

# Rapport Recherche

2009



**METEO FRANCE**  
Toujours un temps d'avance



# Rapport Recherche 2009



# Sommaire

---

## **Modèles pour la prévision du temps** ● page 6

Prévision numérique synoptique  
Assimilation de données  
Prévision cyclonique  
Prévision immédiate

## **Études des phénomènes météorologiques** ● page 16

De la petite échelle à l'échelle synoptique  
Études du brouillard

## **Valorisation de la campagne Amma** ● page 22

## **Étude du climat et du changement climatique** ● page 26

Études du changement climatique  
Impacts du changement climatique et stratégies d'adaptation

## **Études environnementales liées à l'atmosphère** ● page 36

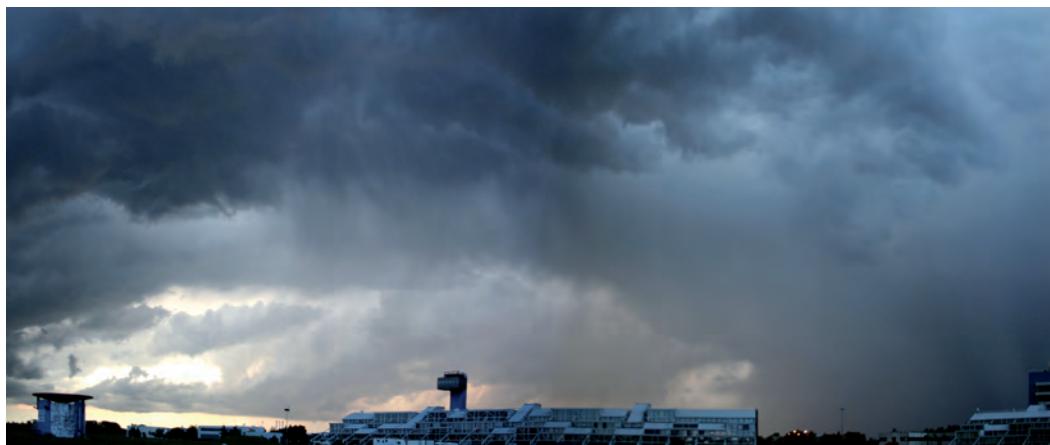
Hydrométéorologie  
Océanographie (modélisation et instrumentation)  
Chimie atmosphérique et qualité de l'air  
Étude du manteau neigeux et des avalanches

## **Instrumentation** ● page 44

Instrumentation aéroportée  
Instrumentation *in situ* – télédétection

## **Coordination, communication et valorisation** ● page 50

## **Annexes** ● page 54

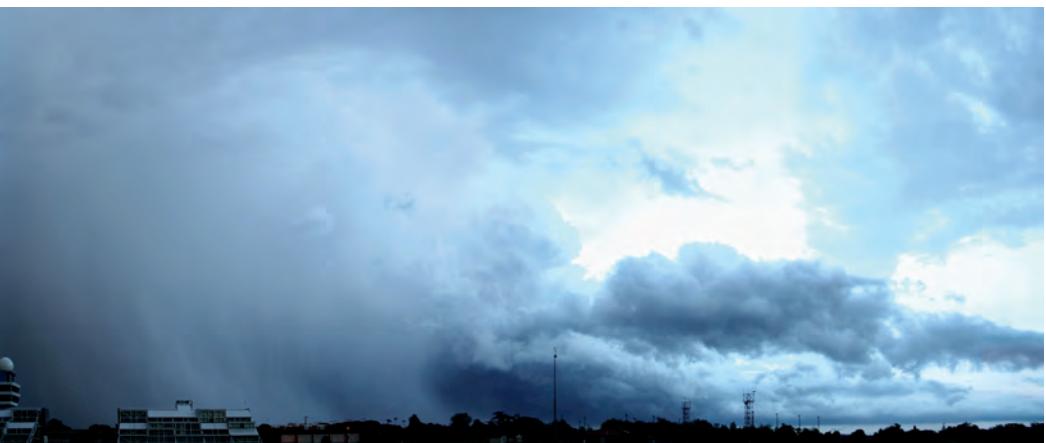


En prenant mes fonctions de Directeur de la Recherche au printemps 2009, j'ai retrouvé un CNRM bien différent de celui que j'avais quitté il y a six ans. Le contexte de la recherche en France est en évolution rapide, avec la montée en puissance des Universités, la création de l'ANR, et l'augmentation des financements contractuels de toutes origines sur l'adaptation au Changement Climatique. Les secteurs de l'Aéronautique et de la Défense expriment des besoins plus précis et plus pressants, qui contribuent à leur tour à déterminer l'agenda de la recherche. Du côté des laboratoires, nous avons maintenant trois unités associées au CNRS (le GAME, SAFIRE et le LACy), la première atteignant une taille respectable, et passant à un stade nouveau de son développement avec la création d'un Conseil de Laboratoire et l'intégration d'un « processus recherche » dans le système qualité de Météo-France.

Clairement la société actuelle demande plus à la recherche météorologique, et lui offre aussi plus de ressources, mais en ordre dispersé. De nouvelles méthodes de travail doivent nous aider à garder les directions stratégiques essentielles malgré la multiplicité des sollicitations. Je rends hommage à mes prédécesseurs, Daniel Cariolle et Eric Brun, pour avoir su mettre en place des structures solides qui permettent un pilotage stratégique précis.

Les résultats atteints en 2009 illustrent bien cette réussite : en prévision numé-

rique du temps, les nouvelles configurations des systèmes ARPEGE, ALADIN et AROME, prêtes à entrer en service opérationnel début 2010, assurent un progrès net en qualité, et tireront pleinement parti de la nouvelle augmentation de puissance de calcul. L'utilisation des observations des satellites météorologiques progresse rapidement. La coopération du CNRM avec le CNES, EUMETSAT et l'ESA est également croissante, comme en témoigne notre engagement sur les projets IASI, SMOS, AEOLUS, PREMIER, CoreH2O, POGEQA, et dans plusieurs SAF. En climat, une nouvelle version du modèle de Système Terre a été préparée pour assurer nos contributions au 5<sup>e</sup> rapport du GIEC. Des discussions ont démarré avec l'IPSL concernant un meilleur partage de l'infrastructure de modélisation. Le CNRM contribue à l'offre de Météo-France sur l'adaptation au Changement Climatique par de multiples projets en partenariat avec des secteurs d'application, comme l'hydrologie, l'urbanisme, l'agriculture. L'exploitation des mesures réalisées pendant la campagne AMMA conduit à de multiples publications, et la Conférence Internationale organisée à Ouagadougou en juillet a rassemblé 500 chercheurs de tous pays et disciplines. La structuration du programme HYMEX sur le bilan de l'eau et les pluies intenses en Méditerranée et son intégration dans le grand chantier sur l'habitabilité du bassin Méditerranéen se poursuivent régulièrement.



© Camille Luxen

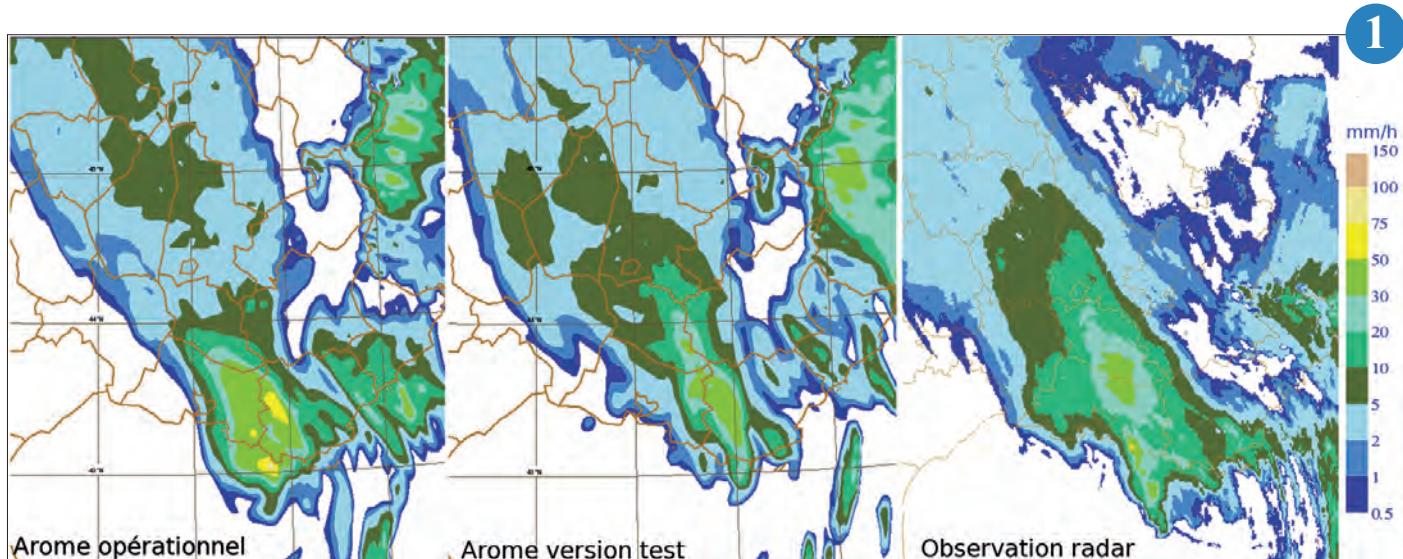


Philippe Bougeault, Directeur de la Recherche à Météo-France,  
lors de son interview en direct sur France 3  
à l'occasion de la Nuit des Chercheurs,  
le 25 septembre 2009.  
(Photo : Ph Dos, Météo-France)

# Modèles pour la prévision du temps

La recherche en prévision numérique vise l'amélioration des prévisions météorologiques et la conception de nouveaux outils, au moyen de systèmes numériques de modélisation de l'atmosphère, configurables pour de multiples applications : ARPEGE à l'échelle globale, ALADIN et AROME pour les prévisions fines régionales, et un système d'assimilation et de prévision d'ensemble pour la prévision probabiliste. En 2009, les paramétrisations physiques du modèle ARPEGE ont été modernisées : introduction d'un schéma de turbulence pronostique, d'une nouvelle représentation de la convection peu profonde et des interactions océan/atmosphère, ce qui a fortement amélioré la modélisation des basses couches. L'utilisation des radiances satellitaires dans l'assimilation a progressé, avec une meilleure utilisation des données Metop/IASI et Aqua/AIRS, grâce aux recherches effectuées sur l'assimilation des radiances en présence de nuages. Ces travaux ont significativement amélioré les performances des prévisions ARPEGE, mesurables par les scores des prévisions, et par des études de la tempête du 24 janvier 2009. ALADIN et AROME en ont aussi profité, ils ont de plus bénéficié d'une nouvelle assimilation régionale des surfaces (état des sols et température de surface de la mer).

L'étape suivante est l'adaptation des logiciels au nouveau supercalculateur NEC SX9, qui offre une puissance de calcul accrue. Cela permet des augmentations importantes de résolution de tous les systèmes numériques, et de nouveaux perfectionnements scientifiques, parmi lesquels on notera l'assimilation des réflectivités radar dans Arome, suivant une technique originale d'inversion bayésienne de ces observations de précipitation, qui place Météo-France parmi les meilleurs centres utilisateurs d'observation radar au monde. Des développements ont été accomplis sur l'élaboration des produits de prévision des rafales de vents, particulièrement importants lors des tempêtes. Ces nouvelles versions d'ARPEGE, ALADIN et AROME seront en production opérationnelle début 2010. En parallèle, le système de prévision d'ensemble progresse afin de fournir de meilleures informations probabilistes à courte échéance sur la métropole. 1



▲ Précipitations cumulées sur 3 heures (en mm), prévues le 16 septembre 2009 à 6 h TU par des prévisions à 6 h d'échéance du modèle AROME opérationnel (gauche), AROME en nouvelle version pré-opérationnelle fin 2009 (milieu), et estimation des précipitations par les radars sur la métropole (droite). La nouvelle version d'AROME fait mieux à la fois qu'ARPEGE et que l'ancienne version d'AROME, en délimitant mieux les zones de fortes précipitations, par exemple sur la Côte d'Azur.

La recherche amont autour de la prévision numérique se concentre sur diverses spécialités scientifiques. Elles concernent (1) les techniques d'assimilation de données, où l'on priviliege la modélisation des structures d'erreur, les phénomènes précipitants et la très haute résolution, l'optimisation des réseaux d'observation ; (2) l'étude des tempêtes et épisodes de précipitations à fort impact, en relation avec la dynamique atmosphérique à grande échelle ; (3) l'extension de l'utilisation des données satellitaires en conditions nuageuses, précipitantes, et sur les régions continentales ; (4) l'optimisation des performances des modèles à très haute résolution. Ces travaux sont menés en contact avec la communauté scientifique nationale et internationale, et s'intègrent à de grands projets de recherche inter-organismes tels qu'Hymex, AMMA, Concordiasi, Thorpex-Tnawdex, SESAR, PCRD7 et sont cohérents avec les objectifs de la Défense Nationale. Les coopérations européennes menées avec le CEPMMT et les groupes ALADIN et HIRLAM, complètent ces travaux et permettent le développement mutualisé de la prévision numérique.

# Prévision numérique synoptique

## De nouvelles versions pré-opérationnelles des modèles ARPEGE et AROME

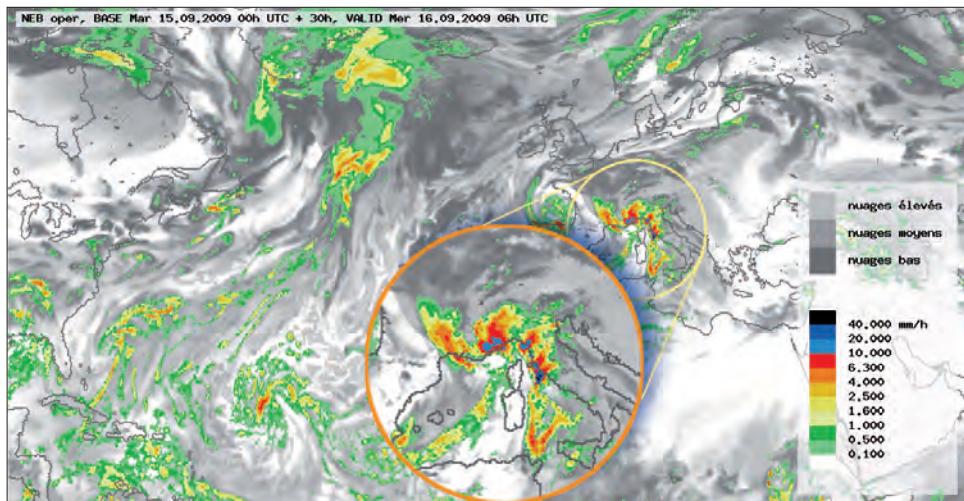
L'extension du supercalculateur NEC/SX9 va permettre une évolution majeure des modèles ARPEGE et AROME utilisés pour la prévision opérationnelle du temps à Météo-France.

L'assimilation 4D-Var sur laquelle repose l'initialisation du modèle global ARPEGE est sensiblement améliorée avec un accroissement de la résolution des incrément d'analyse (60km au lieu de 90km), de la densité horizontale des observations satellitaires assimilées, et l'assimilation de nouveaux canaux IASI (vapeur d'eau et surface) et AMSU-B (humidité basse troposphère sur terres). La caractérisation des statistiques

d'erreur de prévision et d'observations bénéficie des évolutions de l'ensemble d'assimilation, dont le passage en 4D-Var. La résolution spatiale du modèle ARPEGE est augmentée avec l'utilisation de 70 niveaux verticaux et une maille horizontale variant de 10 km sur la France à 60 km aux antipodes. Cette configuration permet d'envisager un couplage direct avec le modèle méso-échelle AROME pour une simplification de la chaîne opérationnelle et de son exploitation par les prévisionnistes. Les reflectivités des radars du réseau français ARAMIS sont assimilées dans l'analyse 3D-Var du modèle AROME, concrétisant

ainsi plusieurs travaux de recherche et développement sur le pré-traitement et l'assimilation de ces observations. La résolution verticale du modèle AROME est nettement accrue, notamment dans la couche limite avec quasiment un doublement du nombre de niveaux verticaux, 27 dans les 3 000 premiers mètres. La représentation des processus physiques est améliorée au niveau du calcul de l'ascendance convective dans le schéma de convection peu profonde et par la prise en compte de la vitesse de sédimentation des gouttelettes nuageuses, importante pour la prévision du brouillard.

2



2

Précipitations en surface cumulées sur 1 h (en mm) et nébulosités instantanées basse, moyenne, haute (plages grisées) prévues le 16 septembre 2009 à 6 h TU par une prévision à 30 h d'échéance réalisée avec la version pré-opérationnelle du modèle ARPEGE.

## Vers une mise en œuvre des systèmes Aladin pour l'Outremer

Météo-France souhaite se doter de systèmes de prévision numérique régionale pour chaque direction d'Outre-mer. La configuration cible sera un modèle Aladin avec assimilation 3DVAR, à l'image de ce qui se fait à la Réunion. Ainsi, la Nouvelle-Calédonie, la Polynésie et les Antilles-Guyanes bénéficieront pour les prévisions courte échéance de sorties Aladin à une résolution horizontale de 8 km, avec 70 niveaux verticaux sur leurs domaines respectifs.

En 2009, des tests ont été effectués en adaptation dynamique avec Arpège dans sa version 70 niveaux. Ils ont permis d'affiner le choix des domaines pour le Pacifique, de valider l'utilisation du schéma de surface SURFEX et d'apprecier les améliorations sur les régions tropicales apportées par les nouvelles paramétrisations physiques, opérationnelles dans nos modèles depuis février 2009. La figure jointe illustre une prévision de fortes précipitations sur la Nouvelle-Calédonie.

Compte-tenu des performances des modèles globaux sur les régions tropicales, le choix du modèle coupleur s'est porté sur IFS (du CEPMMT), dont la résolution atteint maintenant 16 km environ. L'utilisation d'IFS imposera toutefois un couplage asynchrone en raison des contraintes des délais de production. Quant au couplage de la surface, il s'effectuera avec les sorties du modèle Arpège. La mise en place de l'assimilation de données dans les configurations Aladin Outremer devra aboutir à un mode opératoire simplifié afin de faire des configurations « portables ». Pour chaque domaine, il faut calculer la matrice de covariance des erreurs d'ébauche. Le but recherché est l'automatisation de ce calcul nécessaire à l'assimilation 3DVAR.

L'évaluation des Aladin OM tels que décrits ci-dessus devrait débuter au printemps 2010 et leur mise en opérationnel est prévue pour début 2011.

3

## Estimation des incertitudes des prévisions : PEARP, une prévision d'ensemble à l'état de l'art

La Prévision d'Ensemble ARPEGE (PEARP), est le système de prévision d'ensemble de Météo-France, à la fois global et de meso-échelle sur l'Europe. Il vise à fournir des prévisions probabilistes optimisées pour la courte échéance.

Au cours de l'année 2009, une importante évolution de PEARP a été menée à bien et évaluée. Celle-ci a pour objectif de mieux quantifier les sources d'incertitude inhérentes à toute prévision météorologique. Un couplage à l'ensemble d'assimilations ARPEGE (évoqué page 10) a été mis en œuvre de façon à mieux prendre en compte l'incertitude sur l'état initial des prévisions. L'utilisation de différents jeux de paramétrisations physiques permet de tenir compte de l'incertitude sur la modélisation de l'atmosphère. Enfin, une augmentation significative de la taille de l'ensemble (passage de 11 à 35 membres) devrait améliorer la prévision des phénomènes peu fréquents. Une première évaluation montre que ces modifications ont un effet bénéfique sur l'ensemble des scores de validation probabiliste.

Le passage en opérationnel de cette nouvelle version de PEARP a été réalisée en décembre 2009 et une expérimentation de son utilisation par les prévisionnistes est prévue au cours de l'hiver 2009-2010. D'autres évolutions, comme le passage à une résolution horizontale comprise entre 15 et 10 km sur la France, sont envisagées en 2010. PEARP et l'EPS du Centre Européen de Reading sont les principales sources d'information sur les incertitudes des prévisions à courte et moyenne échéance dont l'utilisation plus extensive est l'objet du projet PREVIPROB.

4

## Vers la mise en place d'une chaîne de prévision probabiliste

Le projet PREVIPROB a été lancé au début de l'année 2009 pour une durée de trois ans. Il a pour but de mettre en place une chaîne de production de prévisions probabilistes dès la courte échéance. Pour cela des outils seront développés en aval des systèmes de prévision d'ensemble.

D'une part, des couplages d'applications (modèle hydrologique, modèle de surcotes, modèles de suivi de pollution marine ou environnementale, ...) seront mis en place sur les systèmes de prévision d'ensemble, notamment la PEARP. Il sera ainsi possible de réaliser des prévisions probabilistes pour la détection et le suivi de risques spécifiques (inondations, feux de forêt, pollution) par la modélisation des incertitudes liées à ces prévisions.

D'autre part, des post-traitements permettront de produire des distributions probabilistes prévues de façon optimale, à la fois pour les systèmes de prévision d'ensemble et pour les modèles déterministes. Ces post-traitements mettent en œuvre des techniques statistiques utilisant des lois paramétriques de probabilités adaptées à chaque variable météorologique : loi normale pour les températures, loi gamma pour les précipitations, loi de weibull pour le vent et loi bêta pour la nébulosité et l'humidité (voir figure).

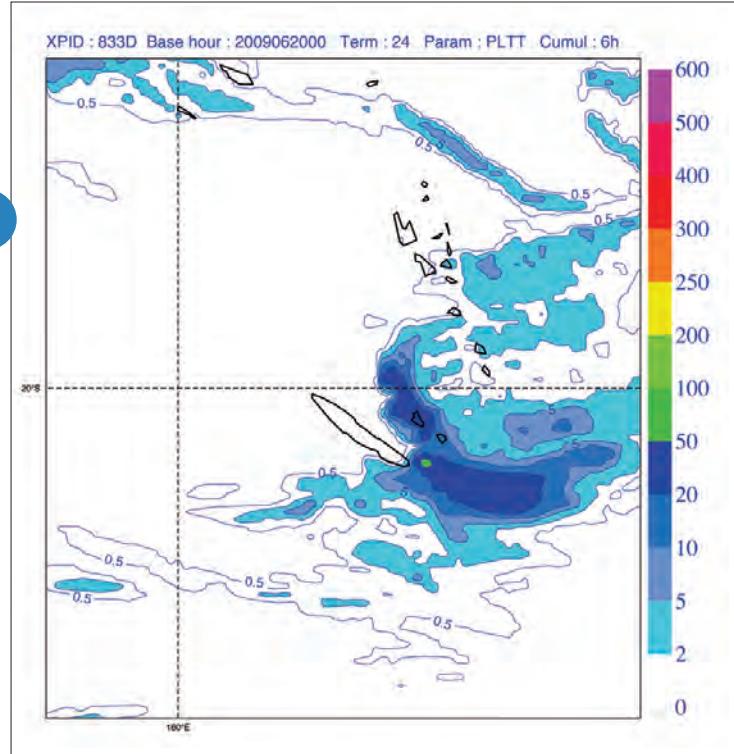
Enfin, des études orientées sur l'aide décisionnelle permettront d'utiliser les prévisions probabilistes en analysant les besoins de l'utilisateur final par des modèles de type coûts/pertes.

Le projet s'accompagnera également de développements de produits de visualisation, de méthodologies d'utilisation, de contrôles et de formation et débouchera sur la mise en place d'une chaîne de production de prévisions probabilistes.

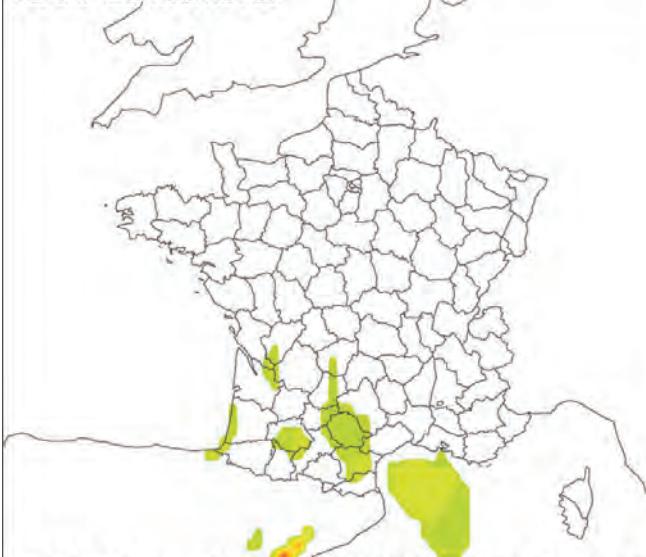
5

3

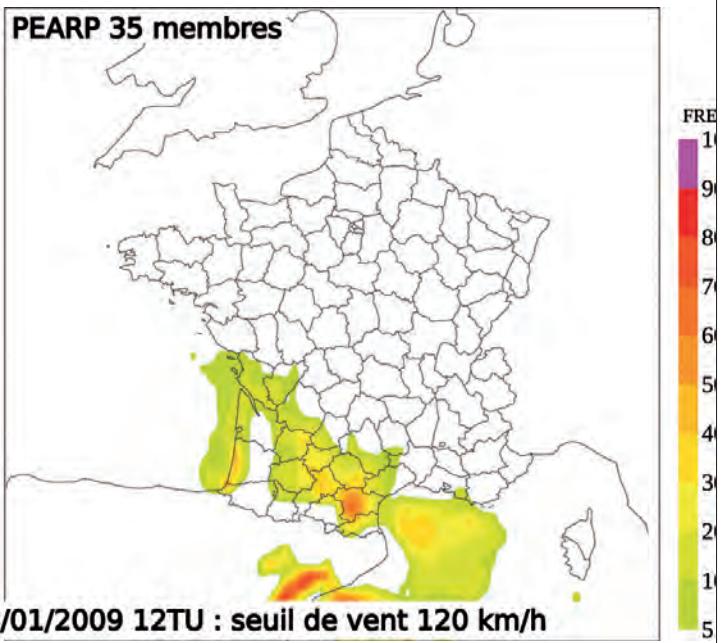
► Cumul de précipitations sur 6 heures d'une prévision Aladin à échéance 24 h pour le 21 juin 2009 sur le domaine Nouvelle-Calédonie.



**PEARP 11 membres**



**PEARP 35 membres**



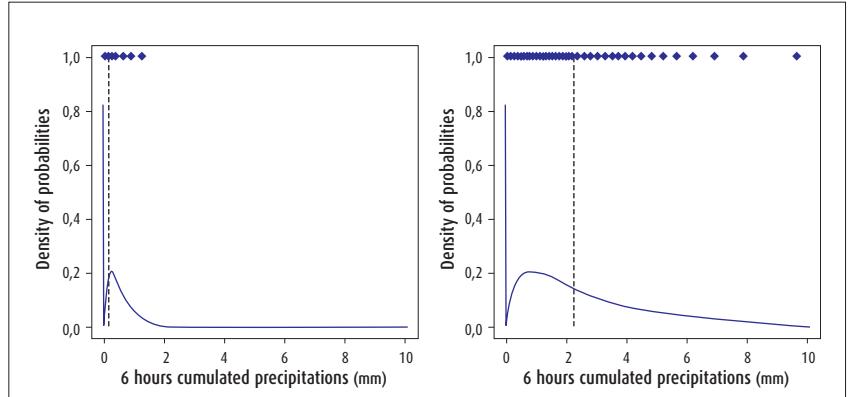
**prévision du 22/01/2009 18TU valide pour le 24/01/2009 12TU : seuil de vent 120 km/h**

4

► Sur le cas de la tempête du 24 janvier 2009, on s'intéresse au risque de fortes rafales de vent (valeurs supérieures à 120 km/h) pour le début d'après-midi. A gauche, la fréquence de dépassement du seuil prévu par la version opérationnelle de PEARP, à droite celle prévue par la nouvelle version bénéficiant des avancées décrites dans le texte. La nouvelle version de PEARP permet de mieux anticiper le phénomène avec des fréquences prévues plus élevées et mieux situées.

5

► Fonction de densité des probabilités discrète et continue pour les précipitations prévues. Prévision de quantités de précipitations du 09/02/2006 à 12 h pour Bordeaux, à l'échéance 48 h (cas de non pluie) à gauche. Prévision de quantités de précipitations du 01/03/2006 à 12 h pour Bordeaux, à l'échéance 48 h (cas de pluie) à droite.



# Assimilation de données

## Mise en œuvre d'une assimilation d'ensemble en 4D Var

L'assimilation de données repose sur une caractérisation statistique des erreurs de prévision. Il s'agit en particulier de spécifier les amplitudes attendues de ces erreurs (décrites par des variances), qui dépendent de la situation météorologique.

Dans ce contexte, une assimilation d'ensemble est mise en œuvre de façon opérationnelle, sur la base de six assimilations perturbées. La dispersion d'un tel ensemble permet d'estimer la dynamique spatio-temporelle des variances d'erreur de prévision. Par ailleurs, une version 4D de cette assimilation d'ensemble a été expérimentée, de façon à mieux simuler les erreurs du système 4D-Var.

Cela est illustré par les figures a et b, qui correspondent à un cas de tempête sur la France, le 24 janvier 2009. La variabilité géographique des variances s'est avérée plus réaliste en mode 4D (figure a) que dans la

version 3D (figure b), avec notamment un maximum plus marqué et mieux localisé sur la France, en accord avec la forte incertitude associée à ce type de système météorologique intense.

La supériorité de l'assimilation d'ensemble 4D a été confirmée par des comparaisons avec les écarts entre observations et prévisions, ainsi que par des études sur l'impact des variances, issues de l'ensemble, sur la qualité des prévisions. Le surcoût associé s'est avéré également modéré, et compatible avec l'augmentation de puissance de calcul en cours.

Il est prévu d'étendre l'utilisation des écarts entre observations et prévisions, pour estimer les contributions de l'erreur de modèle (à distinguer des erreurs dues aux conditions initiales). Cela permettra d'estimer de façon objective cette composante d'erreur, qui est mal connue à l'heure actuelle.

6

## Impact des sondeurs infrarouges hyperspectraux en prévision numérique du temps

IASI et AIRS, à bord des satellites européen MetOp et américain Aqua, sont des sondeurs hyperspectraux infrarouges qui mesurent des milliers de canaux par profil. Ils sont utilisés en opérationnel dans le modèle global ARPEGE et dans le modèle régional ALADIN depuis 2006 pour AIRS et 2008 pour IASI.

Comme le spectre infrarouge est affecté par la présence de nuages, leur détection et leur caractérisation sont primordiales. Dans un premier temps, seuls les canaux clairs ont été assimilés. Pour prendre en compte les effets des nuages, la pression de sommet des nuages et l'émissivité déduites des observations en chaque point de mesure sont utilisées en entrée du système pour assimiler les canaux nuageux. Ceci a été évalué pour AIRS et a apporté une augmentation du nombre de données assimilées et un impact positif sur les prévisions. Des développements similaires sont en cours pour IASI.

Dans le modèle global, assimiler 4 fois plus de données, en passant d'une donnée tous les 250 km à une tous les 125 km, améliore les prévisions pour toutes les échéances et toutes les variables, comme le vent et le géopotentiel, particulièrement sur l'hémisphère sud. Les données IASI et AIRS sont également assimilées à haute densité dans le modèle de méso-échelle AROME. Malgré une couverture temporelle plutôt faible du domaine, les données ont un impact positif sur les champs de surface et d'altitude pour toutes les échéances jusqu'à 30 heures. Les prévisions de pluie, un point clé d'AROME, ont aussi été améliorées.

Les prochaines étapes seront la caractérisation des propriétés de la surface pour perfectionner l'assimilation des sondeurs infrarouges sur terre.

8

## Assimilation des réflectivités radar dans Arome

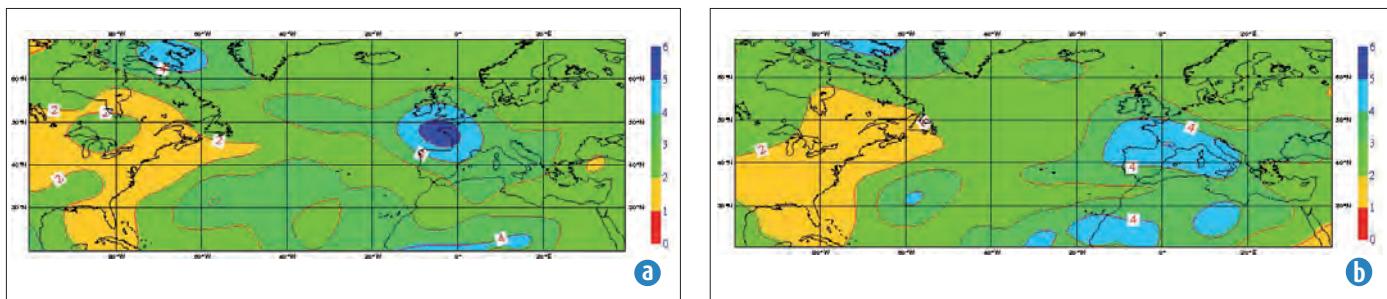
Au travers des études de systèmes précipitants, les essais d'assimilation dans le modèle AROME des réflectivités du réseau national de radars volumiques ARAMIS ont montré une meilleure description qualitative et quantitative des prévisions de précipitations à courte échéance, notamment en cas de bon échantillonnage vertical de l'atmosphère.

La méthode utilisée inverse au préalable les réflectivités radar en profils d'humidité relative, qui sont alors fournis à l'assimilation. L'avantage d'assimiler des profils est d'utiliser le maximum d'informations verticales exploitable fournies par les radars volumiques. La méthode a aussi l'avantage de pouvoir utiliser à la fois le signal précipitant et non-précipitant des observations et de pouvoir ainsi créer des précipitations ou assécher le modèle selon les cas. Sur la figure a, on peut voir l'impact sur une analyse d'humidité de l'assimilation de réflectivités d'altitude (pluie n'atteignant pas le sol). On constate une propagation de l'information cohérente avec les échelles spatiales observées.

L'assimilation des réflectivités est maintenant évaluée de façon systématique depuis la fin de l'année 2008, sur la base de don-

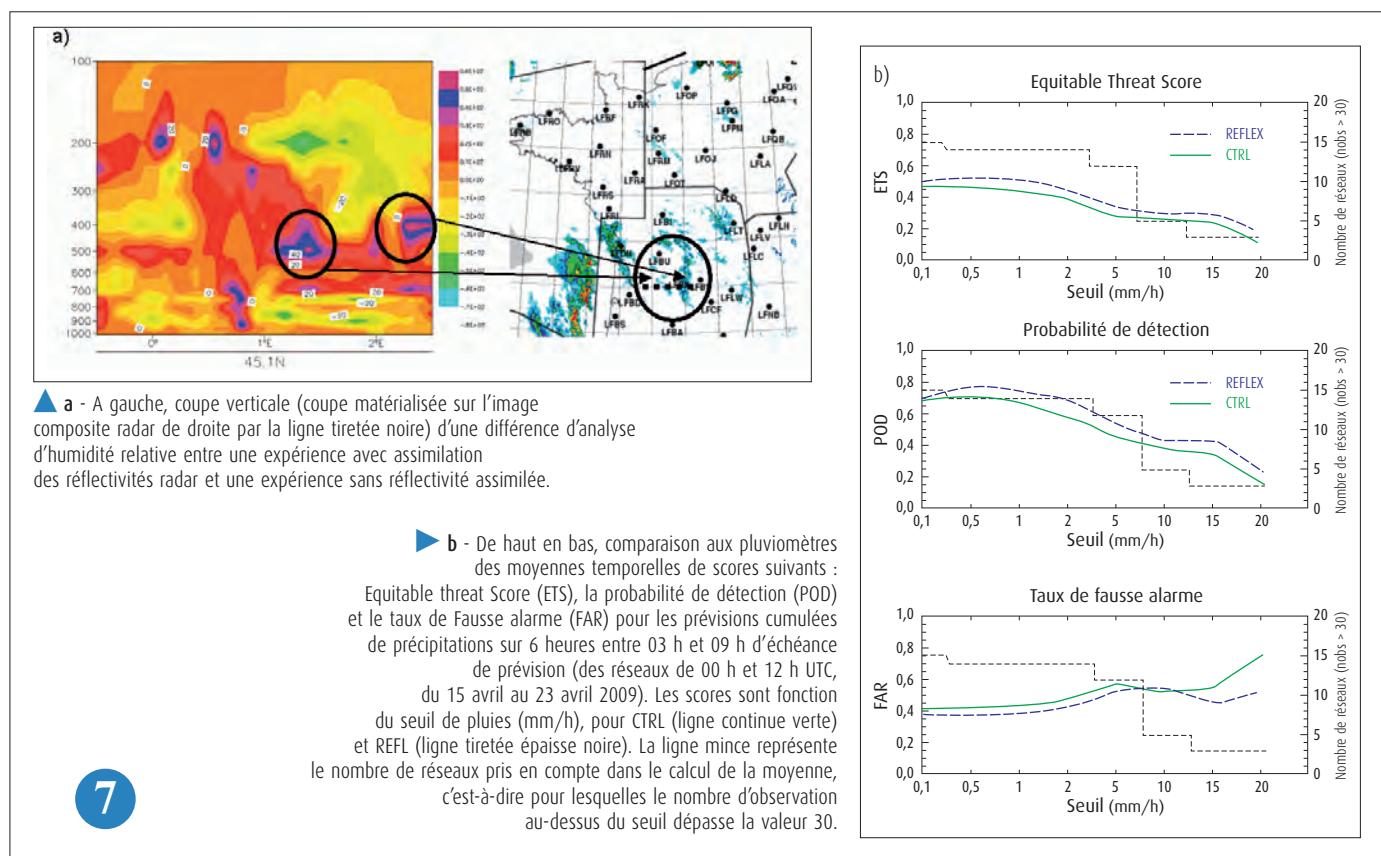
nées provenant d'un produit radar optimisé pour Arome (vent Doppler et réflectivité). Les données des 24 radars du réseau sont assimilées mais en n'intégrant ni les faibles réflectivités de la basse troposphère (susceptibles d'être de la propagation anormale non identifiée), ni les plus basses élévations dont le faisceau est fortement masqué par le relief. L'évaluation régulière de cette assimilation a montré des résultats positifs permettant d'envisager une intégration opérationnelle. Ces résultats impactent surtout le cycle hydrologique du modèle à courte échéance, l'impact positif de l'expérience avec assimilation des réflectivités (REFL) par rapport à une expérience sans réflectivités (CTRL) en terme de scores de prévisions de précipitations apparaît nettement sur la figure b. Une amélioration des scores de prévision d'autres paramètres du modèle (comme le « vent » par exemple) sur de longues périodes a également été observée.

7



6

► Cartes des écarts types des erreurs de prévision pour le vent zonal (unité :  $\text{ms}^{-1}$ ) vers 500 hPa, le 24 janvier 2009, estimés à l'aide de deux versions de l'assimilation d'ensemble. (a) : écarts types issus d'une assimilation d'ensemble 4D ; (b) : écarts types issus d'une assimilation d'ensemble 3D.

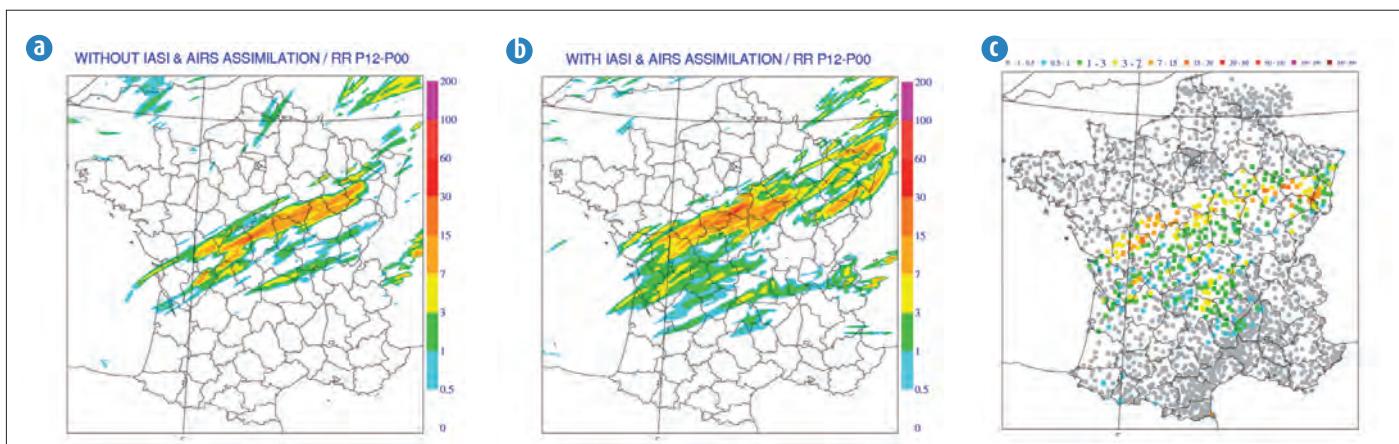


7

► b - De haut en bas, comparaison aux pluviomètres des moyennes temporelles de scores suivants : Equitable threat Score (ETS), la probabilité de détection (POD) et le taux de Fausse alarme (FAR) pour les prévisions cumulées de précipitations sur 6 heures entre 03 h et 09 h d'échéance de prévision (des réseaux de 0 h et 12 h UTC, du 15 avril au 23 avril 2009). Les scores sont fonction du seuil de pluies ( $\text{mm}/\text{h}$ ), pour CTRL (ligne continue verte) et REFLEX (ligne tiretée épaisse noire). La ligne mince représente le nombre de réseaux pris en compte dans le calcul de la moyenne, c'est-à-dire pour lesquelles le nombre d'observation au-dessus du seuil dépasse la valeur 30.

8

▼ Précipitations cumulées sur 12 h telles que prévues par AROME sans assimilation de données AIRS & IASI (a) et avec assimilation des données AIRS & IASI (b), à comparer avec les mesures de pluviomètres (c), pour la période comprise entre 0 h et 12 h UTC le 21 mai 2009.



## Validation des profils d'humidité restitués avec IASI à partir de l'expérience Jaivex

Les fluctuations des profils d'humidité sont actuellement mal restituées dans l'assimilation des données des satellites. La campagne JAIVEX réalisée pendant la phase de validation du satellite METOP a fourni un jeu de grande qualité d'observations IASI coregistrées à plusieurs dropsondes.

Les situations claires sur mer (25 observations) ont permis d'améliorer la restitution des profils d'humidité. Nous avons pris comme référence (cas A sur la figure) les 178 canaux utilisés par le CEPMMT et leurs deux matrices d'erreur d'observations et de background. Nous avons évalué l'impact d'une matrice d'erreur d'observations plus précise et d'une sélection dynamique de 150 canaux dans le jeu de 366 canaux

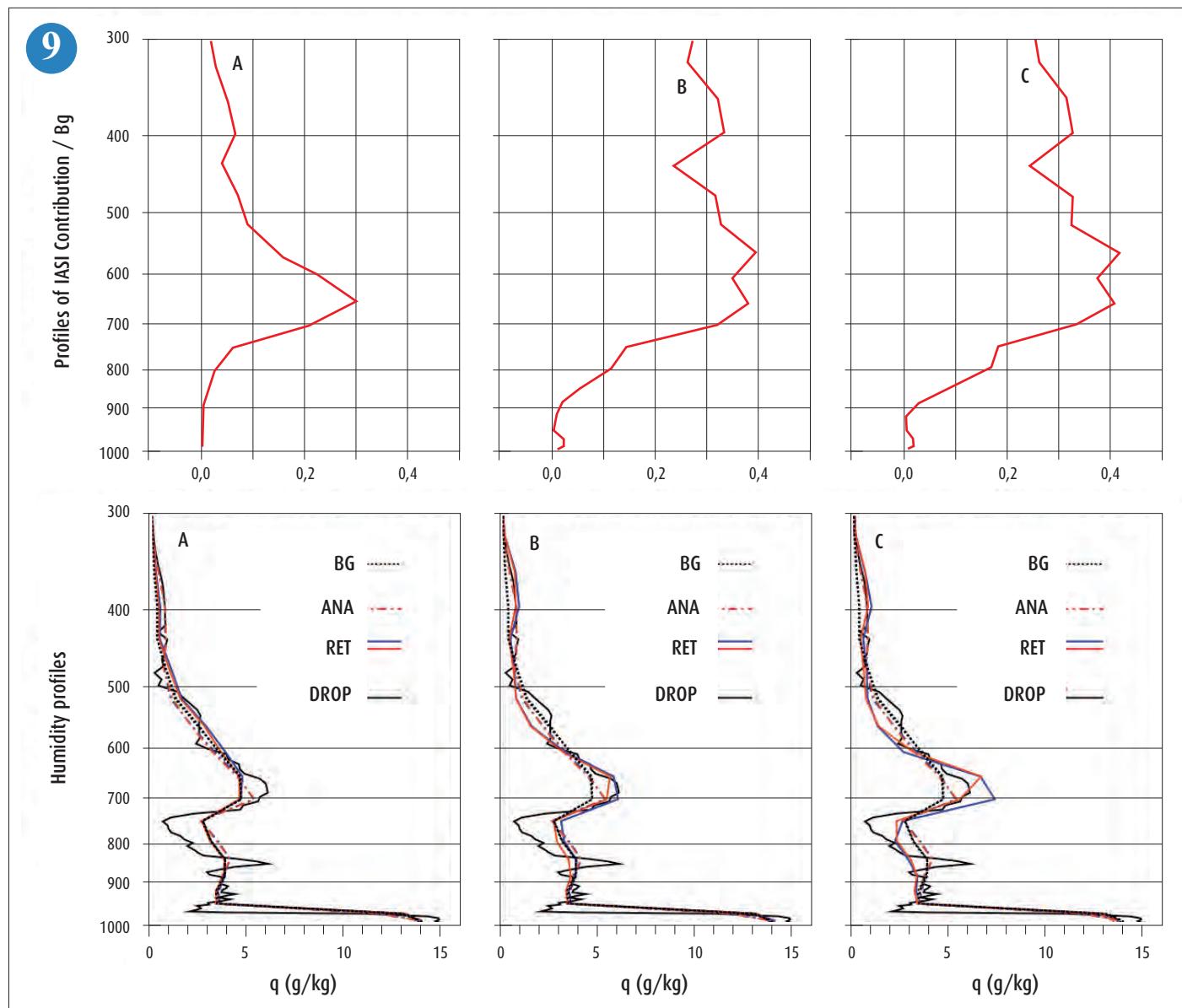
sélectionnés avant lancement du satellite et diffusés sur le GTS (cas B) et dans un jeu de 1 700 canaux sensibles uniquement à la température et à l'humidité (cas C). L'amélioration des profils restitués est estimée par une meilleure cohérence avec le profil de la dropsonde, des résidus observés – calculés plus faibles sur tout le spectre –, une contribution d'information plus grande de IASI dans l'inversion et une résolution verticale plus fine.

La figure montre les résultats pour une situation claire proche d'une masse nuageuse (29/04/2007) avec une forte fluctuation d'humidité très mal représentée par la prévision. Les conditions de référence ne permettent pas de quitter la prévision : les

fluctuations ne sont pas restituées par l'inversion et très peu d'information vient de IASI. Les expériences B et C améliorent de manière significative le profil restitué ainsi que l'apport de IASI dans l'inversion.

Ce travail va se poursuivre avec le traitement des cas sur terre et par une augmentation du nombre de niveaux verticaux de pression pris en compte.

9



▲ Apport de l'information de IASI par rapport à celle du profil d'initialisation sur les niveaux de l'inversion (figures du haut) et profils d'humidité correspondants (figures du bas). La courbe noire montre le profil de la dropsonde, les courbes en trait continu les restitutions du profil à partir de 2 spots IASI à 14 km (rouge) et 26 km (bleu) et à 10 minutes du lâcher de la dropsonde. La courbe en pointillés fins correspond à la prévision (background) et la courbe en traits-pointillés à l'analyse la plus proche.

# Prévision cyclonique

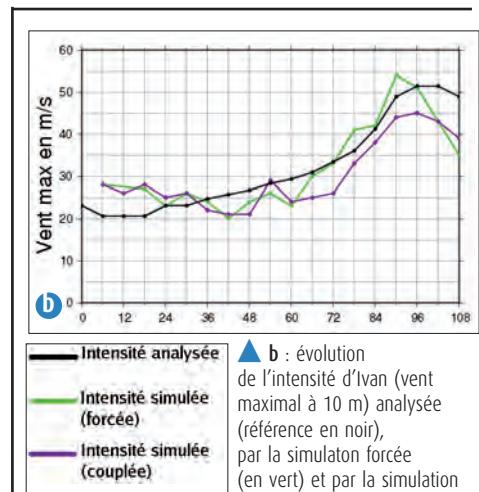
## Analyse de l'interaction du cyclone tropical Ivan (2008) avec l'océan

Les cyclones tropicaux puisent la majeure partie de leur énergie dans les couches superficielles de l'océan. Pour qu'un cyclone se développe, il faut que la température de l'océan soit supérieure à 26 °C sur une hauteur d'eau moins 30 m. En premier lieu, les vents du cyclones extraient de l'énergie à l'océan par les flux de surface, ce qui en retour intensifie les vents du cyclone. Mais ils génèrent aussi des effets dynamiques sur les couches superficielles de l'océan, qui peuvent affecter la température de surface de la mer (TSM). Ainsi, les interactions sont particulièrement complexes. De plus, mieux comprendre les mécanismes d'interaction entre les cyclones et l'océan est crucial pour faire progresser les prévisions d'intensité des cyclones.

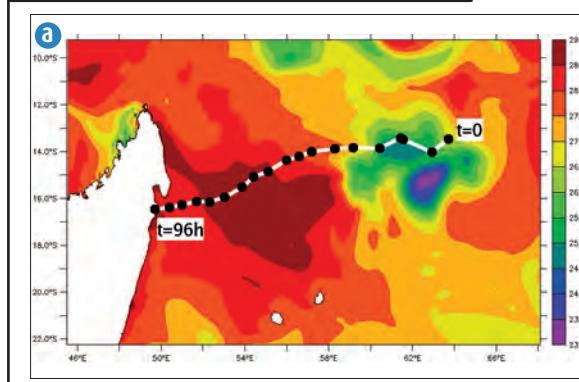
La figure jointe présente l'étude du cyclone tropical Ivan (Sud-Ouest de l'Océan Indien, 2008) et de son interaction avec l'océan lors de son passage d'une région de TSM froide à une TSM chaude. Deux simulations entre les instants  $t=0$  et  $t=96\text{ h}$  ont été effectuées à l'aide du modèle à haute résolution Meso-NH. La première simulation (forcée) dispose en surface du champ de TSM fixé au cours du temps. La seconde simulation (couplée) permet l'évolution de la TSM grâce

au couplage de Meso-NH à un modèle océanique en surface, capable de représenter l'évolution des colonnes d'eau. On voit que la simulation couplée intensifie moins le cyclone que la simulation forcée, qui représente des taux d'intensification trop forts. Une étude plus fine a permis d'analyser les processus qui sont responsables des différences entre les deux simulations. A l'avenir, ce type de modèle couplé sera mis en place pour la prévision opérationnelle des cyclones tropicaux.

10



10



## Les performances du modèle Aladin-Réunion sur le cas du cyclone Gael (2009)

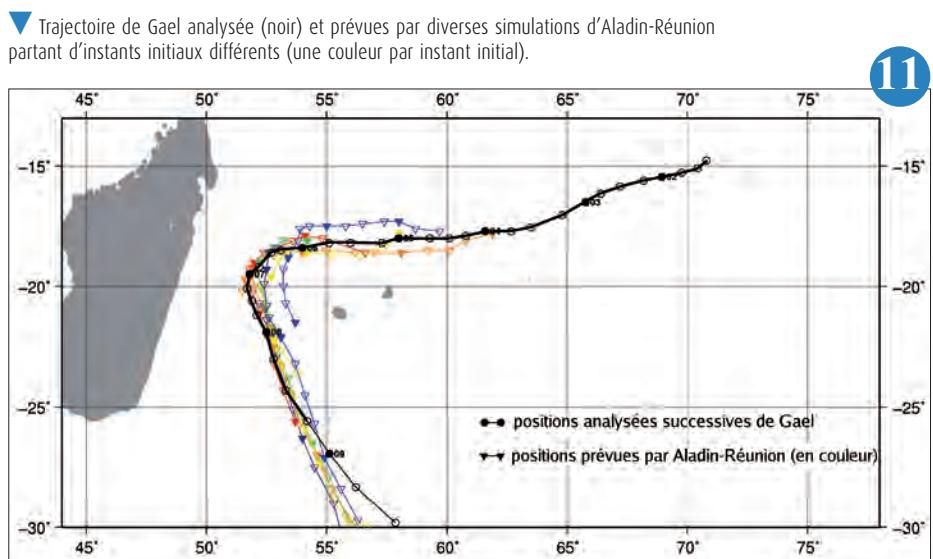
Le modèle Aladin-Réunion est un modèle à aire limitée qui couvre le Sud-Ouest de l'Océan Indien avec une maille de 10 km. Ce modèle opérationnel continue à évoluer afin notamment de faire progresser la prévision de la trajectoire et de l'intensité des cyclones tropicaux.

En 2009, Aladin-Réunion a vu une refonte de certaines de ses paramétrisations physiques, avec en particulier l'intégration d'une nouvelle paramétrisation des flux de surface entre l'air et la mer. L'intérêt principal du modèle réside dans sa représentation réaliste de la structure des cyclones, que les modèles globaux ne parviennent pas à atteindre. En prévision de trajectoires, ses performances sont bonnes en moyenne, et parfois excellentes. Ainsi, en février 2009, le cyclone Gael est passé à 400 km au Nord de l'Île de La Réunion avant d'effectuer un recourbement vers le Sud autour de l'Île. Toutes les prévisions d'Aladin à partir du 4 février (figure jointe) présentent un tel recourbement et des trajectoires prévues très proches de la trajectoire réelle. En revanche, les autres modèles ont créé un recourbement plus proche de Madagascar,

voire une trajectoire rectiligne. Pour ce qui concerne l'intensité prévue de Gael, Aladin-Réunion génère cependant un creusement excessif du système.

Le modèle continuera d'évoluer avec une augmentation prochaine de résolution horizontale (8 km) et verticale.

11



# Prévision immédiate

## Le projet Arome-Isba piste

ADP (Aéroports de Paris) et le Bureau d'Etudes et de Climatologie parisien de Météo-France ont convenu de l'utilité de développer un nouveau système nommé ARISP (AROME-ISBA-Piste) de prévisions de températures de pistes spécialement conçu pour les alarmes de gel de piste.

Le concept de base d'un tel système n'est pas nouveau à Météo-France. Le modèle météorologique ARPEGE, interpolé spatialement et temporellement au moyen de l'outil SAFRAN, fournit les intrants météorologiques pour le modèle d'Interface-Sol-Biosphère-Atmosphère (ISBA) qui, connaissant les forçages atmosphériques et les propriétés physiques d'une colonne de sol, sait en faire évoluer les profils d'humidité et de température. Ce schéma est utilisé en opérationnel pour le système SIR (SAFRAN-ISBA-Route) de prévision de températures de routes.

Un nouvel aspect du système actuellement développé est l'utilisation des paramètres du nouveau modèle opérationnel de mésoscalaire AROME en lieu et place de SAFRAN. La résolution horizontale de 2,5 km d'AROME permet des applications à échelle locale de meilleure qualité. De plus, la microphysique originale d'AROME et sa capacité à simuler des nuages réalistes contribuent à fournir de meilleures prévisions du rayonnement infrarouge et visible, composante importante de la température du sol. Des résultats préliminaires comparant ARISP et SIR sont présentés dans la figure.

D'autres particularités sont également ajoutées, comme un réglage d'ISBA propre à chaque profil de piste et l'utilisation d'observations météorologiques pour initialiser les prévisions.

Les premiers essais de ce système ont débuté durant l'hiver 2009-2010 à l'aéroport de Roissy Charles-De-Gaulle et seront étendus à Orly l'hiver suivant.

12

## Caractérisation de la couverture nuageuse par satellite

Le SAFNWC (Satellite Application Facility in support to Nowcasting) fait partie du segment sol d'Eumetsat. Il fournit un logiciel permettant d'extraire, à partir de l'imagerie SEVIRI de MSG, des produits utiles pour la prévision immédiate. Les modules permettant de décrire la couverture nuageuse (type et hauteur de nuages) ont été récemment développés.

Une série d'améliorations a été récemment mise au point. La principale d'entre elles concerne les nuages de basse couche. La détection des brouillards ou stratus a été fortement améliorée à la transition jour/nuit par l'utilisation d'une analyse temporelle et d'un traitement morphologique. De plus, leur confusion avec des nuages d'étage moyen a été réduite par l'utilisation du canal infrarouge à 8.7 µm. Cela est particulièrement important pour une visualisation des types nuageux pour les prévisionnistes, mais aussi en vue de leur utilisation par des méthodes automatiques telles que la cartographie du risque d'occurrence de brume et brouillard, ou l'assimilation des radiances SEVIRI par le modèle à maille fine AROME. La détection diurne des cumulus de petite taille a également été améliorée par l'usage du canal visible à haute résolution (le HRV). Bien que le logiciel SAFNWVC ait été développé pour l'imagerie SEVIRI de MSG, il a été scientifiquement et techniquement adapté par Météo-France, le LMD et le pôle thématique ICARE pour permettre la restitution de paramètres nuageux à partir d'autres satellites géostationnaires tels que GOES ou MTSAT. Le logiciel ainsi modifié est en opération au pôle ICARE en support à la mission franco-indienne Megha-tropique.

13

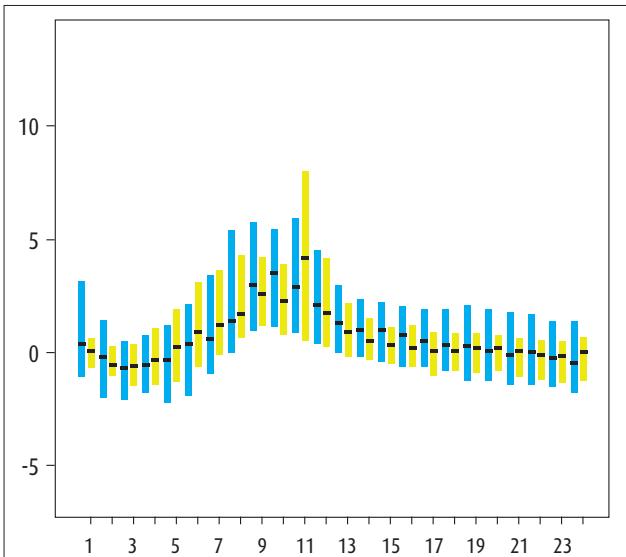
## La détection et le suivi des cellules orageuses au service de l'aéronautique

Le projet FLYSAFE a permis de définir et expérimenter un système d'information météorologique au profit des pilotes. Ce système permet de communiquer en temps réel aux aéronefs la position et l'évolution des risques météorologiques suivants : les orages, le givrage et la turbulence en ciel clair.

Le système d'information des risques d'orage a été développé conjointement par Météo-France et le centre national allemand de recherche pour l'aéronautique et l'espace. Le principe est de compléter la description insitu de l'orage obtenu à partir du radar de bord par une information complémentaire provenant du sol. Pour des raisons évidentes de flux de données et pour faciliter l'intégration du risque dans les systèmes embarqués, la représentation d'un système orageux a été simplifiée afin de fournir une information synthétique au pilote et/ou au processus de fusion de données à bord. Le risque d'orage est donc représenté sous la forme de deux volumes. Le premier volume, défini à partir de l'imagerie radar, permet de représenter les dangers de forte pluie, de grêle et de foudre. Le deuxième volume, défini à partir de l'imagerie satellitaire, caractérise plus particulièrement le sommet des systèmes et notamment les risques de forte turbulence pour l'aviation commerciale.

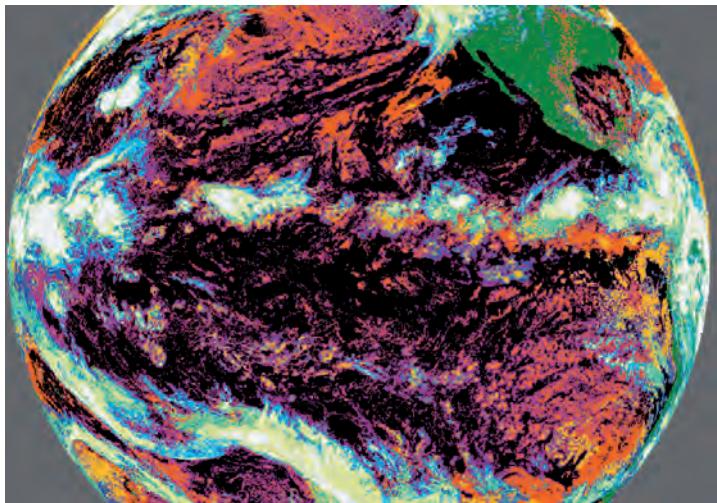
Le système d'information du risque d'orage a été testé dans une configuration simulateur de bord mais également en situation de vol par deux avions de recherche. La complémentarité de cette information avec la donnée radar de bord est démontrée notamment en complétant l'information convective en dehors de la couverture angulaire du radar de bord mais également dans les cas d'atténuation du signal générée par les fortes pluies. Il permet également d'alerter le pilote des zones de déclenchement de la convection avant sa détection par le sensor de bord.

14



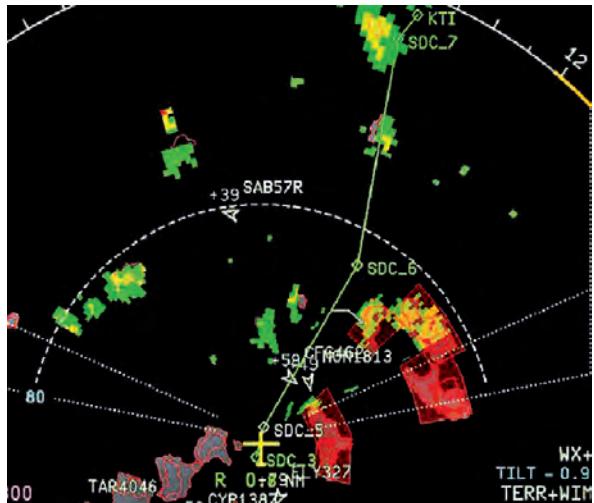
12

◀ Comparaison, au cours d'un cycle diurne, des écarts entre les observations in-situ et les températures prévues par deux systèmes : ARISP (qui utilisait une version expérimentale d'AROME, en jaune) et SIR (en bleu). Le point du bas de chaque barre est le premier quartile, le point du milieu est la médiane et le point du haut est le dernier quartile. Les données ont été recueillies au cours de l'hiver 2007-2008.



13

◀ Exemple de types nuageux extraits de l'imagerie du satellite GOES-11 au-dessus de l'Océan Pacifique en support à la mission Megha-tropique.



14

◀ Superposition entre l'image radar de bord (Image Raster), volumes de risque d'orage du système d'information sol (Polygones), boîtes de risque issues de la fusion de données à bord (Boites Rouges), trajectoire minimisant les risques proposée par le calculateur de bord (Ligne Verte)

# Étude des phénomènes météorologiques

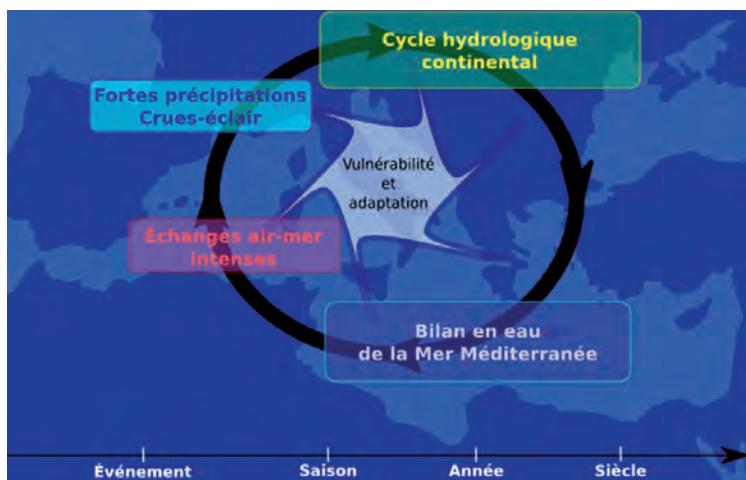
## De la petite échelle à l'échelle synoptique

La compréhension et la modélisation des phénomènes et processus de mésoéchelle ont pour finalité l'amélioration de leurs représentations dans les modèles de prévision numérique du temps et du climat de Météo-France. Les travaux de recherche à moyenne échelle portent sur la convection profonde, les processus microphysiques au sein des systèmes nuageux et précipitants, l'étude des processus et phénomènes de couches limites convective et stable y compris le brouillard, les processus à l'interface surface-atmosphère en considérant différents types de surface (surfaces naturelle et urbanisée, lac, océan) et l'hydrologie continentale.

La fin de l'année 2008 a vu la mise en opérationnel du modèle AROME sur la France, avec l'aboutissement des travaux sur la convergence des paramétrisations physiques MESO-NH/AROME et sur l'assimilation de nouvelles données dans AROME (GPS, radar). Le développement et la validation dans MESO-NH puis AROME d'un nouveau schéma de convection peu profonde (appelé EDKF) a notamment permis de résoudre certains défauts initiaux de la prévision AROME de structures organisées de vents. Des travaux de recherche amont ont aussi été initiés pour préparer l'avenir à moyen terme de la prévision numérique aux échelles kilométriques et sub-kilométriques. On peut citer des travaux prospectifs couplant la prévision d'ensemble PEARP et l'assimilation d'ensemble AROME conduits sur des situations de pluie intense afin de développer une méthodologie pour élaborer une prévision d'ensemble avec le modèle AROME aux échelles kilométriques. Ils sont combinés à des travaux qui visent à définir une prévision d'ensemble des crues rapides avec le système hydrométéorologique ISBA-TOPMODEL. Une analyse des faiblesses et forces des modèles AROME et MESO-NH aux échelles sub-kilométriques est aussi conduite pour préparer les utilisations de ces modèles à ces résolutions aussi bien en recherche qu'en opérationnel. Ces échelles sont particulièrement problématiques pour la représentation de la turbulence, correspondant à la zone dite « grise » pour celle-ci. Une première étude a notamment permis de mettre en évidence les défauts des paramétrisations actuelles de la turbulence dans MESO-NH en les confrontant à des simulations LES. Ces LES sont de plus en plus utilisées, que ce soit pour l'étude du brouillard, l'amélioration des paramétrisations des nuages ou l'étude de la propagation acoustique.

Un autre pan de la recherche à méso-échelle concerne la conception et l'exploitation de campagnes de mesures. L'effort d'exploitation des données de la campagne terrain d'AMMA en 2006 s'est poursuivi en 2009. L'exploitation des données des campagnes COPS (assimilation de données GPS et radar avec AROME) et de CarboEurope sur le Sud-Ouest de la France avec la simulation de toute la campagne 2005 montrent un bon comportement du schéma ISBA-A-gs pour la simulation des flux et concentration de CO<sub>2</sub>. Enfin, un effort soutenu a été conduit dans la coordination et la préparation du programme expérimental HyMeX sur le cycle de l'eau en Méditerranée (voir figure). Des études préparatoires accompagnent la définition du plan d'implémentation du programme HyMeX, citons par exemple la mise en place d'une version d'AROME avec assimilation de données sur le bassin méditerranéen occidental ou encore les études de cas réels ou idéalisés de pluie intense en Méditerranée nord-occidentale.

1



1

Les cinq thèmes de recherche d'HyMeX dont les objectifs principaux sont d'améliorer la prévision et prévention des phénomènes intenses en Méditerranée (pluie intenses et crues-rapides, vents forts, sécheresse) et d'évaluer les impacts régionaux du changement climatique, en particulier sur la circulation thermohaline en Méditerranée et sur les événements intenses.

## Amélioration du schéma de nuages dans AROME

A la résolution horizontale d'AROME (2.5 km), il existe encore des nuages sous-maille qu'un traitement en « tout ou rien », qui suppose qu'une maille du modèle est entièrement nuageuse ou en ciel clair, ne peut pas représenter. Il est donc nécessaire de considérer un schéma de nuages sous-maille pour décrire la variabilité nuageuse à l'intérieur d'une maille du modèle, à partir d'une distribution statistique qui doit être satisfaisante pour l'ensemble des types de nuages.

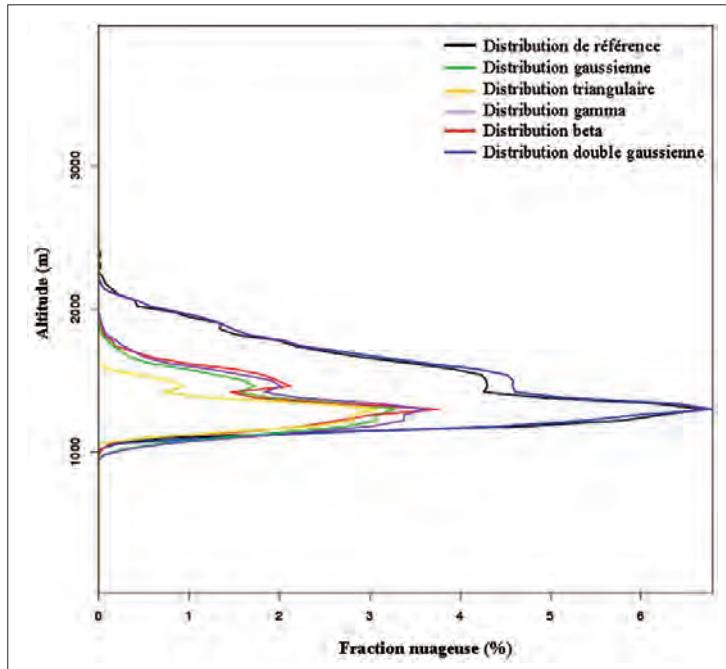
Des simulations LES (Large Eddy Simulations) avec une résolution de l'ordre de 100 m, ont été réalisées avec le modèle Meso-NH pour

évaluer ces fluctuations sous-maille en considérant le domaine de simulation LES comme une maille du modèle de méso-échelle (environ 5 km). La distribution « de référence » déduite des données LES, s'est avérée bornée, flexible et parfois asymétrique avec l'apparition d'un second mode. Pour les cumulus, ce second mode traduit l'apport d'eau du sol par activation de la convection peu profonde alors que pour les stratocumulus, il montre l'intrusion d'air sec de la troposphère libre asséchant la couche nuageuse. Les distributions théoriques unimodales classiquement utilisées dans les modèles ne

permettent pas la représentation du second mode et amènent à une sous-estimation des champs nuageux. L'hypothèse d'unimodalité faite à grande échelle s'avère donc peu adaptée à méso-échelle.

L'enjeu à venir est donc la détermination d'une distribution bimodale, vue comme une combinaison linéaire de deux distributions gaussiennes, dont il faudra déterminer les paramètres à partir des variables du modèle, en vue d'une implémentation dans Meso-NH et AROME.

2



2

Profils verticaux de la fraction nuageuse pour la distribution « de référence » (LES) (noir), la distribution double gaussienne (bleu) et les différentes distributions théoriques unimodales pour un cas de cumulus peu profonds (ARM). La distribution double gaussienne est la seule capable d'ajuster au mieux la distribution de référence.

## **Etude des zones à potentiel convectif à l'aide des sorties de modèles numériques d'échelle fine**

Une des fonctions du Laboratoire de Prévision est la préparation et la validation de nouveaux outils pour l'expertise du prévisionniste. Dans ce cadre, à la suite de la tornade qui a touché Boussiére-sur-Sambre et Haumont le 3 août 2008, il a été décidé de compléter la palette des outils déjà existants par un calcul des indices de convections sévères qui ont été mis au point aux USA, ceci pour les trois modèles numériques de Météo-France : ARPEGE, ALADIN et AROME (dont les résolutions horizontales étaient en 2009 de 15, 10 et 2.5 km).

Le paramètre utilisé aux USA pour discriminer l'occurrence des tornades est le STP (pour « Significant Tornado Parameter »). La formule du STP est complexe (voir la figure). Elle se compose d'un produit de 4 termes sans dimension, avec des normalisations qui permettent d'avoir une échelle où, pour des valeurs supérieures à 1, le risque de présence de tornade augmente de plus en plus.

On présente sur la figure les calculs faits avec ALADIN et AROME pour les heures rondes encadrant le phénomène, c'est à dire à 20 et 21 UTC (pour des prévisions à 2 h et 3 h issues du réseau de 18 UTC). On voit que le modèle AROME permet d'accéder à des structures qui sont mieux localisées (flèches) et à plus haute résolution que pour ALADIN, avec des valeurs qui deviennent significatives, supérieures à 0.8 à 20 UTC en (a) et supérieures à 1.2 à 21 UTC en (b).

A la suite de cet exemple plutôt prometteur, les indices de convection utilisés aux USA ont été analysés journallement pour les trois modèles pendant l'été 2009. Les résultats ont été moins probants que pour le cas de Haumont (nombreuses fausses alertes et non-detections). Ce travail préliminaire sera poursuivi en 2010 en testant des modifications pour ces indices et en testant d'autres indices de convections sévères.

3

## **Climatologie à maille fine du vent dans les basses couches sur des théâtres extérieurs**

Pour établir une climatologie à maille fine du vent dans les basses couches, il est nécessaire de disposer de séries de mesures suffisamment longues et nombreuses, ce qui n'est évidemment pas le cas sur toutes les régions du globe (océans, déserts, zones de relief...). Le programme de recherche, développé conjointement entre le SHOM et Météo-France sur 3 ans, vise à développer une méthode permettant d'établir une climatologie du vent à maille fine dans de telles zones.

La méthodologie s'inspire de celle de l'action « B95 » du CNRM qui s'appliquait à la France métropolitaine. Cette fois, 3 théâtres aux climats très différents sont concernés : le golfe de Guinée, l'océan Indien Nord et la Méditerranée Orientale.

Les progrès récents de la modélisation permettent de disposer de modèles à maille fine qui prennent de mieux en mieux en compte les phénomènes complexes, tels que par exemple la convection, les brises.... Cependant, les capacités de calcul ne permettent pas encore de faire tourner ces modèles, en un temps raisonnable, sur une durée assez longue pour établir une climatologie. Il a donc fallu passer par une étape de sélection de types de temps de grande échelle. A partir des 23 dernières années (1979-2001) des ré-analyses globales

ERA40, une étude statistique, différente pour chacune des trois zones étudiées, a permis de définir un (ou plusieurs) paramètre(s) pertinent(s) pour discriminer les différents types de temps (4 pour le golfe de Guinée, 7 pour l'océan Indien, à l'étude pour la Méditerranée Orientale). A l'intérieur de ces types de temps, une centaine de "dates-étalons" considérées comme représentatives du climat de la zone ont été choisies.

L'étape suivante consistera à réaliser, pour chaque théâtre, des simulations à échelle fine sur la centaine de dates-étalons sélectionnées. Cette étape permettra de reconstituer tout d'abord la climatologie du vent de chaque type de temps, puis d'en déduire une climatologie globale modélisée, à petite échelle, du vent dans les basses couches de la zone considérée. Pour cela, on réalisera une série de simulations imbriquées, partant de la ré-analyse de grande échelle (ERA40), passant par des simulations du modèle ALADIN sur des grilles de 30 puis 10 kilomètres de résolution pour aboutir à l'utilisation du modèle AROME à une résolution de 2,5 kilomètres.

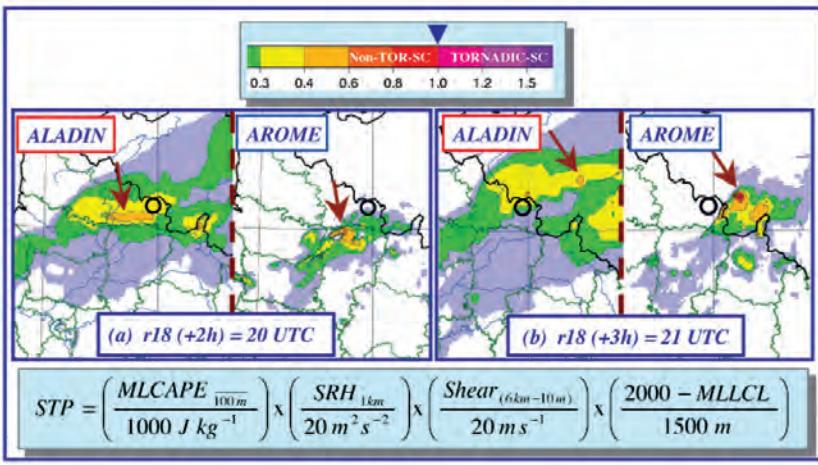
4

## **Devenir d'une dépression de surface d'amplitude modérée en tempête en l'absence d'une anomalie d'altitude**

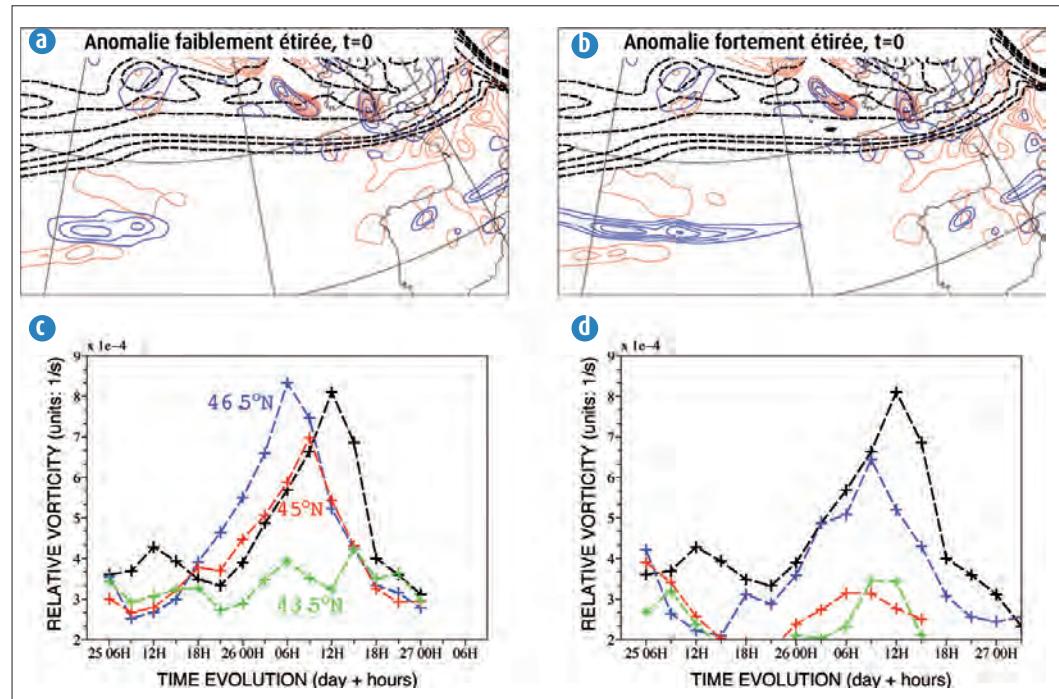
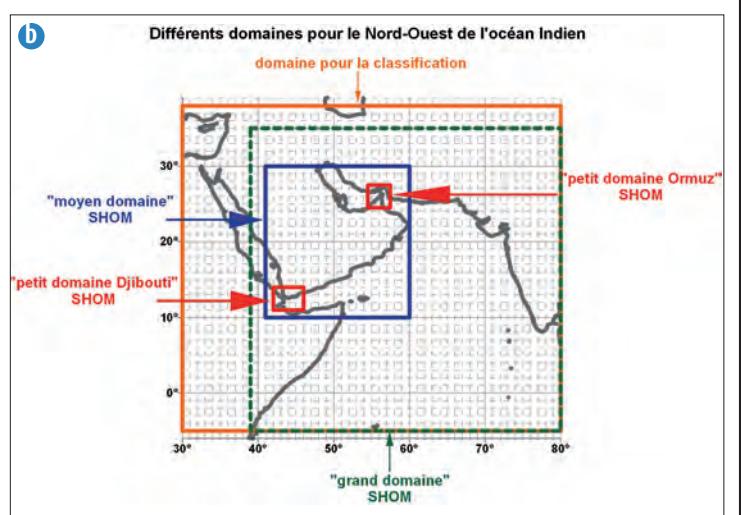
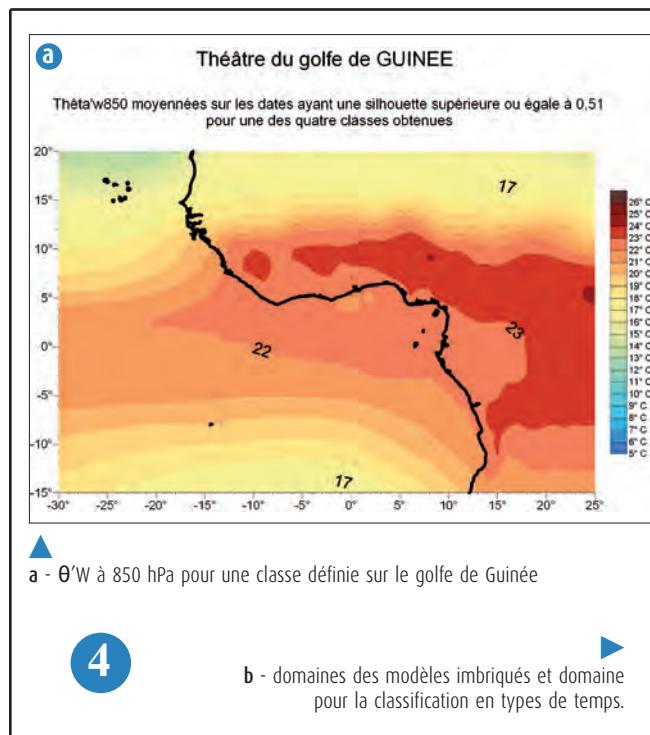
Les deux tempêtes qui ont frappé la France en décembre 1999 ont d'abord traversé l'Atlantique sous forme de dépressions de surface d'amplitude modérée. Elles se sont fortement creusées ensuite en interagissant avec le courant jet d'altitude. Pour le cas de la seconde tempête, cette interaction a été facilitée par la présence d'une anomalie d'altitude, ce qui n'était pas le cas de la première tempête. Cependant, on peut montrer qu'en enlevant l'anomalie d'altitude dans une simulation numérique de la seconde tempête, cette dernière disparaît. Il semble donc que certains éléments au sein même de la dépression de surface soient déterminants, en l'absence d'un précurseur d'altitude, pour le devenir ou non en tempête.

Afin d'identifier ces éléments, des expériences numériques ont été effectuées à l'aide du modèle opérationnel ARPEGE en repartant d'une condition initiale comprenant le courant-jet de 1999 et en introduisant des anomalies de surface idéalisées plus ou moins étirées au sud du courant-jet et plus ou moins proches de celui-ci. La figure montre que l'anomalie qui a le plus de chances de devenir une tempête est celle qui est moins étirée et plus proche du courant-jet. Il est curieux de noter comment un changement de latitude d'un degré et demi seulement peut changer du tout au tout l'évolution de la dépression.

5



Cartes du STP pour le 3 août 2008 et pour ALADIN et AROME.  
Le rond noir représente la zone proche de Haumont.  
En (a) : prévisions à 2 h (juste avant l'événement) ;  
en (b) prévisions à 3 h (juste après).



5

Les figurines a et b montrent deux conditions initiales différentes issues de l'écoulement du 25 décembre 1999 à 06h mais en ayant remplacé l'anomalie de la première tempête par une anomalie de surface idéalisée au même endroit. La vorticité relative à 850 hPa (en bleu, intervalle :  $8 \cdot 10^{-5} s^{-1}$ ), à 300 hPa (en noir, intervalle :  $5 \cdot 10^{-5} s^{-1}$ ) et la vitesse verticale à 600 hPa (en rouge, intervalle :  $0.4 Pa.s^{-1}$ ) y sont représentées pour (a) une anomalie légèrement étirée et (b) une anomalie fortement étirée (toutes deux centrées à 36W, 45N). (c) montre l'évolution du maximum de la vorticité relative à 850 hPa pour une anomalie légèrement étirée située à 46.5N (en bleu), 45N (en rouge), et 43.5N (en vert). (d) est similaire à (c) mais pour une anomalie fortement étirée. La courbe noire correspond au cas d'une simulation avec la première tempête.

# Études du brouillard

## Modélisation du brouillard

La modélisation précise des phénomènes pilotant la formation et l'évolution des brouillards est encore un défi. Pourtant, le brouillard a un très fort impact sociétal (transport aérien ou routier, dispersion de polluant, par exemple) et il est nécessaire d'améliorer la qualité de nos connaissances et de nos prévisions. Les travaux de recherches se focalisent actuellement sur la spécification des conditions initiales, l'impact des aérosols et les circulations à très fines échelles au sein d'une couche de brouillard.

Comme dans tout système de prévision météorologique, les conditions initiales de la prévision sont de la plus haute importance. Ainsi deux techniques d'assimilation novatrices, un filtre de Kalman d'ensemble et un filtre à particules, ont été développées dans le cadre du système de prévision locale des brouillards Cobel-Isba en place sur les aéroports de Paris-Roissy, Paris-Orly et Lyon. Ces deux méthodes d'assimilation ont montré leur efficacité dans le cadre de la prévision des brouillards à l'échelle locale. Un travail a également été mené afin de prendre en compte la spécificité des gouttelettes de brouillard. Les études s'appuyant sur les campagnes de mesures ParisFog et ToulouseFog ont montré une dépendance complexe entre le nombre de particules d'aérosols et le nombre de gouttelettes de brouillard. Ainsi, une atmosphère fortement polluée inhibe la formation de brouillard dense (visibilité inférieure à 200 m) mais favorise l'apparition de brumes.

Une des spécificités des couches de brouillard est l'existence de gradients verticaux et horizontaux très forts sur des échelles très fines. Afin de traiter précisément les interactions entre les différents processus physiques se produisant au sein d'une couche de brouillard, il est alors nécessaire d'utiliser une résolution très fine, actuellement hors de portée des modèles opérationnels de prévision. Les simulations effectuées à l'aide du modèle Meso-NH à 5 m de résolution horizontale et 1 m de résolution verticale, permettent d'étudier les hétérogénéités présentes dans une couche de brouillard (voir figure).

La synthèse de ces travaux conduira à concevoir de nouvelles paramétrisations physiques traitant mieux les phénomènes physiques présents au sein du brouillard, ce qui permettra d'en améliorer la prévision.

6

## Observation du brouillard à Roissy par télédétection acoustique

Dans le cadre de l'action nationale Brouillard destinée à améliorer nos capacités de prévision du brouillard, notamment sur aéroport, une expérimentation a été conduite afin de tester l'apport d'un instrument de télédétection acoustique – le sodar – à l'observation opérationnelle du phénomène. Sensible aux hétérogénéités turbulentes de température, le sodar est en effet capable en théorie de détecter le sommet de la couche de brouillard et de situer précisément celui-ci en temps réel.

Cette capacité n'ayant cependant jamais été testée systématiquement, une expérimentation a été décidée. Un sodar a été déployé sur l'aéroport de Roissy en juin 2008. Les premières semaines de fonctionnement ont confirmé sa capacité à fonctionner dans un environnement pourtant fortement bruité. L'expérimentation elle-même a été conduite au cours de l'hiver 2008 – 2009. Pendant 4 mois, une équipe du CNRM était présente sur place et opérait un système de sondage de l'atmosphère sous ballon captif. Un sondage des premières centaines de mètres était réalisé toutes les heures dès qu'un brouillard était prévu ou observé. Une dizaine de cas de brouillard a ainsi pu être documenté. Comme le montre la figure, les résultats confirment la capacité du sodar à situer en temps réel le sommet du brouillard caractérisé par un pic dans la puissance du signal reçu (réflectivité sodar).

Il apparaît ainsi que les mesures sodar apportent une information nouvelle par rapport au dispositif existant, qui devrait permettre de corriger les hauteurs de brouillard analysée par le système de prévision (COBEL). Il reste maintenant à évaluer l'apport de cette information sur la qualité des prévisions.

7

## Spatialisation des basses visibilités pour améliorer la détection des brumes et brouillards dans CARIBOU

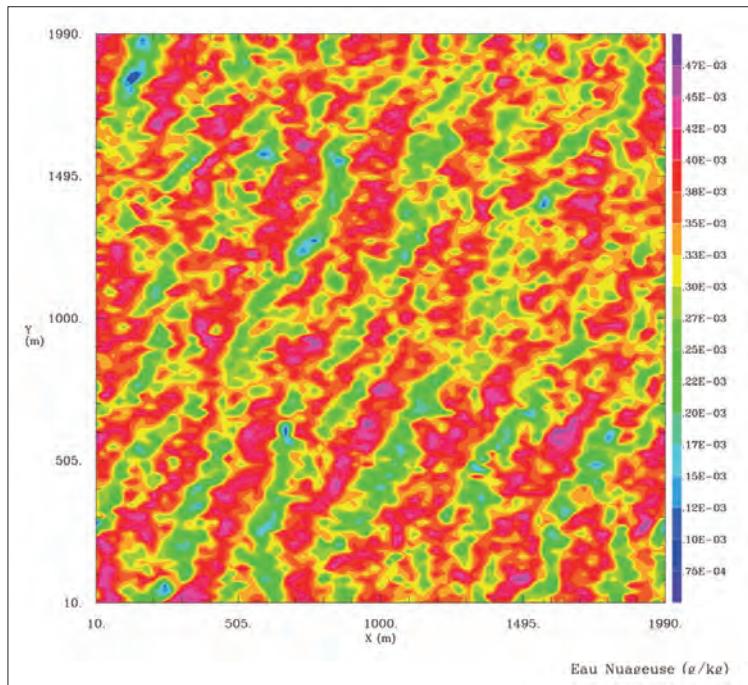
Actuellement, seule l'analyse « CARIBOU » fournit depuis fin juin 2007 une information spatialisée relative au risque de brume ou de brouillard sur la France métropolitaine (on s'intéresse ici à la détection du phénomène, et non à sa prévision). Néanmoins, ces analyses ne comprennent pas d'indication sur les visibilités attendues au sein des zones à risque. Par ailleurs, elles ne sont pas systématiquement disponibles en tout point.

Une nouvelle méthode a donc été développée afin de répondre aux axes d'amélioration décrits ci-dessus. Elle est fondée sur la spatialisation des visibilités observées in situ, à partir d'une régression linéaire multiple utilisant des prédicteurs météorologiques et géographiques. Une interpolation spatiale des résidus permet ensuite de s'approcher au mieux des observations de visibilité disponibles. On obtient ainsi une indication sur les visibilités attendues, en tout point du domaine.

La fusion des visibilités spatialisées avec l'analyse CARIBOU actuelle permet de prendre respectivement en compte l'information quantitative sur les baisses de visibilité et l'information qualitative sur le risque d'occurrence du phénomène de brume ou brouillard. Il est alors possible de produire des cartes fournissant le risque d'occurrence de visibilités inférieures à un seuil donné (200, 600, 1 000 et 5 000 m).

Les résultats obtenus sont encourageants. Toutefois, de nouveaux développements sont en cours avant toute mise en œuvre opérationnelle de cette nouvelle version de CARIBOU. Il s'agit en effet de répondre aux besoins du projet SYMPOSIUM-2 (distributions de probabilité) et de mieux prendre en compte les caractéristiques des observations de visibilité utilisées.

8

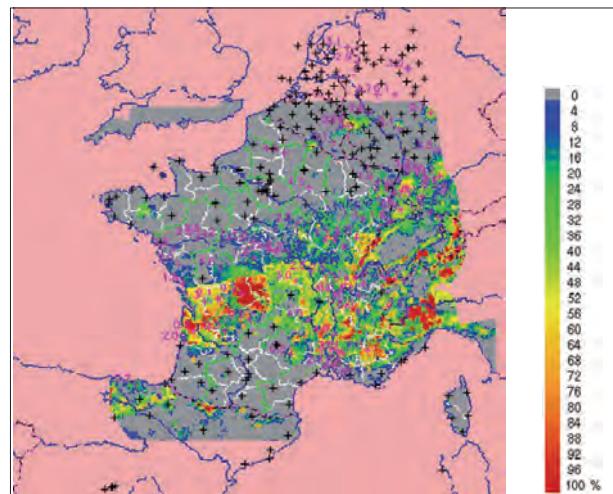
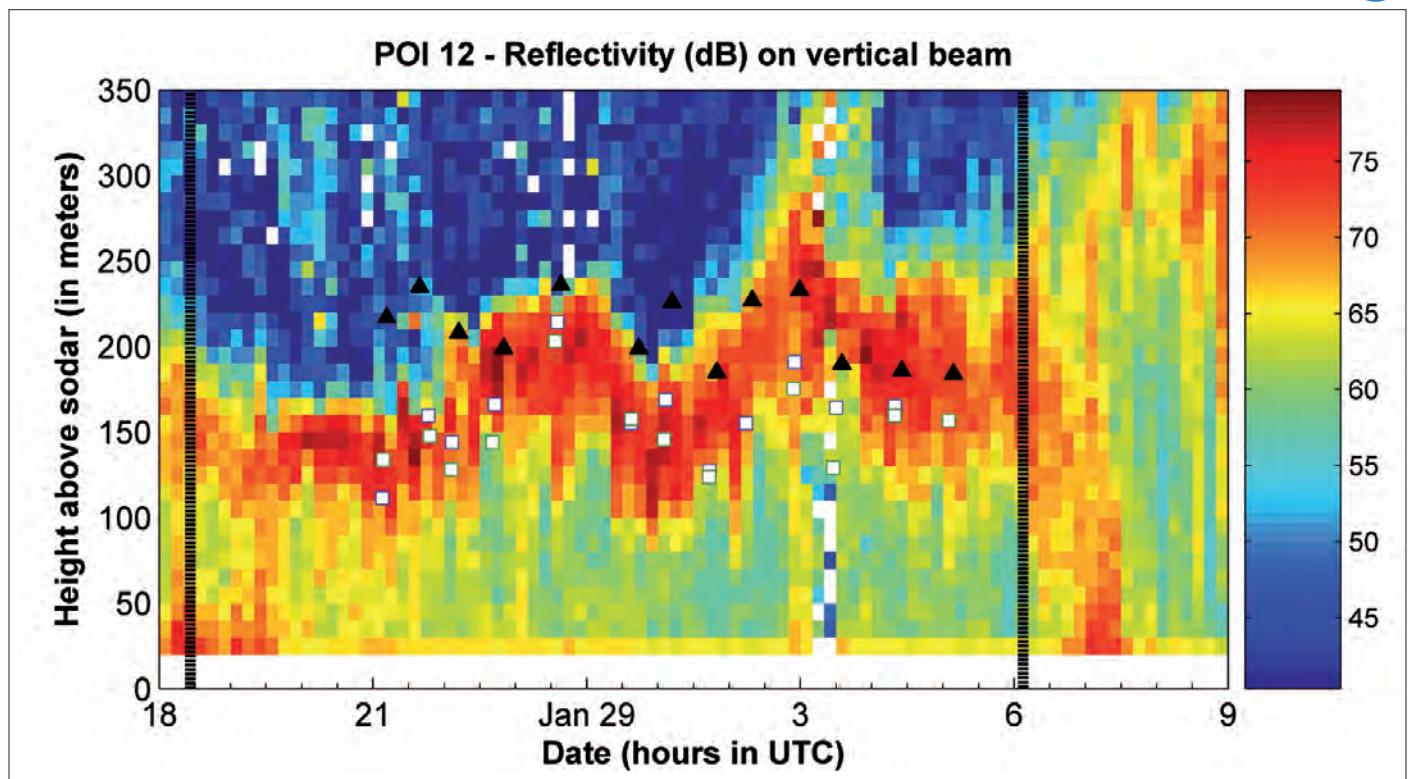


6

◀ Coupe horizontale dans une couche de brouillard. Le contenu en eau liquide nuageuse est issu d'une simulation numérique à échelle très fine (5 m sur l'horizontale et 1 m sur la verticale). On remarque les structures organisées en lignes.

Puissance du signal sodar (réflectivité) en fonction du temps (abscisse) et de la hauteur (ordonnée). Le code couleur est indiqué sur la droite. Les carrés blancs superposés indiquent les hauteurs de brouillard détectées sur les sondages sous ballon captif, les triangles noirs correspondent au sommet des sondages, les barres verticales signalent le début et la fin du brouillard. On observe une très bonne corrélation entre l'indication fournie par les sondages et le pic de réflectivité en altitude. Celui-ci signe bien le sommet du brouillard et permet de le situer en temps réel..

7



8

◀ Risque d'observer des visibilités inférieures à 1 000 m, le 17/09/2009 à 05 h UTC (en %)

# Valorisation de la campagne AMMA

Lancé à Niamey en février 2002, AMMA est un programme international qui vise à améliorer nos connaissances de la mousson d'Afrique de l'Ouest et de sa variabilité de l'échelle journalière à inter-annuelle (incluant le changement climatique), mais aussi ses impacts sur les ressources naturelles et cultivées et les maladies. AMMA travaille également à améliorer les réseaux d'observations et les prévisions du temps et du climat et leurs applications (Systèmes d'alerte précoce pour les ressources et maladies). AMMA est animée par un intérêt pour les questions scientifiques fondamentales et par des besoins sociétaux.

La 3<sup>ème</sup> conférence internationale AMMA, qui s'est déroulée en juillet 2009 à Ouagadougou, a présenté les résultats phare devant 500 chercheurs toutes disciplines confondues. Les éléments clés de la mousson sont maintenant mieux compris : la dépression thermique Saharienne, les interactions surface-atmosphère, les mécanismes de la langue d'eau froide et son rôle dans le démarrage de la mousson sont quelques exemples des récentes avancées de la recherche. Des méthodes nouvelles combinant données satellites et modèles ont permis de mieux estimer les bilans d'eau sur la région et d'en déterminer ses différentes sources.

En collaboration avec les grands centres de prévision météorologiques, les prévisions à court terme ont pu être améliorées grâce à l'assimilation des radiosondages corrigés des biais de mesures et des radiances micro-ondes sur continent. L'étude des scénarios climatiques du GIEC montre que la région AMMA est celle où les modèles divergent le plus. L'une des raisons est la mauvaise représentation des téléconnexions entre régions tropicales. Des avancées ont aussi été obtenues sur les liens entre climat et maladies (ménigrite, paludisme, fièvre de la vallée du rift), ressources en eau, production agricole avec les premières cartes de conseil pour les semis mais aussi sur la pollution atmosphérique dans les grandes villes africaines.

La conférence de Ouagadougou a aussi permis de consolider le plan de la phase 2 d'AMMA à travers des débats et des réunions des comités de pilotage. Le programme va maintenant développer davantage ses recherches sur les interactions entre société, environnement et climat et chercher à améliorer les systèmes de prévisions et leurs applications.

1

## Assimilation des radiances micro-ondes dans le cadre d'AMMA

Les instruments AMSU-A et -B permettent de sonder la température et l'humidité de l'air sur plusieurs niveaux de l'atmosphère. Malgré leur contenu en information, ces observations sont sous-exploitées en partie à cause de la description inappropriée de l'émissivité dans les modèles. Depuis juillet 2008, une nouvelle modélisation de l'émissivité de surface a été mise en œuvre dans les modèles opérationnels de Météo-France. Ce développement a rendu possible l'assimilation des observations sensibles aux basses couches atmosphériques. Des études de faisabilité ont été menées afin d'apprécier le potentiel de ces observations : en plus d'une expérience de contrôle, une expérience d'assimilation de 2 mois a été effectuée durant l'été 2006. Les deux expériences diffèrent uniquement par l'assimilation ou non des observations sensibles à la couche limite au-dessus des surfaces continentales.

L'assimilation de ces observations a eu des conséquences importantes sur des paramè-

tres clés du cycle de l'eau. Des changements ont été observés sur les analyses d'humidité et les prévisions de pluie. Le changement de l'humidité s'est manifesté par l'apparition d'un dipôle sur les Tropiques : plus d'humidité au-dessus de l'Inde, l'Amérique du Sud et l'Afrique de l'Ouest et assèchement de l'atmosphère au-dessus de l'Arabie et de l'Afrique du Nord-Est. Ce changement concerne non seulement la surface mais plusieurs niveaux de l'atmosphère (jusqu'à 500 hPa) et a été évalué avec succès à l'aide de mesures indépendantes (GPS). Les changements d'analyses et de prévisions ont eu pour effet une mousson africaine mieux organisée avec une Zone de Convergence Inter Tropicale plus forte. Les erreurs de prévisions ont été largement réduites au-dessus des tropiques avec pour conséquence une amélioration des prévisions sur les latitudes moyennes à 48 et 72 heures d'échéances.

2

## Développement de convection diurne au sein d'une couche limite qui s'assèche

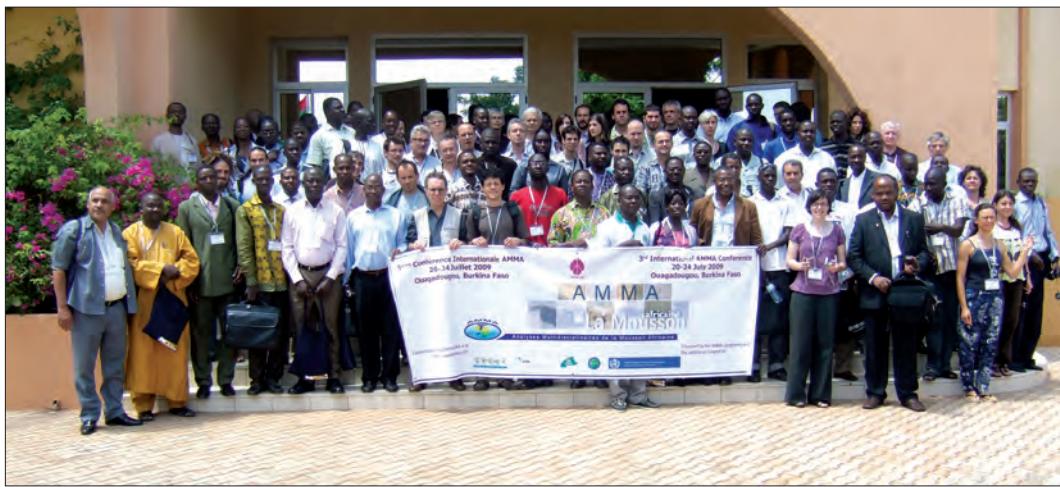
Avant le saut de mousson, les couches limites sahéliennes présentent des structures typiques qui ont été particulièrement bien échantillonnées par une suite d'instruments le 10 juillet 2006. Ceci inclut :

- une croissance importante de la couche mélangée pendant cette journée, son sommet coïncide avec l'évolution du niveau de condensation jusqu'en milieu d'après-midi, en cohérence avec les estimations de base de nuages fournies par un ceilomètre colocalisé (voir le panneau central haut de l'illustration).
- des organisations de couche limite marquées et en évolution, depuis des rouleaux le matin (figure en haut à gauche) à des cellules l'après-midi, et ensuite, parfois des cellules de convection plus profonde.

Ce fut le cas le 10 juillet (figure du haut, milieu). Une cellule convective se développa dans le champ de vue du radar et généra un courant de densité quasi-circulaire (panneau en haut à droite) qui s'étala dans les basses couches où le vent était faible. Les sondages n'indiquent pas d'augmentation de la CAPE ni d'abaissement du niveau de convection libre au cours de la journée (panneau du bas).

Ce type de situation, fréquent, diffère radicalement du schéma classique de développement de convection diurne, qui fait intervenir une augmentation de la CAPE. Il appelle des études complémentaires dans la mesure où il semble particulièrement difficile à simuler, et a été largement ignoré par le passé.

3

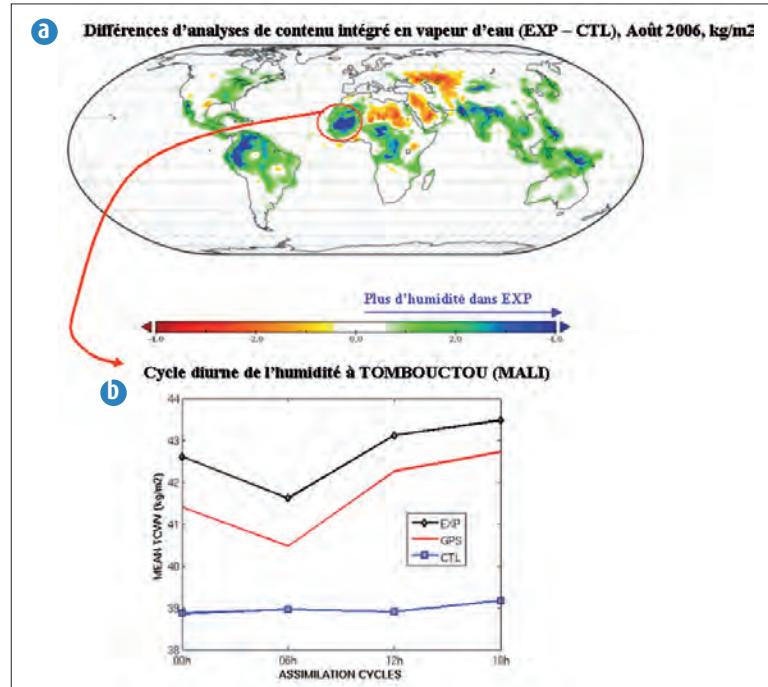


Une partie des participants à la 3<sup>e</sup> conférence AMMA à Ouagadougou en juillet 2009

1

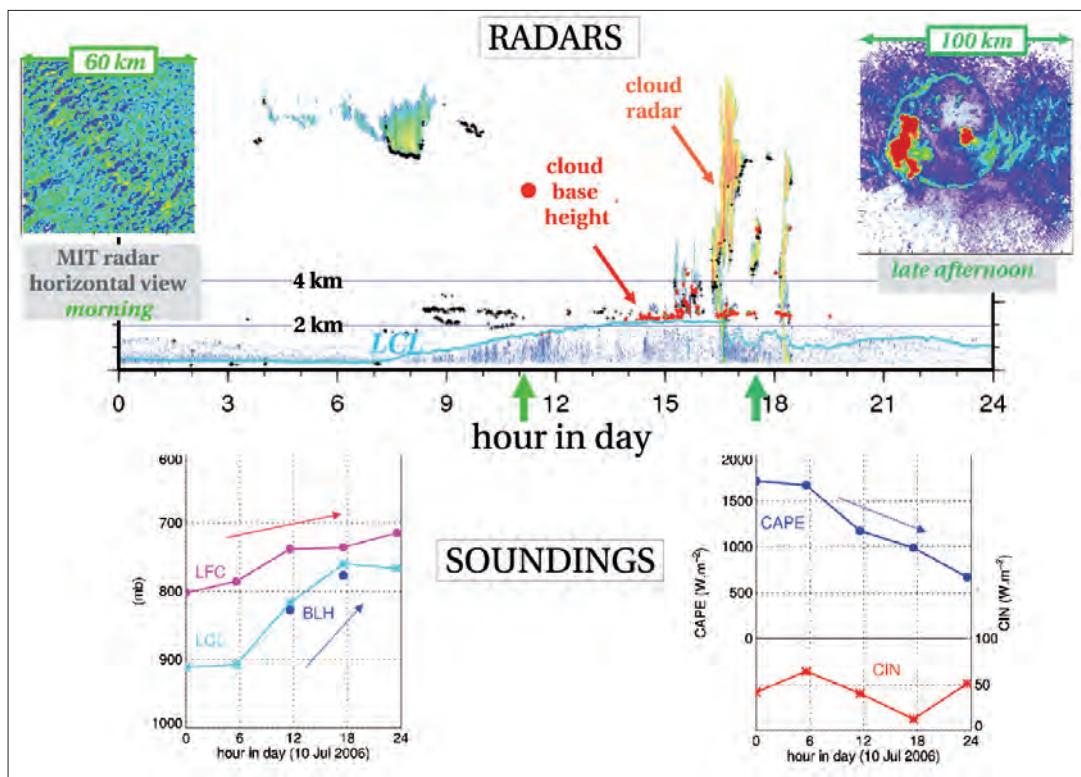
- (a) Différences moyennes d'analyses de contenu intégré en vapeur d'eau (expérience moins contrôle) pendant le mois d'août 2006. Les valeurs négatives (positives) indiquent que le contrôle est plus humide (sec) que l'expérience.
- (b) Cycle diurne de contenu intégré en vapeur d'eau à proximité de TOMBOUCTOU avec des valeurs estimées à partir de mesures GPS et d'analyses provenant du contrôle (CTL) et de l'expérience (EXP). Les statistiques sont sur 45 jours (du 01/08/2006 au 14/09/2006)

2



3

Développement de convection diurne observé par les radars MIT et nuage (haut) et les sondages - LCL, LFC et BLH réfèrent respectivement aux niveaux de condensation, niveaux de convection libre et hauteur de couche limite (bas).



## **ALMIP: exercice international d'intercomparaison de modèles de surface sur l'Afrique de l'Ouest - situation actuelle et perspectives**

Une priorité importante du projet AMMA est de mieux comprendre et modéliser l'influence de la variabilité spatiale et temporelle des processus de surface sur la mousson africaine. Cette question est traitée à travers une approche de modélisation multi-échelle en utilisant un ensemble de modèles de transfert sol-végétation atmosphère (SVAT) qui reposent sur les produits satellites des forcages atmosphériques (ex. les précipitations), des paramètres qui décrivent la surface, et les données de la campagne d'observation AMMA. La coordination internationale des activités de modélisation de la surface est soutenu par le « AMMA Model Intercomparison Project » (ALMIP).

Dans la phase I récemment achevée d'ALMIP, une douzaine de groupes différents de la communauté internationale a effectué des simulations pluri-annuelles (2002-2007) sur l'Afrique de l'Ouest. Les SVATs ont été en mesure de produire des distributions spatio-temporelle d'humidité du sol compatibles avec la température de brillance mesurée par satellite. À l'échelle de la grille, les estimations de flux de chaleur sensible par les SVATs fournissent la même réponse de base à la saison des pluies que les flux agrégés à partir des données d'observations des sites à l'échelle locale (voir figure). Les simulations LSM (avec des Modèles de Surface) sont actuellement largement utilisées pour la modélisation hydrologique, les estimations régionales du bilan d'eau, les études de cas à méso-échelle (initialisation et évaluation), et pour l'évaluation de l'échelle régionale et globale des modèles atmosphériques.

Dans la phase suivante ALMIP, les SVATs seront évalués à partir des données d'observation à l'échelle locale des trois « supersites » fortement instrumentés du système d'observation AMMA-CATCH, qui s'étendent selon un axe nord-sud à fort gradient éco-climatique.

4

## **Langue d'Eau Froide Equatoriale et Mousson Africaine**

S'il est bien connu que l'intensité de la mousson Africaine dépend des gradients d'énergie entre le golfe de Guinée et l'Afrique de l'Ouest, nos connaissances sur les mécanismes de formation de la Langue d'Eau Froide (LEF) et ses interactions avec la mousson sont en revanche infiniment plus restreintes. C'est pourquoi un des objectifs du projet AMMA est l'étude des couches supérieures de l'Atlantique tropical et leur impact sur la mousson.

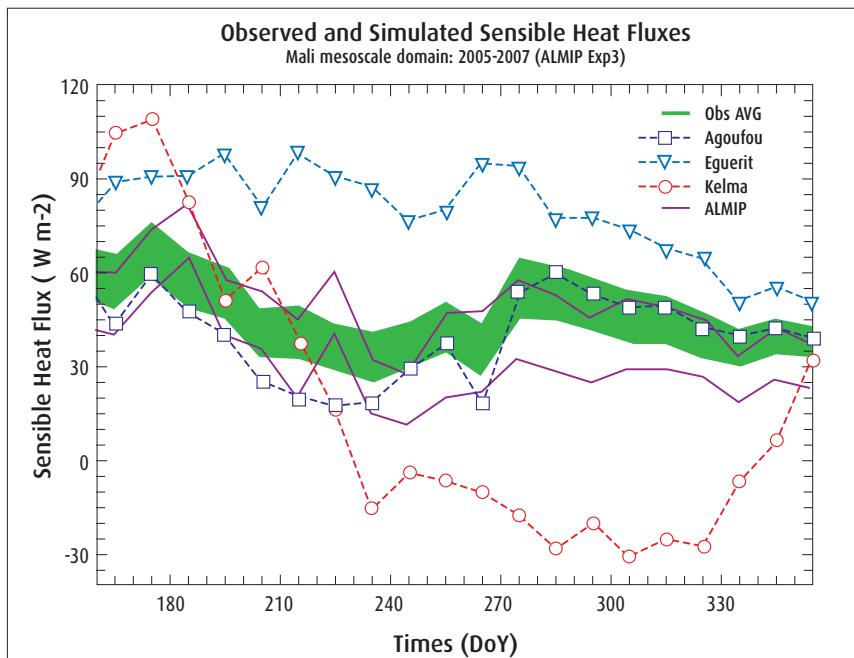
Chaque année, de mai à août, les températures de surface de la mer (TSM) au sud de l'équateur chutent de 6 à 8 °C lors du renforcement des alizés de sud-est dans l'hémisphère sud : c'est la mise en place de la LEF. Les processus qui génèrent la LEF reposent sur la théorie du pompage d'Ekman ou sur celle de la propagation des ondes de Kelvin le long de l'équateur. Ces schémas sont cependant trop simplifiés car ils ne tiennent pas compte du système des courants équatoriaux. Ce dernier se compose d'un courant de surface vers l'ouest (le Courant Equatorial Sud : CES) et d'un courant de subsurface vers l'est (le Sous-Courant Equatorial : SCE).

Un nouveau schéma consiste à déduire les mouvements verticaux océaniques à partir de l'équilibre géostrophique. A l'équateur, celui-ci lie le cisaillement vertical du courant à la courbure du champ de pression. Lorsque ce lien est perturbé par le vent, le

fluide restaure l'équilibre géostrophique par une vitesse verticale qui réajuste le champ de pression. Le schéma conceptuel de ce mécanisme est donné sur la figure a. Lorsque les alizés se renforcent en mai, ils intensifient le CES et accroissent le cisaillement vertical du courant. L'ajustement du champ de pression au nouveau champ de courant s'effectue via un upwelling qui transporte les eaux profondes froides vers la surface. Une illustration de l'ajustement du champ de pression/densité dans un modèle 3D d'océan est montée figure b. L'upwelling équatorial apparaît donc comme une réponse indirecte de l'océan au vent et non comme une réponse directe du pompage d'Ekman.

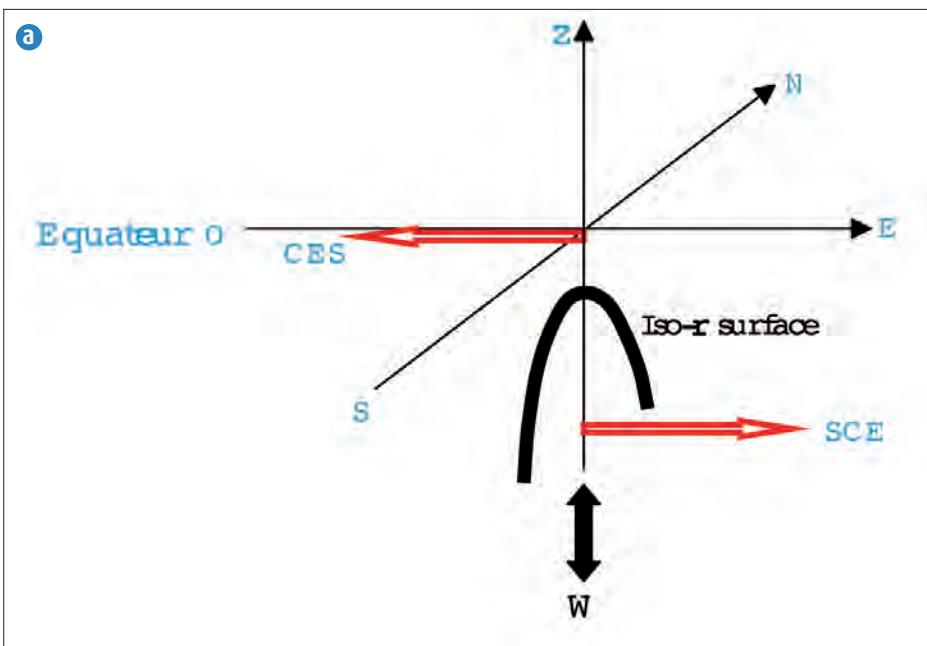
Il s'agit ici d'une différence majeure dans la compréhension du fonctionnement de la LEF qui suggère que les biais des modèles climatiques (gradients zonaux de TSM inversés à l'équateur, SCE absent ou irréalistes) peuvent être induits par une mauvaise représentation de ce mécanisme de réajustement.

5



4

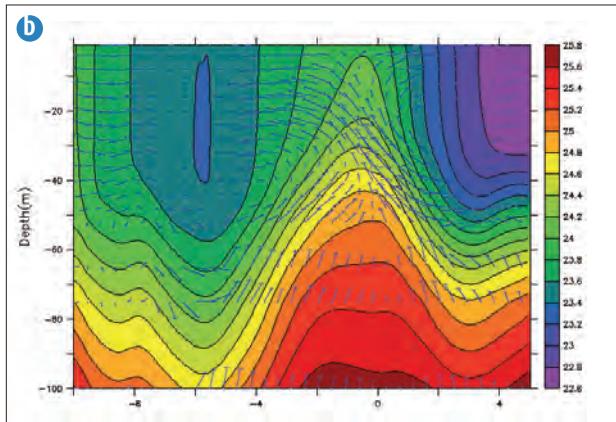
La moyenne du flux de chaleur sensible observé sur trois ans (2005-2007) pour les trois sites locaux au sein du super-site du Mali sont indiqués par les courbes avec symboles non pleins, et la zone verte correspond à la dispersion des flux agrégés spatialement (représentant le domaine mésoscale de  $60 \times 60 \text{ km}^2$ ). Les courbes en tirets représentent l'enveloppe à un écart-type de la moyenne multi-modèle d'ALMIP.



5

a - Représentation schématique du système de courants zonaux à l'équateur (flèches rouges). Le courant équatorial sud (CES) en surface vers l'ouest et le sous-courant équatorial (SCE) vers l'est. La vitesse verticale W vient ajuster la courbure du champ de pression/densité au cisaillement vertical du courant zonal.

b - Coupe verticale méridienne du champ de densité (couleur) et de courant (vecteur,  $v$  : vitesse méridienne ;  $w$  : vitesse verticale) entre les latitudes 10S et 5N. Le système de courants zonaux à l'équateur (Latitude=0) est perpendiculaire au plan de coupe. La convergence du courant vers l'équateur restaure à tout instant la courbure du champ de densité et assure le maintien du cisaillement vertical du courant zonal. Le réalisme du sous-courant équatorial dépend étroitement de cette convergence.



# Étude du climat et du changement climatique

---

Les recherches en modélisation climatique se développent en priorité autour des études d'impact des activités humaines sur le climat et la chimie atmosphérique, la régionalisation du climat, les études de prévisibilité à longue échéance et l'étude des interactions océan-atmosphère. Les enjeux associés à ces thèmes de recherche sont importants pour Météo-France comme en témoigne la liste des orientations principales de l'établissement figurant dans le contrat d'objectif 2009-2011. Parmi les six orientations qui y figurent, l'une vise à « se mobiliser pour répondre aux demandes nouvelles sur le changement climatique, ses impacts et ses conséquences pour les territoires et les secteurs économiques».

Au cours de l'année 2009, dans le domaine d'étude de la variabilité climatique de grande échelle, de nombreux ensembles de simulations ont été réalisés pour analyser les téléconnexions entre les régions tropicales et extratropicales. L'analyse de ces simulations a notamment permis de montrer que même si la correction des biais tropicaux n'a que peu d'impact en moyenne sur la correction des biais extratropicaux, il n'en est pas de même pour certains cas particuliers de situations climatiques. L'année 2003 fait l'objet d'une attention toute particulière.

Concernant les scénarios climatiques à l'échelle globale, le modèle couplé CNRM-CM5 qui sera utilisé pour réaliser les simulations du GIEC a été défini et est en cours d'évaluation. Ce modèle comportera une résolution double de celle du modèle utilisé pour le précédent exercice. Il comporte aussi plusieurs innovations dans ses différentes composantes notamment grâce à l'utilisation d'un nouveau code radiatif développé au CEPMMT et du module SURFEX permettant d'intégrer dans le modèle de climat les toutes dernières évolutions de la représentation des surfaces continentales. Un des aspects marquants des premières simulations est une très nette amélioration de la simulation de la glace de mer en Arctique grâce à une meilleure représentation de la dynamique atmosphérique.

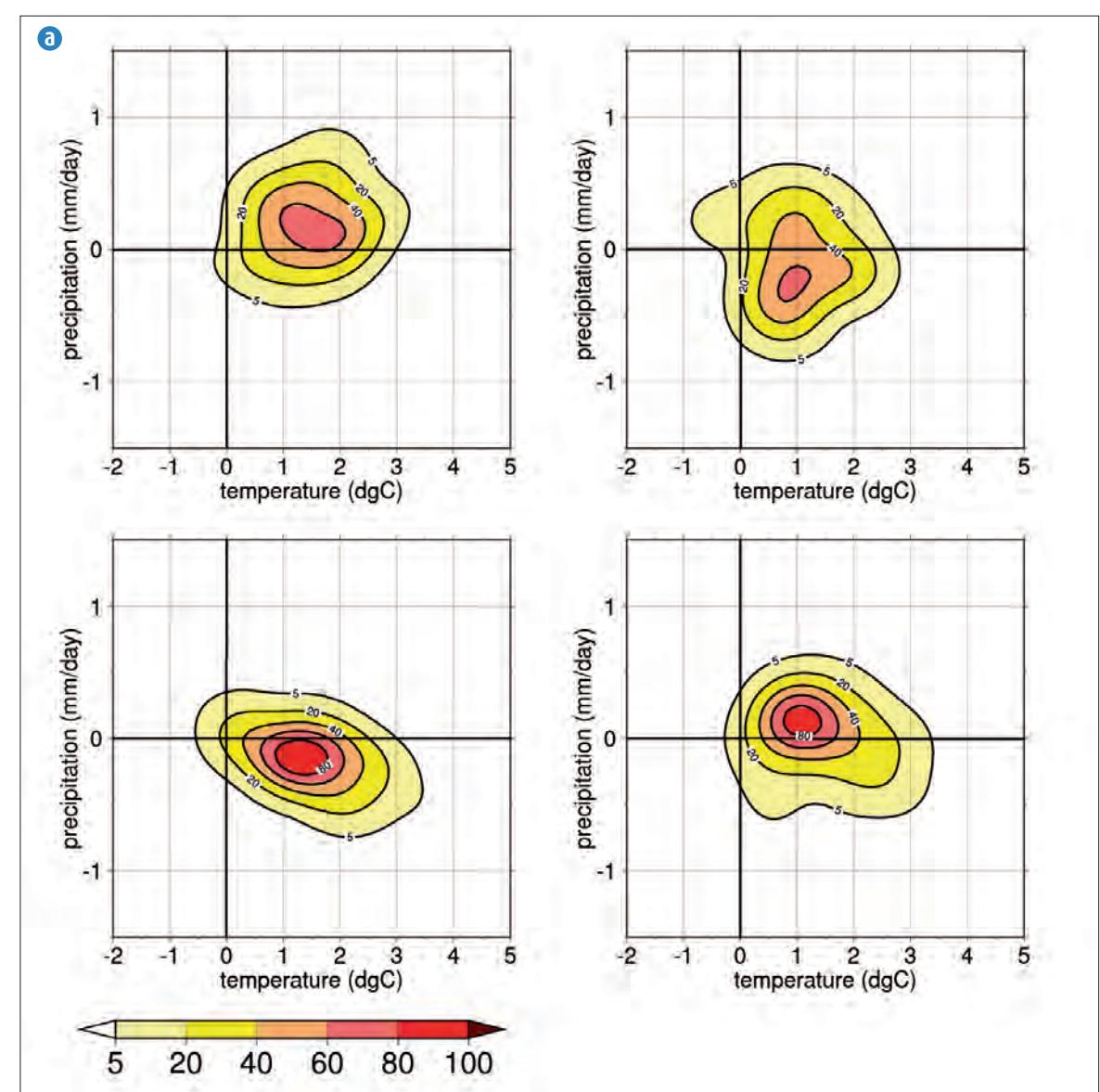
Dans le cadre du projet ANR "Cyclones et Climat", des expériences forcées ont été menées à l'aide d'ARPEGE-Climat dans lesquelles les anomalies de température de surface de la mer sont issues de simulations de 15 modèles du GIEC. Le modèle ainsi contraint reproduit assez bien la dispersion des réponses de la cyclogénèse au changement climatique des modèles d'origine, ce qui révèle l'influence prépondérante de la simulation des changements de température de surface de la mer.

Dans le domaine de la régionalisation du climat, les résultats du projet européen ENSEMBLES ont en particulier permis une estimation de distributions de probabilités du changement climatique (températures et précipitations) à la localisation des capitales européennes (figure a). D'autres travaux portent notamment sur l'évaluation de l'incertitude climatique et de ses sources, l'étude des flux d'eau et de chaleur en Méditerranée ou sur les régimes de temps en Europe. De nouvelles simulations de scénarios ont par ailleurs été réalisées avec ALADIN-Climat ou ARPEGE-Climat, en particulier une simulation couvrant le globe à 50 km de résolution et des simulations à résolution variable dont le pôle est déplacé à différents endroits du globe, permettant de confirmer l'intérêt de cette dernière approche. Dans le cadre du projet ANR-SCAMPEI, ce sont des scénarios de changement climatique sur la France à 12 km de résolution qui ont été réalisés pour permettre une étude de l'impact du changement climatique sur les régions de montagne. L'année 2009 a aussi vu arriver à maturité scientifique de nouveaux outils numériques à haute résolution, couplés sur le domaine Méditerranéen, dont le tout nouveau modèle couplé ALADIN-Climat / NEMOMED8.

Sur le thème de la détection et de l'attribution du changement climatique, les études menées au moyen des nouvelles méthodologies statistiques développées ces toutes dernières années, ont été étendues au cas des précipitations en France. Ces études révèlent notamment la détection d'un signal de changement de la distribution spatiale des précipitations moyennes annuelles. Par ailleurs, une nouvelle méthodologie d'attribution des changements climatiques adaptée à l'échelle régionale a été développée et testée avec succès sur des cas académiques.

Dans le domaine de la prévision saisonnière, des simulations en mode couplé et non couplé ont montré que les scores de prévisibilité étaient relativement insensibles au choix de l'ensemble de paramétrisations physiques mis au point pour la version 5 du modèle ARPEGE-Climat. Ces scores sont comparables à ceux obtenus avec la version précédente du modèle. De plus, une version du modèle ARPEGE-Climat avec pôle sur la Méditerranée a été couplée à l'océan global en vue de la réalisation de simulations de prévision saisonnière à plus forte résolution sur l'Afrique de l'Ouest.

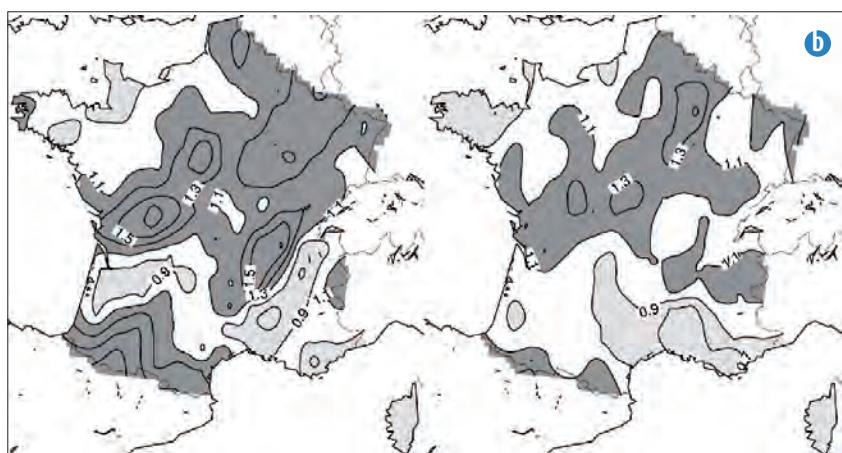
Dans le domaine de l'étude des interactions chimie-climat, le CNRM a participé pour la première fois à l'exercice d'intercomparaison international CCMVal, préparant le prochain rapport de l'« Ozone Assessment ». Les premiers résultats montrent que la climatologie de la stratosphère est dans la moyenne des autres modèles pour l'hémisphère sud (figure b), mais elles révèlent aussi certains défauts comme l'absence de « Quasi-Biennal Oscillation ». Par ailleurs, le comportement chimique du modèle baptisé CNRM-ACM (ARPEGE Couplé avec MOCAGE), est cohérent avec celui de l'ensemble des autres modèles.



▲ a - Distributions conjointes de probabilité de changement de température (en degré) et de précipitations (en mm/jour), à la localisation de Paris, pour la période 2021-2050 par rapport à la période 1961-1990 et suivant le scénario d'émission A1B. Ces distributions sont construites à partir d'une pondération des résultats de 16 modèles climatiques régionaux (de l'ordre de 25km de résolution), pour l'hiver et le printemps (en haut de gauche à droite), l'été et l'automne (en bas de gauche à droite).

1

► b - Rapport entre le quantile 99,9 % de la pluie d'été simulé par ALADIN-Climat forcé par la réanalyse ERA40 sur la période 1960-2000, et celui de l'analyse d'observations SAFRAN. ALADIN-Climat a une résolution de 50km (à gauche) et 12 km (à droite), la réanalyse SAFRAN a quant à elle une résolution de 8 km.



# Étude du changement climatique

## Caractérisation de l'effet d'urbanisation sur les longues séries climatiques : l'exemple des séries de température de Vienne (Autriche)

Les longues séries instrumentales sont très souvent affectées par des modifications des conditions de mesures au cours du temps : changements d'emplacement, d'instrumentation, etc... Très souvent, ces changements se traduisent par des ruptures artificielles, qui peuvent être du même ordre de grandeur que les évolutions climatiques que l'on étudie. L'emploi d'une procédure d'homogénéisation classique permet de détecter et de corriger ces sauts brusques dans les séries. Mais d'autres phénomènes plus progressifs peuvent altérer l'observation du signal climatique, comme en particulier l'effet d'urbanisation.

Le modèle statistique UBRIS est spécialement développé pour la prise en compte des tendances parasites dans le processus d'homogénéisation. Outre la correction des ruptures, ce modèle permet, à partir d'un jeu de séries rurales et urbanisées, de tester la significativité des tendances dues à l'effet d'urbanisation. L'utilisateur peut alors choisir de corriger les séries de cet effet.

En collaboration avec le ZAMG, 13 séries Viennoises rurales, urbaines et périurbaines sont étudiées. On montre que seules les stations périurbaines sont touchées : l'urbanisation progressive de ces postes provoque une élévation artificielle des températures moyennes de l'ordre de 0,05 à 0,1°C par décennie. Les stations centrales de Vienne ne sont en revanche pas affectées : déjà urbanisé lorsque les observations ont débuté, leur environnement n'a pas évolué. En prenant en compte l'effet d'urbanisation directement, le modèle UBRIS permet une meilleure estimation du changement climatique global sur les séries observées.

2

## Un scénario climatique à haute résolution sur le globe

Depuis que les calculateurs numériques tentent de résoudre les équations de l'atmosphère, le choix de la résolution horizontale a été une question cruciale. Mieux représenter les mers et les montagnes permet de mieux représenter le temps qu'il fait et le climat.

En concevant le modèle ARPEGE, doté d'une maille variable, au début des années 1990, Météo-France s'est doté d'un outil permettant de favoriser la résolution d'une région du globe afin de tirer parti du mieux possible des moyens de calcul disponibles. Depuis quelques années, une série de simulations climatiques pour la période 1950-2100 a été réalisée en utilisant les scénarios du GIEC pour l'évolution des océans et en recalculant à plus haute résolution les variables atmosphériques. Dans ces expériences, la résolution varie entre 50 km sur la région d'intérêt et 300 km aux antipodes. Dans la majorité des cas la région d'intérêt est l'Europe, mais pour deux scénarios, il s'agit de l'Amérique du Nord et pour un scénario de l'extrême Orient. Il reste de nombreuses régions non couvertes à haute résolution, en particulier dans l'hémisphère Sud.

L'arrivée récente du calculateur NEC-SX9 de Météo-France et sa grande disponibilité pendant les premières semaines qui ont suivi son installation ont permis de réaliser une expérience colossale en terme de ressources : 150 ans simulés avec une résolution de 50 km partout sur le globe. La figure montre la réponse en hiver et en été pour la température de la fin du 21<sup>e</sup> siècle.

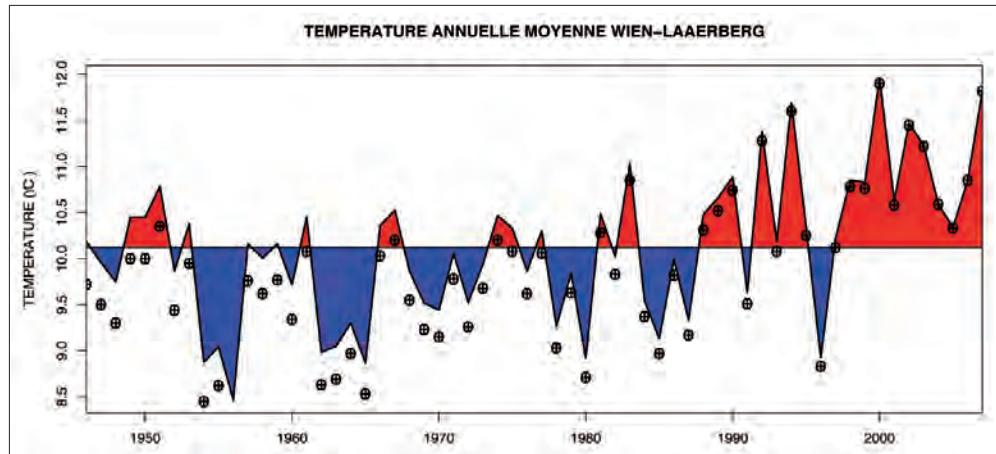
4

## En route pour le 5<sup>e</sup> rapport du GIEC

Contribuer au prochain rapport du GIEC devant paraître en 2013 implique de réaliser de nouvelles simulations des climats du passé, ainsi que des projections climatiques à partir de début 2010. Pour cela, un nouveau modèle, CNRM-CM5, a été développé en collaboration avec le Cefacs. Il repose sur le couplage des dernières versions des modèles d'océan NEMO et d'atmosphère ARPEGE. La résolution horizontale de CNRM-CM5, proche de 1° en longitude/latitude, a été doublée par rapport à l'ancienne version du modèle. Les composantes glace de mer et routage des fleuves de CNRM-CM5 sont respectivement représentées par GELATO et TRIP. Outre une amélioration de la formulation du rayonnement dans ARPEGE, une des principales nouveautés de ce nouveau système couplé réside dans le traitement par SURFEX des surfaces continentales et des échanges d'énergie entre l'océan et l'atmosphère. La prise en

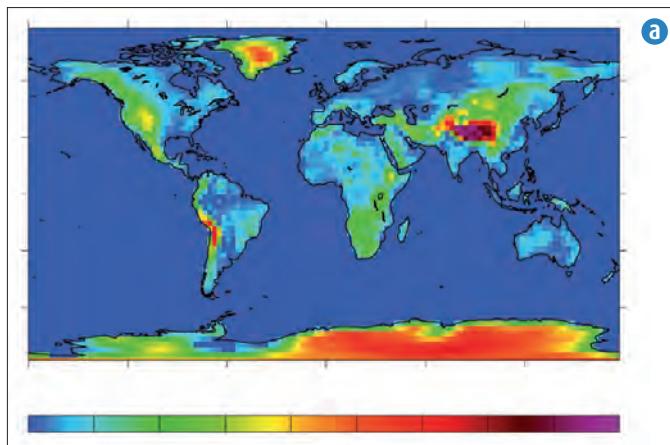
compte de certains facteurs influençant l'évolution et la variabilité du climat a été améliorée. Ainsi, les impacts climatiques simulés des aérosols sulfatés et des éruptions volcaniques ont été confrontés à des observations. Les enseignements qui en ont été tirés ont permis d'améliorer la représentation de ces processus dans CNRM-CM5. De nombreuses simulations-tests ont été déjà réalisées avec CNRM-CM5. Elles montrent que, sur plusieurs points, les simulations climatiques produites par le nouveau modèle se comparent favorablement aux simulations de référence existantes. En particulier, la représentation de la glace de mer en Arctique est plus réaliste, en raison notamment d'une amélioration de la dynamique atmosphérique. Par ailleurs, le phénomène El Niño et son impact sur la mousson africaine sont désormais bien mieux simulés.

3



**2**

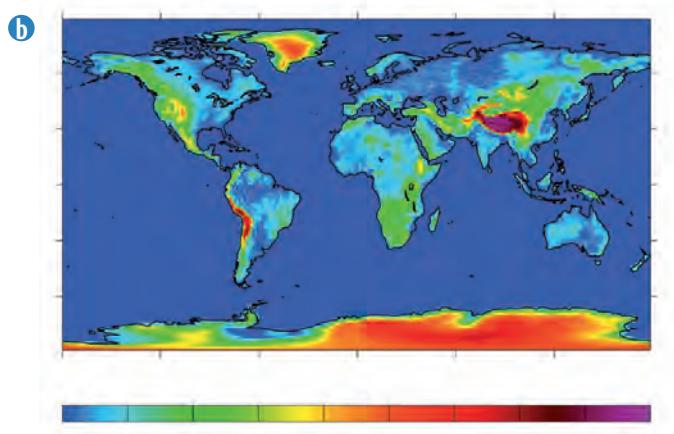
Evolution des températures annuelles moyennes de la série périurbaine de Vienne-Laaerberg, après simple correction des ruptures (⊕) puis élimination de l'effet d'urbanisation par UBRIS (trait plein).



**a**

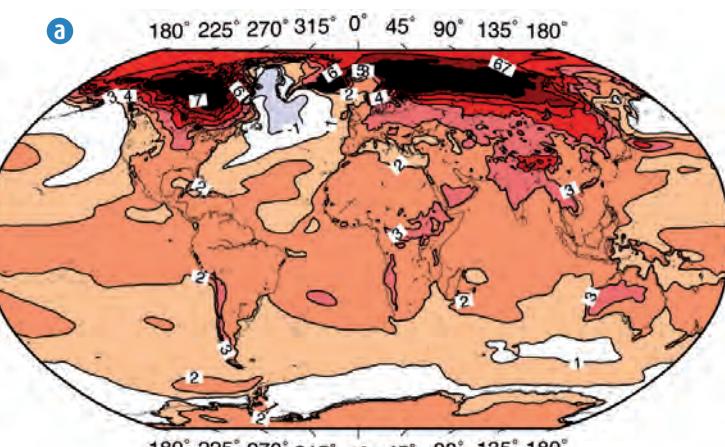
a : Représentation de l'orographie dans l'ancienne version de CNRM-CM

▼ b : Représentation de l'orographie dans la nouvelle version de CNRM-CMS



**b**

**3**



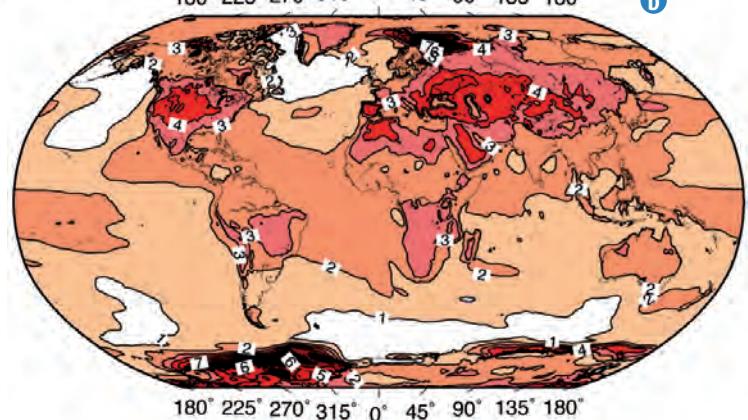
**a**

**4**

Différence de température moyenne entre 2071-2100 et 1961-1990 pour l'hiver boréal (a) et l'été boréal (b) ; écartement des isothermes 1 K.

180° 225° 270° 315° 0° 45° 90° 135° 180°

**b**



## Détection statistique des changements climatiques

Dans le cadre de l'étude de l'impact anthropique sur le climat, l'évaluation des changements climatiques contenus dans les séries observées constitue un élément clé. Afin de mener cette évaluation, le GIEC a, notamment, introduit la notion de détection des changements climatiques, dont le but est de séparer les signaux de changements climatiques et les fluctuations naturelles intrinsèques au système climatique.

La contribution de Météo-France sur le thème de la détection des changements climatiques a d'abord consisté à proposer des méthodes statistiques de détection adaptées à l'échelle régionale permettant d'aller au-delà des résultats déjà obtenus à l'échelle globale. Ces méthodes ont ensuite été appliquées aux jeux de données homogénéisées de températures et de précipitations couvrant la métropole. Des changements significatifs ont ainsi été mis en évidence sur les températures annuelles et saisonnières. La présence d'un

réchauffement général a été confirmée, mais surtout, ces travaux ont permis d'identifier une signature spatiale des changements en cours. Cette signature est statistiquement robuste, et de ce fait, elle peut être interprétée physiquement ou comparée à des résultats de simulations. L'étude des précipitations annuelles a également révélé la présence de changements au cours de la période 1900-2006, bien que le signe de ces changements ne soit pas constant sur l'ensemble du territoire. D'autres résultats originaux ont été obtenus à l'échelle du bassin méditerranéen dans le cadre du projet du 6<sup>e</sup> PCRD CIRCE. De nombreuses autres applications de ces techniques sont désormais envisagées afin d'affiner le diagnostic des changements climatiques en cours, notamment sur d'autres variables climatiques.

5

## Changement de climat régional : l'approche probabiliste du projet ENSEMBLES

Une des originalités du projet européen ENSEMBLES qui s'achève en 2009 est la production de lois de probabilité pour les scénarios régionaux. En effet, à l'échéance 2021-2050, la réponse sur l'Europe du changement climatique est assez incertaine.

Dans ce projet, 14 modèles régionaux, dont notre modèle ALADIN, ont été utilisés pour fournir une population de scénarios possibles à résolution 25 km sur l'Europe. Certains modèles régionaux ont été pilotés par plusieurs modèles globaux, ce qui porte à 17 le nombre d'expériences disponibles. Contrairement au projet européen précédent PRUDENCE, il a été décidé d'attribuer à chaque modèle un poids différent. Pour cela, les modèles régionaux ont été pilotés par des observations sur la période 1961-2000. Pour six types de diagnostics, chaque modèle a reçu une note mesurant son degré

de réalisme dans la reproduction des observations. Ces notes ont été agrégées pour fournir un poids à chaque modèle régional. A partir de là, chaque expérience a reçu une probabilité proportionnelle au poids du modèle régional utilisé et on a constitué une loi de probabilité pour la réponse du changement climatique qui tienne compte de trois facteurs : la probabilité de chaque expérience, la variabilité interne de chaque modèle, et la possibilité qu'il existe des modèles intermédiaires entre nos 17 modèles.

La figure page 27 montre la densité de probabilité conjointe de température et de précipitation à Paris lors de chaque saison, celle jointe à cet article page 31 présente la réponse moyenne multi-modèle estivale et hivernale.

6

## Evaluation de l'impact des moyens de transport sur le climat

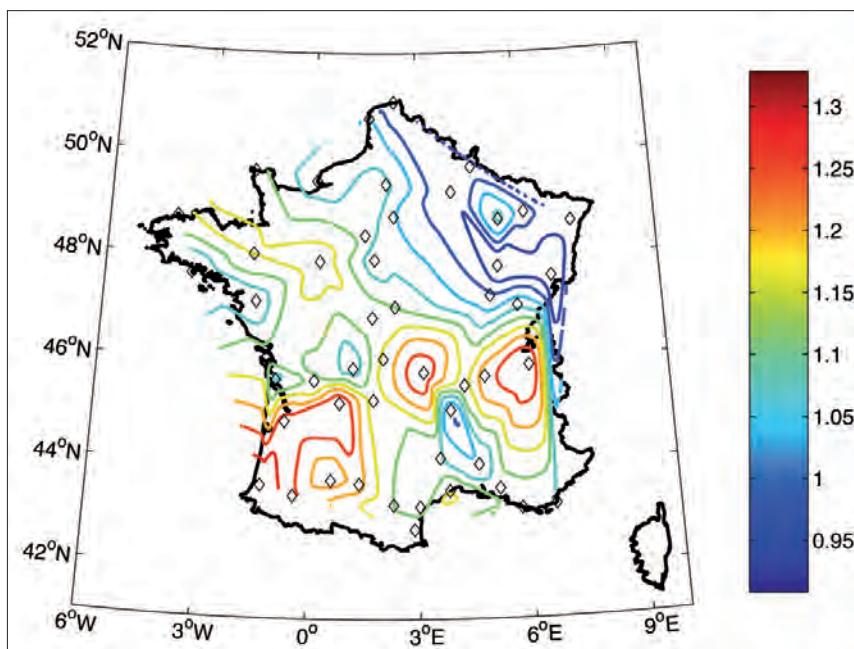
Les moyens de transports terrestres, maritimes et aériens rejettent dans l'atmosphère une grande variété de constituants chimiques, en surface comme en altitude, dans des zones géographiques très diverses. Un projet de recherche Européen baptisé QUANTIFY a été mis en place pour mieux quantifier les impacts chimiques et climatiques des différents moyens de transports.

Le CNRM a participé aux simulations d'impact sur le climat à l'aide de son modèle couplé atmosphère-océan. A côté du forçage radiatif créé par les rejets de gaz carbonique, le modèle prend en compte les effets radiatifs et chimiques des émissions d'oxydes d'azote, de monoxyde de carbone, de suies (aérosol carboné) et d'aérosol sulfaté ainsi que l'effet radiatif des traînées de condensation des avions. Les processus chimiques ont été paramétrés et une validation a été faite par comparaison à des simulations couplées, sur des périodes courtes, du modèle de chimie et transport MOCAGE et du modèle de circulation générale Arpège-Climat.

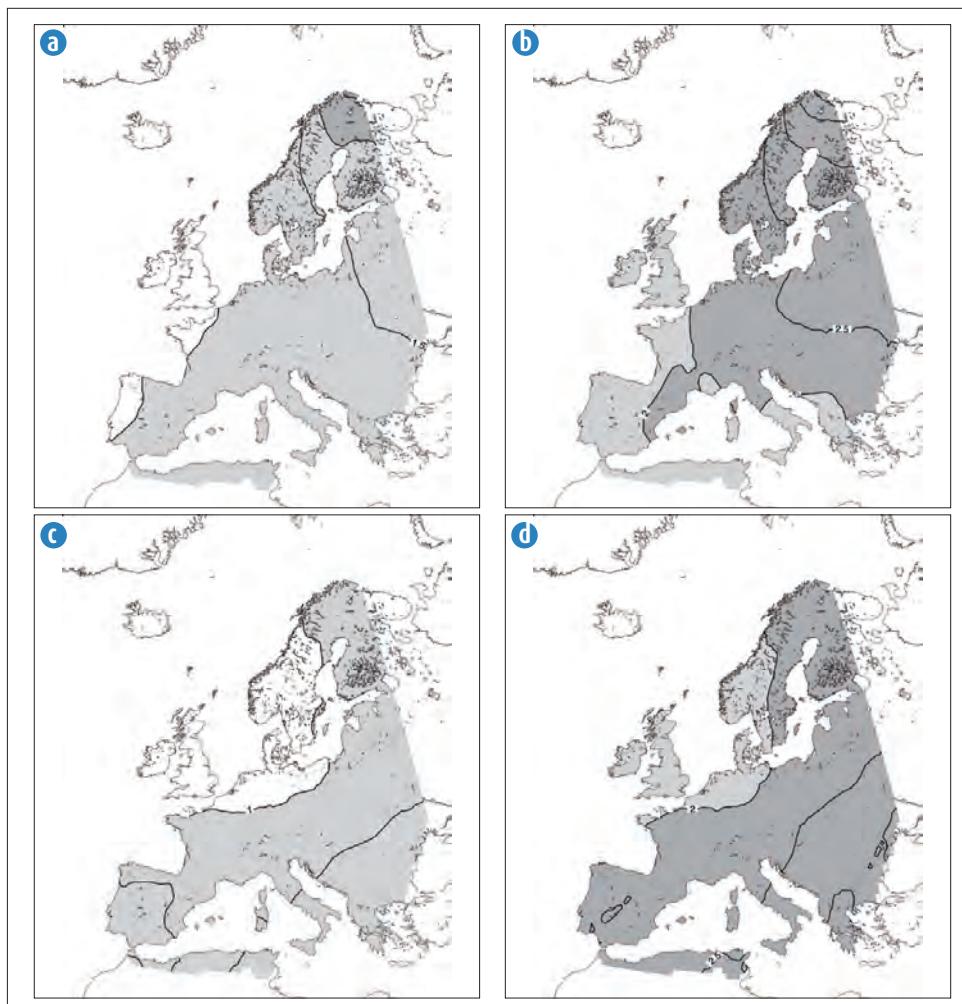
6 simulations transitoires de 1860 à 2100 ont été réalisées, en séparant d'une part les émissions de CO<sub>2</sub> et celles des autres constituants (CO, NO<sub>x</sub>, aérosols) et d'autre part les différents moyens de transports. En 2100, l'augmentation de température à 2 m due au CO<sub>2</sub> rejeté par les transports est de 0,6 degré environ, l'aviation représentant un tiers de cette augmentation. Les autres émissions ont un impact inférieur et leurs signes changent suivant les moyens de transport : positif pour l'aviation (production d'ozone et de traînées de condensation qui contribuent à l'effet de serre), négatif pour les bateaux (émission d'aérosol et formation de nuages bas qui augmentent la réflexion vers l'espace du rayonnement solaire, forte réduction du temps de vie du méthane). En définitive, en considérant tous les transports, l'impact des émissions autres que le CO<sub>2</sub> est faible mais cette évolution suppose des transports routiers stabilisés et de plus en plus propres.

Il reste à évaluer plus en détail le climat simulé du 21<sup>e</sup> siècle pour y déceler des changements régionaux qui pourraient être l'empreinte des divers moyens de transport et qui seraient utiles pour maîtriser leur développement.

7



5

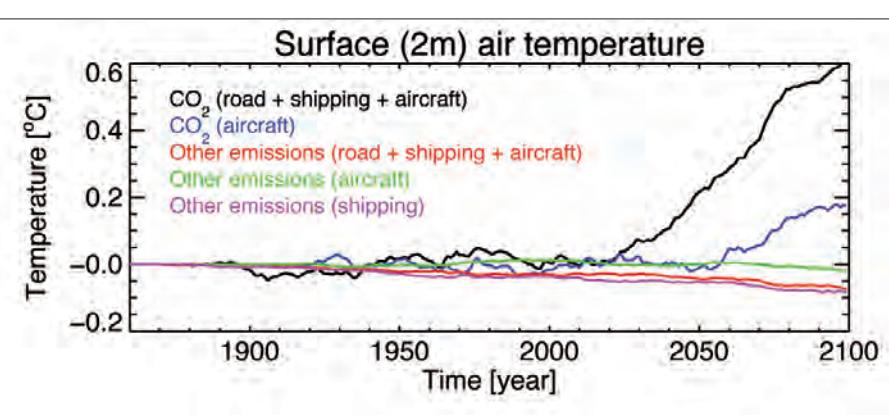


6

Réponse moyenne multi-modèle (17 modèles régionaux) de température sur l'Europe issue des simulations du projet ENSEMBLES en hiver (a,b) et en été (c,d) pour la période 2021-2050 par rapport à 1961-1990 ; bornes inférieures (a,c) et supérieures (b,d) d'un intervalle de confiance à 99 % ; isothermes tous les 0.5°C

7

Évolution de la température moyenne globale en fonction du temps pour un scénario d'émission SRES-A1, en séparant les contributions des émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres constituants, pour différents types de transports (terrestres, aériens, maritimes)



# Impacts du changement climatique et stratégies d'adaptation

## L'évolution du climat dans les Pyrénées Françaises ces 50 dernières années : l'évidence d'un réchauffement au début des années 1980 et de son impact sur l'enneigement

En l'absence de longues séries d'observations nivo-météorologiques dans les Pyrénées françaises, les modèles Safran-Crocus ont été utilisés pour établir une climatologie des conditions météorologiques et de l'enneigement sur ce secteur depuis 1958. Le principal travail a été de rechercher les données météos disponibles depuis cette date dans les massifs montagneux pyrénnéens français ou espagnols pour le schéma d'analyse variationnelle de Safran. 50 années de simulations de la chaîne Safran-Crocus sur les 10 massifs français plus l'Andorre ont été réalisées. La critique et l'évaluation des résultats montrent une bonne corrélation pour les températures de l'air et des problèmes récurrents sur les précipitations et les hauteurs de neige (pb mesure neige fraîche en montagne et effet du transport de neige par le vent). Ces limites étant connues, une climatologie des condi-

tions météorologiques et de l'enneigement a été réalisée à partir de ces données simulées. Le gradient Ouest/Est est quantifié avec des précipitations annuelles 2 fois plus marquées à l'Ouest ( $\rightarrow$  à 2 000 mm) qu'à l'Est ( $\leftarrow$  à 1 000 mm) et des températures plus chaudes à l'Est (près de 6 °C à 1 800 m) qu'à l'Ouest (environ 5 °C). Quant aux hauteurs de neige, elles sont significativement plus fortes à l'Ouest qu'à l'Est quelle que soit l'altitude. L'étude des tendances temporelles montre clairement un réchauffement d'environ 1 °C sur l'ensemble de la chaîne pyrénnéenne avec une rupture vers 1981. Pour les précipitations, la grande variabilité spatiale entre massif ne permet pas de dégager une tendance claire. Une baisse de la hauteur de neige au sol est constatée à basse et moyenne altitude. L'étude va se poursuivre en intégrant les Pyrénées espagnoles pour un projet européen baptisé FluxPyr.

8

## Estimation de l'impact du changement climatique sur les incendies de forêts

Les feux de forêts constituent un risque important en France, aux enjeux économiques forts. Météo-France a été chargé par la Mission sur l'extension éventuelle des zones à risque élevé d'incendie de forêts de caractériser l'évolution passée et future du risque feu de forêt sur la France.

Ces travaux s'appuient sur le calcul de l'indice IFM afin de caractériser l'évolution du risque météorologique d'incendie. Cet indice indique, grâce à la prise en compte des conditions météorologiques, le danger global d'incendie en synthétisant le danger d'éclosion et le danger de propagation. La plupart des composantes de cet indice IFM devrait connaître une évolution allant dans le sens d'une augmentation du risque feu. Cette étude a été menée sur la période 1958-2008, elle s'appuie sur la réanalyse du modèle Safran. Cette réanalyse a été utilisée en entrée du modèle opérationnel de prévision d'IFM, opéré par Météo-France pour la Sécurité Civile.

Les résultats s'appuient également sur la confrontation des périodes 1961-1980 et 1989-2008. La comparaison de ces deux périodes met en lumière une hausse marquée de l'IFM moyen sur l'ensemble du territoire français. L'IFM a augmenté de 22 % sur la période annuelle et de 24 % sur la période estivale. L'augmentation de l'IFM moyen durant l'été est localement très marquée. Elle peut atteindre 20 pour certains départements, comme l'Hérault et la Corse du Sud. La tendance linéaire à la hausse sur les 50 dernières années est statistiquement significative sur la moitié sud du pays. Les tendances sont très nettes également en terme de dépassement de seuils. Dans de nombreuses régions françaises, le nombre annuel de jours avec IFM > 20 augmente de plus de 10 jours. Cette tendance peut atteindre 50 jours localement, soit deux mois de plus par an. La surface du territoire métropolitain concernée par au moins un jour tous les ans avec IFM > 20 a également doublé entre la période 1961-1980 et la période 1989-2008.

Ces résultats suggèrent donc un allongement des périodes de feux et une augmentation du nombre de régions concernées par les feux de forêt.

## Caractérisation des sécheresses en France (1958-2008) avec la chaîne hydrométéorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU

Les sécheresses impactent des domaines d'activité variés (alimentation en eau potable, irrigation, hydroélectricité, etc.) qui reposent sur des composantes spécifiques du cycle hydrologique. Le suivi des ressources en eau requiert donc l'utilisation d'indices reliés à la fois aux sécheresses météorologiques, agricoles et hydrologiques. Cette étude propose une analyse rétrospective sur la France de tels événements à l'aide de la chaîne SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM), qui a été utilisée pour constituer une réanalyse hydrométéorologique horaire à haute résolution spatiale sur la période août 1958 – juillet 2008.

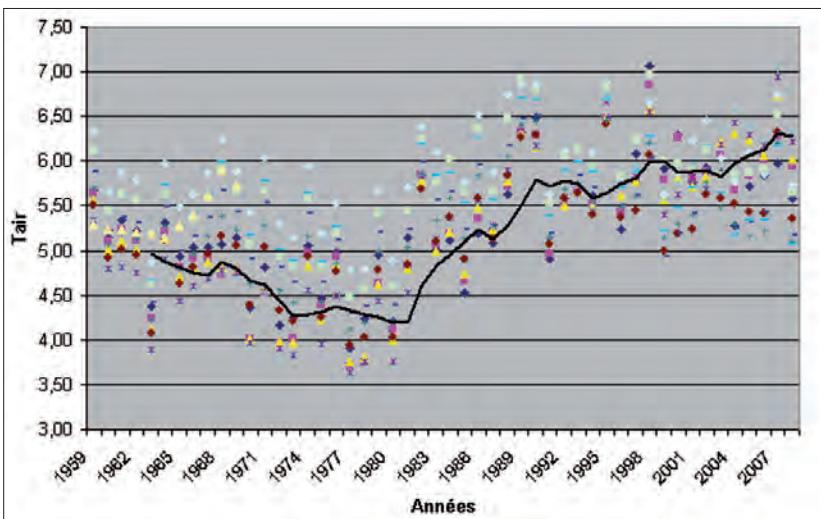
Les sécheresses météorologiques sont caractérisées au travers du Standardized Precipitation Index calculé à différentes échelles de temps. Les sécheresses agricoles et hydrologiques sont identifiées en appliquant une méthode similaire de standardisation par rapport au climat local, respectivement aux variables d'humidité du

sol et de débit. Une telle approche permet d'appréhender de manière cohérente la propagation des sécheresses à travers le cycle hydrologique, en considérant des indices issus de contenus en eau de chacune de ses composantes.

Des statistiques sur 50 ans des événements de sécheresse – nombre, durée, sévérité et magnitude – ont été calculés à l'échelle locale pour déterminer les spécificités régionales à différentes échelles de temps et à différents niveaux du cycle hydrologique. Les caractéristiques spatio-temporelles des événements de sécheresse ont ensuite été utilisées pour comparer à l'échelle nationale les événements marquants des cinquante dernières années. Cette climatologie des sécheresses servira de référence pour évaluer l'impact du changement climatique sur ces événements en France.

9

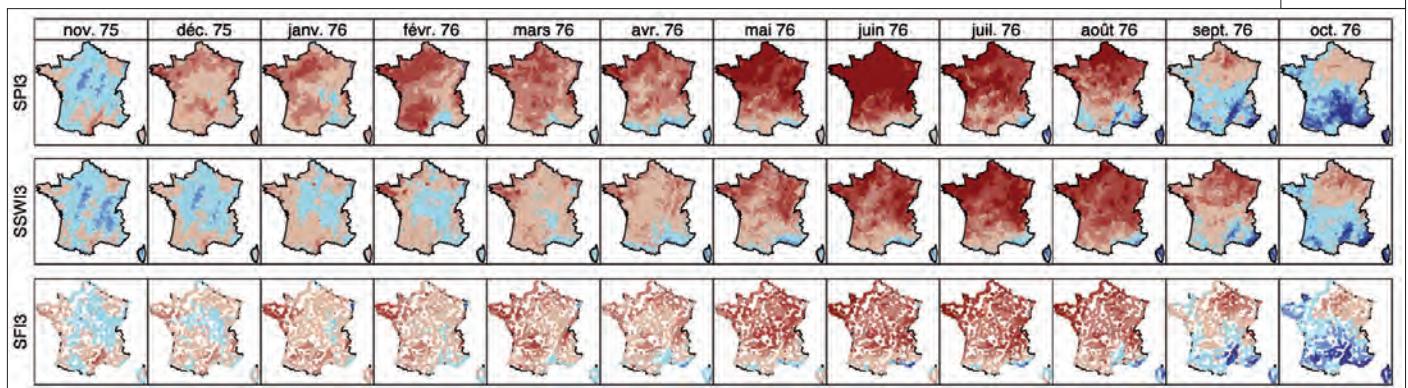
10



8

▲ Evolution de 1958 à 2007 de la température moyenne annuelle de l'air à 1 800 m simulée par Safran pour les 10 massifs pyrénéens français et l'Andorre avec une courbe de tendance en moyenne mobile sur 5 ans.

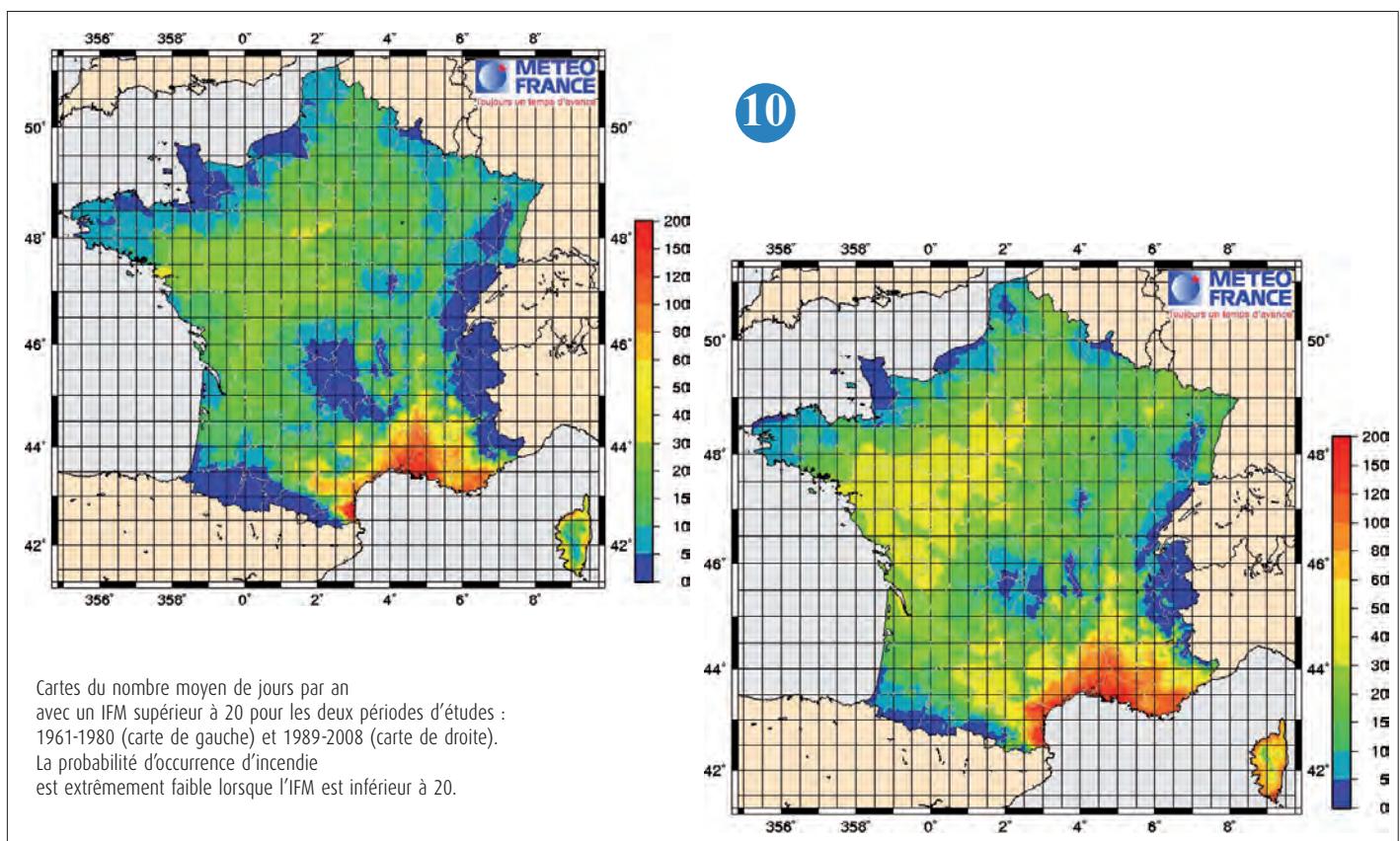
- Extrêmement humide
- Très humide
- Modérément humide
- Légèrement humide
- Légèrement sec
- Modérément sec
- Sécheresse sévère
- Sécheresse extrême



9

▲ Évolution de la sécheresse de 1976 avec des indices basés sur des déficits sur 3 mois en termes de précipitations (haut), humidité du sol (milieu) et débits des rivières (bas).

10



Cartes du nombre moyen de jours par an avec un IFM supérieur à 20 pour les deux périodes d'études : 1961-1980 (carte de gauche) et 1989-2008 (carte de droite). La probabilité d'occurrence d'incendie est extrêmement faible lorsque l'IFM est inférieur à 20.

## Climatologie des flux de carbone des sols et de la végétation sur la France

La végétation et le sol échangent de l'énergie, de l'eau, et du carbone avec l'atmosphère. Ces flux sont reliés à l'humidité du sol et à la biomasse de la végétation. Ces quantités présentent une évolution saisonnière et inter-annuelle qu'il est important de bien représenter pour évaluer les effets du changement climatique.

Le modèle ISBA-A-gs, permet de décrire l'évolution de ces variables en fonction des conditions météorologiques et des événements climatiques (les sécheresses par exemple). Des simulations à haute résolution (8 km) ont été réalisées sur la France pour la période 1994-2006, en utilisant la carte de végétation ECOCLIMAP2 et les variables atmosphériques issues de la climatologie SAFRAN. L'analyse des simulations permet de mieux caractériser l'impact de la vague de chaleur de 2003 sur l'humidité des sols et sur l'indice foliaire de la végétation. La sécheresse a affecté une large partie sud-est de la métropole, ainsi que certaines régions du Nord de la France. Les simulations indiquent cependant que les anomalies de l'humidité des sols et de l'indice foliaire présentent des structures différentes. Ainsi, en juillet 2003, un déprérisissement abnormal de la végétation affecte essentiellement la région Midi-Pyrénées, la vallée du Rhône et de la Saône, la Limagne, la Plaine du Forez, et les zones côtières de la Corse. Il est moins généralisé que l'assèchement anormal des sols. Dans certaines régions, comme les Ardennes ou le nord des Alpes, la végétation semble même mieux se développer alors que les sols sont plus secs. Ces différences sont un peu atténuées en août.

Ce résultat illustre la complémentarité des deux variables (indice foliaire et humidité des sols), qui répondent de manière différenciée aux événements climatiques.

11

## Impact du changement climatique sur l'évolution des forêts françaises

Le changement climatique pourrait modifier sensiblement la diversité végétale d'ici à la fin du 21<sup>e</sup> siècle, mais notre capacité à prédir ces modifications est très faible. Le projet QDiv dirigé le laboratoire Ecologie, Systématique et Evolution (ESE, CNRS/Université Paris Sud), a pour but de développer des outils quantitatifs de prédition des effets des changements du climat sur la diversité et la répartition spatiale des plantes en France. Ce projet s'appuie sur un ensemble d'observations, d'expériences de terrain et de modèles (modèles statistiques ou modèles mécanistes basés sur la représentation de processus comme la photosynthèse). Les comparaisons entre observations, expériences et modèles, permettront d'accroître la qualité des prédictions et de dégager un consensus sur les risques associés aux changements du climat et du CO<sub>2</sub>.

Le CNRM et le CERFACS contribuent à ce projet en fournissant à tous les participants des simulations du climat du 21<sup>e</sup> siècle à haute résolution sur la France. Le CNRM simule aussi les écosystèmes forestiers avec le modèle mécaniste de dynamique des écosystèmes naturels IBIS. Pour le 20<sup>e</sup> siècle, le modèle simule sur la majorité de la France des forêts dominées par des arbres à feuilles caduques et des conifères (figure a). Sur le pourtour Méditerranéen, le modèle simule un mélange d'arbres à feuilles persistantes (chêne vert) et d'arbustes. Ceci correspond bien à la végétation naturelle en France. Selon le modèle, à la fin du 21<sup>e</sup> siècle, les forêts de feuillus et de conifères seront limitées aux zones montagneuses et au Nord-Est de la France (figure b), alors que les arbres méditerranéens pourront pousser sur tout le Sud-Ouest.

Les participants au projet comparent maintenant les résultats des modèles pour comprendre leurs différences et déduire des résultats robustes qui seront ensuite comparés aux expériences de terrain et présentés aux décideurs.

12

## Le Grand Pari : pour une adaptation de l'agglomération parisienne au contexte du changement climatique

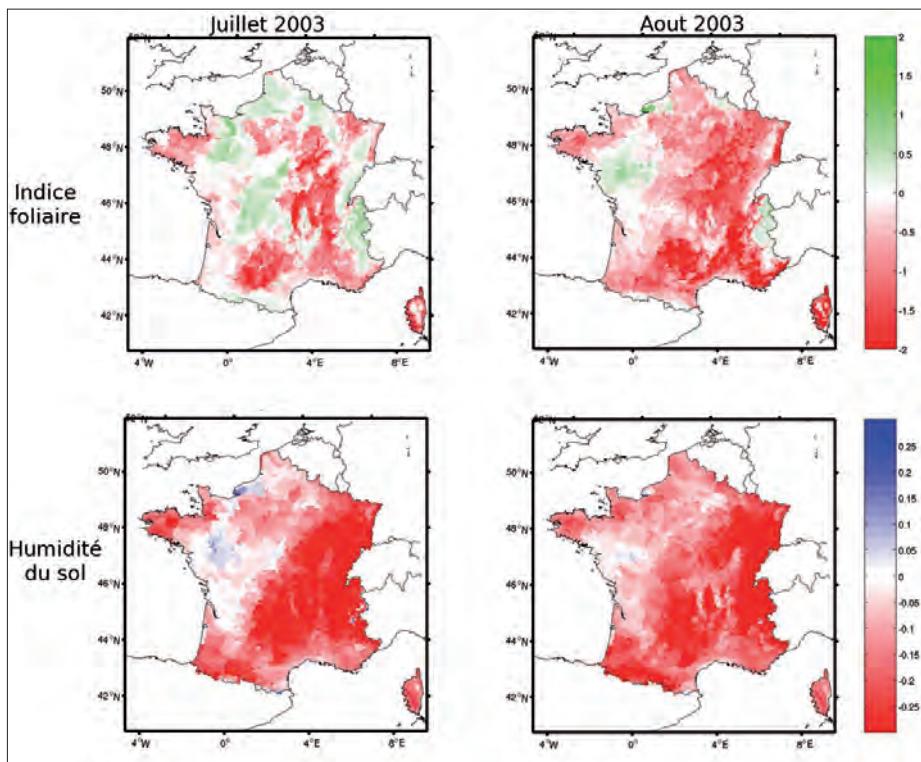
Météo-France a participé, au sein du groupe Descartes coordonné par le cabinet d'urbanisme d'Yves Lion, à l'étude lancée par le ministère de la culture sur le "Grand Pari de l'Agglomération Parisienne". Lors de celle-ci, dix consortia regroupés autour de cabinets d'urbanisme ont ainsi effectué des études visant à tracer des pistes générales sur la manière de faire évoluer l'agglomération parisienne à échéance 2030.

Si tous ont proposé d'une manière ou d'une autre de "verdir" l'agglomération (pour lutter contre le réchauffement climatique via une captation des émissions de CO<sub>2</sub>), les travaux menés au CNRM ont de plus permis de quantifier l'impact sur le micro-climat de scénarios d'aménagement de l'Île-de-France à échelle 2030. Ce scénario, fourni par les autres membres du consortium, était basé sur une extension de 40 % des forêts (forêts exploitées pour la menuiserie ou le bois de chauffage), des retenues d'eau étendues, une transformation de cultures céréalier en cultures maraîchères d'été. Ont aussi été appliquées des peintures plus réfléchissantes sur les toits et les routes en petite et grande couronne.

En intégrant ces scénarios dans le modèle de recherche atmosphérique MesoNH, il a été possible de mettre en évidence (figure a) une diminution de l'îlot de chaleur nocturne (en période de canicule) de 3 degrés en zone périurbaine et 2 degrés dans Paris intra-muros, alors même qu'aucune modification n'était proposée à l'intérieur du boulevard périphérique.

Le groupe Descartes a ainsi pu montrer que l'on peut faire des aménagements réalisables d'assez grande envergure, sur une agglomération déjà existante, ayant un impact favorable à la fois en termes économique, de loisirs, d'émissions de gaz à effet de serre ainsi que sur le microclimat local.

13

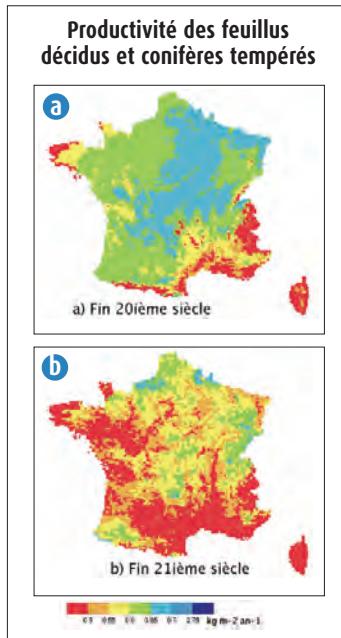


11

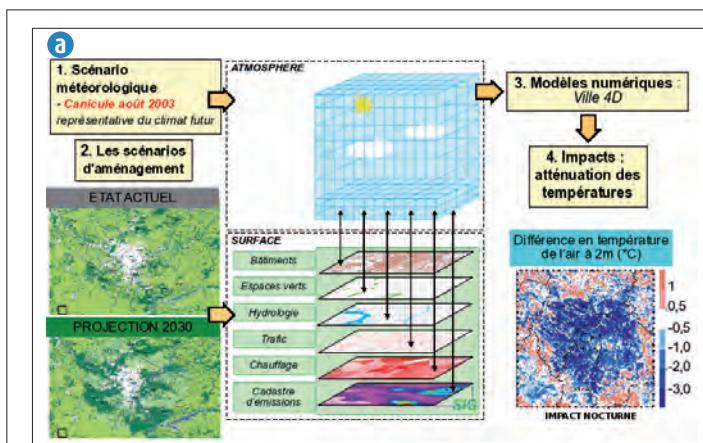
Effet de la sécheresse de 2003 sur la végétation simulée par le modèle ISBA-A-gs : anomalie en juillet (à gauche) et en août (à droite) 2003 de l'indice de la végétation (en haut) et de l'humidité des sols (en bas). Une période de référence de 12 années (1994-2006) est utilisée.

La couleur rouge représente une diminution de la variable considérée entre l'année 2003 et la moyenne 1994-2006.

12

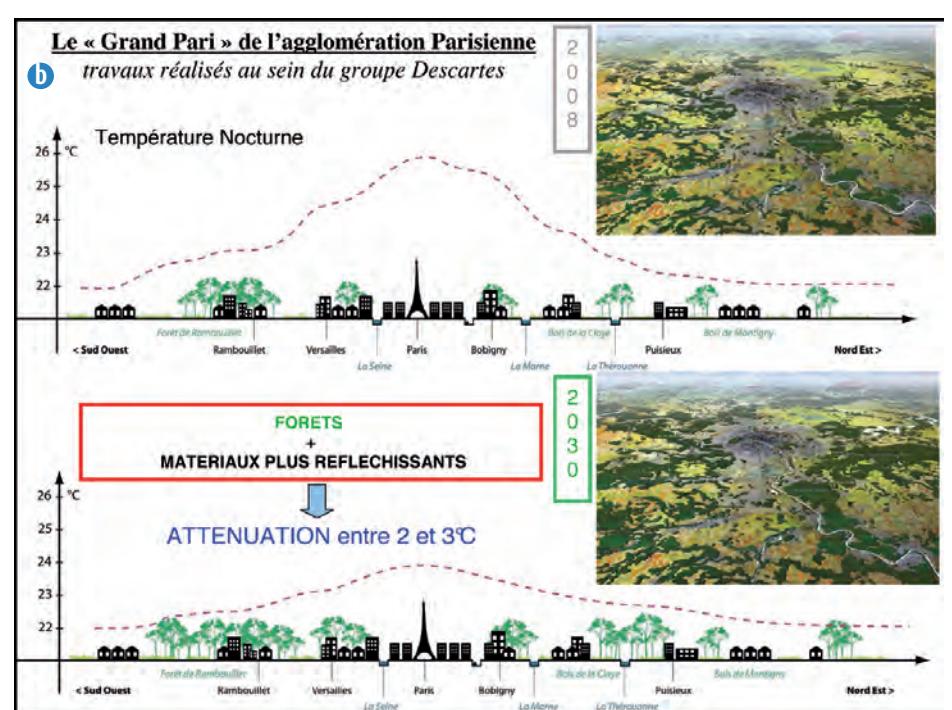


Productivité primaire nette des arbres à feuilles caduques et des conifères simulée par le modèle de dynamique des écosystèmes IBIS a) à la fin du 20<sup>e</sup> siècle et b) à la fin du 21<sup>e</sup> siècle.



13

a - Méthodologie d'étude mise en place lors du Grand Pari



# Études environnementales liées à l'atmosphère

En 2009, de multiples travaux de recherche ont été conduits en hydrométéorologie, en océanographie, en nivologie, ainsi que dans le domaine de la chimie atmosphérique et de la qualité de l'air. On soulignera particulièrement des avancées notables comme la prévision d'ensemble des débits ainsi que la campagne de grande envergure Mégapoli visant à mieux comprendre l'impact des mégacités sur la qualité de l'air.

## Hydrométéorologie

### Prévision d'ensemble hydrométéorologique d'épisodes de pluies intenses en région méditerranéenne

En automne, le Sud-est de la France est régulièrement exposé à des crues-éclair générées par des épisodes de fortes pluies. Ce travail cherche à caractériser l'incertitude sur la prévision de ces événements ainsi que sa propagation des prévisions météorologiques jusqu'à la réponse hydrologique. Une approche en prévision hydrométéorologique d'ensemble est développée et présentée ici pour un cas de système convectif quasi-stationnaire avec des cumuls de pluies importants.

La prise en compte des incertitudes atmosphériques à fine échelle requiert une approche spécifique en prévision d'ensem-

ble pour laquelle le modèle AROME est utilisé. L'incertitude sur les conditions initiales d'échelle synoptique et aux limites est fournie par les onze membres de la prévision d'ensemble grande échelle PEARP de Météo-France. Une assimilation de données à méso-échelle est également réalisée dans AROME pour être au plus près des observations. Enfin, les prévisions AROME obtenues sont utilisées en entrée du modèle hydrologique ISBA-TOPMODEL pour caractériser l'incertitude sur la prévision des débits. Les champs de pluies AROME obtenus montrent une variabilité significative des précipitations (intensité et localisation) autour

des observations. Quant aux prévisions hydrologiques, beaucoup sous-estiment les débits, mais cette approche en ensemble indique la possibilité d'une crue du Gardon à Boucoiran contrairement à la prévision déterministe AROME.

Les incertitudes sur les conditions initiales et les erreurs du modèle pour AROME et ISBA-TOPMODEL seront également considérées par la suite dans le cadre du projet national MEDUP.

1

### Impact de l'assimilation des débits sur les prévisions hydrologiques d'ensemble

La chaîne hydrométéorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM), développée à Météo-France et à Mines Paris Tech, permet de simuler les bilans hydrologiques de surface ainsi que les débits sur la France entière (900 stations). Cette chaîne a rendu possible la mise en place de prévisions d'ensemble de débits, en utilisant les prévisions d'ensemble météorologiques (EPS) à 10 jours d'échéance du CEPMMT. Cette prévision d'ensemble de débits a montré son utilité à des fins d'alerte ou de pré-alerte. Cependant, les imperfections des modèles et forçages atmosphériques peuvent mener à manquer des événements importants.

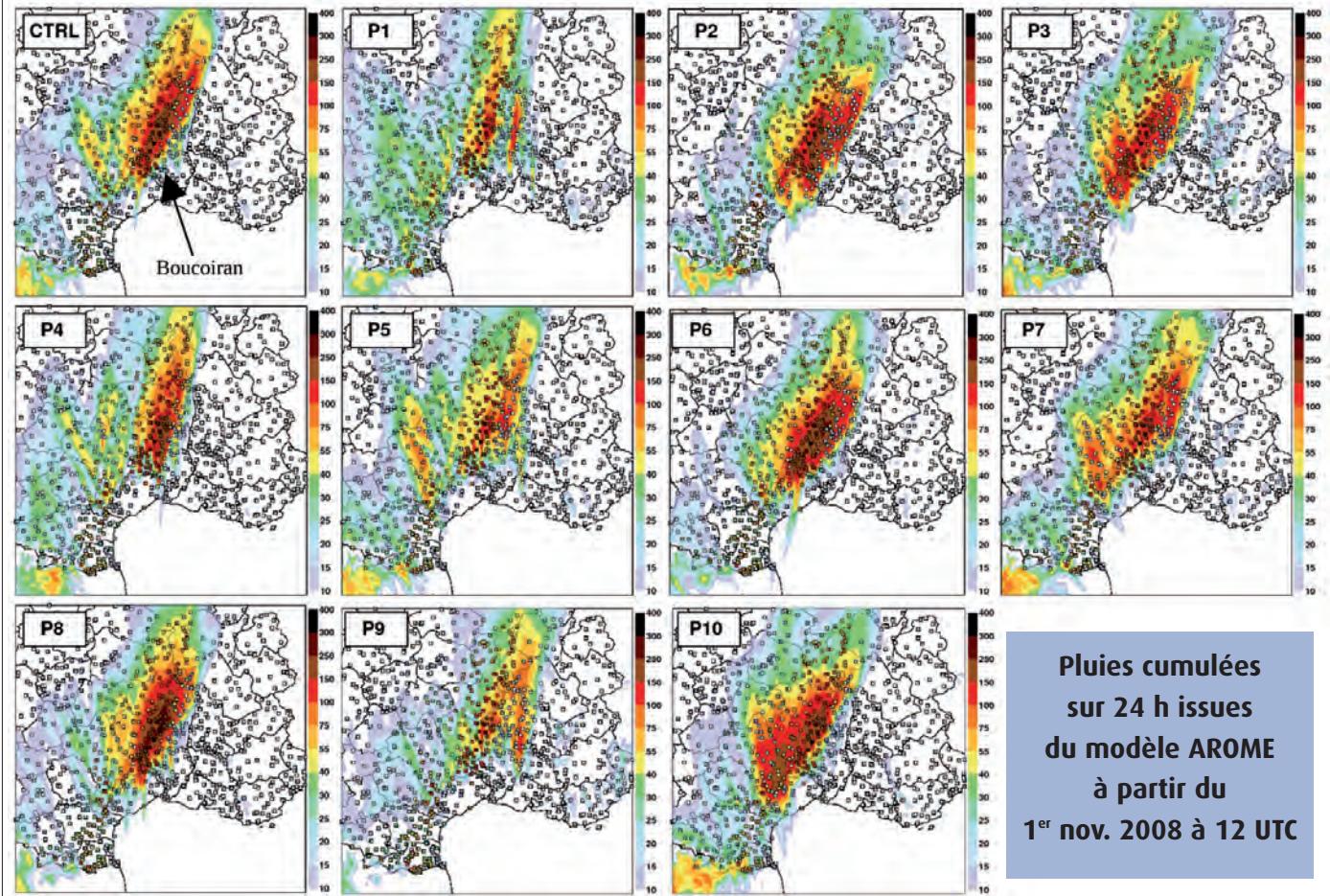
C'est pourquoi un système d'assimilation de débits passés a été construit sur la base de l'outil PALM du Cerfacs. Il a pour but de fournir des états initiaux de meilleure qualité aux prévisions d'ensemble de débits. Son principe est de modifier l'humidité du sol dans SIM, afin de rapprocher les simulations de débits des débits observés. De plus, une amélioration de la physique du modèle a été testée. Les prévisions d'ensemble de débits initialisées par les états initiaux assimilés ont été comparées à celles d'origine sur une période de 18 mois. Cette comparaison a montré une nette diminution de l'erreur tout

au long de l'échéance, due à l'assimilation pour les premiers jours, et à l'amélioration de la physique du modèle ensuite. Les scores ensemblistes ainsi que ceux utilisés par les prévisionnistes sont améliorés, montrant que ces prévisions seront plus faciles à utiliser par les Services de Prévision des Crues.

Une implémentation opérationnelle du système d'assimilation est prévue dans un futur proche.

2

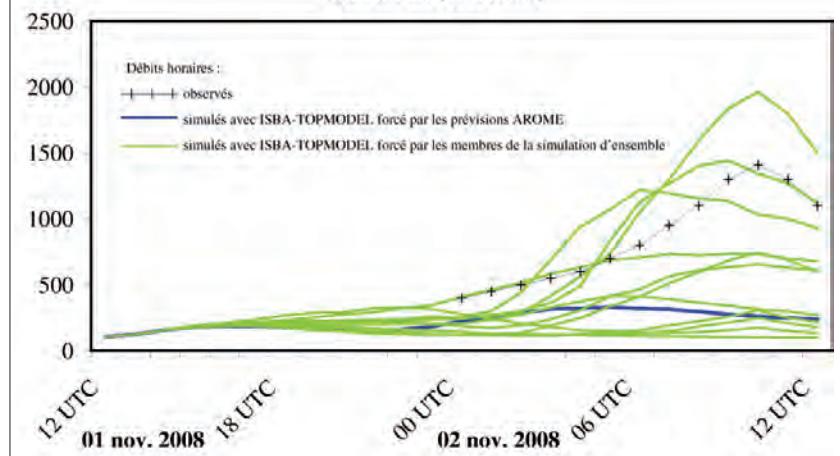
## Ensemble PEARP-AROME



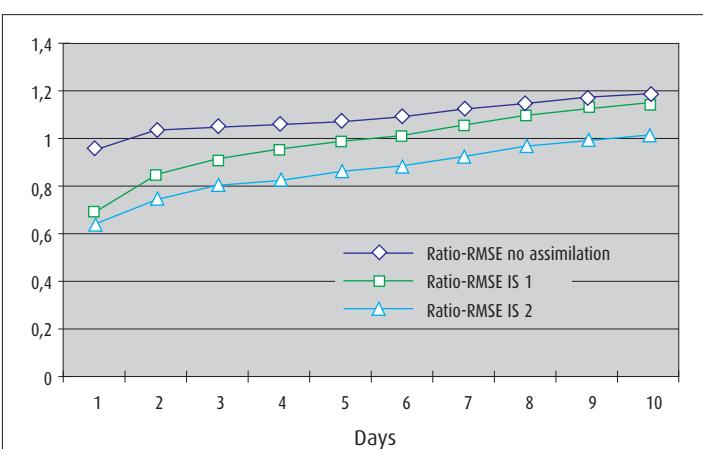
▲ Simulations d'ensemble hydrométéorologiques élaborées à partir du modèle atmosphérique à fine échelle AROME (en haut) forçant le modèle hydrologique ISBA-TOPMODEL (à droite). Les débits simulés ( $m^3.s^{-1}$ ) sont estimés à Boucoiran pour le bassin versant du Gardon. Les observations pluviométriques de cumuls de pluie sont représentées par des carrés. La prévision hydrologique utilisant les sorties d'AROME déterministe est en bleu et les observations sont représentées par les croix.

1

## Ensemble ISBA-TOPMODEL Boucoiran (Gardons)



2



▲ Ratio-RMSE (erreur quadratique moyenne normée) de la moyenne de l'ensemble moyen sur 148 stations du 10 mars 2005 au 30 septembre 2006. En noir pour les prévisions d'ensemble des débits sans assimilation, en vert pour les prévisions d'ensemble des débits utilisant l'assimilation des débits (IS1), en bleu pour les prévisions d'ensemble des débits utilisant l'assimilation des débits et l'amélioration de la physique (IS2).

# Océanographie (modélisation et instrumentation)

Dans le domaine de l'océanographie, le CNRM est notamment responsable du développement de bouées météo-océanographiques dérivantes et ancrées pour la prise en compte des interactions océan/atmosphère. Il contribue à l'amélioration des mesures sur les bouées de type SVP et à l'étude de nouveaux systèmes pour la transmission des données, tel Iridium. La participation en 2008/2009 aux campagnes multi-organismes CAROLS, AMANDES a permis de fiabiliser les mesures de salinité de surface de la mer. La contribution à la validation des mesures fournies par le satellite SMOS à partir de 2010 se fait à travers le programme GOSCAL.

Par ailleurs, le conseil d'EUMETNET ayant confié à Météo-France la responsabilité du programme d'observation marine de surface

d'EUCOS (E-SURFMAR) jusqu'à la fin de l'année 2011, c'est l'équipe CMM du CNRM qui en assume la conduite. Ceci amène également à augmenter le nombre d'observations faites par les navires en développant des stations automatiques simples (MINOS, BAROS...) et en diminuant les coûts de transmission des données de navires (ex : compression des données, transmission Iridium). La participation au Comité de Pilotage du projet PREVIMER permet également de mieux appréhender les enjeux et les besoins en Océanographie Côtière. Enfin, les travaux sur la définition d'un site instrumenté dédié aux besoins de l'Océanographie Côtière ont débuté. Ce site sera développé en collaboration avec d'autres partenaires.

3



Bouée dérivante SVP-BS  
(baromètre + salinité)

3

## La bouée dérivante Marisonde «NG», un outil pour les campagnes à la mer

Les bouées dérivantes Marisonde GT ont été développées au début des années 90. Elles permettaient la transmission des données et leur localisation grâce au système Argos et mesuraient le vent en force et direction, la pression atmosphérique et des températures en profondeur de la mer jusqu'à 200 mètres. Mais les solutions utilisées pour la réalisation de chaînes bathythermiques plus longues étaient arrivées à une limite technique, liée au nombre de conducteurs et au poids du câble. Pour pouvoir augmenter le nombre de capteurs, il fallait concevoir une électronique capable de gérer un nouveau type de chaîne bathythermique. L'idée générale est de pouvoir dialoguer avec les différents capteurs régulièrement espacés le long de la chaîne à l'aide d'un simple «bus». La carte électronique de la nouvelle génération des Marisonde a été définie de façon à pouvoir interfacer trois «bus» sous-marin et un «bus aérien». Les capteurs des «bus» de la chaîne bathythermique sont alternés de façon à assurer l'obtention d'un profil de température en cas de défaillance d'un des «bus».

Le renouvellement du parc de Marisonde NG (Nouvelle Génération) a été initié en 2007 et se poursuit progressivement pour disposer à nouveau d'une quinzaine de bouées qui pourront être mises en mer lors des campagnes dédiées aux études des interactions océan-atmosphère. La chaîne bathythermique de 300 mètres de long comprend 16 sondes de températures et 4 capteurs de pression hydrostatique sur deux «bus».

4

## Le cycle diurne des températures de surface de la mer dans l'Océan Arctique évalué par radiométrie satellitaire

Dans le cadre du SAF O&SI (Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility d'EUMETSAT), le Centre de Météorologie Spatiale de Météo-France produit depuis 2007 des cartes de température de surface de la mer (TSM) à 1 km de résolution sur la surface du globe à partir des données de METOP. Ces cartes font l'objet d'une validation rigoureuse, en particulier dans des zones délicates comme l'Océan Arctique. Au cours de l'été 2008, l'équipe de validation opérationnelle du CMS a détecté des taches chaudes dans l'Océan Arctique similaires à celles couramment observées aux latitudes moyennes en cas de vent faible et d'ensoleillement élevé. Pour étudier ce problème, une expérience d'observation intensive a été montée en collaboration avec nos collègues de la Météorologie Norvégienne et de l'Université de Southampton. Toutes les données de TSM issues de différents capteurs (METOP, MODIS,

AMSR-E,...), disponibles au cours de l'été 2008 ont été rassemblées sur une grille commune pour analyser les cycles quotidiens de températures (figure b). Un réchauffement diurne est considéré comme significatif lorsqu'une amplitude de 1 K a été observé par au moins 3 capteurs. Ces cycles sont confirmés par l'examen des structures superficielles de la TSM de METOP et des champs de vents coïncidents du diffusiomètre ASCAT (figure c). Cette expérience a révélé l'existence de ces taches chaudes significatives jusqu'à 80 °N (figure a). A côté des implications météorologiques et océanographiques du phénomène, il est nécessaire de prendre en compte l'existence de telles taches chaudes dans l'utilisation des TSM satellites. Elles sont superficielles et transitoires et doivent être éliminées si la constitution d'un champ de températures profondes (sous la thermocline diurne) est recherchée.

5

## Une nouvelle dissipation dans le modèle de vagues de Météo-France

Dans le cadre d'une collaboration avec le SHOM et l'IFREMER, un nouveau modèle de vagues de 3<sup>e</sup> génération (MFWAM) a été mis en place sur la chaîne opérationnelle de Météo-France depuis avril 2009. Ce modèle est une adaptation du modèle ECWAM du CEPMMT avec de nouvelles formulations pour mieux prendre en compte la dissipation des vagues. En effet, même si grâce aux progrès de la modélisation numérique et des techniques d'assimilation associés à l'utilisation de données issues de nombreux capteurs spatiaux, la précision des analyses et des prévisions de vents de surface à l'échelle globale et régionale s'est considérablement améliorée ces dernières années, des erreurs importantes persistaient, notamment dans les zones tropicales. Des études d'abord conduites à Météo-France avaient montré que

ces erreurs provenaient du paramétrage de la dissipation et des modifications avaient été proposées pour l'améliorer. Depuis, des travaux importants ont été réalisés par la communauté scientifique pour mieux comprendre et paramétrier les mécanismes de dissipation des vagues avec des avancées récentes grâce notamment aux efforts conjoints du SHOM de l'IFREMER et de Météo-France, en liaison avec l'utilisation de données spatiales.

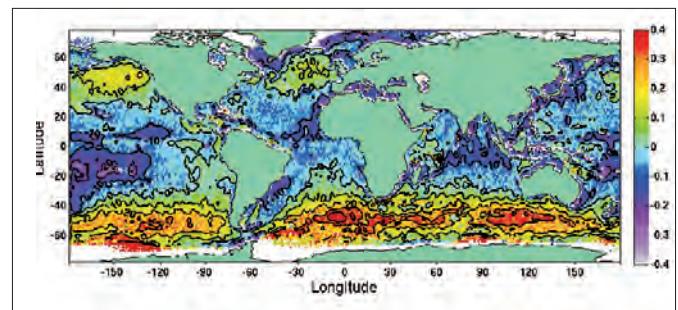
Ainsi, la nouvelle dissipation de la houle fait maintenant appel à un mécanisme à seuil plutôt qu'à la cambrure moyenne des vagues. Il en résulte également une meilleure croissance des vagues. Des réglages restent à réaliser pour réduire les biais résiduels, observés par exemple dans les mers du sud.

6



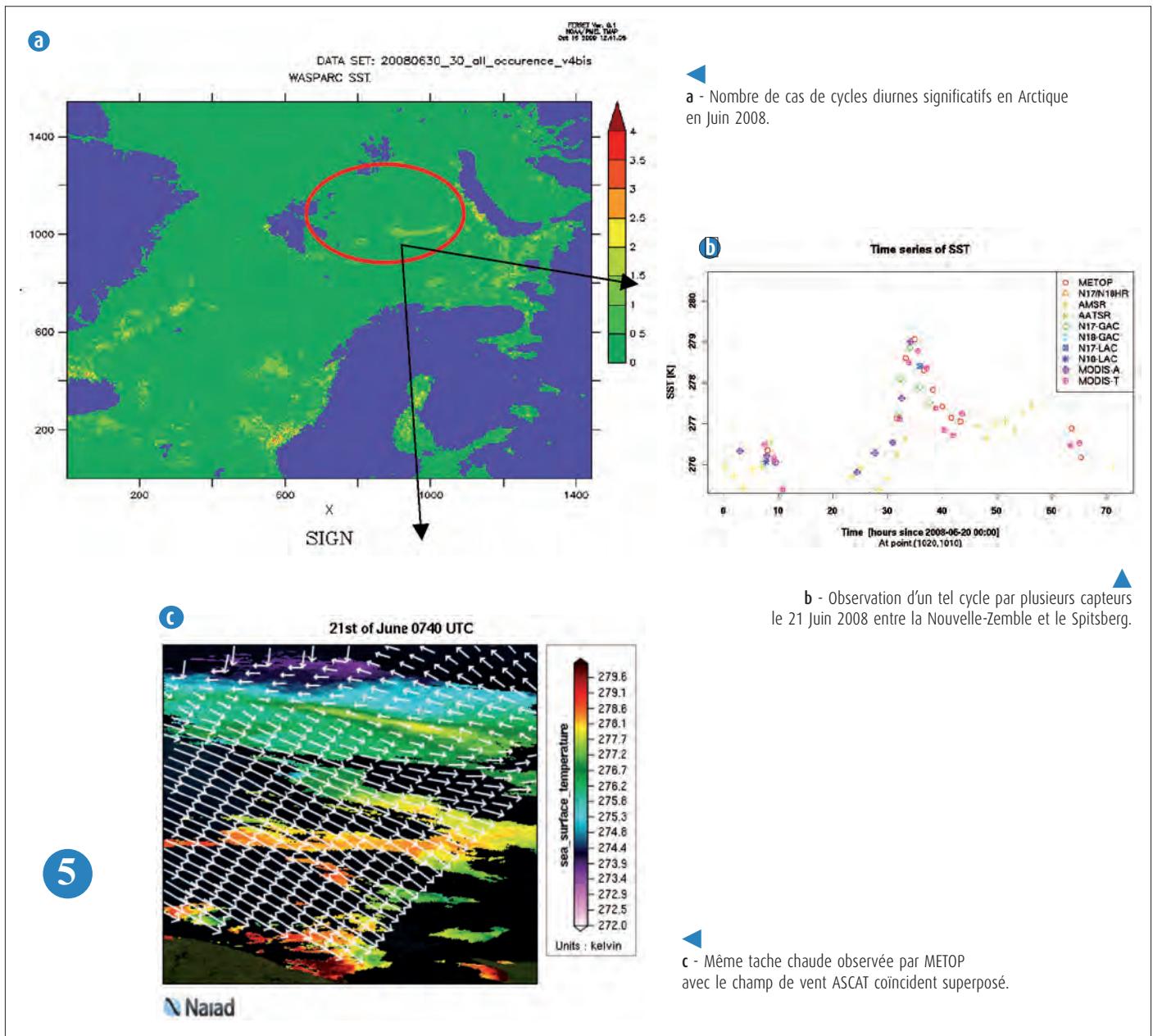
4

Mise à l'eau d'une Marisonde NG par le NO Antea  
(Crédit Photo Denis Dousse/Locean)  
pour des mesures des températures de la mer en profondeur lors  
de la campagne GOGASMOS en 2009 dans le Golfe de Gascogne.



6

Carte représentant l'écart moyen entre  
la hauteur significative des vagues du modèle MFWAM  
avec la nouvelle dissipation, sur une période d'un an,  
et celle mesurée par les altimètres Jason, ENVISAT et GFO.



# Chimie atmosphérique et qualité de l'air

## La prévision d'ensemble de la qualité de l'air en Europe

Depuis juin 2009, dans le cadre du projet FP7 MACC, des recherches sur la prévision d'ensemble de la qualité de l'air en Europe sont menées. L'approche est basée sur 7 modèles pré-opérationnels, dont les deux modèles de la plateforme Prév'Air, CHIMERE (INERIS et CNRS) et MOCAGE (Météo-France). Les travaux s'intéressent aussi bien aux polluants primaires (comme le dioxyde d'azote), que secondaires (comme l'ozone), ainsi qu'aux particules fines.

Un constat est que les performances des prévisions se dégradent peu jusqu'à 72 h : les prévisions pour le jour même et pour le lendemain sont statistiquement équivalentes, pour tous les polluants considérés. La dégradation de la qualité de la prévision météorologique joue ainsi à un ordre moindre que la situation synoptique elle-même, le moment de la journée, les émissions de polluants prescrites ou encore la formulation particulière de chaque modèle qualité de l'air.

Ceci confirme l'intérêt d'une approche multi-modèles plutôt qu'une approche qui serait basée sur un seul modèle et un ensemble de prévisions météorologiques perturbées. La dispersion, illustrée ici, dépend fortement du polluant : elle est assez faible pour les espèces dont les distributions sont pilotées par la météorologie (contrainte à grande échelle pour tous les modèles par le CEPMMT) et les émissions (comme les oxydes d'azote ou le dioxyde de soufre), et est au contraire forte pour l'ozone.

Si la prévision fournie par le modèle « médian » (valeur médiane des 7 modèles à chaque instant et en chaque point) fait jeu égal avec les meilleurs modèles chaque jour, il existe un intérêt fort à développer des ensembles pondérés par les performances constatées la veille. Il s'avère en effet que les modèles les plus performants un jour sur une zone ont une plus grande espérance statistique de réaliser une bonne prévision le lendemain.

7

## Impact des mégacités sur la pollution atmosphérique à l'échelle régionale : l'expérience MEGAPOLI

Le projet MEGAPOLI réunit les principaux groupes de recherche européens, les instruments scientifiques les plus perfectionnés et les acteurs clés du tiers-monde afin d'étudier les interactions entre mégacités, qualité de l'air et climat. L'objectif général est de mieux quantifier les sources d'aérosols primaires et secondaires dans une grande agglomération urbaine et dans son panache. Un zoom particulier est placé sur l'accumulation de l'aérosol organique secondaire et sa relation aux gaz précurseurs.

Dans le cadre de ce projet, le CNRM a participé à une campagne de mesure intensive en région parisienne au cours du mois de juillet 2009, afin d'examiner l'évolution de l'aérosol et des interactions gaz-aérosol dans l'écoulement atmosphérique urbain de la ville de Paris. La région parisienne a été choisie pour ces mesures car elle fait l'objet d'un suivi régulier de la qualité de l'air depuis de nombreuses années (AIRPARIF).

L'ATR42 de SAFIRE a réalisé avec succès 11 vols scientifiques représentant 43 heures de vol pendant la campagne expérimentale. Chaque vol suivait le même scénario : un tour de Paris pour étudier les conditions initiales dans toutes les directions, puis des legs en râteau en s'éloignant sous le vent de Paris

pour étudier l'évolution du panache de pollution. La configuration instrumentale de l'avion était composée d'analyseurs d'aérosols (dont 3 spectromètres de masse) et d'analyseurs de la chimie atmosphérique (Ozone, CO, COV...). Ces instruments, spécifiques à la campagne, étaient ajoutés aux mesures de base de l'avion: pression, température, humidité, position, turbulence.

En plus de l'ATR42, de nombreuses mesures étaient effectuées au sol ou à partir de 3 camions mobiles. Deux jours ont été dédiés à un exercice d'inter-comparaison des mesures effectuées par l'avion et par les camions mobiles. Pour se faire, les camions se sont positionnés près de l'avion, sur le tarmac de l'aéroport de Pontoise-Cormeilles.

Le niveau de pollution atmosphérique durant la campagne était plutôt faible mais durant plusieurs jours l'activité photochimique a été plus forte dans l'agglomération et dans le panache. Aussi, même les jours peu pollués, le panache de pollution restait bien visible à plus de 100 km sous le vent de Paris. Les mesures sont actuellement en cours de traitement chez les différents partenaires. La seconde partie de la campagne aura lieu entre mi-janvier et mi-février 2010.

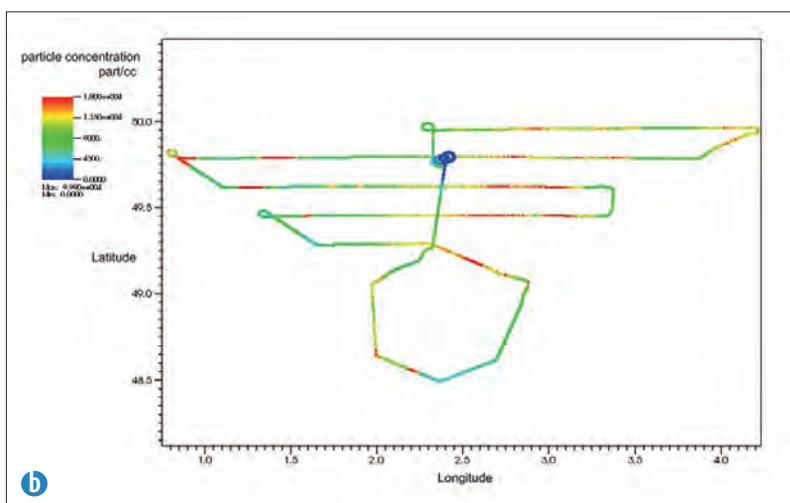
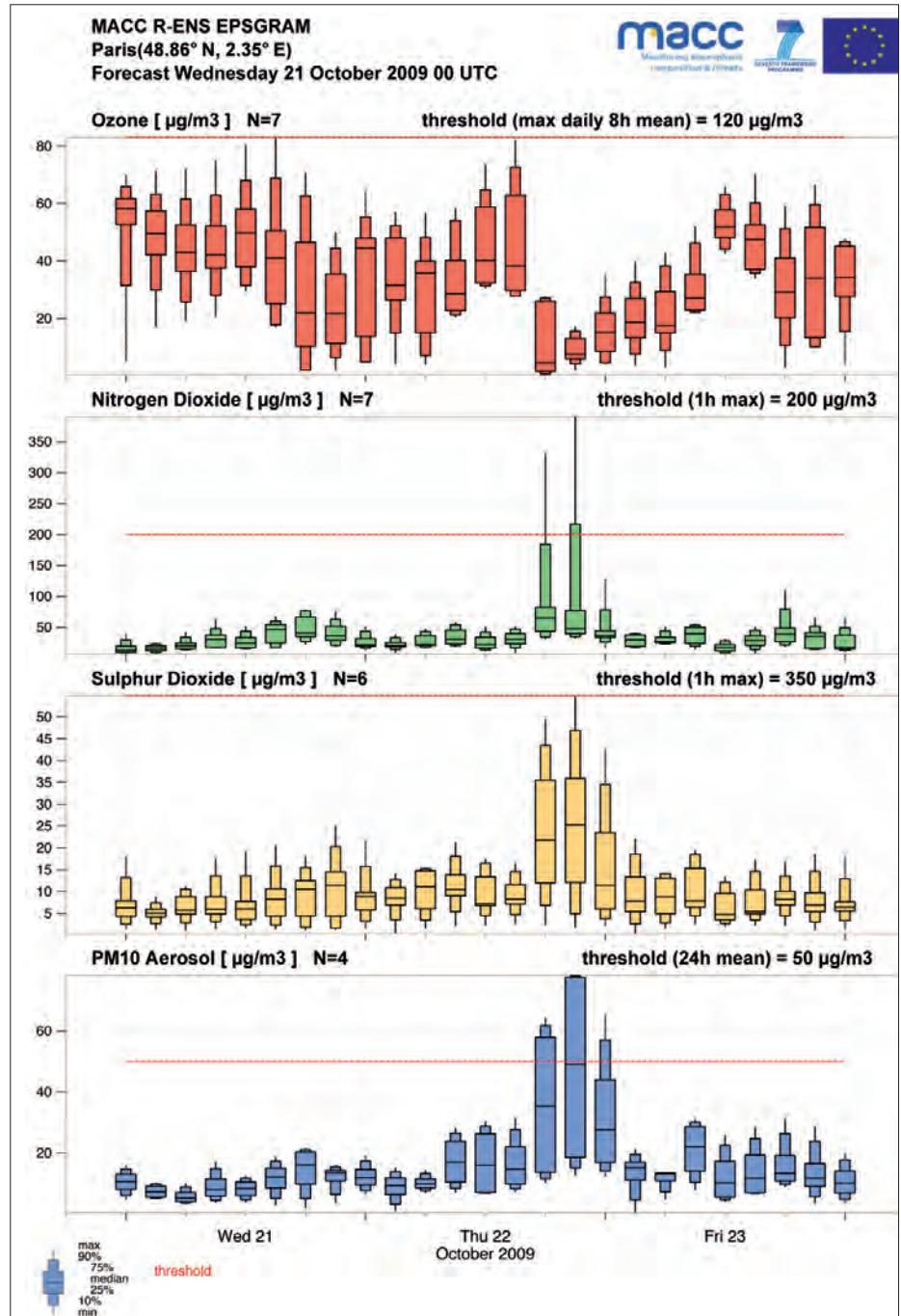
8



a - Une partie des équipes du CNRM et de SAFIRE impliquées dans Mégapoli

EPSgramme (prévision incluant la dispersion de l'ensemble multi-modèle de qualité de l'air) pour les principaux polluants sur la région Parisienne, basée le 21 octobre 2009. Le calcul de ce type de diagrammes est actuellement réalisé quotidiennement par le CEPMMT, mais cette activité est actuellement en cours de transfert à Météo-France, qui a obtenu cette responsabilité dans le cadre du projet MACC.

7



► b - Concentration de particules d'aérosol lors du vol scientifique du 21 juillet 2009 dans le secteur situé au nord de Paris (vol MEGAPOLI n°32). On peut clairement distinguer le panache de pollution dans la zone nord-nord-est.

▼ c - Séance d'intercalibration de l'ATR42 avec les 3 camions instrumentés



8

# Étude du manteau neigeux et des avalanches

Dans le domaine de l'étude de la neige, de multiples tâches de recherche sont conduites à Météo-France : étude et modélisation du manteau neigeux et de ses interactions avec l'atmosphère, analyse météorologique en montagne et transport de neige par le vent, propriétés physiques de la neige et ses transformations, propriétés mécaniques du manteau neigeux et instrumentation spécifique. Parmi les principaux résultats obtenus en 2009, on peut noter les travaux sur le transport de neige par le vent, avec une première pré-étude du transfert des résultats des modélisations développées vers les services de prévisions. Un effort important a continué d'être mené sur l'observation et la modélisation de la neige à micro-échelle afin de documenter les processus physiques dominants à cette échelle et d'établir le lien avec les propriétés macroscopiques du manteau neigeux. Des travaux ont également été menés à plus grande échelle, comme la modélisation nivo-glaciaire d'un bassin versant de haute altitude en montagne tropicale ou la climatologie nivo-météorologique des massifs français pour les 50 dernières années. Le travail en vue d'assimiler des données télédéetectées dans un modèle de neige a été poursuivi, avec des premiers résultats encourageants au Col de Porte. Un effort conséquent a également porté sur l'instrumentation spécifique à l'observation de la neige, avec en particulier la fin de la rénovation de la chambre froide de Saint-Martin d'Hères. En 2010, les actions de recherche menées en 2009 seront poursuivies et de nouvelles actions seront initiées, comme par exemple le début de travaux sur la modélisation du transport de neige par le vent à l'aide du modèle Méso-NH, sur la régionalisation des scénarios climatiques en zones de relief (projet SCAMPEI), sur la mise en place de mesures de paramètres du manteau neigeux (tels que la conductivité thermique ou la surface spécifique de la neige) nécessitant le développement de nouveaux capteurs. Les modèles de microstructure seront affinés, en se basant en particulier sur des expériences menées en chambre froide. Les résultats de la chaîne SCM sur les 50 dernières années seront comparés aux données de l'Enquête Permanente des Avalanches en vue de documenter une climatologie de la stabilité du manteau neigeux. L'effort sur l'instrumentation sera poursuivi, notamment par l'aide à l'assistance de la route du Col de Montets grâce à un capteur sismique et l'implication dans le projet OPTIMISM (optimisation de capteurs nivo-météorologiques en conditions polaires).

9

## Influence des échanges de vapeur d'eau sur le tassemement de la neige : modélisation et validation expérimentale à partir d'images tomographiques

La neige est un matériau complexe qui se transforme au cours du temps. Son métamorphisme (c'est-à-dire sa modification structurale) se traduit, pour de la neige sèche placée en conditions isothermes, par une densification marquée.

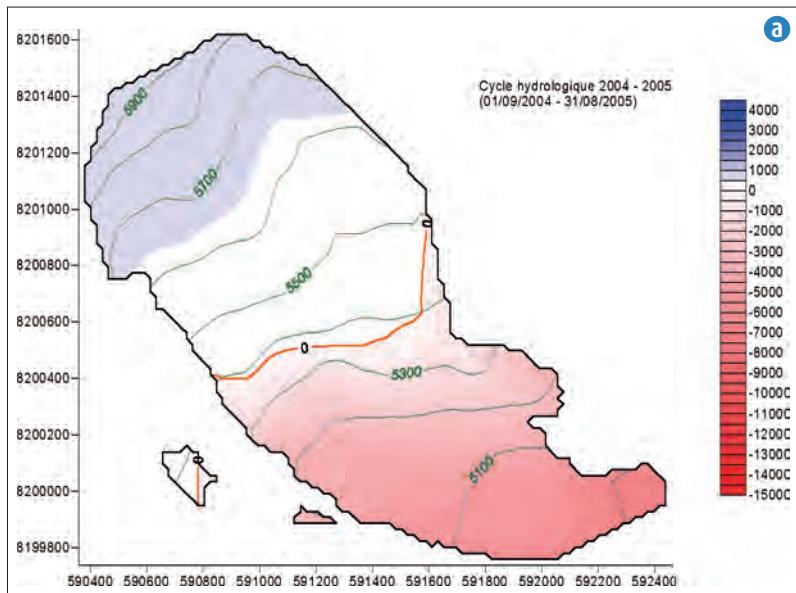
Les mécanismes pilotant cette densification et leur importance relative ont fait l'objet d'une analyse approfondie : le tassemement résulte-t-il uniquement de l'action du poids des couches supérieures (effet mécanique) ou peut-il être expliqué également par les échanges de vapeur d'eau dans l'espace poreux de la structure de la neige (effet essentiellement thermodynamique) ?

Une étude précédente avait montré que la thermodynamique suffisait à elle seule à modéliser les ruptures de ponts entre les différents grains de neige en début de métamorphisme. L'idée était donc de développer ce modèle en ajoutant des lois simples de mécanique afin de réorganiser les grains déconnectés.

Les résultats des modélisations ont été comparés à une série d'images obtenues par microtomographie X réalisée en chambre froide (SLF, Davos, Suisse). Le même échantillon de neige est ainsi observé tout au long de l'expérience, permettant une analyse qualitative très fine (grain à grain) des simulations.

Le modèle numérique développé permet de reproduire l'évolution de la surface spécifique (rapport entre la surface de l'interface air/glace et la masse de glace) de la neige durant la métamorphose et explique en partie la densification rapide observée. Il ouvre des perspectives intéressantes pour l'étude du métamorphisme de la neige sèche en conditions isothermes et de son impact sur le tassemement.

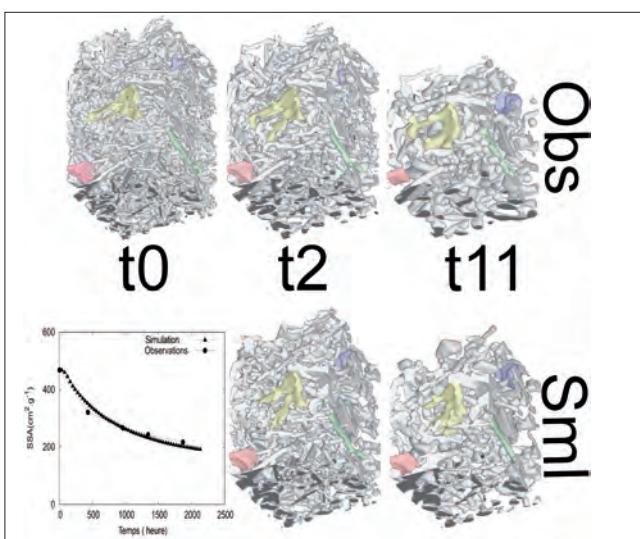
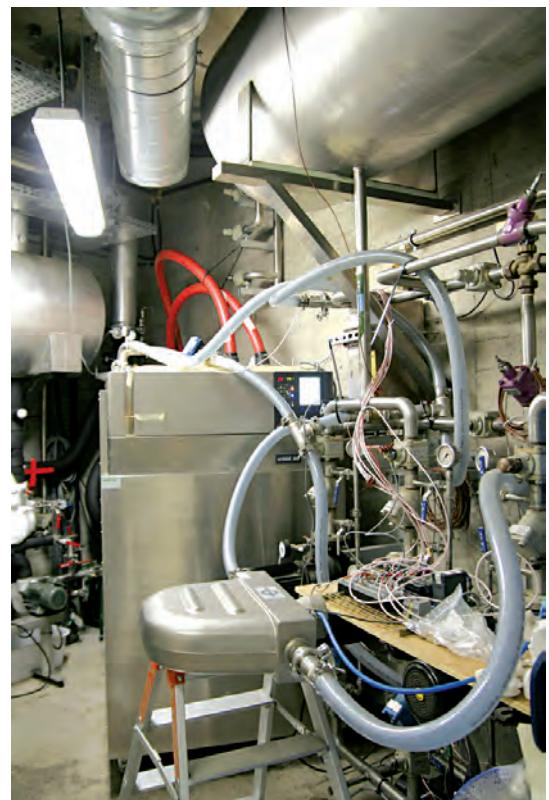
10



9

a - bilan de masse annuel du glacier Zongo calculé à l'aide du modèle Crocus du 01/09/2004 au 31/08/2005 (en mm d'équivalent eau). Les parties en bleu correspondent à la zone d'accumulation du glacier, celles en rouge à la zone d'ablation.

b - Vue du nouveau dispositif chargé d'assurer la production de froid de la chambre froide laboratoire du Centre d'Etudes de la Neige. Ce cryothermostat a été pourvu, dans une première phase d'évaluation de performances, d'une instrumentation destinée à contrôler certains paramètres, sur les circuits hydrauliques d'entrée et de sortie.



Echantillon de neige sèche placé en conditions isothermes (-8 °C). Trois étapes sont représentées, à la fois pour les observations (Obs) et la simulation (Sml) : état initial (t0), après 2 semaines (t2) et après 11 semaines (t11) de métamorphisme. La coloration des grains permet de suivre le tassemement ainsi que l'évolution des formes ; l'adéquation qualitative entre simulation et observation est très satisfaisante. Les courbes représentent l'évolution temporelle de la surface spécifique pour les observations (disques) et la simulation (triangles).

10

# Instrumentation

La recherche instrumentale et expérimentale vise le développement de nouveaux instruments, la mise en œuvre de dispositifs de mesure de natures diverses, ainsi que les opérations et le traitement des données collectées lors des grandes campagnes de recherche de la communauté scientifique. En 2009, cette activité de service a été particulièrement soutenue avec la participation à une dizaine de campagnes.

Parmi les développements instrumentaux, on citera les travaux autour du compteur de noyaux de condensation multi-colonnes, et son utilisation couronnée de succès dans le cadre de la campagne Mégapol. La plupart des projets concerne la mise en œuvre d'instruments de très haute technologie (radar, lidar, radiomètres,...), au sol, aéroportés ou dans l'espace, pour lesquels les contributions du laboratoire recouvrent le développement de techniques de restitution des paramètres physiques et leur analyse dans un contexte multi-instrumental. Ces études conduiront à terme à la conception d'un système de télédétection du profil vertical des paramètres d'état dans l'atmosphère. Des travaux importants ont été réalisés pour la préparation de la mission spatiale AEOLUS, de nouvelles méthodes de filtrage non-linéaire ont été développées et deux nouvelles techniques ont été validées : le sodar pour mesurer la hauteur des couches de brouillard et le scintillomètre pour mesurer des flux de chaleur sensible intégrés sur une base kilométrique.

Sur le plan des recherches thématiques, plusieurs résultats significatifs ont été obtenus qui ont donné lieu à publication : dans le cadre d'une collaboration avec le Laboratoire d'Aérologie, qui combine modélisations physique et numérique, des expériences sur les ondes internes dans l'océan ont été réalisées. Les collaborations internationales mises en place dans le cadre du programme européen d'infrastructure HYDRALAB ont abouti à des résultats originaux sur les ondes internes dans l'atmosphère.

Des études expérimentales de l'aérosol et des nuages ont été conduites dans le cadre des campagnes SCMS, EUCAARI, CAPITOUL, AMMA, Brouillard et MILAGRO. Les résultats obtenus ont servi de support à des études de modélisation numérique des processus sur l'aérosol, de la microphysique nuageuse et de la dynamique des nuages de couche limite. 1

## Instrumentation aéroportée

SAFIRE, unité mixte de services du CNRS, de Météo-France et du CNES, est en charge de la mise en œuvre des trois avions de recherche français instrumentés pour la recherche sur l'environnement. En 2009, outre la réalisation des campagnes (notamment MEGAPOLI et CAROLS), l'activité de SAFIRE a été rythmée par quatre grandes thématiques : le renouvellement de la convention liant les trois tutelles de SAFIRE, la consolidation des compétences des météorologues navigants, la préparation de l'avenir suite à l'annonce de la fermeture de l'aérodrome de Francazal, et la remise en service de l'avion Falcon 20.

L'Unité Mixte de Services SAFIRE avait été créée en 2005 pour une durée de quatre ans. La convention liant les trois tutelles de SAFIRE a donc expiré en 2009. Durant ses quatre années d'existence, SAFIRE a montré la pertinence de la mutualisation des moyens de ses trois tutelles. L'UMS a donc été reconduite pour 4 années à compter du 1er Janvier 2009.

Suite à l'arrivée en 2006 de deux nouveaux avions de grande taille (le Falcon 20 et l'ATR42), il était nécessaire de former de nouveaux personnels au métier de météorologue navigant, ainsi que d'harmoniser les compétences. Ainsi, début 2009, une formation théorique et pratique a permis d'attribuer le brevet de "Météorologue Navigant" à 5 agents. Cette formation a représenté un volume de 18 jours de cours et 1 mois de pratique au sol et en vol.

Par ailleurs, SAFIRE est hébergé sur la base aérienne de Francazal depuis 2003. Suite à l'annonce en juillet 2008 de la fermeture prochaine de cette base, les équipes de direction de SAFIRE et du CNRM se sont mobilisées pour trouver les solutions permettant d'assurer la continuité du service. Les opérations de SAFIRE requièrent un hangar pour les 3 avions ainsi que 700 m<sup>2</sup> de bureaux et laboratoires. Les trois tutelles de SAFIRE ont émis un très fort souhait de maintenir son implantation à Toulouse, pour la proximité des installations de Météo-France et du CNES, mais aussi parce que Toulouse est le foyer du Réseau Thématisé de Recherche Avancée « Sciences et Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace ». Plusieurs pistes sont donc explorées pour une relocalisation en 2010 sur l'aéroport de Toulouse-Blagnac. Néanmoins, il demeure possible que l'aéroport de Francazal ait un avenir aéronautique civil. Dans ce cas, SAFIRE privilierait d'y rester implanté si les conditions le permettaient.

Enfin, afin d'opérer le Falcon 20 du CNRS jusqu'alors pris en charge par l'IGN, le CNRS a décidé d'assurer en interne, via SAFIRE, l'exploitation de cet avion, et a embauché en 2009 un pilote et un mécanicien agréés. Ces personnels sont venus compléter l'équipe de trois pilotes et d'un mécanicien de Météo-France. Les prochains vols de l'avion Falcon 20 sont prévus début 2010. 2

## Campagne CAROLS : mesure aéroportée de l'humidité des sols et de la salinité océanique

Les vols CAROLS ont pour objectif de valider l'instrument du même nom, un radiomètre passif, et les algorithmes associés, qui mesure la teneur en humidité des sols ainsi que la salinité des océans. Un radiomètre équivalent (à antenne de synthèse d'ouverture) équipe le satellite SMOS dont le lancement a eu lieu le 2 novembre 2009. Les tests menés jusqu'à mi-2009 ont donc eu pour but de préparer la future validation des mesures du satellite.

Après les premiers tests effectués fin 2007 et en octobre 2008 sur l'ATR42 de Météo-France, une campagne d'un mois a eu lieu en mai 2009. La moitié des vols CAROLS a été réalisée avec une combinaison d'instruments : radiomètre CAROLS et radar RASTA. Les mesures complémentaires du radar permettent de connaître l'état de la mer lors des survols maritimes : vent de surface et hauteur des vagues.

La campagne d'essais s'est avérée très productive pour le développement et l'amélioration des instruments. Les équipes de SAFIRE et du CETP (responsable de l'instrument CAROLS) sont maintenant prêtes pour les prochains vols en ATR42 (avril-juin 2010) qui permettront les premières comparaisons avec les mesures issues du satellite. 3



1

◀ Une partie du dispositif instrumental (et notamment le sodar) mis en place à Roissy lors de la campagne de mesures sur le brouillard durant le premier trimestre 2009.



2



▲ a - Le Falcon 20 F-GBTM en vol. Il est équipé d'emports sous voilure pour les mesures de microphysique (gouttelettes et poussières).

▶ b - Le hangar de Toulouse-Francazal occupé par SAFIRE depuis 2003. Pour quelques mois encore ?



3

L'une des 2 antennes CAROLS montée dans la fosse arrière de l'ATR42.

# Instrumentation *in situ* – télédétection

## Développement d'un mini compteur multi-colonnes aéroporté de noyaux de condensation nuageuse

Une des plus grandes incertitudes dans la compréhension du changement climatique est d'établir l'impact des aérosols sur la formation des nuages, le forçage radiatif indirect qui en découle et les processus de formation des précipitations. Les noyaux de condensation nuageuse (CCN) représentent la fraction de particules d'aérosol qui servent d'embryon de gouttelettes nuageuses. La mesure des CCN est donc fondamentale pour établir ce lien entre microphysique nuageuse et physico-chimie de l'aérosol. Une chambre cylindrique à flux continu et à gradient thermique a été développée en 2005 par Roberts et Nenes afin de mesurer les concentrations de CCN pour une sursaturation donnée. La sursaturation est fonction du débit et du gradient de température dans la colonne de l'instrument et le flux continu permet un échantillonnage rapide (1 Hz). Une collaboration entre le CNRM et le SIO (Scripps Institute of Oceanography, San Diego) a consisté à étendre le développement des chambres CCN pour réaliser des mesures rapides de concentration de

CCN pour des valeurs multiples de sursaturation (entre 0.07 et 2 %) à l'aide d'un instrument miniaturisé multi-colonnes et à échantillonnage rapide, dédié aux mesures aéroportées.

Les composants de ce mini compteur CCN ont été construits au SIO. Son assemblage, les tests et son étalonnage ont été réalisés au CNRM. L'instrument a été réduit en taille et en poids sans compromettre ses performances qui ont été vérifiées par calibrage. De plus, le logiciel du compteur miniaturisé a été testé afin de fournir des spectres de sursaturation à haute résolution. Un instrument miniaturisé à simple colonne a fonctionné avec succès à bord de l'ATR42 de SAFIRE durant la campagne expérimentale MEGAPOLI en juillet 2009. Le nouvel instrument miniaturisé multi-colonnes est disponible au CNRM depuis la fin de l'année 2009.

4

## Vers une amélioration notable des mesures de vent issues des radars météorologiques Doppler

Fin 2009, le réseau ARAMIS de Météo-France est complètement Doppler-isé. Les informations Doppler (tours d'antenne de vitesses radiales) des 24 radars sont assimilées opérationnellement par le modèle AROME. Elles sont aussi utilisées pour restituer des profils de vent à la verticale des radars et pour reconstruire le champ de vent tri-dimensionnel dans les zones de recouvrement entre radars, en présence de précipitations. Ces zones de recouvrement sont très importantes dans le réseau français en raison de la densité du réseau mais aussi de l'utilisation d'une technique Doppler innovante et brevetée qui permet d'avoir des mesures de vitesse radiale sans ambiguïté jusqu'à plus de 250 km de portée. Les champs 3D nationaux de réflectivité et de vent (15 minutes x 2.5 km) seront introduits en opérationnel en 2010.

Des études ont été lancées en septembre 2008 pour améliorer la qualité des mesures Doppler et réduire le taux de mesures erronées, résultats d'erreurs de repliement, particulièrement visibles sur les cas de forte convection et sur les cas d'air clair. Ainsi, il

était recommandé jusqu'à présent aux utilisateurs d'appliquer un filtre médian  $5 \times 5 \text{ km}^2$  sur les images de vitesse radiale de résolution kilométrique.

Des tests d'augmentation des PRFs (fréquence de récurrence des tirs radars) et de diminution de la vitesse de Nyquist étendue ( $V_{NE}$ ) de 60 à environ 45 m/s ont été réalisés sur tous les types de radars du réseau (radars bande S, anciens et nouveaux bande C). La vitesse de Nyquist est la vitesse maximum que l'on peut mesurer sans ambiguïté avec un schéma Doppler donné. Ces tests ont clairement mis en évidence une diminution des taux de mesures erronées. Par exemple, le taux d'erreur passe de 16.7 % à 2.5 % entre le mode actuel et le nouveau mode proposé sur un cas convectif observé par le radar de Nîmes (bande S). Sur les radars bande C, le nouveau schéma proposé donne une vitesse de Nyquist étendue de 44 m/s. Un algorithme a donc été développé pour restituer les fortes vitesses au-delà de cette valeur. Cet algorithme utilise le champ d'advection, il a été testé sur de nombreuses situations (tempête, tornade...) et donne satisfaction.

## Expérimentation d'un lidar vent sur l'aéroport de Nice

Le cisaillement de vent en air clair est régulièrement observé en approche de l'aéroport de Nice. L'arrivée sur le marché de lidars vents plus facilement déployables à conduit la DSO et le CNRM à proposer l'essai d'un tel système avec les objectifs suivants :

- vérifier sur site, dans les conditions atmosphériques de Nice, le fonctionnement d'un lidar.
- évaluer son potentiel de détection des cisaillements sur les trajectoires d'approche.
- recueillir un jeu de données à haute résolution, si possible tridimensionnel, pour documenter la structure du vent autour de l'aéroport, en particulier en vue de l'amélioration de la modélisation à maille fine des phénomènes de cisaillement.

La campagne de mesures a eu lieu de mars à mai 2009 avec l'installation provisoire d'un lidar vent à Nice. La portée annoncée de l'instrument est de 10 km, en air clair. Sa vision est panoramique et à angle de site programmable. Effectuée en liaison avec les services de la Navigation Aérienne, l'expérimentation a permis d'observer quatre situations de cisaillement.

Les premiers résultats indiquent que le lidar détecte bien ces phénomènes. En partant des besoins exprimés par l'usager aéronautique et des données recueillies, la spécification d'un système d'observation du cisaillement à Nice est en cours. Enfin, les vents lidar ont commencé à être utilisés en comparaison avec des simulations du modèle Meso-NH sur les cas pertinents.

5

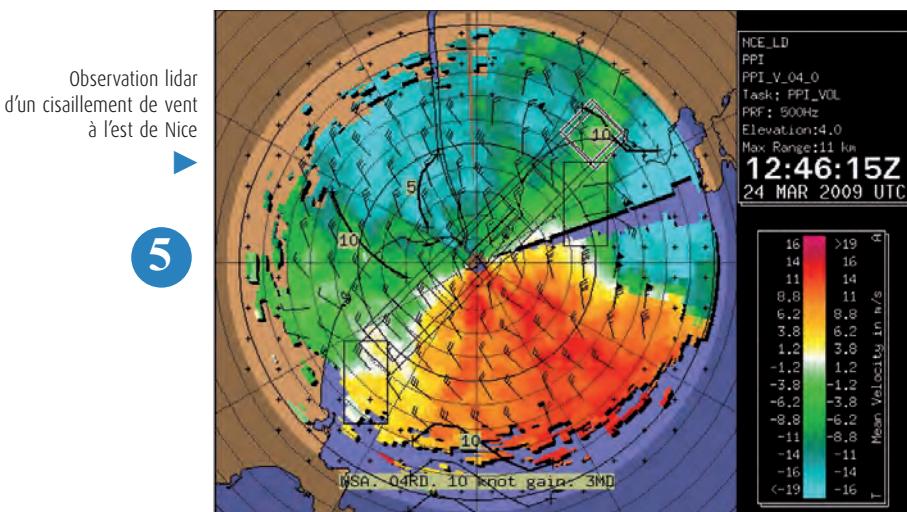
Ces modifications vont donc être progressivement mises en opérationnel. Cela permettra de rendre possible une exploitation des vitesses radiales à leur résolution spatiale de départ (1 km<sup>2</sup>). Cela est particulièrement important pour détecter des phénomènes de petite échelle tels que lignes de cisaillement, convergences, tornades, ... Une mosaïque nationale de cisaillement de basses couches sera produite en temps-réel, à titre de démonstration, lors de l'été 2010.

6



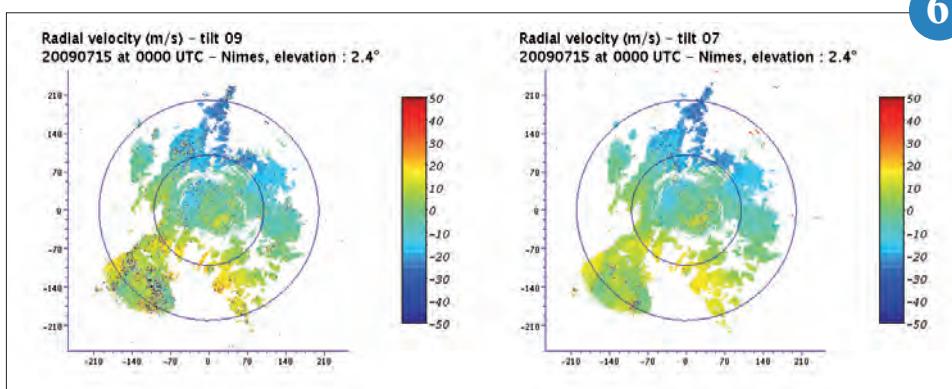
Chambre CCN miniaturisée aéroportée installée dans l'ATR42 de SAFIRE durant l'expérience MEGAPOLI.

4



Images de vitesse radiale avec mode actuel (à gauche) et le mode de test (à droite). Radar de Nîmes le 15/07/2009 à 00 UTC, élévation 2.4°. Mode actuel : PRF1=290 Hz, VNE=58 m/s, mode test : PRF1=500 Hz, VNE=50 m/s

6



## Vers une exploitation opérationnelle des radars polarimétriques

Depuis 2004, Météo France a progressivement introduit dans le réseau radar ARAMIS une nouvelle technologie baptisée diversité de polarisation. En octobre 2009, le réseau radar métropolitain comptait 10 radars double polarisation sur un total de 24. Ces radars fournissent des données plus riches que les radars conventionnels. Grâce aux informations supplémentaires obtenues, on peut envisager par exemple de détecter la bande brillante, de corriger l'image radar de l'atténuation par les précipitations ou d'identifier les différents types d'hydrométéores (pluie faible, pluie forte, neige sèche ou mouillée, grêle, ...).

Une des difficultés d'utilisation des données double polarisation réside dans le fait qu'elles doivent être très soigneusement calibrées, car les traitements effectués sont très sensibles aux erreurs. Un travail considérable a donc été entrepris, en lien avec les équipes de maintenance et de suivi de la production, pour mettre au point des indicateurs robustes permettant un suivi temps-réel de la qualité des mesures polarimétriques.

Actuellement, une chaîne de traitement des données double polarisation fonctionne en temps réel pour l'ensemble des radars double polarisation. Elle effectue les corrections de biais de calibration, l'identification des échos non météorologiques (échos de sol, insectes, oiseaux, ...), la détection de la bande brillante, la correction de l'atténuation par les précipitations et le typage des hydrométéores. Une première version de la chaîne polarimétrique devrait être introduite en opérationnel au premier semestre 2010. En parallèle, les études se poursuivront sur l'estimation du taux de pluie, la détection de la grêle, la distinction pluie – neige au sol et la détection de l'eau surfondue. Cette chaîne polarimétrique sera adaptée aux radars en bande X du projet RHYTMME.

7

## Evaluation de la mesure de flux de chaleur sensible par scintillométrie sur l'étang de Thau

La mesure des flux de chaleur sensible et latente entre les surfaces liquides (lacs, lagunes, océans) et l'atmosphère reste délicate en raison des contraintes d'infrastructures (navires, bouées) et des limites instrumentales.

Deux méthodes sont traditionnellement utilisées : les méthodes directes à partir de mesures de vent, de température, et d'humidité à haute fréquence à partir desquelles les flux sont estimés par la méthode « eddy corrélation », et les méthodes indirectes ou « bulk » utilisant des mesures météorologiques moyennes accessibles avec des capteurs robustes, mais nécessitant une paramétrisation. Plus récemment, des méthodes basées sur le scintillement d'une onde lumineuse en présence d'un flux de chaleur sensible se sont développées.

En 2009, le CNRM a mené une expérimentation sur l'étang de Thau afin de recueillir un jeu de données permettant la validation de cette technique. Plusieurs dispositifs ont été mis en œuvre pour estimer les flux entre la surface et l'atmosphère, station de mesure météorologique, station de mesure de flux par « eddy corrélation » et un scintillomètre Kipp et Zonen sur un trajet optique de 4.8 kilomètres.

Les flux mesurés permettront la mise au point d'une méthodologie pour l'estimation des flux de chaleur sensible et latente à partir de la mesure du seul scintillomètre, avec l'avantage de pouvoir réaliser des mesures continues sur le long terme. Une campagne se déroule pendant l'hiver 2009-2010 à Brest, en milieu côtier plus ouvert afin de valider la méthode.

8

## La veine hydraulique au renfort des chercheurs européens en météorologie

Un certain nombre de phénomènes font intervenir des échelles telles que leur observation dans le milieu naturel est difficile et que leur modélisation numérique n'est possible que pour des domaines très limités. Les expériences de laboratoire constituent de ce fait un outil intéressant pour leur étude, en particulier dans une installation comme la veine hydraulique du CNRM-GAME. Cet instrument unique en Europe permet en effet de reproduire des écoulements stratifiés en densité parfaitement contrôlée, particulièrement pertinents pour la recherche en météorologie.

C'est à ce titre que le CNRM-GAME fait partie du réseau européen de grandes installations hydrauliques du projet HYDRALAB-III du 6<sup>e</sup> PCRD. Le laboratoire de simulation physique a reçu dans ce cadre trois équipes de chercheurs de 2008 à 2010, venues approfondir leurs travaux grâce à des expériences financées par l'Union Européenne.

D. Etling et C. Knigge, de l'université de Hanovre, furent les premiers à bénéficier de ce projet pour réaliser des expériences inédites sur les rotors qui se forment en aval des montagnes. Ces rotors constituent un danger pour les aéronefs, et ce travail aura permis de clarifier leur mécanisme de formation.

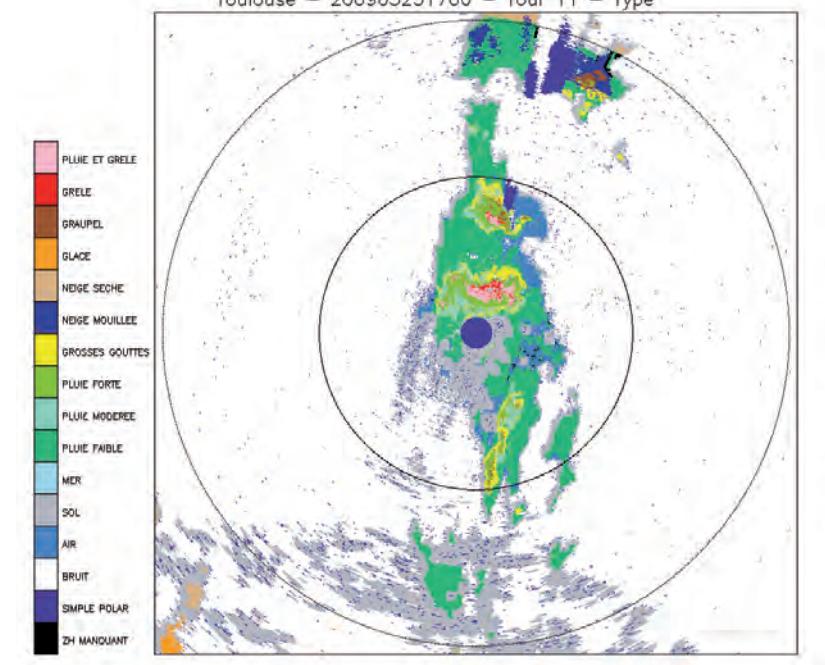
La deuxième équipe était composée de deux mathématiciens de l'University College London, E.R. Johnson et G. Esler. La validation en laboratoire de leur travail est importante pour son application à la représentation de la traînée exercée par le relief sur l'atmosphère dans les modèles numériques.

Enfin D. Dobrovolschi de la météorologie roumaine et G.-J. Steeneveld de l'université de Wageningen s'intéresseront aux transports verticaux au sein de la couche limite atmosphérique stable, pour réduire les incertitudes sur leur représentation dans les modèles.

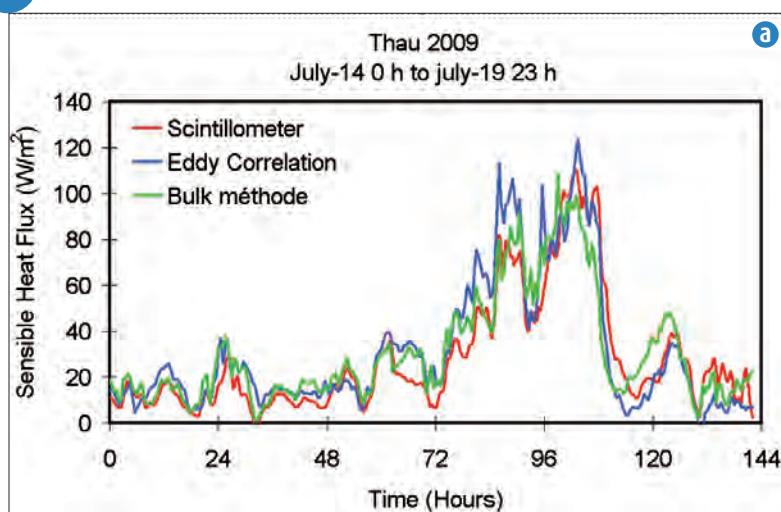
9

7

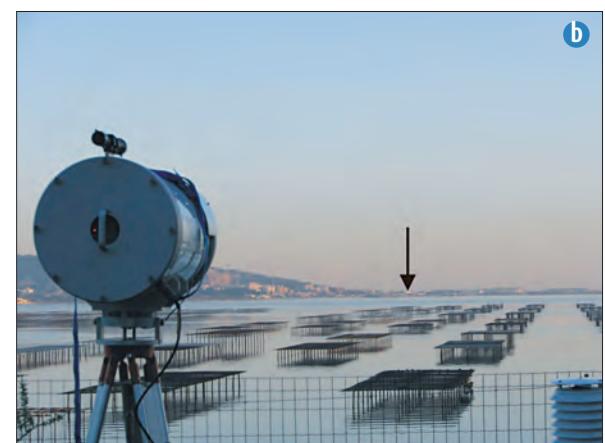
Type d'hydrométéore déterminé par l'algorithme de classification pour le radar de Toulouse, le 25 mai 2009 à 17h UTC, au site 1.5°. Les cercles noirs sont les cercles de rayon 50 et 100 km. Les zones grises correspondent aux échos fixes.



8



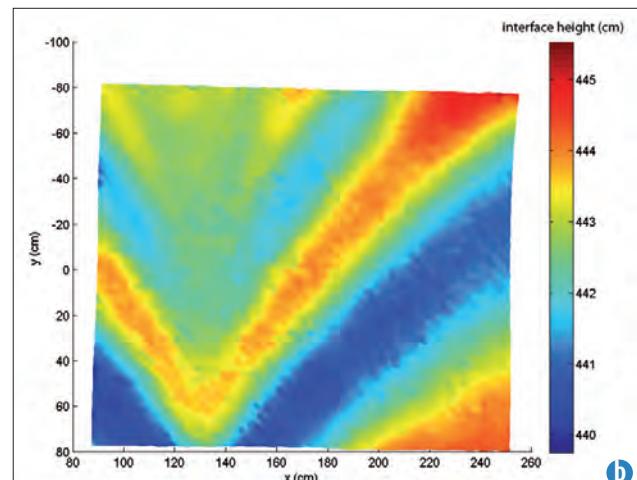
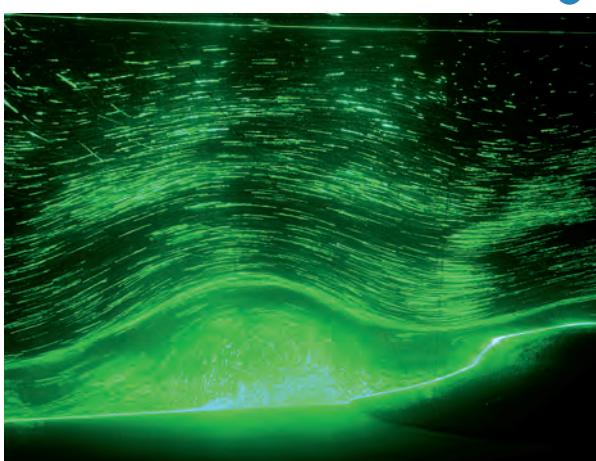
▲ a - Séries temporelles des flux de chaleur sensible mesurés sur l'étang de Thau par les méthodes « bulk », « eddy correlation » et « scintillomètre » du 14 juillet au 19 juillet 2009.



▲ b - Emetteur du scintillomètre installé au nord de l'Etang de Thau. La flèche indique la position du récepteur sur l'autre rive.

9

▼ a - Expérience de laboratoire mettant en évidence la formation d'un rotor sous la première crête de l'onde en aval d'une montagne. La visualisation (vue de coté, perpendiculairement à l'écoulement) est obtenue ici par des particules éclairées par un plan laser vertical. Le nombre de Reynolds est supérieur à 20000.



▲ b - Ondes de gravité internes générées au niveau d'un interface de densité visualisée par une technique de stéréoscopie (collaboration avec l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, figure réalisée par E. Cid). Cette technique permet de mesurer la hauteur de l'interface, déplacée verticalement par les ondes qui se forment derrière la montagne (située en bas à gauche de l'image). Ces ondes sont responsables d'une partie importante de la traînée exercée par le relief sur l'atmosphère.

# Coordination, valorisation et communication

Une partie des actions de recherche menées à Météo-France est conduite en dehors du CNRM. La coordination de celles-ci est prise en charge par le Réseau d'Etudes et de Transfert Interne des Connaissances (RETIC) et se fait principalement dans le cadre de la procédure d'élaboration du programme de recherche hors CNRM, ainsi que par l'organisation de réunions régulières, en particulier les Rencontres Recherche & Développement, annuelles, qui permettent des échanges entre tous les acteurs de la recherche à Météo-France.

Le RETIC a aussi pour mission le renforcement des transferts de la recherche vers l'opérationnel, en complément des actions menées par diverses équipes. Le soutien aux transferts de la recherche vers l'opérationnel réalisé dans ce cadre peut prendre des formes variées, allant de la mise en relation avec des experts et de la mise à disposition de documentation jusqu'à la mise en place de formations, en liaison avec l'Ecole Nationale de la Météorologie, ou au montage complet d'applications pour répondre aux besoins des services. Ces activités incluent également un soutien à la mise en place de nouvelles applications opérationnelles et aux évolutions de celles-ci en fonction des avancées de la recherche, sous forme de recommandations et d'une contribution à la coordination des montées de niveau.

En 2009, les actions majeures auxquelles le RETIC aura apporté son aide sont la mise en place d'une "structure innovation" à la Direction des Systèmes d'Observation, la définition d'un mode de fonctionnement entre le CNRM et la Direction de la Climatologie pour la mise à disposition de données issues des simulations climatiques et la gestion des réponses aux demandes d'études d'impact, la mise en place d'une structure pour recenser les demandes de nouvelles sorties de modèles, pour les besoins de la prévision ou d'études, et y répondre, ainsi que la rédaction du mandat d'un groupe de travail inter-services pour la planification des évolutions des différents éléments de la chaîne opérationnelle, afin de pérenniser l'organisation informelle mise en place à l'automne 2007.

La valorisation des activités de recherche passe également par une politique de communication interne et externe ambitieuse, visant à faire connaître et partager les récentes avancées dans le domaine des sciences de la météorologie, du climat et de l'environnement. A ce titre, 2009 aura vu la concrétisation de plusieurs actions phares : on retiendra notamment le grand succès de la seconde Nuit des chercheurs organisée sur le site de la Météopole, la finalisation du film météo sur la campagne AMMA, les conférences de presse organisées sur la mousson africaine, les multiples interventions des experts du CNRM pour répondre aux sollicitations médiatiques (par exemple à l'occasion de la conférence de Copenhague sur le changement climatique, ou dans le cadre d'émissions consacrées au 10<sup>e</sup> anniversaire des tempêtes de 1999).

1



▲ a - Les participants aux « Rencontres R&D 2009 » organisées par le RETIC en juin 2009. (Photo : P. Pichard, Météo-France)



1

◀ b - Serge Planton,  
Responsable de la Recherche Climatique à Météo-France,  
lors d'une interview donnée à TF1 en préparation  
d'une émission spéciale pour la conférence de Copenhague.



c - Interview de J.P. Lafore (CNRM/GMME), réalisé par B. Petit (CNRM/PAD),  
dans le cadre de la préparation du film Météo-France sur la campagne AMMA.

## Nuit des chercheurs : 1 500 visiteurs sous le charme de la Météopole

Météo-France, en partenariat avec le CNRS et le Cerfacs, organisait une opération « Nuit des Chercheurs » le 25 septembre 2009, en association avec la soirée du même nom organisée par la Communauté Européenne. L'objectif de cette manifestation est de permettre un contact direct entre les chercheurs et le grand public, sous des aspects à la fois scientifiques, techniques et culturels.

Les 1 500 visiteurs accueillis sur le site ont pu découvrir, par une magnifique soirée automnale, de nombreuses démonstrations extérieures (radiosondages nocturnes avec projection des résultats en temps réel, ballon captif, présentations de lidar, télémètre, vélo instrumenté, ...), assister à un programme de conférences riche et diversifié, visiter le laboratoire de simulation hydraulique,... Le dialogue direct entre scientifique et grand public pouvait se faire devant différentes maquettes conçues (modélisation) ou rénovées (radar ST, satellite SMOS, circulation thermo-haline) pour l'occasion, ou dans des stands d'exposition où les résultats les plus significatifs de ces dernières années étaient présentés sous forme de panneaux, de diaporamas, ou de mini-films. A deux reprises durant la soirée, des contacts directs entre le Centre de Conférence et l'intérieur de la salle de calcul de Météo-France ont été établis, permettant à nos visiteurs de découvrir l'environnement des calculateurs NEC et d'obtenir les réponses qu'ils attendaient sur la puissance de calcul utilisée par les équipes de recherche. Des intermèdes à caractère culturel (chant chorale, danse irlandaise, expos peinture et photos) venaient donner une touche originale et festive à cette soirée.

L'engouement suscité par cet événement était tel qu'il a fallu refuser des inscriptions de visiteurs plusieurs jours avant l'échéance. Des personnalités de haut rang (le président de la Région Midi-Pyrénées par exemple) ont passé plusieurs heures sur le site et se sont déclarées enchantées de ce qu'elles y ont découvert. La rédaction nationale de France 3 avait également retenu le site de la Météopole pour illustrer cette Nuit des Chercheurs dans notre pays : P. Bougeault, Directeur de la Recherche à Météo-France, a ainsi été interrogé en direct à l'occasion du 1<sup>er</sup> journal national de la soirée, avant qu'Armelle Barelli, Déléguée Régionale du CNRS, ne soit à son tour interviewée pour l'édition régionale de la chaîne.

A la lecture des messages élogieux reçus après cette opération, nul doute que cette manifestation fut une très belle réussite, et a suscité un grand intérêt. Les avancées récentes en prévision numérique du temps, l'amélioration de nos connaissances sur les évolutions du climat, les projets de recherche en cours sur l'atmosphère et l'environnement, sont des sujets pour lesquels l'attente de nos concitoyens est très importante. C'est une des missions d'un centre de recherche que de répondre à cette demande, et le CNRM-GAME s'attachera à poursuivre sa politique de vulgarisation scientifique durant les années à venir.

2

▼ a - Une partie du dispositif instrumental mis en place pour la Nuit des Chercheurs (ballon captif, scintillomètre, ...).  
Photo : Ph Dos, Météo-France



## Les actions de communication autour d'AMMA

Durant la 3<sup>e</sup> conférence internationale AMMA, de nombreuses activités de communication se sont déroulées à Ouagadougou. Un Café des sciences a eu pour thème « femmes et science » et l'exposition « Sous la mousson, des Hommes... » a été présentée dans différents endroits de la ville. Enfin, trois films ont été diffusés pour les participants de la conférence notamment le film réalisé par Météo-France « Au cœur de la Mousson Africaine » sur les campagnes AMMA de 2006.

Les médias ont été invités à deux conférences de presse, à Ouagadougou et au siège du CNRS Paris. L'AFP, Le Monde, Libération... entre autres, ont assisté à la présentation des résultats phares du programme, exposés à Ouagadougou et plus d'une trentaine de retombées presse ont suivi.

Le semestre suivant Ouagadougou a été l'occasion pour AMMA de participer à de très nombreuses actions de sensibilisation du grand public à la science. En plus des multiples actions de culture scientifique comme la nuit des chercheurs à Météo-France, AMMA a installé ses quartiers à « La Novela », festival arts et sciences de Toulouse ayant pour thème « Carnet de Voyage/Carnet de recherche ». Accompagnant l'exposition, les photos, les instruments de mesures..., un écran diffusait le film de Météo-France. L'exposition et les films ont ensuite repris leur route en France mais aussi au Mali, au Sénégal, au Niger, au Burkina Faso et au Bénin. AMMA se concentre aujourd'hui sur le développement d'un réseau de communicants et journalistes sur l'Afrique de l'Ouest afin d'augmenter la diffusion des informations scientifiques fournies par le programme.

3



2

► b - Philippe Bougeault (Directeur de la Recherche) et Martin Malvy (Président de la Région Midi-Pyrénées) assistent à une conférence donnée au CIC dans le cadre de la Nuit des Chercheurs, dans un amphithéâtre bondé.  
 Photo : Ph Dos, Météo-France.



► c - Armelle Barelli, Déléguée Régionale du CNRS, lors de son interview en direct de la Météopole pour le journal de France 3 Sud.  
 (Photo : P. Pichard, Météo-France)

3

A. Sonneville (CNRM) accueille P. Cohen, Maire de Toulouse et C. Guien, adjointe à l'innovation à la Mairie de Toulouse, sous la tente AMMA mise en place à l'occasion de la Novela en octobre 2009 au cœur du Grand-Rond.



# Annexes

## Liste des publications scientifiques 2009

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

Agustí-Panareda A., D. Vasiljevic, A. Beljaars, O. Bock, F. Guichard, M. Nuret, A. Garcia Mendez, E. Andersson, P. Bechtold, A. Fink, H. Hersbach, J.-P. Lafore, J.-B. Ngamini, D.J. Parker, J.-L. Redelsperger and A. M. Tompkins, 2009, Radiosonde humidity bias correction over the West African region for the special AMMA reanalysis at ECMWF, QJRMS, Volume 135 Issue 640, p 595-617. doi : 10.1002/qj.396.

Albergel, C. Rüdiger, C. Carrer, D. Calvet, J.-C. Fritz, N. Naeimi, V. Bartalis, Z. and Hasenauer S., 2009, An evaluation of ASCAT surface soil moisture products with in-situ observations in Southwestern France, Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 115-124.

Amalvict M., P. Willis, G. Wöppelmann, E. Ivins, M.-N. Bouin, L. Testut and J. Hinderer, 2009, Isostatic stability of the East Antarctic station Dumont d'Urville from long-term geodetic observations and geophysical models. Polar Research, volume 28(2), doi:10.1111/j.1751-8369.2008.00091.x.

Argence S., D. Lambert, E. Richard, J.-P. Chaboureau, J.-P. Arbogast, K. Maynard: Improving the numerical prediction of a cyclone in the Mediterranean by local potential vorticity modifications Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc. 135, 865-879.

Ballester J., H. Douville, F. Chauvin, 2008 : Present-day climatology and projected changes of warm and cold days in the CNRM-CM3 global climate model. Climate Dyn., 32, 35-54, (Référence 2008, Référence papier 2009).

Ballu, V., J. Ammann, O. Pot, O. de Viron, G. Sasagawa, G. Reverdin, M.N. Bouin, M. Cannat, C. Deplus, S. Deroussi, M. Maia and M. Diament, 2008, A seafloor experiment to monitor vertical deformation at the Lucky Strike volcano, Mid-Atlantic Ridge, Journal of Geodesy, (Référence 2008, Référence papier 2009).

Belviso, S., and G. Caniaux, 2009: A new assessment in North Atlantic waters of the relationship between DMS concentration and the upper mixed layer solar radiation dose. Global Biogeochemical Cycles, 23, GB1014, doi:10.1029/2008GB003382.

Bernstein, B.C. and C. LeBot, 2009, An Inferred Climatology of Icing Conditions, Including Supercooled Large Drops. Part II: Europe, Asia and the Globe. J. Appl. Meteor. Clim., 48, 1503-1526

Biancamaria, S., P. Bates, A. Boone and N. Mognard, 2009, Large-scale coupled hydrologic and hydraulic modeling of an arctic river: the Ob river in Siberia. Journal of Hydrology, 379, 136-150.

Bielli S., H. Douville, B. Pohl, 2009, Understanding the West African monsoon variability and its remote effects: an illustration of the grid point nudging methodology. Climate Dyn., doi:10.1007/s00382-009-0667-8.

Bock O. and M. Nuret, 2009 : Verification of NWP Model Analyses and Radiosonde Humidity Data with GPS Precipitable Water Vapor Estimates during AMMA Weather and Forecasting Volume 24, Issue 4 (August 2009) pp. 1085–1101.

Bock O., M.N. Bouin, E. Doerflinger, P. Collard, F. Masson, R. Meynadier, S. Nahmani, M. Koité, K. Gaptia Lawan Balawan, F. Didé, D. Ouedraogo, S. Pokperlaar, J.-B. Ngamini, J.P. Lafore, S. Janicot, F. Guichard, M. Nuret, The West African Monsoon observed with ground-based GPS receivers during AMMA, J. Geophys. Res., 113, D21105, doi:10.1029/2008JD010327.

Boniface K., V. Ducrocq, G. Jaubert, X. Yan, P. Brousseau, F. Masson, C. Champollion, J. Chéry, and E. Doerflinger, 2009, Impact of high-resolution data assimilation of GPS zenith delay on Mediterranean heavy rainfall forecasting, Annales Geophysicae, vol. 27, Page(s) 2739-2753.

Boone A., P. de Rosnay, G. Basalmo, A. Beljaars, F. Chopin, B. Decharme, C. Delire, A. Ducharne, S. Gascoin, M. Grippo, F. Guichard, Y. Gusev, P. Harris, L. Jarlan, L. Kergoat, E. Mougin, O. Nasanova, A. Norgaard, T. Orgeval, C. Ottlé, I. Poccard-Leclercq, J. Polcher, I. Sandholt, S. Saux-Picart, C. Taylor and Y. Xue, 2009, The AMMA Land Surface Model Intercomparison Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., doi:10.1175/2009BAMS2786.1

Boone A., Y. Xue I. Poccard-Leclercq, J. Feng, F. de Sales and P. de Rosnay, 2009, Evaluation of the WAMME model surface fluxes using results from the AMMA land-surface model intercomparison project. /Clim. Dynamics/, DOI:10.1007/s00382-009-0653-1.

Bottenheim J. W., S. Netcheva, S. Morin, and S. V. Nghiem, 2009, Ozone in the boundary layer air over the Arctic Ocean: measurements during the TARA transpolar drift 2006–2008, Atmos. Chem. Phys., 9, 4545-4557.

Bou Karam D., C. Flamant, P. Tulet, J.-P. Chaboureau, A. Dabas, M. C. Todd, 2009, Estimate of Sahelian dust emissions in the intertropical discontinuity region of the West African Monsoon, J. Geophys. Res., 114, D13106, doi:10.1029/2008JD011444.

Bou Karam D., Flamant, C., Tulet P., Todd, M., Pelon J. and Williams E., 2009, Dry cyclogenesis and dust lofting in the Inter Tropical Discontinuity region of the West African Monsoon : a representative case study. J. Geo. Res. 114, D05115, doi:10.1029/2008JD010952.

Bouiloud L. E. Martin, F. Habets, A. Boone, P. Le Moigne, J. Livet, M. Marchetti, A. Foidart, L. Franchistéguy, S. Morel, J. Noilhan, P. Pettré, 2009 : Road surface condition forecasting in France. J. Appl. Meteor. and Clim., (sous presse), DOI:10.1175/2009JAMC1900.1

Bouin M-N, Ballu V, Calmant S, Pelletier B, 2009, Improving resolution and accuracy of mean sea surface from kinematic GPS, Vanuatu subduction zone, Journal of Geodesy Volume: 83 Issue: 11 Pages: 1017-1030

Bouin M.-N., V. Ballu, S. Calmant, B. Pelletier, J.M. Boré, E. Folcher, J. Ammann, 2009, Methodology of kinematic GPS experiment for local sea surface mapping, Vanuatu, /Journal of Geodesy/, 83 (12), pp. 1203-1217, doi: 10.1007/s00190-009-0338-x.

Bourras D., A. Weill, G. Caniaux, L. Eymard, B. Bourlès, S. Letourneau, D. Legain, E. Key, F. Baudin, B. Piguet, O. Traullé, G. Bouhours, B. Sinardet, J. Barillé, J.P. Vinson, F. Boutet, and C. Berthod, C. Cléménçon, 2009: Turbulent air-sea fluxes in the Gulf of Guinea during the EGEE-AMMA experiment. Journal of Geophysical Research, 114, C04014, doi:10.1029/2008JC004951.

Bresson R., D. Ricard, V. Ducrocq, 2009, Idealized mesoscale numerical study of Mediterranean heavy precipitating convective systems, Meteorol Atmos Phys, DOI:10.1007/s00703-008-0338-z.

Brut A., Rüdiger C., Lafont S., Roujean J.-L., Calvet, J.-C. Jarlan, L. Gibelin, A.-L. Albergel, C. Le Moigne, P. Souussana, J.-F. Klumpp, K. Guyon, D. Wigneron, J.-P. and Ceschia E., 2009, Modelling LAI at a regional scale with ISBA-A-gs: comparison with satellite-derived LAI over southwestern France, Biogeosciences, 6, 1389-1404.

Cariolle D., D. Caro, R. Paoli, D. A. Hauglustaine, B. Cuénat, A. Cozic, and R. Paugam (2009), Parameterization of plume chemistry into large-scale atmospheric models: Application to aircraft NO<sub>x</sub> emissions, J. Geophys. Res., 114, D19302, doi:10.1029/2009D011873

Carrer, D., J.-L. Roujean, O. Hautecoeur, and T. Elias, 2009, Daily estimates of aerosol optical thickness over land surface based on a directional and temporal analysis of SEVIRI/MSG visible observations, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2009JD012272.

Carrer D., Roujean J.-L., Meurey C., 2009, Comparing Operational MSG/SEVIRI Land Surface Albedo Products From Land SAF With Ground Measurements and MODIS, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, doi:10.1109/TGRS.2009.2034530.

Champollion C., Drobinski P., Haeffelin M., Bock O., Tarniewicz J., Bouin MN, Vautard R., 2009, Water vapour variability induced by urban/rural surface heterogeneities during convective conditions, QJRMS, Volume: 135 Issue: 642 Pages: 1266-1276 Part: Part A

- Conil S., H. Douville, S. Tyteca, 2008 : Contribution of realistic soil moisture initial conditions to boreal summer predictability. *Climate Dyn.*, 32, 75-93, (Référence 2008, Référence papier 2009).
- Couvreux F., F. Guichard, P. H. Austin and F. Chen, 2009, Nature of the Mesoscale Boundary Layer Height and Water Vapor Variability Observed 14 June 2002 during the IHOP\_2002 Campaign, *Monthly Weather Review*, vol 137, page 414-432.
- Couvreux F., F. Guichard, O. Bock, B. Campistron, J.-P. Lafore and J.-L. Redelsperger, 2009: Synoptic variability of the monsoon flux over West Africa prior to the onset? *Quarterly Journal of the Royal Meteorology*. DOI:10.1002/qj.473.
- Couvreux, F., F. Hourdin and C. Rio, 2009: Resolved versus parametrized boundary-layer plumes. Part I: a parametrization-oriented. *Boundary Layer Meteorology*. DOI:10.1007/s10546-009-9456-5.
- Dabas A., Observing the atmospheric wind from space. *C. R. Geoscience* (2009), doi:10.1016/j.crte.2009.09.014.
- De Rosnay P., M. Drusch, A. Boone, G. Balsamo, B. Decharme, P. Harris, Y. Kerr, T. Pellarin, J. Polcher, and J.-P. Wigneron (2009), AMMA Land Surface Model Intercomparison Experiment coupled to the Community Microwave Emission Model: ALMIP-MEM, *J. Geophys. Res.*, 114, D05108, doi:10.1029/2008JD010724.
- Delayen K., J.L. Yano, 2009: Is asymptotic non-divergence of the large-scale tropical atmosphere consistent with equatorial wave theories Source: Tellus Series A-Dynamic Meteorology and Oceanography, 61 (4): 491-497. Doi:10.1111/j.1600-0870.2009.00404.
- Delrieu G., Braud I., Berne A., Borga M., Boudevillain B., Fabry F., Freer J., Gaume E., Nakakita E., Seed A., Tabary P., Uijlenhoet R., 2009, Weather radar and hydrology Preface, *Advances in Water Resources* Volume: 32 Issue: 7 Special Issue: Sp. Iss. SI Pages: 969-974.
- Desroziers G., Loïk Berre, Vincent Chabot and Bernard Chapnik, 2009 : A Posteriori Diagnostics in an Ensemble of Perturbed Analyses. *MWR*, 137, pp. 3420-3436.
- Doblas-Reyes, F.J., A. Weisheimer, M. Déqué, N. Keenlyside, M. McVean, J.M. Murphy, P. Rogel, D. Smith and T. N. Palmer, 2009, Addressing model uncertainty in seasonal and annual dynamical ensemble forecasts. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 135: 1538–1559.
- Dolman A.J., C. Gerbig, J. Noilhan and C. Sarrat, F. Miglietta, 2009: Detecting regional variability in sources and sinks of carbon dioxide: a synthesis. *Biogeosciences*, 6, 1015-1026.
- Douville H., 2009, Relative contributions of soil and snow hydrology to seasonal climate predictability : a pilot study. *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-008-0508-1.
- Douville H., 2009, Stratospheric polar vortex influence on Northern Hemisphere winter climate variability. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2009GL039334.
- Draper C.S, J.-F. Mahfouf and J.P. Walker, 2009, An EKF assimilation of AMSR-E soil moisture into the ISBA land surface scheme", *J. Geophys. Res.*, vol 114, D20104, doi:10.1029/2008JD011650
- Driouech F., M. Déqué, A. Mokssit, 2008, Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco, *Clim Dyn*, Volume: 32 Issue: 7-8 Pages: 1055-1063. (Référence doi 2008, Référence papier 2009).
- Durand Y., M. Laternser, G. Giraud, P. Etchevers, B. Lesaffre and L. Méridol, 2009, Reanalysis of 44 Yr of Climate in the French Alps (1958–2002) : Methodology, Model Validation, Climatology, and Trends for Air Temperature and Precipitation., *JAMC*, 48, 3, March 2009, 429–449.
- Durand Y., Laternser M., Giraud G., Etchevers P., Lesaffre B., Méridol L., 2009, Reanalysis of 47 years of climate in the French Alps (1958 – 2005): climatology and trends for snow cover, *Journal of Applied Meteorology and Climatology (JAMC)*. Vol. 48, No. 12, pp 2487–2512.
- Elias T., M. Haefelin, P. Drobinski, L. Gomes, J. Rangognio, T. Bergot, P. Chazette, J.-C. Raut, M. Colomb, 2009, Particulate contribution to extinction of visible radiation: Pollution, haze, and fog, *Atmospheric Research* 92 (2009) 443–454.
- Escorihuela M.J., Y. Kerr, P. de Rosnay, K. Saleh, J. P. Wigneron and J.-C. Calvet, 2009, Effect of dew on the radiometric signal of a grass field at L-Band, *IEEE Geosc. Remote Sens. Letters*, Vol. 6, No. 1, doi:10.1109/LGRS.2008.2000714.
- Etien N., V. Daux, V. Masson-Delmotte, O. Mestre, M. Stievenard, M. T. Guillemin, T. Boettger, N. Breda, M. Haupt, P. P. Perraud. Summer maximum temperature in northern France over the past century: instrumental data versus multiple proxies (tree-ring isotopes, grape harvest dates and forest fires) *Climatic Change*, Received Volume: 94 Issue: 3-4 Pages: 429-456 : (Référence doi 2008, Référence papier 2009).
- Faccani C., Rabier F., Fourrié N., Agusti-Panareda A., Karbou F., Moll P., Lafore JP., Nuret M., Hidou F., Bock O., 2009, The impact of the AMMA Radiosonde Data on the French Global Assimilation and Forecast System. *Weather and Forecasting*, 24, 1268-1286. doi:10.1175/2009WAF2222237.1.
- Flemming J., Inness A., Flentje H., Huijnen V., Moinat P., Schultz M. G., and Stein O.: Coupling global chemistry transport models to ECMWF's integrated forecast system, *Geosci. Model Dev.*, 2, 253-265, 2009.
- Frappart F., P. Hiernaux, F. Guichard, E. Mougin, L. Kergoat, M. Arjounin, F. Lavenu, M. Koité, J-E. Paturel and T. Lebel, 2009, Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali, *Journal of Hydrology*, Volume 375, Issues 1-2, 30 August 2009, Pages 128-142.
- Frey M.M., J. Savarino, S. Morin, J. Erbland and J.M.F. Martins, 2009, Photolytic imprint on the nitrate stable isotope signal in snow and atmosphere of East Antarctica and implications for reactive nitrogen cycling, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 8681 – 8696.
- Friedrich K., U. Germann and P. Tabary, 2009 : Influence of Ground Clutter Contamination on Polarimetric Radar Parameters, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 26, Issue 2, pp. 251–269.
- Gascoin S., A. Ducharme, P. Ribstein, Y. Lejeune and P. Waggon, 2009, Dependence of bare soil albedo on soil moisture on the moraine of the Zongo glacier (Bolivia): Implications for land surface modeling, *J. Geophys. Res.*, 114, D19102, doi:10.1029/2009JD011709.
- Georgiev C. G., Santurette P., 2009 : Mid-level jet in intense convective environment as seen in the 7.3 μm satellite imagery. *Atmos. Res.*, 93 277-285.
- Gérard L., J-M. Piriou, R. Brozkova, J-F. Geleyn & D. Banciu, 2009, Cloud and Precipitation Parameterization in a Meso-Gamma-Scale Operational Weather Prediction Model. *Monthly Weather Review*, 137, 3960-3977.
- Gilet J.B., M. Plu and G. Rivière, 2009, Nonlinear Baroclinic Dynamics of Surface Cyclones Crossing a Zonal Jet. *J. Atmos. Sci.*, doi:10.1175/2009JAS3086.1, 66, 3021-3041.
- Gouasmi M., P. Mordelet, V. Démarez, J.-P. Gastellu-Etchegorry, V. Le Dantec, G. Dedieu, J.-C. Menaut, J.-C. Calvet, T. Lamaze, 2009, Photosynthesis of a temperate fallow C3 herbaceous ecosystem: measurements and model simulations at the leaf and canopy levels, *Photosynthetica*, 47(3), 331-339.
- Gourley J.J., A.J. Illingworth and P. Tabary, 2009 : Absolute calibration of radar reflectivity using redundancy of the polarization observations and implied constraints on drop shapes, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 26, Issue 4, pp. 689–703.
- Guemas V., D Salas-Mélia, M Kageyama, H Giordani, A Voldoire, E Sanchez-Gomez (2008) Summer interactions between weather regimes and surface ocean in the North-Atlantic region. *Climate Dynamics*, (Référence doi 2008, Référence papier 2009).
- Guemas V., D. Salas-Mélia, M. Kageyama, H. Giordani, A. Voldoire, and E. Sanchez-Gomez (2009), Winter interactions between weather regimes and marine surface in the North Atlantic European region, */Geophys. Res. Lett.*, 36, L09816, doi:10.1029/2009GL037551.
- Guichard F., L. Kergoat, E. Mougin, F. Timouk, F. Baup, P. Hiernaux and F. Lavenu, 2009, Surface thermodynamics and radiative budget in the Sahelian Gourma: Seasonal and diurnal cycles, *Journal of Hydrology*, Volume 375, Issues 1-2, 30 August 2009, Pages 161-177.
- Guichard, F., N. Asencio, C. Peugeot, O. Bock, J.-L. Redelsperger, X. Cui, M. Garvert, B. Lamptey, E. Orlando, J. Sander, F. Fierli, M. A. Gaertner, S. Jones, J.-P. Lafore, A. Morse, M. Nuret, A. Boone, G. Balsamo, P. de Rosnay, B. Decharme, P. P. Harris, J.-C. Bergès, 2009, An intercomparison of simulated rainfall and evapotranspiration associated with a mesoscale convective system over West Africa. *Weather and Forecasting*, DOI:10.1175/2009WAF2222250.1.
- Hallegratte S., 2009, Strategies to adapt to an uncertain climate change, *Global Environmental Change* 19, 240-247.
- Herrmann M., J. Bouffard and K. Béranger, 2009, Monitoring open-ocean deep convection from space, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L03606, doi:10.1029/2008GL036422.
- Hidalgo J., V. Masson and L. Gimeno, 2009, Scaling the Daytime Urban Heat Island and Urban-Breeze Circulation, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, doi:10.1175/2009AMC2195.1
- Hoor P.J., Borken-Kleefeld D. Caro, O. Dessens, O. Endresen, M. Gauss, V. Grewe, D. Hauglustaine, I.S.A. Isaksen, P. Jöckel, J. Lelieveld, G. Myhre, E. Meijer, D. Olivié, M. Prather, C. Schnadt Poberaj, K. P. Shine, J. Staehelin, Q. Tang, J. van Aardenne, P. van Velthoven and R. Sausen, The impact of traffic emissions on atmospheric ozone and OH: results from QUANTIFY, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 3113-3136, 2009.

- Hourdin F., F. Guichard, F. Favot, P. Marquet, A. Boone, J.-P. Lafore and J.-L. Redelsperger, P. Ruti, A. Dell'Aquila, T.L. Doval, A. K. Traore, and H. Galée, 2009, AMMA-Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* DOI:10.1175/2009BAMS2791.1
- Joly M. and A. Volodire, 2009, Influence of ENSO on the West African monsoon: temporal aspects and atmospheric processes, *Journal of Climate*, Volume: 22, Issue: 12, pages 3193–3210.
- Joly M., A. Volodire, 2009 : Role of the Gulf of Guinea in the inter-annual variability of the West African monsoon : what do we learn from CMIP3 coupled simulations ? *International Journal of Climate* : Oct 28 2009). DOI:10.1002/joc.2026.
- Jomelli V., D. Brunstein, M. Déqué, M. Vrac and D. Grancher, 2009, Impacts of future climatic change (2070–2099) on the potential occurrence of debris flows: a case study in the Massif des Ecrins (French Alps). *Climatic Change*, DOI: 10.1007/s10584-009-9616-0
- Karam H-A., A. J. Pereira Filho, V. Masson, J. Noilhan, and E. Pereira Marques Filho, 2009, Formulation of a tropical town energy budget (t-teb) scheme. *Theoretical and Applied Climatology*, doi:10.1007/s00704-009-0206-x
- Kostopoulou E., Tolika K., Tegoulias I., Giannakopoulos C., Somot S., Anagnostopoulou C., Maheras P., 2009, Evaluation of a regional climate model using in situ temperature observations over the Balkan Peninsula, *Tellus Series A- Dynamic Meteorology and Oceanography*, Volume: 61 Issue: 3 Pages: 357-370.
- Kucharski F., A. A. Scaife, J. H. Yoo, C. K. Folland, J. Kinter, J. Knight, D. Fereday, A. M. Fischer, E. K. Jin, J. Kröger, N.-C. Lau, T. Nakagawa, M. J. Nath, P. Pegion, E. Rozanov, S. Schubert, P. V. Sponsheva, J. Syktus, A. Volodire , J. H. Yoon, N. Zeng and T. Zhou, 2008 : The CLIVAR C20C project : skill of simulating Indian monsoon rainfall on interannual to decadal timescales. Does GHG forcing play a role ? *Climate Dynamics*, (Référence doi 2008, Référence papier 2009).
- Kulmala M., A. Asmi, H. K. Lappalainen, K. S. Carslaw, U. Pöschl, U. Baltensperger, Ø. Hov, J. L. Breuer, S. P., 2009: Introduction: European Integrated project on Aerosol Cloud Climate and Air Quality interactions (EUCAARI) - integrating aerosol research from nano to global scales. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2825-2841, 2009.
- Lachkar Z., Orr J.C., Dutay J.C., Delécluse P., 2009, On the role of mesoscale eddies in the ventilation of Antarctic intermediate water, *Deep-Sea Research part I-Oceanographic research papers*, Volume 56 Issue: 6 Pages: 909-925.
- Laine A., M. Kageyama D. Salas-Mélia, A. Volodire, G. Rivière, G. Ramstein, S. Planton, S. Tyteca and J. Y. Peterschmitt, 2008 : Northern hemisphere storm tracks during the last glacial maximum in the PMIP2 ocean-atmosphere coupled models : energetic study, seasonal cycle, precipitation. *Climate Dynamics*, Volume 32 Issue : 5 Pages 593-614. (Référence doi 2008, Référence papier 2009).
- Laine A., M. Kageyama, D. Salas-Melia, G. Ramstein, S. Planton S., S. Denvil and S. Tyteca S., 2009, An Energetics Study of Wintertime Northern Hemisphere Storm Tracks under 4 x CO<sub>2</sub> Conditions in Two Ocean-Atmosphere Coupled Models, *Journal of Climate*, Volume: 22 Issue: 3 Pages: 819-839.
- Laj P., J. Klausen, M. Bilded, C. Plass-Duelmer, G. Pappalardo, C. Clerbaux, U. Baltensperger, J. Hjorth, D. Simpson, S. Reimann, P.-F. Coheur, A. Richter, M. de Mazière, Y. Rudich, G. McFiggans, K. Torseth, A. Wiedensohler, S. Morin, M. Schulz, J. Allan, J.-L. Attié, I. Barnes, W. Birmilli, P. Cammas, J. Dommen, H.-P. Dorn, D. Fowler, J.-S. Fuzzi, M. Glasius, C. Granier, M. Hermann, I. Isaksen, S. Kinne, I. Koren, F. Madonna, M. Maione, A. Massling, O. Moehler, L. Mona, P. Monks, D. Müller, T. Müller, J. Orphal, V.-H. Peuch, F. Stratmann, D. Tanré, G. Tyndall, A. A. Rizi, M. Van Roozendael, P. Villani, B. Wehner, H. Wex and A. A. Zardini, 2009 : Measuring atmospheric composition change, /Atmos. Env./, 43, 5351-5414.
- Langlois A., Brucker L., Kohn J., Royer A., Derksen C., Cliche P., Picard G., Fily M. and Willemet J.M. (2009). Regional Retrieval of Snow Water Equivalent (SWE) using Thermodynamic Snow Models in Québec, Canada. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 10, No. 6, 1447-1462.
- Lauvau T., O. Pannekoucke, C. Sarrat, F. Chevallier, P. Ciais, J. Noilhan and P. J. Rayner : Structure of the transport uncertainty in mesoscale inversions of CO<sub>2</sub> sources and sinks using ensemble model simulations *Biogeosciences*, 6, 1089-1102, 2009.
- Lauvau T., Gioli B., Sarrat C., Rayner P. J., Ciais P., Chevallier F., Noilhan J., Miglietta F., Brunet Y., Ceschia E., Dolman H., Elbers J. A., Gerbig C., Hütjes R., Jarosz N., Legain D., Uliasz M., 2009, Bridging the gap between atmospheric concentrations and local ecosystem measurements, *Geophysical Research Letters* Volume: 36 Article Number: L19809.
- Lavaysse C., C. Flamant, S. Janicot, J.-P. Lafore, D. Parker and J. Pelon, 2009: Seasonal cycle of the West African heat low: a climatological perspective, *Clim. Dyn.* 33, 313-330. DOI:10.1007/s00382-009-0553-4.
- Lebeaupin Brossier C., V. Ducrocq, H. Giordani, 2009: Two-way one-dimensional high-resolution air-sea coupled modelling applied to Mediterranean heavy rain events, *Quat. J. Roy. Meteor. Soc.*, Volume 135, 187-204.
- Lebeaupin Brossier, C., V. Ducrocq and H. Giordani, 2009: Effects of the air-sea coupling time frequency on the ocean response during Mediterranean intense events, *Ocean Dynamics*, 59, x, 11pp, doi:10.1007/s10236-009-0198-1.
- Lebeaupin, C., V. Ducrocq and H. Giordani, 2009, Sensitivity of three Mediterranean heavy rain events to two different sea surface fluxes parameterizations in high-resolution numerical modelling. *JGR-Atmospheres*, 113, D21109, doi :10.1029/2007JD009613.
- Lefèvre J-M, 2009, High swell warnings in the Caribbean islands during march 2008, *Nat Hazard* 49: 361-370.
- Lemonsu A., Bélair S., Mailhot J., and Leroyer S., 2009, Evaluation of the Town Energy Balance Model in Cold and Snowy Conditions during the Montreal Urban Snow Experiment 2005, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, DOI:10.1175/2009JAMC2131.1.
- Lemonsu A., Bélair S., and Mailhot J., 2009, The new Canadian urban modelling system: Evaluation for two cases from the Joint Urban 2003 Oklahoma City experiment. *Boundary Layer Meteorology*, 133, 47-70.
- Leroyer S., Mailhot J., Bélair S., Lemonsu A., and Strachan I., 2009, Modeling the surface energy budget during the thawing period of the 2006 Montreal Urban Snow Experiment, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, doi:10.1175/2009JAMC2153.1.
- Longepe N., Allain S., Ferro-Famil L., Pottier E., Durand Y., 2009, Snowpack Characterization in Mountainous Regions Using C-Band SAR Data and a Meteorological Model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 47, Issue 2, pp 406-418, doi:10.1109/TGRS.2008.2006048.
- Losada T., B. Rodríguez-Fonseca, S. Janicot, S. Gervois, F. Chauvin, P. Ruti, 2009: Tropical response to the Atlantic Equatorial mode : AGCM multimodel approach. *Climate Dynamics* doi:10.1007/s00382-009-0624-6.
- Losada T., B. Rodríguez-Fonseca, S. Janicot, S. Gervois, F. Chauvin, P. Ruti, 2009: A multi-model approach to the Atlantic Equatorial mode : impact on the West African monsoon. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-009-0625-5.
- Mahfouf J.-F., K. Bergaoui, C. Draper, F. Bouyssel, F. Taillefer and L. Taseva, 2009, A comparison of two off-line soil analysis schemes for assimilation of screen level observations, *J. Geophys. Res.*, 114, D08105, (Référence doi 2008 Référence papier 2009)
- Mahfouf J.-F., and B. Bilodeau, 2009, A simple strategy for linearizing complex moist convective schemes. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol 135, 953-962, doi:10.1002/qj.427.
- Mallet M., P. Tulet, D. Serça, F. Solmon, O. Dubovik, J. Pelon, V. Pont and O. Thouron, 2009, Impact of dust aerosols on the radiative budget, surface heat fluxes, heating rate profiles and convective activity over West Africa during March 2006, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 7143-7160.
- Marin F., G. Caniaux, B. Bourlès, H. Giordani, Y. Gouriou and E. Key, 2009 : Why were sea surface temperatures so different in the Eastern Equatorial Atlantic in June 2005 and 2006? *Journal of Physical Oceanography*, 39, 1416-1431. doi:10.1175/2008JPO4030.1.
- Martet M., V.-H. Peuch, B. Laurent, B. Marticorena and G. Bergametti, 2009, Evaluation of long-range transport and deposition of desert dust with the CTM Mocage, *Tellus*, 61B, 449-463.
- Massart S., C. Clerbaux, D. Cariolle, A. Piacentini, S. Turquety and J. Hadji-Lazaro, 2009, First steps towards the assimilation of IASI ozone data into the MOCAGE-PALM system, *Atmos. Chem. Phys.*, Volume: 9, Issue: 14, Pages: 5073-5091.
- Masson V., Seity Y., 2009, Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes. *JAMC*, 48, 1377–1397.
- Ménégoz M., Salas y Melia D., Legrand M., Teyssèdre H., Michou M., Peuch V.-H., Martet M., Josse, B., and Dombrowski-Etchevers I.: Equilibrium of sinks and sources of sulphate over Europe: comparison between a six-year simulation and EMEP observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 4505-4519, 2009.
- Merlivat L., M. Gonzalez Davila, G. Caniaux, J. Boutin and G. Reverdin, 2009: Impact of dynamical and biogeochemical mesoscale processes on CO<sub>2</sub> air-sea exchange: a lagrangian study in the northeast Atlantic Ocean during the POMME experiment. *Journal of Geophysical Research*, 114, C03010, doi:10.1029/2007JC004657.

- Mestre O., S. Hallegatte, 2009, Predictors of Tropical Cyclone Numbers and Extreme Hurricane Intensities over the North Atlantic Using Generalized Additive and Linear Models. *Journal of Climate*, Vol. 22, No. 3, 633–648.
- Montmerle T. and C. Faccani, 2009: Mesoscale assimilation of radial velocities from Doppler radar in a pre-operational framework. *Mon. Wea. Rev.*, vol 137, No. 6, 1939–1953.
- Mougin E. , P. Hiernaux, L. Kergoat, M. Grippa, P. de Rosnay, F. Timouk, V. Le Dantec, V. Demarez, F. Lavenu, M. Arjounin, T. Lebel, N. Soumague, E. Ceschia, B. Mougenot, F. Baup, F. Frappart, P.L. Frison, J. Gardelle, C. Gruhier, L. Jarlan, S. Mangiarotti, B. Sanou, Y. Tracol, F. Guichard, V. Trichon, L. Diarra, A. Soumaré, M. Koité, F. Dembélé, C. Lloyd, N.P.Hanan, C. Damesin, C. Delon, D. Serça, C. Galy-Lacaux, J. Seghieri, S. Becerra, H. Diah, F. Gangneron and P. Mazzea, 2009, The AMMA-CATCH Gourma observatory site in Mali: Relating climatic variations to changes in vegetation, surface hydrology, fluxes and natural resources, *Journal of Hydrology*, Volume 375, Issues 1-2, Pages 14-33.
- Myhre G., M. Kvalevåg, G. Rädel, J. Cook, K. P. Shine, H. Clark, F. Karcher, K. Markowicz, A. Kardas, P. Wolkenberg, Y. Balkanski, M. Ponater, P. Forster, A. Rap, R. Rodriguez De Leon, 2009, Intercomparison of radiative forcing calculations of stratospheric water vapour and contrails, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 18, No. 6, 585-596
- Pangaud T., N. Fourrie, V. Guidard, M. Dahoui, and F. Rabier, 2009, Assimilation of AIRS Radiances Affected by Mid- to Low-Level Clouds. *Monthly Weather Review*, 137, 4276-4292.
- Pannekoucke O., 2009, Heterogeneous correlation modelling based on the wavelet diagonal assumption and on the diffusion operator. *Mon. Wea. Rev.* 137: 2995–3012. Special Issue on Mathematical Advances in Data Assimilation DOI:10.1175/2009MWR2783.1.
- Peings Y. and H. Douville (2009) Influence of the Eurasian snow cover on the Indian summer monsoon variability in observed climatologies and CMIP3 simulations, *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-009-0565-0.
- Peings Y., H. Douville and P. Terray (2009) Extended winter Pacific North America oscillation as a precursor of the Indian summer monsoon rainfall, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L11710, doi:10.1029/2009GL038453..
- Pellarin, J.P. Laurent, B. Cappaerae, B. Decharme, L. Descroix and D. Ramier, 2009, Hydrological modeling and associated microwave emission of a semi-arid region in South-western Niger, *Journal of Hydrology*, Volume 375, Issues 1-2, 30 August 2009, Pages 262-272.
- Pergaud J., V. Masson, S. Malardel and F. Couvreux, 2009, A parameterization of dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction. *Boundary-Layer Meteorol.*, 132(1):83-106.
- Pisso I., E. Real, K. Law, B. Legras, N. Bousrez, J.-L. Attié and H. Schlagler, 2009: Estimation of mixing rates in the troposphere from lagrangian trace gas reconstructions, *J. Geophys. Res.*, 114 (D19301), doi:10.1029/2008JD011289.
- Pitman A. J., C. Delire, A. Voldoire & al., 2009, Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L14814, doi:10.1029/2009GL039076.
- Poli P., S.B. Healy, F. Rabier and J. Pailleux, 2008: Preliminary Assessment of the Scalability of GPS Radio Occultation Impact in Numerical Weather Prediction *Geophysical Research Letters*, 35. (Référence papier 2009)
- Pradier-Vabre S., C. Forster, W. W. M. Heesen, C. Pagé, S. Sénési, A. Tafferner, I. Bernard-Boussières, O. Caumont, A. Drouin, V. Ducrocq, Y. Guillou et P. Josse, 2009 : Description of convective-scale numerical weather simulation use in a flight simulator within the Flysafe project. *Meteor. Atmos. Phys.*, 103(1–4), 127–136, doi:10.1007/s00703-008-0317-4.
- Protat, A. Bouniol, D. Delanoë, J. May, P. Plana-Fattori, A. Hasson, A. O'Connor, E. Görsdorf, U. et Heymsfield A., 2009, Assessment of CloudSat reflectivity measurements and ice cloud properties using ground based and airborne cloud radar observations. *J. Oceanic Atmos. Technol.*, 26, 1717-1741.
- Quetelard H., P. Bessemoulin, R-S. Cerveny, T-C. Peterson, A. Burton and Y. Boodhoo, 2009: World-record rainfall during tropical cyclone Gamede. *Bull. Amer. Met. Soc.*, Volume 80, Issue 5 (May 2009), 603-607.
- Quintana Segui P., Ribes A., Martin E., Habets F., Boé J., 2009: Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.09.050, Corrected Proof, Available online 6 October 2009.
- Quintana Seguí P., Martin E., Habets F., and Noilhan J., 2009, Improvement, calibration and validation of a distributed hydrological model over France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13, 163–181.
- Rabier F., A. Bouchard, E. Brun, A. Doerenbecher, S. Guedj, V. Guidard, F. Karbou, V.-H. Peuch, L. E. Amraoui, D. Puech, C. Genthon, G. Picard, M. Town, A. Hertzog, F. Vial, P. Cocquerez, S. Cohn, T. Hock, H. Cole, J. Fox, D. Parsons, J. Powers, K. Romberg, J. VanAndel, T. Deshler, J. Mercer, J. Haase, L. Avallone, L. Kalnajsand, C. R.Mechoso, A. Tangborn, A. Pellegrini, Y. Frenot, A. McNally, J.-N. Thépaut, G. Balsamo and P. Steinle, 2009: "The Concordiasi project in Antarctica" Bulletin of the American Meteorological Society, doi:10.1175/2009BAMS2764.1.
- Raynaud L., L. Berre, G. Desroziers, 2009, Objective filtering of ensemble-based background-error variances. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 135A, 1177-1199.
- Rémy S. and T. Bergot, 2009, Assessing the impact of observations on a local numerical fog prediction system, *QJRMS*,135: 1248–1265, doi:10.1002/qj.448.
- Renaudie C., R. Baraille, Y. Morel, G. Hello, H. Giordani: Adaptation of the vertical resolution in the mixed layer for HYCOM, *Ocean modelling*, 30, 178-189.
- Rey G., A. Fouillet, P. Bessemoulin, P. Frayssinet, A. Dufour, E. Jouglia and D. Hémon, 2009, Heat exposure and socio-economic vulnerability as synergistic factors in heat-wave-related mortality, *European Journal of Epidemiology*, Volume 24, Number 9, Pages 495-502 doi:10.1007/s10654-009-9374-3.
- Ribes A, J-M. Azaïs, S. Planton, 2009, Adaptation of the optimal fingerprint method for climate change detection using a well-conditioned covariance matrix estimate, *Climate Dynamics*: Volume 33, Issue 5, Page 707-722, doi:10.1007/s00382-009-0561-4.
- Ricaud P., Pommereau J.-P., Attié J.-L., Le Flochmoën E., El Amraoui L., Teyssèdre H., Peuch V.-H., Feng W., Chipperfield M.P., 2009, Equatorial transport as diagnosed from nitrous oxide variability. *Atmospheric Chemistry and Physics*,9, 8173-8188.
- Ricaud, P., J.-L. Attié, B. Barret, H. Teyssèdre, L. El Amraoui, V.-H. Peuch, M. Matricardi and P. Schlüssel, 2009, Equatorial total Column of Nitrous Oxide as measured by IASI on MetOp, implications to transport processes, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 3947-3956.
- Rio C., F. Hourdin, J.-Y. Grandpeix and J-P. Lafore (2009), Shifting the diurnal cycle of parameterized deep convection over land, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07809, doi:10.1029/2008GL036779.
- Rivière O., G. Lapeyre and O. Talagrand: A Novel Technique for Nonlinear Sensibility Analysis: application to moist predictability. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 135B, 1520–1537.
- Rivière, G. 2009: Effect of latitudinal variations in low-level baroclinicity on eddy life cycles and upper-tropospheric wave-breaking processes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, /, Vol. 66, No. 6. p1569–1592.
- Roquelaure S., and T. Bergot, 2009, Contribution from a local ensemble prediction system (L-EPS) for improving fog and low clouds forecasts at airports, *Weather and Forecasting*, 24, 39-52
- Roquelaure S., R. Tardif and T. Bergot, 2009, Skill of a ceiling and visibility local ensemble prediction system (L-EPS) according to fog type prediction at Pris Charles de Gaulle airport, *Weather and Forecasting*, doi:10.1175/2009WAF222213.1, 24, 1511-1523.
- Rotach M.W., Ambrosetti P., Ament F., Appenzeller C., Arpagaus M., Bauer H.S., Behrendt A., Bouttier F., Buzzi A., Corazza M., Davolio S., Denhard M., Dorninger M., Fontannaz L., Frick J., Fundel F., Germann U., Gorgas T., Hegg C., Hering A., Keil C., Liniger M.A., Marsigli C., McTaggart-Cowan R., Montani A., Mylne K., Ranzi R., Richard E., Rossa A., Santos-Muñoz D., Schär C., Seity Y., Staudinger M., Stoll M., Volkert H., Walser A., Wang Y., Werhahn J., Wulfmeyer V., Zappa M., 2009, MAP D-PHASE: Real-time Demonstration of Weather Forecast Quality in the Alpine Region, *Bull Amer Meteor Soc*, 90 (9), 1321-1336, doi:10.1175/2009BAMS2776.1.
- Rouil L., C. Honoré, R. Vautard, M. Beekmann, B. Bessagnet, L. Malherbe, F. Meleux, A. Dufour, C. Elichegaray, J.M. Flaud, L. Menut, D. Martin, A. Peuch, V.H. Peuch and N. Poisson, 2009, Prev'air: An Operational Forecasting and Mapping System for Air Quality in Europe, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol 90, Issue 1, pp. 73–83.
- Rüdiger C., J.-C. Calvet, C. Gruhier, T. Holmes, R. De Jeu, W. Wagner, "An intercomparison of ERS-Scat and AMSR-E soil moisture observations with model simulations over France", *J. Hydrometeorol.*, 10, 431-447, doi:10.1175/2008JHM997.1, 2009.
- Rutter N., R. Essery, J. Pomeroy, N. Altimir, K. Andreadis, I. Baker, A. Barr, P. Bartlett, A. Boone, H. Deng, H. Douville, E. Dutra, K. Elder, C. Ellis, X. Feng, A. Gelfan, A. Goodbody, Y. Gusev, D. Gustafsson, R. Hellstrom, Y. Hirabayashi, T. Hirota, T. Jonas, V. Koren, A. Kuragina, D. Lettenmaier, W.-P. Li, C. Luce, E. Martin, & al, 2009, Evaluation of forest snow processes models (SnowMIP2). *J. Geophys. Res.*, 114, D06111, (Référence doi 2008, Référence papier 2009)
- Samson, G., H. Giordani, G. Caniaux, F. Roux, 2009, Numerical investigation of an oceanic resonant regime induced by hurricane winds, *Ocean Dyn.*, DOI:10.1007/s10236-009-0203-8.

- Sanchez-Gomez E., S. Somot and M. Déqué, 2009, Ability of an ensemble of regional climate models to reproduce the weather regimes during the period 1961-2000, *Clim. Dyn.*, 33(5):723-736, doi:10.1007/s00382-008-0502-7.
- Sanchez-Gomez E., S. Somot and A. Mariotti (2009), Future changes in the Mediterranean water budget projected by an ensemble of regional climate models, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L21401, doi:10.1029/2009GL040120.
- Sandu I., Brenguier J-L., O. Thouron O. and Stevens B., (2009), How important is the vertical structure for the representation of aerosol impacts on the diurnal cycle of marine stratocumulus? *Atmos. Chem. Phys.*, Volume: 9, Issue: 12, Pages: 4039-4052.
- Sarrat C., Noilhan J., Lacarrère P., Ceschia E., Ciais P., Dolman A.J., Elbers J.A., Gerbig C., Gioli B., Lauvaux T., Miglietta F., Neininger B., Ramonet M., Vellinga O., Bonnefond J. M., 2009, Mesoscale modelling of the CO<sub>2</sub> interactions between the surface and the atmosphere applied to the April 2007 CERES field experiment, *Biogeosciences*, Volume: 6 Issue: 4 Pages: 633-646.
- Sarrat C., Noilhan J., Lacarrère P., Masson V., Ceschia E., Ciais P., Dolman A., Elbers J., Gerbig C., and Jarosz N., 2009, CO<sub>2</sub> budgeting at the regional scale using a Lagrangian experimental strategy and meso-scale modeling, *Biogeosciences*, 6, 113-127.
- Saux-Picart S., C. Ottlé, B. Decharme, C. André, M. Zribi, A. Perrier, B. Coudert, N. Boulain, B. Cappelaere, L. Descroix and D. Ramier, 2009, Water and energy budgets simulation over the AMMA-Niger super-site spatially constrained with remote sensing data, *Journal of Hydrology*, Volume 375, Issues 1-2, 30 August 2009, Pages 287-295.
- Saux-Picart S., C. Ottlé, A. Perrier, B. Decharme, B. Coudert, M. Zribi, N. Boulain, B. Cappelaere, D. Ramier, 2009, EtHyS\_Savannah : A multiple source land surface model applied to Sahelian landscapes, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 149, Issue 9, Pages 1421-1432.
- Semanne N., V.-H. Peuch, S. Pradier, G. Desroziers, L. El Amraoui, P. Brousseau, S. Massart, B. Chapnik, and A. Peuch : On the extraction of wind information from the assimilation of ozone profiles in Météo-France 4-D-Var operational NWP suite, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 4855-4867, 2009.
- Steiner A., J. Pal, S. Rauscher, J. Bell, N. Diffenbaugh, A. Boone, L. Sloan and F. Giorgi, 2009, Land surface coupling in regional climate simulations of the West African monsoon. /Clim. Dynamics/, doi:10.1007/s00382-009-0543-
- Stickler A., A-N. Grant T., Ewen, T-F. Ross, R-S Vose, J. Comeaux, P. Bessemoulin, K. Jylhä, W-K. Adam, P. Jeannet, A. Nagurny, A-M. Sterin, R. Allan, G-P. Compo, T. Griesser and S. Brönnimann 2009: The comprehensive historical upper-air network (CHUAN). *Bull. Amer. Met. Soc. (BAMS)*. Doi:10.1175.2009BAMS2852.1.
- Tabary P., G. Vulpiani, J. Gourley, A. Illingworth, J. Thompson and O. Bousquet, 2009: Unusually high differential attenuation at C-band: results from a two-year analysis of the French Trappes polarimetric radar data. *J. App. Meteorol. Clim.* Volume : 48, Issue : 10, Pages: 2037-2053. doi:10.1175/2009JAMC2039.1.
- Tsimplis M., Marcos M., Colin, J., Somot S., Pascual A., Shaw A.G.P. (2009) Sea level variability in the Mediterranean Sea during the 1990s on the basis to two 2d and one 3d model. *Journal of Marine Systems*, 78 (1): 109-123, doi:10.1016/j.jmarsys.2009.04.003.
- Vidal J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Baillon M., Soubeyroux J.-M?, 2009, A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*. Doi:10.1002/joc.2003.
- Vigaud N., Roucou P., Fontaine B., S. Sijikumar, S. Tyteca, 2009, WRF/ARPEGE-CLIMAT simulated climate trends over West Africa, *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-009-0707-4.
- Vincendon B. V. Ducrocq, S. Dierer, V. Kotroni, M. Le Lay, M. Milelli, A. Quesney, G M. Saulnier, D. Rabuffetti, L. Bouilloud, K. Chancibault, S. Anquetin, K. Lagouvardos, P. Steiner, 2009: Flash flood forecasting within the PREVIEW project: value of high-resolution hydrometeorological coupled forecast, *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 103, pp 115-125.
- Voitus F., P. Termonia and P. Bénard, 2009, Well-Posed Lateral Boundary Conditions for Spectral Semi-Implicit Semi-Lagrangian Schemes: Tests in a One-Dimensional Model. *MWR*, 137 315-330.
- Wagnon P., M. Lafaysse, Y. Lejeune, L. Maisincho, M. Rojas and J.P. Chazarin, 2009, Understanding and modeling the physical processes that govern the melting of snow cover in a tropical mountain environment in Ecuador, *J. Geophys. Res.*, 114, D19113, doi:10.1029/2009JD012292.
- Weisheimer A., Doblas-Reyes F.J., Palmer T.N., Alessandri A., Arribas A., Déqué M., Keenlyside N., MacVean M., Navarra A., Rogel P., 2009, ENSEMBLES: A new multi-model ensemble for seasonal-to-annual predictions-Skill and progress beyond DEMETER in forecasting tropical Pacific SSTs, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, No. 21, L21711.
- Woepelmann G., Letetrel C., Santamaria A., Bouin M.-N., Collilieux X., Altamimi Z., Williams SDP, Miguez BM, 2009, Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame, *Geophysical Research Letters* Volume: 36 Article Number: L12607.
- Yan X., V. Ducrocq, G. Jaubert, P. Brousseau, P. Poli, C. Champollion, C. Flamant, K. Boniface, 2009, The benefit of GPS zenith delay assimilation to high-resolution quantitative precipitation forecasts: a case-study from COPS IOP 9, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 135, N°644, 1788-1800, doi:10.1002/qj.508.
- Yan X., V. Ducrocq, P. Poli, M. Hakam, G. Jaubert and A. Walpersdorf (2009), Impact of GPS zenith delay assimilation on convective-scale prediction of Mediterranean heavy rainfall, *J. Geophys. Res.*, 114, D03104, (Référence doi 2008, Référence papier 2009).
- Yano J-I and Bonazzola M., 2009, Scale Analysis for Large-Scale Tropical Atmospheric Dynamics, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol 66, 159-172, doi:10.1175/2008JAS2687.1.
- Yano J-I, Mulet S., Bonazzola M., 2009, Tropical large-scale circulations: asymptotically non-divergent ?, Tellus series a-dynamic meteorology and oceanography volume 61, issue 3, pages 417-427.
- Zhou TJ, B. Wu, A. A. Scaife, S. Brönnimann, A. Cherchi, D. Fereday, A. M. Fischer, C. K. Folland, K. E. Jin, J. Kinter, J. R. Knight, F. Kucharski, S. Kusunoki, N.-C. Lau, Lijuan Li, M. J. Nath, T. Nakaegawa, A. Navarra, P. Pegion, E. Rozanov, S. Schubert, P. Sporyshev, A. Volodire, Xinyu Wen, J. H. Yoon and N. Zeng, 2009 : The CLIVAR C20C project : which components of the Asian-Australian monsoon circulation variations are forced and reproducible ? *Clim. Dyn.*, online, doi:10.1007/s00382-008-0501-8.
- Zribi M., M. Pardé, P. De Rosnay, F. Baup, N. Boulain, L. Descroix, T. Pellarin, E. Mougin, C. Ottlé and B. Decharme, 2009, ERS scatterometer surface soil moisture analysis of two sites in the south and north of the Sahel region of West Africa, *Journal of Hydrology*, Volume 375, Issues 1-2, 30 August 2009, Pages 253-261.

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

- Amodei M. and J. Stein, 2009 : Deterministic and fuzzy verification methods for a hierarchy of numerical models, Meteorological Applications, 16, 191-203.
- Baehr C., 2009, Stochastic modeling and filtering of discrete measurements for a turbulent field. application to measurements of atmospheric wind. International Journal of Modern Physics B, 23 (28-29), 5424-5433, doi:10.1142/S0217979209063742.
- Boudevillan B, S. Argence, C. Claud, V. Ducrocq, B. Joly, A. Joly, D. Lambert, O. Nuissier, M. Plu, D. Ricard, P. Arbogast, A. Berne, J-P Chaboureau, B. Chapon, F. Crépin, G. Delrieu, E. Doerflinger, B. M. Funatsu, P-E Kirtstetter, F. Masson, K. Maynard, E. Richard, E. Sanchez, L. Terray and A. Walpersdord, 2009, Cyclagnèses et précipitations intenses en région méditerranéenne : origines et caractéristiques, La Météorologie n° 66, p 18-28.
- Caspar R., L. Labbé and E. Jakob, 2009, les tornades en France : généralités et analyse de l'événement du 3 août 2008 en val de Sambre, La météorologie, n°67, novembre 2009, pages 19-30.
- Champeaux J-L, Dupuy P., Laurantin O., Soulan I., Tabary P., Soubeyroux JM., 2009, Rainfall measurements and quantitative precipitation estimations at Meteo-France: inventory and prospects, Houille Blanche, Issue: 5 Pages: 28-34.
- Daniel P., B. Haie and X. Aubail, 2009: Operational Forecasting of Tropical Cyclones Storm surges at Météo France, Marine Geodesy, Volume 32, Number 2, pp 233-242
- Davidson F.J.M., A. Allen, G. Brassington, O. Breivik, P. Daniel, M. Kamachi, S. Sato, B. King , F. Lefevre, M. Sutton and H. Kaneko , 2009: Applications of GODAE ocean current forecasts to search and rescue and ship routing, Oceanography, Vol. 22, N°3, pp 176-181.
- Dzepina K., Volkamer R. M., Madronich S., Tulet P., Ulbrich I. M., Zhang Q., Cappa C. D., Ziemann P. J. and Jimenez J. L., 2009, Evaluation of new secondary organic aerosol models for a case study in Mexico City, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 9, 4417-4488.
- Etchevers-Dombrowski, I., V-H. Peuch, B. Josse et M. Legrand, 2009 , Evaluation of the transport of 210-Lead in high-altitude European sites, Geophys. Mod. Dev. Disc., 2, 247-278.
- Geoffroy O., J-L. Brenguier, and F. Burnet, 2009 : Parametric representation of the cloud droplet spectra for LES warm bulk microphysical schemes, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 9, 17633-17663.
- Hackett B., E. Comerma, P. Daniel and H. Ichikawa, 2009: Marine oil pollution prediction, Oceanography, Vol. 22, N°3 , pp 104-111.
- Han, Q., Brenguier JL, Kuo KS, Naeger A, 2009, a new IR technique for monitoring low cloud properties using geostationary satellite data, ATMOSPHERIC SCIENCE LETTERS Volume: 10 Issue: 2 Pages: 115-121.
- Lefèvre, N., D. Diverrès, F. Gallois, G. Parard, J. Boutin, G. Caniaux, L. Beaumont, and T. Danguy, 2009: Autonomous CO<sub>2</sub> measurements in the tropical Atlantic. MERCATOR Ocean Quarterly Newsletter, 34, Oct. 2009, 20-29.
- Lowe J.A., C.D. Hewitt, D.P. van Vuuren, T.C. Johns, J.-F. Royer, and P.J. van Der Linden, 2009: New study for climate modeling, analyses, and scenarios. EOS Trans. Geophys. Union, 90 (21), 181-182.
- Mallet M., Tulet P., Serça D., Solmon F., Dubovik O., Pelon J., Pont V., Thouron O.: Impact of dust aerosols on the radiative budget, surface heat fluxes, heating rate profiles and convective activity over West Africa during March 2006. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions 9, 1 (2009) 2967-3006 hal-00357631-version1.
- Martin E., Thirel G., Regimbeau F., Noilhan J., Franchistéguy L., Soubeyroux J.-M., Habets F. (2009): Vers une prévision d'ensemble des débits à l'échelle des grands bassins versants français. La Houille Blanche, N° 5/2009, 88-94.
- Matsuki, A., A. Schwarzenboeck, H. Venzac, P. Laj, S. Crumeyrolle, and L. Gomes, 2009, Effect of surface reaction on the cloud nucleating properties of mineral dust: AMMA aircraft campaign in summer 2006, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 9, 1797-1830.
- Paradis D., P. Ohl and P. Daniel, 2009: Operational Storm Surges Forecasting in an Estuary, Marine Geodesy, Volume 32, Number 2, pp 166-177.
- Poli P., J. Pailleux, V. Ducrocq, P. Moll, F. Rabier, M. Mauprizez, S. Dufour, M. Grondin, F. Carvalho, J.-L. Issler, A. de Latour, 2009: Meteorological Applications of GNSS Signals with Ground- and Space-based Receivers. Inside GNSS, 3 (8), 30-39.
- Poli P., P. Moll, D. Puech, F. Rabier, and S.B. Healy, 2009 : Quality control, error analysis, and impact assessment of FORMOSAT-3/COSMIC in numerical weather prediction. Terrestrial, Atmospheric, and Oceanic Sciences, 20 (1), 101-113, doi:10.3319/TAO.2008.01.21.02(F3C).
- Rangognio, J., P. Tulet, T. Bergot, L. Gomes, O. Thouron and M. Leriche, 2009, Influence of aerosols on the formation and development of radiation fog, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 9, 17963-18019.
- Ricard D., Beaulant A.L., Boé J., Déqué M., Ducrocq V., Joly A., Joly B., Martin E., Nuissier O., Quintana Seguí P., Ribes A., Sevault F., Somot S., 2009, Impact du changement climatique sur les événements de pluie intense du bassin Méditerranéen, La météorologie, n°67, novembre 2009, pages 19-30.
- Richard E., C. Flamant, F. Bouttier, J Van Baelen, C. Champollion, S. Argence, J. Arnault, C. Barthlott, A. Behrendt, P. Bosser, P. Brousseau, J-P Chaboureau, U. Corsmeier, J. Cuesta, P. Di Girolamo, M. Hagen, C. Kottmeier, P. Limnaios, F. Masson, G. Pigeon, Y. Pointin, F. Tridon, Y. Seity et V. Wulfmeyer, 2009, La campagne COPS : genèse et cycle de vie de la convection en région montagneuse, La Météorologie, n°64, p32-42.
- Soruco A., C. Vincent, B. Francou, P. Ribstein, T. Berger, J.E. Sicart, P. Wagnon, Y. Arnaud, V. Favier and Y. Lejeune, 2009, Mass balance of Zongo glacier, Bolívia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods. Annals of Glaciology, 50, p. 1-8, doi:10.3189/172756409787769799.

## Contributions à des ouvrages ou à des rapports

- Alot, C., P. Battaglia, P. Bois, D. Dartus, V. Ducrocq, A. E. Khadi, S. Evans, E. Gaume, P. Goblet, J.M. Grésillon, F. Habets, D. Laplace, P. Lefort, E. Mignot, J.B. Migraine, A. Paquier, J.M. Tangy, R. Wagner, I. Zin, 2009, Processus hydrologiques et fluviaux, Volume 1 du « Traité d'hydraulique environnementale, de la goutte de pluie jusqu'à la mer » sous la direction de Jean Michel Tanguy, Edition: Lavoisier, ISBN: 978-2-7462-1836-9.
- Arpagaus M., W. Rotach, P. Ambrosetti, F. Ament, Ch. Appenzeller, H.-S. Bauer, A. Behrendt, F. Bouttier, A. Buzzi, M. Corazza, S. Davolio, M. Denhard, M. Dorninger, L. Fontannaz, J. Frick, F. Fundel, U. Germann, T. Gorgas, G. Grossi, Ch. Hegg, A. Hering, S. Jaun, Ch. Keil, M., A. Liniger, C. Marsigli, R. McTaggart-Cowan, A. Montani, K. Mylne, L. Panziera, R. Ranzi, E. Richard, A. Rossa, D. Santos-Muñoz, Ch. Schär, Y. Seity M. Staudinger, M. Stoll, S. Vogt, H. Volkert, A. Walser, Y. Wang, J. Werhahn, V. Wulfmeyer, C. Wunram and M. Zappa: MAP D-PHASE : Demonstrating forecast capabilities for flood events in the Alpine region, Veröffentlichungen der MeteoSchweiz, 78, 75 pp. (Report on the WWRP Forecast Demonstration Project D-PHASE submitted to the WWRP Joint Scientific Committee), sans comité de lecture.
- Baddour O. and P. Bessemoulin 2009: Climate Watch: Purpose and Requirements. Climate Sense, pp190-193. Published by Tudor Rose, England.
- Bessemoulin P., 2009 : Les conditions météorologiques lors des tempêtes de décembre 1999 et l'évolution des tempêtes dans le contexte du changement climatique, in La forêt face aux tempêtes. Chapitre 3, pp. 37-48. Yves Birot, Guy Landmann, Ingrid Bonhème éditeurs. Co-édité par Quae Editions –ECOFOR, Mai 2009.
- Brenguier J-L and R. Wood, 2009, Observational Strategies from the Micro-to Mesoscale, in "Clouds in the Perturbed Climate System", Edited by J. Heintzenberg and R.J. Charlson, The MIT Press, Cambridge Massachusetts/ London England, ISBN 978-0-262-01287-4, p 487-510.
- Cassé V., 2009, Les observations des satellites pour la Météorologie, dans "Objectifs Terre / la révolution des satellites", ISBN 978-2-7465-0419-6, Editions Le Pommier, pages 80-93.
- Déqué, M. 2009: Temperature and precipitation probability density functions in ENSEMBLES regional scenarios. ENSEMBLES technical report n°5, 63 pp.
- Goodess, C.M., Jacob, D., Déqué, M., Guttiérrez, J.M., Huth, R., Kendon, E., Leckebusch, G.C., Lorenz, P. and Pavan, V., 2009, Downscaling methods, data and tools for input to impacts assessments. ENSEMBLES: Climate change and its impact at seasonal, decadal and centennial time scales, Paul van der Linden and John F.B. Mitchell editors, Met Office, 59-78
- Lefèvre J-M et A. Toffoli, juin 2009, Analyse des états de mer associés à l'accident du Prestige, Mémoire de l'Association Technique Maritime et Aéronautique (ATMA) (médaille de l'ATMA).
- Levin Z. and J-L Brenguier, 2009, Effects of pollution and biomass aerosols on clouds and precipitation : observational studies in "Aerosol Pollution Impact on Precipitation", Edited by Z. Levin and W.R. Cotton, Springer, ISBN 978-1-4020-8689-2, p205-242.
- Pailleux, J., 2009, Les observatoires - analyse d'un cas, la météorologie, contribution à l'ouvrage intitulé "Les observatoires" sous la direction d'A. Lebeau, Editions Hermann, ISBN 978 27056 6946 1, pages 57 à 72.
- Royer J.F., E Roeckner, U. Cubasch, F. Doblas-Reyes, H.-D. Hollweg, T. Johns, W. May, D. van Vuuren, 2009, Production of seasonal to decadal hindcasts and climate change scenarios [Research Theme 2A] Ch. 4, in: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts (van der Linden and J.F.B. Mitchell, eds.), Met Office Hadley Centre, Fitzroy Road, Exeter EX1 3PB, UK. pp 35-46.
- Royer J.F., F. Chauvin, 2009 : Response of tropical cyclogenesis to global warming in an IPCC AR-4 scenario assessed by a modified yearly genesis parameter. "Hurricanes and Climate Change", J. B. Elsner and T. H. Jagger (Eds.), Springer, ISBN : 978-0-387-09409-0, pp 213-234.
- Siebesma, A-P., J-L Brenguier, C.S. Bretherton, W. Grabowski, J. Heintzenberg, B. Kärcher, K. Lehmann, J. C. Petch, P. Spichtinger, B. Stevens, 2009, Cloud-controlling factors, in "Clouds in the Perturbed Climate System", Edited by J. Heintzenberg and R.J. Charlson, The MIT Press, Cambridge Massachusetts/ London England, ISBN 978-0-262-01287-4, p 269-290.
- Somot S., Sevaut F., Déqué M. (2009) Design and first simulation with a tri-coupled AORCM dedicated to the Mediterranean study. Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC Working group on numerical experimentation. Report No.39.
- Stevens B. and J-L Brenguier, 2009, Cloud controlling factors : low clouds, in "Clouds in the Perturbed Climate System", Edited by J. Heintzenberg and R.J. Charlson, The MIT Press, Cambridge Massachusetts/ London England, ISBN 978-0-262-01287-4, p 173-196.

## Thèses soutenues en 2009

Gilet J.-B., 2009 : Interactions non linéaires de structures cohérentes tourbillonaires d'échelle synoptique. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 19 novembre 2009.

Guemas V., 2009 : Rôle de la surface marine sur la variabilité intra-saisonnière estivale de l'atmosphère dans la région Nord Atlantique Europe. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 15 décembre 2009.

Lejeune Y., 2009 : Apports des modèles de neige CROCUS et de sol ISBA à l'étude du bilan glaciologique d'un glacier tropical et du bilan hydrologique de son bassin versant. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier Grenoble, Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 18 décembre 2009.

Menegoz M., 2009 : Modélisation des interactions entre atmosphère, aérosols et climat : Une étude du sulfate, du carbone-suie et des poussières minérales. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 03 juillet 2009.

Pangaud T., 2009 : Assimilation des radiances des sondeurs infrarouges hyperspectraux en condition nuageuse : application à des cyclogénèses extratropicales. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 20 novembre 2009.

Rangognio J., 2009 : Impact de l'aérosol sur le cycle de vie brouillard : de l'observation à la modélisation. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 14 décembre 2009.

Remy S., 2009 : Prévision locale des faibles visibilités pour l'aéronautique. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 20 octobre 2009.

Renaudie C., 2009 : Étude et validation des couches limites atmosphérique et océanique à l'échelle locale. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 08 octobre 2009.

Ribes A., 2009 : Détection statistique des changements climatiques. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Mathématique Appliquée, soutenance le 11 septembre 2009.

Samson G., 2009 : Modélisation de la réponse océanique à un cyclone tropical et sa rétroaction sur l'atmosphère. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 16 décembre 2009.

Thirel G., 2009 : Amélioration des prévisions d'ensemble des débits sur la France de SAFRAN-ISBAMODCOU. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 23 novembre 2009.

Yan X., 2009 : Assimilation de données GPS pour la prévision de la convection profonde. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 10 mars 2009.

## Habilitations à diriger des recherches soutenues en 2009

Fischer C., 2009 : Les états initiaux pour la prévision numérique en météorologie : incertitude des données et méthodes de correction. Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 26 février 2009.

Masson V., 2009 : Paramétrization des couches limites hétérogènes et application au micro-climat urbain. Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 16 novembre 2009.

# Glossaire

## Organismes et Laboratoires

### Organismes

- AIRPARIF** Surveillance de la qualité de l'air en Ile-de-France  
**ANR** Agence Nationale de la Recherche  
**CEPMMT** Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme  
**CERFACS** Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul  
**EUMETNET** EUropean METeorological NETwork  
**EUMETSAT** EUropean organisation for the exploitation of METerological SATellites  
**IFREMER** Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER  
**IGN** Institut Géographique National  
**OMM** Organisation Météorologique Mondiale  
**RTRA STAE** Réseau Thématisé de Recherche Avancé – Sciences et Technologies de l'Aéronautique et de l'Espace  
**SHOM** Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

### Laboratoires ou unités de recherche/développement

- CETMEF** Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales  
**CETP** Centre d'Etude des environnements Terrestre et Planétaire  
**CNRM** Centre National de Recherches Météorologiques  
**DSO** Direction des Systèmes d'Observation  
**GAME** Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique  
**ICARE** Institut de Combustion, Aérothermique, Réactivité & Environnement  
**IPSL** Institut Pierre Simon Laplace – institut de recherche en sciences de l'environnement  
**LACy** Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones  
**LMD** Laboratoire de Météorologie Dynamique  
**MIT** Massachusetts Institute of Technology  
**UMS-SAFIRE** Unité Mixte de service - Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement  
**SIO** Scripps Institute of Oceanography, San Diego, USA  
**ZAMG** Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Autriche

### Programmes et projets nationaux et internationaux

- ALMIP** AMMA Land Surface Intercomparison Project  
**CIRCE** Climate change and impact research : mediterranean environment (6<sup>e</sup> PCRD)  
**CarboEurope** Campagne d'Etude du carbone atmosphérique en Europe  
**CONCORDIASI** Validation de l'assimilation de IASI adaptée à l'Antarctique à l'aide de mesures in situ.  
**ENSEMBLES** Ensemble-based predictions of climate changes and their impacts (6<sup>e</sup> PCRD)  
**EUCOS** EUmetnet Composit Observing System  
**E-Surfmar** Programme d'observation océanique de surface.  
**FluxPyr** Projet Européen sur les flux d'énergie dans les pyrénées.  
**FLYSAFE** Système de vol intégré pour l'amélioration de la sécurité, la protection contre les imprévus, et les opérations tout temps  
**GARP** Programme de Recherches sur l'Atmosphère Globale  
**GOSCAL** Global Ocean Salinity Calibration and Validation  
**GIEC** Groupe Inter-gouvernemental d'Experts sur le changement Climatique (IPCC)  
**HYDRALAB** Integrating European Hydraulic research Infrastructure  
**HyMeX** Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment  
**MEDUP** Prévision et projection climatique d'événements intenses méditerranéens : Incertitudes et propagation sur l'environnement  
**METOP** METeorological Operational Polar satellites  
**POGEQA** Plateforme d'Observation GEostationnaire pour la mesure de la Qualité de l'Air (projet RTRA STAE)  
**PRUDENCE** Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining EuropeaN Climate change risks and Effects.  
**QUANTIFY** QUANTIFYing the climate impact of global and european transport systems (6<sup>e</sup> PCRD)  
**RHYTMME** Risques Hydrométéorologiques en Territoires de Montagne et Méditerranéens  
**SAF** Satellite Application Facility  
**SAFNWC** Satellite Application Facility in support to Nowcasting  
**SCAMPEI** Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes

**SESAR** Single European Sky ATM Research Programme

**SMOS** Soil Moisture Observing System

**THORPEX** THe Observing Research and Predictability EXperiment (programme mondial du GARP sous l'égide de l'OMM)

### Campagnes expérimentales

- AMMA** Approche Multidisciplinaire de la Mousson Africaine  
**AMANDES** Expérience au large de l'Amazone  
**CAPITOUL** Campagne expérimentale de météorologie urbaine sur Toulouse  
**COPS** Convective and Orographically-induced Precipitation Study Atmosphérique et de Transports d'Emissions  
**EUCAARI** European intergrated projection aerosol cloud climate air quality  
**JAIVEX** Joint Airborne IASI Validation Experiment  
**MEGAPOLI** Étude de la pollution dans les mégacités  
**PARIS-FOG** Campagne de mesures pour l'étude du cycle de vie du brouillard (Palaiseau 2006)  
**SCMS** Small Cumulus Microphysics Study  
**ToulouseFog** Campagne de mesure du brouillard sur Toulouse

### Autres sigles, abréviations ou acronymes

- 4D-Var** Assimilation variationnelle quadridimensionnelle à la Neige  
**AEOLUS** Satellite d'observation de la dynamique de l'atmosphère terrestre  
**AIRS** Atmospheric Infrared Sensor  
**ALADIN** Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement InterNational  
**AMSR-E** Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (Earth Observing System)  
**AMSU** Advanced Microwave Sensor Unit  
**AMSU-B** Advanced Microwave Sounding Unit – B  
**API** Année Polaire Internationale  
**AQUA** Satellite du Earth observing system de la NASA  
**ARAMIS** Application RADar à la Météorologie Infra-Synoptique  
**ARISP** ARome ISba Piste : Système de prévision de température des pistes  
**AROME** Application de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle  
**ARPEGE** Applications de la Recherche Petite Echelle Grande Echelle  
**ASAR** Advanced Synthetic Aperture Radar  
**ASCAT** Advanced SCATterometer  
**ATR** Avion de Transport Régional  
**BAROS** Station automatique de navire  
**BLH** Boundary Layer Heat (hauteur de couche limite)  
**CAPE** Convective Available Potential Energy  
**CARIBOU** Cartographie des Analyses du Risque de Brume et brOuillard  
**CAROLS** Cooperative Airbone Radiometer for Ocean and Land Studies  
**CCMVal** Chemistry-Climate Model Validation  
**CCN** Cloud Condensation Nuclei  
**CES** Courant équatorial sud (CES)  
**CNRM-CM5** Version 5 du Modèle de Climat du CNRM  
**COBEL** Code de Brouillard à l'Echelle Locale  
**CoReH2O** Cold REgions Hydrology High-resolution Observatory - satellite consacré à la mesure de la quantité d'eau potable  
**COV** Composés Organiques Volatile  
**CROCUS** Modèle d'évolution du manteau neigeux  
**Doppler** RAdio Detection And Ranging  
**ECOCЛИMAP** Base de données de paramètres de surface  
**EDKF** Eddy-Diffusivity-Kain-Fritsch  
**ENVISAT** ENVironmental SATellite  
**EPS** Ensemble Prediction System  
**ERA40** Réanalyse (sur 40 ans) du CEPMMT  
**GELATO** Modèle d'évolution de la banquise développé au CNRM  
**GFO** Geosat Follow On  
**GOSCAL** Global Ocean Salinity Calibration and Validation  
**GOES** Satellite météorologique Géostationnaire (Etats-Unis)  
**GPS** Global Positioning System  
**IASI** Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge  
**IBIS** Integrated Biosphere Simulator  
**IFM** Indice forêt météo (estimation du risque d'occurrence d'un feu de forêt)  
**IFS** Integrated Forecasting System  
**ISBA** Interaction between Soil, Biosphere and Atmosphere

<b>LAI</b>	Cartographie de l'indice foliaire
<b>LCL</b>	Lifting Condensation Level (niveau d'élévation de condensation)
<b>LEF</b>	Langue d'Eau Froide
<b>LES</b>	Large Eddy Simulation
<b>LFC</b>	Level of free convection (niveau de convection libre)
<b>LSM</b>	Land surface Model
<b>MACC</b>	Monitoring Atmospheric Composition and Climate
<b>Megha-Tropique</b>	Satellite franco-indien dédié à l'étude du cycle de l'eau et des échanges d'énergie dans la zone tropicale
<b>MESO-NH</b>	Modèle numérique à MESO-échelle Non-Hydrostatique
<b>MFWAM</b>	Météo-France WAve Model
<b>MILAGRO</b>	Megacity Initiative: Local and Global Research Observations
<b>MINOS</b>	Station météorologique automatique embarquée sur navire
<b>MOCAGE</b>	MOdèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle
<b>MODCOU</b>	MODèle hydrologique COUplé surface-souterrain
<b>MODIS</b>	MODerate resolution Imaging Spectroradiometer
<b>MSG</b>	Meteosat Seconde Génération
<b>NEMOMED8</b>	Version Régionale Méditerranée du Modèle Océanique version 8
<b>Nox</b>	Oxyde d'Azote
<b>OPTIMISM</b>	Optimisation de capteurs nivo-météorologiques en conditions polaires
<b>OSI</b>	Ocean and Sea Ice
<b>PALM</b>	Coupleur dynamique de codes parallèles développé par le CERFACS
<b>PCRD</b>	Programme Cadre de Recherche et Développement
<b>PEARP</b>	Prévision d'Ensemble ARPège
<b>PREMIER</b>	Process Exploration through Measurements of Infrared and millimetre-wave Emitted Radiation
<b>PREVIMER</b>	Observations et prévisions de l'état et de la qualité des eaux côtières
<b>PREVIPIRB</b>	Prévision Probabilité
<b>PRFs</b>	Fréquence de récurrence des tirs radars
<b>Qdiv</b>	Quantifying the effects of global environmental change on terrestrial plant Diversity
<b>RASTA</b>	Radar Aéroporté et Sol de Télédétection Atmosphérique
<b>SAFRAN</b>	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques
<b>SCE</b>	Sous-Courant Equatorial (SCE)
<b>SCM</b>	Safran Crocus Mepra
<b>SEVIRI</b>	Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
<b>SIM</b>	Safran-Isba-Modcou
<b>SIR</b>	Safran-prévision/Isba-Route
<b>SPOT</b>	Satellite Pour l'Observation de la Terre
<b>SRES</b>	Special Report on Emission Scenarios
<b>STP</b>	Significant Tornado Parameter
<b>SURFEX</b>	SURFace EXternalisée
<b>SVAT</b>	Sol Vegetation Atmospheric (Modèles de Transfert)
<b>SX9</b>	Calculateur NEC de Météo-France
<b>SYMPORIUM</b>	SYstème Météorologique de Prévision Orienté Services Intéressant des Usagers Multiples
<b>TEB</b>	Town Energy Balance
<b>TNAWDEX</b>	THORPEX North Atlantic Waveguide and Downstream Impacts. Experiment
<b>TOPMODEL</b>	sur les crues cévenoles 2008
<b>TRIP</b>	Total Runoff Integrating Pathway
<b>TSM</b>	Température de Surface de la Mer
<b>UBRIS</b>	Urban Bias Removed of Instrumental Series
<b>UTC</b>	Universal Time Coordonnée (TU)
<b>VNE</b>	Vitesse de Nyquist Etendue
<b>ZCIT</b>	Zone de convergence Intertropicale

# Organigramme du Centre National de Recherches Météorologiques

A la date du : 31.12.2009

Directeur : **Philippe Bougeault**

Directeur adjoint - Toulouse : **Joël Poitevin**

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

Directeur adjoint - Paris : **Pascale Delécluse**

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 : **François Bouttier**

GROUPE DE MÉTÉOROLOGIE EXPERIMENTALE ET INSTRUMENTALE

GMEI - Toulouse

Chef de division : **Jean-Louis Brenguier**

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 : **Christine Dreveton**

SERVICES COMMUNS

Paris & Toulouse

Responsable : **Joël Poitevin**

**Nota :**  
Le GAME est l'unité de Recherche Associée entre Météo-France et le CNRS. Les unités sur fond bleu foncés 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



**Centre National de Recherches Météorologiques / Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique**  
42, avenue Gaspard Coriolis - 31057 Toulouse Cedex 1 France  
Tél : (33) 5 61 07 93 70 - Fax : (33) 5 61 07 96 00  
<http://www.cnrm.meteo.fr> - Mail : [contact@cnrm.meteo.fr](mailto:contact@cnrm.meteo.fr)

**Édition Météo-France**  
Direction commerciale et de la communication.  
Imprimé sur du papier écologique,  
sur les presses de l'imprimerie de Météo-France D2C/IMP, labelisé Impri'vert®.  
Conception, réalisation et impression D2C/IMP Trappes  
Maquette de couverture [www.eurorscg.fr](http://www.eurorscg.fr)



Depuis fin 2008, les prévisionnistes utilisent le modèle de prévision numérique Arome. Une nouvelle version de ce modèle, intégrant notamment des données radar, a été développée en 2009 et permettra, entre autres, d'améliorer la localisation des précipitations.

Météo-France  
1, quai Branly  
75340 Paris Cedex 7  
Tél. : 01 45 56 71 71  
Fax : 01 45 56 71 11  
**[www.meteofrance.com](http://www.meteofrance.com)**

Météo-France est certifié ISO 9001-2000  
par Bureau Veritas Certification



# Rapport Recherche 2009