

An aerial photograph of a town nestled in a valley, surrounded by thick white clouds. The town features a mix of residential houses and larger buildings, with green fields interspersed. A weather map is overlaid on the lower half of the image, showing contour lines with values such as 1010, 1015, 1020, 1025, and 1030. The map includes various symbols like triangles and dots, indicating specific weather data points or stations. The overall scene is misty and atmospheric, with the town appearing as a small island in a sea of clouds.

Rapport recherche & développement 2007



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

Sommaire

Modèle pour la prévision du temps ● page 4

Prévision numérique synoptique
Prévision numérique à méso-échelle
Prévision cyclonique

La campagne de mesure Amma ● page 16

La valorisation des données collectées dans le cadre d'Amma
Études conduites dans le cadre d'Amma

Phénomènes météorologiques ● page 20

Étude cyclogénèse et prévisibilité
Phénomène de méso-échelle

Étude du climat et du changement climatique ● page 28

Études environnementales liées à l'atmosphère ● page 32

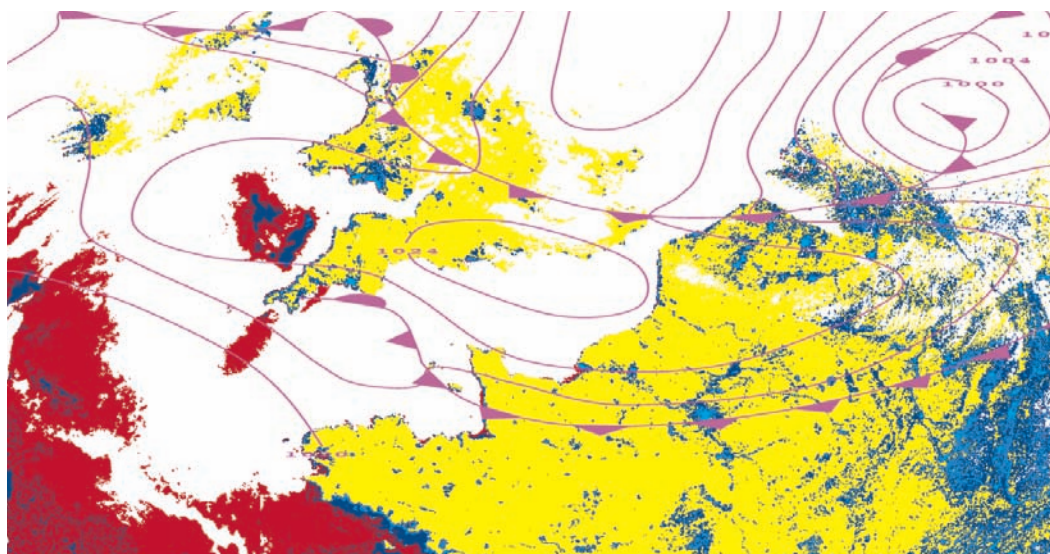
Hydrométéorologie
Océanographie (modélisation et instrumentation)
Environnement atmosphérique
Chimie atmosphérique et qualité de l'air
Étude du manteau neigeux et des avalanches

Instrumentation pour la recherche ● page 48

Instrumentation aéroportée
Instrumentation *in situ* – télédétection

Communication et valorisation ● page 54

Annexes ● page 56



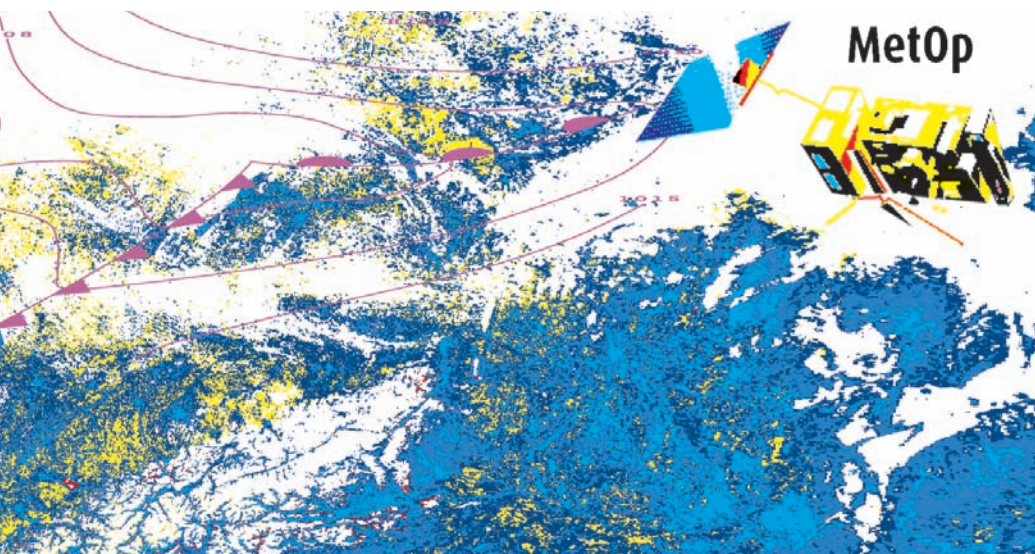
Certains des articles que le lecteur découvrira dans ce rapport annuel décrivent des avancées importantes visant à l'amélioration du système de prévision météorologique global Arpege. Quatre actions méritent une attention particulière :

- l'amélioration du modèle atmosphérique avec en particulier une augmentation sensible des résolutions horizontale et verticale permises par le calculateur Nec SX 8R en service depuis début 2007. Outre une amélioration spectaculaire des performances d'Arpege, cette évolution peut être considérée comme une première étape vers l'augmentation suivante de résolution qui permettra en 2009 un couplage direct entre Arpege et le modèle de méso-échelle Arome.
- l'assimilation de nouvelles observations a fait l'objet d'une intense activité, en particulier pour les observations produites par le satellite *MetOp*, avec des résultats très prometteurs pour une prochaine utilisation des données du sondeur Iasi. Un effort particulier porte sur l'assimilation des observations relatives au cycle de l'eau. Les progrès récents ont permis d'assimiler opérationnellement les données de radio-occultation GPS, avec un impact particulièrement positif sur les zones de l'hémisphère sud.
- la prévision d'ensemble est une action nouvelle pour le CNRM. Elle s'est traduite en 2007 par le développement de nouvelles

méthodes de perturbation des conditions initiales. Celles-ci ont permis de générer un ensemble générant de la dispersion sur l'ensemble du globe, avec une performance proche de l'état de l'art. Cet ensemble alimente le très grand ensemble Tigge mis en place par le programme Thorpex de l'OMM et sur lequel se focalisent de nombreuses recherches à vocations académiques et opérationnelles.

- l'assimilation d'ensemble s'avère être une méthode particulièrement prometteuse pour estimer des erreurs de prévision dépendant de la situation en cours et améliorer ainsi l'assimilation opérationnelle du modèle déterministe Arpege. Les travaux récents montrent qu'un ensemble d'assimilation bien réglé produit avec seulement six membres des statistiques d'erreur tout à fait pertinentes. Cette performance permet d'envisager la mise en œuvre opérationnelle de cette technique dans un futur très proche.

L'amélioration du modèle Arpege ne répond pas seulement à des objectifs opérationnels. La plupart des développements sur la physique ou sur la dynamique se font en étroite coopération avec les équipes qui travaillent sur les modèles à aire limitée Aladin, Méso-NH et Arome mais également avec les équipes travaillant sur la modélisation climatique. Ainsi l'ensemble des outils de modélisation atmosphérique de Météo-France a des caractéristiques de plus en



plus proches depuis quelques années, et la combinaison de l'expérience respective des différentes équipes de modélisation dans une synergie particulièrement efficace permet des progrès rapides et spectaculaires à toutes échelles. Des travaux sont en cours pour mutualiser également la représentation des surfaces continentales et océaniques dans ces différentes classes de modèle.

Enfin, le modèle Arpege est également un outil de recherche à part entière qui est au cœur des études sur les cyclogenèses et la dynamique des fronts, présentées également dans les pages qui suivent.

Mais les efforts des équipes de Météo-France impliquées dans les activités de recherche ne se sont bien évidemment pas cantonnés en 2007 au seul domaine de la modélisation en prévision numérique du temps. Le lecteur découvrira au fil des pages la diversité et la richesse des actions conduites, tant en ce qui concerne les travaux sur les processus météorologiques, les études sur le climat et le changement climatique, les campagnes instrumentales, les études environnementales liées à l'atmosphère....

Éric Brun

Directeur de la recherche



◀ Éric Brun, directeur du CNRM, lors de son allocation introductive aux Ateliers de modélisation de l'atmosphère en janvier 2007.

Modélisation

L'année 2007 a été marquée par les premières expérimentations en mode quasi temps réel du prototype Arome, préfigurant la mise en opérationnel du modèle prévue pour fin 2008. Mais les efforts des équipes de recherche n'ont pas porté que sur Arome : ainsi, une nouvelle résolution spatiale pour Arpege et Aladin a été mise en

œuvre, les systèmes d'assimilation de données ont été enrichis, des outils de prévision ciblés notamment pour l'aéronautique ont vu le jour. Par ailleurs, des progrès importants dans la compréhension des cyclones tropicaux ont été accomplis, ouvrant la voie à des avancées en terme de prévision de ces phénomènes extrêmes.

Prévision numérique synoptique

Assimilation des données de MetOp

Le satellite *MetOp* lancé en octobre 2006 par Eumetsat est la première contribution européenne à la constellation des satellites définitifs opérationnels. Les nombreux instruments embarqués, innovants pour certains, dans la continuité d'outils existants pour d'autres, fournissent des données dont une partie est déjà assimilée dans les modèles de prévision numérique du temps de Météo-France.

Les instruments ATOVS (AMSU-A, MHS, HIRS) mesurent des radiances qui peuvent être directement liées à la température et l'humidité atmosphériques. Ces données constituent maintenant un complément précieux à celles provenant des satellites américains dans les modèles opérationnels. Le diffusiomètre Ascet observe le vent à la surface des océans dans la continuité du diffusiomètre ERS, mais avec une couverture spatiale deux fois plus étendue.

L'instrument phare de MetOp est l'interféromètre infra-rouge lasi de type Michelson, développé par le Cnes en collaboration avec Eumetsat. La quantité d'information recueillie par lasi est plus de cent fois supérieure à celle fournie par les sondeurs de génération précédente tels Hirs, permettant désormais d'observer plus finement la structure verticale de l'atmosphère. L'assimilation des données de Ascet et lasi est prévue pour 2008. Enfin, l'instrument Gras fournira bientôt des données de radio-occultation GPS similaires à celles déjà assimilées depuis peu à Météo-France.

Au-delà de l'application pour la prévision numérique à quelques jours d'échéance, les données fournies par lasi permettront une meilleure connaissance de la composition de l'atmosphère en gaz rares dont les propriétés radiatives sont importantes pour le climat. 1

Assimilation de données d'occultation radio GPS en prévision numérique

Des observations satellite de l'atmosphère collectées à partir du système de positionnement global par satellite GPS sont désormais utilisées dans l'élaboration des prévisions numériques du temps à Météo-France.

Les signaux de radio-navigation émis par les satellites américains GPS situés à une altitude de 20 200 km sont réfractés par l'atmosphère terrestre. La réfraction atmosphérique mesurée par des récepteurs GPS en orbite basse (altitude entre 400 et 1 600 km) permet alors de caractériser la distribution de la température et de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

En 2006, six satellites emportant de tels récepteurs d'occultation radio GPS ont été lancés par la mission Formosat-3/Cosmic (États-Unis, Taïwan), s'ajoutant aux satellites

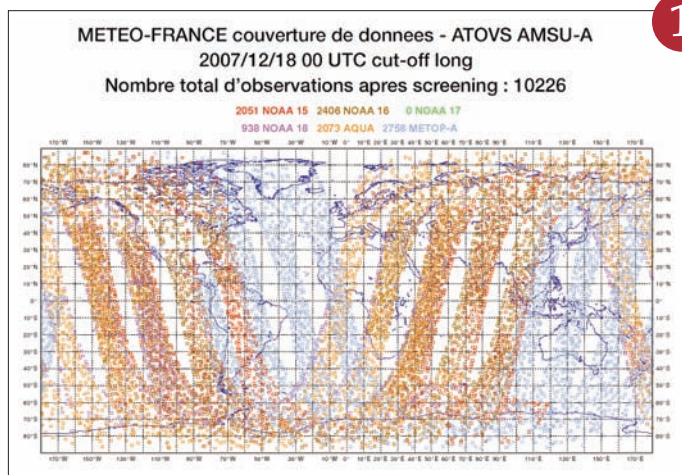
Champ et Grace (Allemagne). Des expériences conduites à Météo-France ont démontré que les données d'angles de réfraction ainsi collectées permettent d'améliorer la connaissance de l'état initial de l'atmosphère et les prévisions qui en découlent. Les améliorations les plus significatives sont les zones traditionnellement peu observées (hémisphère Sud) et celles où le fait de disposer d'observations à haute résolution verticale est déterminant (région de la tropopause).

Depuis septembre 2007, les données d'occultation radio GPS sont ainsi assimilées opérationnellement à Météo-France par les modèles de prévision numérique global (Arpege) et à aire limitée sur l'Europe et La Réunion (Aladin). 2

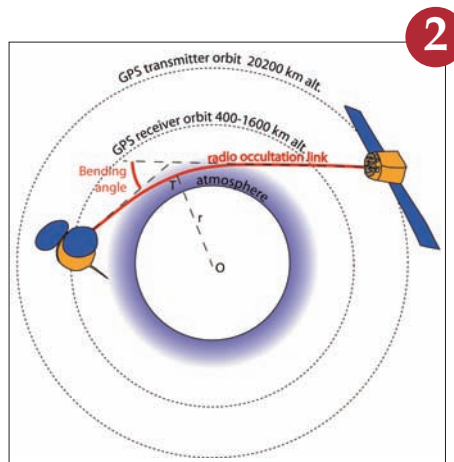
Arpege : du global vers la moyenne échelle « sans couture »

Le système d'assimilation et de prévision global de Météo-France, Arpege, ainsi que les modèles hydrostatiques Aladin qui lui sont couplés continuent d'évoluer et de s'améliorer. D'autres articles évoquent ainsi l'enrichissement du système d'observation et les améliorations apportées en 2007 en assimilation ou dans les paramétrisations. Le cadre général dans lequel s'intègrent ces changements connaît lui-même quelques évolutions.

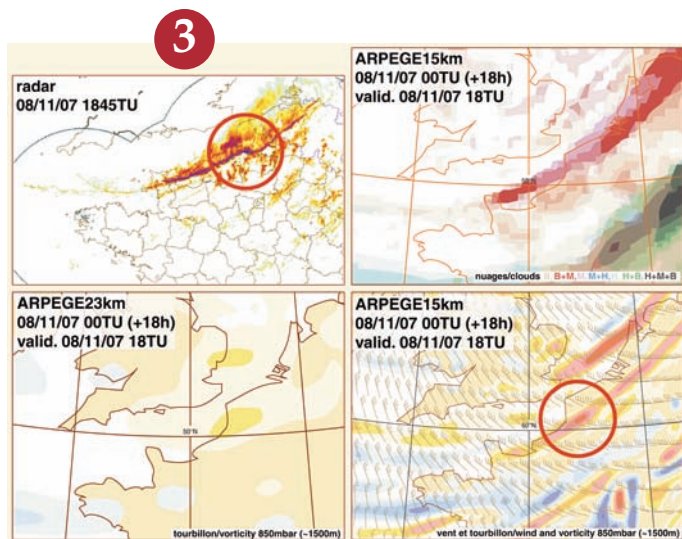
Il s'agit avant tout d'un changement de résolution verticale qui s'applique à l'ensemble des modèles Arpege et Aladin : l'atmosphère est découpée en 60 couches verticales au lieu de 46 antérieurement. On a choisi, à cette occasion, de focaliser le raffinement vers 10-12 km d'altitude afin de mieux décrire les courants-jets, qui influencent de nombreux aspects de l'évolution du temps. La précision des calculs sur la verticale est améliorée par l'activation d'un schéma numérique mis au point au CEPMMT à Reading. De plus, la résolution horizontale d'Arpege est aussi améliorée. Partout sur le globe, elle devient meilleure que 100 km. Autour de la Réunion, elle est inférieure à 50 km. Sur la zone Europe-Atlantique, Arpege devient plus fin que le modèle du CEPMMT, avec une résolution moyenne inférieure à 20 km de l'Islande à la Caspienne et qui atteint 15 km sur la France. La résolution évolue de manière continue, évitant ainsi les ruptures liées au couplage par les bords. Cette nouvelle résolution donne accès à une description détaillée des tempêtes, comme l'illustre la figure, avec des systèmes nuageux très réalistes. Ces évolutions ont été longuement testées pendant le dernier trimestre de 2007 et sont devenues opérationnelles début 2008. 3



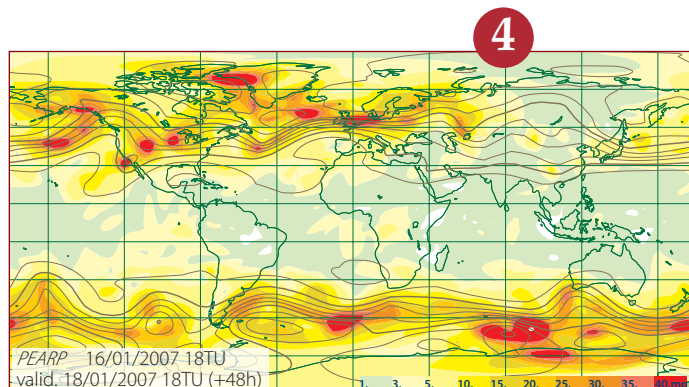
◀ Couverture des données des sondes Amsu-A utilisées opérationnellement dans l'assimilation du modèle Arpege, sur une période d'assimilation de 6 heures (MetOp en bleu).



◀ Géométrie de l'occultation radio GPS ; l'atmosphère réfracte le signal radio émis par un satellite GPS ; l'angle de réfraction observé par le récepteur GPS permet de caractériser l'indice de réfraction au point tangent (T).



▲ La journée du 8 novembre 2007 a vu s'amplifier une forte tempête en mer du Nord. Le front froid associé, bien marqué, a présenté des perturbations internes d'échelle fine qui ont entraîné des dégâts significatifs dans le Nord de la France (image de réflectivité composite radar en haut à droite). L'ancienne version d'Arpege (en bas à gauche) prévoit la tempête mais ne donne pas accès à de telles structures. La nouvelle version d'Arpege (figurines de droite) en revanche prévoit en plus l'organisation du front et suggère la perturbation interne, tant dans ses éléments dynamiques (bas) que la partie nuageuse (haut). En haut à gauche : nébulosités combinées de trois couches, nuages hauts (H), moyens (M) et bas (B). En bas : le vent (barbules en kt) et le tourbillon relatif (plages de couleur) vers 1 500 m d'altitude. Une bande de fort tourbillon relatif est un bon marqueur d'un front, et un noyau indique un tourbillon. (Intervalle de tracé : couleurs chaudes $5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ à partir de la couleur rose, $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ en deçà, couleurs froides, valeurs négatives.)



▲ Exemple de prévision d'incertitude à 48 h d'échéance réalisée avec la nouvelle version globale de PEARP à partir du 16 janvier 2007 18 h TU, pour le 18 janvier 2007 18 h TU, date d'une tempête marquante en mer du Nord et sur les pays sud-est voisins. Les isolignes représentent le champ de géopotentiel (à lire comme la pression) à 500 mbar (vers 5,6 km d'altitude, intervalle de tracé 10 damgp) prévu par la moyenne de l'ensemble PEARP. Les plages de couleur indiquent l'incertitude sous la forme de l'écart type des différences entre les prévisions par les membres de l'ensemble (intervalle : 5 mgp). Loin d'être uniforme, l'incertitude se développe dans certaines zones indiquées en couleur rouge et ce sont souvent des zones de mauvais temps actif.

Une première évolution de la prévision d'ensemble Arpege (PEARP)

La PEARP, ou Prévision d'Ensemble Arpege, est le système de prévision d'ensemble de Météo-France, développé à l'origine au sein de la Direction de la Prévision. Il s'agit d'un ensemble optimisé en vue de réaliser des prévisions probabilistes à courte échéance, c'est à dire pour les 3 prochains jours. En plus de la prévision de référence non perturbée, la PEARP consiste en 10 prévisions dont les conditions initiales sont légère-

ment perturbées de manière non aléatoire. Les écarts entre les évolutions des 11 prévisions au cours du temps servent de mesure de l'incertitude et permettent d'esquisser des distributions de probabilité des paramètres prévus. Dans la précédente version opérationnelle, les perturbations qui servaient à créer les différents états initiaux étaient calculées uniquement sur une zone restreinte qui couvre l'Atlantique et l'Europe. La prise en main de la PEARP par le CNRM a consisté en une évolution de ces perturbations. D'une part, celles-ci sont désormais calculées sur tout le globe. D'autre part, l'incertitude liée à la prévision provient pour partie du passé, à travers le devenir des perturbations des réseaux antérieurs au cours de la période précédant le début de la prévi-

sion. Enfin, une petite composante d'incertitude sur la connaissance de l'état initial est tirée de la dernière analyse variationnelle Arpege pour ajuster l'amplitude des perturbations composites finalement ajoutées à cette analyse.

Il s'agit de la première étape d'une évolution visant à développer un système probabiliste au niveau de l'état de l'art, étape surtout destinée à crédibiliser la contribution de Météo-France au projet Tigge de collection de prévisions d'ensemble globales soutenu par l'OMM. Cette nouvelle version est entrée est devenue opérationnelle début février 2008.

Estimation des erreurs de prévision à l'aide d'un petit ensemble de prévisions et d'un filtrage spatial optimisé

Les systèmes d'assimilation de données tels que ceux des modèles Arpège, Aladin et Arome permettent de corriger les prévisions à l'aide des observations. Cela est fait en tenant compte des statistiques des erreurs de prévision.

Pour estimer les erreurs de prévision, une approche attractive consiste à simuler l'évolution temporelle des erreurs à l'aide d'un ensemble d'assimilations perturbées. L'idée est d'ajouter des perturbations qui simulent les incertitudes en jeu, et de les faire évoluer au cours des étapes d'analyse et de prévision.

La taille de l'ensemble constitue un facteur crucial pour obtenir une estimation à la fois robuste et pas trop coûteuse. Le recours à des techniques de filtrage spatial optimisé permet néanmoins de réduire la taille de l'ensemble requise pour atteindre une précision donnée (ou réciproquement d'accroître la précision pour une taille d'ensemble donnée). L'idée est de calculer une moyenne spatiale locale des statistiques, ce qui permet d'obtenir une forte augmentation de la taille de l'échantillon statistique.

La figure ci-jointe montre 4 estimations de la carte des variances d'erreur du tourbillon à 500 hPa. Le panel (a) est une référence, qui indique que les erreurs sont plus fortes sur les océans Atlantique et Pacifique, ainsi que dans l'hémisphère Sud. Le panel (b) correspond à une estimation à l'aide d'un ensemble de 6 réalisations aléatoires et d'un filtrage spatial optimisé. L'estimation obtenue est plus précise que les estimations brutes à partir de 6 ou même 220 réalisations (panels (c) et (d) respectivement).

Une mise en œuvre opérationnelle de ces techniques est envisagée pour 2008, afin de décrire la dépendance des erreurs à la situation météorologique en cours.

5

Étude de formulations alternatives pour le noyau dynamique d'IFS-Arpege-Aladin-Arome

Le noyau dynamique non-hydrostatique (NH) de notre outil de prévision numérique représente un des éléments importants du système Arome. Il est testé actuellement en vue de son prochain passage en opérationnel (les autres éléments majeurs étant la physique et l'assimilation).

Parallèlement à cette utilisation à échelle fine sur domaines limités de faible extension, d'autres applications sont envisagées dans le futur. Ainsi, une collaboration avec le CEPMMT est en cours pour évaluer la pertinence de ce noyau dynamique pour le modèle global IFS en mode NH. Une collaboration, avec le groupe Hirlam cette fois, vise une utilisation en aire limitée mais sur grands domaines.

De telles configurations sont très différentes de celle d'Arome à de multiples points de vue (géométrie, inclusion de la physique, choix algorithmiques, etc.) et afin de pouvoir utiliser le noyau dynamique NH dans cette large gamme de configurations, le recours à des algorithmes robustes et précis est nécessaire. Dans cette optique, les axes de travail ont porté principalement sur l'amélioration de la robustesse vis-à-vis des longs pas de temps par une révision de la discrétisation de certains termes non-linéaires, et sur l'amélioration de la précision intrinsèque via l'installation d'une version préliminaire en éléments finis sur la verticale. Un travail de fond visant au remplacement éventuel des variables pronostiques NH du système est en cours, avec l'objectif d'une inclusion plus naturelle des éléments finis.

6

Assimilation des vents à 10 m dans Aladin

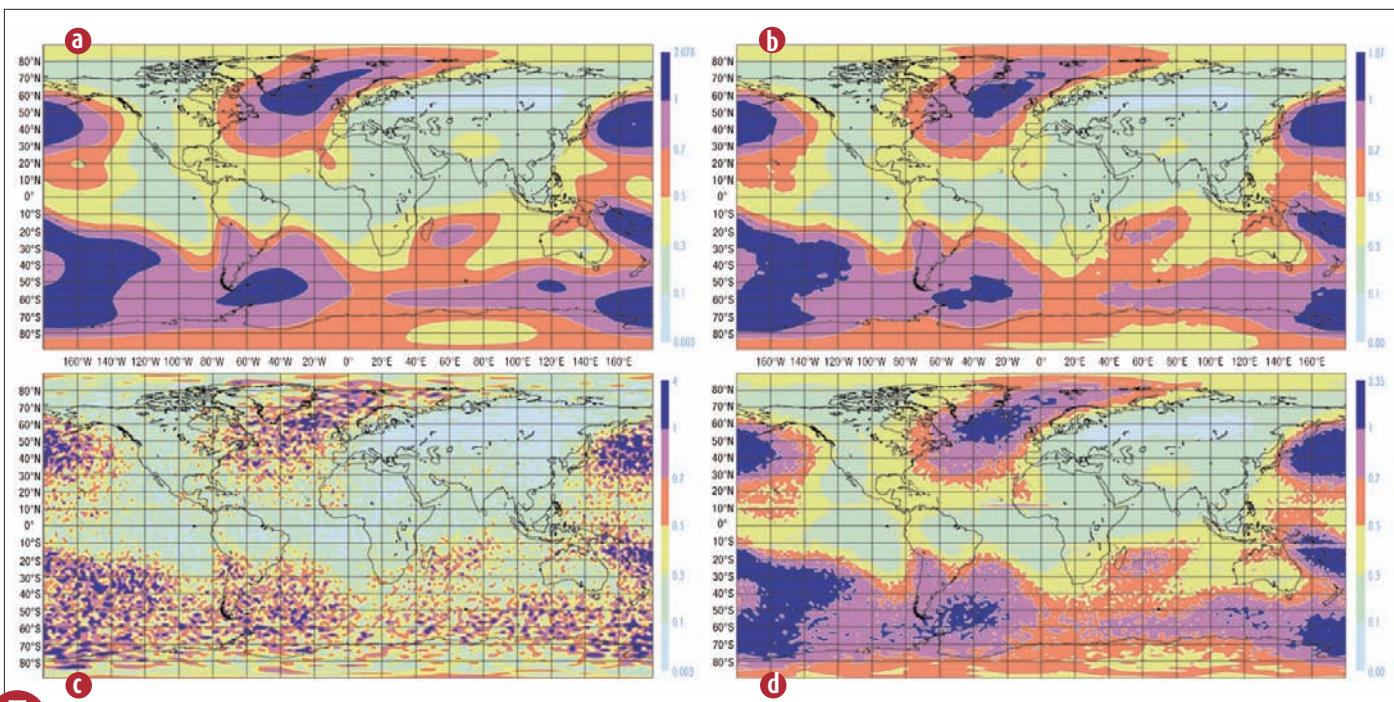
Les observations de vent à 10 m sont des données délicates à utiliser dans un système d'assimilation. En effet, le vent près du sol dépend beaucoup du relief de petite échelle dont on sait qu'il est assez différent du relief de grande échelle des modèles. D'autre part, cette donnée est également influencée par les données physiographiques du sol (hauteur de la végétation...). Enfin une mesure de vent peut dans des zones montagneuses représenter un phénomène limité dans le temps et donc de peu d'intérêt pour les grandes échelles.

Cependant, dans les modèles à aire limitée présentant des caractéristiques de surface plus proches de la réalité, ces observations apportent de l'information à un système d'assimilation. Du fait de la forte couverture spatiale (figure a) et temporelle, on s'est attaché à tester leur impact dans le modèle à aire limitée Aladin. Pour cela, une sélection de stations a tout d'abord été réalisée, en ne retenant que celles qui ont présenté sur une période de test (4 mois) une corrélation suffisamment élevée avec les valeurs du vent prévue par le modèle Aladin.

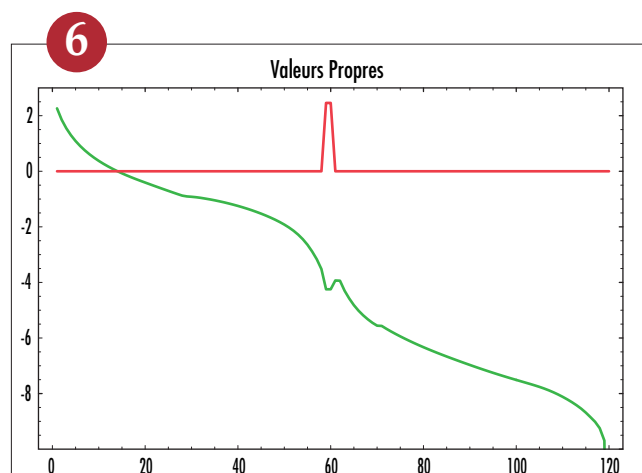
L'apport isolé de ces observations est essentiellement limité à la couche limite atmosphérique comme on peut le voir sur la figure b, en effet, cette coupe verticale montre que l'impact est important en dessous du niveau modèle 35, soit 1,5 km.

La seule amélioration notable de l'assimilation du vent à 10 m est la diminution de la valeur relative du biais de pression au sol dans le modèle Aladin, ce qui est un défaut connu de ce modèle. Cet effet est possible grâce aux corrélations entre les erreurs du modèle sur la pression au sol et sur le vent.

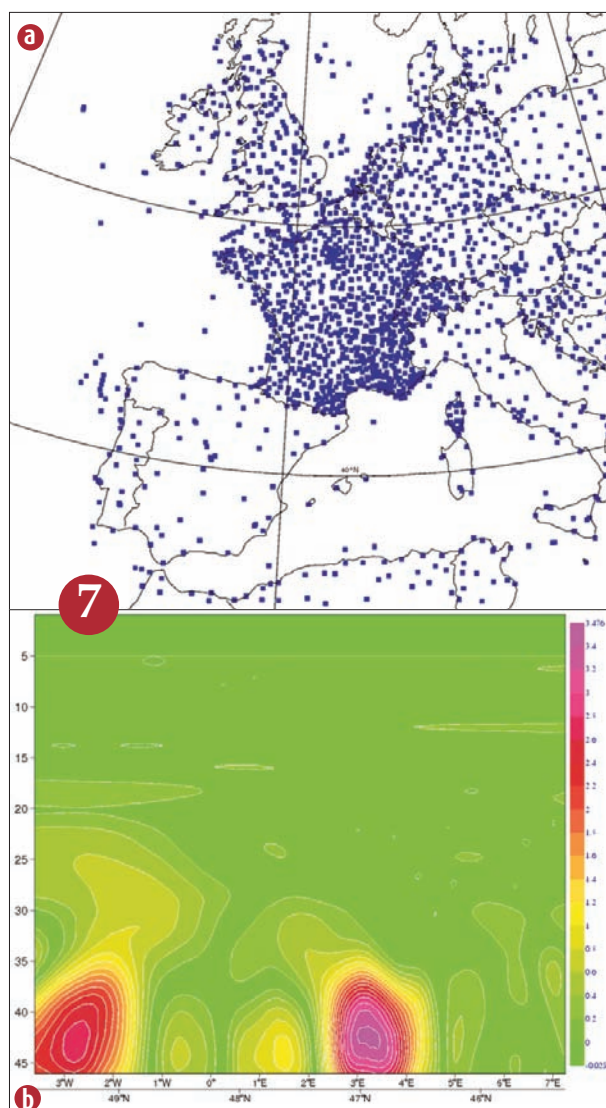
7



5 ▲ Variances des erreurs de prévision du tourbillon (en 10^{-5} s^{-1}) vers 500 hPa.
 (a) : référence ;
 (b) : estimation filtrée à partir de six réalisations aléatoires ;
 (c) et (d) : estimations brutes à partir de 6 ou 220 réalisations, respectivement.
 L'estimation filtrée est la plus proche de la référence.



▲ Exemple de fréquences des modes propres du noyau dynamique NH diagnostiquées analytiquement pour le cas d'une discrétisation particulière en éléments finis verticaux avec 60 niveaux non-équidistants.
En vert : logarithme de la partie réelle ;
en rouge, partie imaginaire ($\times 10^4$). L'existence d'une faible partie imaginaire de la fréquence indique une instabilité du système s'il était utilisé avec cette discrétisation particulière.
 Ce type d'analyse de la réponse du système permet de prévoir son comportement sans s'engager dans des développements coûteux.



▲ **a** : Observations de vent à 10 m disponibles pour un réseau d'assimilation.
b : Coupe verticale sur la France montrant la différence du vent entre une analyse à 12 h 00 avec vent à 10 m et une analyse sans vent à 10 m.
 Les différences sont à constater essentiellement dans la couche limite (niveau 35 = hauteur moyenne d'une couche limite diurne).

Prévision numérique à méso-échelle

Le modèle Arome bénéficie de sa propre assimilation

Jusqu'à présent, les prévisions fournies quotidiennement par le modèle Arome en test étaient initialisées par les analyses du modèle opérationnel Aladin-France. Depuis le 25 septembre 2007, Arome dispose de son propre système d'assimilation et utilise donc sa propre analyse comme état initial de ses prévisions.

Basé sur le schéma 3D-Var Aladin-France opérationnel à Météo-France depuis juin 2005, ce système d'assimilation a pour objectif d'utiliser au mieux toutes les observations disponibles, y compris des observations à haute fréquence spatiale et temporelle comme, par exemple, les observations radar de vent et de réflectivité du réseau Aramis. Pour pallier au manque de dimension temporelle du schéma 3D-Var, la fréquence du cycle d'assimilation est plus grande que celle utilisée traditionnellement pour Arpege-Aladin. Ainsi, toutes les 3 heures (contre 6 heures pour Aladin) la prévision du réseau précédent, l'ébauche, est utilisée pour assimiler de

nouvelles observations et fournir un nouvel état analysé des champs de vent, température, humidité et pression de surface. Les autres champs du modèle sont cyclés à partir de l'ébauche. Pour l'instant, les observations assimilées sont les mêmes que celles utilisées dans Aladin-France. L'assimilation d'un nouveau type d'observations, les mesures de vent par radars Doppler, est en test fin 2007 et devrait aboutir en 2008.

Ce système d'assimilation a d'abord été testé sur des cas d'événements précipitants, avant de tourner quotidiennement à partir de la fin du mois de septembre 2007. L'évaluation, notamment par le calcul de scores classiques de comparaison aux observations, des simulations issues de ce cycle d'assimilation, montre une amélioration de la qualité de la prévision dans les douze premières heures d'échéance. Au delà, l'impact des conditions aux bords du domaine devient prépondérant par rapport à celui des conditions initiales. 8

Prise en compte des données radars dans Arome

Les mesures effectuées par les radars Doppler permettent de décrire avec une haute résolution spatiale et temporelle la structure tridimensionnelle de la dynamique et de l'intensité des précipitations dans des systèmes précipitants. Ce type de données est donc amené à jouer un rôle déterminant dans l'élaboration des analyses Arome, dont un des principaux buts est de mieux prévoir les phénomènes convectifs violents. Dans cette optique, des travaux sont en cours pour prendre en compte les observations provenant du réseau national de radar Aramis dans le cycle d'assimilation Arome. Une première étape a été de développer des opérateurs d'observations, permettant de simuler la mesure des vitesses radiales et des réflectivités radar à partir des variables du modèle.

L'assimilation des vitesses radiales dans l'analyse tri-dimensionnelle 3Dvar Arome a ensuite été validée sur des cas convectifs divers et est actuellement en cours d'évaluation dans une

configuration pré-opérationnelle. Lorsque les conditions d'échantillonnage sont favorables (système proche de radars notamment), il a été montré un impact significatif pour la prévision des précipitations à courte échéance grâce à l'analyse réaliste des structures de convergence de basses couches (figure 9).

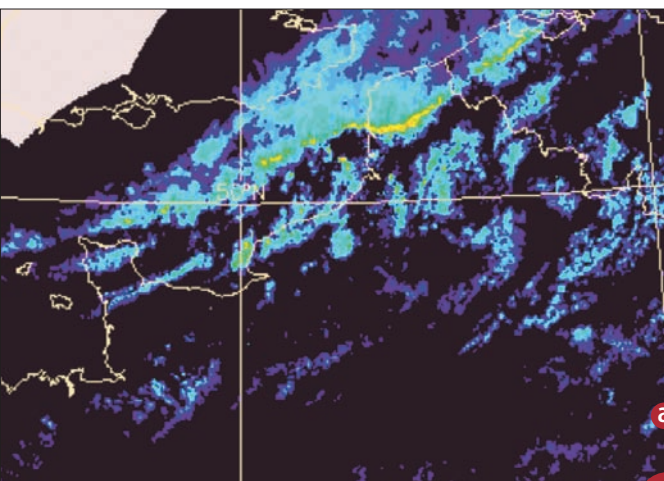
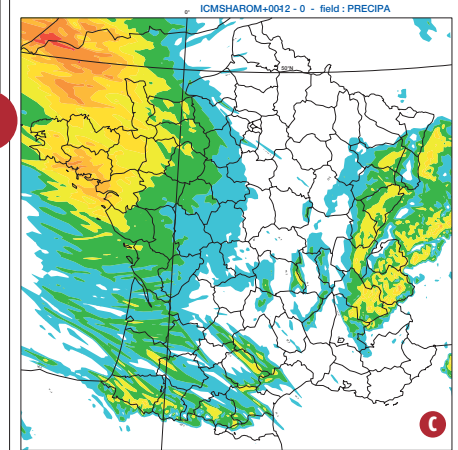
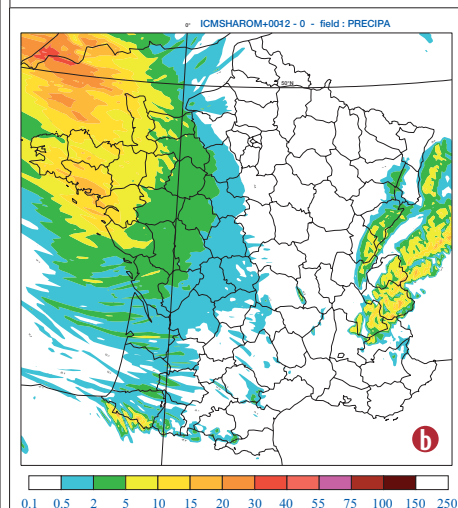
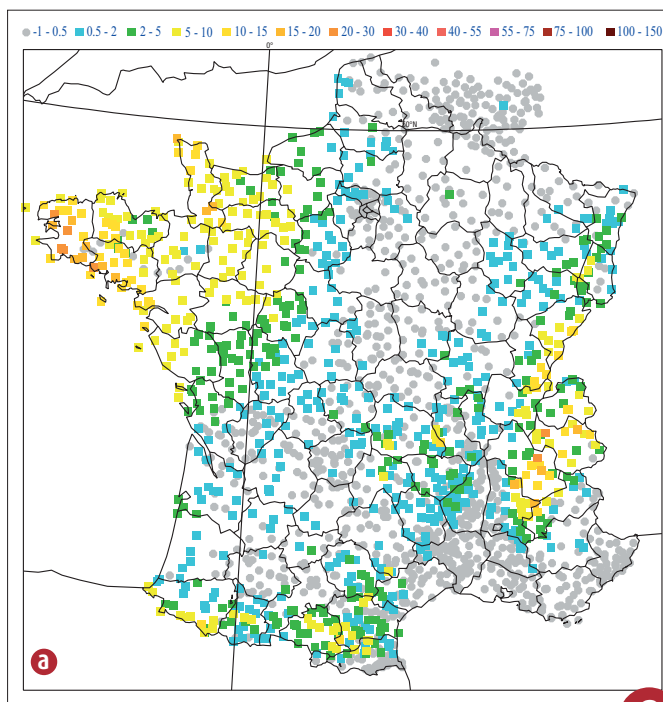
En ce qui concerne l'assimilation des réflectivités, celle-ci est plus complexe de par la difficulté de linéariser les processus physiques à seuil constituant le cycle de l'eau et du fait que les variables microphysiques ne sont pas des variables de contrôle du modèle. La première étape consiste en une inversion statistique uni-dimensionnelle des réflectivités en profils d'humidité relative en utilisant l'état du modèle dans le voisinage de l'observation comme source d'information probable. Ces profils sont alors assimilés dans le 3Dvar. Des résultats encourageants ont été obtenus et l'évaluation de la méthode se poursuit. 9

Évaluation du modèle Arome en test

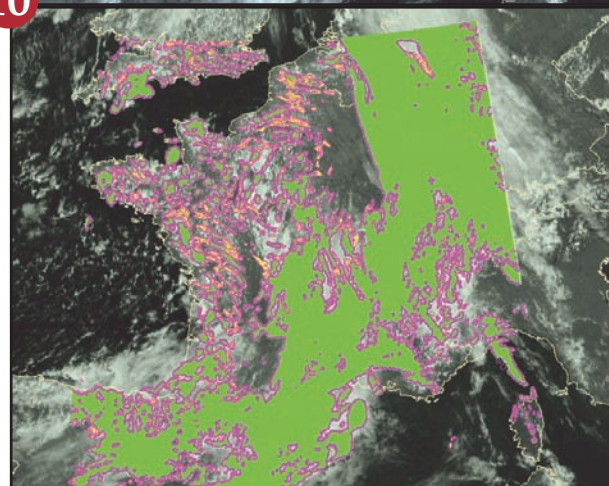
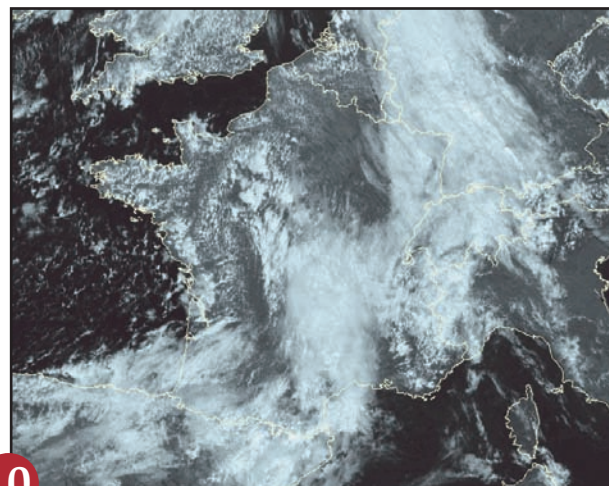
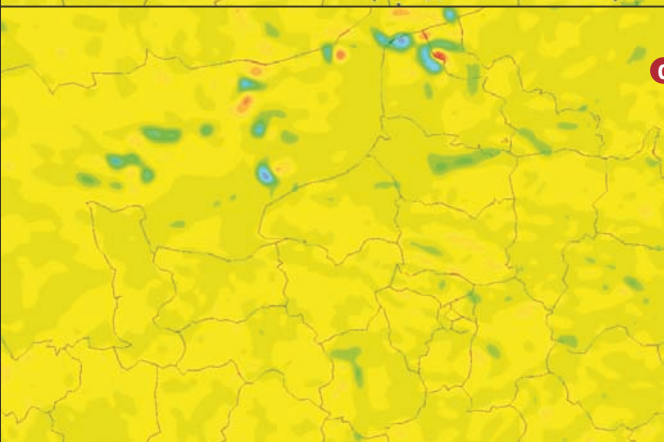
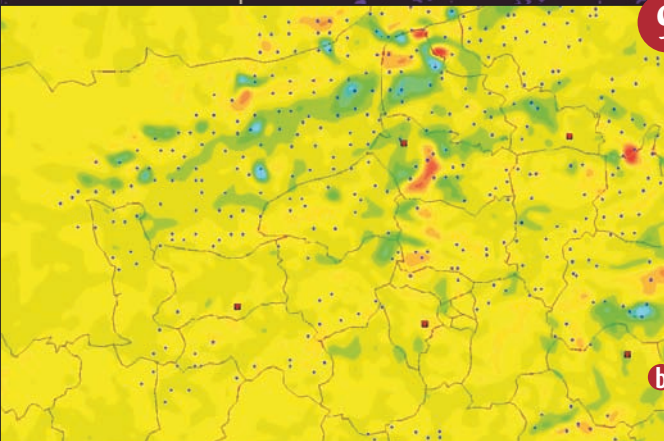
L'année 2007 a été consacrée à la phase finale de mise au point du modèle Arome. Durant ces 12 mois, la chaîne numérique permettant de produire les prévisions à échelle fine a connu plusieurs évolutions importantes. On retiendra en premier lieu le passage d'Arome sur un domaine couvrant en totalité la métropole dès janvier 2007, grâce à la puissance de calcul du supercalculateur NEC. Dans le courant de l'année 2007, les expérimentations mises en place par le projet d'accompagnement Parme avec des prévisionnistes régionaux et du service central ont permis de détecter des défauts de jeunesse du modèle dont certains sont d'ores et déjà corrigés ou en passe de l'être. On a pu en particulier revenir sur certains réglages de la dynamique inadaptés à l'échelle horizontale du modèle et évaluer des améliorations de la physique comme un nouveau schéma pour la convection peu profonde. Des évaluations objectives de type scores par les observations ont également permis de détecter des biais systématiques. Certains ont trouvé une réponse comme pour la température à 2 mètres et le vent à 10 mètres au travers de la mise en place d'un nouveau schéma pour la canopée, d'autres comme une surestimation des fortes précipitations, demandent encore à être réévalués. Enfin, la mise en place d'une assimilation propre depuis fin septembre clôt cette année riche en évolutions pour Arome.

La qualité des prévisions Arome apparaît variable suivant les paramètres et les types de temps. De façon objective, le modèle se compare aux scores d'Aladin. Les expérimentations ont également souligné des réussites en particulier sur le démarrage de la convection diurne ou, comme sur la figure, dans la représentation de la nébulosité. Les prochaines évolutions verront entre autres choses d'ici le passage en opérationnel du modèle, la prise en compte des observations de vent des radars Doppler dans l'assimilation. 10

Cumul de précipitation
entre 00 et 12 h
le 8 décembre 2007 :
mesuré par pluviomètre
(a), simulé par la prévision
Arome du réseau de 00 UTC,
utilisant comme conditions
initiales
l'analyse Aladin (b)
et l'analyse Arome (c).



◀ Cas de la bande étroite
de front froid du 8 novembre 2007
à 18 UTC :
(a) mosaïque radar, analyses
de divergence à 950 hPa obtenues
avec le cycle d'assimilation Arome
(b) avec et (c) sans vitesses
Doppler (les contours bleu-verts
signalent de la convergence ;
pour la figure (b) les carrés
représentent les radars pris
en compte, les points indiquent
les profils de vitesses radiales
considérés dans l'analyse).



▶ Image visible
du 7 août 2007
à 12 h UTC.

▶ En superposition
la prévision à 12 heures
d'échance
du 7 août 2007
du paramètre nébulosité
totale du modèle
en test Arome.

Test d'un schéma turbulent de Canopée dans Arome

Un nouveau schéma de couche limite de surface a été testé dans Arome. Ce schéma est intégré au module de surface. Il consiste à rajouter 6 niveaux verticaux entre le sol et le plus bas niveau atmosphérique du modèle (situé à 17,5 m dans Arome). Sur ces six niveaux supplémentaires, un schéma de turbulence est utilisé pour y calculer les flux et l'évolution des variables pronostiques telles que la température, l'humidité et le vent. Les flux renvoyés à l'atmosphère sont eux aussi modifiés par ce calcul. Ainsi, outre les diagnostics de couche limite classiques (température à 2 m, humidité à 2 m et vent à 10 m), l'ensemble de la prévision météorologique est modifié. Ce module a été testé sur deux mois, en janvier et juillet 2007, sur le Sud-Est de la France. L'amélioration recherchée concernait principalement les températures nocturnes, qu'Arome avait tendance à surestimer dans les situations anticycloniques.

Les figures (a) et (b) montrent l'amélioration apportée par ce schéma en terme de biais et d'écart type des erreurs aux 351 stations du réseau Radome se trouvant sur la zone. Les scores de couche limite d'Arome sont désormais de qualité au moins équivalente à ceux d'Aladin.

11

Impact du nouveau schéma de convection peu profonde dans Arome

À la résolution horizontale d'Arome (2,5 km), les nuages d'extension horizontale plus petite que celle des cumulonimbus (cumulus, voire stratocumulus très fractionnés) sont associés à des processus sous-maille qui doivent encore être paramétrés. Un nouveau schéma de convection peu profonde, dit « EDKF » (Eddy-Diffusivity-Kain-Fritsch) a été développé dans Arome pour assurer un mélange suffisant dans les couches limites convectives sèches et humides, associé aux thermiques peu profonds. Ce schéma est inspiré du schéma en flux de masse développé en 2004 au CNRM combiné au calcul de l'entraînement et du déentraînement nuageux du schéma original de MésoNH. Un mélange non-local peut également être appliqué au vent, en plus du mélange déjà réalisé par le schéma de turbulence.

Cette nouvelle paramétrisation est actuellement en test régulier dans Arome et montre des améliorations significatives sur les couvertures nuageuses de couche limite. Un autre impact positif est la disparition de la structure en « arêtes de poisson » sur le vent dans les basses couches, qui se produisait assez fréquemment dans les couches limites convectives sèches en situation de vent faible (figure 12). Cette structure dynamique bruitée était due à un mélange insuffisant dans la couche limite, qui intensifiait une structure en « rouleaux », typique de la simulation aux résolutions kilométriques, lorsque les tourbillons sont partiellement résolus par les équations du modèle et partiellement paramétrés. Le nouveau schéma EDKF renforce le mélange paramétré et permet une meilleure représentation des thermiques de couche limite, à la fois du point de vue de la thermodynamique et de la dynamique.

12

Prévision locale des faibles visibilités pour l'aéronautique

La prévision de la formation et de la dissipation des nappes de brouillard ou nuages bas a une grande importance pour les plate-formes aéroporportuaires, car les conditions de faible visibilité et le plafond déterminent la fréquence des atterrissages et décollages à un moment donné. Le système d'assimilation-prévision Cobel-Isba (développé conjointement avec le Laboratoire d'aérodynamique et l'université Paul-Sabatier) est un modèle numérique unidimensionnel, spécialisé dans la prévision des situations de brouillards et nuages bas, utilisé de façon opérationnelle à l'aéroport de Paris - Charles-de-Gaulle depuis 2002.

Au cours de l'année 2007, le travail de recherche s'est principalement concentré sur les conditions initiales de température et d'humidité pour ce modèle. Celles-ci sont fournies par le système d'assimilation, qui utilise des observations locales, et une ébauche issue du cycle de prévision précédent. Il a été montré que l'influence sur la verticale des observations dans les profils initiaux, suit un cycle diurne prononcé.

Par conséquent, un nouveau système d'assimilation a été développé. Il prend mieux en compte la variation de la portée des observations sur la verticale : le filtre de Kalman d'ensemble (EnKF). D'autre part, la corrélation entre les incertitudes de température et d'humidité dans l'ébauche a été intégrée au modèle. Ces travaux ont aussi permis de montrer l'importance de l'initialisation des brouillards et nuages bas et d'optimiser celle-ci.

En 2008, le travail sur le système d'assimilation se poursuivra, à l'aide notamment des données provenant de la campagne Paris-FOG, à laquelle Cobel-Isba a participé en fournissant des prévisions quotidiennes. Le modèle est en cours d'installation sur les sites de Paris-Orly et Lyon - Saint-Exupéry, l'objectif est de pouvoir utiliser Cobel-Isba de façon opérationnelle pour l'aéroport de Lyon - Saint-Exupéry à l'hiver 2008-2009.

13

Système de mise à disposition ciblée d'informations météorologiques géoréférencées pour les avions en vol

Flysafé a pour objectif de définir et tester de nouveaux moyens et systèmes contribuant à la sécurité des vols. L'objectif est de fournir au pilote une aide à la décision intégrée sur les principales menaces qui interviennent dans les accidents, parmi lesquelles les conditions météorologiques défavorables. Météo-France, le Met Office, le DWD (*Deutsche Wetter Dienst*), le DLR (*Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt*) et l'université de Hanovre ont développé des systèmes sol (WIMSS : *Weather Information Systems*) qui

fournissent une information de type prévision immédiate sur des phénomènes impactant la sécurité des aéronefs : orages et cumulonimbus, givrage aéronautique, turbulence en ciel clair et turbulence de sillage. Les produits des WIMSS sont des objets météorologiques géoréférencés qui décrivent les zones de danger sous forme de polygones auxquels sont associées des méta-informations telles que la sévérité du risque ou l'indice de confiance associé à la prévision. Un serveur de données météorologiques concentre les objets

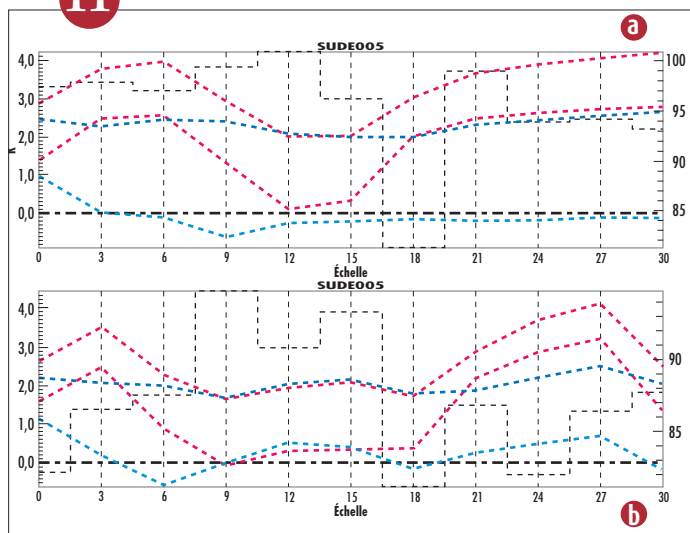
des différents WIMSS et répond aux requêtes des avions en vol.

Le modèle d'échange de données GML mis en place est conforme aux spécifications de l'Open Geospatial Consortium (OGC), ce qui facilitera grandement l'interopérabilité et plus généralement l'avenir opérationnel du système.

Un test grandeur nature sera réalisé en 2008 au travers de deux campagnes d'essais en vol auxquelles participera l'ATR42 de l'unité Safire.

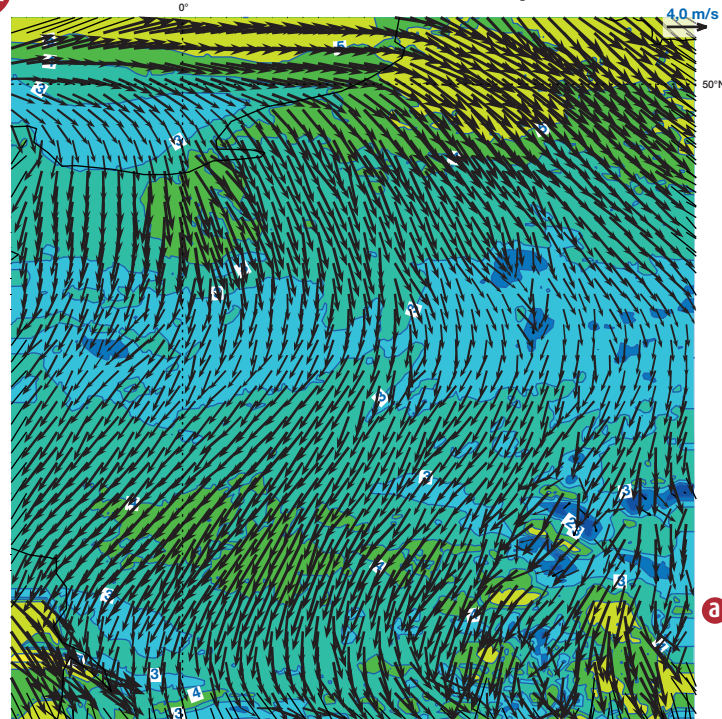
14

11



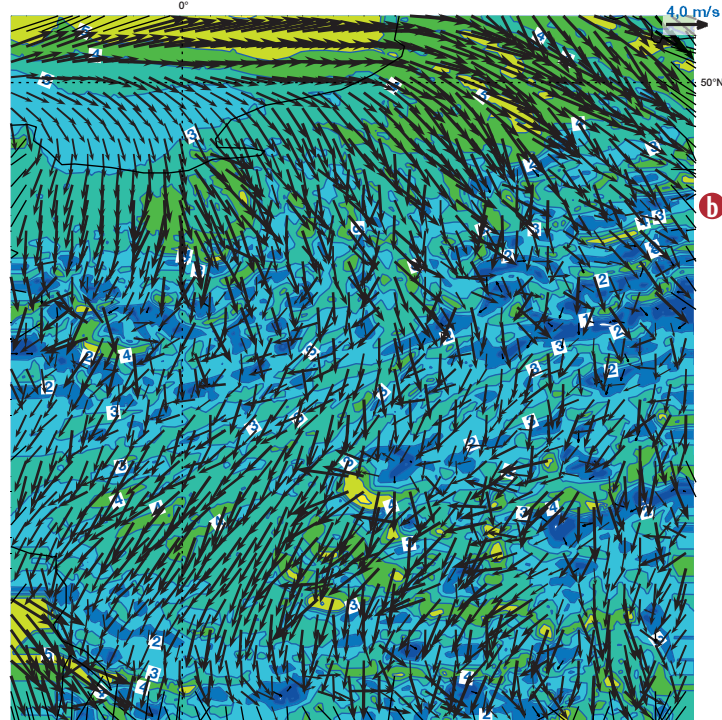
12

Module : min=0.0785159468651 max=7.88577312231 moy=3.58882217836



0.1 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 - 7 7 - 10 10 - 15

Module : min=0.024394646287 max=7.46915210783 moy=3.18201259333

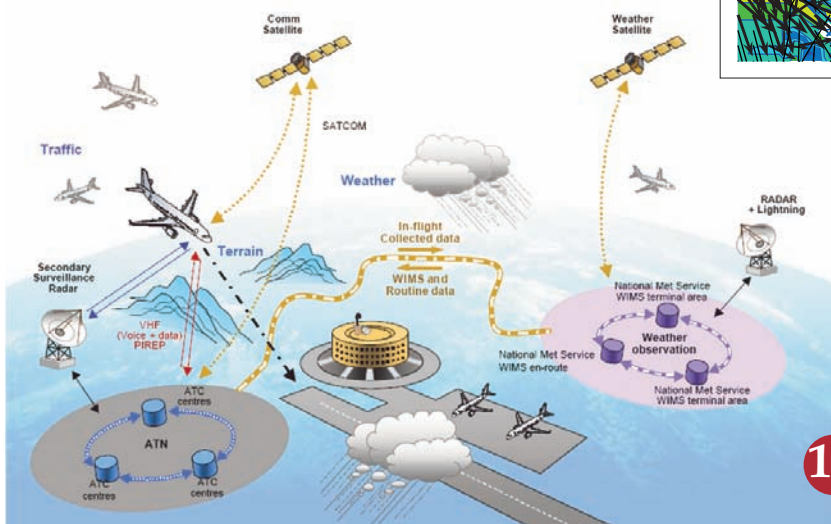


▲ Situation du 30 juillet 2007 à 14 h TU sur le nord-ouest de la France. Force et direction du vent près du sol prévus par Arome en version standard (sans EDKF) (a) et avec EDKF (b).

◀ Concept général Flysafe.

14

FLYSAFE FLYSAFE overall concept



Observations nouvelle génération et modèle numérique méso échelle pour la détection du risque de givrage aéronautique

Le projet européen Flysafe est dédié à l'amélioration de la sécurité des vols et regroupe 36 partenaires de l'industrie aéronautique, de services météorologiques nationaux, de centres de recherches et d'universités de l'Union européenne et de la Russie.

Dans le cadre de ce projet, Météo-France s'est fortement investi dans l'amélioration du système actuel d'identification des zones givrantes à petite échelle pour l'aéronautique : Sigma.

Les développements de Sigma se font dans une démarche innovante d'utilisation des nouvelles observations disponibles comme les produits élaborés issus du radar 3D et du satellite MSG, et des sorties du modèle numérique de prévision à petite échelle de Météo-France, Arome. L'algorithme de Sigma a été entièrement repensé afin de tirer le meilleur profit des développements en cours et à venir sur les données d'entrée du système. En effet, des produits ont été élaborés au CMS et au CMR à partir des don-

nées des instruments implantés récemment (radar 3D polarisé, satellite multi-canaux haute résolution). Le nouvel algorithme prend en compte ces informations pour mieux diagnostiquer les zones d'eau surfondue. On peut ainsi accorder une part plus importante aux observations par rapport aux données de prévision numérique. Parallèlement à l'amélioration des données observées, les modèles numériques de prévision fournissent maintenant, outre une meilleure précision des champs de données usuels (température, humidité relative), des champs complémentaires de microphysique fondamentaux pour la détection et la prévision des zones d'eau surfondue.

La mise au point et la validation de ce nouvel algorithme Sigma vont se poursuivre au cours de l'année 2008, bénéficiant des observations qui seront récoltées lors des deux prochaines campagnes d'essais en vol du projet Flysafe qui auront lieu en février et août 2008. 15

Développements pour un service d'alerte à la pluie

En vue de proposer au grand public un service d'alerte à la pluie, une chaîne de prévision a été mise en service et évaluée. Le service est disponible à l'échelle de chaque commune, et combine un message d'avertissement pour le début de pluie dans l'heure à venir, et la mise à disposition d'une information plus détaillée sur sa chronologie.

La méthode de prévision est basée sur l'analyse des mouvements des zones de pluie détectées par le réseau Aramis, suivie d'une simple extrapolation de la mosaïque dite « lame d'eau », laquelle couvre la France métropolitaine. Les intensités de précipitations sont donc translatées sans être modifiées. L'utilisation de la « lame d'eau » permet de tirer profit de l'information de qualité de l'estimation des pluies qui l'accompagne, pour gérer dynamiquement l'impact de la qualité d'observation sur la qualité de service.

L'évaluation menée concerne une période de quatre mois. Elle utilise la donnée lame d'eau comme référence. Pour le reste, elle a été menée avec des critères simulant la perception de l'utilisateur final, et dont on a calculé la valeur médiane parmi toutes les communes ; le taux d'alertes non justifiées est de 37 %, ce qui est admissible ; celui des non-détections est remarquablement faible (3 %) ; et le préavis moyen est de 25 minutes, ce qui est au-dessous de l'objectif initial. Mais la difficulté de cette prévision est qu'elle vise aussi à traiter un seuil d'intensité des pluies très faible. La qualité n'est pas homogène sur le territoire, ce qui a mené à en qualifier une partie seulement.

Pour l'année 2008, l'effort portera sur la prise en compte d'une lame d'eau améliorée, sur une extension et un approfondissement de l'évaluation, et sur l'amélioration des défauts résiduels afin d'ouvrir plus largement le service. 17

Un système de Prévision Immédiate des orages pour accroître la sécurité des vols commerciaux

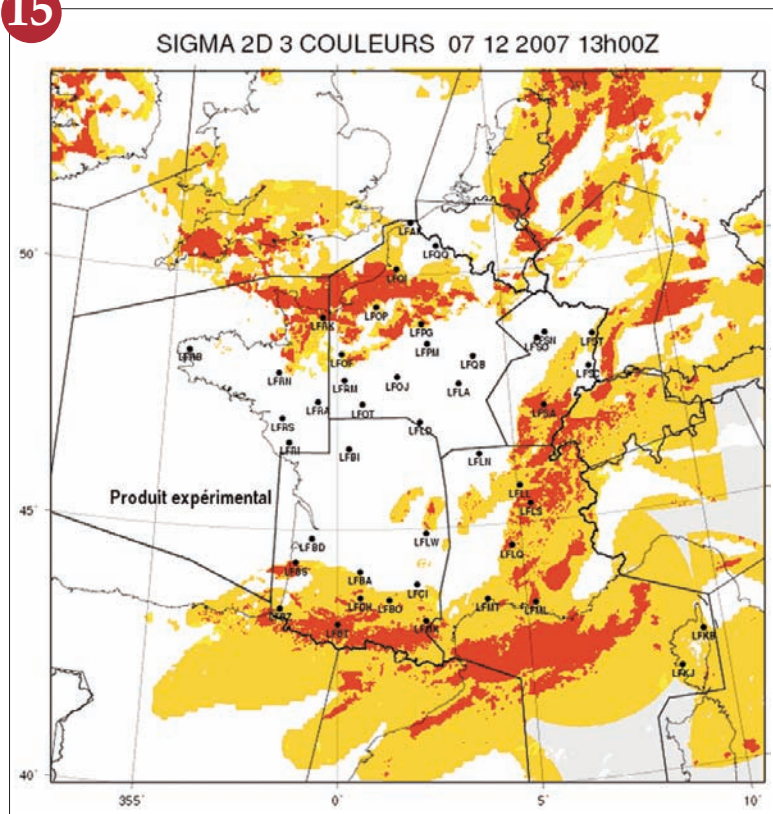
Le projet européen Flysafe vise à améliorer la sécurité de l'aviation commerciale à l'horizon 2015 dans trois domaines : la collision des aéronefs entre eux, la collision avec le terrain, et la sensibilité aux conditions météorologiques. Un des 4 risques météorologiques traités concerne les orages. Ceci donne lieu au développement d'un prototype de Système de Gestion de l'Information Météorologique spécifique, le « WIMS-Cb ».

Ce développement est mené en partenariat avec le DLR allemand, l'Onera, le Met Office britannique et l'université de Hanovre. Météo-France traite deux échelles spatiales en commun avec le DLR : l'approche des aéroports et l'échelle dite « régionale » (c'est-à-dire européenne). Il s'agit essentiellement de signaler et prévoir les orages sous une forme objet, à une heure d'échéance, et avec une grande répétitivité. À l'échelle de l'approche des aéroports parisiens, on utilise principalement les données radar avancées du réseau Aramis : données tridimensionnelles et leur synthèse 2D, et

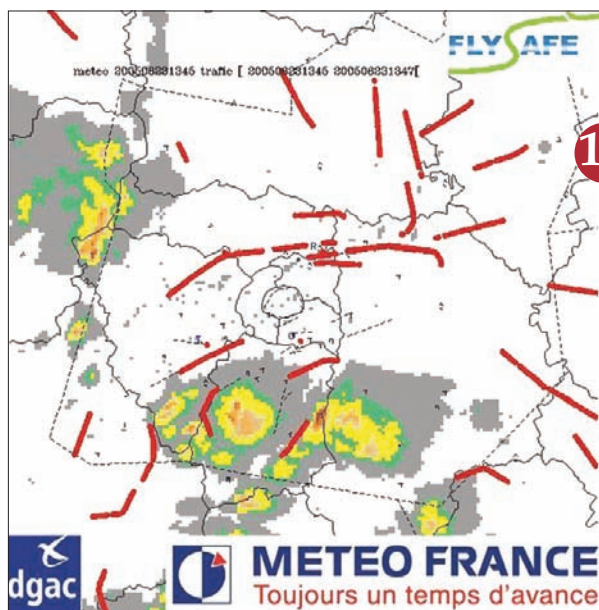
données de diversité de polarisation pour la détection de la grêle ; les données Doppler servent à détecter les cisaillements de vent les plus marqués. La prévision du sommet maximal des orages utilise une analyse des profils thermodynamiques. À l'échelle européenne, on utilise une mosaïque de données radar 2D qui intègre les pays limitrophes en gérant explicitement leur décalage temporel. Pour l'évaluation des objets orages diagnostiqués, on analyse la cohérence avec la localisation des éclairs nuage-sol, et avec des objets diagnostiqués en utilisant l'imagerie satellite. Pour l'évaluation des prévisions, une démarche originale a été développée, qui prend en compte une tolérance spatiale et temporelle dans le calcul de scores binaires d'occurrence d'objets orage basé sur les objets diagnostiqués.

L'année 2008 sera consacrée à parfaire l'évaluation de ces prototypes, en particulier dans le cadre d'une campagne d'essais en vol prévue en août, et qui testera la pertinence de données radars embarquées. 16

15

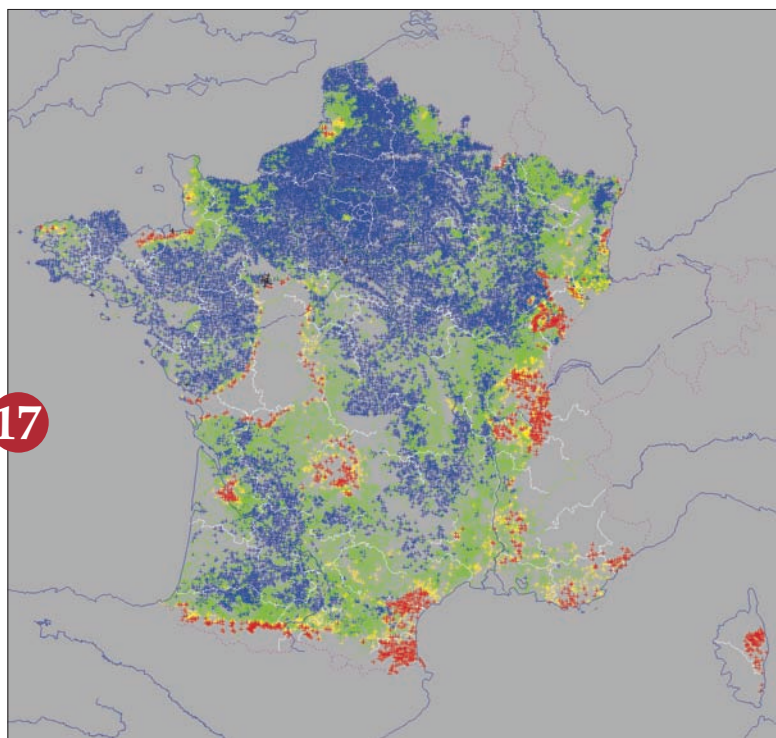


◀ Diagnostic de givrage obtenu à partir du produit Sigma pour le 7 décembre 2007 à 13 h UTC au niveau 800 hPa, présentant une zone de conditions givrantes de risque modéré à sévère en rouge, de risque modéré en orange et de risque faible en jaune.



16

▼ Cartographie des préavis pour le produit « alerte pluie » (en valeur moyenne). Code couleur : noir < 30' < bleu < 25' < vert < 20' < jaune < 15' < rouge.



▲ Flysafe et orages : éviter aux pilotes d'avoir à flirter avec les orages. Le 23 juin 2005 à 13 h 45, autour de Paris, les avions (lignes rouges), et en particulier ceux situés au milieu de la moitié basse de l'image, se fraient difficilement un chemin au milieu des orages (représentés par les plages de couleur vert jaune ou orange) pour atterrir à Orly, faute d'avoir obtenu plus en amont une prévision détaillée de la localisation des orages

Prévision cyclonique

Une initialisation spécifique des cyclones

La Direction Interrégionale de Météo-France à la Réunion assure la surveillance cyclonique du sud-ouest de l'océan Indien, responsabilité internationale confiée par l'OMM. Disposer de bons modèles de prévision numérique est devenu essentiel pour prévoir l'évolution de ces phénomènes tropicaux.

L'initialisation de ces modèles fait appel à des quantités énormes de données, en grande partie issues d'observations satellitaires. Cependant, les données réellement utilisées au cœur des cyclones sont très éparpillées (figure a), à cause de la « pollution » des mesures par les nuages, les précipitations, ou les conditions de vents forts. L'analyse de la structure et de l'intensité de ces météores est alors rendue particulièrement difficile.

L'analyse de Dvorak, réalisée par les prévisionnistes en utilisant l'imagerie satellitaire,

restitue les principales caractéristiques d'un système dépressionnaire tropical donné. À partir de quelques uns de ces paramètres estimés, des modèles analytiques restituent la structure tridimensionnelle type du système. Des pseudo-observations sont ainsi construites et assimilées dans Aladin-Réunion depuis décembre 2007. Elles permettent de repositionner efficacement le cyclone à l'analyse et d'améliorer la prévision de trajectoire (figure b). Les bénéfices sont également nets sur l'intensité prévue.

Dans les années à venir, l'utilisation des mesures satellitaires en présence de nuages ou de pluie deviendra de plus en plus répandue. Un autre axe important de progrès pour la prévision cyclonique est la meilleure prise en compte de l'océan, qui constitue le réservoir de carburant du cyclone

18

Réponse de la couche limite océanique à des conditions cycloniques

Malgré une importante amélioration de la prévision de la trajectoire des cyclones tropicaux au cours des dernières années, la prévision de leur intensité reste aujourd'hui encore soumise à d'importantes incertitudes. Cela est en grande partie dû à la résolution insuffisante des modèles numériques, mais également à l'absence de prise en compte des interactions entre le cyclone et l'océan. Les cyclones tropicaux tirent en effet la quasi-totalité de leur énergie de la chaleur contenue dans les couches superficielles de l'océan. Mais en contre partie, ils le refroidissent en absorbant de la chaleur et de l'humidité à sa surface et en créant du mélange turbulent par l'intermédiaire des vents, des vagues et des courants dans ses couches superficielles. Ce refroidissement océanique affecte ensuite directement le cyclone qui va voir son carburant, et par conséquent son intensité, diminuer.

La réponse de l'océan superficiel au passage du cyclone Frances en 2004 a été étudiée par la mise en œuvre d'un modèle de couche de mélange océanique dans la région des Antilles (figure a). La comparaison des températures de surface de l'océan issues du modèle avec les données satellite disponibles montre un fort refroidissement pouvant atteindre localement 4 °C et permet ainsi de vérifier le comportement réaliste du modèle (figure b).

Les conséquences de ce refroidissement sur le cyclone lui-même seront prochainement étudiées dans le cadre de simulations couplées océan-atmosphère afin de mieux comprendre ces phénomènes météorologiques extrêmes, et ainsi de mieux les prévoir.

20

L'effet du relief de l'île de la Réunion sur le cyclone tropical Dina (2002)

Le cyclone tropical intense Dina a touché l'île de la Réunion le 22 janvier 2002, causant de nombreux dégâts. Cet épisode constitue un cas d'étude intéressant pour investiguer les interactions en jeu entre le relief escarpé de l'île de la Réunion et un cyclone.

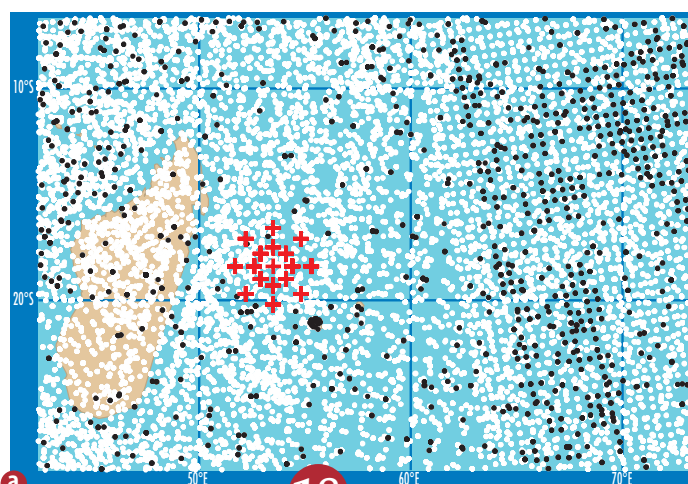
Pour ce faire, deux simulations ont été conduites avec le modèle Mésos-NH en zoomant à la résolution de 4 km sur la Réunion : - la première nommée « Island » avec l'île de la Réunion, - la seconde nommée « Ocean » dans laquelle l'île de la Réunion a été remplacée par de l'océan.

Les deux simulations restituent des trajectoires de Dina très similaires ; « Island » montre une très légère déviation de la trajectoire vers le nord, qui a été aussi observée en réalité mais de façon plus prononcée. La présence de l'île atténue les oscillations naturelles présentes dans le mur de l'œil : l'intensité du cyclone pour « Island » est ainsi plus faible.

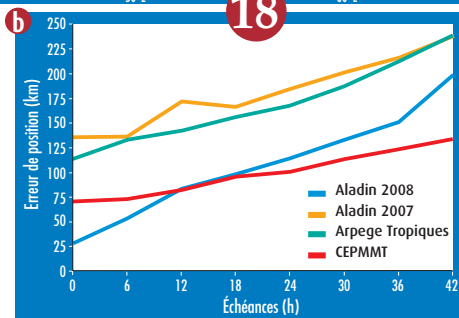
Des différences notables sont présentes dans le champ de vent avec, pour « Island », des vents plus faibles ainsi qu'une subsidence marquée sous le vent de l'île. Lors du passage des vents les plus forts au niveau de l'île, le flux privilégie un passage au-dessus du relief plutôt que son contournement. Ce passage au-dessus du relief excite une onde orographique, qui est associée à des intrusions d'air stratosphérique, comme le montre la comparaison des figures a et b. Cette onde simulée, associée à des maxima de vents, concorde bien avec l'observation de vents très forts au sein du cirque de Cilaos, pourtant abrité, et qui y ont dévasté une forêt.

Outre la compréhension de ces mécanismes, les simulations à haute résolution permettent d'estimer les vents et pluies cycloniques sur toute l'île. Mésos-NH a pu restituer de façon réaliste les caractéristiques d'un cyclone tropical mature, l'objectif est maintenant d'étudier un stade de vie plus précoce du cyclone : la cyclogénèse.

19

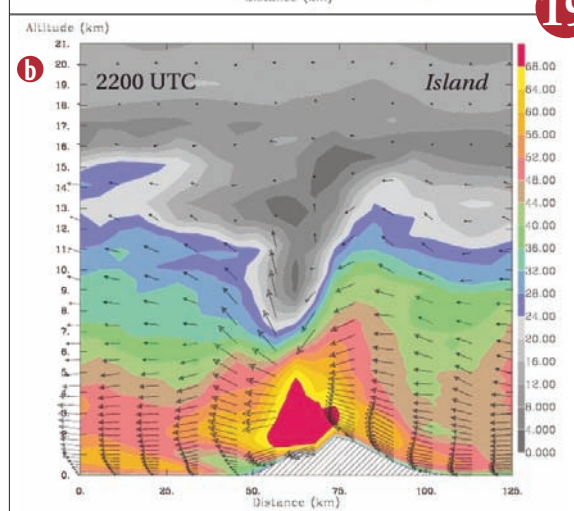
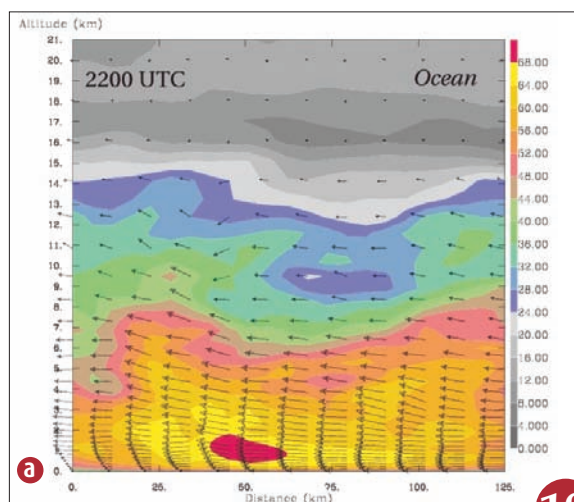
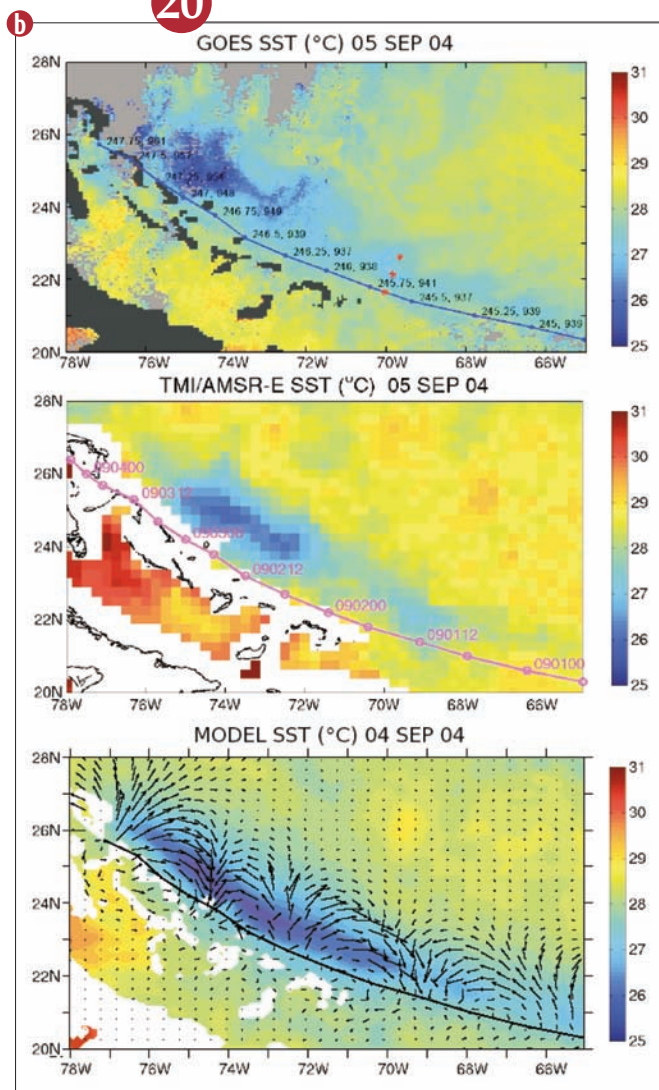
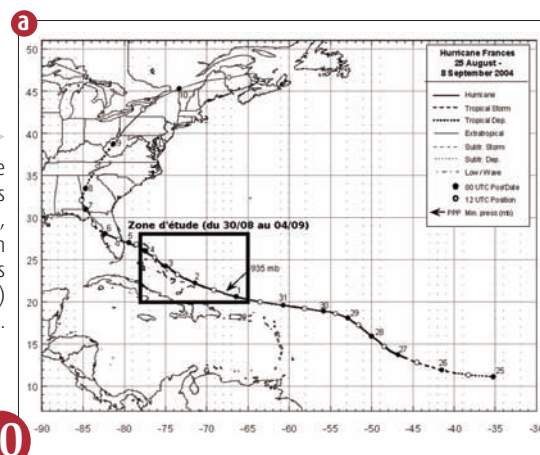


◀ **a** - Projection au sol des observations du 26 février 2007 à 00 h UTC : les points blancs représentent toutes les observations disponibles ; les points noirs celles effectivement utilisées par Aladin-Réunion pour son analyse ; les croix rouges situent les pseudo-observations supplémentaires décrivant le cyclone Gamede (le vortex tridimensionnel de vent à 100 et 200 km du centre et aux niveaux 10 m, 850, 700 et 500 hPa – et la pression mer au centre).



b - Erreurs moyennes de position du centre du système, en fonction des échéances, de quatre modèles pour les systèmes tropicaux de la période du 29 janvier (0 h UTC) au 15 mars 2007 (12 h UTC), incluant les cyclones Dora, Enok, Favio, Gamede et Indlala ; les échantillons sont homogènes entre les modèles et comprennent de 76 à 50 éléments selon les échéances. Aladin-Réunion 2008 utilise la nouvelle initialisation des cyclones dont les bénéfices peuvent être déduits par comparaison à "Aladin-Réunion 2007".

▶ Trajectoire
(a) du cyclone Frances
du 30 août au 4 septembre 2004,
et comparaison
(b) des températures
de surface de l'océan (SST)
observées et prévues.



▲ **a** - Coupe verticale du module du vent horizontal (isosurfaces colorées en m/s) et vent tangent à la coupe (vecteurs) le 22 janvier 2002 à 22 h 00 UTC au niveau de l'emplacement de l'île de la Réunion, pour la simulation « Océan », dans laquelle l'île de la Réunion a été remplacée par de l'océan.

b - Idem à la figure (a) mais pour la simulation « Island », c'est-à-dire en présence de l'île de la Réunion.

Amma

Après les périodes d'observations intensives de l'année 2006, l'année 2007 a été marquée par les premiers dépouillements de données collectées pendant Amma. La conférence de Karlsruhe à

l'automne 2007 a permis à la communauté scientifique de faire un point sur les premiers résultats obtenus. Ceux-ci sont très prometteurs.

La valorisation des données collectées dans le cadre d'Amma

Observation de la langue d'eau froide lors des campagnes Amma-Egee

Dans le golfe de Guinée, on assiste tous les ans à un intense refroidissement des eaux de surface le long de l'équateur : c'est la « Langue d'eau froide » (LEF). Ce signal se manifeste dans la partie orientale de l'Atlantique tropical, là où la thermocline est proche de la surface. Ce refroidissement débute en mai et les variations saisonnières des températures de surface de la mer (TSM) atteignent 5 à 7 °C en moyenne. Dès lors que cette anomalie froide s'est formée, sa frontière nord est en contact avec les eaux chaudes du golfe de Guinée : c'est là que l'on enregistre d'importants gradients nord-sud de TSM ainsi qu'une forte discontinuité des flux à l'interface océan-atmosphère.

Une des questions majeures du programme Amma-Egee est d'identifier les mécanismes impliqués dans la mise en place de la LEF et son rôle dans le couplage avec la mousson africaine. Les premiers résultats obtenus dans le cadre de ce programme concernent l'analyse comparée des TSM entre 2005 et 2006, qui furent deux années très contrastées, puisque la LEF de 2005 a été la plus précoce des 25 dernières années, et celle de 2006 l'une des plus tardives. Ce déphasage est à mettre en relation avec la mise en place tardive de la mousson africaine en 2006 par rapport à celle de 2005.

L'analyse a montré que le refroidissement de la LEF en 2005 avait été accru par un coup de vent fort et précoce, associé aux alizés de l'anticyclone de Sainte-Hélène. Cet événement a provoqué le mélange intense des eaux de surface avec les eaux plus froides de sub-surface au sud de l'équateur. De plus, des vents soutenus ont été observés au centre de l'Atlantique en avril 2005 qui ont pré-conditionné la structure des couches mélangées à travers l'ensemble du bassin.

1

Le profileur de vent VHF durant la campagne Amma

Le radar VHF a été installé sur le site de Nangatchori au Bénin entre avril 2006 et novembre 2007 en vue de l'observation à haute résolution de la mousson ouest-africaine.

Toutes les heures, cet instrument a réalisé à la verticale, entre 1,6 et 10 km d'altitude, un profil de vent avec une résolution de 375 m, permettant tout particulièrement une analyse fine du jet et des ondes d'est vers 4 km d'altitude. Associés aux phénomènes de basses couches (observés par le profileur UHF), ces événements exercent une grande influence sur les précipitations intervenant dans la région avec les conséquences qu'elles représentent pour l'agriculture, la santé et l'économie en général.

L'étude des ondes sur une large gamme de fréquences a permis par ailleurs de suivre le transport de quantité de mouvement et le bilan d'énergie, apportant ainsi des informations supplémentaires sur la circulation à grande échelle et la structure de l'atmosphère qui caractérisent la mousson ouest-africaine.

Enfin, les mesures de réflectivité radar et de largeur du signal sur le spectre ont apporté des éléments sur la turbulence atmosphérique. L'information d'humidité qu'elles contiennent a permis d'affiner la mesure de la vapeur d'eau et de compléter ainsi les mesures fournies par le radiomètre.

Le profileur VHF a fonctionné correctement durant la majeure partie de sa mission au Bénin et l'ensemble des mesures horaires (les trois composantes du vent, la réflectivité radar et le taux de dissipation turbulente) a été intégré à la base de données fin 2007. L'année 2008 sera consacrée à l'exploitation scientifique des données, en synergie avec d'autres instruments de télé-détection installés sur le même site.

2

Corrections des biais d'humidité des radiosondes durant la campagne Amma

Durant la phase d'observations intensives d'Amma, le nombre quotidien de sondages effectués sur l'Afrique de l'Ouest et transmis sur le Système mondial de télécommunication a été multiplié par 3, mais certaines sondes ont montré des défauts systématiques.

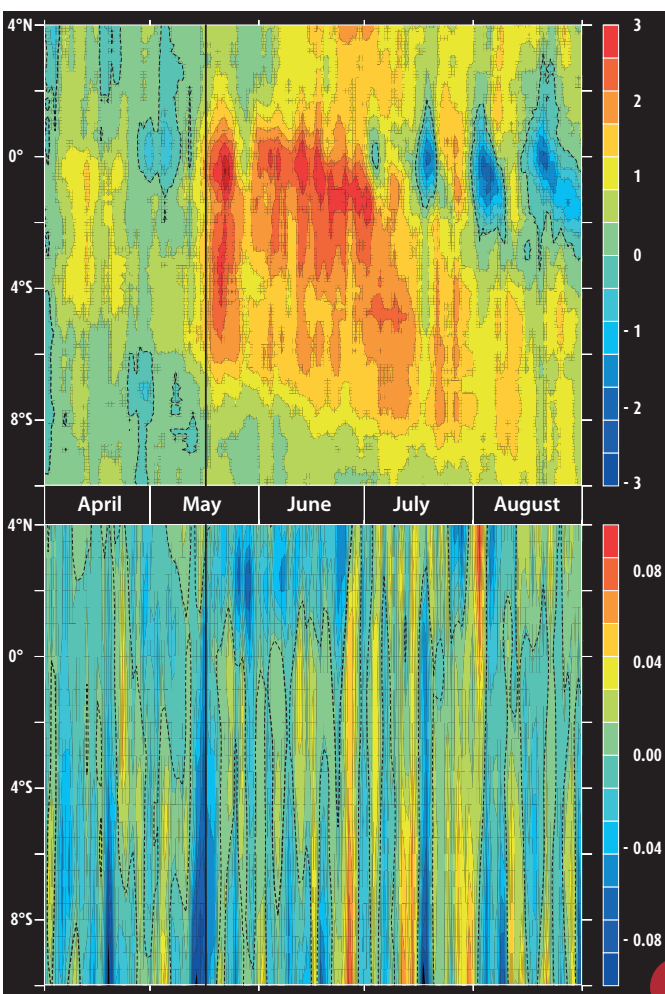
Les premières évaluations objectives ont montré des écarts importants (biais secs d'humidité) pour les stations ayant utilisé des radiosondes de type Vaisala RS80, ce qui représente environ la moitié des stations de la zone Amma. La station de Niamey (Niger) a effectué 8 sondages/jour pendant les deux périodes d'observations intensives (20-30 juin 2006 et 1^{re}-15 août 2006). Pendant ces deux POI, des sondes Vaisala RS92 (de bonne qualité) ont été alternativement lancées (00, 06, 12, 18 h UTC) avec des sondes Vaisala RS80 (03, 09, 15, 21 h UTC).

L'impact de cet échantillonnage alterné est visible sur la figure (a) à Niamey : la courbe en pointillé présente une structure en dent de scie où les valeurs très faibles irréalistes correspondent au diagnostic de Cape calculés à partir des profils thermodynamiques mesurés par les RS80.

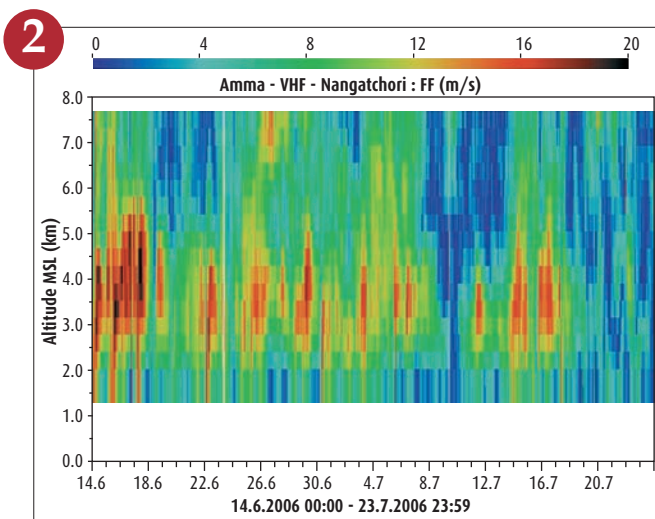
Une méthode de correction statistique utilisant l'échantillonnage alterné de Niamey a permis de documenter le biais différentiel d'humidité entre les deux types de sondes Vaisala. Ce biais est présenté sur la figure (b), où l'on voit 2 maxima : un dans la basse troposphère (jusqu'à 15 %) et un autre en haute troposphère (supérieur à 20 %). Le trait plein de la figure (a) correspond à la série temporelle de Cape où la correction de biais décrite ci-dessus a été appliquée au RS80 ; cette première correction permet d'obtenir une série temporelle bien plus cohérente. Cette méthode a été appliquée à différents sites et validée par rapport à des données GPS coïncidentes indépendantes.

Après une validation poussée de cette approche, une correction de la base de données des sondages Amma sera envisagée.

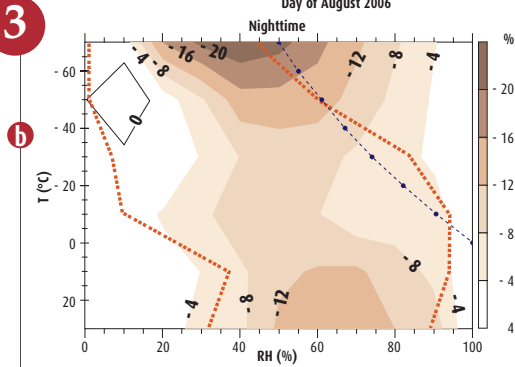
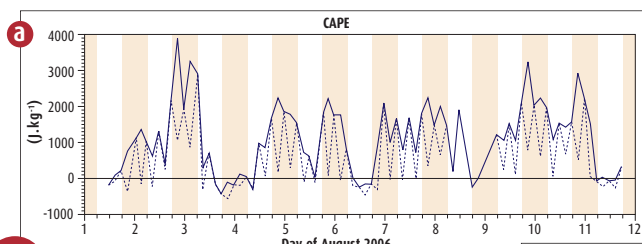
3



▲ Diagrammes de Hovmöller montrant la différence entre les années 2006 et 2005 des températures de surface de la mer (en haut) et du stress du vent (en bas). On notera que les différences de SST atteignent 3°C après un coup de vent provenant de l'hémisphère sud en mai 2005.

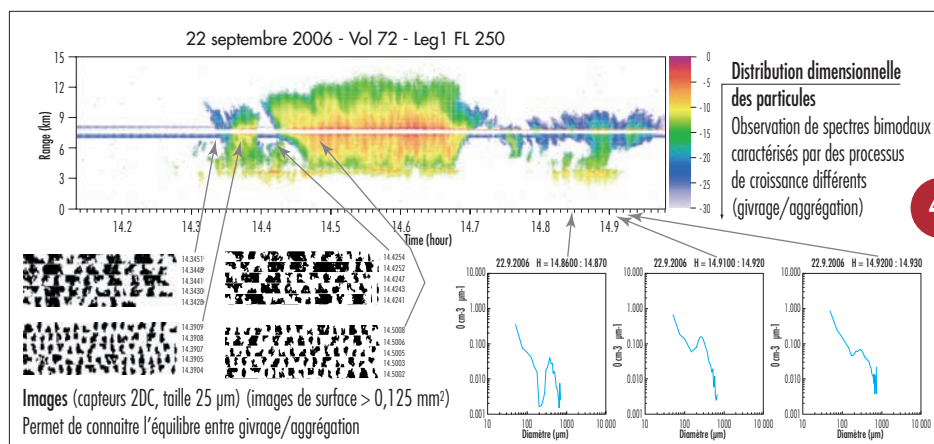


◀ Évolution de la force du vent en altitude mesurée par le profileur VHF durant la période 14 juin - 23 juillet 2006. On peut distinguer nettement les variations du jet d'est entre 2,5 et 5 km d'altitude.



◀ a - Évolution temporelle du Cape calculé toutes les 3 heures à partir des données de radiosondage de Niamey (1^{er}-11 août 2006). En trait pointillé avec les données brutes, en trait plein avec les données corrigées.

b - Biais d'humidité différentiel de nuit entre les sondes Vaisala RS 80 et RS 92. En abscisse l'humidité, en ordonnée la température mesurées par la sonde Vaisala RS80. Les lignes pointillées correspondent au 1^{er} et 10^e décile de la distribution cumulée d'humidité des sondes RS80. La ligne contenant des points correspond à la saturation relative à la glace.



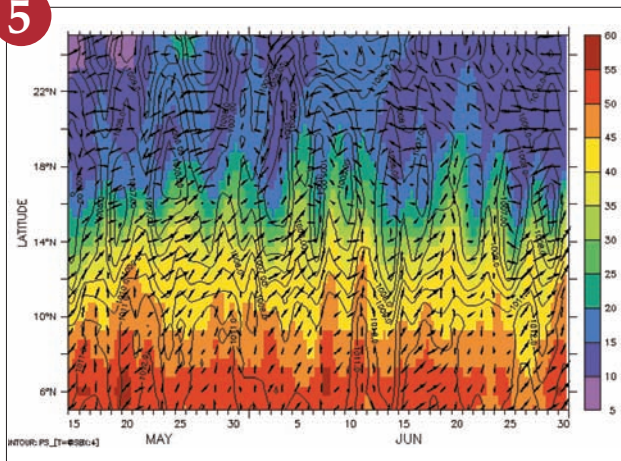
◀ Cas du 22 septembre 2006, au niveau de vol FL250 (concentration en hydrométéores ; équilibre entre givrage et agrégation ; distribution dimensionnelle des particules).

Observation des enclumes durant la SOP Amma

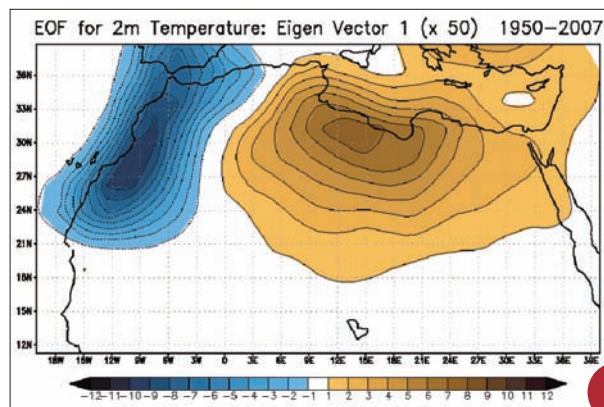
Les parties stratiformes et cirriformes qui se forment à l'arrière des parties convectives des systèmes convectifs tropicaux persistent plusieurs heures voire plusieurs jours après le passage de ces systèmes. Ces enclumes de grande extension ont un fort impact à grande échelle pouvant moduler les composantes de la mousson via leur forçage radiatif.

La POI d'Amma a permis de documenter pour la première fois les propriétés internes de ces enclumes tropicales par un ensemble de mesures télédétections (radars, lidars) et *in situ* depuis la surface, aéroportées (microphysique et Rali) ou spatiales (CloudSat, Calipso). L'objectif est par traitement de ces mesures de documenter les propriétés dynamiques, microphysiques et radiatives de ces enclumes et cirrus à différentes échelles, ainsi que l'impact de ces entités sur le système complexe de la mousson africaine. L'exploitation des données de l'expérience Amma a permis de documenter plusieurs cas d'enclume et d'étalonner les données

du radar Rasta. La comparaison des données CloudSat avec les mesures aéroportées de Rasta a mis en évidence un phénomène de diffusion multiple dans le signal du radar CloudSat. Ce résultat peut avoir des répercussions importantes pour l'exploitation quantitative des mesures Cloudsat et la réalisation de climatologies des propriétés nuageuses.



◀ Diagramme temps-latitude des analyses du Centre européen moyennées sur 0°-10° E et du 15 mai au 30 juin 2006 de l'eau précipitable (couleurs en kg.m^{-2}), de la pression ramenée au niveau de la mer où la variabilité diurne a été filtrée (iso-contours en hPa) et du vent à 925 hPa (flèches noires).



▲ Structure spatiale du premier mode de variabilité de la température quotidienne à 2 m calculé à partir des données de la ré-analyse NCEP (1950-2007). Sans unité, le champ est normé et a été multiplié par 50 pour plus de lisibilité.

Études conduites dans le cadre d'Amma

Pulsation de mousson sur l'Afrique de l'Ouest

Relativement peu d'études se sont focalisées sur la phase d'installation de la mousson africaine ; elles concernent de plus des échelles spatiales et temporelles relativement grandes. Pour la première fois, la variabilité haute fréquence du flux de mousson a été analysée.

Durant l'installation de la mousson, des excursions vers le nord du flux de mousson sont fréquentes avec des fluctuations de fréquence d'environ 5 jours indiquées par les mesures GPS. Ces excursions quasi-périodiques sont aussi présentes dans les analyses du Centre européen (figure 5). Elles coïncident avec une intensification du vent méridional et succèdent à un maximum d'intensité de la dépression thermique. De telles pulsations participent à la variabilité intra saisonnière. Elles sont mieux définies pendant la phase d'installation et de retrait de la mousson que pendant la mousson où l'interaction avec la convection complique la situation. Certaines pulsations restent stationnaires alors que d'autres se déplacent vers l'Ouest suite à leurs interactions avec les ondes Est africaines.

Le schéma explicatif suivant est proposé pour ces pulsations : le développement de la convection sèche induit une intensification de la dépression thermique et donc du tourbillon relatif. Cela produit une aspiration du flux de mousson apportant un air humide (augmentation du contenu intégré en eau) et froid (détruisant la dépression thermique). Cette dépression doit ensuite se reconstruire ce qui conduit à une oscillation.

À l'avenir, l'analyse des observations et de simulations à méso-échelle permettra de confirmer les mécanismes proposés et d'explorer les facteurs qui modulent les caractéristiques de ces pulsations.

Variabilité de la dépression thermique africaine et lien avec les latitudes moyennes

Dans le cadre du projet Amma, un intérêt particulier s'est porté sur la dépression thermique saharienne (*Heat Low*), notamment lors de la campagne de mesure qui s'est déroulée au cours de la saison 2006. L'approche climatique du phénomène est l'occasion de resituer l'année 2006 dans la série d'observations des 50 dernières années.

À l'aide d'une méthode d'Analyse en Composantes Principales appliquée sur des données quotidiennes issues des deux ré-analyses NCEP et ECMWF, un mode robuste de variabilité de la température à 2 m sur le nord de l'Afrique a été identifié. Ce mode présente un temps caractéristique de 20 à 30 jours et une structure spatiale est-ouest, opposant la partie littorale du Maroc et de la Mauritanie au centre de la Libye (cf figure).

En isolant les maxima et minima successifs au cours des 58 dernières années (1950-2007), il a été possible de reconstituer les champs atmosphériques journaliers globaux les ayant précédés. Les champs moyens ainsi obtenus montrent une relation entre le *Heat Low* et les conditions de moyennes latitudes. Ainsi, les quatre régimes de temps établis par le Cerfacs, pour la saison d'été, dont les probabilités d'occurrence sont identiques en moyenne, se retrouvent-ils bien discriminés à la lumière des phases du *Heat Low*. La phase positive (ouest plus froid) correspond, dans 75 % des cas, à un régime de blocage ou de NAO- alors que la phase négative correspond aux régimes de NAO+ ou de dorsale atlantique dans les mêmes proportions.

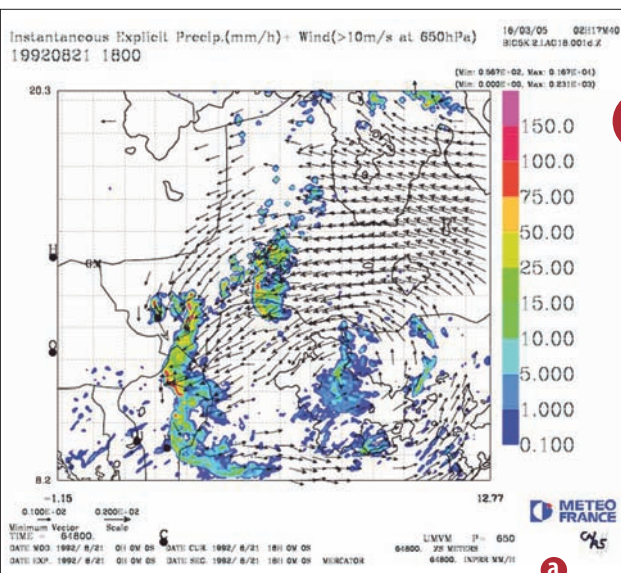
La connaissance des liens entre le *Heat Low* et les régimes de moyennes latitudes peut permettre d'améliorer la prévisibilité dans cette région. Pour y parvenir, il est nécessaire d'approfondir nos connaissances sur le rôle du *Heat Low* dans le régime de mousson.

Validation de paramétrisations physiques sur l'Afrique de l'Ouest à l'aide d'Aladin-Climat

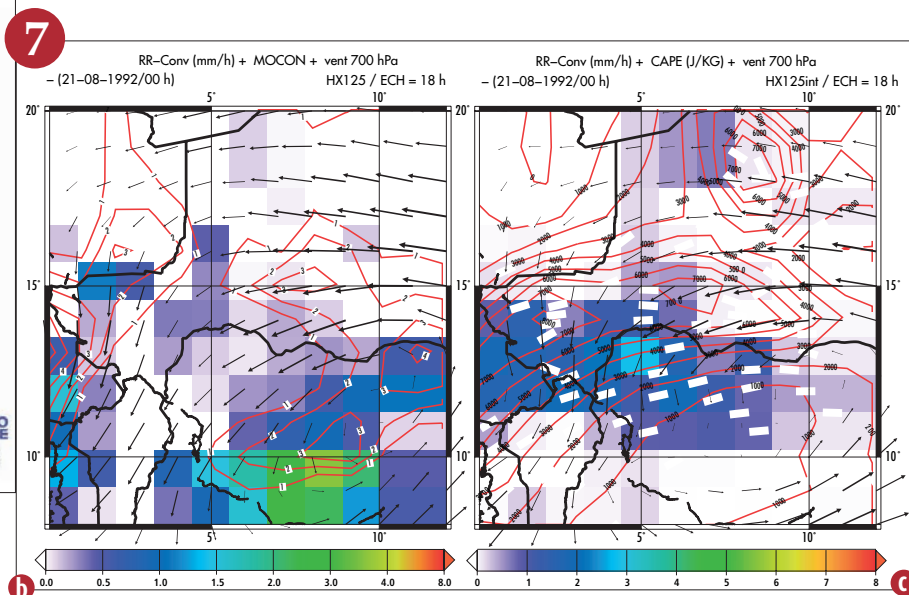
Dans les modèles de grande échelle, l'effet moyen des processus convectifs, sur une maille du modèle, est représenté par un modèle simplifié appelé paramétrisation de la convection. Le comportement de différentes paramétrisations de la convection disponibles au sein du modèle global Arpege-Climat a été exploré en étudiant tout particulièrement la zone de l'Afrique de l'Ouest.

Dans cet objectif, des comparaisons ont été menées entre des simulations à maille suffisamment fine pour que la convection soit représentée de manière explicite (simulation réalisée avec le modèle non-hydrostatique Méso-NH et une maille horizontale de 5 km) et des simulations réalisées sur le même domaine horizontal, avec les mêmes conditions initiales et latérales, avec le modèle Aladin-Climat (modèle à aire limitée), dans lequel la convection est paramétrée et la résolution horizontale peut varier. Le cas étudié ici est celui d'une ligne de grains observée sur l'Afrique de l'ouest en août 1992 (campagne Hapex-Sahel). Les résultats obtenus avec Aladin-Climat et une maille de 125 km mettent en évidence les comportements différents des schémas convectifs testés et l'apport de certains pour l'amélioration des structures précipitantes simulées.

Des diagnostics pertinents vont être élaborés, des tests relatifs à la résolution horizontale d'Aladin-Climat vont être menés, avant d'appliquer la méthode à des cas issus de la campagne Amma de l'été 2006. Ces études participent à la validation et à l'amélioration des schémas de paramétrisation existants et en développement.

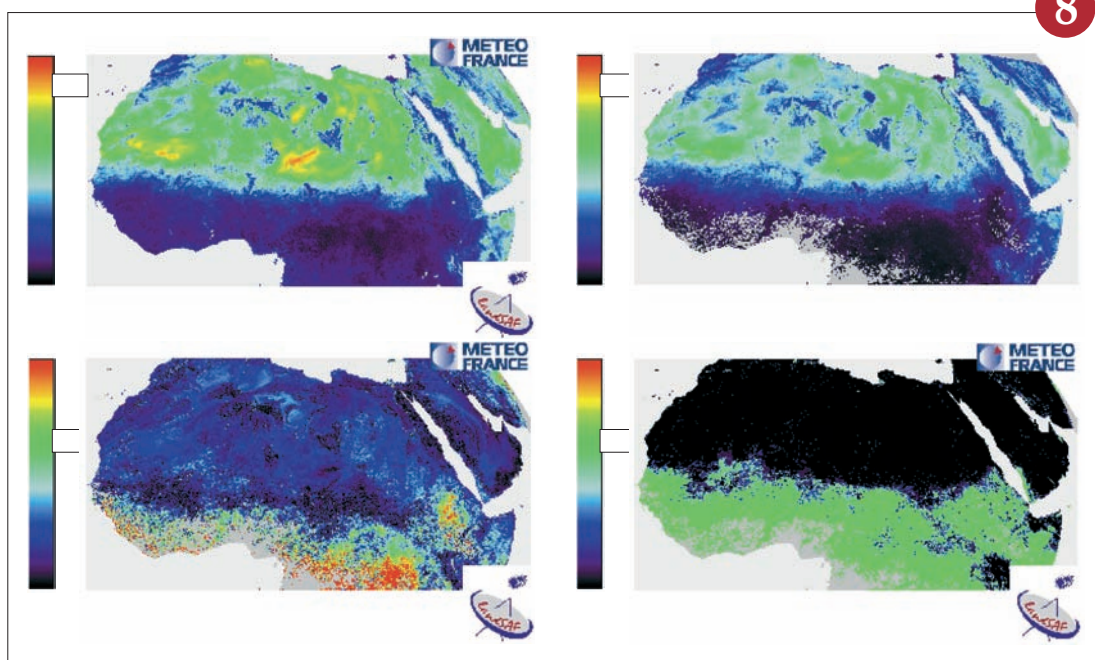


a) Précipitations explicites simulées par le modèle non-hydrostatique MésO-NH avec une maille horizontale de 5 km sur l'Afrique de l'ouest (zones colorées). Flèches : vents à 650 hPa. 21 août 1992, 18 h UTC.



b) Précipitations convectives (zones colorées) et vents à 700 hPa simulés avec Aladin-Climat sur le même domaine. Version « standard » – des paramétrisations physiques (Version 4 d'Arpege-Climat). Le déclenchement du schéma de convection est déterminé par le paramètre décrit par les isolignes rouges.

c) Précipitations convectives (zones colorées) et vents à 700 hPa simulés avec Aladin-Climat sur le même domaine. Version améliorée des paramétrisations physiques. Le déclenchement du schéma de convection est déterminé par le paramètre décrit par les isolignes rouges.



▲ Cartes comparatives des albédos visible MSG (haut gauche) et Modis (haut droite) pour la période du 12 au 26 Juillet 2006 sur la zone Amma. La magnitude des erreurs relatives (bas gauche) s'explique par la relative qualité du produit Modis (bas droite).

Le programme SAF pour l'Analyse des terres émergées : une fourniture opérationnelle étendue en Afrique

Le programme SAF (*Satellite Application Facility*) pour l'Analyse des terres émergées (ATE) produit opérationnellement des variables de surface à partir des observations des satellites MSG et EPS d'Eumetsat. Huit entités coopèrent à ce programme dont quatre sont des Services météorologiques nationaux (Belgique, Finlande, France et Portugal). Le projet basculera en phase opérationnelle en mars 2007.

Le projet comprend 5 types de produits (opérationnels, internes opérationnels, candidats opérationnels, démonstratifs, expérimen-

taux) générés à la résolution spatiale nominale de MSG. Seuls les produits opérationnels sont disponibles sur le disque MSG et d'accès public (www.landsaf.meteo.pt). Il s'agit de l'albédo, de la température de surface, des rayonnements optique et thermique, et de la couverture de neige. Le CNRM est responsable des produits albédo et rayonnement optique. Leur validation s'effectue par comparaison avec des mesures des réseaux sol et des produits satellitaires équivalents. Pour l'Europe, celle-ci a été étendue à des domaines spatiaux, le

réseau Radome krigé pour le rayonnement et l'imagerie Modis pour l'albédo. Une utilisation de l'albédo dans Surfex a été initiée. Un effort particulier a porté sur une validation en Afrique au bénéfice des données *in situ* du programme Amma.

Pour 2008, il s'agit d'amorcer la fusion des données MSG et EPS, en visant d'abord l'extension de la couverture géographique aux hautes latitudes pour tous les produits, et la combinaison optimale des observations géostationnaires et polaires pour l'albédo sur le disque MSG.

Phénomènes météorologiques

L'étude des processus atmosphériques constitue la pierre angulaire de l'amélioration de la compréhension et de la prévision des phénomènes météorologiques et climatiques. L'année 2007 a été

marquée notamment par la poursuite des travaux sur la cyclogénèse, et par des avancées significatives sur la modélisation du cycle du carbone.

Étude cyclogénèse et prévisibilité

Zones critiques de régénération des perturbations d'altitude

Aux latitudes moyennes, de nombreuses anomalies d'échelle synoptique évoluant le long des courant-jets apparaissent dans la haute troposphère. Le champ de déformation de ces derniers étire ces anomalies d'altitude horizontalement leur causant une forte perte d'énergie. Cependant, ces dernières peuvent temporairement se contracter lorsqu'elles traversent le courant-jet et ainsi se régénérer. Cette traversée se fait en des points très précis le long de l'axe du courant-jet, appelés points critiques comme l'illustre la figure 1. Sur chaque vignette de la figure, le même triangle vert apparaît. C'est un point remarquable du courant-jet et plus précisément le point-selle d'un champ dynamique important appelé déformation effective dont les valeurs positives sont montrées par les plages roses. Deux simulations effectuées dans un modèle

à une couche sur la sphère sont comparées, l'une non-linéaire et l'autre linéaire, elles sont sensées représenter l'évolution d'une anomalie d'altitude dans l'environnement précédent. Dans le cas non-linéaire, la perturbation s'étire d'abord le long des axes de dilatation puis traverse le courant-jet du sud au nord autour du point critique et commence à se contracter tout en gagnant de l'énergie lorsqu'elle dépasse ce même point. Dans le cas linéaire, elle reste du côté sud du courant-jet, ne traverse jamais le point critique et ne fait que s'étirer ce qui l'amène à perdre de l'énergie en permanence. Le mécanisme mis en évidence par ces simulations dépend donc des effets combinés de la déformation et des non-linéarités, mais en aucun cas d'une quelconque instabilité linéaire. 1

Apport de l'extraction en ondelettes pour la cohérence des structures de tourbillon potentiel

Les tempêtes des latitudes moyennes sont souvent le résultat d'interactions entre un tourbillon en basses couches et un autre en altitude. L'inversion du tourbillon potentiel donne un moyen d'attribuer les champs météorologiques (vent et température) à chacun de ces tourbillons, et d'étudier leurs interactions. Les résultats dépendent de la technique utilisée pour extraire ces tourbillons. La nouvelle méthode d'extraction objective basée sur les ondelettes donne une structure qui est plus cohérente dans le temps que la technique plus classique et subjective qui consiste à extraire un monopole.

Si on extrait une anomalie à un instant initial, on peut prévoir son évolution par différence entre la simulation avec l'anomalie et la simulation sans anomalie initialement. On obtient ainsi une anomalie prévue. Au même instant final de la prévision, on peut extraire l'anomalie dans le champ prévu. Si on suppose que l'anomalie n'interagit qu'avec son environnement, on s'attend alors à ce que ces deux anomalies soient ressemblantes. Ce critère permet d'évaluer la qualité de l'extraction. Sur la figure jointe, on voit qu'avec la méthode ondelette, l'anomalie prévue et l'anomalie extraite dans le champ prévu sont assez proches, ce qui n'est pas le cas avec l'extraction monopolaire, dont l'évolution par le modèle crée davantage de dispersion. Cette propriété rend l'extraction en ondelettes préférable pour l'étude des interactions à l'œuvre dans la formation des tempêtes et pour ses applications numériques. 3

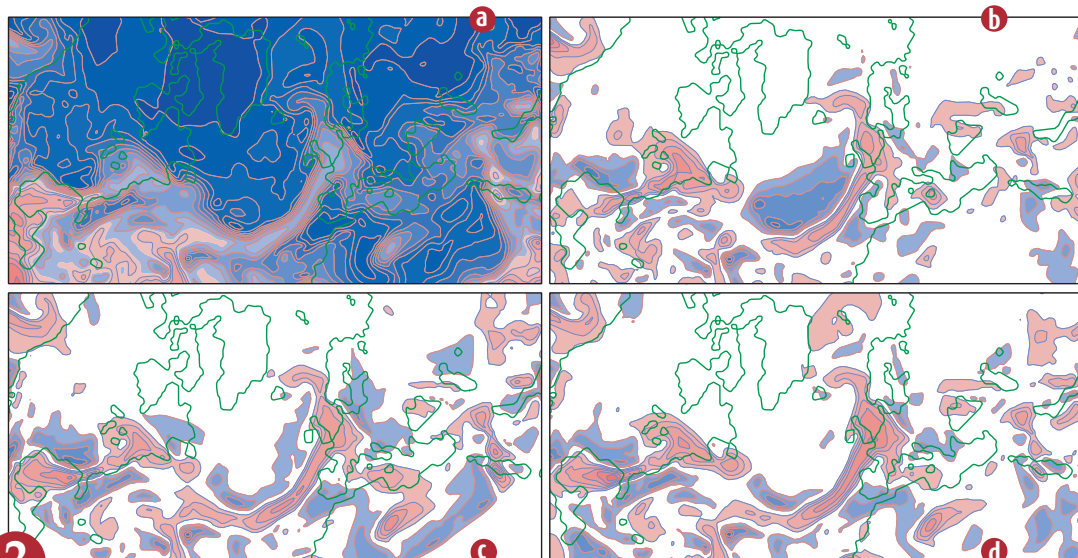
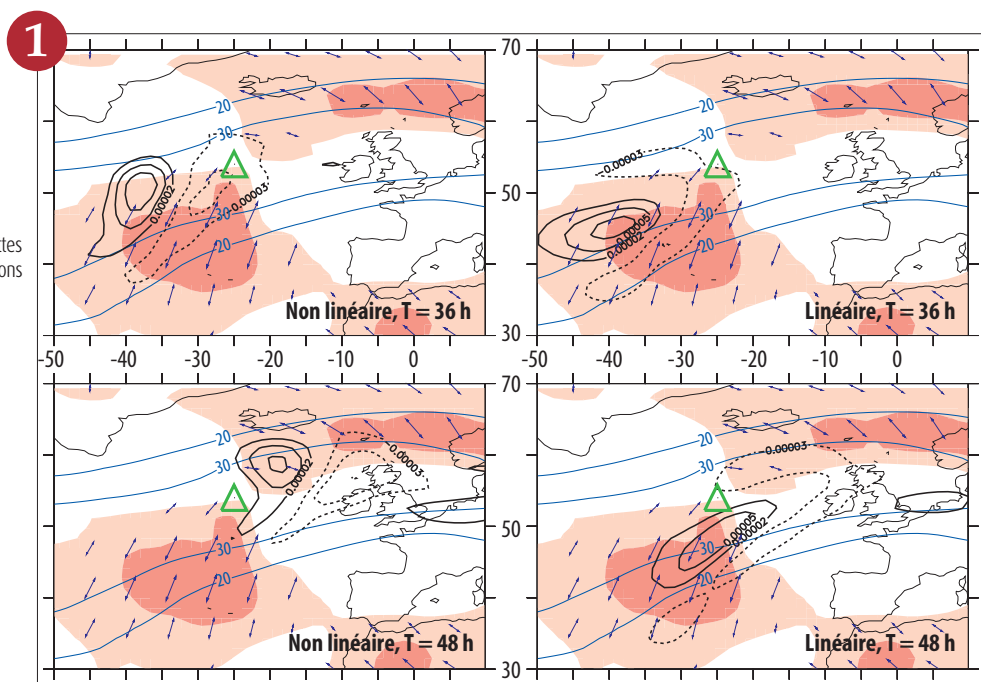
Recherche d'une méthode de définition objective d'anomalies d'humidité

Aux échelles synoptiques, les dépressions peuvent être décrites à l'aide du champ de tourbillon potentiel, résumant leur dynamique, et d'un champ quantifiant la présence de vapeur d'eau en leur sein. Tandis que l'humidité est classiquement considérée comme simple modulateur des mécanismes de croissance des dépressions Atlantiques, l'action de l'eau - plus précisément ses changements de phase - sur les dépressions méditerranéennes, semble nettement plus central. Une description visant à donner les éléments nécessaires à la compréhension de l'évolution de ces éléments synoptiques doit donc inclure une information sur l'humidité.

Une méthode, basée sur la décomposition sur une base orthogonale d'ondelettes, a récemment été développée au CNRM pour extraire des anomalies basses de tropopause. Déterminer l'ensemble des anomalies pré-

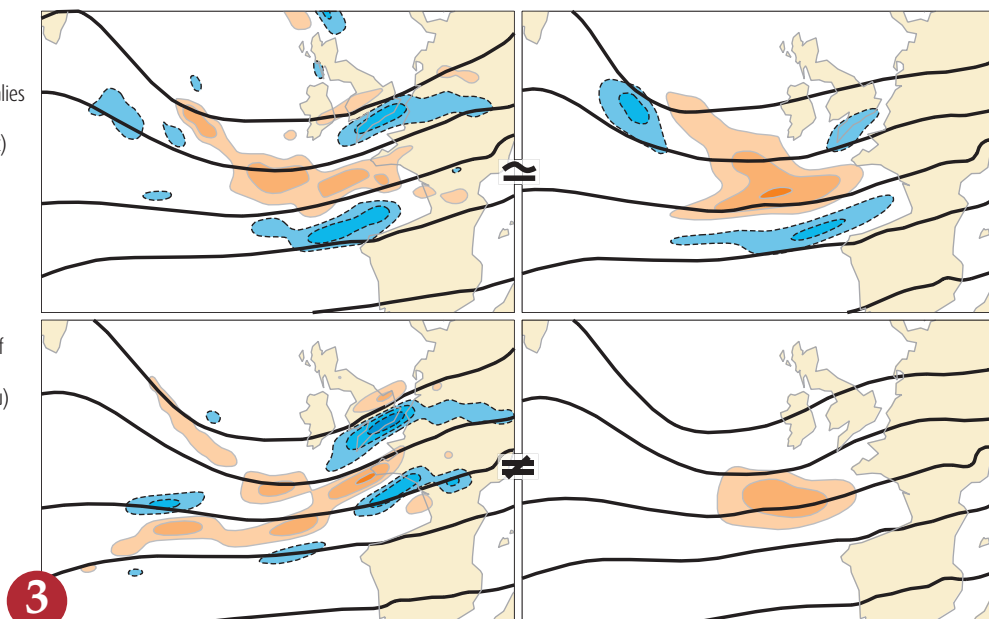
sentes dans un champ requiert deux étapes : tout d'abord, il est nécessaire d'isoler l'environnement de grande échelle de l'ensemble des anomalies, qui sont quant à elles principalement de petite échelle, chacune d'entre elles devant ensuite être isolée des autres. Le travail a porté sur la première étape et a consisté à étendre et adapter la méthode existante aux champs humides : humidité spécifique, humidité relative ou bien grandeurs dérivées diverses. Un processus itératif a été mis en œuvre permettant de limiter les hypothèses sur les propriétés des anomalies, valables pour le tourbillon potentiel d'altitude mais non vérifiées par les champs humides, conduisant à adjoindre une petite part de modes de grande échelle au champ de petite échelle pour former le champ d'anomalies. L'étape suivante consistera à utiliser ce champ pour définir des anomalies individuelles. 2

► Évolutions non linéaire (à gauche) et linéaire (à droite) d'une perturbation d'échelle synoptique se déplaçant le long d'un courant-jet présentant un point remarquable autour de 25° W, 54° N et représenté par le triangle vert. Les vignettes du haut et du bas correspondent aux situations après 36 h et 48 h de simulation respectivement. En bleu, le module de vent associé au courant-jet (intervalle : 10 m/s pour valeurs supérieures à 20 m/s). Les plages roses situent les régions de forte déformation effective (intervalle: $5 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-2}$) et les flèches bleues à double sens sont les axes de dilatation. Le tourbillon de la perturbation est représenté par les isolignes noires en traits gras (intervalle : $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) ; les traits tiretés et continus correspondent aux valeurs négatives et positives respectivement.



◀ Différentes décompositions du champ d'humidité spécifique à 850 hPa, le 1^{er} décembre 2001 à 00 h TU, intervalle de tracé : 1 g/kg.
 (a) : champ total (plages bleues (resp. rouges) : valeurs inférieures (resp. supérieures) à 10 g/kg) ;
 (b) : composante de haute fréquence temporelle, fréquence de coupure 8 jours (plages bleues : valeurs inférieures à -1g/kg, plages rouges : valeurs supérieures à 1g/kg) ;
 (c) : composante de petite échelle, décomposition en ondelettes (mêmes conventions qu'en b) ;
 (d) ensemble des anomalies extraites avec l'algorithme étendu complet (mêmes conventions qu'en b).

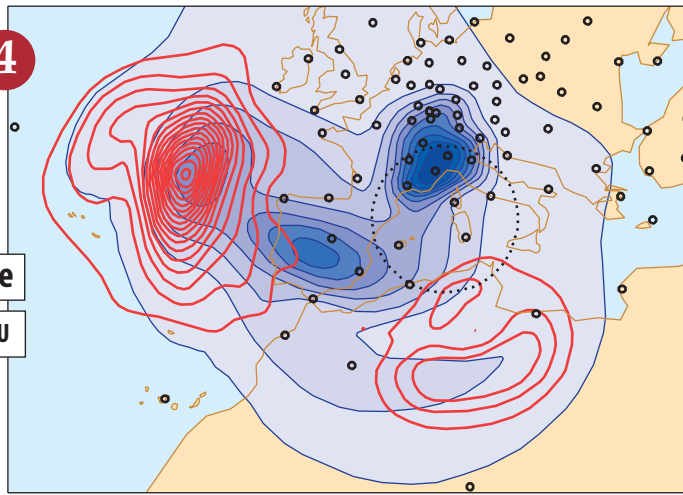
► Illustration de la cohérence entre les anomalies prévues (à gauche) et les anomalies extraites au même instant (à droite) pour la méthode d'extraction en ondelettes (haut) et pour une extraction monopolaire (bas). On voit ici le tourbillon d'altitude associé à la tempête du 27 décembre 1999. Les extractions initiales sont faites sur les champs du 27 à 06 h UTC, la prévision dure 6 heures et les extractions finales sont effectuées le 27 à 12 h UTC. Les champs montrés sont le tourbillon relatif à 350 hPa (intervalle $5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, positif en plage d'orangé, négatif en plage de bleu) de l'anomalie, et le géopotentiel à 350 hPa (intervalle 20 damgp, trait gras) de son environnement. Avec la méthode en ondelettes, l'anomalie préserve mieux sa cohérence qu'avec l'extraction d'un monopole.



4

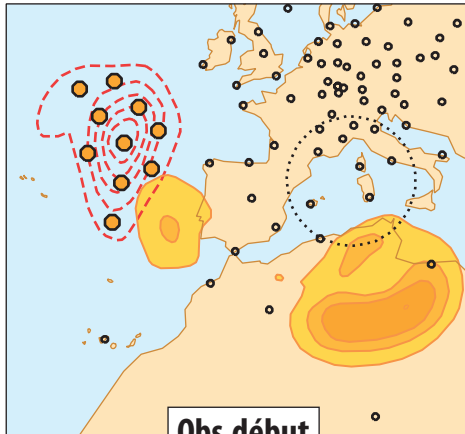
Routine

20 juin 2007 à 21 h TU



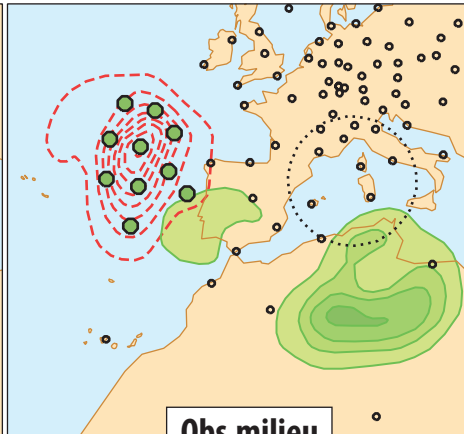
◀ Carte du haut.

En bleu : zones de besoin calculées pour le cas du 21 juin 2007 à 00 h TU tenant compte à la fois de la sensibilité de la prévision et de l'incertitude sur l'ébauche. En rouge : le besoin tient compte en plus de l'analyse des radiosondages de routine. Ces zones sont valides 15 heures avant l'événement (prévision pour le 21 juin à 12 h TU dans la région cernée en pointillés).



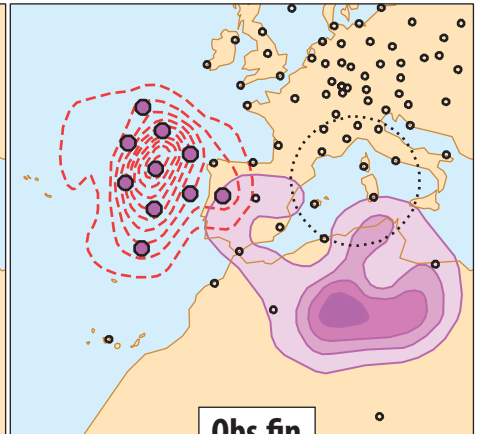
Obs.début

20 juin 2007 à 21 h TU



Obs.milieu

21 juin 2007 à 00 h TU

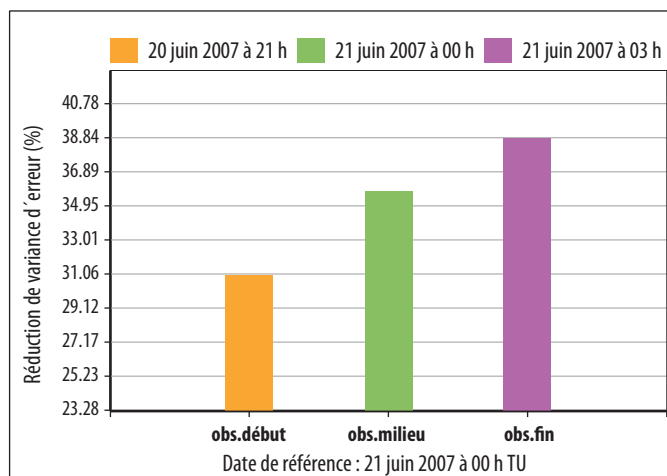


Obs.fin

21 juin 2007 à 03 h TU

► Histogramme.

Prévision de la réduction de variance d'erreur de la fonction prévue (sur laquelle ont été effectués les calculs de sensibilité) due à l'ajout des radiosondages (RS) additionnels (en pourcentage de la réduction amenée par le réseau de routine, contre l'ébauche). Les déploiements sont représentés sur les cartes du bas. Ils correspondent à un décalage temporel du déploiement dans la fenêtre d'assimilation, comme indiqué sur la légende de l'histogramme (milieu et fin, respectivement).



▲ Cartes du bas.

Zones de besoin résiduel résultant de l'assimilation du réseau étendu : RS de routine plus RS additionnels, pointés en orange, vert ou rose, et notés obs.début, obs.milieu ou obs.fin (comme sur l'histogramme). La date donne l'instant de validité. Les tirets rouges montrent la réduction de l'incertitude due aux nouvelles observations par rapport à la carte du haut.

De la prévision du bénéfice d'une observation météorologique bien placée

L'observation adaptative consiste en l'ajout d'observations dans des zones sensibles calculées pour améliorer (localement) une prévision. Des techniques linéaires (basées sur le calcul adjoint) ont été conçues pour étudier la sensibilité des prévisions numériques à leurs conditions initiales (soit l'analyse, soit les observations impliquées dans le calcul de cette analyse).

La KFS (*Kalman Filter Sensitivity*) est un outil quantitatif capable de comparer les bénéfices espérés pour diverses simulations d'un réseau d'observation additionnel et adaptatif. Ce bénéfice se mesure comme

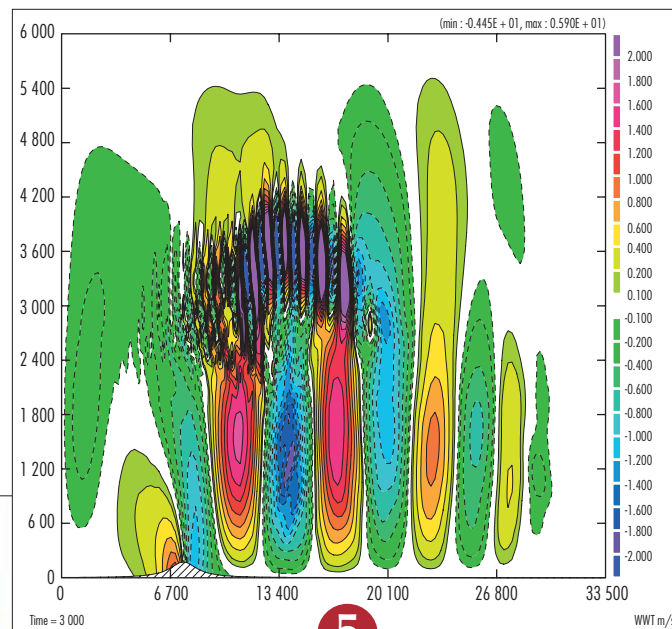
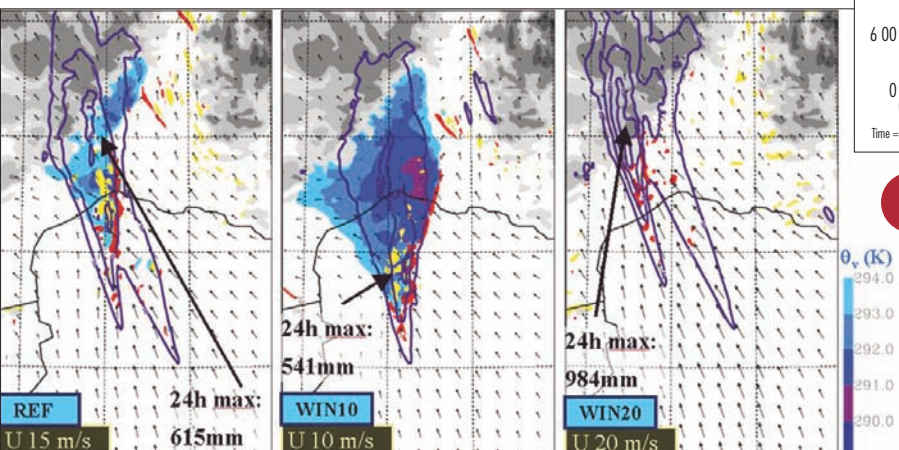
une réduction de la variance d'erreur (sur une fonction locale) de la prévision. Cette méthode utilise une estimation de l'incertitude résidant dans l'analyse initiale. On peut utiliser des résultats intermédiaires du calcul de la KFS pour constituer des cartes utiles à la définition des déploiements.

Dans le cadre du projet Cyprim, les aspects de grande échelle des cas méditerranéens représentatifs de situations à fortes précipitations ont été étudiés. La figure montre le bénéfice espéré de trois déploiements (de dix sondages simulés chacun, sur l'histogramme). Elle indique les zones dites de

besoin où l'ajout d'observations est susceptible d'être bénéfique à la qualité de la prévision pour une région et à une échéance pré-déterminées. Il s'agit d'un cas de juin 2007, n'utilisant que les messages Temp (radiosondages). Les trois réseaux adaptatifs comparés sont géométriquement proches, ils diffèrent surtout par l'heure du déploiement, en début, milieu et fin de fenêtre d'assimilation. Le réseau tardif est le plus prometteur, en accord avec le comportement connu des observations dans une fenêtre de 4D-Var.

4

Coupe verticale de vitesse verticale (en m.s⁻¹) après 3 000 s d'intégration temporelle pour des ondes orographiques piégées, induites par la colline dans un flux circulant d'ouest en est. À gauche avec les schémas d'advection précédents, à droite avec les nouveaux schémas.



6

◀ Sensibilité à l'intensité du flux de basses couches :
plage froide sous orage (température potentielle virtuelle en plage colorée, K),
précipitations cumulées en 24 h (lignes violettes : 50, 250, 500 et 750 mm, indication du maximum), zones d'ascendances
(en rouge, > 1 m/s) et subsidences (en jaune, < -0.5 m/s), vent à 10 m
(flèches noires, m/s) après 48 heures pour l'expérience de référence (REF) et pour les expériences avec un jet plus lent (WIN10) ou plus rapide (WIN20). Le relief est représenté en échelle de gris, à partir de 500 m.

Phénomène de méso-échelle

Un nouveau schéma d'advection pour Méso-NH

Méso-NH est un modèle de recherche dédié à la simulation des cas académiques ou réels à méso-échelle, pour des résolutions variant de 50 km à 10 m (en mode LES). Il utilisait jusqu'alors des algorithmes de transport standard eulériens, associés à un schéma temporel de type « saute-mouton ». L'inconvénient majeur était une limitation sévère du pas de

temps afin de garantir une bonne précision des résultats. Il était donc devenu nécessaire d'augmenter le pas de temps et d'améliorer la qualité du schéma d'advection.

Un nouveau schéma d'advection eulérien a été implémenté avec succès pour les variables scalaires, associé à un schéma temporel à 2 pas de temps pour les termes d'advec-

tion, et à un schéma d'advection du quatrième ordre. L'impact est très positif sur la précision et la stabilité des simulations (figure 5). Mais l'augmentation du pas de temps devrait être plus significative quand le schéma temporel du type « saute-mouton » évoluera vers un nouveau schéma temporel pour l'ensemble du modèle.

5

Modélisation idéalisée de systèmes convectifs quasi-stationnaires

Le Sud-Est de la France est souvent soumis à d'intenses pluies dues à des systèmes convectifs de méso-échelle quasi-stationnaires. Un cadre de simulations idéalisées de ces systèmes a été mis en place en 2007 pour mieux comprendre l'impact des conditions de basses couches sur la localisation et l'intensité des systèmes.

Ces simulations sont réalisées à l'aide du modèle de recherche Méso-NH dans la configuration d'un écoulement instable et humide idéalisé, mais en utilisant la topographie réelle. Ainsi, on impose un jet de basses couches instable orienté vers les Cévennes.

La simulation de référence parvient à simuler un système convectif quasi-stationnaire. Les précipitations s'étendent de la mer jusqu'au Massif central. L'évaporation d'une partie des précipitations induit la formation d'une plage froide sous le système. Le jet de basses couches vient buter sur le bord d'attaque de cette plage froide, les ascendances induites déclenchent de nouvelles cellules convectives. Des variations des caractéristiques (humidité, force du vent, instabilité) de l'écoulement de basses couches au-dessus de la mer Méditerranée ont été étudiées. La figure 6 montre la sensibilité à la force du vent : plus le flux est lent, plus le système est situé en

amont. De même, plus l'environnement est sec ou plus le flux est instable, plus la localisation du système est en amont du relief des Cévennes, sur la mer. Différents mécanismes d'ascendance entrent en compétition pour expliquer la position spécifique des systèmes (forçage orographique, plage froide, convergence de basses couches due au relief).

Cette exploration de la prévisibilité associée à ces systèmes dans ce cadre idéalisé va être poursuivie en étendant l'éventail de conditions de basses couches testées ; l'impact des reliefs et de la mer Méditerranée sera également évalué.

6

Le programme Ecoclimap-II : une nouvelle classification des surfaces pour l'Europe

Le programme Ecoclimap est constitué à la fois d'une carte d'occupation des sols et d'une base de données de paramètres de surface dérivée de la classification à partir de tables de correspondance.

Une nouvelle classification de la végétation en zones thématiquement et fonctionnellement homogènes a été réalisée pour l'Europe. Les classifications initiales sont Corine2000 à 100 m pour l'essentiel du domaine et GLC2000 à 1 km (Global Land Cover 2000, un an de données Spot/Vegetation) pour le reste du domaine. Elles ont été éclatées sur la base d'une classification automatique portant sur sept ans (1999 à 2005) de données de l'indice de végétation Spot/Vegetation sans tenir compte cette fois du zonage climatique. Cela a conduit à 273 classes. Les critères tiennent compte de facteurs indépendants du couvert végétal tels le climat ou les modes d'agricul-

ture mis en œuvre au niveau régional. Une validation indépendante a porté sur les données statistiques des pratiques agraires sur la France.

Les classes sont désagrégées en une ou plusieurs fractions de types de végétation d'Isba. Ce travail s'appuie dans la nouvelle version sur la recherche de pixels purs à 1 km de type de végétation. La variable pour la désagrégation est l'indice foliaire qui est moins contaminé par l'effet de sol que l'indice de végétation. L'indice foliaire et l'albédo sont les variables les plus pertinentes d'Ecoclimap. Dans la nouvelle version, elles sont déduites de la combinaison des produits à 1 km Modis et Vegetation (projet européen Cyclopes).

La poursuite de ce travail est la réalisation de cas tests dans Surfex afin d'évaluer l'impact de la nouvelle base de données Ecoclimap. 7

Modélisation du cycle du carbone continental

Une nouvelle option du modèle de surface continentale du CNRM, Isba (Interactions entre le Sol-Biosphère-Atmosphère) a été développée pour représenter la composante continentale du cycle du carbone. Le nouveau modèle, Isba-CC (Cycle du Carbone), représente les principaux flux de carbone échangés entre la surface continentale et l'atmosphère (photosynthèse, respiration autotrophe, et respiration hétérotrophe), ainsi que les réservoirs et les flux de carbone dans la plante et dans le sol.

Le modèle a été validé sur 26 sites du réseau Fluxnet des moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère nord, qui fournissent des mesures des flux d'énergie, d'eau et de carbone. Le modèle reproduit bien les principales caractéristiques des cycles diurnes et saisonniers moyens, ainsi que celles de la variabilité intra-saisonnière et inter-annuelle. Il se compare aussi favorablement aux autres modèles de carbone continental, notamment au modèle Orchidee de l'IPSL.

Le modèle Isba-CC sera prochainement couplé au modèle de circulation générale du CNRM, Arpege-Climat, avec les autres composantes du cycle du carbone, afin de simuler les rétroactions entre le cycle du carbone et le climat. 9

Variation régionale du dioxyde de carbone : le projet Carboeurope régional

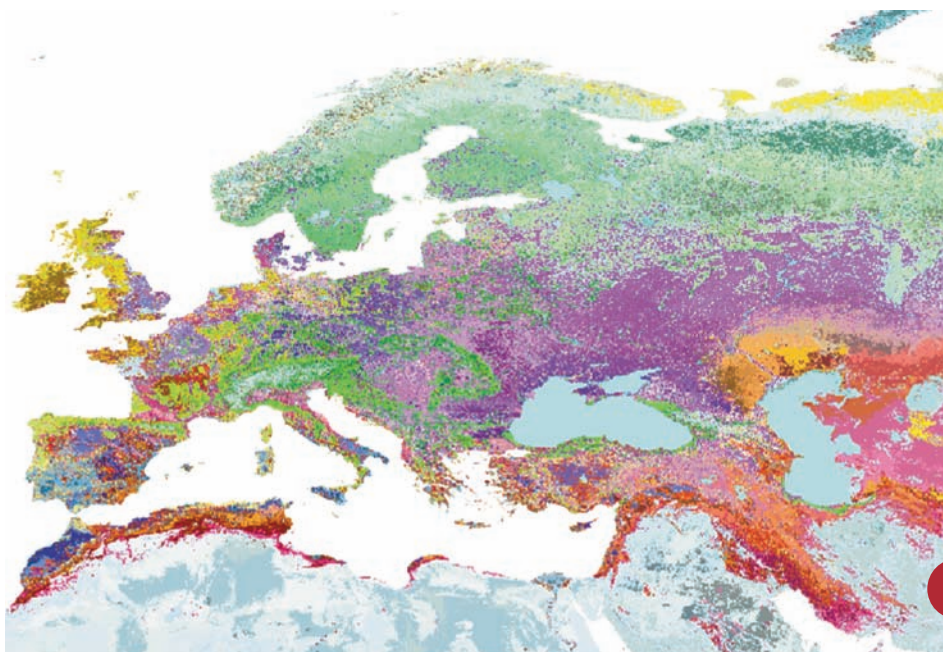
Le projet européen Carboeurope régional permet de développer une campagne d'observations et des modèles capables de mettre en évidence et d'expliquer les variations régionales du gaz carbonique dans le Sud-Ouest de la France.

Une partie de l'activité annuelle a été consacrée à l'interprétation numérique des données expérimentales collectées lors de la campagne Ceres conduite en mai et juin 2005. Plusieurs modèles atmosphériques de méso-échelles capables de représenter le cycle diurne du CO₂ et son couplage avec les échanges de carbone à la surface ont été évalués finement sur plusieurs types de données : flux de CO₂ sur un ensemble de type de végétation, radiosondage au centre de la forêt des Landes, mesures aéroportées (Piper Aztec) du CO₂ dans la couche limite atmo-

sphérique. La figure 8 présente un exemple de résultats montrant que les 5 modèles atmosphériques (dont Méso-NH) reproduisent correctement l'assimilation du CO₂ par les cultures de blé (a) mais que les variations spatiales du CO₂ dans les basses couches atmosphériques sont beaucoup moins bien représentées (c) en réponse à une trop grande dispersion des couches limites simulées, comme le montre la comparaison au radiosondage (b).

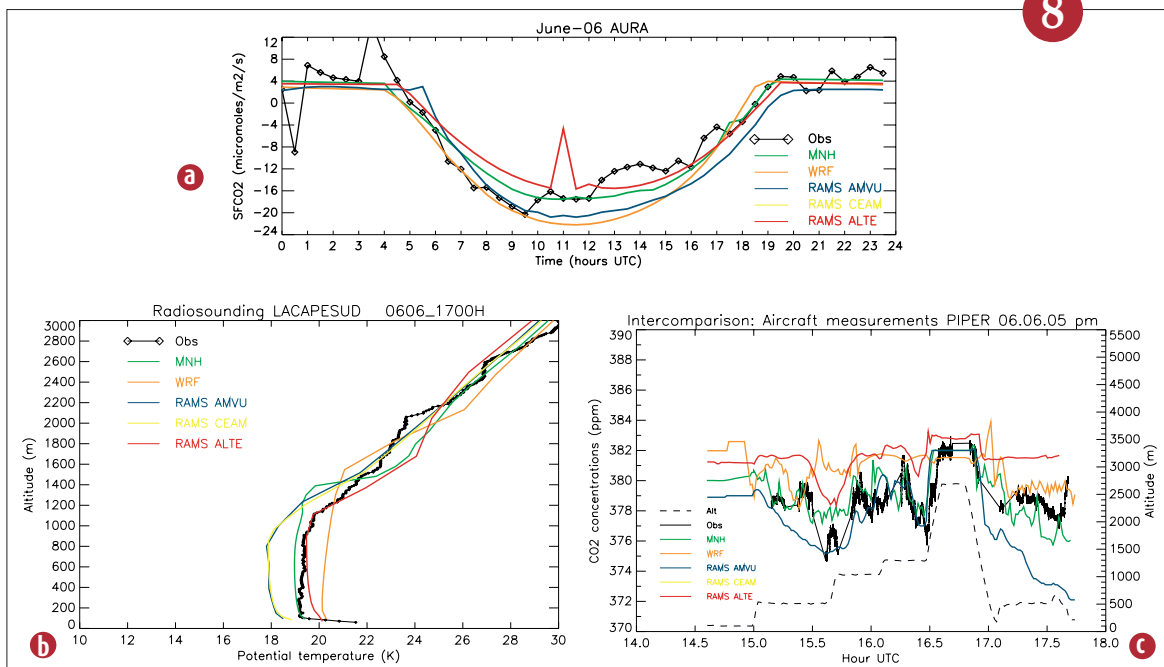
Deux nouvelles campagnes expérimentales ont été conduites en avril et septembre 2007 pour étudier le rôle des interactions surface-atmosphère sur le cycle du carbone pour des états de développement de cultures très contrastés ainsi que pour une large gamme de conditions météorologiques. 8

► Cartes d'occupation
Ecoclimate-II
sur l'Europe
avec 273 classes.



7

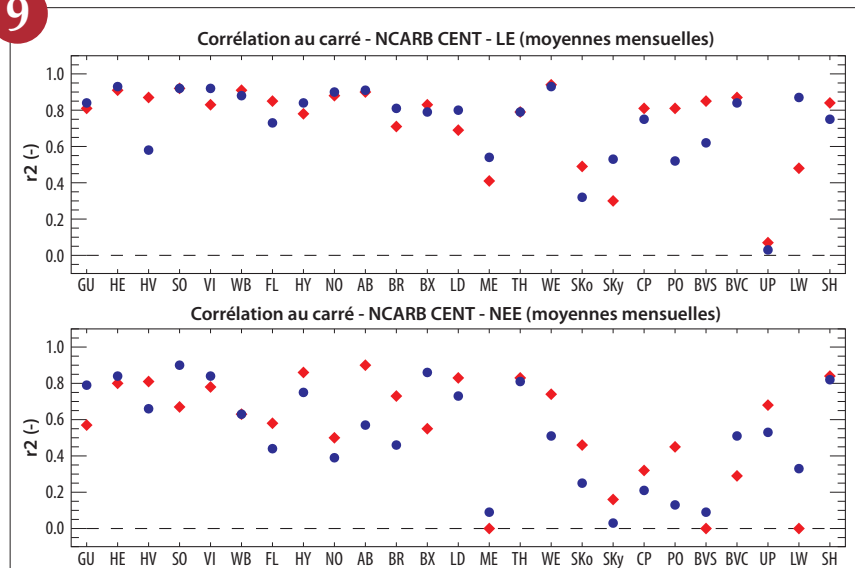
► Inter-comparaison
de cinq modèles
atmosphériques de méso-
échelle pour simuler
le cycle diurne du CO_2
observé lors du cas
du 6 juin de la campagne
Ceres 2005
(Sarrat et al. 2007) :
(a) comparaison des flux
d'assimilation observé et
simulés sur la parcelle de blé
d'Auradé ;
(b) comparaison du profil
vertical de température
potentielle observé
à la Cape-Sud (Landes)
et simulés ;
(c) comparaison du CO_2
atmosphérique observé
par le Piper Aztec
à différents niveaux dans
la Couche Limite et simulé
par les cinq modèles le long
de la trajectoire avion
(pointillés).

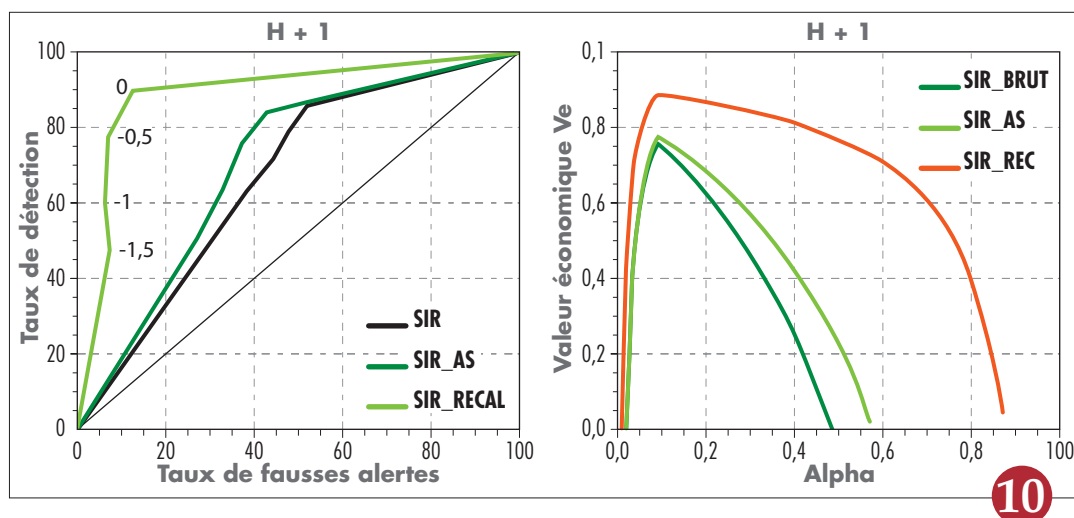


8

9

Corrélation au carré entre les séries
de moyennes mensuelles observées
et simulées par Isba-CC (cercles bleus)
et Orchidee (losanges rouges) du flux
de chaleur latente (LE en haut)
et du flux net de carbone (NEE en bas)
pour 26 sites du réseau Fluxnet.





◀ Diagrammes pseudo-Roc (à gauche) et de rapport coût/perte (à droite) tracés pour l'échéance H+1 et à chaque étape de traitement statistique : modèle brut (SIR_BRUT), modèle débiaisé (SIR_AS) et modèle recalé, après le débiaisage, (SIR_REC). Pour le seuil de 0 °C, obtention pour le modèle SIR_REC d'un taux de détection de 90 %, d'un taux de fausse alarme de 10 % et d'un fort intérêt économique pour des rapports coût/perte faibles.

Évaluation du modèle de température de chaussée mis en place pour Aéroports de Paris

La mise en place d'un modèle de prévision de température de chaussée sur l'aéroport Paris-CDG résulte d'une collaboration entre le Bureau d'études de la Diric et ADP.

La prévision est basée sur le modèle physique SIR (Safran-Isba-Route) qui, à partir de la connaissance des prévisions atmosphériques sur le domaine étudié, simule des bilans d'énergie et hydrique sur une surface constituée de différentes couches associées à des matériaux et des profondeurs propres. Le modèle SIR a été adapté à Paris-CDG de telle sorte qu'il prenne en compte les prévisions locales de nébulosité et les observations in-situ par des méthodes de débiaisage et de recalage. Une évaluation pré-opérationnelle du modèle a ensuite été menée en temps réel sur l'hiver 2006-2007.

L'évaluation statistique classique a conclu à un biais du modèle quasiment nul, avec par ailleurs un Écart Quadratique Moyen inférieur à 1 °C jusqu'à la 6^e échéance. En outre, de

manière plus novatrice, une évaluation économique du modèle a été réalisée afin d'estimer l'intérêt pour l'exploitant d'utiliser un tel modèle pour la prévision du risque de gel, plutôt que de se fier à des normales climatologiques. Cette analyse est basée d'une part sur des estimations de taux de détection et de fausse alarme d'occurrence de température de chaussée négative et d'autre part, sur la valeur économique qui est une fonction du rapport coût/perte de l'exploitant. Cette notion permet de situer le modèle par rapport à l'intérêt de la climatologie et à celui d'un modèle parfait.

Les résultats obtenus montrent tout l'intérêt d'utilisation du modèle pour les 6 premières échéances. Au-delà, les résultats sont plus contrastés et font entrevoir de nouvelles pistes d'investigation pour améliorer les performances du modèle pour une utilisation opérationnelle. 10

Mesures tri-dimensionnelles de la turbulence en milieu stablement stratifié

La turbulence atmosphérique est souvent soumise aux effets des forces de flottabilité dues à une stratification stable. Bien que ces effets soient globalement stabilisants, la structure et la dynamique résultantes ne sont encore que partiellement élucidées du fait de la complexité des phénomènes et de la difficulté d'accès aux régimes pleinement turbulents par modélisation numérique directe ou par simulation en laboratoire.

En effet, dans ce domaine en particulier, les effets de viscosité se font ressentir assez rapidement. Dans les expériences de laboratoire (souffleries, canaux hydrauliques), la mesure des vitesses turbulentes par des méthodes optiques non-intrusives qui donnent depuis plusieurs années accès à des champs de vitesse bi-dimensionnels bien résolus en espace et aussi en temps, n'est plus viable justement dans les régimes d'intérêt du fait des variations d'indice optique liées à la stratification en densité (un problème similaire se pose pour les télescopes terrestres).

Un autre défi à surmonter est l'accès à des mesures de champ de vitesse tridimensionnel pour mieux décrire la dynamique où l'anisotropie de la turbulence est croissante. Ceci permet aussi une évaluation de la dispersion lagrangienne, importante pour modéliser la dispersion de gaz polluants.

Avec ces objectifs, une nouvelle technique, en collaboration avec l'IMFT (Toulouse) et des chercheurs aux États-Unis, a donc été mise au point cette année dans un canal hydraulique du CNRM. Elle permet d'éliminer simultanément les problèmes optiques et d'effectuer des mesures tri-dimensionnelles avec un suivi temporel. Un exemple de cette technique par imagerie rapide tridimensionnelle de particules d'un champ tri-dimensionnel de vitesse à trois composantes, obtenue dans un régime encore fortement tridimensionnel et turbulent, est montré dans la figure 12. 12

Étude à échelle fine des renverses de vent sur Nice

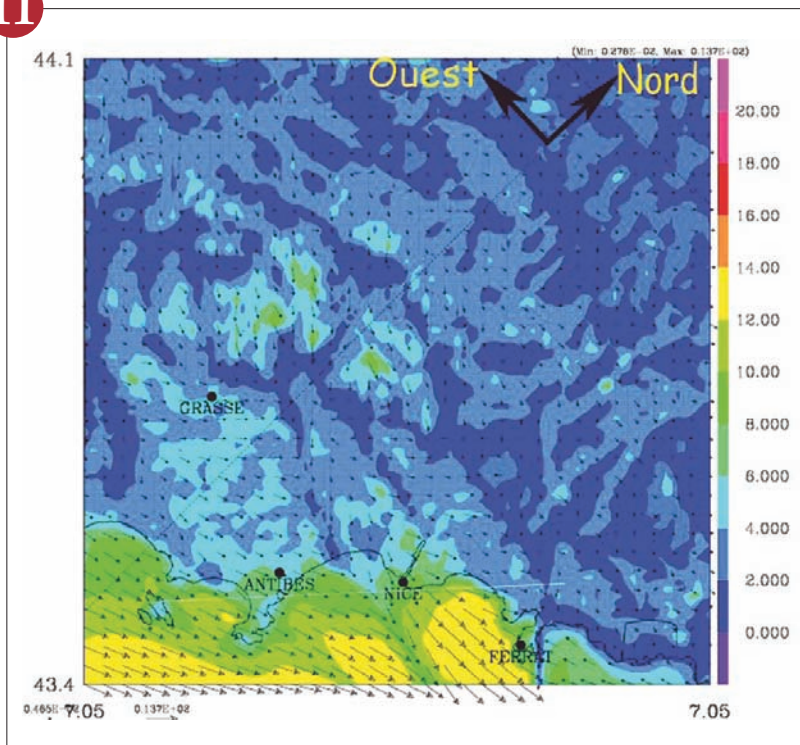
Dans certaines situations météorologiques, sur la piste de l'aérodrome de Nice, on observe une bascule soudaine du vent, du secteur ouest au secteur est, ou inversement. Ce phénomène perturbe fortement le fonctionnement du trafic aérien en approche de la plate-forme aéroportuaire et provoque des turbulences dangereuses pour les avions.

Une première étude a utilisé le modèle de recherche de méso-échelle Méso-NH, dans une version à maille 500 mètres, sur une journée représentative de ce phénomène de renverse. En comparant la structure verticale du vent simulé et les diverses observations disponibles (profilier basses couches, sondages avion), on constate que Méso-NH parvient à représenter un phénomène assez comparable à celui qu'il faudrait prévoir, mais pas au bon endroit (vent d'est précédent la bascule décalé d'une ving-

taine de kilomètres) et selon un schéma temporel erroné (quatre heures d'avance sur Nice). Un prototype du modèle Arome, qui deviendra opérationnel fin 2008, a aussi été évalué, sur neuf situations globalement similaires sur la région niçoise et entraînant ou non des renverses de vent sur l'aéroport. Dans la majorité des cas traités, les zones de contact, en cas d'opposition des flux, sont réalistes. La localisation des renverses n'est pas toujours précise, mais on peut penser que le modèle Arome pourra souvent mettre le prévisionniste en vigilance par rapport à une occurrence possible du phénomène et apporter un plus par rapport à Aladin, l'actuel modèle opérationnel.

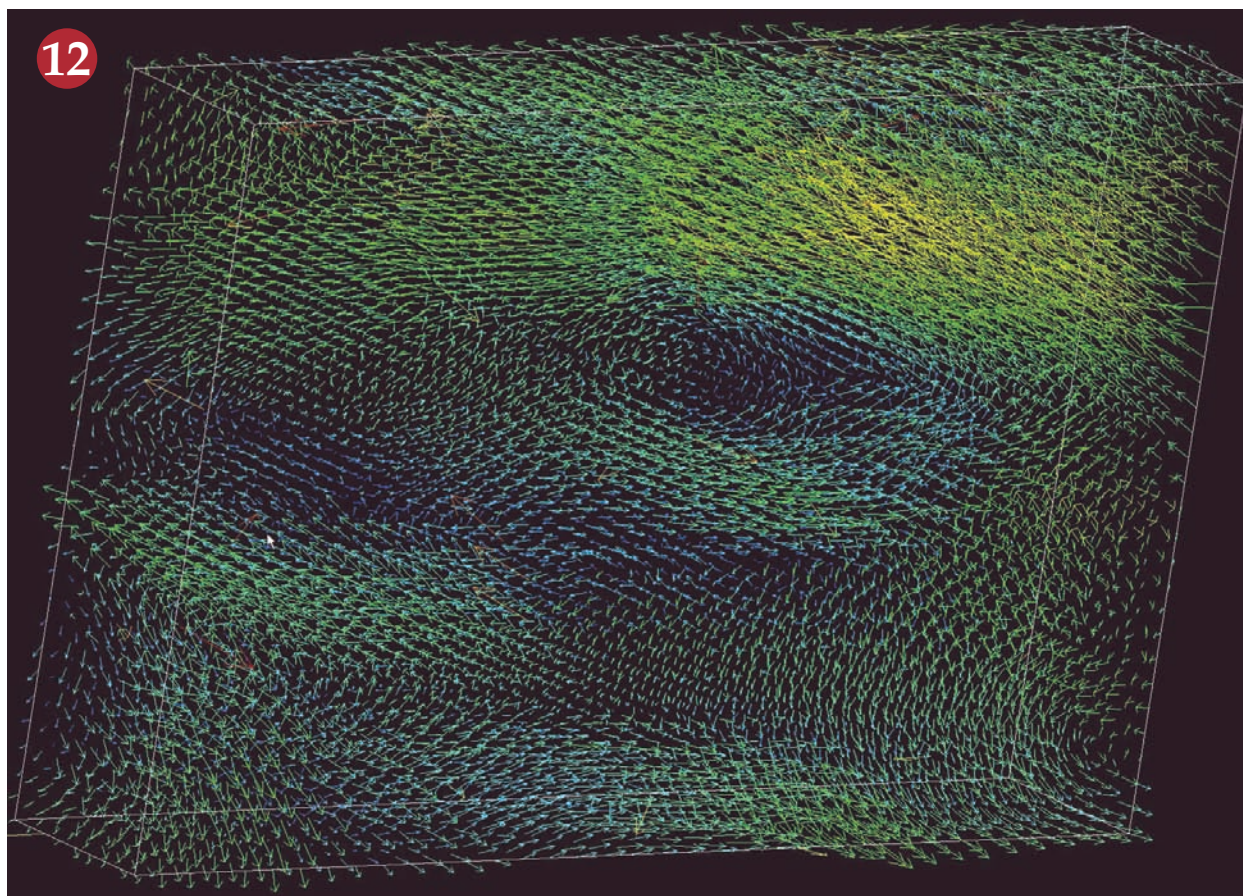
À sa mise en service, le modèle Arome bénéficiera d'une analyse spécifique des observations. On attend une amélioration sur la prévision des phénomènes de type renverse. 11

11



◀ Vent 10 mètres simulé par Mésio-NH le 12 mars 2005 à 13 h 30 UTC (force en m/s). Le front de renverse est réaliste, mais décalé dans l'espace et dans le temps.

12



▲ Un champ de vitesse mesuré dans un écoulement stratifié turbulent.

Étude du climat et du changement climatique

Pour le grand public et les médias, l'année 2007 a été marquée par la publication du IV^e rapport du Giec, occasionnant une large prise de conscience par les citoyens comme par les décideurs de l'ampleur des modifications climatiques en cours ou à venir. Pour

autant, les travaux scientifiques en la matière ne se sont pas interrompus, bien au contraire : il faut souligner particulièrement la poursuite des actions sur la régionalisation, les phénomènes extrêmes, les interactions entre climat tropical et extra-tropical...

Développement du modèle climatique couplé global du CNRM

Le IV^e rapport du Giec paru en 2007 s'est appuyé sur des simulations du climat de la planète réalisées par une vingtaine d'instituts scientifiques, dont le CNRM, qui a mis en œuvre son modèle CNRM-CM à cette occasion. Il s'agit d'un modèle climatique couplé par Oasis, représentant la circulation atmosphérique (Arpège-Climat), océanique (OPA), la glace de mer (Gelato) et l'écoulement des rivières (Trip). Ce système complexe est constamment amélioré et testé. Ainsi, au cours de l'année 2007, la période 1860-2000 a été simulée avec une version de CNRM-CM rendant mieux compte des échanges énergétiques entre l'océan et l'atmosphère, et de l'impact climatique des poussières sulfatées, dont l'effet sur le climat global est refroidissant, au contraire des gaz à effet de serre. D'autres simulations de la même période ont été réalisées, en prenant en compte les changements d'utilisation des sols, qui entraînent une modification de l'albédo et de la rugosité de la surface, modulant le climat aux échelles régionales. Plus récemment, l'effet des éruptions volcaniques a été introduit dans Arpège-Climat sous la forme de poussières dans la basse stratosphère, permettant de simuler l'épisode majeur du Pinatubo (1991) avec plus de réalisme. Cette version améliorée a été portée sur le nouveau calculateur de Météo-France, et permettra de réaliser début 2008 plusieurs simulations climatiques de type Giec dans le cadre du projet européen Ensembles. Au-delà, CNRM-CM sera complètement refondu à horizon 2009, de manière à intégrer les évolutions récentes de ses composantes. De nouveaux couplages avec le cycle du carbone, les calottes glaciaires et la chimie atmosphérique donneront plus de réalisme encore à cette planète virtuelle, pour mieux contribuer au prochain rapport du Giec. **1**

Indices de cyclogénèse tropicale dans les simulations de l'IPCC AR4

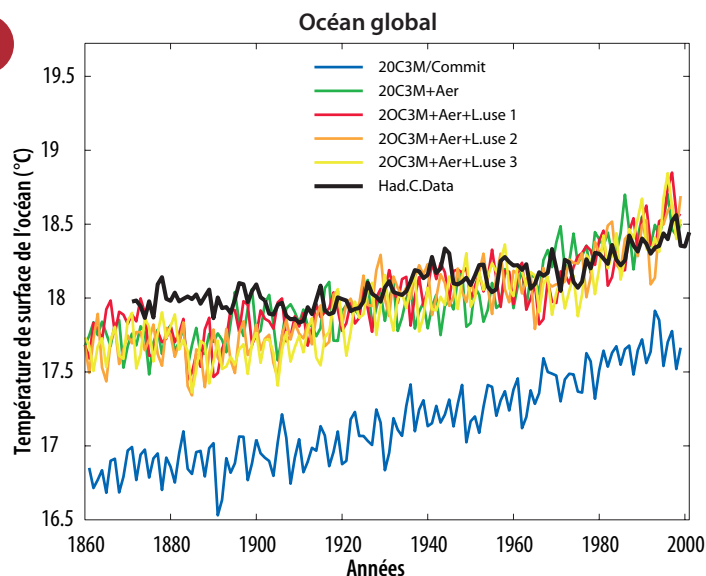
L'évolution future de l'activité cyclonique tropicale est une préoccupation majeure de la communauté scientifique, mais l'incertitude sur celle-ci est si forte que le IV^e rapport du Giec n'a pu que constater le manque de consensus sur le sujet. Depuis longtemps, des méthodes ont été développées pour mesurer la probabilité de formation des cyclones tropicaux dans les modèles de climat. L'une d'entre elles a été mise au point au CNRM, à partir d'indices existants largement répandus dans la communauté scientifique. Le raffinement apporté au CNRM consiste à se débarrasser du seuil de 26 °C pour la température de surface de la mer (TSM), dont la pertinence pour le climat présent disparaît dans le futur. Cet indice a été calculé pour une quinzaine des 19 scénarios A2 (parmi les plus sévères) réalisés dans le cadre du Giec. Les modèles reproduisent une distribution globale réaliste de l'indice, malgré des biais marqués. Lorsqu'on se projette dans le futur, les réponses sont très disparates entre les modèles, au point de rendre impossible de conclure sur le sens de la tendance. Cette forte dispersion des modèles se retrouve également dans la structure de l'anomalie globale de TSM obtenue dans les divers scénarios. Il faudra encore quelques années pour voir se dessiner une tendance fiable sur l'activité cyclonique. En 2008, au CNRM, de nouveaux jeux de simulations avec le modèle Arpège-Climat seront mis en œuvre. Ils seront forcés par les différentes anomalies de TSM obtenues dans les scénarios du Giec. L'idée sous-jacente est de mesurer la part des anomalies de TSM dans la dispersion des réponses. **2**

Influence du climat tropical sur le climat extra-tropical

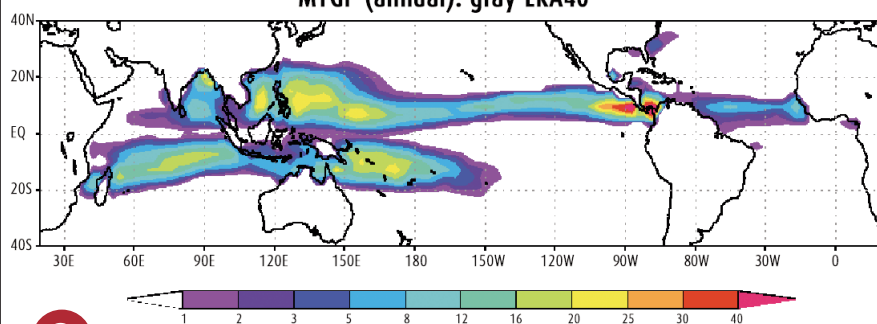
Le projet Ircaam (Influence réciproque des climats d'Afrique de l'Ouest, du sud de l'Asie et du Bassin méditerranéen), financé par l'Agence nationale de la recherche et coordonné par le CNRM, vise essentiellement à comprendre si et comment les modes inter-annuels et/ou intra-saisonniers de la variabilité atmosphérique tropicale exercent une influence sur le climat extra-tropical, en particulier sur l'Europe et le Bassin méditerranéen. Outre l'analyse statistique, il s'appuie sur une approche numérique originale consistant à forcer la dynamique tropicale dans le modèle atmosphérique global Arpège-Climat via un rappel tridimensionnel (baptisé « nudging ») vers les ré-analyses ERA40. Bien que très idéalisée, cette démarche n'est pas sans lien avec la prévision dynamique à longue échéance. Elle vise notamment à évaluer dans quelle mesure l'amélioration des prévisions sous les tropiques (où la persistance des anomalies de température de surface de la mer – TSM – est la plus importante) peut avoir des répercussions favorables sur les scores obtenus aux moyennes et hautes latitudes. Les premières études de cas réalisées sur la période allant de juin à septembre montrent des résultats encourageants (figure 3). Elles montrent que les anomalies inter-annuelles de circulation tropicales sont susceptibles de stimuler des ondes planétaires qui peuvent se propager vers les hautes latitudes et ainsi moduler de manière réaliste (c'est-à-dire en accord avec les analyses atmosphériques et les observations) la circulation extra-tropicale simulée par le modèle Arpège-Climat. **3**

1

► Température moyenne des océans. En noir : observations HadISST du UKMO/Hadley Center. En bleu : simulation réalisée pour le Giec en 2004, version CNRM-CM3.1. En vert, nouvelle version CNRM-CM3.2. En jaune, orange et rouge : ensemble réalisé avec le même modèle mais avec prise en compte des changements d'utilisation des sols.



MYGP (annual): gray ERA40



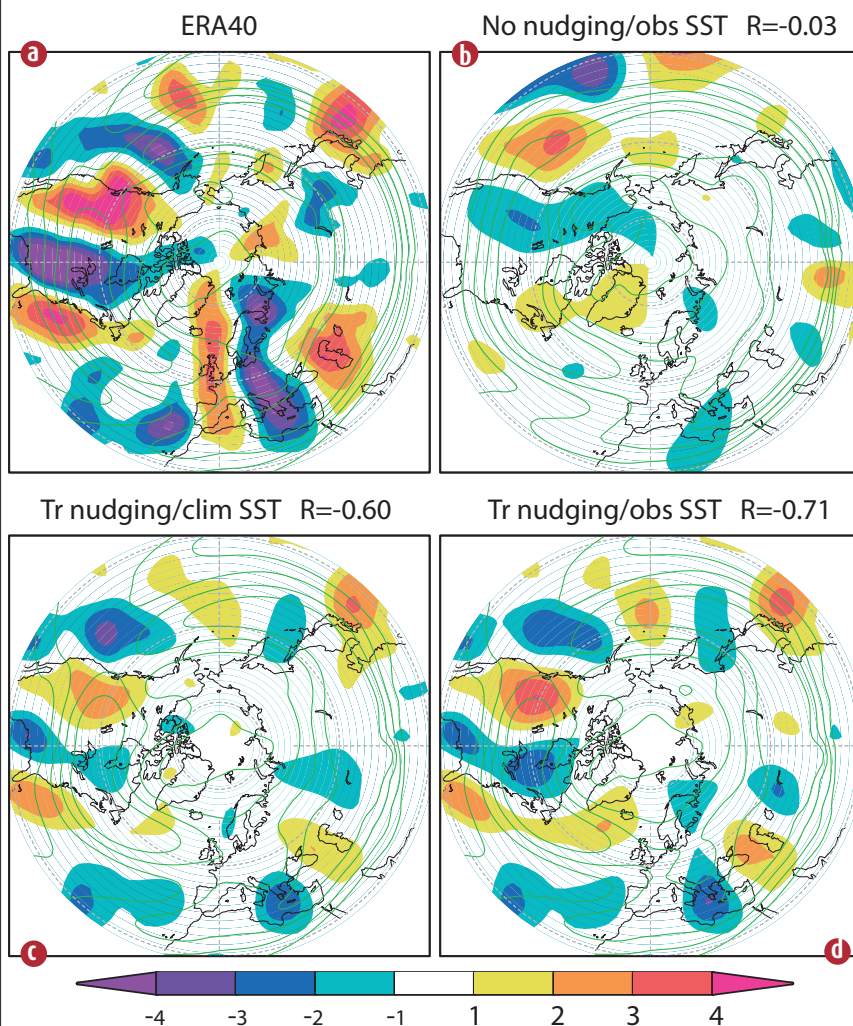
◀ Calcul de l'indice de probabilité de formation de cyclones pour la ré-analyse ERA40. Les unités sont exprimées en nombre de cyclones par 5° de longitude-latitude par vingt ans.

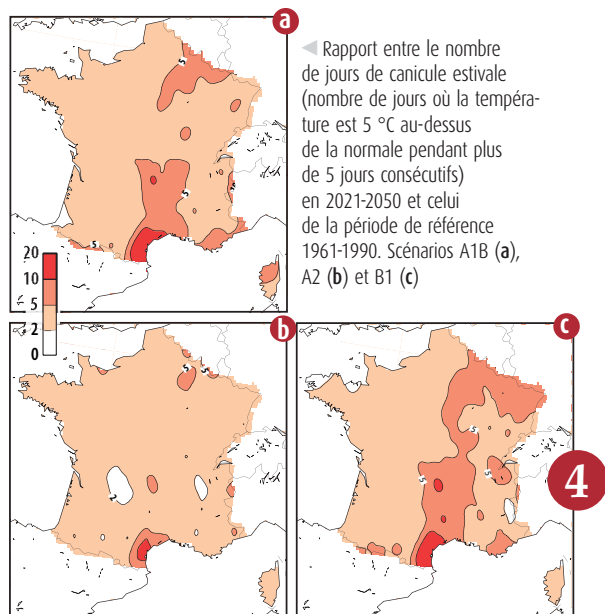
2

3

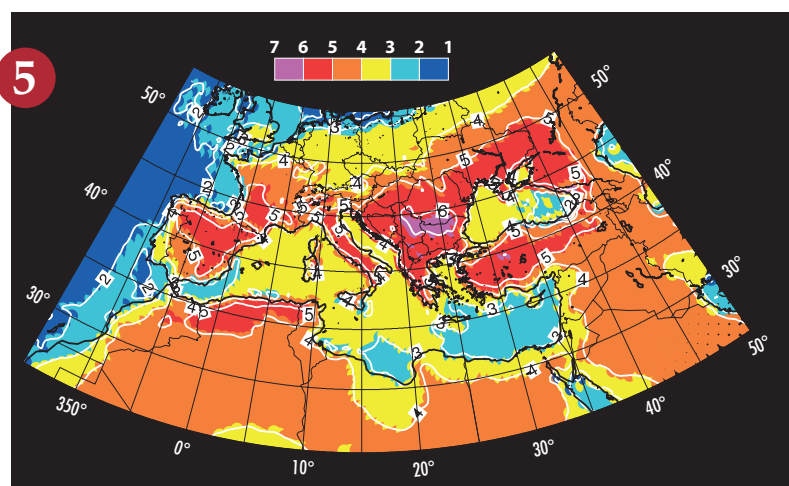
JJAS 1997-clim V200 (m/s)

► Anomalies de vent méridien à 200 hPa observées (a) et simulées (b, c et d) par Arpège-Climat sur la saison allant de juin à septembre 1997 (année Niña). Trois ensembles de 30 simulations sont comparés :
b) expérience de contrôle sans nudging et forcée par les TSM observées,
c) expérience nudgée sous les tropiques et forcée par les TSM climatologiques,
d) expérience nudgée sous les tropiques et forcée par les TSM observées. R est la corrélation spatiale entre anomalies observées et simulées au nord de 30° N. Les contours en vert montrent la climatologie 1971-2000 du vent zonal à 200 hPa (différente pour les simulations avec et sans nudging).





◀ Rapport entre le nombre de jours de canicule estivale (nombre de jours où la température est 5 °C au-dessus de la normale pendant plus de 5 jours consécutifs) en 2021-2050 et celui de la période de référence 1961-1990. Scénarios A1B (a), A2 (b) et B1 (c)



▲ a : carte du réchauffement en °C.
b : carte de la diminution des précipitations (en mm/j) pour la fin du XXI^e siècle (période 2070-2099 comparée à 1961-1990) en été (juin-juillet-août).

Les indices de phénomènes extrêmes sur la France dans les derniers scénarios régionaux 2021-2050

La production de simulations couplées océan-atmosphère à l'occasion du IV^e rapport du Giec a été l'occasion de réaliser une troisième vague de scénarios régionalisés pour la France métropolitaine. Après les simulations de doublement du gaz carbonique (fin des années 1990) et les scénarios A2 et B2 des projets GICC (début des années 2000), un nouveau jeu de trois scénarios A1B, A2 et B1 a été constitué ; ceux-ci s'adressent, et c'est une première, au possible devenir de notre planète durant la première moitié du XXI^e siècle. Pour les prochaines décennies, ce n'est pas tant le réchauffement moyen qui est redouté, mais l'évolution de la fréquence des phénomènes extrêmes. À partir de ces trois simulations à résolution 50 km sur

la France, la fréquence des canicules estivales (figure 4a) a été calculée ainsi que l'intensité des précipitations extrêmes et la durée des sécheresses pour la période 2021-2050. Malgré la diversité des réponses qui traduit la variabilité inter-annuelle imprévisible, se dégagent trois caractéristiques qui avaient été mises en évidence pour la fin du XXI^e siècle dans le projet Imfex : augmentation des canicules et des sécheresses, augmentation paradoxale (car les précipitations moyennes sont en recul) des précipitations supérieures à 20 mm/jour.

Les travaux sur ces données vont se poursuivre avec la mise à jour des résultats de l'impact sur les vents forts et sur l'hydrologie de surface.

4

Simulation du changement climatique de la zone Europe-Méditerranée à l'aide d'un modèle régional couplé océan-atmosphère

Suite aux deux derniers rapports du Giec (2001 et 2007), la région méditerranéenne a été identifiée comme une des zones les plus sensibles au changement climatique prévu pour le XXI^e siècle. C'est également une des zones pour laquelle les modèles de climat globaux s'accordent entre eux pour annoncer un réchauffement très important surtout en été, et un assèchement du bassin à l'échelle annuelle (plus particulièrement en été).

Afin d'obtenir des informations à plus haute résolution sur ce domaine, le CNRM a développé depuis quelques années une version régionale à haute résolution du modèle couplé Arpege-OPA. Ce modèle est le premier de ce type qui tient compte des interactions océan-atmosphère à haute résolution en Méditerranée. Les modèles utilisés sont Arpege et OPA comme pour le modèle CNRM-CM3 utilisé lors du dernier exercice du Giec, mais leur résolution

est portée localement à 50 km dans l'atmosphère et 10 km dans la mer Méditerranée. Une simulation de la période 1960-2099 a été réalisée en suivant le scénario intermédiaire A2 du Giec.

Cette simulation permet d'obtenir une image à haute résolution de ce que pourraient être le réchauffement et l'assèchement du bassin méditerranéen et de l'Europe du Sud (figure 5 a et b). La simulation permet également de quantifier le réchauffement, la salinisation (figure b) et l'élévation du niveau de la mer Méditerranée.

Dans le futur, le projet européen Circe, basé sur six autres modèles du même type, permettra d'évaluer les incertitudes liées au réchauffement climatique dans la région. Ce nouveau type de modèle climatique sera également au centre du projet HyMEx, planifié pour l'étude des événements extrêmes en Méditerranée dans les années à venir.

5

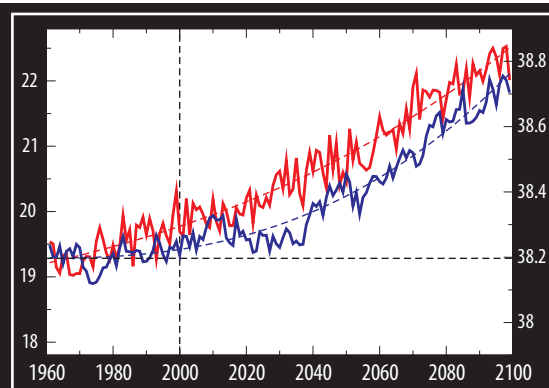
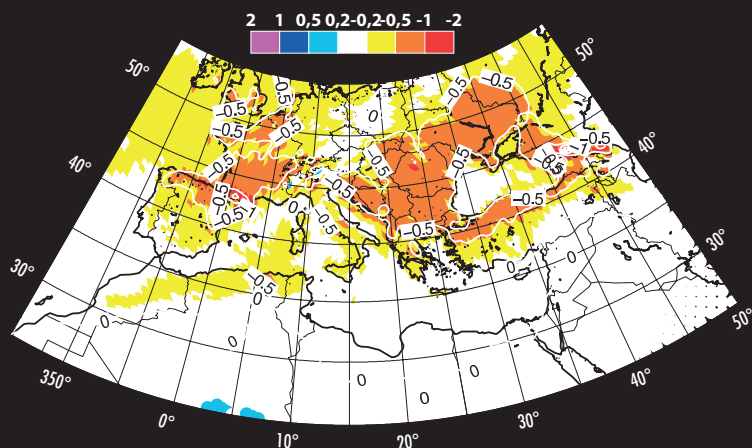
Épisodes de pluies intenses méditerranéennes en climat futur

Le projet national Cyprim lancé en 2005 constitue un cadre d'étude pluridisciplinaire des événements précipitants intenses d'automne, en Méditerranée (EPI). Son objectif est de mesurer l'évolution future de l'aléa lié à ces phénomènes dans le cadre du changement du climat. Une meilleure qualification sur la période actuelle et la mise au point d'une méthode objective de détection de ces événements en climat futur ont été réalisés en 2007.

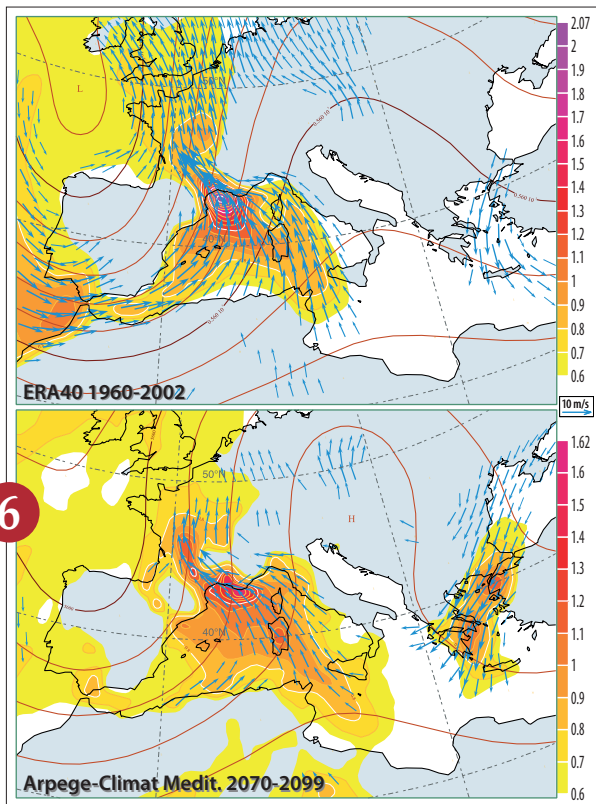
La tâche principale de l'étude a consisté à croiser l'information de pluies extraite du réseau de mesures de Météo-France, avec une banque de données de champs météorologiques de référence (ERA40) produite au CEPMMT. Un jeu de 1 210 situations de précipitations significatives a été défini dont les environnements de grande échelle ont ensuite été identifiés au moyen d'outils statistiques de classification automatique. On obtient alors des types de temps reliés aux différentes zones de la climatologie moyenne des pluies de la région. En approfondissant la relation, on constate que deux types de temps seulement sont associés aux EPI. Les ingrédients météorologiques propres aux EPI sont alors mis en évidence, et servent à développer un algorithme pour détecter à partir de l'information de grande échelle seule, des cas associés à des pluies fortes. Le nombre de cas détectés varie peu en temps futur (scénario A2), seule la direction d'alimentation en air chaud et humide de ces cas semble s'orienter sensiblement vers le sud-est (figure 6).

Des simulations à haute-résolution en temps présent et futur devront permettre d'examiner de possibles évolutions de cumuls de pluie ou de structures des EPI.

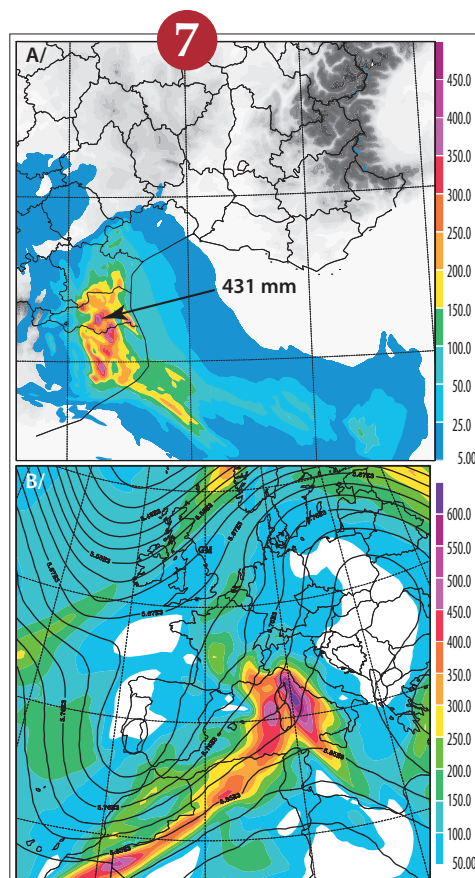
6



▲ Série temporelle de l'évolution de la température de surface (°C, en rouge) et de la salinité de surface (psu, en bleu) pour l'ensemble du bassin méditerranéen.



▲ Composites des situations de fortes pluies, en climat présent dans la réanalyse ERA40 (haut), dans les simulations Arpege Climat Méditerranée SAMM en climat futur (bas). Les champs sont la hauteur de géopotential à 500 mbar (isolignes marrons), le vent à 925 mbar seuillé à 5 m.s⁻¹ (flèches bleues) et le flux d'humidité à 925 hPa (plages colorées).



◀ Cumuls de précipitations sur 24 heures simulés par Més0-NH à 2,5 km (A/) et géopotential à 500 hPa et flux d'humidité en basses couches du modèle Arpege Climate-Opamed (B/) pour un cas d'évènement intense simulé dans le climat futur.

Régionalisation climatique des pluies intenses avec Més0-NH

Pour apporter des éléments de réponse à la difficile question de l'évolution de la fréquence et de l'intensité des événements de pluie intense dans le climat futur, des méthodes de descente en échelle des sorties des modèles climatiques sont développées. Dans le cadre du projet Cyprim, une méthode de descente en échelle statistico-dynamique a notamment été conçue pour étudier l'évolution de l'intensité des événements fortement précipitants en Méditerranée. Cette méthode statistico-dynamique repose sur i) la sélection de situations dans des classes d'environnements synoptiques favorables au déclenchement d'épisodes de pluies intenses dans le climat présent (1960-2000) et dans le climat futur (2070-2099) et ii) leur simulation à l'aide d'un modèle de

fine échelle capable de simuler de façon détaillée les mécanismes conduisant à la formation d'événement précipitant. Une méthode d'analogues basée sur le géopotential à 500 hPa et le flux d'humidité en basses couches a permis de sélectionner ainsi une vingtaine de situations propices à la formation de fortes précipitations dans les sorties du modèle de climat couplé Arpege Climat-Opamed. Elles ont été ensuite simulées avec le modèle Més0-NH à la résolution de 2,5 km en utilisant comme conditions initiales et aux limites les sorties du modèle Arpege Climate-Opamed.

Pour l'ensemble des vingt situations sélectionnées équitablement réparties entre le climat présent et le climat futur, Més0-NH à haute résolution simule des systèmes forte-

ment précipitants dont les cumuls en 24 heures dépassent les 100 mm, voire pour certains cas les 400 mm. Ces résultats confirment la pertinence de la méthode statistique de sélection des environnements propices aux événements de pluie intense et la capacité de la méthode dynamique de descente en échelle à reproduire des systèmes précipitants avec des cumuls de précipitations caractéristiques des événements méditerranéens. La synthèse des résultats quant à l'évolution de l'environnement des événements de pluie intense et de leur intensité est en cours de réalisation, notamment en examinant l'évolution des ingrédients clés pour la formation de pluie intense (flux d'humidité, contenu en eau précipitable, jets de basses couches et instabilité convective disponible).

Etudes environnementales liées à l'atmosphère

En 2007, de multiples développements ont été menés en hydro-météorologie, en océanographie, en nivologie, ainsi que dans les domaines de l'étude des faibles visibilités ou de la modélisation en chimie atmosphérique. On soulignera particulièrement les

progrès sur la prévision des débits grâce à l'amélioration de SIM, l'effort particulier fait sur le brouillard, ainsi que les nouveautés que constituent la prévision d'ensemble de la qualité de l'air ou celle des poussières désertiques.

Hydrométéorologie

Processus couplés océan-atmosphère lors des épisodes de pluie intense

Pour les événements fortement précipitants qui affectent fréquemment le pourtour méditerranéen à l'automne, la mer Méditerranée constitue une importante source de chaleur et d'humidité. La mer peut aussi parfois jouer le rôle d'amplificateur des crues par la montée de son niveau et la génération d'une forte houle dues aux vents forts qui accompagnent les pluies intenses.

Pour étudier l'impact des fortes précipitations et du fort vent marin observé dans ces situations sur la couche de mélange océanique, ainsi que les rétroactions de son évolution au cours du temps sur les phénomènes atmosphériques, le développement d'une modélisation totalement couplée entre

l'océan et l'atmosphère a été entrepris. Un couplage à haute résolution a été développé entre le modèle atmosphérique Méso-NH via son schéma de surface Surfex et un modèle océanique 1D en énergie cinétique turbulente. Appliqué à trois cas de pluie intense (Aude les 12 et 13 novembre 1999, Gard les 8 et 9 septembre 2002 et Hérault le 3 décembre 2003) avec une résolution de 2,4 km, le système couplé est capable de reproduire une réponse de fine échelle de la couche de mélange océanique. Un approfondissement et un refroidissement significatifs de la couche de mélange océanique sont obtenus sous les vents forts associés aux systèmes précipitants. La prise en compte des précipi-

tations dans le couplage est également primordiale pour reproduire l'impact de l'apport en eau douce sur la salinité et la formation de couches internes fines relativement peu salées. Comparé à un simple forçage, le couplage interactif tend à amortir les réponses de deux couches limites sans modifier la prévision à haute-résolution et à courtes échéances des systèmes fortement précipitants.

Cette étude constitue une première étape dans la modélisation couplée air-mer à fine échelle et se place au cœur des thématiques de la future campagne HyMeX qui s'intéressera au cycle hydrologique en Méditerranée.

1

Amélioration des transferts hydrologiques dans le modèle de surface Isba

Une bonne représentation des transferts hydriques dans le sol est nécessaire pour la simulation de la dynamique des écoulements et des transferts d'eau vers les rivières. Une des possibilités d'amélioration du schéma de surface actuel Isba consiste à faire diminuer de manière exponentielle le profil de conductivité hydraulique à saturation avec la profondeur. Ce paramètre gouverne en effet la vitesse d'écoulement d'eau dans le sol, sa diminution avec la profondeur étant liée à la compactation progressive du sol.

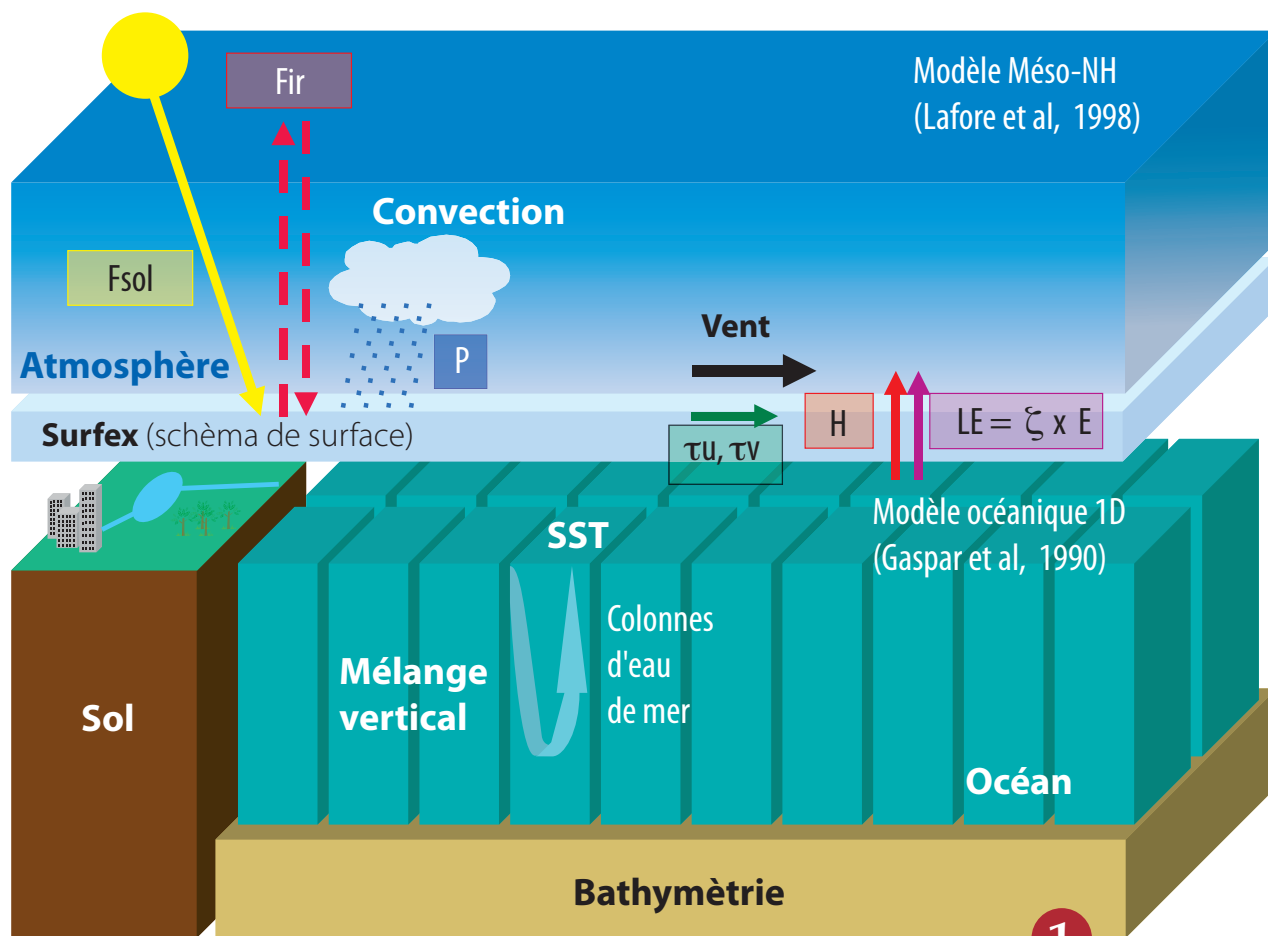
Après des applications très encourageantes à l'échelle du bassin versant du Rhône et à

l'échelle globale, cette modification a été testée cette année dans l'application hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou (SIM) à l'échelle de la France. Après des tests ponctuels, une stratégie de calage des paramètres prenant en compte la compactation du sol a été définie. Grâce aux débits observés dans environ 200 stations de mesures en France, cette nouvelle paramétrisation a été calée pour restituer de manière la plus fidèle possible les débits observés.

L'amélioration des performances est réelle sur la plupart des stations (augmentation significative du critère de Nash, critère usuel

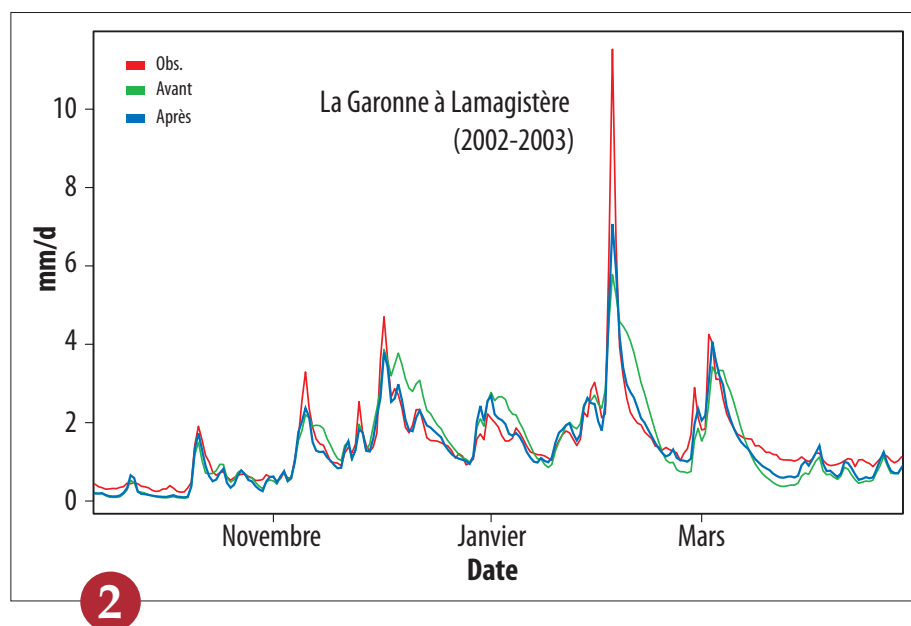
de mesure de la qualité des débits simulés). L'effet sur le bilan hydrologique de surface et l'humidité de la zone racinaire est pratiquement neutre. L'humidité du réservoir sous la zone racinaire est augmenté, ce qui permet de mieux représenter les phases de décrue, ainsi que les étiages estivaux. Ce nouveau calage améliore la qualité des simulations SIM. Il pourra être exploité tant au niveau de la simulation des débits pour la validation des bilans de surface, que pour la prévision des débits et l'impact des changements du climat sur l'hydrologie.

2



▲ Principe du couplage
Més0-NH (Surfex) - modèle océanique 1D.
Les variables échangées à l'interface
sont les flux radiatifs (F_{sol} et F_{ir}),
les flux turbulents (τ , H , LE)
et le taux de précipitations (P).

► Amélioration des débits
de la Garonne à Lamagistère
(Lot-et-Garonne)
pour l'hiver 2002-2003.



Extension de la ré-analyse du système hydrométéorologique SIM

Le système hydrométéorologique SIM (Safran-Isba-Modcou), opérationnel à Météo-France depuis 2004, permet un suivi continu et temps réel de la ressource en eau des sols superficiels sur la France. Afin de détecter d'éventuelles anomalies concernant la disponibilité de cette ressource et de pouvoir qualifier une année hydrologique donnée, une ré-analyse du modèle est utilisée quotidiennement comme référence.

Cette ré-analyse a été étendue au cours de l'année 2007 à la période 1970-2006 en utilisant la ré-analyse atmosphérique ERA40 (1957-2001) du CEPMMT et les observations

du réseau climatologique de Météo-France. L'extension de la période couverte par la ré-analyse se poursuivra en 2008.

Cette action permettra de disposer alors d'une climatologie du modèle sur la période 1958-2008 avec un jeu de données novateur de cinquante ans de ressources en eau des sols superficiels à 8 kilomètres de résolution spatiale sur l'ensemble de la France. La disponibilité de cette ré-analyse SIM est importante dans la perspective de futures études concernant en particulier l'impact du changement climatique sur la ressource en eau.

3

La prévision d'ensemble des débits grâce à la chaîne SIM

La chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou (SIM) permet de simuler les bilans hydrologiques de surface et les débits associés de manière distribuée à l'échelle de la France. Safran est un système d'analyse météorologique, Isba le modèle de surface simulant les bilans d'eau et d'énergie à la surface, et Modcou un modèle hydrologique (développé par l'École nationale supérieure des Mines de Paris) permettant de simuler des débits sur 800 points des rivières françaises.

La disponibilité de cette chaîne a ouvert la voie à des études en prévision des débits journaliers, en aval des prévisions météorologiques d'ensembles du CEPMMT. Pour cela, les prévisions des précipitations sont tout d'abord désagrégées à l'échelle de la France, pour tenir principalement compte du relief et de biais éventuels. Ensuite, Isba-Modcou est activé pour chacun des membres de la prévision d'ensemble. On dispose donc d'un ensemble de prévisions hydrologiques, qui a été évalué sur une période de plus d'une année.

Les performances sont d'ores et déjà très satisfaisantes, malgré un manque de dispersion de l'ensemble visible aux courtes échéances, notamment pour les précipitations. La prévision d'ensemble hydrologique permettra d'améliorer l'échéance des prévisions (10 jours pour les prévisions basées sur les prévisions à moyenne échéance du CEPMMT) et la mise en pré-alerte en cas de crue. Ce travail de recherche a pris en compte très tôt les contraintes liées au contexte opérationnel, ce qui facilitera la mise en opérationnel des outils. Un test utilisant les prévisions d'ensemble à deux jours du modèle de prévision français Arpege a conduit à une légère augmentation de la qualité des prévisions à courte échéance, surtout sur les bassins versants les plus petits.

Les tests du système en temps différé et en temps réel sont poursuivis. Les efforts portent actuellement sur l'amélioration de l'état initial du modèle hydrologique, qui sera basée sur une assimilation des débits observés.

4

Suivi de l'état hydrique des sols : modélisation et observations satellitaires et *in situ*

Le contenu en eau de la couche superficielle du sol peut être estimé à partir de données satellitaires micro-ondes. Cette variable est simulée par les modèles de surface. Le contenu en eau du sol peut être mesuré *in situ* en continu en utilisant des sondes automatiques. La comparaison de ces différentes sources d'information permet d'avancer dans la compréhension des processus biophysiques et dans leur modélisation.

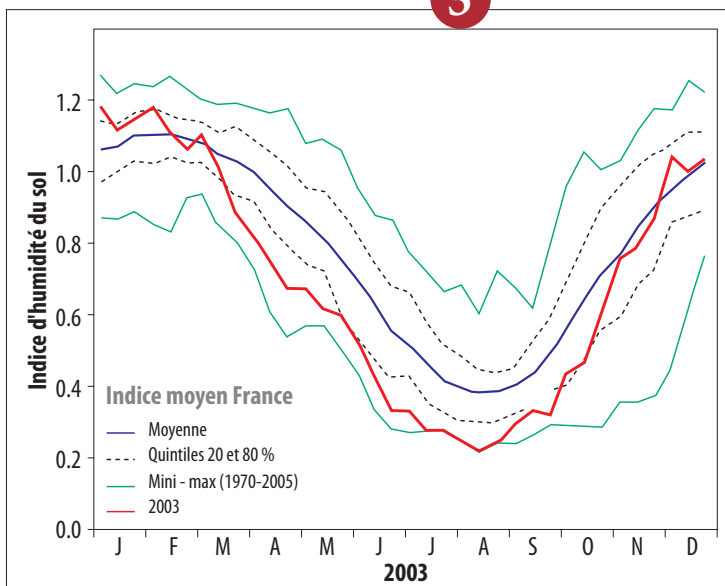
La mission spatiale Smos (radiomètre en bande L) – dont le lancement est programmé pour 2008 – fournira depuis l'espace une estimation de l'humidité superficielle du sol avec une fréquence temporelle de 2-3 jours, et une résolution de 20 à 60 km. Plusieurs produits satellitaires existant pourront être utilisés en synergie avec Smos. Les données des diffuseurs vent en bande C (ERS-Scat, Ascat sur *Metop*) ou les données radiométriques en bande C et X (AMSR-E sur *Aqua*) fournissent déjà une estimation de l'état hydrique des sols en surface, à une résolution spatiale voisine de celle de Smos. L'instrument Ascat sur *Metop* permettra à Eumetsat de distribuer des produits globaux d'humidité du sol avec une fréquence temporelle voisine de celle de Smos.

Des mesures *in situ* de l'humidité des sols sont disponibles dans le sud-ouest de la France : Smosmania (2007-2013) est un réseau de 12 stations météorologiques Radome de Météo-France équipées pour la mesure du profil vertical d'humidité et de température du sol (-5, -10, -20, -30 cm).

La comparaison des données *in situ* avec les données simulées (SIM) et les produits satellitaires disponibles (figure 5) permet de réaliser une validation croisée des produits satellitaires avec le modèle, et de vérifier la représentativité des données *in situ*.

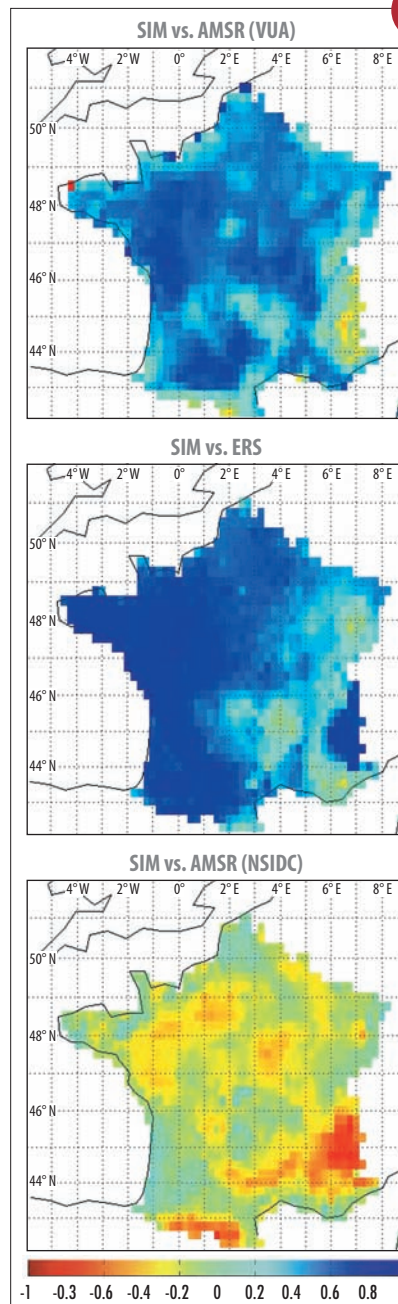
5

3

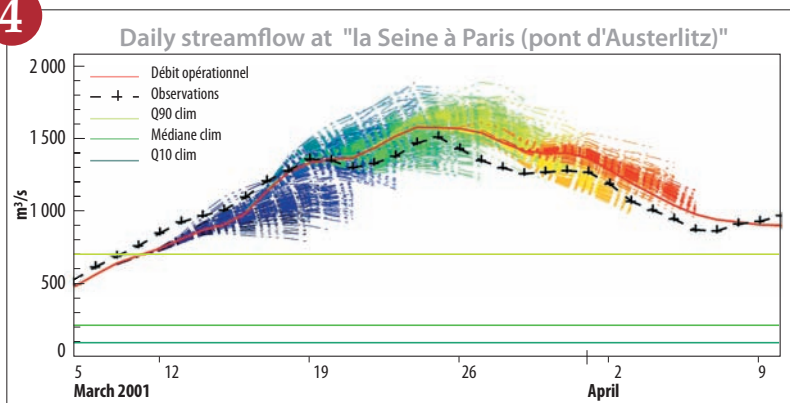


Évolution de l'indice d'humidité des sols moyen sur la France sur l'année 2003 et comparaison aux statistiques sur ce paramètre déterminées sur la période 1970-2005.

5



4



▲ Préviction d'ensemble des débits de la crue de 2001 à Paris. Observations : noir, simulation utilisant l'analyse Safran : rouge, préviction d'ensemble : pointillés, seuil climatologiques : vert.

Cartes de la corrélation entre l'humidité superficielle des sols simulée par SIM sur la France et trois produits satellitaires, pour la période 2003-2005.

De haut en bas : AMSR-E (université d'Amsterdam), ERS-Scat (université de Vienne), AMSR-E (Nasa, version 3-B03).

Océanographie (modélisation et instrumentation)

Mesure de salinité de surface de la mer en vue de la calibration de Smos

Le Centre de météorologie marine du CNRM est partie prenante dans la validation et l'établissement des données du satellite *Smos* de l'ESA, notamment via le projet Glosca (*Global Ocean Salinity Calibration and Validation*). Celui-ci, mené en collaboration avec la communauté scientifique nationale et internationale, concerne l'étude des données de salinité de surface de la mer (données *Smos*, données *Aquarius*, et données *in situ*). Ce paramètre est en effet particulièrement important pour la connaissance du climat. Dans ce contexte, des bouées dérivantes équipées de capteurs de conductivité ont été déployées au large de l'Amazonie dans le cadre des campagnes Plumand et Amandes, et dans le golfe de Gascogne dans le cadre de la campagne Carols. La mise en mer de bouées au large de l'Amazonie avait deux objectifs : scientifique d'une part (analyse de la variabilité de la salinité dans les eaux dessalées en surface), instrumental d'autre part (validation dans les océans tropicaux). Le but, à terme, est de disposer d'une trentaine de bouées déployées après le lancement du satellite *Smos*.

6

Le programme européen d'observation marine de surface E-Surfmar

Depuis 2003, l'observation météorologique marine de surface est organisée en Europe dans le cadre d'Eucos, programme d'observation composite d'Eumetnet. Au sein de ce programme, E-Surfmar, dont Météo-France assure la responsabilité, pilote les observations issues des navires sélectionnés par les services météorologiques européens ainsi que celles des bouées dérivantes et ancrées. En 2007, le budget d'E-Surfmar s'est élevé à près de 820 k€.

Alors que les observations réalisées par les navires conventionnels sont en constante diminution, celles effectuées par des stations automatiques embarquées à bord de navires européens ont doublé en l'espace de cinq ans. On est ainsi passé de 300 à plus de 700 observations par jour en moyenne dans l'Atlantique nord et la Méditerranée.

Fin 2007, près de cent bouées dérivantes financées par le programme transmettaient plus de 2 200 observations de pression atmosphérique et de température de la mer chaque jour, soit un niveau jamais atteint jusqu'à présent. L'automatisation de l'observation, l'abaissement de ses coûts de production, l'amélioration de sa qualité et la réduction des délais de transmission sont les préoccupations majeures de E-Surfmar. En 2007, le système Iridium a démontré de nets avantages vis-à-vis d'Argos en terme de délai de transmission de l'information pour les données des bouées dérivantes. La décision a été prise d'étendre progressivement cette technologie à l'ensemble de ces bouées.

7

Contribution à l'Année polaire internationale

Météo-France contribue à l'Année polaire internationale (API 2007-2009), notamment au travers du programme européen E-Surfmar.

E-Surfmar finance en effet quelques bouées «glace» qui ont été mises en œuvre dans le cadre du programme international de bouées arctique (IABP). Deux bouées ont été larguées par avion durant l'été 2006. Sept bouées moins onéreuses ont été déposées sur la banquise durant l'été 2007 par le Navire Océanographique allemand *Polarstern*. Au mois de décembre 2007, huit des neuf bouées déployées fonctionnaient parfaitement, transmettant leurs données horaires soit par le système Argos, soit par le système Iridium.

Le but est de profiter de cette vaste campagne pour contribuer à densifier le réseau d'observation de pression atmosphérique dans cette région pour pouvoir ensuite en mesurer l'impact grâce à des études ultérieures.

Le voilier *Tara V* (ex-*Antartica*) qui a entrepris une dérive de deux ans dans les glaces de l'océan Arctique à partir du mois de septembre 2006, a aussi été équipé d'une station automatique.

9

L'utilisation d'Iridium pour la transmission des données marines de surface

Les essais réalisés en 2007 sur l'utilisation d'Iridium comme moyen de communication pour les bouées dérivantes ont été couronnés de succès. Le système est fiable, rapide et peu coûteux. Fin 2007, près de 20 bouées SVP-B équipée d'un émetteur Iridium SBD, sont en opération dans divers endroits du monde : Arctique, Atlantique nord, mer Noire, Atlantique sud et océan Indien. Toutes les heures, leurs données sont reçues au CNRM/CMM à Brest, converties en messages FM18-BUOY et transmises sur le SMT en moins de 10 minutes.

Quarante-cinq bouées de ce type, financées par le programme E-Surfmar, ont été approvisionnées conjointement avec 25 bouées Argos. Toutes seront mises à l'eau dans le courant de l'année 2008. Les futures commandes ne devraient concerner que des bouées Iridium.

En 2007, le CMM a développé aussi une station météorologique minimale de navire répondant aux objectifs de E-Surfmar, c'est-à-dire mesurant au moins la pression atmosphérique. Cette station, baptisée Baros, est

construite autour d'un baromètre, un GPS et un émetteur Iridium SBD. Un prototype a été installé sur le *Jericho*, chalutier du Guilvinec. Il fonctionne parfaitement bien depuis début novembre et ses données sont transmises sur le SMT en temps réel sous forme de messages FM13-Ship. Quatre nouvelles stations destinées à équiper des navires E-Asap non encore équipés de stations automatiques, sont en cours de fabrication.

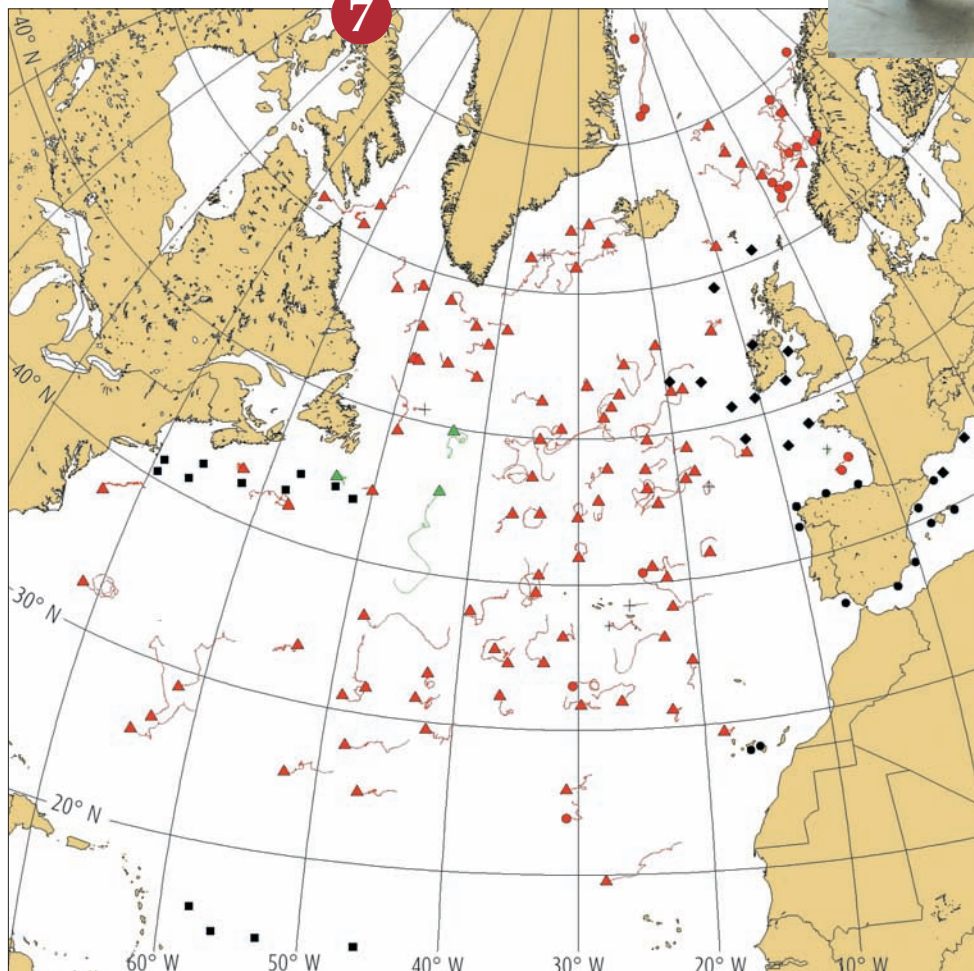
8

6

► Bouée « salinité » :
bouée dérivante équipée
d'un capteur de conductivité.



7

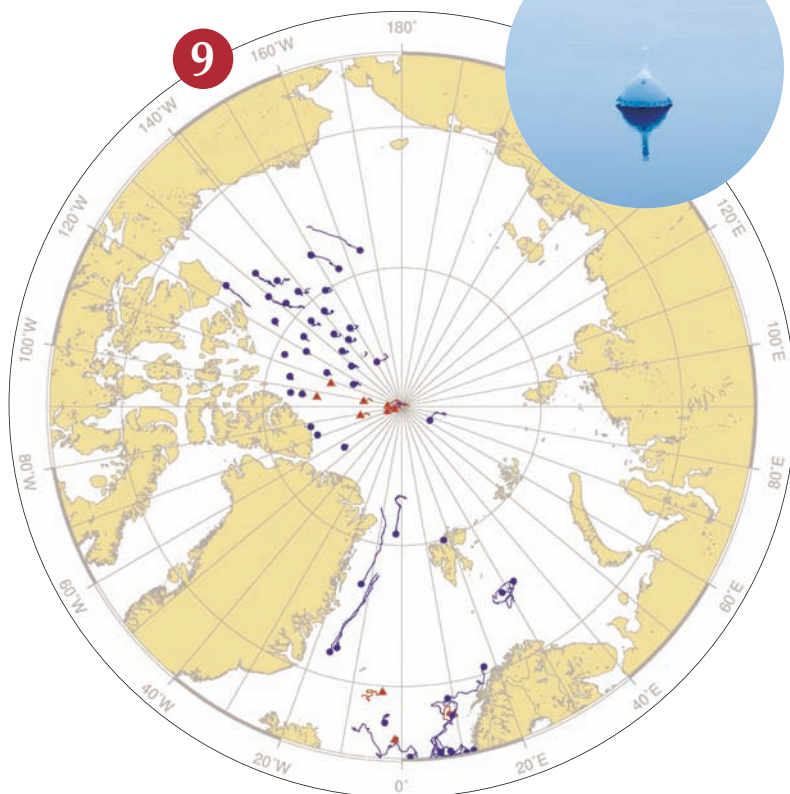


◀ Carte des trajectoires
de bouées dérivantes
mesurant la pression
atmosphérique au cours
du mois de novembre 2007.

▼ Bouée sur la banquise
(photo L. Rabenstein).
Trajectoires de bouées au mois
de novembre 2007
(en rouge bouées E-Surfmar).



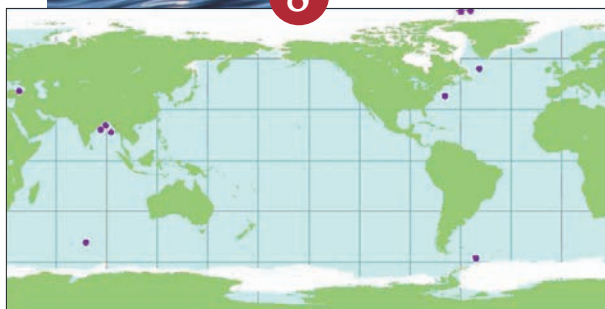
9



◀ Bouée SVP-B Iridium en mer.

▼ État du parc et position
des bouées Iridium
(au 19 décembre 2007)
du projet pilote du DBCP
(Data Buoy Cooperation Panel).

8



Les bouées ancrées

Les bouées océaniques Brittany (ancrées à une profondeur de 2 100 mètres) et Gascogne (ancrée à 4 500 mètres) sont gérées sur le proche Atlantique en coopération avec le Met Office du Royaume-Uni. Par ailleurs, Météo-France maintient des bouées ancrées par grande profondeur sur quatre autres sites : deux au large des Antilles sur des fonds de

5 500 mètres et deux en Méditerranée sur des fonds de 2 300 mètres. Il s'agit de structures d'un poids de 3,7 tonnes de 2,8 mètres de diamètre et de 6 mètres de haut. Toutes les heures, des observations sont réalisées par différents capteurs et transmises en temps réel via les satellites Météosat.

10

De Mersea à My Ocean : vers un système intégré européen d'océanographie opérationnelle

L'objectif du projet européen Mersea (2004-2008), financé par la Commission européenne et coordonné par l'Ifremer, est le développement et la démonstration pré-opérationnelle d'un système intégré européen d'océanographie opérationnelle, répondant aux besoins de GMES. Ce système comprend des centres d'analyse et de prévision océanique pour le domaine global (sous la responsabilité de Mercator Océan) et pour des domaines régionaux (Méditerranée, Atlantique nord-est, mer du Nord et mer Baltique, océan Arctique), et des centres de données satellite et *in situ* fournissant les observations nécessaires.

Météo-France contribue au projet par des activités de recherche menées au CNRM concernant les forçages atmosphériques et l'impact des analyses océaniques globales à haute résolution pour la prévision saisonnière, par des activités de démonstration menées à la

division Prévision Marine concernant l'utilisation des prévisions de courant de surface pour la prévision des états de mer et des dérives de nappes d'hydrocarbures, et par des activités de développement et de production menées au CMS concernant les observations satellite de température de surface de la mer.

En 2007, l'impact positif des nouvelles paramétrisations des flux turbulents développées au CNRM sur la simulation de la circulation océanique globale a été démontré et documenté, et de nouveaux produits satellite de température de surface de la mer multi-capteurs à haute résolution sur l'Atlantique ont été mis en production au CMS et mis à disposition des utilisateurs.

2008 verra la transition de Mersea vers My Ocean (2008-2011), nouveau projet financé par la Commission européenne devant assurer la mise en exploitation opérationnelle du système développé dans le cadre de Mersea.

11

Ecume : une nouvelle paramétrisation des flux de surface océanique

Dans les modèles de circulation générale atmosphérique, l'estimation des flux turbulents océan-atmosphère (tension de vent, flux de chaleur sensible et latente) repose sur l'utilisation de formulations « bulk » qui permettent de relier paramètres météo-océaniques et flux turbulents via l'introduction de coefficients d'échange pour le vent, la température et l'humidité.

En 2007, une nouvelle paramétrisation des coefficients d'échange – en atmosphère neutre – baptisée Ecume (*Exchange Coefficients from Unified Multi-campaigns Estimates*) a été établie à partir de la base de données Albatros (<http://dataserv.cetp.ipsl.fr/FLUX/>) qui regroupe l'ensemble des mesures en mer effectuées au cours des dix dernières années en étroite collaboration entre le CNRM et l'IPSL. La force de cette paramétrisation réside dans le fait qu'elle fournit une formulation analytique pour l'ensemble des trois

coefficients d'échange à partir de mesures de turbulence effectuées simultanément, en utilisant des méthodes homogènes, pour des conditions de vent et de stratification particulièrement variées.

Une première évaluation de cette paramétrisation a été effectuée à l'aide du modèle océanique global OPA développé au Locean, dans le cadre du projet européen Mersea. L'apport de cette paramétrisation pour la modélisation atmosphérique est en cours d'étude, à grande échelle d'une part via son intégration dans le modèle Arpege-Climat, et à méso-échelle d'autre part via sa mise à disposition dans les modèles Arome et Méso-NH. Deux études réalisées avec le modèle Méso-NH ont ainsi mis en relief le potentiel de cette paramétrisation pour la représentation des événements précipitants extrêmes méditerranéens et la modélisation des cyclones.

12

10



► Remplacement d'une bouée en Méditerranée au mois de février 2007 par le baliseur des Phares et Balises Le Provence.

Marée interne océanique : étude expérimentale en canal hydraulique

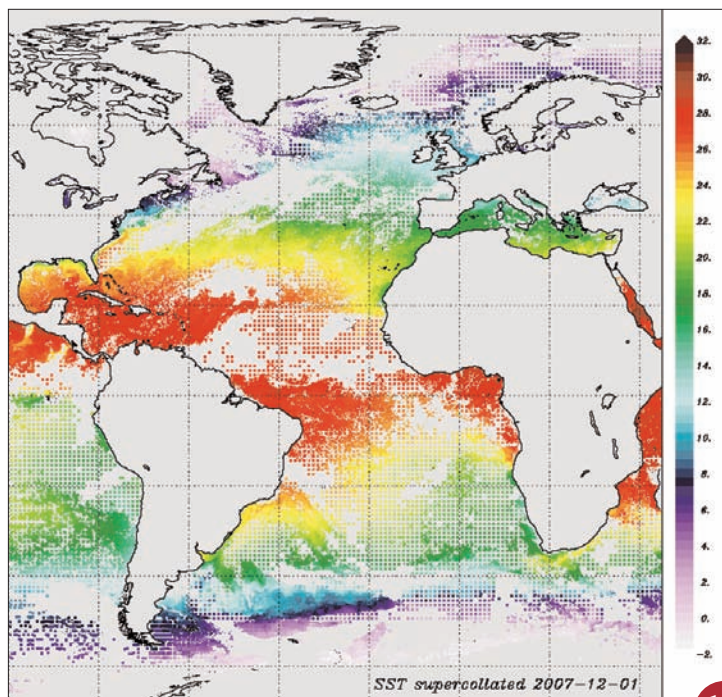
Dans l'océan, comme dans l'atmosphère, les ondes de gravité internes ont un impact sur la circulation à grande échelle et la structure en densité. Le rôle global joué par ces ondes à l'échelle de la circulation thermohaline a été estimé par Munk et Wunsch (1998), mais de nombreuses questions restent ouvertes concernant la génération, la propagation et le déferlement des ondes internes.

Le mélange turbulent permettant d'assurer la remontée des eaux profondes formées aux hautes latitudes résulterait en grande partie du déferlement de ces ondes, générées dans une proportion équivalente par le forçage atmosphérique et par la marée barotrope.

Des expériences en laboratoire sont en cours pour étudier la marée interne générée sur un mont sous-marin. Le forçage de la marée barotrope sur le mont est représenté par des oscillations périodiques de ce dernier dans un fluide stratifié. Les mesures donnent accès aux modifications du champ de densité par les ondes, ainsi qu'au champ de vitesse. Ces expériences ont notamment pour vocation de valider et de compléter l'outil d'analyse des échanges énergétiques au sein du champ d'ondes internes intégré dans le modèle numérique Symphonie développé au Laboratoire d'Aérodynamique.

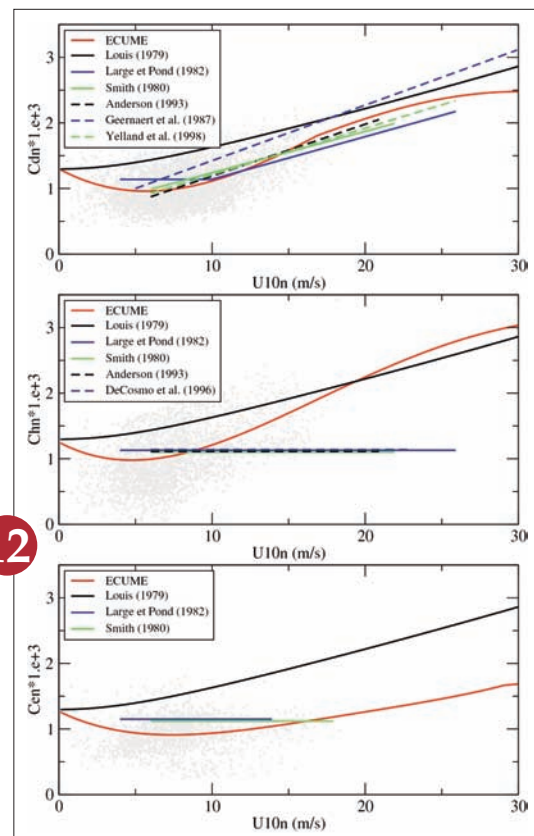
À terme, ces travaux permettront d'améliorer notre compréhension du fonctionnement de la circulation thermohaline. Les masses d'eau peuvent mettre jusqu'à mille ans pour parcourir ce système de courant océanique. Les retombées seront donc importantes pour la recherche sur le climat.

13

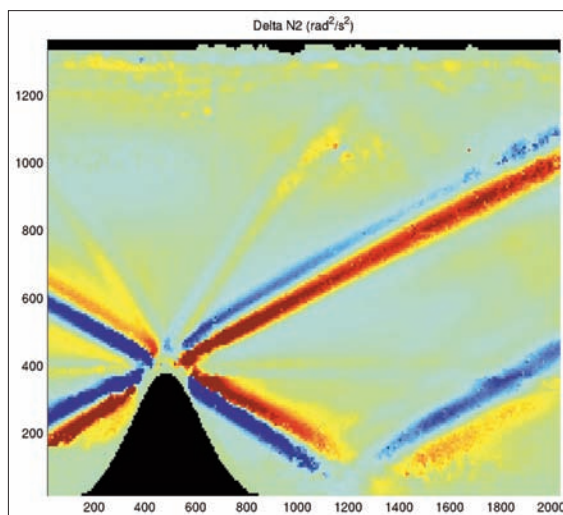


▲ Champ multi-captureurs de température de surface de la mer observé le 1^{er} décembre 2007, combinant les observations infra-rouge et micro-ondes issues de satellites géostationnaires et défilants.

11

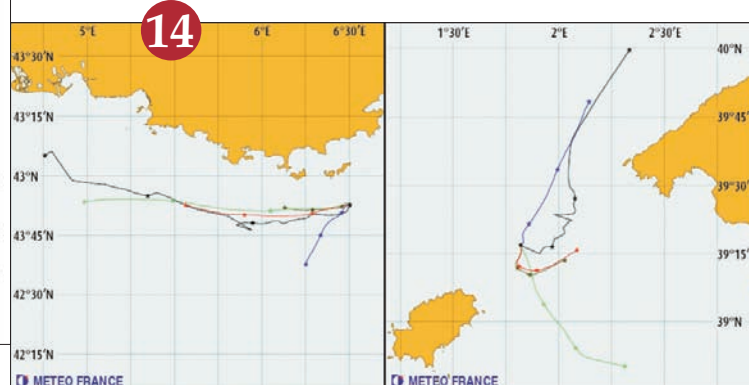


▲ Coefficients d'échange neutres pour le vent (C_{dn}), la température (Ch_n), et l'humidité (C_{en}) fournis par la paramétrisation Ecume (en rouge), en fonction du gradient de vent entre la surface et 10 m en atmosphère neutre. Chaque croix grise représente une valeur issue de la base de données Albatros. Différentes paramétrisations bulk (parmi les plus utilisées) sont également représentées.



▲ Modification du champ de densité par les ondes internes.

13



Dérive sur 72 heures, observée avec une bouée (noir) et modélisée par Mothy avec le forçage vent seul (marron) ou en ajoutant les courants d'une climatologie mensuelle (vert), ou les analyses de MFS (rouge) ou celles de Mercator-Océan PSY2V2 (bleu).
 À gauche : début de la dérive le 13 octobre 2007 ; on observe un bon accord pour la dérive Mothy utilisant la climatologie alors que les systèmes d'océanographie reproduisent mal le courant liguro-provençal.
 À droite : début de la dérive le 16 novembre 2007 près des Baléares ; les courants de Mercator se montrent alors les plus précis.

14

Inter-comparaison de dérives de pétrole simulées et observées en Méditerranée

Dans le cadre de ses responsabilités nationales et internationales, Météo-France met en œuvre le modèle Mothy de prévision de dérive. Il associe un modèle d'océan à surface libre (calcul du courant en réponse au vent) et un modèle de comportement du polluant (ou d'objet) dans l'environnement marin. Or, dans certains cas, la circulation océanique de basse fréquence peut devenir un acteur prépondérant de la dérive. Une participation de Météo-France au projet européen Mersea a consisté justement à en évaluer l'impact.

Une expérimentation en Méditerranée a donc été menée en automne 2007 avec des services français (Cedre, Ifremer), norvégien (Met.No) et chypriote (UCY) afin de larguer des bouées émettrices dérivant comme du pétrole : trois à proximité de Chypre et huit au large de Toulon. L'expérience a duré plus de trois semaines et a permis de collecter de précieuses observations de dérive dans une mer où les systèmes de prévision de dérive n'ont pas été souvent validés alors que sa dynamique est très complexe (courants varia-

bles associés à une marée faible). Les systèmes de dérive norvégien (OD3D), chypriote (MedSlik) et français (Mothy) vont pouvoir être inter-comparés tout en testant l'apport des différents systèmes opérationnels de modélisation océanique (Mercator - France, MFS - Italie et Cycofos - Chypre). Les études avec ces données ont démarré en novembre et se prolongeront au-delà du projet Mersea pour améliorer les systèmes existants.

14



◀ Mât instrumenté mis en place sur le site de Toulouse Météopole dans le cadre de la campagne Toulouse-Fog. Ce dispositif permettait des mesures de température et d'humidité à 0,5, 1, 2, 5 et 10 mètres de hauteur, ainsi que des mesures du vent à 10 m.

Environnement atmosphérique

Campagnes de mesures dédiées aux brouillards : de Paris-Fog à Toulouse-Fog

Les brouillards sont des phénomènes météorologiques très difficiles à prévoir avec la précision spatiale et temporelle requise par les utilisateurs. Et de nombreux domaines, les transports aériens ou routiers, par exemple, continuent d'être fortement perturbés par les réductions de visibilité.

Pour progresser, il est nécessaire d'améliorer notre connaissance des processus influençant le cycle de vie du brouillard. Des travaux de recherches sont donc menés au CNRM afin d'améliorer nos connaissances sur l'influence des hétérogénéités de surface et des aérosols atmosphériques sur le cycle de vie du brouillard.

Une campagne de mesures, nommée Paris-Fog, s'est déroulée au cours de l'hiver 2006-2007 en région parisienne en collaboration entre l'IPSL, le Cerec et le CNRM. Paris-Fog aura permis de documenter précisément différents processus intervenant dans le cycle de vie du brouillard, de sa formation à sa dissipation, de manière continue pendant cinq mois. Les nombreuses données recueillies ont été validées et sont accessibles pour la

communauté scientifique via le serveur web <http://parisfog.sirta.fr/>.

Cependant, la combinaison d'un printemps peu favorable au brouillard et de problèmes techniques et instrumentaux n'a pas permis de documenter le volet microphysique de manière totalement satisfaisante lors de Paris-Fog. Or, une meilleure connaissance de la microphysique du brouillard est indispensable, par exemple, pour répondre au besoin exprimé par les laboratoires des Ponts et Chaussées qui désirent essayer de définir des systèmes d'aide à la conduite. Une nouvelle campagne de mesures se focalisant sur les aspects microphysiques, appelée Toulouse-Fog, a donc été organisée en région toulousaine au cours de l'hiver 2007-2008.

La progression dans la prévision du brouillard ne peut se faire qu'à l'aide d'observations détaillées, telles que celles réalisées lors de Paris-Fog et Toulouse-Fog. Ces données sont en cours d'exploitation au CNRM pour améliorer les paramétrisations physiques des modèles.

15

Cartographies du risque de brume et brouillard : Caribou

Depuis fin juin 2007, des cartographies du risque de brume et brouillard sont produites de façon opérationnelle à Météo-France. Il s'agit d'une estimation du risque d'occurrence de ces phénomènes, élaborée par fusion d'observations satellitaires (classification nuageuse MSG du SAF-NWC), d'analyses de surface (analyses Diagpack) et de télédétection radar (lames d'eau Panthere). Les classifications nuageuses produites par le CMS à partir des données du satellite géostationnaire MSG fournissent une information spatialisée sur la présence de nuages bas, en l'absence évidemment de couches nuageuses à des niveaux plus élevés. Les analyses de surface Diagpack, élaborées chaque heure par interpolation optimale, à partir d'une ébauche Aladin et des observations in situ disponibles, ont pour but d'ajuster au mieux ces dernières et fournissent ainsi des champs au plus près des observations.

Les champs d'humidité relative à 2 m et de vent à 10 m issus de ces analyses, associés aux lames d'eau radar Panthere, permettent de discriminer, au sein de la classification nuageuse, les « nuages bas » en contact ou pas avec le sol. Ainsi, le risque de rencontrer des phénomènes de brume et de brouillard, c'est-à-dire des visibilités globalement inférieures à 5 000 m, est estimé en tout point du territoire français métropolitain, avec une résolution géographique de 3 km et un pas de temps horaire.

Actuellement, la principale limite du produit est l'absence de quantification des baisses de visibilité attendues au sein des zones à risque. Une étude a été initiée afin d'associer à la notion de risque une classe de visibilité.

17

La prévision d'ensemble des brouillards

Le trafic aérien est particulièrement dense sur les principaux aéroports mondiaux, si bien que les conditions de faibles visibilités, brouillards ou nuages bas, affectent fortement la gestion et la sécurité du trafic. Les enjeux économiques reliés aux perturbations occasionnées par les brouillards sont donc considérables dans le secteur du transport aéronautique civil ou commercial. Un système de prévision d'ensemble local (prévisions probabilistes) des faibles visibilités, nommé Leps (*Local Ensemble Prediction System*), a été développé pour l'aéroport international de Paris - Roissy-Charles-de-Gaulle pour optimiser la gestion de la plate-forme aéroportuaire et la planification du trafic aérien. Ce système de prévision d'ensemble s'appuie sur la chaîne de prévision numérique du brouillard Cobel-Isba, opérationnelle sur Roissy depuis

2005. LEPS est un système novateur et original qui permet de replacer l'utilisateur au centre du processus de décision grâce à l'évaluation d'indices de confiance pour la prévision du brouillard à l'échelle locale. Chaque utilisateur peut ainsi moduler sa prise de décision en fonction du risque de brouillard prévu, ce qui lui permet de minimiser les pertes d'exploitation liées à ce phénomène météorologique.

LEPS permet de prévoir de manière fiable le risque d'occurrence de faibles visibilités sur l'aéroport Charles-de-Gaulle. De plus, le système est portable et peut être installé sur d'autres aéroports. C'est un outil performant et une aide à la gestion du transport de passager et de marchandise dans le secteur aéronautique, tant sur l'aspect de la sécurité du transport que sur celui de sa planification.

16

Chimie atmosphérique et qualité de l'air

Prise en compte des incertitudes dans la dispersion à méso-échelle

La prévision de la dispersion dans l'atmosphère de rejets de sources ponctuelles comprend trois ingrédients essentiels : le forçage météorologique (vent, stabilité verticale...), la représentation de la source (émissions) et le traitement numérique en lui-même du transport et des éventuels processus physico-chimiques. Chacune de ces composantes est entachée d'incertitudes spécifiques et c'est un objectif de pouvoir les prendre en compte dans l'estimation de l'impact d'une pollution accidentelle.

Des simulations ont été réalisées avec le système Perle, utilisé à Météo-France pour la modélisation de la dispersion de polluants à courte distance, afin d'illustrer les incertitudes liées au forçage météorologique et à la représentation de la source. Dans le premier cas, la prévision d'ensemble météorologique basée sur le modèle météorologique Arpège a été utilisée en entrée de Perle ; cette prévi-

sion consiste en onze scénarios météorologiques obtenus à partir d'autant de conditions initiales légèrement différentes. La variabilité des simulations de dispersion révèle une très forte sensibilité des résultats aux facteurs météorologiques dans certaines conditions de types de temps. Par ailleurs, il a été montré qu'une imprécision sur les caractéristiques du rejet conduit à des évolutions très différentes du panache de polluant, et donc des conséquences potentielles, alors même que ces caractéristiques sont généralement très mal connues en cas d'accident. Un prototype, mis en place sur cluster de PC et sur supercalculateur, permet d'ores et déjà d'apprécier, en mode post-accidentel, la variabilité des scénarios de dispersion prévus par Perle en utilisant la prévision d'ensemble météorologique ou en faisant diverses hypothèses sur les caractéristiques du rejet. 19

Prévisions opérationnelles de poussières désertiques

Les poussières désertiques, particules atmosphériques dont les tailles sont essentiellement comprises entre 1 et 10 micromètres, sont produites par arrachement éolien dans les zones arides et semi-arides. Cet aérosol est susceptible d'être transporté sur des milliers de kilomètres avant de se déposer. Outre leur impact sur la qualité de l'air et la santé, ces poussières affectent certaines installations sensibles, les opérations des forces armées, la visibilité ou encore l'imagerie satellitaire.

La prévision de leur concentration et de leur dépôt est donc utile pour de nombreux domaines. Issue de travaux de recherche menés à Météo-France en collaboration avec le Lisa, cette prévision est, depuis novembre 2007, disponible jusqu'à quatre jours d'échéance dans des conditions opérationnelles. Le modèle de chimie-transport Mocage

est utilisé pour cette application ; il prend en compte les poussières désertiques provenant des deux principales zones d'émissions mondiales : le Sahara et l'Arabie Saoudite d'une part, la Chine d'autre part. Le transport des poussières se fait sous l'effet des vents prévus par les modèles météorologiques opérationnels de Météo-France, Arpège et Aladin. Après un fonctionnement en test de plusieurs mois et des travaux de validation, la mise en opérationnel des prévisions de poussières désertiques issues de Mocage permet d'offrir un service fiable aux utilisateurs. En particulier, les Aasqa qui utilisent quotidiennement la plate-forme Prév'Air (www.prevoir.org) du Medad, qui concentre et diffuse des prévisions et des carto-graphies de qualité de l'air, peuvent maintenant y trouver les prévisions de concentrations de poussières de Météo-France. 20

Vers des calculs de rétro-panaches en opérationnel

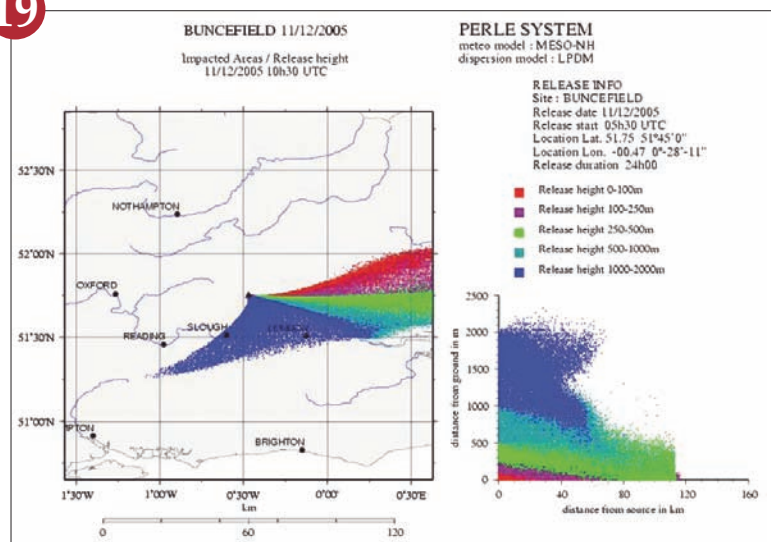
Dans un contexte de crise accidentelle, en particulier nucléaire, il est intéressant de pouvoir déterminer l'origine spatio-temporelle d'une pollution détectée à un ou plusieurs endroits d'un réseau de mesure. Si la question « *D'où vient la masse d'air ?* » est résolue de manière rudimentaire depuis longtemps par trajectographie, ce n'est que depuis quelques années qu'émergent des applications de « *backtracking* », consistant à intégrer à rebours dans le temps des modèles de dispersion 3D (rétro-panaches). Ces simulations inverses partagent les concepts théoriques de l'assimilation des données et permettent notamment de déterminer le « champ de vue » 3D d'un site, à tout instant dans le passé. L'Otice, organisme en charge de la surveillance du traité d'interdiction des essais nucléaires, a sollicité l'OMM pour étudier la mise en place d'un soutien opérationnel en *backtracking* à ses missions.

Le CNP de Météo-France est un des CMRS de l'OMM. Il a été impliqué en 2007 dans un exercice de soutien à l'Otice. Des rétro-panaches, calculés sur alerte, ont été fournis à l'Otice, qui s'est chargé de croiser les résultats provenant des différents centres pour déterminer les caractéristiques probables de la (ou des) source(s), fictive(s) ici. À Météo-France, les calculs ont été réalisés avec la version « inverse », sans chimie, du modèle de chimie-transport Mocage. La figure 21 présente une validation de rétro-panaches de Mocage par comparaison avec une expérience de référence de l'Otice.

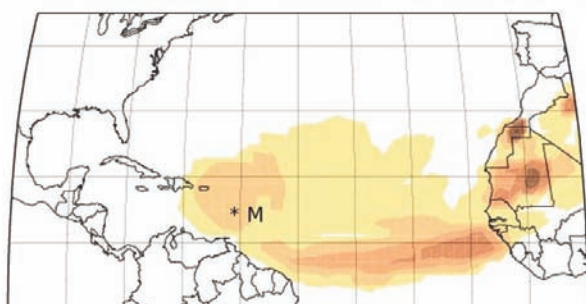
De tels exercices de *backtracking* seront réalisés régulièrement et, en cas d'alerte réelle, les CMRS pourraient être sollicités à l'avenir aussi bien pour des panaches (direct) que pour des rétro-panaches (inverse). Les configurations « directe » et « inverse » de Mocage seront disponibles au CNP en opérationnel dès 2008. 21

19

► Variabilité des résultats de dispersion en fonction de la hauteur du rejet. Ici, sur le cas de l'incendie du dépôt pétrolier de Buncefield (Angleterre) en décembre 2005, la dispersion sur l'horizontale (à gauche) et sur la verticale (à droite), 5 h après le début du rejet, est matérialisée selon 5 couleurs correspondant à 5 hauteurs de rejet différentes : rejet entre 0 et 100 m (rouge), entre 100 et 250 m (rose), entre 250 et 500 m (vert), entre 500 et 1 000 m (bleu ciel) et entre 1 000 et 2 000 m (bleu foncé).

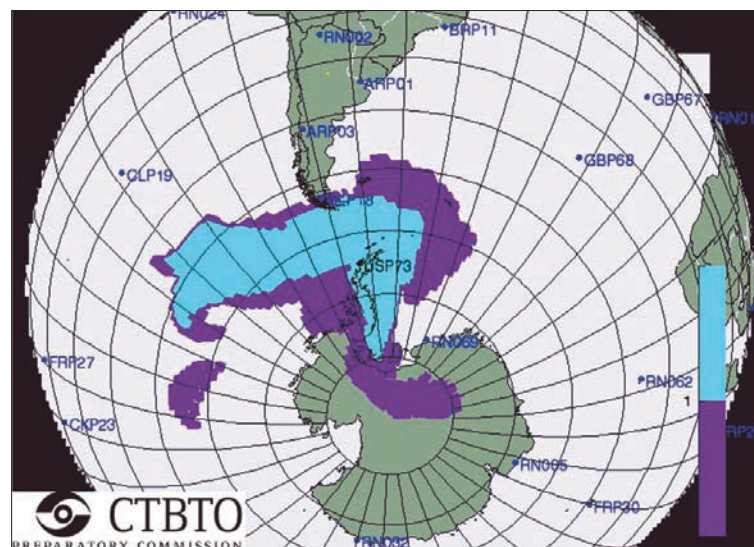


Legend : Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Level : Surface Date : 20070515 12H ech:J0



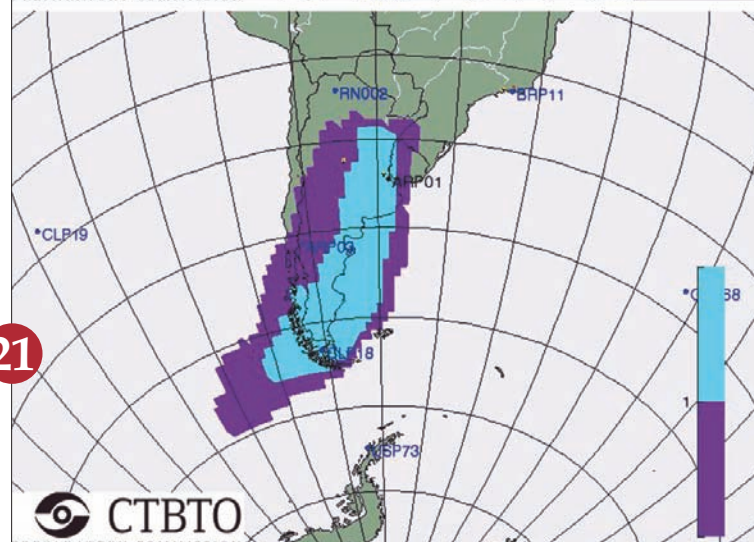
20

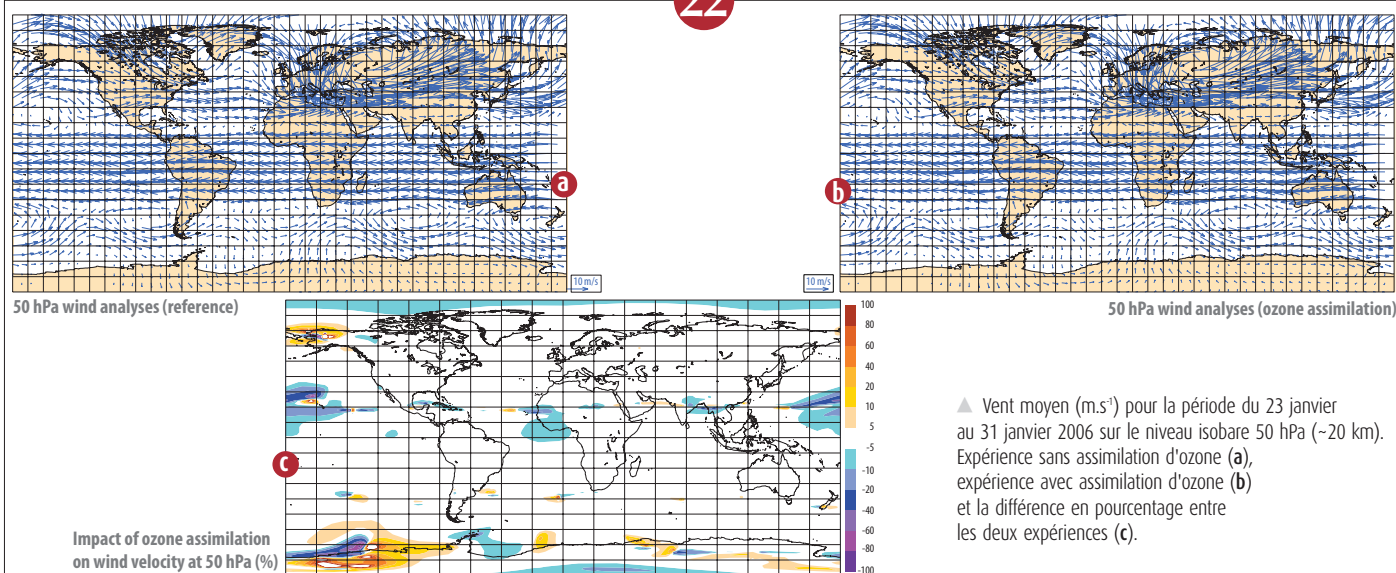
▲ Épisode exceptionnel de transport transatlantique de poussières sahariennes jusqu'en Martinique (M sur la carte), à la mi-mai 2007.



► Intersection (bleu) et union (violet et bleu) entre rétro-panaches calculés par MOCAGE et par L'Otice, pour une situation de juin 2007 sur deux sites de détection situés en Antarctique et en Argentine.

21





Assimilation d'ozone dans Arpege et impact sur la dynamique

L'assimilation de mesures satellitaires de constituants chimiques permet aujourd'hui de constituer des distributions spatio-temporelles fiables de certains gaz atmosphériques importants, comme l'ozone. Il est envisagé de retirer de l'information sur la dynamique à partir de la déformation des structures d'ozone dans la basse stratosphère. Cette information additionnelle présente un intérêt potentiel pour l'amélioration de la prévision météorologique notamment en altitude, dans les régions pauvres en observations météorologiques ou pour la moyenne échéance. Pour ce faire, deux outils ont été mis en œuvre : l'un est un système « spécialisé » pour l'assimilation de mesures chimiques, qui est basé sur le modèle de chimie-transport Mocage de Météo-France et le logiciel Palm du Cerfacs ; l'autre est une extension du système opérationnel Arpege, qui permet d'assimiler simultanément mesures météoro-

logiques et d'ozone. L'algorithme 4Dvar d'Arpege a ainsi été utilisé pour assimiler les mesures stratosphériques d'ozone du sondeur Aura/MLS en plus des observations météorologiques assimilées en opérationnel. Dans ce contexte expérimental, la variable « ozone » est considérée comme passive dans Arpege tandis que son ébauche, un champ 3D analysé d'ozone indépendant très réaliste, est fournie pour chaque cycle par Mocage-Palm.

Cet exercice d'assimilation de mesures satellitaires d'ozone dans Arpege a, pour la première fois au monde, montré un impact non-neutre, bien que modeste encore à ce stade de cette étude. L'impact principal est une légère amélioration de la prévision du vent au-delà de 24 heures d'échéance à 50 hPa (~20 km) dans les tropiques. Au vu de ces premiers résultats encourageants, les travaux en la matière vont se poursuivre en 2008. 22

Simulation de l'impact des moyens de transport sur la chimie atmosphérique et sur le climat

Le projet européen Quantify étudie les effets des transports terrestre, maritime et aérien sur l'atmosphère et le climat. Le modèle Arpege-Climat du CNRM a été adapté pour simuler l'évolution du climat sous l'influence des rejets dans l'air de ces activités. Une difficulté majeure est de faire le lien entre des phénomènes de petite échelle comme la traînée de condensation pouvant apparaître dans le sillage d'un avion avec l'échelle globale représentée par Arpege-Climat. Pour cela, un traceur du fioul consommé est adjoint au modèle, avec un temps de vie variant de 50 minutes à la surface à 2 heures vers 10 km d'altitude et représentant la durée de la perturbation locale créée par les différents moyens de transport.

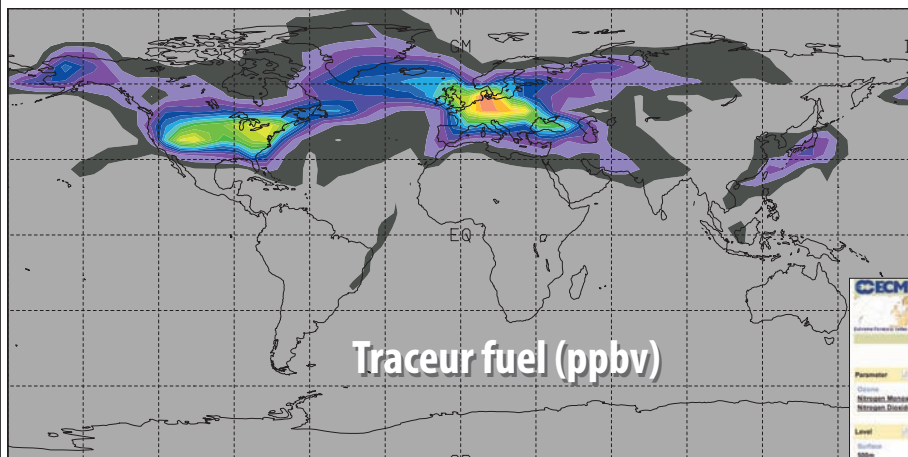
Avec ces modifications, Arpege-Climat peut prendre en compte l'effet radiatif de changements de la couverture nuageuse. L'impact chimique est également considéré via une modification de la chimie simplifiée de l'ozone qui désormais considère l'effet des principaux polluants que sont les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et la vapeur d'eau. Dans cette configuration d'Arpege-Climat, des simulations du XX^e et XXI^e siècles pourront être réalisées en 2008. Elles seront confrontées aux simulations du modèle Mocage qui représente la chimie atmosphérique de façon plus détaillée mais est plus coûteux en temps de calcul, à différentes époques de l'évolution, pendant une dizaine d'années autour des années 2000, 2050 et 2100. 23

Prévision d'ensemble de la qualité de l'air en Europe

2007 a été marqué par les premières démonstrations de prévisions d'ensemble de qualité de l'air sur l'Europe, étape décisive vers la fourniture d'un service opérationnel « de base » pan-européen. Ces travaux se situent dans le cadre des projets GEMS (6^e PCRD) et Promote (ESA), qui visent à construire le volet « Atmosphère » de l'initiative GMES. Météo-France assure un rôle de coordination conjointement avec ses partenaires de Prév'Air, et fournit les prévisions du modèle Mocage.

Des systèmes d'assimilation et de prévision de qualité de l'air couvrant l'Europe à résolution relativement fine (moins de 50 km) ont maintenant émergé, particulièrement en France avec la plateforme Prév'Air. Il apparaît intéressant de tirer partie de la dispersion des modèles pour élaborer les prévisions et estimer les probabilités d'occurrence. Depuis juillet 2007 et dans le cadre de Promote, trois modèles opérationnels (Chimere, Eurad et Mocage) sont combinés pour proposer une première démonstration aux utilisateurs potentiels. Dans GMES, un travail de fond et d'harmonisation a été réalisé sur les émissions, les conditions météorologiques et les conditions chimiques aux limites ; les modèles impliqués sont au nombre d'une dizaine et les travaux se concentrent sur l'exploitation des incertitudes propres à la modélisation chimie-transport elle-même, ainsi que sur différentes méthodologies d'ensemble envisageables.

En parallèle, un effort sans précédent de concentration en temps réel des observations de qualité de l'air à la surface dans une quinzaine de pays d'Europe a été réalisé, en collaboration avec les réseaux de mesure. Les données sont converties au format BUFR et servent pour la vérification des prévisions et pour la réalisation d'analyses. 24



Décembre 2001

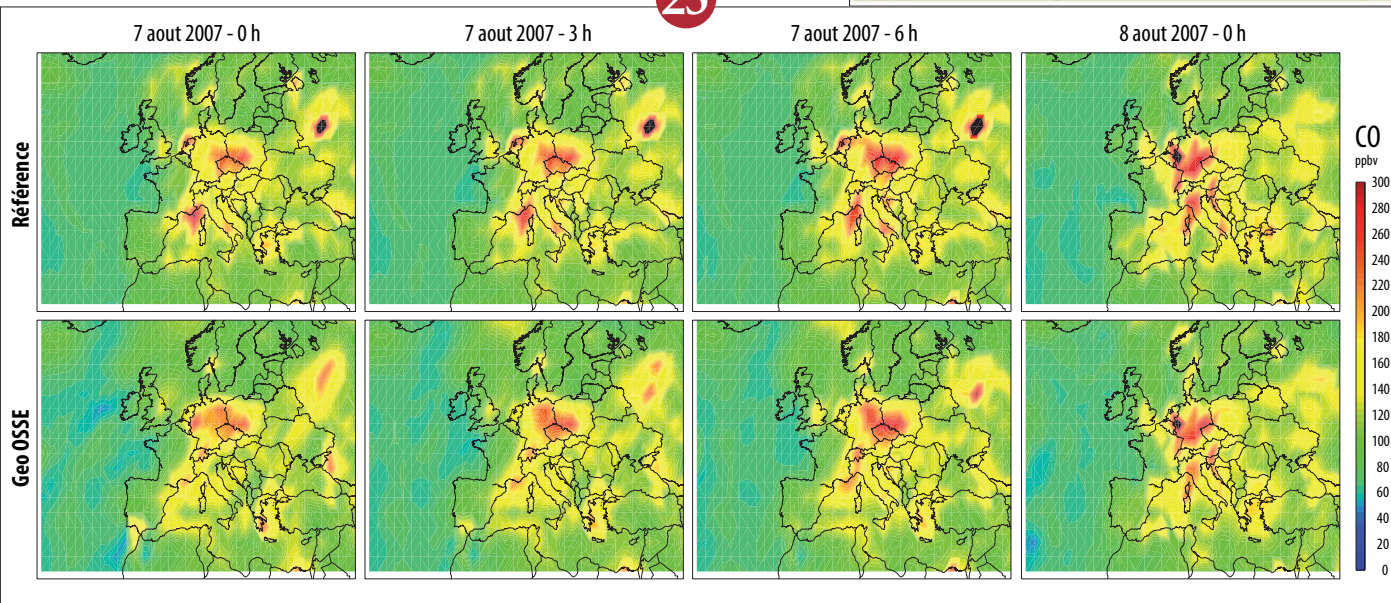
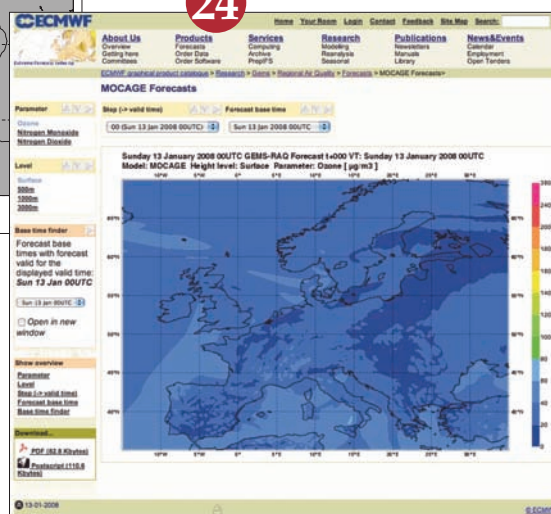
23

257,36 hPa

◀ Distribution du traceur « fioul » au niveau 250 hPa (altitude de croisière des vols subsoniques). Outre les grands centres aéroportuaires mondiaux, les grandes routes aériennes apparaissent comme le couloir nord-atlantique reliant Europe et Amérique du Nord.

▼ Expérience de système d'observation simulé (Osse) réalisée avec Mocage-Palm. L'assimilation d'observations synthétiques construites à l'aide d'une simulation de référence (haut) permet de contraindre efficacement une simulation partie d'un état initial erroné (bas). Dans le cas étudié, il faut à peu près 24 heures pour corriger l'erreur initiale.

► Sur le site internet du CEPMMT, les prévisions d'une configuration spécifique de Mocage sont présentées avec celles de plusieurs autres modèles européens. Tous contribuent à la démonstration d'un service de prévision d'ensemble des principaux polluants réglementés.



Études préliminaires pour la mesure de qualité de l'air depuis l'orbite géostationnaire

La mesure de la qualité de l'air depuis l'espace est un défi, notamment dans le contexte de l'initiative GMES. En complément des observations au sol, la mesure spatiale permettrait d'assurer une couverture spatio-temporelle complémentaire et une exploration verticale minimale des basses couches. La réflexion du consortium opérationnel Prév'Air amène à privilégier la solution d'un sondeur géostationnaire, capable d'apporter la fréquence temporelle suffisante compte-tenu des tendances chimiques et advectives pour les polluants clés : l'ozone, le NO_2 , le CO et l'épaisseur optique des aérosols.

De nombreuses questions scientifiques et techniques se posent pour la mise au point d'un instrument compatible avec une exploitation géostationnaire, et permettant des précision et sensibilité suffisantes. En collaboration avec le LA, le Lisa et la société Astrium, le CNRM contribue à cet objectif par des expériences de système d'observation simulé (Osse) : le modèle Mocage est utilisé pour simuler des observations suivant des caractéristiques (géométrie, fréquence, erreurs...) possibles pour un instrument géostationnaire ; on assimile ensuite ces observations « synthétiques » pour évaluer leur capacité à contraindre les prévisions de

qualité de l'air. Il s'agit ainsi d'éléments objectifs pour optimiser le concept instrumental.

La figure 25 illustre une Osse pour le monoxyde de carbone sur l'Europe. À partir d'une référence réalisée avec Mocage, des observations « synthétiques » sont construites. Partant d'un état initial erroné, on assimile celles-ci dans Mocage ; la simulation avec assimilation se rapproche progressivement de la référence, indiquant la capacité du système d'observation simulé à contraindre le modèle. Ces travaux se poursuivront en 2008 dans le cadre d'une collaboration internationale.

Étude du manteau neigeux et des avalanches

Un vent nouveau sur le réseau Nivôse

Depuis la première installation en 1981, le réseau de stations automatiques de haute montagne Nivôse est devenu un des éléments clé pour la prévision du risque d'avalanche. Le Centre d'études de la neige a la responsabilité du déploiement en cours d'une troisième génération de stations, qui vise à améliorer la qualité et la fiabilité des mesures.

La nouvelle station a été développée en optimisant la compatibilité sur le plan mécanique avec les infrastructures existantes afin de réduire les coûts de remplacement. Dans le même esprit, l'alimentation par batterie et panneaux solaires ainsi que la transmission satellitaire par balise Météosat ont été conservées.

La station est maintenant articulée autour de la toute nouvelle centrale d'acquisition Campbell CR1000. L'ensemble des capteurs a

été renouvelé avec notamment : l'adoption d'un anémomètre Young (vitesse et direction du vent) peu sensible aux problèmes de givrage, du nouveau capteur de hauteur de neige Campbell SR50A, d'un abri de température ventilé optimisé, etc. Un effort tout particulier a porté sur la réduction de la consommation de la station, source principale d'incidents pour la génération précédente.

Sur un total de 21 stations réparties sur les massifs alpins, pyrénéens et corses, 15 ont déjà été rénovées durant l'été 2007. À cela s'ajoutent deux nouvelles implantations dans les Alpes-du-Sud (Orcières dans le Champsaur et Millefontes dans le Mercantour), portant ainsi le nombre total de stations à 23. La saison estivale 2008 devrait marquer la suite et fin de cette cure de jouvence de l'ensemble du réseau, ainsi remis à niveau pour de longues années de service.

26

Le projet Dolmen : un transfert à l'opérationnel réussi

Débuté en février 2004, le projet Dolmen avait pour but le développement de la version 2 des applications nivologiques à usage des CDM.

Les trois objectifs majeurs de ce projet étaient :

- l'implantation de la chaîne Safran (analyse fine météorologique) - Crocus (modèle d'évolution du manteau neigeux) - Meptra (modèle d'analyse mécanique du manteau neigeux) dans un environnement 100 % opérationnel (centre de calcul toulousain et serveurs départementaux). Cette chaîne, développée par le CEN, était exploitée en mode semi-opérationnel depuis plusieurs années ; seule une petite partie des résultats était à disposition des nivologues départementaux.

- l'enrichissement de l'applicatif « Poste nivologie » permettant entre autres l'accès à l'ensemble des résultats de la modélisation. Plusieurs produits de comparaison observa-

tion/modèle permettent en particulier de juger de la pertinence de celui-ci.

- la prise en compte du nouveau codage des observations nivo-météorologiques.

Le déploiement de la version V2.3 en décembre 2007, version remplissant l'ensemble de ces objectifs, a marqué la fin du projet. Cet aboutissement technique traduit une intégration forte de l'exploitation nivologique dans l'architecture technique de l'établissement. Ce transfert s'est accompagné d'un volet formation important, que ce soit pour les utilisateurs de ces nouveaux outils en CDM ou pour les cellules informatiques régionales chargées d'en suivre l'exploitation.

Les développements ultérieurs se feront dans le cadre standard de l'établissement, le CEN conservant bien évidemment la maîtrise de l'évolution scientifique des modèles ainsi que la responsabilité technique et fonctionnelle de l'outil Dolmen.

27

Modélisation 3D de la diffusion de la vapeur d'eau dans la neige à partir d'images micro-tomographiques : application à la métamorphose d'isothermie

Placée en conditions isothermes et à température négative, la neige se transforme peu à peu en neige dure et cassante, constituée de petites formes arrondies caractéristiques des microstructures communément obtenues lors du frittage de céramiques.

Cette métamorphose est classiquement considérée comme limitée par la diffusion de la vapeur d'eau dans l'espace poreux de la structure de neige. Dans le but de valider cette hypothèse, le champ de vapeur d'eau présent dans de petits échantillons de neige a été modélisé à partir d'images tridimensionnelles obtenues par microtomographie X.

À l'aide d'algorithmes précédemment développés, le champ de courbure est tout d'abord estimé à l'interface air-glace. En utilisant l'équation de Kelvin, on peut ainsi définir les conditions aux limites de pression de vapeur à proximité immédiate de l'interface. L'équation de diffusion est ensuite résolue numériquement par une méthode itérative permettant d'obtenir, après convergence, le champ de vapeur d'eau dans l'espace poreux (figure a). Le gradient de vapeur local estimé à proximité de l'interface permet alors de calculer le taux de croissance en chaque point de l'interface (figure b).

Les résultats obtenus permettent de valider la diffusion de vapeur d'eau comme un mécanisme limitant possible pour la métamorphose d'isothermie. Il ne permet cependant pas d'invalider d'autres mécanismes pouvant intervenir dans la neige tels des phénomènes de réaction de surface ou de croissance au niveau des joints de grains.

Ce modèle, qui pourra être utilisé de manière à simuler l'évolution de petites structures de neige au cours du temps, constitue une première étape vers des comparaisons précises entre différents mécanismes.

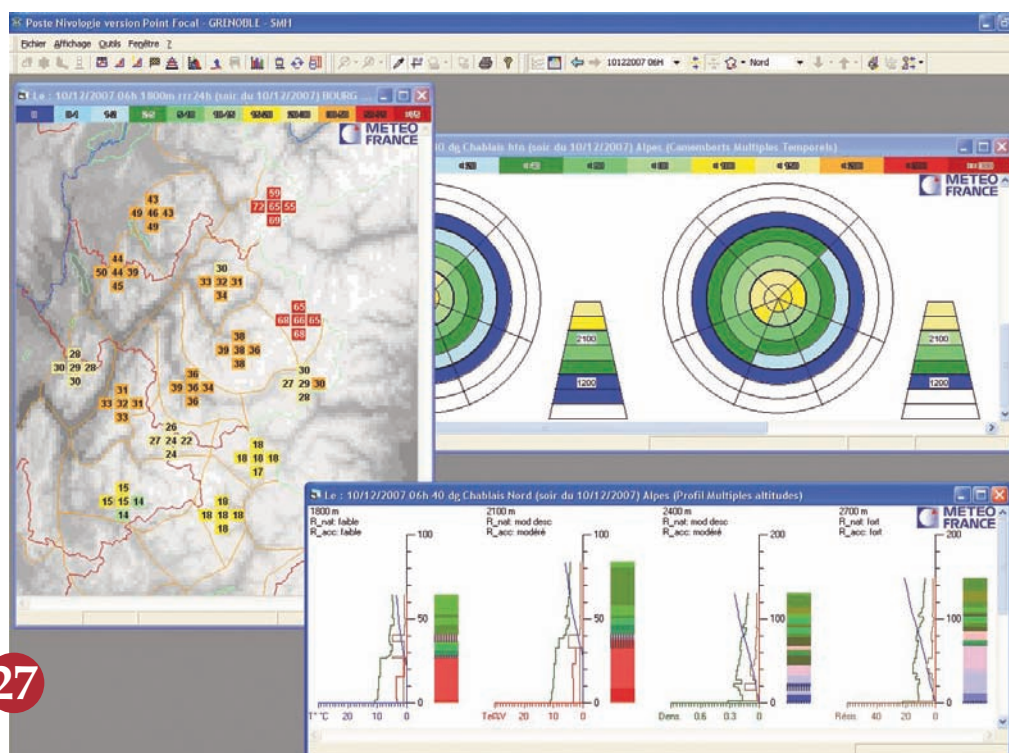
28



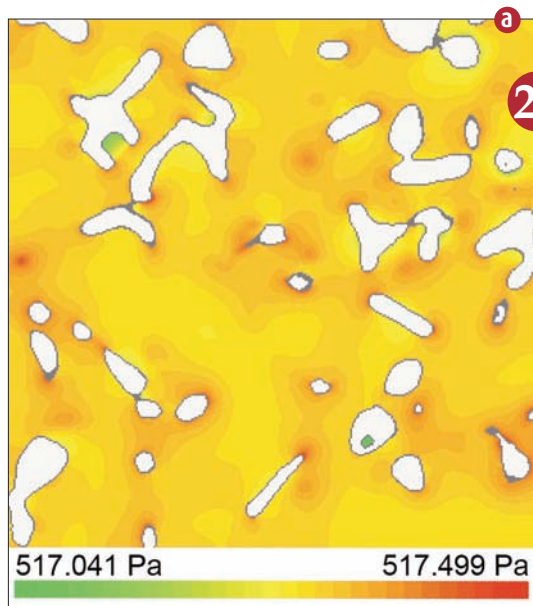
26

◀ La station Nivôse rénovée de la Meije, à 3 100 mètres d'altitude dans le massif de l'Oisans.

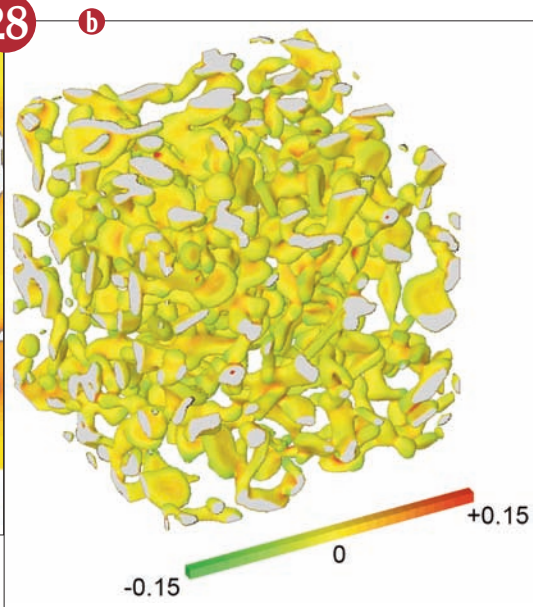
▶ Application Poste nivologie - Résultats de la modélisation SCM.
Carte de répartition des précipitations sur les massifs des Alpes-du-Nord.
Massif du Chablais : répartition des hauteurs de neige et profils simulés du manteau neigeux.



27



28



a - Une coupe 2-D du champ de pression de vapeur calculé à partir d'une image d'un échantillon de neige fraîche soumis pendant 12 jours à une métamorphose d'isothermie. Les bords de l'image mesurent environ 3 mm (300 voxels).

b - Carte des vitesses de croissance locales calculées sur une image de neige naturelle en supposant un mécanisme limité par la diffusion de vapeur dans la matrice de neige. Les bords de l'image mesurent environ 3 mm (300 voxels). Les taux de croissance varient entre -0.15×10^{-10} m/s (vert) et $+0.15 \times 10^{-10}$ m/s (rouge).

Instrumentation pour la recherche

L'action qui a le plus mobilisé les équipes instrumentales en 2007 aura été la campagne Cops, qui s'est déroulée dans les Vosges et en Allemagne durant l'été. L'année écoulée a aussi vu la naissance d'une

école d'été européenne dédiée à la mesure aéroportée : son succès a été tel que celle-ci est pérennisée en 2008. En parallèle, il faut souligner les avancées sur la préparation de la mission ADM-Aeolus.

Instrumentation aéroportée

Première école d'été Eufar

La première école d'été Eufar a été organisée, en juillet 2007, en Roumanie. Elle a accueilli pendant une dizaine de jours vingt-sept étudiants venant de toute l'Europe. Le thème de l'atelier était la théorie de la dynamique de la couche limite et des processus physiques associés. Les formateurs issus de Safire ont formé les stagiaires aux spécificités des mesures aéroportées : règles de sécurité, conception d'un plan de vol, calibrage des instruments.

Les étudiants ont d'abord assisté à des conférences sur les instruments aéroportés et leurs performances selon les configurations de vol, puis ont accompli chacun un vol de recherche sur l'avion instrumenté ATR-42 de Météo-France.

Ils ont préparé le scénario de vol, présenté les méthodes et objectifs et discuté avec

pilotes et conférenciers des conditions météorologiques et du temps de vol estimé. Durant le vol, ils devaient actualiser le scénario en fonction des conditions réellement rencontrées. Après le vol, les stagiaires ont élaboré un compte-rendu sur les activités scientifiques liées à leur vol, et présenté les résultats et les difficultés rencontrées. Les données collectées ont été ensuite analysées avec l'aide des utilisateurs des équipements aéroportés, avant que les étudiants ne rédigeant un court rapport.

Les étudiants ont particulièrement apprécié le caractère interactif de la formation, avec des contacts directs avec les pilotes, les opérateurs d'avions et les experts scientifiques. Une seconde école d'été est d'ores et déjà prévue à Utrecht aux Pays-Bas (KNMI) en avril 2008. ①

L'intégration d'un nouveau radiomètre nommé Carols sur l'ATR 42

L'ATR42 opéré par Safire est une plate forme instrumentale aéroportée qui peut être équipée de nombreux instruments existants, mais aussi d'instruments nouvellement développés, comme c'est le cas pour le radiomètre Carols (*Cooperative Airborne Radiometer for Ocean and Land Studies*). Cet instrument sera notamment utilisé dans le cadre d'une campagne de préparation à la mission du satellite Smos (*Soil Moisture and Ocean Salinity* de l'ESA).

Ce nouvel instrument, un radiomètre micro-onde en Bande L (développé par le CETP) a été installé pour la première fois sur l'ATR en septembre 2007. Deux antennes d'environ 1,5 mètre de haut ont été montées sur des provisions existantes de l'ATR, en s'affranchissant de nombreuses difficultés techniques. Très sensibles, les antennes ont dû être placées à l'extérieur du fuselage sans que cela perturbe la maniabilité de l'avion. Une antenne vise au nadir (vers le sol) et une autre à 35°, permettant ainsi d'obtenir un croisement des données reçues. Il peut être couplé ou non au radar météorologique Storm. Safire a réalisé la conception de l'intégration dans l'avion du radiomètre et du radar, ainsi que la certification de l'ensemble.

Carols permet d'estimer la salinité des océans ainsi que l'humidité des sols. L'ATR sera ainsi amené à participer à de nombreuses campagnes de mesures dans les prochaines années avec ce nouveau radiomètre. En effet, l'humidité de surface est un facteur important d'initiation des phénomènes météorologiques ; son étude est donc fondamentale. ③

La participation de Safire à la campagne Cops

Safire (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement) est l'unité mixte CNRS - Météo-France - Cnes qui opère trois avions de recherche. Deux avions de Safire (l'ATR42 et le Falcon20) ont pris part en juillet 2007 à la campagne internationale d'étude de la convection sur la Forêt noire et le Jura, baptisée Cops.

Le Falcon20 a effectué 55 heures de vol, équipé du lidar Leandre 2 (puissant laser travaillant dans les fréquences visibles et permettant de détecter la teneur en vapeur d'eau). Les vols suivaient une grille pré-définie, couvrant toute la zone d'étude, à une altitude élevée. Le Lidar, avec sa visée vers le bas, a ainsi fourni des informations capitales pour comprendre l'état de l'atmosphère lorsque la convection se développe. De plus, le Falcon a largué une vingtaine de drop-

sondes (sondes sous parachutes), qui envoient en temps réel les informations de pression, température, humidité et vent de la tranche d'air survolée.

L'ATR42 a, quant à lui, volé 10 heures dans les nuages stratiformes qui subsistent après les épisodes convectifs. Les vols étaient consacrés à l'inter-comparaison des contenus en eau surfondue (eau liquide à température négative), avec les mesures effectuées par des radars au sol.

Les avions de Safire ont apporté des éléments complémentaires aux mesures effectuées par les autres équipes internationales (allemande, anglaise, hollandaise...). Les données recueillies seront mises au service de la communauté, elles permettront de mieux comprendre les phénomènes orageux, et d'améliorer les prévisions sur cette région. ②



◀ Étudiants et formateurs réunis lors de la première école d'été Eufar sur le tarmac de l'aéroport de Iasi (Roumanie), à côté de l'ATR42 de Météo-France.

1

▶ L'ATR42 et le Falcon 20 opérés par Safire stationnent sur le site de l'aéroport de Baden Airpark, en juillet 2007, dans le cadre de la campagne Cops.



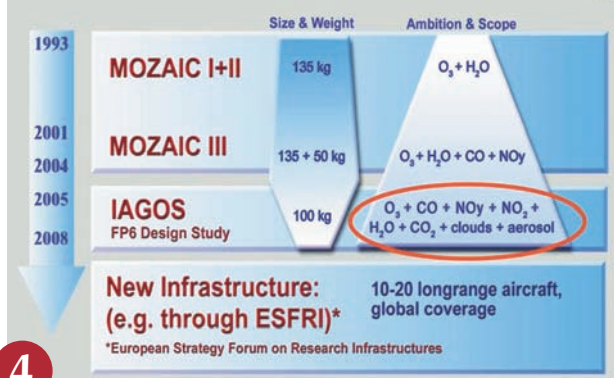
2



3

▲ Installation en cabine du radiomètre Carols (l'antenne est recouverte d'une régulation thermique jaune sur la photo). L'antenne inclinée apparaît au premier plan et au bout de la travée, on peut apercevoir l'antenne verticale. La combinaison de ces mesures sous deux angles différents permet de mesurer l'humidité de surface.

IAGOS: From MOZAIC to Sustainability



4

▶ Calendrier et ambitions des projets Mozaic et Iagos.

Infrastructure pour l'observation en routine de paramètres physico-chimiques à partir d'avions de lignes

Le projet Iagos vise à créer une infrastructure pour la collecte en routine d'observations physico-chimiques réalisées sur des avions de ligne Airbus. Il s'appuie sur l'expérience acquise depuis 1994 dans les projets de recherche Mozaic dédiés à la surveillance de l'environnement à l'échelle globale et aux impacts climatiques potentiels. Si Iagos s'intègre dans la composante Igaco (chimie atmosphérique) des systèmes d'observation mondiaux de l'OMM, il répond également aux besoins en observations des futurs centres de prévision de la qualité de l'air de l'initia-

tive GMES, pilotée par l'Union européenne et l'Agence spatiale européenne. Les études de conception en cours visent à faciliter la participation des compagnies aériennes et à équiper, d'ici dix ans, une vingtaine d'avions. Le CNRM et la DSO préparent la distribution des observations aux services opérationnels en réutilisant de façon optimale les systèmes mis en place dans le cadre de l'Amdar (collecte des observations météorologiques des avions). En 2007, la nécessité d'utiliser un équipement de bord nouveau a été démontrée. Celui-ci interfacera les instruments de

mesure (ozone, vapeur d'eau, oxydes d'azote, monoxyde et dioxyde de carbone, gouttelettes de nuage et aérosol) avec les systèmes de transmission. L'adaptabilité aux configurations les plus courantes des avions et à l'évolution possible de l'instrumentation physico-chimique est un critère essentiel pour la viabilité de l'infrastructure. La phase préparatoire du projet Iagos a été retenue par le 7^e PCRD. Elle démarrera en septembre 2008 et définira le fonctionnement opérationnel sur les plans juridique, économique et technique.

4

Instrumentation *in situ* - télédétection

Reconstruction du champ de vent tri-dimensionnel à partir des radars météorologiques du réseau Aramis

La dopplérisation du réseau de radars météorologiques Aramis consiste à équiper tous les radars d'une capacité doppler afin d'obtenir des mesures de vitesse radiale à haute résolution (1 km²) dans les régions précipitantes jusqu'à 250 km des radars. La finalisation de cette opération pour les 24 radars du réseau Aramis devrait être effective fin 2008. En 2007, le réseau comporte une quinzaine de radars doppler dont les données de vitesses radiales sont sur le point d'être assimilées opérationnellement par le modèle Arome. Des tests ont déjà démontré objectivement et subjectivement l'impact positif de ces mesures sur la qualité des prévisions.

Les données doppler sont en général difficiles à interpréter car le radar ne mesure que la projection du vecteur vent le long de son axe de visée. Le fait de disposer d'un réseau relativement dense de radars doppler permet néanmoins de combiner les mesures afin d'accéder au vecteur vent complet (u, v, w) dans tout le volume précipitant. C'est dans cette optique qu'un démonstrateur temps réel a été réalisé

sur le nord de la France dans le cadre du projet européen Flysafe, pour un domaine de taille 320 x 320 km² et de résolution horizontale 2,5 km défini autour des aéroports de Roissy et d'Orly : depuis fin 2006, les données doppler et volumiques de six radars (Trappes, Abbeville, Arcis, Falaise, Avesnes et Bourges) sont concentrées et combinées en temps réel toutes les 15 minutes.

De nombreuses situations précipitantes de différents types ont été analysées (passages frontaux, lignes de grains, dépressions...). Les vents reconstruits ont été évalués par comparaison avec des données de profileurs et également par le biais de simulations numériques. Ces études ont montré qu'il était possible d'obtenir des informations tout à fait cohérentes sur la structure méso-échelle de l'écoulement tridimensionnel dans les régions précipitantes.

Au vu de ces résultats très positifs, le Groupe des utilisateurs radar (GUR) a recommandé la mise en opérationnel d'une mosaïque radar nationale de vent et réflectivité 3D à horizon 2009. 5

Dispositif instrumental déployé pendant la campagne Cops

L'agence de recherche allemande finance un programme de recherche sur la prévision quantitative des précipitations. Un élément clé de ce programme a été la réalisation d'une campagne de mesures internationale baptisée Cops (Étude des précipitations convectives induites par l'orographie). Celle-ci s'est déroulée de juin à août 2007 dans le Sud-Ouest de l'Allemagne et l'Est de la France, sur un domaine couvrant essentiellement les Vosges et la Forêt noire. Plusieurs organismes français ont participé à cette campagne (Laboratoire d'aérodynamique, Institut Pierre-Simon-Laplace, IGN, Lamp, Safire, CNRM/GMEI...). Météo-France a été impliqué sur plusieurs aspects dont le déploiement par le CNRM de moyens d'observations sur un « super site » à Meistratzheim (20 km au sud de Strasbourg) durant tout le mois de juillet 2007.

L'instrumentation comprenait : deux stations de bilan d'énergie avec des mesures du profil d'humidité et de température du sol, un scintillomètre mesurant le flux de chaleur sensible sur un parcours de plus de 3 km. Pour documenter la structure verticale de l'atmosphère et notamment celle des basses couches, le CNRM a installé un télémètre laser modifié, un profileur de vent UHF et un sodar complétés par la réalisation de près de 110 radiosondages envoyés en temps réel sur le système mondial de transmission.

Quotidiennement des visualisations graphiques de l'ensemble des instruments étaient envoyées vers le centre des opérations à Baden Baden en Allemagne où une station Synergie avait été mise à disposition. Des prévisionnistes de la DIRNE se sont également relayés pour préparer des prévisions personnalisées à l'usage des scientifiques de la campagne et des pilotes des avions instrumentés. Cet échange entre chercheurs et prévisionnistes de différents pays européens fût une expérience très enrichissante pour les deux communautés. 7

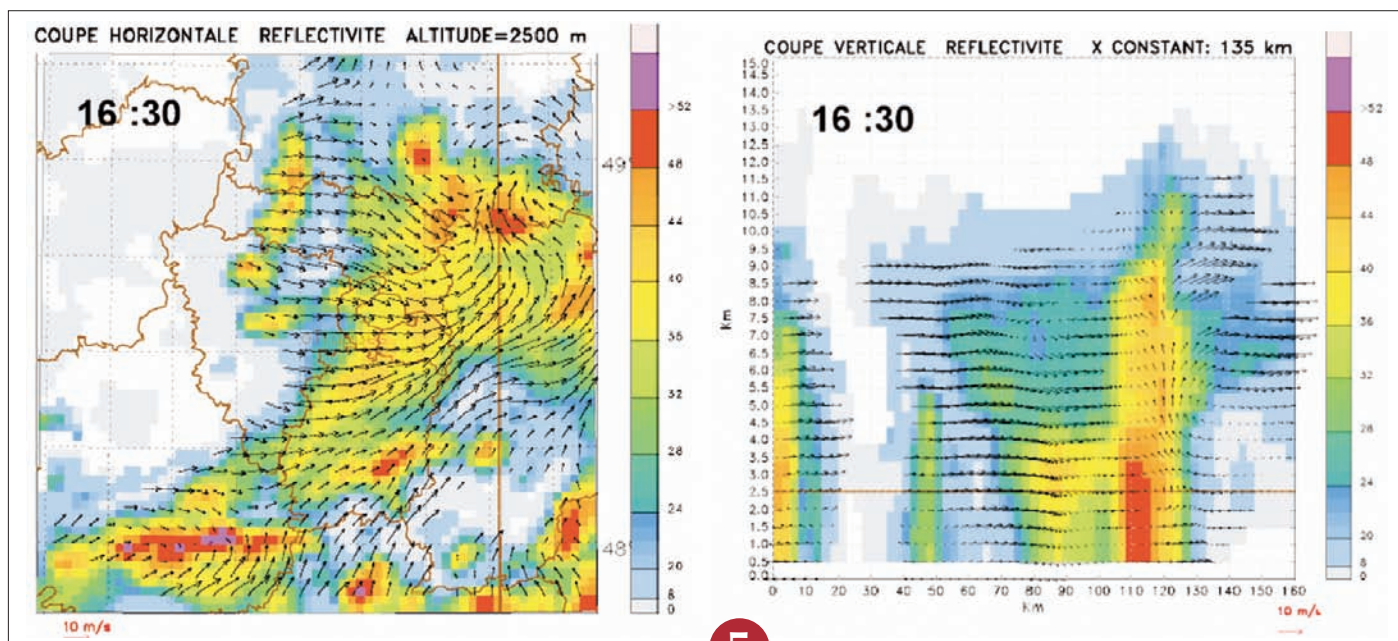
Mesures météorologiques pendant la campagne Cirene

La campagne Cirene, mise en œuvre par le Locean dans la région 55° E-80° E, 10° S-3° S de l'océan Indien, visait à mieux comprendre le couplage océan-atmosphère à l'échelle intra-saisonnière, et à expliquer les mécanismes de la variabilité de la température de surface ainsi que l'influence de cette variabilité sur la colonne atmosphérique. Cette variabilité conditionne l'activité de la mousson, et peut contribuer au développement d'un phénomène El Niño.

Conjointement à la campagne Vasco, mettant en œuvre des Aéroclippers et des ballons pressurisés depuis les Seychelles, cette campagne océanographique a eu lieu sur le navire *Le Suroit* en janvier et février 2007. Le CNRM a participé à cette campagne dans le cadre d'une collaboration avec le CETP et la DT/Insu permettant d'équiper les navires de l'Ifremer en mesures des flux turbulents de chaleur sensible et latente et de mesures de

précipitations. L'instrumentation comprenait des mesures de turbulence, température, humidité, pression et de rayonnement, généralement doublées pour en améliorer la fiabilité. Outre la reconduction du dispositif déjà utilisé sur le navire océanographique *l'Atalante* pendant la campagne Amma-Egee en 2006, l'utilisation du navire océanographique *Le Suroit* a nécessité l'installation d'un mât spécifique de 11 mètres pour réaliser les mesures de vent et des flux radiatifs dans de bonnes conditions, limitant ainsi l'influence de la structure du navire. Pour documenter la structure verticale de l'atmosphère, entre 2 et 8 radiosondages ont été réalisés chaque jour, et étaient transmis en temps réel sur le système mondial de transmission.

Le jeu de données unique recueilli contribuera à une meilleure connaissance des phénomènes atmosphériques en jeu dans cette région. 6



5

▲ Coupes horizontale à 2 500 m (gauche) et coupe verticale nord-sud restitués à partir des données de Trappes, Abbeville et Arcis-sur-Aube, le 23 juin 2006 à 16 h 30 TU, lors d'un système convectif particulièrement intense. Le domaine, centré sur Trappes, a une taille de 160 x 160 km² et une résolution de 2,5 km. En couleurs figure le champ de réflectivité. Les zones sans flèche correspondent aux zones non précipitantes pour lesquelles on ne dispose pas de mesures de vent. En dépit de la distance relativement importante entre radars, on voit qu'il est possible de restituer des structures d'échelle convective.



6

▲ Le navire océanographique *Le Suroit* équipé de son mât au port de Victoria (Seychelles). Sur la proue, une nacelle Aéroclipper installée pour une inter-comparaison avec le mât instrumenté.

▼ Lâcher de ballon à Meistratzheim.



7

Contribution de la DIRNE à la campagne Cops

La campagne Cops a mobilisé des équipes du CNRM pour les aspects instrumentaux et la modélisation, mais la Direction interrégionale Nord-Est (DIRNE) s'y est également notablement impliquée.

Ainsi, en préparation de la campagne, les prévisionnistes de Strasbourg ont aidé à définir les lieux d'implantation des instruments de mesure. Au cours du mois de juillet 2007, le centre de Nancy a doublé le nombre de radiosondages avec des lâchers supplémentaires aux réseaux 6 et 18 heures TU.

Lors de la phase opérationnelle des mesures embarquées par avion, la DIRNE a fourni une assistance météorologique. Du 7 juillet au 5 août, la présence alternée d'un prévisionniste français au centre d'opérations a été assurée par rotation par période de 4 à 6 jours, aux côtés successivement d'un prévisionniste allemand et suisse. Un poste de tra-

vail Synergie, outil de travail habituel des prévisionnistes à Météo-France, a été installé sur place, avec possibilité pour le prévisionniste d'utiliser les résultats du prototype Arome.

Ce contact de proximité avec les pilotes et les scientifiques a permis de répondre efficacement à leurs besoins opérationnels, afin de planifier au mieux les vols des avions instrumentés durant les Périodes d'Observation Intensive (POI).

Cette expérience aura été enrichissante à plusieurs points de vue : confrontation à des utilisateurs aéronautiques exigeants, adaptation aux besoins particuliers des scientifiques, méthodes de travail différentes des prévisionnistes allemands et suisses... Les organisateurs de Cops ont adressé leurs félicitations pour cette assistance météorologique et l'important rôle joué dans les prises de décision.

8

Préparation de la mission spatiale ADM-Aeolus

La mission ADM-Aeolus de lidar vent spatial de l'Agence spatiale européenne (ESA) aborde la dernière ligne droite, avec une date de lancement aujourd'hui planifiée pour mi-2009.

En 2007, le CNRM a poursuivi ses activités sur les processeurs de niveau 1b (vents datés et localisés mais non corrigés des effets de température et pression atmosphérique), 2a (produits optiques) et 2b (vents assimilables). Le processeur de niveau 1b est aujourd'hui pratiquement achevé. En ce qui concerne le niveau 2a, deux versions successives de son prototype ont été livrées. Par ailleurs, une activité sur la calibration radiométrique du lidar spatial que ce processeur requiert a été initiée. Le processeur de niveau 2b a progressé dans le cadre d'un travail commun avec le CEPMMT et le service météorologique néerlandais KNMI. La contribution du CNRM a porté principalement sur le développement d'une version « portable » destinée aux services météorologiques souhaitant assimiler eux-mêmes les données ADM.

Du côté du démonstrateur aéroporté (ADM Airborne Demonstrator ou A2D), l'année a été riche, puisque le système a pu être testé au sol au cours de deux campagnes, puis en vol à bord du Falcon20 du DLR. Une deuxième campagne aéroportée est prévue en 2008.

La mise en place de la calibration - validation en vol du lidar spatial a démarré. L'ESA a lancé un appel d'offres sur lequel le CNRM s'est positionné. Reprenant le programme de travail qui avait été soumis au CNES, la réponse de notre laboratoire coordonne les efforts de cinq instituts de recherche français.

10

Mesure des flux turbulents par scintillométrie

La mesure des flux turbulents de chaleur sensible, de chaleur latente ou de dioxyde de carbone à la surface s'appuie principalement sur deux méthodes. La première utilise des mesures simultanées des gradients verticaux de la quantité considérée et du vent, alors que la seconde repose sur les mesures des fluctuations turbulentes par des instruments fonctionnant à haute cadence (dizaine de hertz) et le calcul de leur corrélation. La représentativité spatiale de ces mesures est, en général, de l'ordre de quelques centaines de mètres. Il s'agit là d'une limitation importante lorsque l'on cherche à déterminer ou à évaluer les paramétrisations de modèles de surface fonctionnant avec une résolution de quelques kilomètres.

Plus récemment, les méthodes par scintillométrie, basées sur la scintillation d'une onde lumineuse en présence d'un flux de chaleur, se sont développées. La mesure des flux de chaleur sensible et de quantité de mouvement a désormais fait preuve de fiabilité. L'intérêt de cette méthode repose principalement sur l'échelle spatiale de sa

représentativité qui peut aller jusqu'à une dizaine de kilomètres. Le CNRM s'est doté d'un tel système et l'a déployé pendant la campagne Cops sur un parcours de 3 kilomètres, soit une échelle largement comparable à celle d'Arome. Les mesures du scintillomètre ont été confrontées à celles issues d'une station fonctionnant selon la méthode des fluctuations turbulentes, la confrontation entre les deux mesures est très satisfaisante.

Des progrès de cette méthode sont encore à attendre, notamment pour la mesure d'autres flux comme l'évaporation. Alors que la scintillométrie visible est sensible aux variations de température, le développement d'une scintillométrie dans d'autres gammes de longueur d'onde comme les micro-ondes est plus sensible aux variations d'humidité.

Le CNRM travaille avec le Cesium à la validation d'un prototype développé par ce laboratoire. Une telle méthodologie serait d'un grand intérêt pour établir des bilans hydriques sur des échelles spatiales proches de celle de nos modèles.

9



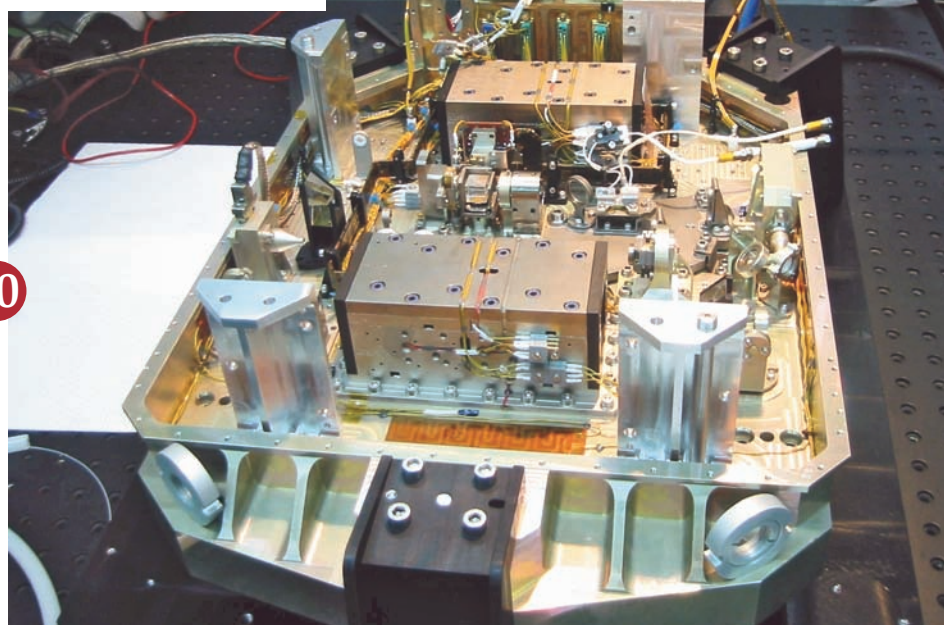
8

▲ Analyse des premiers résultats scientifiques issus du vol du Falcon20 le 19 juillet, lors d'un débriefing sur le site de Baden Baden.



9

◀ Le scintillomètre du CNRM déployé pendant la campagne Cops.



10

► Émetteur laser d'ADM-Aelous. Les deux unités d'amplification (les deux blocs rectangulaires) contiennent chacune huit piles de diodes laser.

Communication et valorisation

La communication et la valorisation des activités de recherche font partie intégrante des activités du CNRM. En ce domaine, il faut noter deux actions majeures en 2007 : d'une part la réponse à de nombreuses sol-

licitations médiatiques sur le thème du changement climatique ; d'autre part, l'ouverture d'un portail d'archives ouvertes pour favoriser la diffusion des publications scientifiques de l'Établissement.

Communication

La sensibilisation à la problématique du changement climatique

La publication du IV^e rapport du Giec, puis l'attribution et la remise du prix Nobel aux experts internationaux ayant contribué à ses travaux, ont fait la une de l'actualité en 2007. Dans ce contexte, les sollicitations médiatiques auprès des scientifiques de Météo-France, et du CNRM particulièrement, ont été fort nombreuses.

La plupart des journaux de vulgarisation scientifique (*Science & Avenir*, *Pour la Science*, *La Recherche*, *Science & Vie*...) ont consacré un numéro spécial au changement climatique en 2007. Des contributions de chercheurs du CNRM ou de la DCLim ont été systématiquement proposées et retenues par le comité éditorial de ces revues. La presse nationale

généraliste, écrite, télévisuelle ou radiophonique, s'est également emparée du dossier : de nombreuses interviews et reportages ont été réalisés.

Les chercheurs du CNRM sont également intervenus dans environ 80 conférences sur cette thématique, l'orientation des débats pouvant parfois être très scientifiques ou très grand public. En terme de communication interne, plusieurs événements ont été organisés sur le site de la Météopole : présentation des travaux du GT1 du Giec au CIC (250 personnes), série de cinq séminaires CNRM sur ce thème (100 personnes environ lors de chaque séance), interventions après des projections du film *Une vérité qui dérange*. Les

efforts de formation en interne se sont également poursuivis avec l'organisation, en coopération avec l'ENM, de deux stages « changement climatique » : ce sont au total plus de 100 agents de Météo-France qui sont maintenant armés pour pouvoir répondre localement aux sollicitations en la matière. L'ensemble de ces actions a permis de faire mieux connaître l'importance des travaux menés à Météo-France sur le thème du climat, et de sensibiliser nos concitoyens aux enjeux du réchauffement de la planète. Cette démarche se poursuivra en 2008, avec notamment pour la première fois la mise en place d'un stage de formation externe sur ce thème. 1

La nouvelle archive ouverte HAL Météo-France

L'archive ouverte HAL Météo-France a été mise en service le 3 octobre 2007. Cet entrepôt électronique de publications scientifiques en texte intégral rassemble des articles parus dans des revues à comité de lecture, des thèses, des habilitations à diriger des recherches et des communications de congrès. Il est intégré à HAL, archive ouverte pluridisciplinaire développée par le Centre pour la communication scientifique directe (CCSD) du CNRS. HAL Météo-France valorise et pérennise la production scientifique de

l'établissement qui, par cette création, s'inscrit dans le mouvement du libre accès aux résultats de la recherche scientifique. Comme l'ensemble des archives ouvertes développées dans le monde, HAL Météo-France est aussi un moyen pour les chercheurs des pays du Sud d'accéder plus facilement aux textes scientifiques les plus récents.

Les dépôts sont effectués par les auteurs, dans le respect des droits des éditeurs, avec le soutien des documentalistes de Météo-France. Si l'archivage en texte intégral n'est

pas autorisé par l'éditeur, seules les données bibliographiques sont mises en ligne. Un ensemble de documents d'aide au dépôt est disponible sur Intramet. HAL Météo-France marque la première étape de la rénovation du système de documentation scientifique et technique de l'Établissement. 2



◀ Serge Planton, responsable de la recherche sur le climat à Météo-France, accompagné de Joël Collado (prévisionniste à Météo-France, intervenant spécialisé sur France Inter - France Info), donnent une conférence sur le changement climatique en marge du festival « Jazz in Marciac », le 7 août 2007.

MÉTÉO FRANCE
Toujours un temps d'avance

Archive ouverte HAL Météo-France

[english version] [manuel] [à propos] [RSS]

[s'authentifier]

HAL Météo-France

Publications scientifiques de Météo-France en libre accès

Hal Météo-France permet de consulter les publications scientifiques de Météo-France et de les déposer en ligne.

Si vous souhaitez être prévenu de chaque nouvelle publication, **abonnez-vous...**

Si vous souhaitez déposer :

- Pour un premier dépôt, **inscrivez-vous...**
- Vous êtes déjà inscrit, **authentifiez-vous...**

contact : hal-meteofrance@ccsd.cnrs.fr

Nombre de documents
57

Contact
support.ccsd.cnrs.fr
hal-meteofrance@ccsd.cnrs.fr

Liens
RoMEO : Politique des éditeurs & archives ouvertes

Les 5 derniers dépôts
21st century climate change scenario for the Mediterranean us a coupled Atmosphere-Ocean Regional Climate Model, Somot Samuel
Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean S for the 21st century using a high-resolution ocean circulation model Somot Samuel
A cyclogenesis evolving into two distinct scenarios and its implications for short-term ensemble forecasting, Plu Matthieu
On the causation of sea level rise the Eastern Mediterranean during the 1990s, Tsimplis Mikis
Relevance of ERA40 dynamical downscaling for modeling deep convection in the North-Western Mediterranean Sea, Herrmann Mark

► Portail d'accueil de HAL Météo-France.

Publications

Liste des publications scientifiques 2007

En plus clair, les publications dont un des auteurs est évalué par la recherche, et n'est ni en détachement, ni mis à disposition.

Publications scientifiques dans des revues de rang « A »

- Ahmadov R., C. Gerbig, R. Kretschmer, S. Koener, B. Neininger, A.J. Dolman, C. Sarraz, 2007 : Mesoscale covariance of transport and CO₂ fluxes: evidence from observations and simulations using the WRF-VPRM coupled atmosphere-biosphere model, *J. Geophys. Res.*, 112, D22107, doi:10.1029/2007JD008552.
- Andersson E., Holm E., Bauer P., Bejaars A., Kelly G.A., McNally A.P., Simmons A.J., Thepaut J.-N. and Tompkins A. M., 2007 : Analysis and forecast impact of the main humidity observing systems. *Q J ROY METEOR SOC* 133 (627): 1473-1485 Part B JUL 2007.
- Auer I., Boehm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., ..., Mestre, O., Moisselin, J.-M., and al, 2007 : HISTALP - historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *INT J CLIMATOL* 27 (1): 17-46 JAN 2007.
- Auger L. and B. Legras, 2007 : Chemical segregation by heterogeneous emissions. *Atmospheric Environment*, 41, 2303-2318.
- Auigné T, 2007. An objective approach to modeling radiances: application to AIRS biases in satellite and AMSU-A. *Q J ROY METEOR SOC* 133 (628): 1789-1801 Part A OCT 2007
- Auigné T, McNally A.P. and Dee D.P., 2007 : Adaptive bias correction for satellite data in a numerical weather prediction system. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 133, 631-642.
- Auigné T. and McNally A.P., 2007 : Interaction between bias correction and quality control. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 133, 643-653.
- Baghdadi N., Aubert M., Cerdan O., Franchistéguy L., Viel C., Martin E., Zribi M. and Desprats J.-F., 2007 : Operational mapping of soil moisture using synthetic aperture radar data: application to Touch basin (France). *Sensors Journal*, vol. 7, pp. 2458-2483.
- Baker B. and J.-L. Brenguier, 2007 : Radar and In-Situ Observations of Small Cumulus: Physical Interpretations of Radar Bragg Scatter, *Quart. J. Roy. Meteorology*, 133(628) : 1677 -1692.
- Baret F., O. Hagolle, B. Geiger, P. Bicheron, B. Miras, M. Huc, B. Berthelot, M. Weiss, O. Samain, J.-L. Roujean et M. Leroy, 2007 : LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 1 : Principles of the algorithm, Remote Sensing of Environment, 110, 275-286.
- Bergot T., E. Terradellas, J. Cuxart, A. Mira, O. Liechti, M. Mueller and N. Woetmann Nielsen, 2007 : Intercomparison of single-column numerical models for the prediction of radiation fog. *J. Appl. Meteorol.*, 46, 504-521.
- Bock O., F. Guichard, S. Janicot, J.-P. Lafore, M.-N. Bouin and B. Sultan, 2007 : Multiscale analysis of precipitable water vapor over Africa from GPS data and ECMWF analyses, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L09705, doi : 10.1029/2006GL028039.
- Boé J., Terray L., Habets F., Martin E., 2007 : Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydrometeorological studies. *International Journal of Climatology*, DOI:10.1002/joc.1602.
- Bormann N. and Thepaut J.-N., 2007 : Assimilation of MIPAS limb radiances in the ECMWF system. I: Experiments observation with a 1-dimensional operator, *Q J ROY METEOR SOC* 133 (623): 309-327 Part B JAN 2007.
- Bourras D., G. Reverdin, G. Caniaux and S. Belamari, 2007 : A nonlinear statistical model of turbulent air-sea fluxes. *Mon. Wea. Rev.*, 135, (3), 1077-1089, doi : 10.1175/MWR3335.1.
- Bousquet O., Tabary P. et al., 2007 : On the value of operationally synthesized multiple-Doppler wind fields - art. no. L22813, *GEOPHYS RES LETT* 34 (22): 22813-22813 NOV 29 2007.
- Bousserez N., J.-L. Attié, V.-H. Peuch, M. Michou, G. Pfister, D. Edwards, M. Avery, G. Sachse, E. Browell and E. Ferrare, 2007 : Evaluation of MOCAGE chemistry and transport model during the ICARTT/ITOP experiment, *J. Geophys. Res.*, 112 (D120S42), doi: 10.1029/2006JD007595.
- Buizza R, Cardinali, C. Kelly, G, Thepaut J.-N, 2007 : The value of observations. II: The value of observations located in singular-vector-based target areas. *Q J ROY METEOR SOC* 133 (628): 1817-1832 Part A OCT 2007.
- Burnet F. and Brenguier, J.-L, 2007 : Observational Study of the Entrainment-Mixing Process in Warm Convective Clouds, *J. Atmos. Sci.*, 64, 1995-2011.
- Caballero Y., P. Chevallier, A. Boone, F. Habets and J. Noilhan, 2007: Calibration of the Interaction Soil Biosphere land-surface scheme on a small tropical high mountain basin (Cordillera Real, Bolivia). *Wat. Res. Research*, 43, doi:10.1029/2005WR004490.
- Caballero Y., S. Voirin-Morel, F. Habets, J. Noilhan, P. LeMoigne, A. Lehenaff, A. Boone, 2007: Hydrological of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, 43, Doi: 10.1029/2005WR004192.
- Calvet J.-C., A. Gibelin, J. Roujean, E. Martin, P. LeMoigne, H. Douville and J. Noilhan, 2007 : "Past and future scenarios of the effect of carbon dioxide on plant growth and transpiration for three vegetation types of southwestern France", *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 7, 4761-4779. ([http : //www.copernicus.org/EGU/acp/acpd/7/4761/acpd-7-4761.pdf](http://www.copernicus.org/EGU/acp/acpd/7/4761/acpd-7-4761.pdf)).
- Cardinali C., Buizza R, Kelly G., Shapiro M., Thepaut, J.-N., 2007 : The value of observations. III: Influence of weather regimes on targeting. *Q J ROY METEOR SOC* 133 (628): 1833-1842 Part A OCT 2007.
- Carolle D. and H. Teyssède, 2007 : a revised linear ozone photochemistry parameterization for use in transport and general circulation models: multi-annual simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol 7, Pages : 2183-2196.
- Catry B., J.-F. Geleyn, M. Tudor, P. Bénard and A. Trojakova, 2007 : Flux-conservative thermodynamic equations in a mass-weighted framework. *Tellus*, 59A, pp. 71-79.
- Chaboureaud J.-P., Tulet P., Mari C., 2007. Diurnal cycle of dust and cirrus over West Africa as seen from Meteosat Second Generation satellite and a regional forecast model. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02822, doi: 10.1029/2006GL027771.
- Chauvin F. and S. Denvil, 2007 : Changes in severe indices as simulated by two French coupled global climate models. *Global and Planetary Change*, 57 (1-2), 96-117.
- Chen J., R. J. Griffin, A. Grini and P. Tulet, 2007 : Modeling secondary organic aerosol formation through cloud processing of organic compounds. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5343-5355.
- Chevalier A., F. Gheusi, R. Delmas, C. Ordóñez, C. Sarraz, R. Zbinden, V. Thouret, G. Athier and J.-M. Cousin, 2007 : Influence of altitude on ozone levels and variability in the lower troposphere: a surface-measurements based study for western Europe over the period 2001-2004. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4311-4326.
- Chevrot S., Sylvander M., Benahmed S., Ponsolles C. Lefevre J.-M., Paradis D., 2007 : Source locations of secondary microseisms in western Europe:

- Evidence for both coastal and pelagic sources. *J GEOPHYS RES-SOL EA 112 (B11)*: - NOV 1 2007
- Chosson F., J.-L. Brenguier and L. Schüller, 2007 : Entrainment-mixing and radiative transfer simulation in boundary-layer clouds. *J. Atmos. Sci.*, 64, 2670-2682.
- Clark H.L., M.-L. Cathala, H. Teyssède, J.-P. Cammas and V.-H. Peuch, 2007 : Cross-tropopause fluxes of ozone using assimilation of MOZAIC observations in a global CTM, *Tellus*, 59B, 39-49.
- Conil S., H. Douville, S. Tyteca, 2007, "The relative roles of soil moisture and SST in climate variability explored within ensembles of AMIP-type simulations". *Climate Dyn.*, 28, 125-145, doi: 10.1007/s00382-006-0172-2.
- Courault D., Drobinski Ph., Brunet Y., Lacarrere P., Talbot C., 2007 : Impact of surface heterogeneity on a buoyancy-driven convective boundary layer in light winds, *Boundary layer meteorology*, doi: 10.1007/s10546-007-9172-y.
- Couvreux F., F. Guichard, V. Masson and J.-L. Redelsperger, 2007 : Negative water vapour skewness and dry tongues in the convective boundary layer: observations and LES budget analysis. *Boundary Layer Meteorology*, 123, 269-294.
- Cuvelier C., P. Thunis, R. Vautard, M. Amann, B. Bessagnet, M. Bedogni, R. Berkowicz, F. Brocheton, P. Builtjes, C. Carnavale, A. Coppalle, B. Denby, G. Douros, A. Graf, O. Hellmuth, C. Honore, J. Jonson, A. Kerschbaumer, F. de Leeuw, E. Minguzzi, N. Moussiopoulos, C. Pertot, V.H. Peuch, G. Pirovano, L. Rouil, F. Sauter, M. Schaap, R. Stern, L. Tarrason, E. Vignati, L. Volta, L. White, P. Wind, A. Zuber, 2007 : CityDelta, a model intercomparison study to explore the impact of emission reductions in European cities in 2010, *Atmos. Env.*, ATMENV-D-06-00252R1, *Atmos. Env.*, 41(1), 189-207.
- Decharme B. and H. Douville, 2007: "Global validation of the ISBA Sub-Grid Hydrology". *Climate Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-006-0216-7.
- Delon C., C.E. Reeves, D.J. Stewart, D. Serça, R. Dupont, C. Mari, J.-P. Chaboureaud and P. Tulet, 2007 : Nitrogen Oxide biogenic emissions from soils: impact on NOx and ozone formation in West Africa during AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analysis). *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 7, 15155-15188.
- Descamps L. and O. Talagrand, 2007: On some aspect of the definition of initial conditions for ensemble prediction. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 3260-3272.
- Descamps L., D. Ricard, A. Joly and P. Arbogast, 2007 : "Is a Real Cyclogenesis Case Explained by Generalized Linear Baroclinic Instability? ". *J. Atm. Sci.*, 64, 4287-4308.
- Donlon C., Robinson I., Casey K., Vazquez-Cuervo J., Armstrong E., Arino O., Gentemann C., May D., LeBorgne P. and al, 2007 : The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project. *BAMS*, Volume: 88 Issue: 8 Pages: 1197-1213.
- Douville H., S. Conil, S. Tyteca, A. Voldoire, 2007 : Soil moisture memory and West African monsoon predictability: artefact or reality? *Climate Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-006-0207-8.
- Drobinski Ph., P. Carlotti, J.L. Redelsperger, R.M. Banta, V. Masson, R.K. Newsom, 2007 : Numerical and experimental investigation of the neutral atmospheric surface layer. *American Meteorological Society*, 64, 137-156, *JAS* doi: 10.1175/JAS3831.1.
- Drobinski Ph. , F. Said, G. Ancellet, J. Arteta, P. Augustin, S. Bastin, A. Brut, J.-L. Caccia, B. Campistron, S. Cautenet, A. Colette, I. Coll, U. Corsmeier, B. Cros, A. Dabas, H. Delbarre, A. Dufour, P. Durand, V. Guénard, M. Hasel, N. Kalthoff, C. Kottmeier, F. Lasry, A. Lemonsu, F. Lohou, V. Masson, L. Menut, C. Moppert, V.H. Peuch, V. Puygrenier, O. Reitebuch, R. Vautard, 2007 : Regional transport and dilution during high pollution episodes in southern France: Summary of findings from the ESCOMPTE experiment. *J. Geophys. Res.*, 112, D13105, doi: 10.1029/2006JD007494.
- Drobinski Ph. , R. Steinacker, H. Richner, K. Baumann-Stanzer, G. Beffrey, B. Benech, H. Berger, B. Chimani, A. Dabas, M. Dorninger, B. Dürr, C. Flamant, M. Frioud, M. Furger, I. Gröhn, S. Gubser, T. Gutermann, C. Häberli, E. Häller-Scharnhorst, G. Jaubert, M. Lothon, V. Mitev, U. Pechinger, M. Piringer, M. Ratheiser, D. Ruffieux, G. Seiz, M. Spatzierer, S. Tschannett, S. Vogt, R. Werner, G. Zängl, 2007 : Föhn in the Rhine Valley during MAP: A review of its multiscale dynamics in complex valley geometry, 2007: *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* , 133, 897-916 2007
- Errico R.M., Bauer P. and Mahfouf J.-F, 2007 : Issues regarding the assimilation of cloud and precipitation data, *J ATMOS SCI* 64 (11): 3785-3798.
- Escorihuela M.J., Y. Kerr, P. de Rosnay, J. P. Wigneron, J.-C. Calvet and F. Lemaître, 2007 : A Simple Model of the Bare Soil Microwave Emission at L-Band, */IEEE Trans. Geosc. /Remote Sens.*, Vol. 45, No. 7, pp. 1978-1987.
- Escorihuela M.J., P. de Rosnay, Y. Kerr and J.-C. Calvet, 2007 : Influence of bound water relaxation frequency on soil moisture measurements, *IEEE Trans. Geosc. RemoteSens.* Vol. 45, No. 12, pp. 4067-4076.
- Felder M., P. Poli et J. Joiner, 2007 : Errors induced by ozone field horizontal inhomogeneities into simulated nadir-viewing orbital backscatter UV measurements. *Jour. Geophys. Res. (Atmospheres)*. Vol. 112, No. D1, D01303 10.1029/2005JD006769.
- Friedrich K., U. Germann, J. Gourley and P. Tabary, 2007 : Effects of radar beam shielding on rainfall estimation for the polarimetric C-band radar. *J ATMOS OCEAN TECH* 24 (11): 1839-1859 NOV 2007.
- Geer A.J., W.A. Lahoz, D.R. Jackson, D. Cariolle, J.P. McCormack, 2007 : Evaluation of linear ozone photochemistry parametrizations in a stratosphere-troposphere data assimilation system. *ATMOS CHEM PHYS* 7: 939-959 FEB 21 2007.
- Gibert F., J. Cuesta, J.-I. Yano, N. Arnault and P.-H. Flamant, 2007 : On the correlation between convective plume up and downdrafts, lidar reflectivity and depolarization ratio. *Boundary Layer Meteorol.*, 125(3) : 553-573, déc 2007.
- Gourley J.-J., P. Tabary, J. Parent du Chatelet, 2007: Empirical estimation of attenuation from differential propagation phase measurements at C-band, *J. Appl. Meteor.*, 46, No. 3, 306 - 317
- Gourley J.-J., P. Tabary, J. Parent du Chatelet, 2007: A fuzzy logic algorithm for the separation of precipitating from non-precipitating echoes using polarimetric radar, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 24, No. 8, 1439-1451.
- Guemas V., D. Salas-Méla (2007) : Simulation of the Atlantic meridional overturning circulation in an atmosphere-ocean global coupled model. Part I: a mechanism governing the variability of ocean convection in a preindustrial experiment, *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-007-0336-8. (<http://www.springerlink.com/content/b67167835n0k7650>).
- Guemas V., D. Salas-Méla (2007) : Simulation of the Atlantic meridional overturning circulation in an atmosphere-ocean global coupled model. Part II : weakening in a climate change experiment: a feedback mechanism, *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-007-0328-8. (<http://www.springerlink.com/content/6322236q88285k37>)
- Hallegatte S., 2007 : The use of synthetic hurricane tracks in risk analysis and climate change damage assessment, *J. Appl. Meteor. Clim.*, 46, 1956-1966.
- Hallegatte S., J.-C. Hourcade and P. Ambrosi, 2007a : Using climate analogues for assessing climate change economic impacts, *Climatic Change*, 82, 47-60.
- Hallegatte S., J.-C. Hourcade and P. Dumas, 2007b : Why economic dynamics matter in assessing climate change damages: illustration on extreme events, *Ecological Economics*, 62, 330-340.
- Haman K., S. Malinowski, M. Kurowski, H. Gerber, and J.-L. Brenguier, 2007 : Small scale mixing processes at the top of a marine stratocumulus – a case study. *QJRM*, Volume: 133 Issue: 622 Pages: 213-226 Part: A.
- Healy SB, JR Eyre, M. Hamrud and J.-N. Thepaut, 2007 : Assimilating GPS radio occultation measurements with two-dimensional bending angle observation operators, *Q J ROY METEOR SOC* 133 (626): 1213-1227 Part A JUL 2007
- Illingworth A.J., R.J. Hogan, E.J. O'Connor, D. Bouniol, M.E. Brooks, J. Delanoë, D.P. Donovan, J.D. Eastment, N. Gaussiat, J.W.F. Goddard, M. Haefelin, H. Klein Baltink, O.A. Krasnov, J. Pelon, J.-M. Piriou, A. Protat, H.W.J. Russchenberg, A. Seifert, A.M. Tompkins, G.-J. Van Zadelhoff, F. Vinit, U. Willén, D.R. Wilson and C.L. Wrench, 2007 : CLOUDNET, Continuous Evaluation of Cloud Profiles in Seven Operational Models Using Ground-Based Observations. *BAMS*, 88 June 2007, doi:10.1175/BAMS-88-6-xxx.
- Jacob D., L. Bärring, O.B. Christensen, J.H. Christensen, M. de Castro, M. Déqué, F. Giorgi, S. Hagemann, M. Hirschi, R. Jones, E. Kjellström, G. Lenderink, B. Rockel, E.S. Sánchez, C. Schär, S.I. Seneviratne, S. Somot, A. Van Ulden, B. Van Den Hurk, 2007 : An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. *Climatic Change* 81, 31-52, suppl 1, may 2007.
- Joiner J., G. Brin, A. da Silva, R. Treadon, J. Derber, P. Van Delst, J. Le Marshall, P. Poli, R.-M. Atlas, C. Cruz and D. Bungato, 2006 : Effects of data selection on the assimilation of AIRS data. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 133 pp. 181-196.

- Joly M., A. Voldoire, H. Douville, P. Terray and J.-F. Royer, 2007 : African monsoon teleconnections with tropical SSTs : validation and evolution in a set of IPCC4 simulations, *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-006-0215-8 URL : <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-006-0215-8>
- Kelly G, JN Thepaut, R. Buizza and C. Cardinali, 2007 : The value of observations. I: Data denial experiments for the Atlantic and the Pacific. *Q J ROY METEOR SOC* 133 (628): 1803-1815 Part A Oct 2007
- Lahoz W.A., A.J. Geer, S. Bekki, N. Bormann, S. Ceccherini, H. Elbern, Q. Errera, H.J. Eskes, D. Fonteyn, D.R. Jackson, B. Khattatov, S. Massart, V.-H. Peuch, S. Rharmili, M. Ridolfi, A. Segers, O. Talagrand, H.E. Thornton, A.F. Vik et T. Von Clarmann, 2007 : The Assimilation of Envisat data (ASSET) project, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1773-1796. (http://www.copernicus.org/EGU/acp/acp/recent_papers.html).
- Legrand M., S. Preunkert, M. Schock, M. Cerqueira, A. Kasper-Giebl, J. Afonso, C. Pio, A. Gelencsér and I. Dombrowski-Etchevers, 2007 : Major 20th century changes of carbonaceous aerosol components (EC, WinOC, DOC, HULIS, carboxylic acids, and cellulose) derived from Alpine ice cores, *J. Geophys. Res.*, 112, D23S11, doi:10.1029/2006JD00808.
- Lejeune Y., P. Wagnon, L. Bouilloud, P. Chevallier, P. Etchevers, E. Martin, E. Sicart, F. Habets, 2007 : Melting of snow cover in a tropical mountain environment in Bolivia: Processes and modelling, *J. of Hydrometeorology*, 8 (4), 922-937.
- Lemonsu A., V. Masson and E. Berthier, 2007 : Improvement of the hydrological component of an urban soil-vegetation-atmosphere transfer model. *Hydrological processes*, 21, 2100-2111.
- Lothon M., F. Couvreur, S. Donier, F. Guichard, P. Lacarrère, J. Noilhan, F. Said, 2007 : Organised structures in the sahelian boundary layer during the dry down season : Impact on flux estimates by aircraft measurements. *Boundary Layer Meteorology*, 124, 425-447, doi: 10.1007/s10546-007-9182-9.
- Lovejoy S. and Schertzer, D., 2007 : Scaling and multifractal fields in the solid earth and topography. *Nonlinear processes in geophysics*, 14(4):465-502.
- Lovejoy S., Tuck, A. F., Hovde, S. J. and Schertzer, D., 2007 : Is isotropic turbulence relevant in the atmosphere? - art. no. L15802. *Geophys. Res. Lett.*, 34(15):15802-15802.
- Malinowski S., C. Haman, H. Gerber and J. L. Brenguier, 2007 : Small scale mixing processes at the top of a marine stratocumulus - a case study. *Quart. J. Roy. Meteorology*, 133, 622, 213-226.
- Montmerle T., F. Rabier and C. Fischer, 2007 : Respective impact of polar-orbiting and geostationary satellites observations in the Aladin/France numerical weather prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133, 655-671.
- Muñoz Sabater J., L. Jarlan, J.-C. Calvet, F. Bouysse, P. De Rosnay, 2007 : From near-surface to root-zone soil moisture using different assimilation techniques", *J. Hydrometeorol.*, Vol. 8, No 2, pp. 194-206.
- Paci A., G. Caniaux, H. Giordani, M. Lévy, L. Prieur and G. Reverdin, 2007 : A high resolution simulation of the ocean during the POMME experiment: Mesoscale variability and near surface processes. *J. Geophys. Res.*, 112, doi: 10.1029/2005JC003389.
- Pannekoucke O., L. Berre, G. Desroziers, 2007 : Filtering properties of wavelets for local background-error correlations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Volume 133, Issue 623, Pages 363 - 379.
- Peyrillé Ph., J.-P. Lafore, J.-L. Redelsperger, 2007 : An idealized two-dimensional framework to study the West African Monsoon. Part I: validation and key controlling factors', *Journal of Atmospheric Sciences*. Vol. 64, No. 8, p2765-2782.
- Peyrillé Ph. and J.-P. Lafore, 2007 : An Idealized Two-Dimensional Framework to Study the West African Monsoon, Part II: Role of Large Scale Forcings and Characterization of the Diurnal Cycle. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 64, No. 8, p2783-2803.
- Pigeon G., D. Legain, P. Durand, V. Masson, 2007 : Anthropogenic heat release in old European city Toulouse (France), *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.1530.
- Pigeon G., A. Lemonsu, CS. Grimond, P. Durand, V. Masson, 2007 : Turbulent fluxes divergences in the surface layer: case of a coastal city. *Boundary Layer Meteorology*, 124, 269-290.
- Piriou J.-M., J.-L. Redelsperger, J.-F. Geleyn, J.-P. Lafore and F. Guichard, 2007 : "An approach for convective parameterization with memory: separating microphysics and transport in grid-scale equations", *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 64, n° 11, p. 4131-4143.
- Polli P., P. Moll, F. Rabier, G. Desroziers, B. Chapnik, L. Berre, S.B. Healy, E. Andersson, F.-Z. El Guelai, 2007 : Forecast Impact Studies of Zenith Total Delay Data from European Near Real-Time GPS Stations in Meteo France 4DVAR, *J. Geophys. Res.*, 112, D06114, doi: 10.1029/2006JD007430.
- Preunkert S., M. Legrand, B. Jourdain and I. Dombrowski-Etchevers, 2007 : Acidic gases (HCOOH, CH₃COOH, HNO₃, HCl and SO₂) and related aerosol species at a high mountain Alpine site (4360 m elevation) in Europe, *J. Geophys. Res.*, 112, D23S12, doi: 10.1029/2006JD008225.
- Radkevich A., Lovejoy, S., Strawbridge, K., Schertzer, D., 2007 : The elliptical dimension of space-time atmospheric stratification of passive admixtures using lidar data. *Physica A - Statistical mechanics and its applications* 382 (2): 597-615 Aug 15 2007.
- Rauber R.M., Bjorn Stevens, H.T. Ochs III, C. Knight, B.A. Albrecht, A.M. Blyth, C.W. Fairall, J.B. Jensen, S.G. Lasher-Trapp, O.L. Mayol-Bracero, G. Vali, J.R. Anderson, B.A. Baker, A.R. Bandy, F. Burnet, J.-L. Brenguier, W.A. Brewer, P.R.A. Brown, P. Chuang, W.R. Cotton, L. Di Girolamo, B. Geerts, H. Gerber, S. Göke, L. Gomes, B.G. Heikes, J.G. Hudson, P. Kollias, R.P. Lawson, S.K. Krueger, D.H. Lenschow, L. Nuijens, D.W. O'Sullivan, R.A. Rilling, D.C. Rogers, A.P. Siebesma, E. Snodgrass, J.L. Stith, D.C. Thornton, S. Tucker, C.H. Twohy, P. Zuidema, 2007 : Rain in (Shallow) Cumulus over the Ocean-The RICO Campaign, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, N° 12, 1912-1928.
- Reverdin G., P. Blouch, J. Boutin, P.P. Niiler, J. Rolland, W. Scuba, A. Lorenzo and F. Rios, 2007 : Surface Salinity Measurements-COSMOS 2005 Experiment in the Bay of Biscay. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 24, N° 9, 1643-1654.
- Rey G., E. Jouglu, A. Fouillet, G. Pavillon, P. Bessemoulin, P. Frayssinet, J. Clavel, D. Hémon, 2007 : The impact of major heat waves on all-cause and cause-specific mortality in France from 1971 to 2003. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 80(7) : 615-26.
- Ricaud P., B. Barret, J.-L. Attié, E. Le Flochmoën, E. Motte, H. Teyssède, V.-H. Peuch, N. Livesey and J.-P. Pommereau, 2007 : Impact of continental convection on the transport of long-lived species to the top of the Tropical Tropopause Layer, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5639-5657.
- Rinne, J., T. Douffet, Y. Prigent and P. Durand, 2007 : Field comparison of disjunct and conventional eddy covariance techniques for trace gas flux measurements. *Journal of Environmental Pollution*, doi: 10.1016/j.envpol.2007.06.063.
- Rivière G. and I. Orlanski, 2007 : Characteristics of the Atlantic storm-track eddy activity and its relation with the North Atlantic Oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 64, 241-266.
- Saleh K., J.-P. Wigneron, P. Waldteufel, P. de Rosnay, M. Schwank, J.-C. Calvet, Y. Kerr, 2007 : Estimates of surface soil moisture under grass covers using L-band radiometry, */Remote Sens. Env./*, Vol. 109, pp. 42-53, 2007.
- Sarrat C., J. Noilhan, P. Lacarrère, S. Donier, C. Lac, J.-C. Calvet, H. Dolman, C. Gerbig, B. Neininger, P. Ciais, J.D. Paris, F. Boumard, M. Ramonet, A. Butet, 2007 : Atmospheric CO₂ modeling at the regional scale: application to the CarboEurope Regional Experiment (Ceres), *J. Geophysical Research*, Vol. 112, D12105, doi: 10.1029/2006JD008107.
- Sarrat C., J. Noilhan, A. Dolman, C. Gerbig, R. Ahmadov, L. Toll, A. Mesters, R. Hutjes, M. Helbert, G. Pere-Landa, S. Donier, 2007 : Atmospheric CO₂ modeling at the regional scale: An intercomparison of 5 meso-scale atmospheric models, *Biogeosciences*, 4, 1923-1952, 2007.
- Saunders R., P. Rayer, P. Brunel, A. Von Engel, N. Bormann, L. Strow, S. Hannon, S. Heilliette, Liu Xu, F. Miskolczi, Y. Han, G. Masiello, J.-L. Moncet, Uymin Gennady, V. Sherlock, D.S. Turner, 2007 : A comparison of radiative transfer models for simulating Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) radiances, *J. Geophys. Res.*, 112, D01S90, doi:10.1029/2006JD007088.
- Semane N., V.-H. Peuch, L. El Amraoui, H. Bencherif, S. Massart, D. Cariolle, R. Abida and J.-L. Attié, 2007 : An observed and analysed stratospheric ozone intrusion over the high Canadian Arctic UTLS region in July 2003, */Q. J. R. Meteorol. Soc./*, 133(S2), 171-178, doi:10.1002/qj.141.
- Stockli, R., Vidale P.-L., Boone, A. and C. Schar, 2007 : Impact of scale and aggregation on the terrestrial water exchange: integrating land surface models and Rhone catchment observations. *J. Hydrometeorol.*, 8(5), 1002-1015.

Swingedouw D, P. Braconnot, P. Delecluse, E. Guilyardi and O. Marti, 2007 : Quantifying the AMOC feedbacks during a 2xCO₂ stabilization experiment with land-ice melting. CLIM DYNAM 29 (5): 521-534 OCT 2007.

Swingedouw D, P. Braconnot, P. Delecluse, E. Guilyardi and O. Marti, 2007 : The impact of global freshwater forcing on the thermohaline circulation: adjustment of North Atlantic convection sites in a CGCM. CLIM DYNAM 28 (2-3): 291-305 FEB 2007

Tabary P., 2007 : The new French radar rainfall product. Part I: methodology, Wea. Forecasting, Vol. 22, N° 3, 393 - 408.

Tabary P., J. Desplats, K. Do Khac, F. Eideliman, C. Gueguen and J.-C. Heinrich, 2007 : The new French radar rainfall product. Part II: Validation, Wea. Forecasting, Vol. 22, No. 3, 409 - 427.

Terray P., F. Chauvin, H. Douville, 2007 : Impact of southeast Indian Ocean sea surface temperature anomalies on monsoon-ENSO-dipole variability in a coupled ocean-atmosphere model. Climate Dyn., 28, 553-580, doi: 10.1007/s00382-006-0192.

Teyssède H., M. Michou, H. Clark, B. Josse, F. Karcher, D. Oliu, V.-H. Peuch, D. Saint-Martin, D. Cariolle, J.-L. Attié, P. Nédélec, P. Ricaud, V. Thouret, R.J. Van Der, A. Volz-Thomas et F. Chéroux, 2007 : A new chemistry-climate tropospheric and stratospheric model MOCAGE-Climat: evaluation of the present-day climatology and sensitivity to surface processes, Atmos. Chem. Phys., 5815-5860.

Voltaire A., B. Heickhout, M. Schaeffer, J.-F. Royer, F. Chauvin, 2007 : Climate simulation of the twenty-first century with interactive land-use changes. Clim. Dyn., 29(2-3) : 177-193, doi: 10.1007/s00382-007-0228-y.

Wigneron J.-P., Y. Kerr, P. Waldteufel, K. Saleh, M.J. Escorihuela, P. Richaume, P. Ferrazzoli, P. De Rosnay, R. Gurney, J.-C. Calvet, J.P. Grant, M. Guglielmetti, B. Hornbuckle, C. Mätzler, T. Pellarin, M. Schwank, 2007 : L-band Microwave Emission of the Biosphere (L-MEB) Model : description and calibration against experimental data sets over crop fields", /Remote Sens. Env/, Vol. 107, pp. 639-655.

Autres publications scientifiques dans des revues à comité de lecture

André J-C, G De Marsily, H. Douville, 2007 : Les impacts des changements climatiques sur le cycle hydrologique. Annales des Mines-série : Responsabilité et Environnement, 47 (2007) 49-53.

Ardhuin F, L Bertotti, J-R Bidlot, L. Cavaleri, V. Filippetto, J-M Lefevre and Wittmann, P, 2007 : Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea. OCEAN ENG 34 (3-4): 526-541 MAR 2007.

Artinyan E., F. Habets, J. Noilhan, E. Ledoux, D. Dimitrov, E. Martin and P. Le Moigne (2007) : Modelling the water budget and the river flows of the Maritsa basin in Bulgaria. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 4, 475-521.

Bencherif H., L. El Amraoui, B. Morel, N. Semane, S. Massart, D.V. Acharyulu, A. Hauchecorne, V.-H. Peuch, 2007 : Examination of the 2002 major warming in the SH using ground-based and Odin/SMR assimilated data: stratospheric ozone distributions and tropic/mid-latitude exchange, Can. J. Phys., 85, 1287-1300, doi:10.1139/P07-143.

Bergot T., 2007 : Quality assessment of the cobel Isba numerical forecast system of fog and low clouds. Journal of Pure and Applied Geophysics, special issue on fog and low clouds. 164, 1265-1282.

Boullès B., P. Brandt, G. Caniaux, M. Dengler, Y. Gouriou, E. Key, R. Lumpkin, F. Marin, R.L. Molinari and C. Schmid, 2007 : African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) : special measurements in the Tropical Atlantic. CLIVAR Newsletter Exchanges, 41, (12), 2, 7-9.

Bouttier F., 2007 : Arome, avenir de la prévision régionale, La Météorologie, 8^e série, n° 58, pp. 12-20.

Chauvin F. et J-F. Royer, 2007 : L'intensité des cyclones augmente-t-elle ? Pour la Science, dossier spécial « Climat, comment éviter la surchauffe », n° 54, 34-38.

Déqué M., 2007 : Réchauffement climatique : les projections, série trimestrielle des Annales des Mines, Responsabilité et Environnement, n° 47, pages 18-26.

Déqué M. et L. Li, 2007 : La prévision climatique - régionalisation et extrêmes, La Météorologie, n° 57, pp28-30.

Douville H., J.-C. André, G. De Marsily, 2007 : Les impacts des changements climatiques sur le cycle hydrologique, série trimestrielle des Annales des Mines, Responsabilité et Environnement, n° 47, pages 49-53.

Douville H. et P. Terray, 2007 : Réponse du cycle hydrologique aux forçages anthropiques « Que nous apprennent les dernières simulations du GIEC ? » La Météorologie, n° 57, pp31-36.

Fouillet A., G. Rey, E. Jouglà, P. Frayssinet, P. Bessemoulin and D. Hemon, 2007 : A predictive model relating daily fluctuations in summer temperatures and mortality rates, BMC Public Health, 7: 114 (19 June 2007).

Guidard V. and D. Tzanos, 2007 : Analysis of fog probability from a combination of satellite and ground observation data. Pure and Applied Geophysics, 164, p 1207-1220.

Gusdorf F. and S. Hallegatte, 2007 : Compact or Spread-Out Cities: Urban Planning, Taxation and the Vulnerability to Transportation Shocks, Energy Policy, 35 (2007) 4826-4838, doi:10.1016/j.enpol.2007.04.017.

Gusdorf F. and S. Hallegatte, 2007 : Behaviors and housing inertia are key factors in determining the consequences of a shock in transportation costs, Energy Policy, 35 (6), pp. 3483-3495.

Hallegatte S. et D. Théry, 2007 : Les impacts économiques futurs du changement climatique sont-ils sous-estimés ? La Revue d'Économie Politique, 117(4), 507-522

Hourcade J.-C, P. Ambrosi et S. Hallegatte, 2007 : Faut-il agir ? Les raisons de l'urgence, Pour la Science n° 54, Climat : comment éviter la surchauffe ?, 2007, 58-62.

Kopf S., S. Hallegatte et M. Ha Duong, 2007 : L'évolution climatique des villes européennes, Pour la Science n° 54 ' Climat : Comment éviter la surchauffe ?, 2007, 48-51.

Lejeune Y., Y. L'Hôte, P. Etchevers, P. Wagnon, J.-P. Chazarin, P. Chevallier, 2006 : Constitution d'une base de données météorologiques sur un site andin de haute altitude : le site du Charquini, 4 795 m. IAHS Publication n° 318, 173-185.

Leroy A., J.-P. Céron, 2007 : Un défi de la prévision saisonnière : la descente d'échelle, La Météorologie, 8^e série, n° 58, pp. 36-44.

Lovejoy S and D. Schertzer, 2007 : Scale, scaling and multifractals in geophysics: Twenty years on. Nonlinear dynamics in geosciences : 311-337, 2007

Macor J, D. Schertzer and S. Lovejoy, 2007 : Multi-fractal methods applied to rain forecast using radar data. La Houille Blanche. (4) : 92-98.

Manach J., E. Bertrand et J. Bidet, 2007 : Assistance météorologique à la prévention et à la lutte contre les feux de forêts en zone méditerranéenne. La Météorologie, 8^e série, n° 56, février 2007, pp 22-26.

Martin E., V. Ducrocq, A. Joly, B. Joly, O. Nuisser, P. Quintana Seguí, D. Ricard, Sevault F., Somot S., P. Drobinsky, 2007 : La Méditerranée, région témoin : de Cyprim à Hymex, La Houille Blanche, N° 6 - 2007, 90-96.

Massart S., A. Piacentini, D. Cariolle, L. El Amraoui, N. Semane, 2007 : Assessment of the quality of the ozone measurements from the Odin/SMR instrument using model assimilation. Can. J. Phys., 85, 1209-1223, doi:10.1139/P07-124.

Moisselin J.-M. et S. Jourdain, 2007 : Long-term data rescue and use. *La Houille Blanche* (1) : 33-38 2007.

Navarre J.-P. J. Meyssonier and A. Vagnon, 2007 : 3D numerical model of snow deformation without failure and its application to cold room mechanical tests, *Cold Regions Science and Technology*, Vol 50 (2007) 3-12.

Planton S., 2007 : Réchauffement climatique : attribution et recherche des causes, série trimestrielle des *Annales des Mines, Responsabilité et Environnement*, n° 47, pages 12-17.

Planton S. et L. Terray, 2007 : Détection et attribution à l'échelle régionale : le cas de la France, *La Météorologie*, 8^e série, n° 58, pp25-29.

Roquelaure S. and T. Bergot, 2007 : Seasonal sensitivity on COBEL-ISBA local forecast system for fog and low clouds. *Journal of Pure and Applied Geophysics*, special issue on fog and low clouds. 164.

Royer J.-F., H. Douville, 2007 : le forçage climatique - cause naturelle et cause anthropique, hors-série de *Sciences et Avenir*, n° 150, pp 73-76.

Sacre C, JM Moisselin, M. Sabre, J.-P. Flori and B. Dubuisson, 2007 : A new statistical approach to extreme wind speeds in France. *J WIND ENG IND AEROD* 95 (9-11): 1415-1423 OCT 2007.

Salas-Mélia D., C. Genthon, O. Arzel, C. Cassou, V. Guemas, G. Krinner, M. Minvielle et D. Swingedouw, 2007 : Régions polaires, cryosphère et circulation thermohaline. Que nous ont appris les simulations du 4^e rapport d'évaluation du GIEC ?, *La Météorologie*, 8^e série, n° 56, fév. 2007, pp 33-39.

Tchiguirinskaia I., D. Schertzer, S. Lovejoy and J.-M. Veyssière, 2007 : Wind extremes and scales: Multifractal insights and empirical evidence. *Wind Energy* : 99-104.

Wagner W., P. Pampaloni, G. Blöschl, J.-C. Calvet, B. Bizzarri, J.-P. Wigneron, Y. Kerr, 2007 : Operational Readiness of Microwave Remote Sensing of Soil Moisture for Hydrologic applications. *Nordic Hydrology*, Vol. 1, N° 1, pp. 1-20.

Contribution à des ouvrages ou à des rapports

Alcamo, J., J.M. Moreno, B. Novak, M. Bindi, R. Corobov, R.J.N. Devoy, C. Giannakopoulos, E. Martin, J.E. Olesen, A. Shvidenko, 2007 : Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, C.E. Hanson, P.J. van der Linden, Eds., Cambridge University Press, Cambridge.

Apicella, L., F. Tallet, S. Hallegatte, F. Nadaud, 2007, Aléas climatiques, aléas économiques : les effets du climat sur l'activité économique en France, dossier de la Note de Conjoncture de l'INSEE, juillet 2007.

Cervený, R., V.D. Belitskaya, P. Bessemoulin, M. Cortez, C. Landsea and T.C. Peterson, 2007: A New Western Hemisphere 24-Hour Rainfall Record. *WMO Bulletin*, 56(3), 212-215, July 2007.

Faure G., S. Westrelin, 2007 : A new Météo-France NWP system over the southwest Indian ocean. *WGNE Blue Book*.

Le Borgne P, A. Marsouin, F. Orain, H. Roquet, A. Coat and Y. Guichoux, 2007 : Implementation of a fine scale SST analysis over the Atlantic Ocean, *MERSEA-WP02-MF-STR-002-1A*, 41p.

Lavanant L., 2007 : Radiance spatial distribution in IASI sounder for analysis. Rapport CNES CalVal IASI level1 phaseA.

Les articles publiés par des agents de Météo-France sont consultables auprès de la médiathèque de Météo-France, et en interne sur le site : <http://intramet.meteo.fr/bibliotheque/> rubrique « documentations scientifiques et techniques».

Thèses soutenues en 2007

Auligné T., 2007 : Assimilation variationnelle des observations de sondeurs infrarouges hyperspectraux : correction de biais et détection nuageuse, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 8 juin 2007.

Caumont O., 2007 : Simulation et assimilation de données radar pour la prévision de la convection profonde à fine échelle, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 4 décembre 2007.

Descamps L., 2007 : Définition des conditions initiales des prévisions d'ensemble. Liens avec l'assimilation de données, thèse de doctorat de l'université Paris VI, discipline Sciences de l'environnement d'Île de France, soutenue le 29 octobre 2007.

Geoffroy O., 2007 : Modélisation LES des précipitations dans les nuages de couche limite et paramétrisation pour les modèles de circulation générale, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 22 mai 2007.

Gibelin A-L., 2007 : Cycle du carbone dans un modèle de surface continentale : Modélisation, validation et mise en œuvre à l'échelle globale, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 9 mai 2007.

Guidard V., 2007 : Assimilation multi-échelle dans un modèle météorologique régional, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 23 octobre 2007.

Lebeau C., 2007 : Étude du couplage océan-atmosphère associé aux épisodes de pluie intense en région méditerranéenne, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 19 décembre 2007.

Munoz-Sabater J., 2007 : Assimilation de données de télédétection pour le suivi des surfaces continentales : Mise en œuvre sur un site expérimental, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 13 avril 2007.

Pigeon G., 2007 : Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine - projets CLU-ESCOMPTE et CAPI-TOUL, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 29 mai 2007.

Rivière O., 2007 : Prévisibilité de l'écoulement atmosphérique aux échelles synoptiques : influence des non-linéarités et de l'humidité, thèse de doctorat de l'École nationale des Ponts et Chaussées, discipline Mathématique informatiques, soutenue le 19 décembre 2007.

Roquelaure S., 2007 : Prévision d'ensemble locale des brouillards et nuages bas à l'aéroport international de Roissy - Charles-De-Gaulle, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 3 décembre 2007.

Rousset F., 2007 : Modélisation des bilans de surface et des débits sur la France, application à la prévision des débits, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 6 juillet 2007.

Sandu I., 2007, Impact de l'aérosol sur le cycle de vie des nuages de couche limite, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 8 novembre 2007.

Sohne N., 2007 : Validation des prévisions de nuages et de précipitations à mésoéchelle par l'observation satellite, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 23 novembre 2007.

Tomas S., 2007 : Modélisation et étude expérimentale de la turbulence au sein des couches limites atmosphériques, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 30 janvier 2007.

Zaïri E.-P., 2007 : Cycle de l'eau des systèmes convectifs Ouest Africains : préparation à l'exploitation des mesures radar Xport dans AMMA par simulation, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 29 janvier 2007.

Habilitation à diriger des recherches soutenue en 2007

Desroziers G., 2007 : mise en œuvre, diagnostic et optimisation des schémas d'assimilation de données, thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier, discipline Physique de l'Atmosphère, soutenue le 11 mai 2007.

Glossaire

Organismes

- AASQA** Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air
CEDRE Centre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux
CEPMET Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
CEREA Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique
CERFACS Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CESBIO Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère
CNES Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS Centre National de la Recherche Scientifique
DLR Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt
ESA European Space Agency (Agence Spatiale Européenne)
EUMETNET European METeorological NETwork
EUMETSAT European organisation for the exploitation of METeorological SATellites
HADLEY CENTER Centre Britannique de Recherche sur le Changement Climatique
IFREMER Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER
IGN Institut Géographique National
IMFT Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
INSU Institut National des Sciences de l'Univers
KNMI Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (Institut royal météorologique des Pays-Bas)
MEDAD Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durable
MERCATOR Océan GIP visant à la mise en œuvre d'un système opérationnel de prévision océanographique global
NCEP National Centers for Environmental Prediction
OMM Organisation Météorologique Mondiale
ONERA Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques
SPOT Satellite Pour l'Observation de la Terre
UKMO (MetOffice) United Kingdom Meteorological Office

Laboratoires ou unités de recherche - développement

- CEN** Centre d'Etudes de la Neige
CETP Centre d'Etude des environnements Terrestre et Planétaire
CMM Centre de Météorologie Marine
CMS Centre Météorologie Spatiale
CNRM Centre National de Recherches Météorologiques
ENM/UFR Ecole Nationale de la Météorologie/Unité de Formation et de Recherche
GAME Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique
IPSL Institut Pierre-Simon-Laplace
LA Laboratoire d'Aérodynamique
LaMP Laboratoire de Météorologie Physique
LCPC Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LISA Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques
LOCEAN Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques
NASA National Aeronautics and Space Administration
SAFIRE Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement
SPEA Simulation Physique des Ecoulements Atmosphériques

Programmes et projets nationaux et européens

Programmes et projets nationaux

- ANR** Agence Nationale de la Recherche
COPS Convective and Orographically-induced Precipitation Study
CYPRIM Cyclogénèse et PRécipitations Intenses en région Méditerranéenne
IRCAAM Influence Réciproque des Climats d'Afrique de l'ouest, du sud de l'Asie et du bassin Méditerranéen
PERLE Programme d'Evaluation des Rejets Locaux d'Effluents

Programmes et projets internationaux

- CERES** CarboEurope Regional Experiment Strategy
CIRCE Climate change and impact research : mediterranean environment (FP6)
CIRENE Projet d'observation de l'océan indien tropical
ENSEMBLES Ensemble-based predictions of climate changes and their impacts (FP6)
EUCOS EUMetnet Composit Observing System
EUFAR European Fleet for Airborne Research (FP6)

- FLUXNET** Programme international sur les mesures de flux de carbone dans les écosystèmes terrestres
FLYSAFE Système de vol intégré pour l'amélioration de la sécurité, la protection contre les imprévus, et les opérations tout temps
GEMS Global and regional Earth-system Monitoring using Satellite and in-situ data (initiative du CEPMMT)
GICC Gestion et Impacts du Changement Climatique (programme du ministère de l'écologie)
GIEC Groupe Inter-gouvernemental d'Experts sur le changement Climatique (IPCC)
GMES Global Monitoring for Environment and Security (Système Global d'Observation de l'Environnement pour la Sécurité, programme de l'Union européenne)
HIRLAM High Resolution Limited Area Model (modélisation)
HyMeX Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment
IMFREX Impact sur la Fréquence des Extrêmes
IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (GIEC)
MERSEA Marine Environment and Security for the European Area
MISSTERRE Modélisation Intégrée du SyStème TERRE (projet LEFE)
MOZAIC Measurement of OZone by Airbus In service airCraft
MyOCEAN Successeur du projet MERSEA, visant à sa consolidation, piloté par Mercator Ocean
PROMOTE PROtocol MOniToring for the GMES service Element for atmosphere project
QUANTIFY QUANTIFYing the climate impact of global and european transport systems (FP6)
SAF Satellite Application Facility
SAMM Sea Atmosphere Mediterranean Model (modèle couplé régional)
THORPEX The Observing Research and Predictability EXperiment (programme mondial du GARP sous l'égide de l'OMM)
TIGGE THORPEX International Grand Global Ensemble

Campagnes expérimentales

- AMMA** Approche Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
COPS Convective and Orographically-induced Precipitation Study Atmosphérique et de Transports d'Emissions
EGEE Volet océanographique de la campagne AMMA (golfe de Guinée)
PARIS-FOG Campagne de mesures pour l'étude du cycle de vie du brouillard (Palaiseau 2006)
SMOSMANIA Soil Moisture Observing System : Meteorological Automatic Network Integrated Application
VASCO Campagne intensive d'observations atmosphériques et des échanges océan-atmosphère

Autres sigles, abréviations ou acronymes

- ADM-AEOLUS** Atmospheric Dynamics Mission (satellite d'observation de la dynamique de l'atmosphère terrestre, mis en œuvre par l'ESA)
ADP Aéroports De Paris
ALADIN Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement InterNational
ALADIN-Climat ALADIN-Climat
ALBATROS Autoflux Linked Base for TRansfer at Ocean Surface
AMDAR Aircraft Meteorological Data Acquisition and Relay
AMSR Advanced Microwave Scanning Radiometer
AMSR-E AMSR for Earth observing system
AMSU-A Advanced Microwave Sounding Unit - A
AQUA Satellite du Earth observing system de la NASA
AQUARIUS Satellite de mesure de la salinité de la surface de la mer
AR-4 Annual Report 4 (4ème rapport annuel du GIEC)
ARAMIS Application RAdar à la Météorologie Infra-Synoptique
AROME Application de la Recherche à l'Opérationnel à Mésos-Echelle
ARPEGE Applications de la Recherche Petite Echelle Grande Echelle (modèle global de prévision numérique opérationnel de Météo-France)
ARPEGE-Climat Modèle de simulation climatique global du CNRM
ARPEGE-SCM SAFRAN-CROCUS-MEPRA
ARGOS Advanced Research and Global Observation Satellite
ASAP Automated Shipboard Aerological Programme
ASCAT Advanced SCATterometer

ATE	Analyse des Terres Émergées (SAF Eumetsat)	LES	Large Eddy Simulation
ATOVS	Advanced Tiros Operational Vertical Sounder	L-EPS	Prévision d'ensemble sur un domaine limité
ATR	Avion de Transport Régional	LIDAR	Light Induced Detection And Ranging
AURA/MLS	AURA (satellite)/Microwave Limb Sounder	MedSlik	Modèle de dispersion de polluants
BUFR	Binary Universal Form for the Representation of meteorological data	MEPRA	Modèle Expert de Prévision du Risque d'Avalanche
CALIPSO	Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations	MERCATOR	Projet d'océanographie opérationnelle de prévision des caractéristiques physiques de l'océan
CAPE	Convective Available Potential Energy	MESO-NH	modèle numérique à MESO-échelle Non-Hydrostatique
CARIBOU	Cartographie des Analyses du Risque de Brume et brOUIllard	METOP	METeorological OperatiOnnal Polar satellites
CAROLS	Cooperative Airbone Radiometer for Ocean and Land Studies	MFS	Meteorological Forecasting System
CHAMP	CHAllenging Minisatellite Payload	MHS	Microwave Humidity Sounder
CHIMERE	Modèle de prévision de la qualité de l'air du CNRS et de l'INERIS	MOCAGE	MODèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle
CIC	Centre International de Conférences	MODCOU	MODèle hydrologique COUplé surface-souterrain
CLOUDSAT	CLOUD SATellite (satellite d'observation de la NASA)	MODIS	MODerate resolution Imaging Spectroradiometer
CMRS	Centre Météorologique Régional Spécialisé	MOTHY	Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures
CNRM-CM3.1	CNRM - Climate Model Version 3.1	MSG	Meteosat Seconde Génération
CNRM-CM3.2	CNRM - Climate Model Version 3.2	NAO	North Atlantic Oscillation
CNRM/GMEI	Centre National de Recherches Météorologiques/Groupe de Météorologie Expérimentale Instrumentale	NH	Non Hydrostatique
CNP	Centre National de Prévision	NIVOSE	Station automatique de mesure en haute montagne
COBEL	Code de Brouillard à l'Echelle Locale	OD3D	Modèle de météorologie marine
COSMIC	Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate	OPA	Océan PARallélisé
CROCUS	Modèle d'évolution du manteau neigeux	OPAMED	Océan PARallélisé/MEDiterranée
CYCOFOS	Prévision pour la Méditerranée (plate-forme Chypre)	ORCHIDEE	ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms
DCLIM	Direction de la CLIMatologie	OSSE	Observing System Simulation Experiments
DGT	Direction Générale Toulouse	OTICE	Organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires
DIAGPACK	DIAGnostic PACKage	PALM	Projet d'Assimilation par Logiciel Multi-méthodes
DIREN	Direction InterRégionale Nord-Est	PANTHERE	Programme Aramis Nouvelles Technologies Hydrométéorologie Extension et RENouvellement
DIRIC	Direction InterRégionale Ile-de-france Centre	PCRD	Programme Cadre de Recherche et Développement
DOLMEN	Développement Opérationnel des Moyens d'Expertise Nivologique	PEARP	Prévision d'Ensemble ARPège
DT/DSO/CMR	Direction Technique/Direction des Systèmes d'Observation/Centre de Météorologie Radar	Prév'Air	Simulations déterministes de la qualité de l'air en France et en Europe
ECOCCLIMAP	Base de données de paramètres de surface	RADOME	Réseau d'Acquisition de Données et d'Observations Météorologiques Étendu
ECUME	Exchange Coefficients from Unified Multi-campaigns Estimates	RALI	Système RADar-Lidar
EPI	Événements Précipitants Intenses	RASTA	Radar Aéroporté et Sol de Télédétection Atmosphérique
EPS	Ensemble Prediction System	ROC	Relative Operating Characteristics
EQM	Erreur Quadratique Moyenne	SAFRAN	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige
ERA40	Réanalyse (sur 40 ans) du CEPMMT	SAF-NWC	Satellite Application Facility - NoWCasting
ERS	European Remote Sensing satellite	SBD	Short Burst Data (bouées)
ERS-SCAT	ERS SCATterometer	SIGMA	Système d'Identification du Givrage en Météorologie Aéronautique
EURAD	EURopäisches Ausbreitungs- und Depositionsmodell	SIM	Safran-Isba-Modcou
FM13-SHIP	Message utilisé en météorologie marine	SIR	Safran-prévision/Isba-Route
FM18-BUOY	Message utilisé en météorologie marine	SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity
FORMOSAT	Satellite operated by Taiwan's National Space Organization	SMT	Système Mondial de Transmission
GELATO	Modèle d'évolution de la banquise développé au CNRM	SOP	Special Observation Period
GLC2000	Global Land Cover 2000	SST	Sea Surface Temperature
GMAP	Groupe Météorologique d'Assimilation Prévision (CNRM)	SURFEX	SURFace EXternalisée
GML	Geography Markup Language	SVP-B	Surface Velocity Program (océanographie)
GNSS	Global Navigation Satellite System	SYMPHONIE	Modèle 3D aux équations primitives développé par le Laboratoire d'Aérodynamique
GPS	Global Positioning System	TRIP	Total Runoff Integrating Pathway
GRACE	GRAvity recovery and Climate Experiment	TSM	Température de Surface de la Mer
GRAS	GNSS Reiver for Atmospheric Sounding	UHF	Ultra High Frequency
GT1	Groupe de Travail 1 (du GIEC)	UTC	Universal Time Coordonné (TU)
GUR	Groupe des Utilisateurs Radar	VEGETATIONB	Module du satellite SPOT
HADISST	HADley centre global sea ice and Sea Surface Temperature	VHF	Very High Frequency
HAL	Hyper Article en Ligne	WIMS-Cb	Weather InforMation Systems on Cumulonimbus
HIRS	High resolution Infrared Radiation Sounder	3D-Var	Assimilation variationnelle tridimensionnelle
IAGOS	Integration of routine Aircraft measurements into a Global Observing System	4D-Var	Assimilation variationnelle quadrimensionnelle
IASI	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge		
IFS	Integrated Forecasting System		
IGACO	Integrated Global Atmospheric Chemistry Observations		
IOP	Intensive Observation Period (IOP)		
IPY	International Polar Year		
IRIDIUM	Satellite en orbite polaire		
ISBA	Interaction between Soil, Biosphere and Atmosphere		
ISBA-CC	ISBA-Cycle du Carbone		
KFS	Méthode de réduction d'entropie KFS		
LEANDRE2	Instrument Lidar aéroporté		
LEF	Langue d'Eau Froide		

Organigramme

Centre national de recherches météorologiques





Centre national de recherches météorologiques

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](http://www.cnrm.meteo.fr) - Mail : contact@cnrm.meteo.fr

Edition Météo-France

Direction commerciale et de la communication.

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

Conception, réalisation et impression D2C/IMP Trappes

Maquette de couverture www.eurorscg.fr

Rapport recherche & développement 2007

Météo-France

1, quai Branly
75340 Paris Cedex 7
Tél. : 01 45 56 71 71
Fax : 01 45 56 71 11
www.meteofrance.com

Météo-France est certifié
ISO 9001-2000 par BVQI

© Météo-France 2008
Dépôt légal août 2008
ISSN 1166-732 X



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance