

Recherche et développement 2006

En Europe
22.03.2007 12h

2° / 11°

4° / 15°

40 km/h

Front chaud

Front froid

Isobare

Direction et force
des vents en Beaufort

Retrouvez votre météo 24h/24

3° / 15°
Températures
à l'aube
et l'après-midi



Sommaire

Modèles pour la prévision du temps / p.4

Prévision numérique synoptique
Prévision numérique méso-échelle
Prévision saisonnière

La campagne de mesure AMMA / p.16

L'infrastructure d'observations mise en place en complément
des réseaux existants
Outils et méthodes de prévision en soutien aux opérations
Études conduites dans le cadre d'AMMA

Étude des phénomènes météorologiques / p.24

Étude sur la cyclogénèse et la prévisibilité
Phénomène de méso-échelle

Climat et changement climatique / p.32

Études environnementales liées à l'atmosphère / p.36

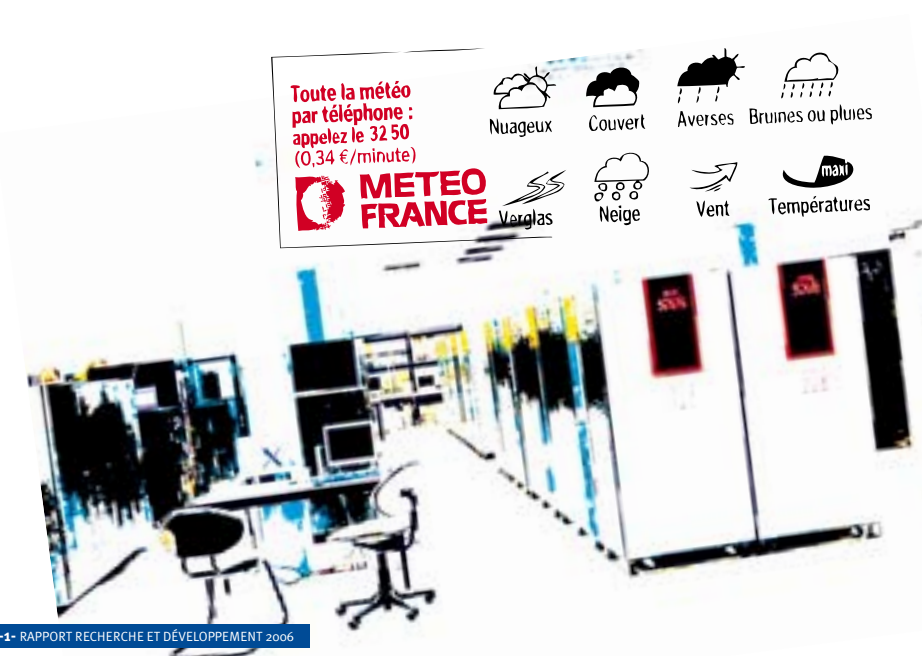
Hydrométéorologie
Océnographie (modélisation et instrumentation)
Environnement atmosphérique et météorologie urbaine
Étude du manteau neigeux et des avalanches

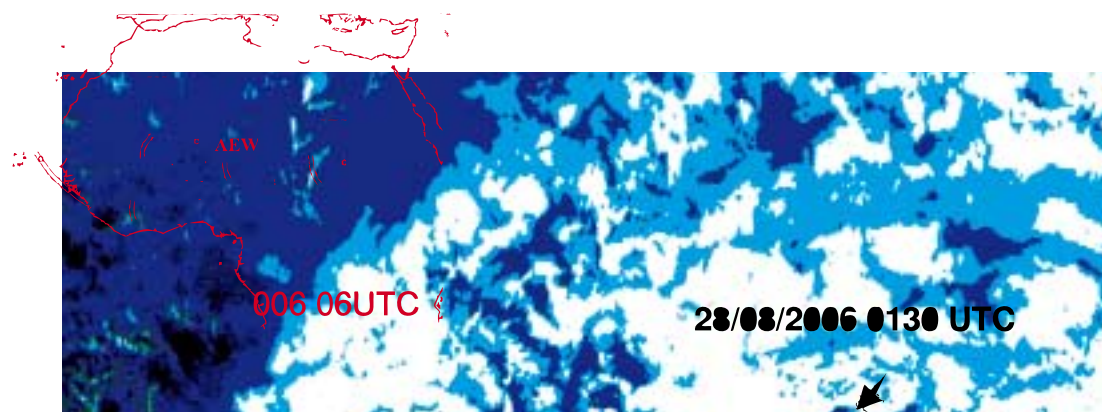
Instrumentation pour la recherche / p.48

Instrumentation aéroportée
Instrumentation in situ et télédétection

Communication / p.52

Annexes / p.54

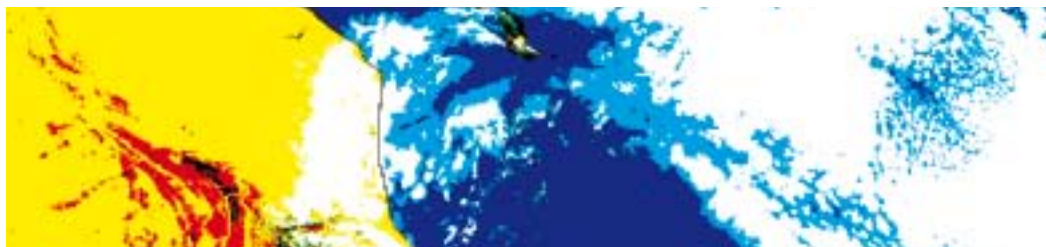


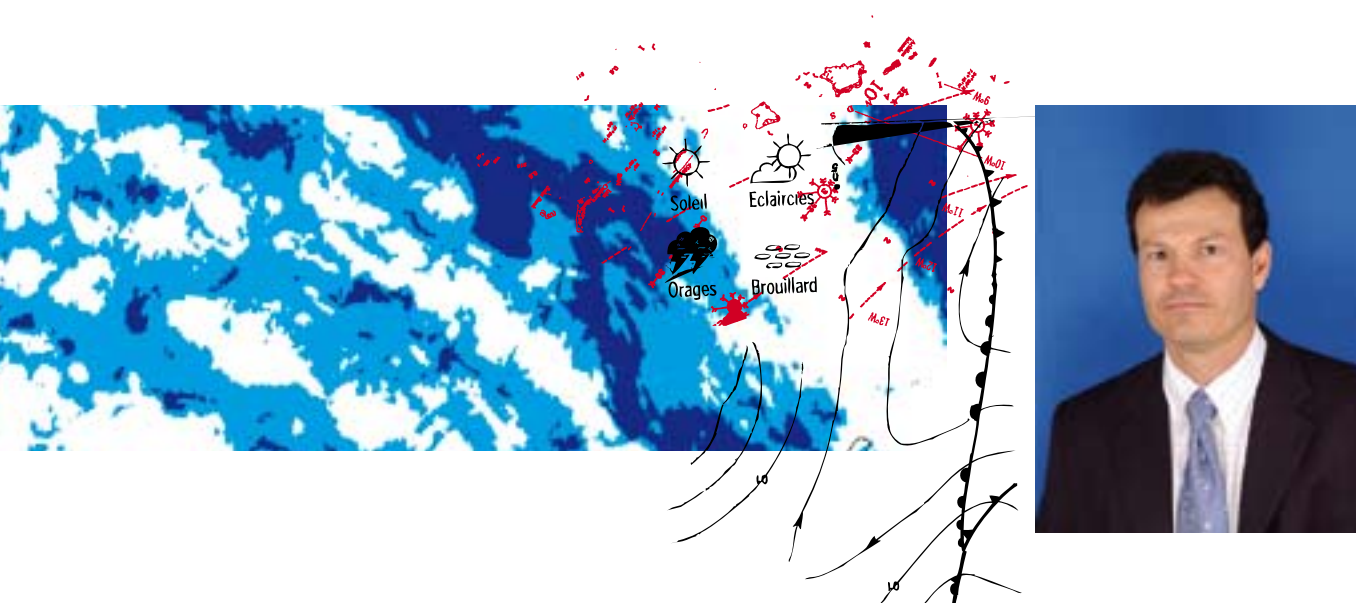


Dans le domaine de la recherche, l'année 2006 a incontestablement été marquée par la forte contribution du CNRM aux phases d'observation intensive du programme international de recherche multidisciplinaire sur la mousson africaine, qui porte le nom de AMMA.

Plusieurs articles de ce compte-rendu d'activité témoignent des objectifs du programme et des moyens mis en œuvre pour les atteindre. La participation à AMMA illustre parfaitement la stratégie du CNRM consistant à s'intégrer à de grands programmes nationaux pour faire avancer ses propres objectifs, tout en apportant une contribution significative et originale s'appuyant sur l'excellence scientifique de ses chercheurs et sur sa capacité à mobiliser des ressources humaines, financières, logistiques et administratives. La légitimité scientifique du CNRM et les moyens mis en œuvre permettent d'intervenir efficacement dans la gouvernance de tels programmes, en bonne intelligence avec ses principaux partenaires dont les objectifs propres peuvent cependant différer sensiblement des nôtres.

Le programme AMMA s'appuie sur une stratégie extrêmement ambitieuse en terme d'observations et de modélisation météorologiques, climatiques, hydrologiques, chimiques et océanographiques, mais également agronomiques, socio-économiques et sanitaires. Le dispositif expérimental mis en œuvre durant la phase intensive a traduit une volonté d'intégration multidisciplinaire inégalée jusque là. AMMA a mobilisé six avions instrumentés (dont les premières missions de l'ATR42 de Météo-France et du Falcon 20 du CNRS gérés par SAFIRE), trois navires océanographiques et des dispositifs expérimentaux exceptionnels, voire uniques au monde. Ceux-ci ont été disposés dans de nombreux pays de la région, en s'appuyant autant que possible sur les réseaux d'observation existants. Certains des systèmes





mis en œuvre sont des premières mondiales (driftsondes du CNES et du NCAR sur le Sahel et l'Atlantique, mesures aéroportées radar/lidar du CNRS sous la trace de Cloudsat/Calipso).

Réussir de telles expérimentations nécessite une énergie et une motivation peu imaginables aussi bien des chercheurs que des personnels techniques et administratifs, tant sont complexes et diverses les actions à mener : préparation et certification des avions instrumentés, reconnaissance des sites et installation des instruments, mise en place à Niamey des systèmes informatiques nécessaires au pilotage des opérations et à la prévision des situations météorologiques propices, achats et envoi de matériels.

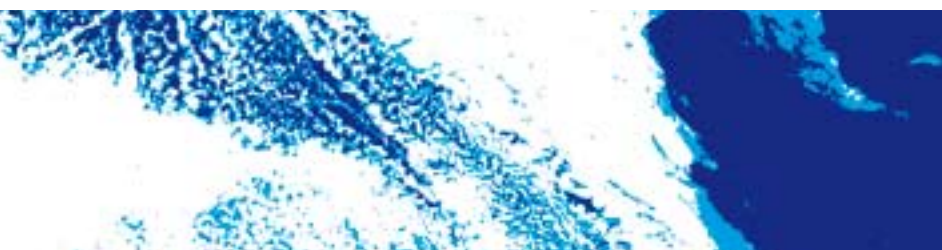
Mais l'ambition du programme va bien au delà de cette phase d'observations intensi-

ves. Le jeu de données déjà collecté s'enrichira encore par des observations de plus long terme jusqu'à fournir une matière première unique pour la poursuite, pendant de longues années, des travaux scientifiques pluridisciplinaires sur les nombreux aspects de la mousson africaine, y compris ses aspects socio-économiques.

Pour Météo-France, bon nombre des avancées qui seront faites se traduiront par l'amélioration de la performance sur l'Afrique de l'Ouest des modèles de prévision météorologique, de prévision saisonnière et de climat. Les enjeux sont considérables et Météo-France s'attachera à ce que les services météorologiques africains disposent des moyens nécessaires pour en faire profiter leur population.

ERIC BRUN

Directeur de la recherche



Prévision du temps

L'année 2006 a connu de nombreuses avancées en modélisation avec notamment de multiples travaux en assimilation de données et le portage des principaux codes de calcul sur les nouveaux supercalculateurs NEC. Par ailleurs, l'amélioration

du prototype Arome s'est poursuivie, avec en parallèle, le lancement du projet d'accompagnement à la future mise en œuvre opérationnelle de ce modèle.

PRÉVISION NUMÉRIQUE SYNOPTIQUE

Evolution des paramétrisations physiques dans les modèles Arpège et Aladin

La simulation des nuages et des échanges radiatifs a été sensiblement améliorée dans les modèles Arpège et Aladin. Deux paramétrisations sur les cinq représentant les processus physiques atmosphériques ont été entièrement renouvelées. Compte tenu de l'ampleur des changements, une année entière de tests pré-opérationnels aura été nécessaire avant la bascule opérationnelle en juin 2006. Ce travail s'intègre dans le cadre de l'action visant au développement d'une physique commune pour la prévision opérationnelle synoptique du temps et la simulation du climat.

Un nouveau schéma de nuages et de précipitations « stratiformes » représente de manière pronostique l'évolution temporelle de l'eau condensée nuageuse liquide et solide, de la pluie et de la neige pour une simulation plus précise du cycle de l'eau et des échanges de chaleur latente associés. Un schéma statistique décrivant les fluctuations sous-maille de la température et de l'humidité est utilisé pour représenter les processus de

condensation et d'évaporation nuageux. Les processus microphysiques liés aux précipitations, décrits explicitement dans ce schéma, sont la collection de l'eau nuageuse, l'évaporation et la fonte. L'algorithme décrivant la sédimentation des précipitations a également été revu.

Les nuages « stratiformes » générés par ce schéma sont combinés avec les nuages « convectifs » pour simuler les interactions nuages/rayonnement avec une nouvelle paramétrisation également utilisée au CEPMMT, dans le modèle de recherche Meso-NH et le futur modèle Arome. Les échanges radiatifs thermiques sont maintenant calculés à partir de seize intervalles spectraux, au lieu d'un seul précédemment.

Ces modifications ont permis une amélioration de la prévision des nuages (cirrus et nuages bas) et des précipitations, et facilitent l'assimilation des radiances satellites nuageuses et des réflectivités radars. (Figure 1)

Une nouvelle approche pour le calcul de la sédimentation des précipitations

Les modèles ARPEGE et ALADIN France opérationnels utilisent un schéma de microphysique pronostique issus de travaux datant de 2002 (P. Lopez), puis perfectionné par les équipes physiques du CNRM. Ce schéma est basé sur un algorithme de sédimentation lagrangien qui permet d'utiliser de grand pas de temps. Cependant, le coût quadratique avec le nombre de niveaux ainsi que la complexité de l'algorithme ont conduit à l'écriture d'un nouveau schéma plus simple.

Le principe de base de ce nouveau schéma est de construire un algorithme purement local. La sédimentation est vue, pour une espèce précipitante donnée, comme le calcul de la proportion de particules de cette espèce qui quitteront la couche considérée avant la fin du pas de temps. Si on considère que pour la sédimentation tous les membres d'une espèce précipitante donnée ont une vitesse de

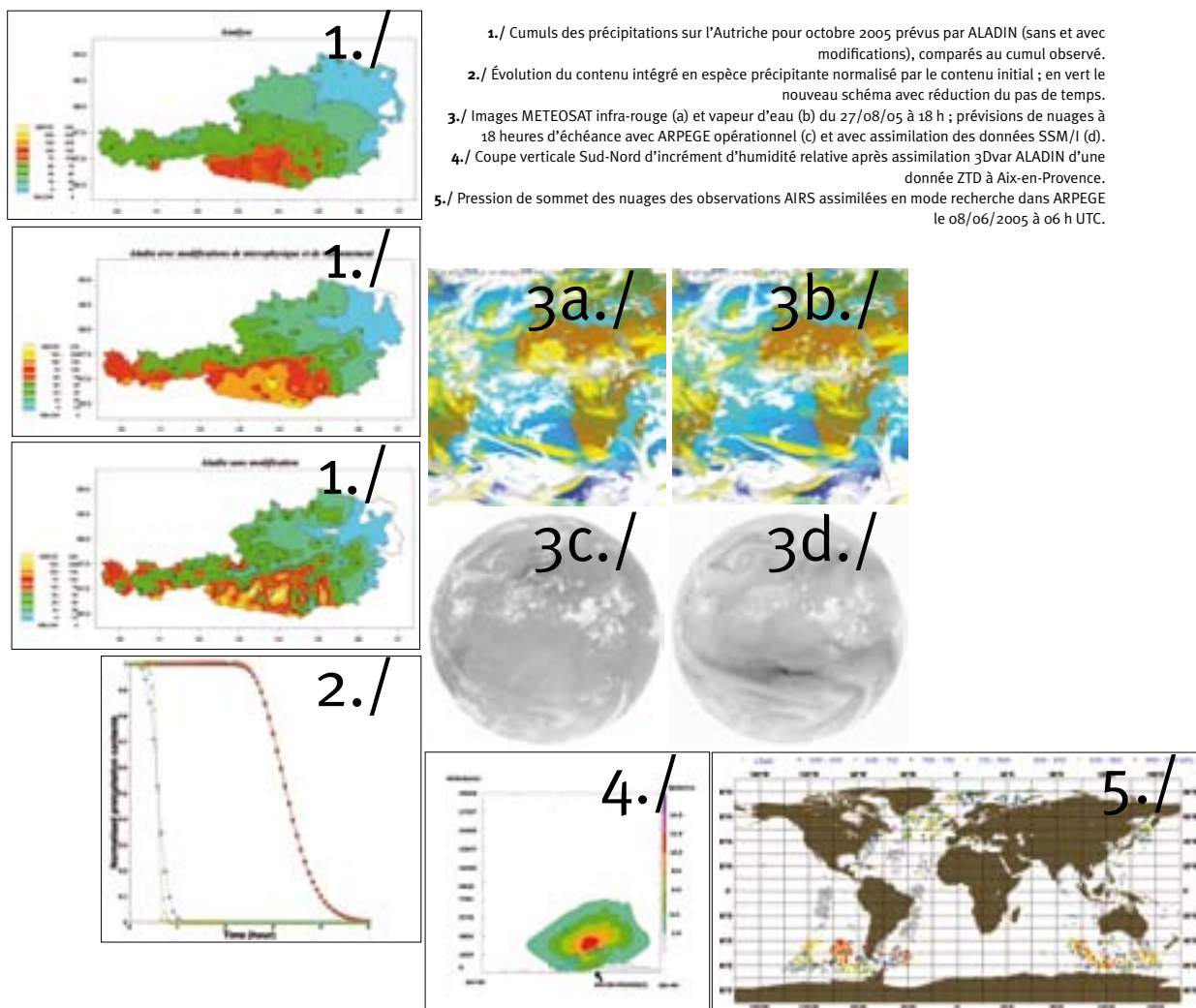
chute identique, ce qui est déjà une des hypothèses du schéma lagrangien, alors il est possible de calculer les proportions pour les trois cas qui peuvent se présenter : les particules qui sont dans la couche au début du pas de temps, celles qui viennent du niveau supérieur et enfin celles qui sont produites au cours du pas de temps. Pour le cas des particules qui proviennent du niveau supérieur, une nouvelle hypothèse est nécessaire : elle consiste à considérer que le flux entrant de particules est constant au cours du pas de temps.

On peut voir sur la figure 2 que le schéma reproduit quasi-parfaitement la sédimentation lagrangienne. La légère différence, due à la nouvelle hypothèse, est d'autant plus faible que le produit de la vitesse par le pas de temps n'est pas trop grand devant l'épaisseur des couches.

Assimilation des radiances SSM/I dans le modèle Arpège

Les données de radiances provenant des satellites défilants ATOVS sont utilisées opérationnellement à Météo-France depuis quelques années, fournissant des informations précieuses sur la température et l'humidité atmosphériques. Depuis cette année sont également assimilées les données de l'imagerie SSM/I, sensibles au contenu intégré en vapeur d'eau, à la vitesse du vent de surface et au contenu intégré en eau liquide. Ces données sont plus facilement utilisables sur mer et en zones non pluvieuses. Nous nous sommes limités dans un premier temps à ces conditions pour leur mise en œuvre opérationnelle. Leur apport conduit à une humidification globale de l'atmosphère, provenant essentiellement de la zone inter-tropicale. Les scores de prévisions sont globalement légèrement positifs.

Deux axes de recherche ont également été explorés. L'un d'eux consiste à étendre l'utilisation de ces données au-dessus des terres. Pour ceci, une connaissance précise de l'émissivité de surface est nécessaire, et une approche permettant d'évaluer celle-ci directement à partir des mesures a été développée. Grâce à cette nouvelle estimation des conditions de surface, les données de l'imagerie SSM/I ont pu être assimilées au-dessus des continents. Leur apport est généralement bénéfique, notamment au niveau de l'Afrique, où l'amélioration de l'analyse d'humidité permet une meilleure simulation des systèmes convectifs. La figure 3 montre l'apport des données SSM/I sur terre et mer pour une situation convective en Afrique. La deuxième voie explorée est l'assimilation des données SSM/I en zones pluvieuses. Un algorithme simple de régression a été développé pour assimiler ces données cruciales pour une bonne analyse des systèmes de cyclones tropicaux notamment.



1./ Cumuls des précipitations sur l'Autriche pour octobre 2005 prévus par ALADIN (sans et avec modifications), comparés au cumul observé.
2./ Évolution du contenu intégré en espèce précipitante normalisé par le contenu initial ; en vert le nouveau schéma avec réduction du pas de temps.
3./ Images METEOSAT infra-rouge (a) et vapeur d'eau (b) du 27/08/05 à 18 h ; prévisions de nuages à 18 heures d'échéance avec ARPEGE opérationnel (c) et avec assimilation des données SSM/I (d).
4./ Coupe verticale Sud-Nord d'incrément d'humidité relative après assimilation 3Dvar ALADIN d'une donnée ZTD à Aix-en-Provence.
5./ Pression de sommet des nuages des observations AIRS assimilées en mode recherche dans ARPEGE le 08/06/2005 à 06 h UTC.

Assimilation de données GPS pour la prévision des pluies intenses

La capacité du GPS-sol à détecter la vapeur d'eau troposphérique est désormais reconnue, avec une précision des estimations en contenu intégré en vapeur d'eau qui égale celle des autres instruments de mesures météorologiques (sondages, radiomètres). Dans un contexte de forte expansion des réseaux de GPS-sol, l'assimilation des paramètres troposphériques issus du GPS-sol apparaît comme une voie d'amélioration possible des champs initiaux d'humidité des modèles de prévision numérique.

L'année 2006 a vu le développement de l'assimilation des délais zénithaux totaux (ZTD) – un des paramètres troposphériques que fournissent les logiciels de positionnement par GPS-sol – dans le système d'assimilation variationnel du modèle ALADIN. Une première expérience d'assimilation avec le 3Dvar ALADIN d'un mois et demi (15 août-30 septembre 2005) des données de ZTD parvenant en temps réel dans les bases de données de Météo-France a été réalisée et montre un impact neutre en moyenne sur l'analyse. L'impact sur la prévision à courte échéance du modèle ALADIN-France a été examinée

plus particulièrement sur l'épisode de pluie intense des 5 au 9 septembre 2005 dans le Sud de la France. Un impact faiblement positif sur la prévision des précipitations a été trouvé pour cet épisode.

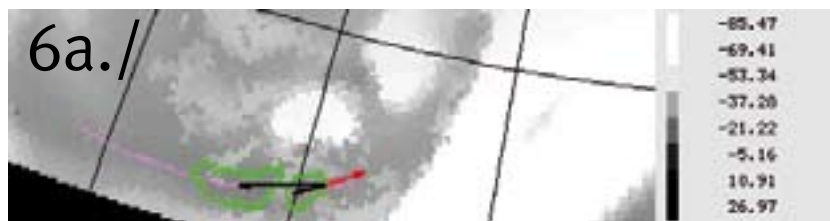
Ces travaux se poursuivent actuellement sur plusieurs aspects : i) essayer de relâcher les critères de sélection du contrôle de qualité pour assimiler un plus grand nombre de données GPS ; ii) assimiler en complément des données temps réel des données de réseaux de recherche pour évaluer l'impact d'une assimilation d'un réseau plus dense d'observations en région Méditerranéenne, et iii) examiner l'impact à plus haute résolution sur la prévision à quelques kilomètres des modèles AROME et Meso-NH.

(Figure 4)

L'assimilation des données du sondeur infra-rouge avancé AIRS

Le sondeur infrarouge AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) à bord du satellite Aqua de la NASA est le premier sondeur avancé lancé en 2002. Il fournit plus de 2000 données par point d'observation et est un précurseur de IASI (Infrared Atmospheric Sounding Inter-

ferometer) développé conjointement par le CNES et EUMETSAT. Ce dernier a été lancé en octobre 2006 à bord du premier satellite européen MetOp à orbite polaire et comporte plus de 8000 données par observation. Depuis septembre 2006, les radiances de AIRS sont utilisées dans le modèle global de façon opérationnelle. Seul un petit nombre de canaux insensibles à la présence de nuages et peu biaisés est actuellement assimilé dans le modèle global ARPEGE mais l'assimilation va être étendue à un plus grand nombre de canaux. Des travaux de recherche sont également menés pour étendre l'utilisation de AIRS dans des conditions d'observations nuageuses ou au dessus des continents. Dans le cas des observations nuageuses, différentes méthodes d'assimilation ont été testées pour des cas de nuages bas et moyens. La figure 5 illustre les pressions de sommet des nuages des observations nuageuses (en plage colorée) assimilées en plus des observations claires (en gris) pour une fenêtre d'assimilation de 6 heures. Par ailleurs, afin de mieux simuler les radiances au dessus des continents, les travaux ont été menés pour calculer l'émissivité de surface qui est un paramètre clé dans la simulation des conditions de surface et donc dans leur assimilation dans les modèles de prévision numérique.



Utilisation du radiomètre SEVIRI embarqué sur Météosat-8

Assimilation des radiances brutes :

Les observations en air clair effectuées par certains canaux (dont les canaux vapeur d'eau) sont prises en compte à haute résolution dans les quatre analyses quotidiennes du modèle ALADIN via l'assimilation de données. Elles permettent notamment de recalibrer l'humidité de la haute et de la moyenne troposphère du modèle vers un état plus réaliste. Parallèlement, des tests sont actuellement en cours afin de mesurer l'impact du produit CSR (Clear Sky Radiance : moyenne d'observations à haute résolution SEVIRI sur des pavés de 40 km de côté à laquelle est associée un pourcentage de couverture nuageuse) dans ARPEGE.

Assimilation des vents satellite SATOB :

Les canaux SEVIRI (vapeur d'eau, visible et infrarouge) permettent d'observer des structures en humidité de la haute et moyenne troposphère. Des observations de vents déduites du suivi de ces structures (vents satellites SATOB) sont assimilées dans ARPEGE, permettant l'amélioration de l'analyse du vent en altitude.

Assimilation en mode recherche dans ARPEGE d'observations de tourbillon potentiel issues du traitement des radiances SEVIRI :

Les anomalies de tourbillon potentiel d'altitude qui jouent un rôle important dans la formation des tempêtes sont repérables dans des séquences d'images géostationnaires dans les canaux vapeur d'eau. Elles sont suivies par un algorithme de traitement d'images RDT et filtrées par des règles de sélection complémentaires.

On compare ensuite les résultats des traitements appliqués aux images modèle et satellites pour détecter les incohérences.

Ce diagnostic est utilisé pour la création de pseudo-observations de tourbillon potentiel qui sont introduites dans le 4D-Var Arpège. Les premières études de cas sur des tempêtes mal prévues montrent que l'erreur d'analyse est en partie réduite. (Figure 6)

L'assimilation d'ensemble, meilleure méthode d'initialisation d'une prévision d'ensemble

La prévision d'ensemble comme approche probabiliste de la prévision météorologique, est maintenant devenue un outil pleinement opérationnel dans de nombreux centres météorologiques. Un des aspects de la prévision d'ensemble encore vivement débattu dans la communauté scientifique concerne la meilleure façon de construire les conditions initiales de l'ensemble.

Le CNRM a entamé des travaux visant à comparer plusieurs méthodes d'initialisation : la méthode des Vecteurs Singuliers, la méthode des 'Bred modes', désormais classiques, et trois méthodes d'assimilation d'ensemble (Filtre de Kalman d'Ensemble, la méthode des Observations Perturbées et l' 'Ensemble Transform Kalman Filter'). Les comparaisons sont faites sous l'hypothèse du modèle parfait en utilisant trois modèles différents : un modèle mathématique de Lorenz, un modèle quasi-géostrophique à trois niveaux et le modèle opérationnel de prévision de Météo-France, ARPEGE. La performance des différentes méthodes est mesurée à l'aide de scores propres à la prévision d'ensemble : on recherche un bon accord entre les fréquences d'événements prévues et observées (fiabilité), et une bonne description de leur variabilité statistique (résolution).

Pour la majorité des scores utilisés, les méthodes d'assimilation d'ensemble obtiennent les meilleures performances. La figure 7 montre, par exemple, pour les expériences avec le modèle quasi-géostrophique, l'évolution du score de Brier. La conclusion générale est que si l'on veut échantillonner correctement l'incertitude sur l'état prévu, le meilleur ensemble est celui qui échantillonne correctement l'incertitude sur l'état initial de la prévision.

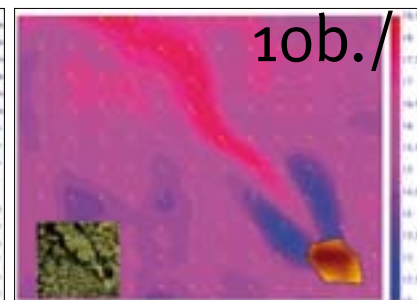
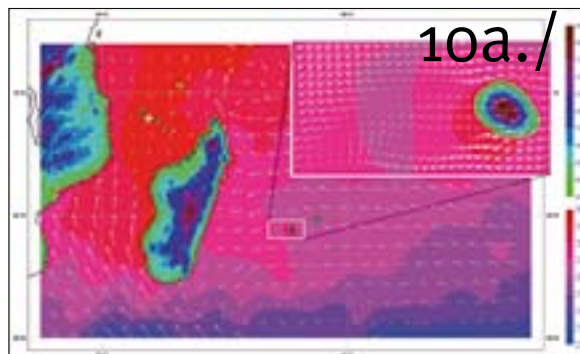
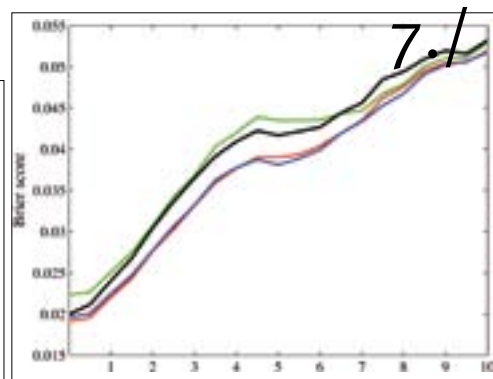
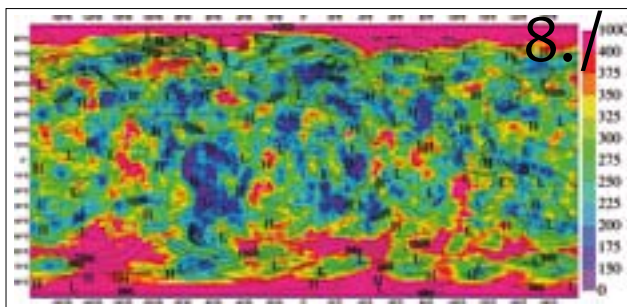
Mise en œuvre d'un ensemble d'assimilations en temps quasi réel

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.

L'estimation des erreurs de prévision et de leurs statistiques n'est cependant pas triviale, ne serait-ce que parce que l'état exact de l'atmosphère n'est jamais parfaitement connu. Dans ce contexte, une approche attractive consiste à simuler l'évolution temporelle des erreurs à l'aide d'un ensemble d'assimilations. 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.

Ainsi, un petit ensemble constitué de seulement six assimilations perturbées s'avère fournir une information utile sur la dépendance des statistiques d'erreur à la situation météorologique. Cela est illustré par la carte des portées, qui correspondent aux échelles spatiales des erreurs. Les portées sont ainsi plus petites au sud de la dépression sur l'Europe par exemple. Cela peut donc permettre d'améliorer les analyses et les prévisions des tempêtes par exemple, au travers d'une meilleure utilisation des observations locales.

Enfin, le coût d'un tel ensemble de six assimilations a pu être ramené à celui d'une seule assimilation déterministe 4D-Var. L'idée est d'utiliser la technique du 3D-Fgat, qui est proche du 4D-Var tout en étant moins coûteuse. Un tel ensemble a ainsi pu être mis en œuvre en temps quasi réel. Cela permet d'envisager sa mise en œuvre opérationnelle, qui offre également d'autres applications relatives aux diagnostics de l'assimilation et à la prévisibilité. (Figure 8)



6a/b./ : Traitement des imageries satellite et modèle (26/05/2006 06 UTC) dans le canal vapeur d'eau 6.2m pour la détection des intrusions sèches (contours et trajectoires ces cellules retenues).
7./ Evolution du score probabiliste de Brier (erreur quadratique moyenne de l'écart entre probabilité prévue et probabilité d'occurrence d'un événement), sur 10 jours de prévision, pour quatre méthodes différentes d'initialisation des prévisions d'ensemble. En noir, pour la méthode des vecteurs singuliers (opérationnelle au CEPMMT de Reading); en vert, pour la méthode des Bred modes (opérationnelle au NCEP aux États-Unis). Les meilleures techniques apparaissent en rouge pour le filtre de Kalman d'ensemble et en bleu pour l' 'Ensemble Transform Kalman

Filter'. Une prévision d'ensemble idéale aurait 0 pour score. Une prévision systématiquement fautive aurait un score de 1, une prévision n'apportant que la climatologie aurait ici un score de 0,25.
8./ Portées des corrélations (en km), obtenues avec une modélisation en ondelettes, et superposées à la pression de surface (isolignes) ; l'ensemble permet par exemple de représenter le raccourcissement des portées près de la dépression sur l'Europe.
9./ le calculateur NEC SX8R dans la salle calcul de Météo-France à Toulouse.
10a./ Domaine géographique du modèle ALADIN-Réunion sur lequel sont représentés son relief (en m) et son analyse de température de surface de la mer (°C) et de vent à 10m (flèches) du 12 décembre 2006

à 12UTC. L'encart en haut à droite, qui zoome sur l'île de La Réunion, illustre l'effet de l'orographie complexe sur le vent.
b./ Prévisions ALADIN-Réunion du 28 juin 2006 à 00UTC pour le lendemain à 00UTC. Sont représentés la température pseudo-adiabatique potentielle du thermomètre mouillé θ^*_{w} à 925hPa (plages de couleurs en°C) et le vent à 10m (flèches). En bas à gauche, la composition colorée NOAA18 du 28 juin 2006 à 23UTC, à titre de comparaison. ALADIN-Réunion prévoit de façon remarquable le panache de nuages sous le vent de La Réunion.

Le portage des modèles opérationnels sur le nouveau supercalculateur NEC

À la fin de l'année 2006, Météo-France a fait l'acquisition d'un nouveau supercalculateur NEC SX8R en remplacement du système FUJITSU VPP5000 vieillissant. La procédure de migration de la chaîne opérationnelle sur cette nouvelle machine a commencé dès l'été 2006 par le portage des principaux codes des modèles numériques opérationnels : la suite d'assimilation variationnelle 4DVar d'ARPEGE, le modèle à aire limitée ALADIN et aussi le futur modèle AROME ; enfin toute une gamme de configurations variées de ces codes (pré-traitements, post-traitements, calculs de vecteurs singuliers pour la prévision d'ensemble).

Bien que les calculateurs FUJITSU et NEC reposent sur la même architecture vectorielle, la nouvelle machine amène son lot de nouveautés techniques, en particulier la possibilité de composer deux modes de parallélisation : le « message passing » entre noeuds de calcul ou processeurs, et le « multi-threading » entre processeurs d'un

même noeud. De plus, ce nouveau serveur vectoriel est interfacé par une machine frontale de type scalaire : cette complexité supplémentaire induit des changements dans la façon de concevoir les scripts de soumission vers le serveur vectoriel, dans le but de tirer la meilleure efficacité du système.

La puissance délivrée par la machine NEC SX8R permettra d'atteindre avec le modèle AROME une résolution sur l'ensemble du territoire métropolitain qui est hors de portée de la précédente machine FUJITSU. Elle permettra aussi d'améliorer le modèle ARPEGE et son assimilation par une résolution plus fine et un accroissement du volume des observations sélectionnées.

Un modèle à 10 km opérationnel sur le sud-ouest de l'océan Indien

Météo-France assure un large éventail de prévisions dans le sud-ouest de l'océan Indien : la prévision du temps sensible sur La Réunion, la prévision marine sur l'ensemble des zones maritimes et la surveillance cyclonique, responsabilité internationale confiée par l'OMM. Depuis fin octobre 2006, les prévisionnistes

de la Direction InterRégionale de Météo-France à La Réunion disposent d'un nouveau modèle numérique (ALADIN-Réunion) sur leur zone d'intérêt (Figure 10a). La résolution horizontale de ce modèle est de 10 km, ce qui constitue un gain conséquent par rapport aux modèles globaux disponibles dont la résolution est de 25 km en prévision pour le plus fin. La meilleure description du relief escarpé de La Réunion, culminant en réalité à plus de 3000m sur une surface de seulement 2500 km², permet au modèle de prévoir des scénarios plus vraisemblables d'interaction entre le relief et l'atmosphère (Figures 10a et 10b). Ce modèle à aire limitée simule aussi des cyclones ayant une structure beaucoup plus réaliste que dans les modèles globaux, ce qui est bénéfique pour les prévisions de leurs trajectoire et intensité.

Des travaux en cours visent à améliorer la position analysée des cyclones, et en aval leur position prévue, par l'apport d'une information tridimensionnelle en vent et une utilisation plus large d'observations satellitaires. L'impact d'une analyse de température de la mer à haute résolution sera exploré, afin de déterminer si cette voie permet des progrès en matière de prévisions d'intensité des cyclones.

Les évolutions du projet Aladin-2 et la collaboration en R&D avec les partenaires

Depuis fin 2005, une profonde restructuration du projet de collaboration internationale Aladin (plus précisément Aladin-2) a été entreprise, dans le but de renforcer les capacités de coordination, tout en maintenant la collaboration scientifique au moins au même niveau que par le passé. La nouvelle structure définit un Programme Manager, un groupe de soutien, des comités scientifique et stratégique, une Assemblée Générale, des contacts locaux. Une autre nouveauté est la mise en place d'un budget central de R&D, auquel chaque partenaire contribue à part

égale. Les développements pour la prévision numérique à aire limitée à très haute résolution (typiquement de 7 à 2.5 km) sont au cœur de la stratégie scientifique. Pour l'essentiel, le projet Aladin-2 va se concentrer à développer, dans le logiciel commun IFS/Arpège/Aladin/Arome, une physique pour les échelles dites « intermédiaires » (résolution de 7 à 4 km), participer au développement de la prévision et de l'assimilation Arome (autour de 2.5 km), poursuivre la maintenance logicielle pour l'ensemble de ces systèmes.

A titre d'exemple, un travail récent de nos partenaires Aladin, la « diffusion horizontale Semi-Lagrangienne (SLHD) » dans le jargon, a été implémenté et testé à la fois dans Arome, Aladin-France et Arpège. Il s'agit d'imposer dans les modèles une diffusion numérique dépendant de l'écoulement. *Les figures 11a et 11b* montrent des précipitations instantanées du modèle Arome pour un cas de ligne de grain sur le Sud-Est de la France. La structure très linéaire de ce système est bien mieux décrite avec la version SLHD.

Les premiers résultats du prototype AROME et la préparation à l'utilisation opérationnelle du modèle

Depuis le mois de juillet 2005, le prototype AROME est mis en œuvre de façon quotidienne à des fins de démonstration. Cette version est en évolution constante, le prototype étant en phase de construction. Bien qu'incomplète, cette première version d'AROME permet de se faire une idée de ce que pourra apporter l'utilisation d'un modèle numérique à mésoéchelle à la prévision du temps et du chemin qu'il reste à faire pour cela.

Le prototype AROME est visualisé sur les postes Synergie en test à la fois à la Direction de la Prévision, à l'Ecole Nationale de la Météorologie et également dans certaines régions comme la Direction régionale Sud-Est. Cette utilisation contribue à préparer les services de prévision à l'utilisation d'AROME. Les pre-

mières évaluations subjectives montrent que le prototype est capable de simuler certains types de temps à son échelle et qu'il constitue un apport dans le détail des champs. Ce travail, démarré en avril 2006, a un objectif triple : d'une part, évaluer subjectivement l'apport du prototype ; d'autre part, imaginer et spécifier les diagnostics utiles à l'exercice de l'expertise du prévisionniste à échelle fine ; et enfin développer les outils nécessaires à la formation des prévisionnistes. En parallèle, les services qui envisagent de développer des produits à partir des champs prévus par AROME énoncent leurs besoins afin qu'ils soient pris en compte dans la mise en œuvre du scénario d'exploitation du modèle et qu'ils puissent tester en amont l'apport de l'utilisation d'AROME. (*Figure 12*)

Assimilation des réflectivités radar

L'assimilation de données permet de rappeler à un modèle de prévision numérique (PN) les dernières observations météorologiques. Dans le cadre du développement du prochain modèle de prévision numérique à haute résolution de Météo-France (Arome), il est envisagé d'assimiler des observations radar afin d'améliorer entre autres la prévision des événements fortement précipitants.

Cependant, le système d'assimilation variationnelle prévu pour Arome n'est pas capable de traiter directement les réflectivités mesurées par les radars. Une méthode de type statistique a donc été développée afin de restituer des paramètres analysables

directement par le système d'assimilation d'Arome (humidité, température, etc.) à partir des réflectivités observées et des informations fournies par le modèle (champs d'humidité, température, réflectivité simulée, etc.) au moment de l'assimilation.

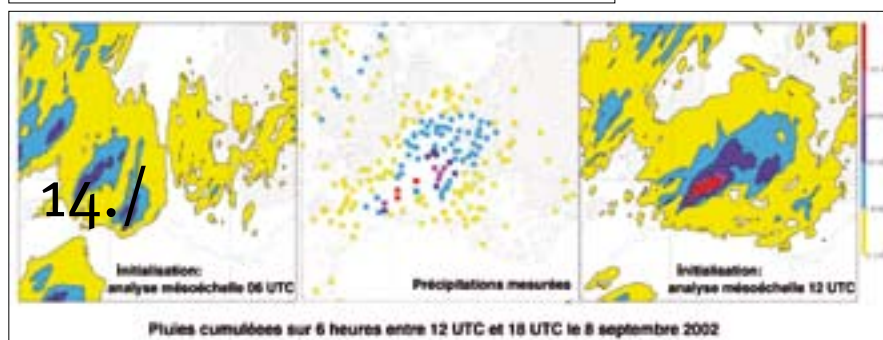
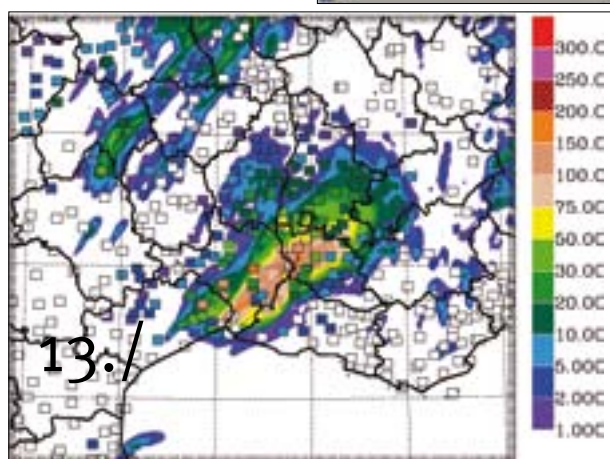
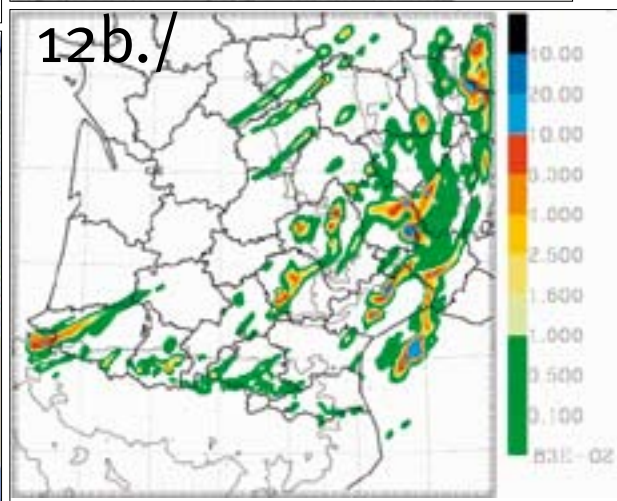
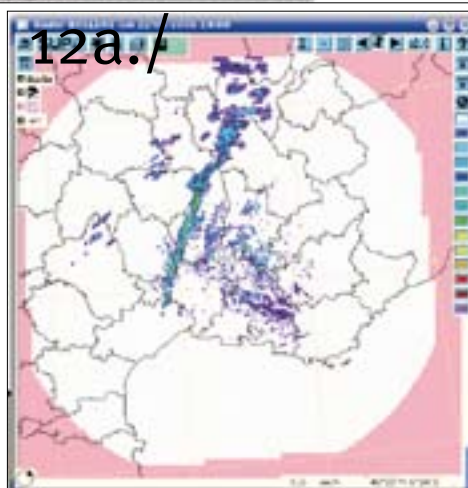
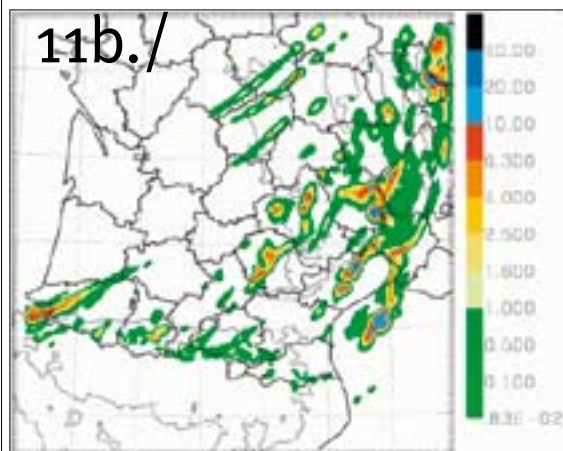
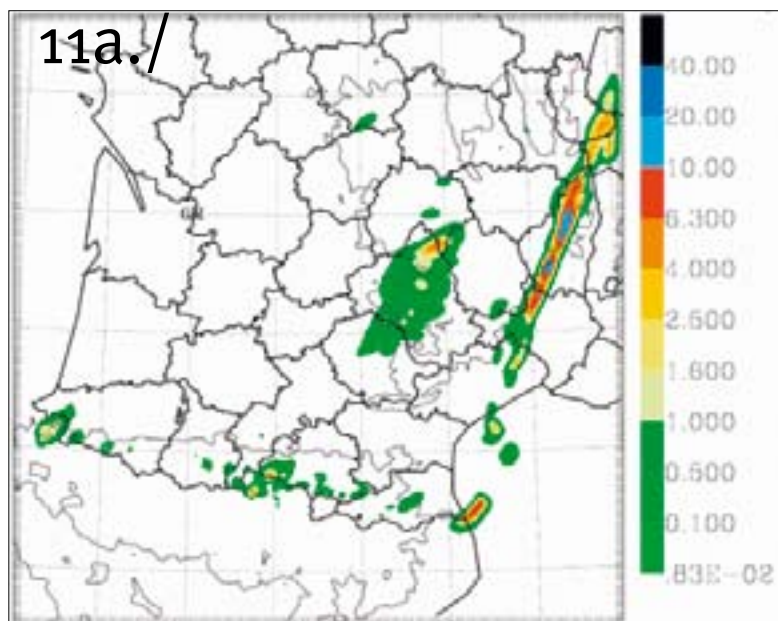
La technique complète d'assimilation des réflectivités radar a été testée sur un cas d'étude. Si la structure et la localisation des précipitations paraissent améliorées, la méthode semble néanmoins produire trop de précipitations. Des études complémentaires sont nécessaires afin de mieux identifier et corriger ce comportement. (*Figure 13*)

Assimilation de données à mésoéchelle en région Méditerranéenne

Dans le cadre du développement du projet AROME, un système hybride d'assimilation à l'échelle kilométrique, associant le modèle de recherche Méso-NH et le module d'assimilation du modèle opérationnel ALADIN a été développé. Le modèle Méso-NH fournit l'ébauche pour le calcul des écarts aux observations, et le schéma 3D-Var d'ALADIN permet de minimiser la fonction coût.

Ce système a permis de tester l'apport d'une meilleure initialisation des basses couches et du champ d'humidité sur la simulation d'un événement de pluie intense méditerranéen (situation des inondations du Gard des 8-9 septembre 2002). L'assimilation des données du réseau de stations de surface (humidité, température et vent) et du satellite QuikSCAT (Vent près de la surface de la mer) permet une initialisation plus réaliste du flux de sud humide et instable alimentant le système et de la plage froide sous-orage qui joue un rôle essentiel dans la stationnarité de ce système sur les plaines du Gard.

Plusieurs configurations du cycle d'assimilation (fréquence de 1h à 6h, nature des observations assimilées : radiosondage, observations de surface, QuikSCAT) ont été testées et montrent que le gain le plus important est obtenu par l'analyse des observations de surface lorsque le système est déjà en place sur le Gard. L'assimilation en zone Méditerranéenne se heurte en effet au problème de l'hétérogénéité spatiale du réseau d'observation conventionnel, dont les mesures sont principalement terrestres. Alors que de nombreux systèmes fortement précipitants se forment sur mer avant de venir s'ancrer sur les terres du pourtour Méditerranéen occidental, peu d'observations sont disponibles pour décrire cette phase d'initiation dans l'assimilation. Des travaux sont en cours pour exploiter au mieux les données satellitaires dans ces zones pauvres en données in-situ. (*Figure 14*)



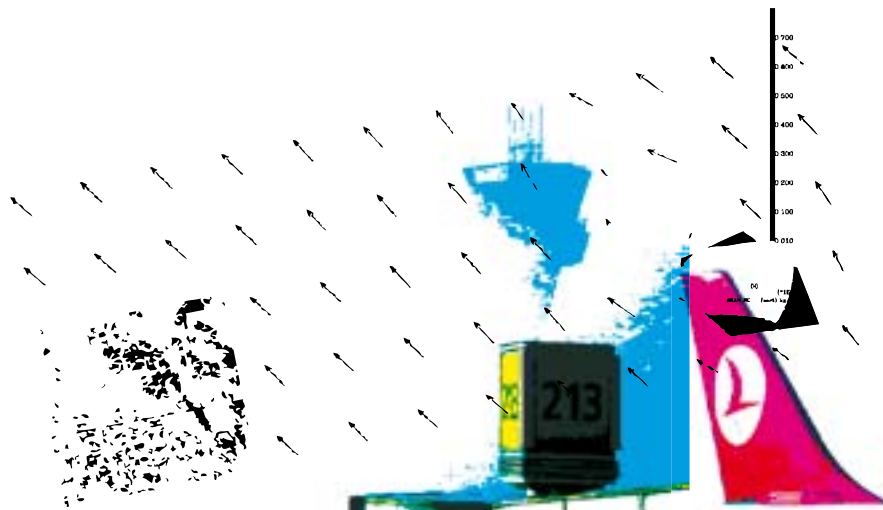
11a./ Précipitations instantanées (mm/h) pour une simulation Arome avec diffusion « SLHD » (voir texte).

b./ Précipitations instantanées (mm/h) pour une simulation Arome sans diffusion « SLHD » (voir texte). Figures fournies par Yann Seity (CNRM) et Filip Va a (CHMI, Prague, Rép. Tchèque).

12a./ Les précipitations vues par le radar de Bollène le 22 mai 2006 à 14 heures UTC. b./ La prévision de précipitation à 14 heures d'échéance par le prototype AROME

13./ Cumuls de pluie (en mm) entre 1200 et 1800 UTC le 8 septembre 2002. Les observations pluviométriques (carrés) sont superposées aux pluies simulées par le modèle Méso-NH (surfaces colorées). Les conditions initiales sont fournies par une analyse à mésoéchelle des données de réflectivités radar, des observations de surface et des radiosondages.

14./ Les pluies intenses observées lors de l'épisode exceptionnel de pluies cévenoles du 8 septembre 2002 entre 12 h UTC et 18 h UTC (au centre) sont très bien modélisées par une simulation initialisée par une analyse mésoéchelle à 12 h UTC (à droite). La simulation initialisée par une analyse à 06 UTC (à gauche) modélise bien des précipitations importantes, mais d'intensité un peu faible, et avec une localisation un peu décalée vers les contreforts du Massif Central.



Amélioration de la représentation des cumulus dans Arome

A la résolution horizontale d'Arome, la dynamique non-hydrostatique d'Aladin-NH associée à la microphysique détaillée de MésO-NH permet de modéliser explicitement la convection profonde de façon réaliste. En revanche, 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 à cette résolution.

Les thermiques peu profonds qui se développent dans une couche limite instable jouent un rôle essentiel dans le mélange vertical de chaleur, d'humidité et de quantité de mou-

vement qu'il y ait formation de nuage ou non. Ce mélange est reproduit en partie par le schéma de turbulence, puis doit être complété dans le cas d'Arome par une paramétrisation dite « de convection peu profonde ». Dans le premier prototype d'Arome, la convection peu profonde est traitée par le schéma développé à l'origine pour MésO-NH (il date de 2001). Ce schéma, qui ne se déclenche que si on diagnostique un nuage (pas de thermiques secs) produit un mélange insuffisant qui se traduit par des structures nuageuses trop concentrées.

Un nouveau schéma basé sur la construction d'un thermique sous-maille nuageux ou non

à partir du sol a été développé. Ce schéma est inspiré du schéma en flux de masse développé en 2004 (Soares), combiné au calcul de l'entraînement et du déentraînement nuageux du schéma original de MésO-NH.

La validation de ce nouveau schéma a commencé sur des cas d'intercomparaison idéalisés et se poursuit maintenant dans Arome, avant d'être proposé pour une intégration dans le prototype. Le travail sur les schémas en flux de masse a permis de mettre en place des collaborations avec les autres équipes européennes travaillant sur le sujet, en particulier au KNMI et au CEPMMT. (Figure 15)

Amélioration de la représentation du brouillard dans MésO-NH / AROME

Le brouillard est un phénomène complexe, impliquant des processus microphysiques, radiatifs, turbulents et chimiques. Une étude s'est concentrée sur la microphysique, avec l'objectif d'améliorer la modélisation du cycle de vie du brouillard dans AROME. En effet, même si le prototype AROME semble reproduire assez régulièrement des situations de brouillard, les contenus en eau nuageuse paraissent surestimés ainsi que l'extension verticale de la couche nuageuse. La sédimentation des gouttelettes d'eau nuageuse, non négligeable dans les brouillards, a ainsi été introduite dans le schéma microphysique de MésO-NH/AROME. La prise en compte de ce processus permet, sur des cas à une dimension, de réduire les contenus en eau nuageuse et en gouttes de pluie, le réchauffement radiatif associé étant alors plus faible. Cela modifie sensiblement le cycle de vie du brouillard, notamment l'extension verticale

et l'heure de dissipation. L'heure de formation du brouillard est quant à elle fortement sensible à la résolution verticale dans les très basses couches, plus tardive lorsque la résolution est grossière. Ces améliorations seront testées dans AROME à partir de janvier 2007, et leur validation s'appuiera sur la campagne PARIS-FOG qui se déroule sur le site de Palaiseau durant l'hiver 2006-07. (Figure 16)

Prévisions immédiates du brouillard sur les plate-formes aéroporutaires

La prévision du cycle de vie du brouillard, et notamment de sa formation et de sa dissipation, est un enjeu important pour la gestion du trafic sur les aéroports. Le système COBEL-ISBA a été élaboré en collaboration avec le Laboratoire d'Aérodynamique pour répondre à ce besoin spécifique de prévision locale du brouillard. Il est composé d'un modèle numérique local COBEL-ISBA, d'un système

d'assimilation adaptatif local, et d'un système d'observation dédié. Ce système de prévision est utilisé par les prévisionnistes pour élaborer des produits spécifiques pour Roissy depuis décembre 2002. Il est en cours d'installation à Orly, et à Lyon St Exupéry.

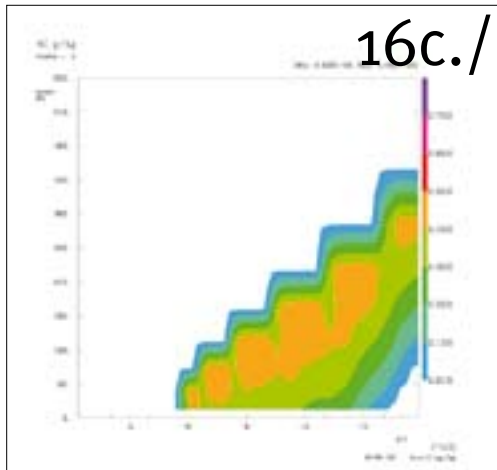
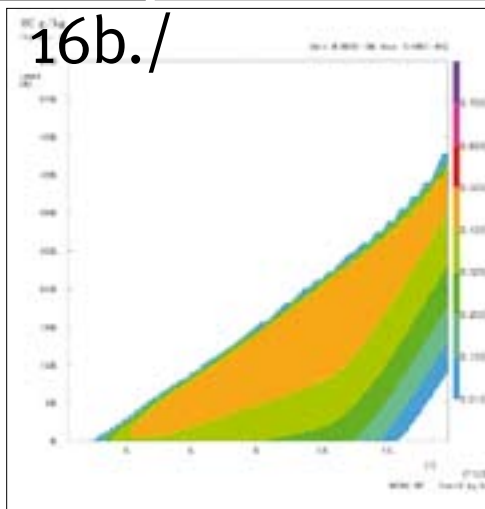
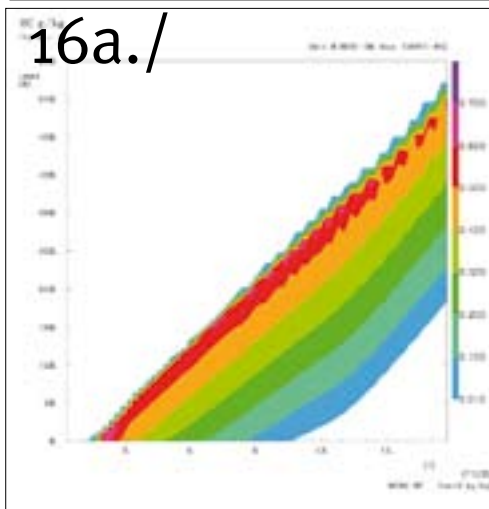
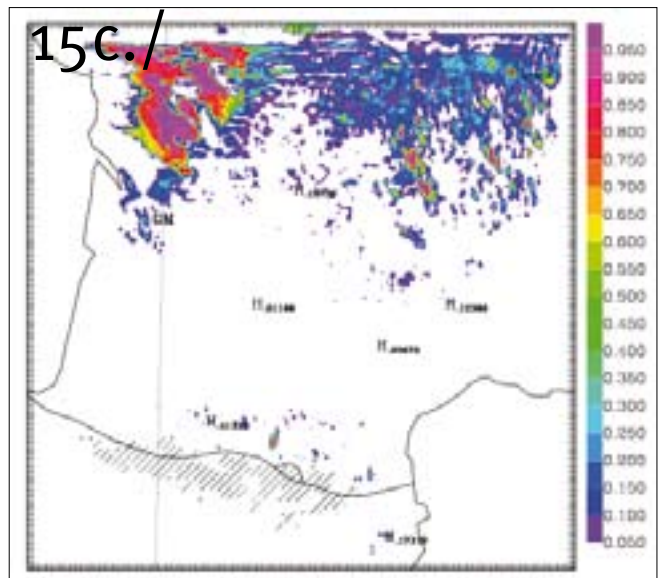
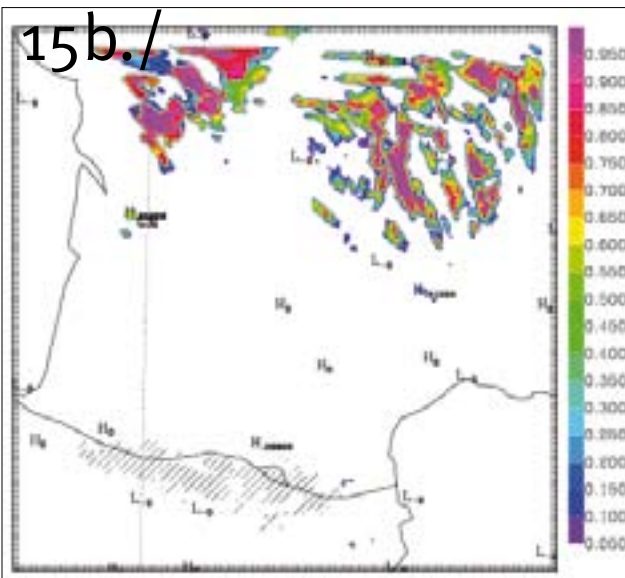
En 2006, COBEL-ISBA a été intégré au système de production opérationnel de Météo-France, et plusieurs actions ont été menées dans le but d'améliorer les performances du modèle. La description des propriétés optiques du brouillard a été améliorée, et des prévisions sont désormais réalisées toutes les heures, ce qui permet de tirer le maximum des systèmes d'observations spécifiques qui sont mis en oeuvre.

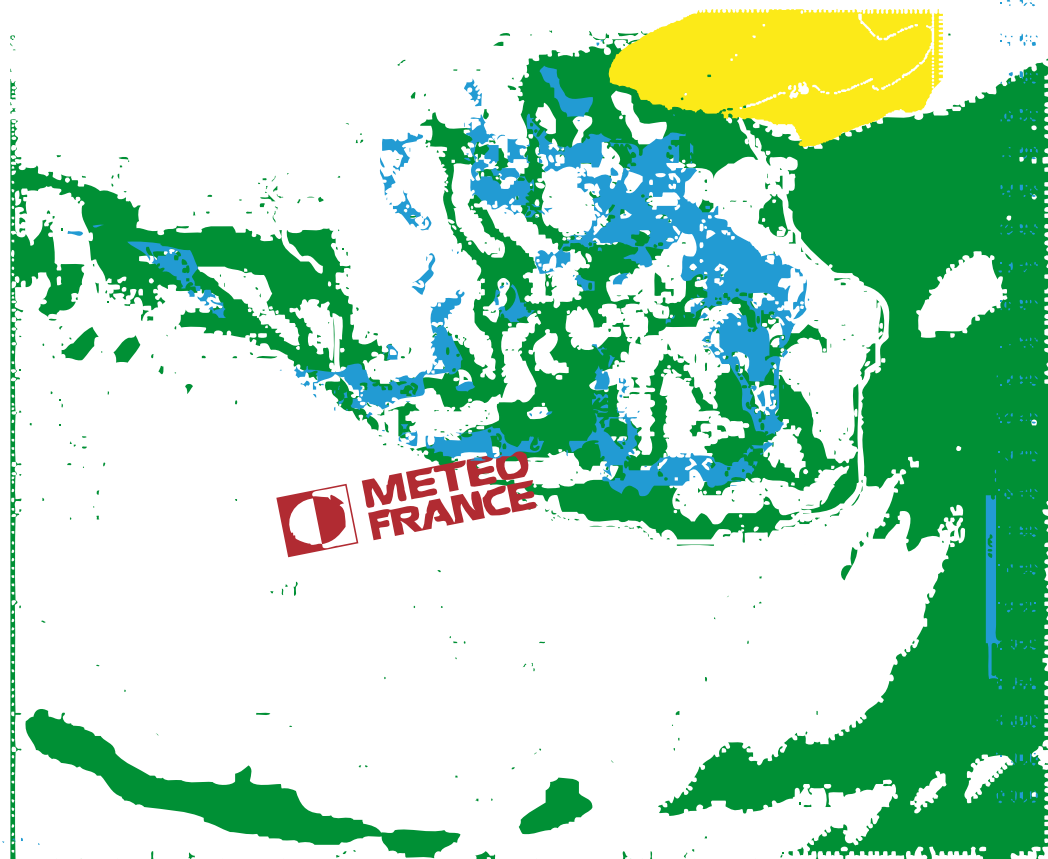
Durant l'hiver 2006-2007, COBEL-ISBA a été utilisé pendant l'expérimentation PARIS-FOG. Cette campagne scientifique axée sur l'observation et la prévision du brouillard doit permettre de rassembler un jeu de données complet sur lequel pourront s'appuyer les travaux scientifiques dans les années qui viennent. (Figure 17)

- 15./ Situation du 6 juin 2006 à 11h TU sur le sud-ouest de la France (POI de l'expérience Carbo-Europe riche en observations) :
- a./ Image satellitaire visible haute résolution ;
 - b./ prévision de la couverture nuageuse à 1500 m par le prototype Arome ;
 - c./ prévision de la couverture nuageuse à 1500 m avec le nouveau schéma de convection peu profonde.

- 16./ Evolution temporelle sur 18h sur les 600 premiers mètres d'altitude le 1er octobre 2003 à partir de 18TU du contenu en eau nuageuse (en g/kg) d'une simulation MésO-NH 1D
- a./ Résolution verticale fine, sans sédimentation d'eau nuageuse ;
 - b./ Résolution verticale fine, avec sédimentation d'eau nuageuse ;
 - c./ Résolution verticale du prototype AROME, avec sédimentation d'eau nuageuse.
- 17./ le brouillard peut réduire de moitié le trafic aéroporutaire (aéroport d'Istanbul, photo Ruchan Ziya).

15a./





Signalisation du risque de givrage aéronautique : utilisation combinée de données issues de satellite, de radar et de modèle numérique

Parmi les dangers pour la sécurité aérienne, le givrage en vol est cause d'accidents et peut avoir un impact significatif sur la gestion de vols (retards, détournements). Météo-France a donc développé un système d'identification des zones givrantes : SIGMA (Système d'Identification des zones Givrantes en Météorologie Aéronautique).

Ce système est basé sur la fusion de sorties de modèles de prévision numérique, d'imagerie infra-rouge, et de réflectivité radar du réseau de radar sol de Météo-France. La capacité de détection des zones à risques par SIGMA a été démontrée au cours d'évaluations et de cam-

pagnes de validation sur l'Europe et les USA.

De nouveaux développements de l'algorithme de SIGMA ont lieu dans le cadre de FLYSAFE, projet du 6ème Programme Cadre de Recherche et Développement de la Commission Européenne. Ce projet, dédié à l'amélioration de la sécurité des vols, 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.

Cette année, SIGMA est passé d'une version

en points de grille fournissant le maximum de risque sur la verticale à une version fournissant des objets « givrage » selon leur sévérité sur différents niveaux de vols. Le nouveau produit est plus adapté à une utilisation directe par les contrôleurs aériens, les compagnies aériennes et les équipages. D'autres évolutions du système sont à l'étude, rendues possibles grâce aux meilleures résolutions spatiale et temporelle des données satellites et des modèles de prévision numérique, ainsi qu'aux nouveaux produits issus de l'imagerie satellite et radar.

(Figure 18)

Des simulations numériques à échelle 1 km, afin d'apporter une aide au zonage des vents cycloniques lors de la rédaction des dossiers CAT/NAT

Afin de pouvoir qualifier les événements cycloniques dans les Pays d'Outre Mer pour les déclarations d'état de catastrophe naturelle (dossiers CAT/NAT), Météo-France a développé, dans le cadre du Réseau d'Etudes et de Transfert Interne de Connaissances, une méthode de zonage des vents cycloniques basée sur le résultat de simulations numériques à échelle fine (1 km).

Le modèle de recherche Mésa-NH, développé conjointement entre le Laboratoire d'Aérodynamique et Météo-France, a été utilisé et mis au point dans une configuration originale

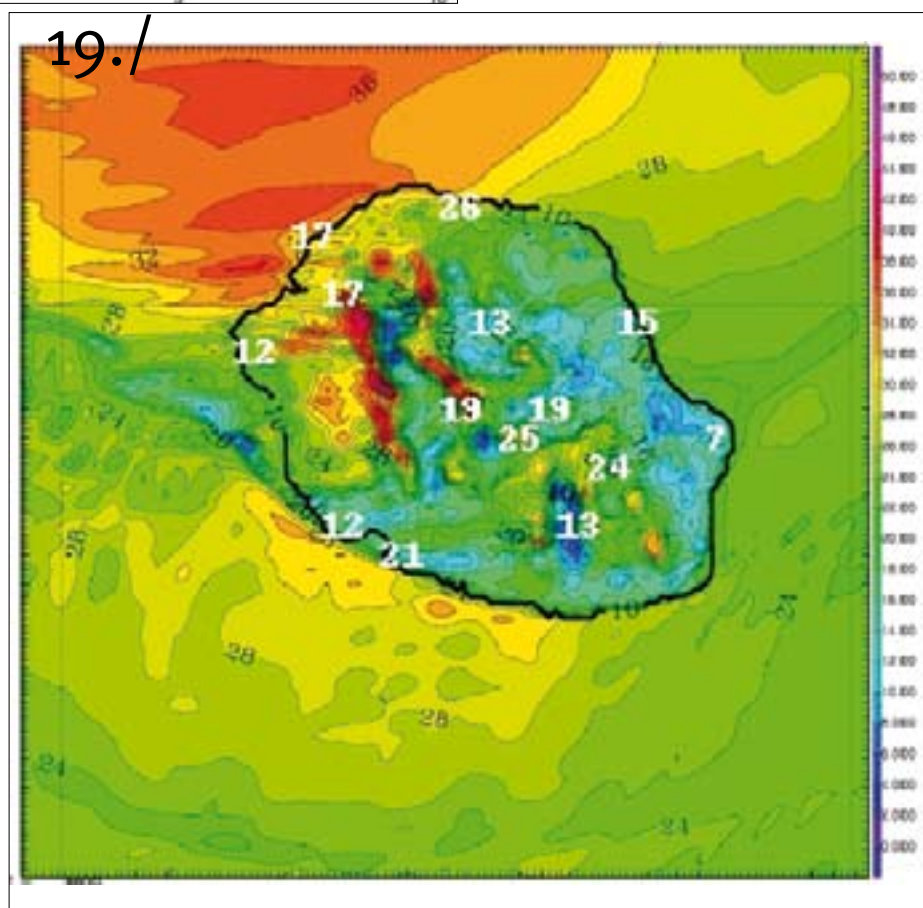
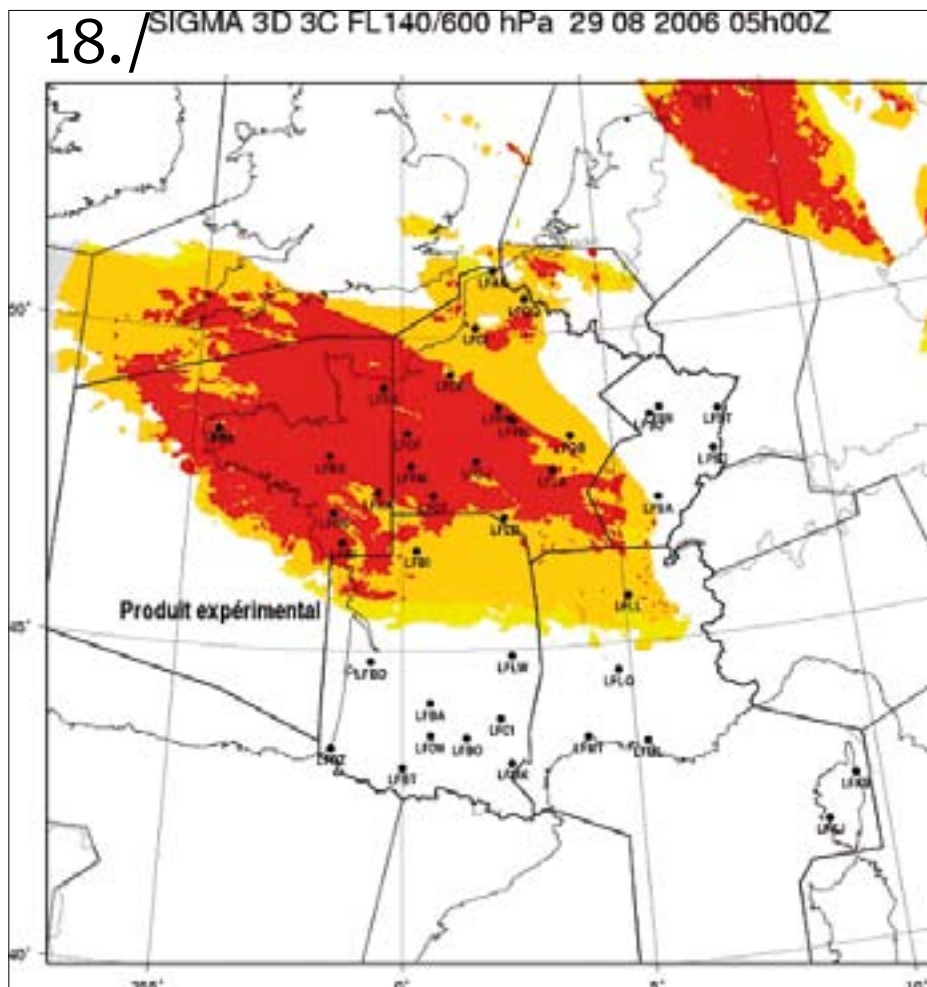
permettant de prendre en compte les particularités des cyclones (prise en compte spécifique des conditions initiales, simulations par tronçons afin de mieux se rapprocher de la trajectoire).

Les résultats obtenus sur les trois cyclones étudiés présentent une bonne cohérence d'ensemble avec des structures caractéristiques pertinentes. Les simulations fourniront des éléments d'aide à la rédaction des dossiers CAT/NAT mais une expertise locale sera indispensable pour la critique et l'interprétation des résultats, qui seront systématique-

ment comparés aux observations. Par ailleurs, il n'est pas garanti que la méthode puisse tourner sur l'ensemble des cyclones, lors de trajectoires trop erratiques en particulier.

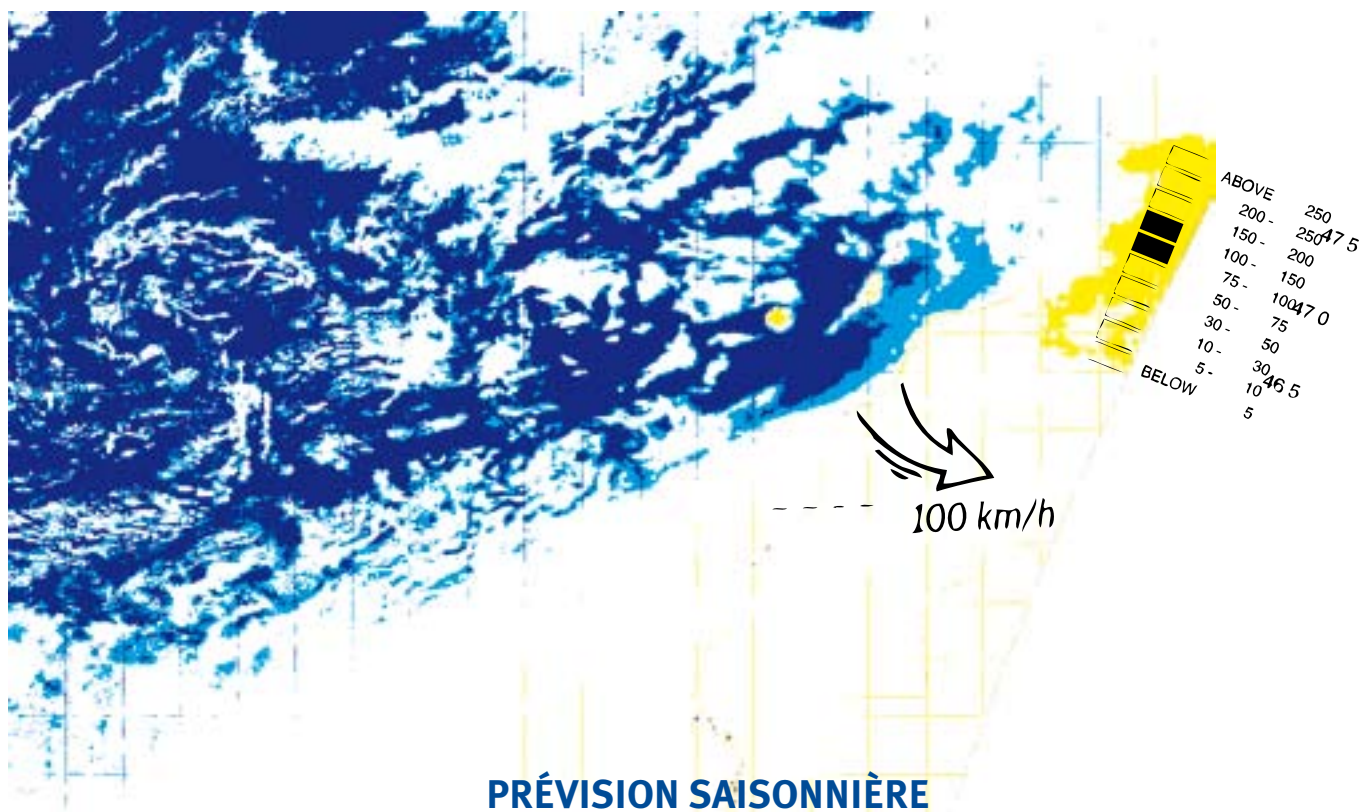
La méthode sera activée au cas par cas par la Direction de la Production à Toulouse, les résultats seront ensuite analysés par les personnes en charge des dossiers CAT/NAT dans les Directions Outre-Mer de Météo-France. Le délai nécessaire pour le lancement des simulations et l'interprétation des résultats sera de l'ordre d'un mois au total.

(Figure 19)



18./ Diagnostic de givrage obtenu à partir du produit SIGMA pour le 29 août 2006 à 05hUTC au niveau 600hPa, présentant une zone de conditions givrantes de risque modéré à sévère en rouge, de risque modéré en orange et de risque faible en jaune.

19./ Vitesse en m/s du vent moyen sur 10 minutes simulé (observations en blanc) le 22 janvier 2002 à 16 UTC sur l'île de La Réunion (cyclone DINA).



PRÉVISION SAISONNIÈRE

L'utilisation des prévisions saisonnières dans les DOM-TOM

Les prévisions saisonnières de Météo-France sont actuellement préparées par la DCLim qui utilise le modèle Arpège couplé avec initialisation Mercator. Cette prévision comporte 41 membres et participe à l'expérience multi-modèles Euro-SIP en cours avec la participation des modèles du CEP et du Met Office.

Un des challenges à relever pour l'utilisation de ces prévisions est de préparer des produits adaptés à l'échelle des utilisateurs, généralement largement en deçà de celle des Modèles de Circulation Générale (résolution typiquement supérieure à 200 km). Dans cette perspective, un travail a été réalisé sur l'adaptation des prévisions saisonnières en

Nouvelle-Calédonie. Outre une méthodologie généralisable à l'ensemble des DOM-TOM, certains résultats ont été mis en lumière. Parmi ceux-ci, on peut citer la mise en évidence des limites spatiales de la descente d'échelle, l'apport des modèles non linéaires pour les prévisions probabilistes, la possibilité de calibrer ces méthodes sur des jeux de réanalyse en cas d'expérience de référence courte ou encore l'apport de solutions multi-modèles par rapport aux solutions modèle unique. Ainsi, il apparaît vain de vouloir prévoir des précipitations à une échelle plus petite que celle de l'ensemble du territoire Calédonien, alors qu'on peut affiner les pré-

visions pour les températures minimales ou maximales en utilisant 2 sous-régions.

Ce travail devrait prochainement se concrétiser par des produits de prévision saisonnière adaptés au territoire de la Nouvelle-Calédonie. Cela sera possible dès que la nouvelle version de notre modèle couplé sera disponible avec la réanalyse océanique Mercator. Il bénéficiera alors, non seulement d'une meilleure analyse océanique et d'un modèle Arpège amélioré, mais également d'une durée plus importante de l'expérience de référence (plus de vingt ans). (Figure 20)

Des prévisions saisonnières aux prévisions décennales

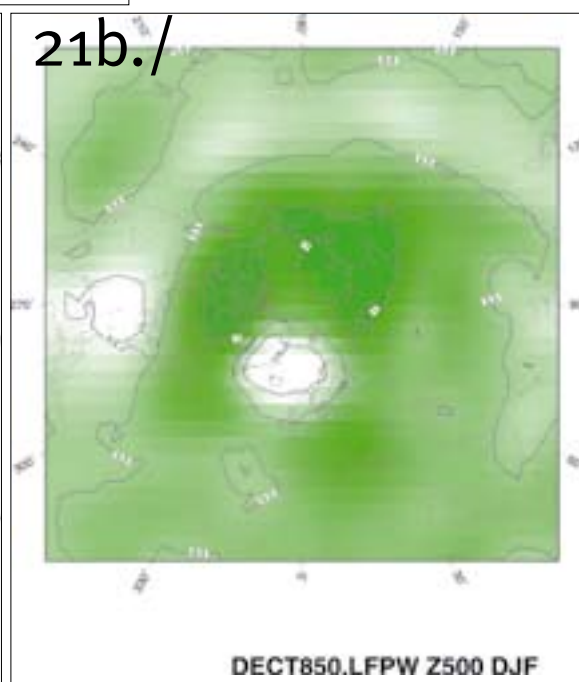
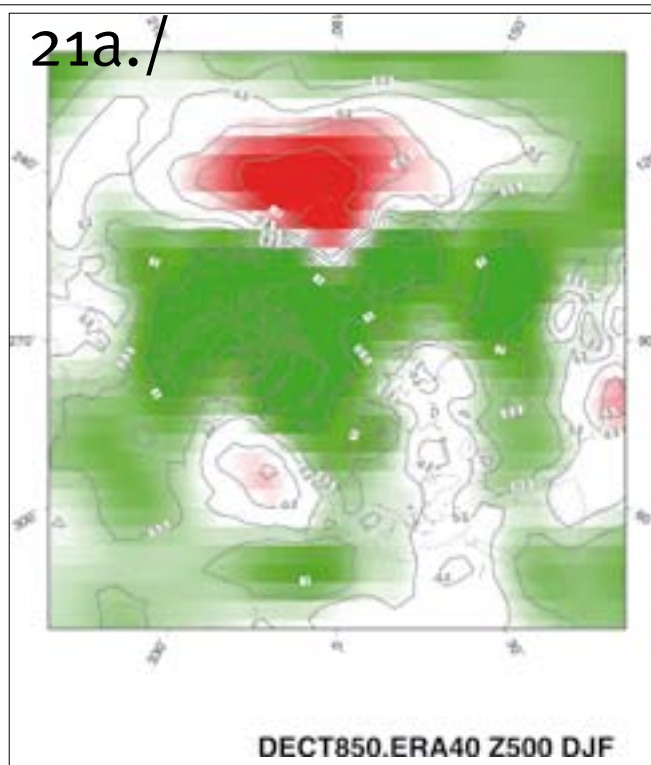
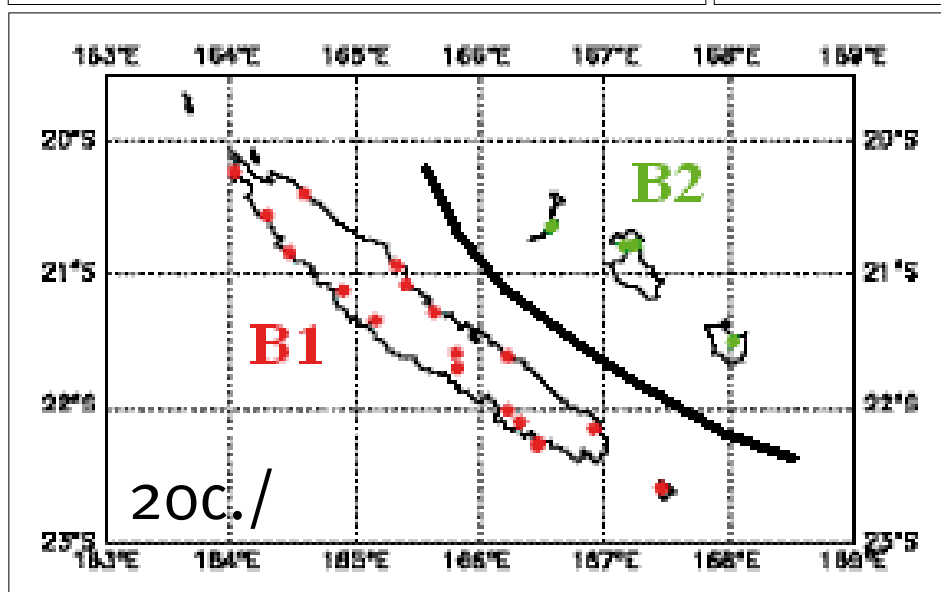
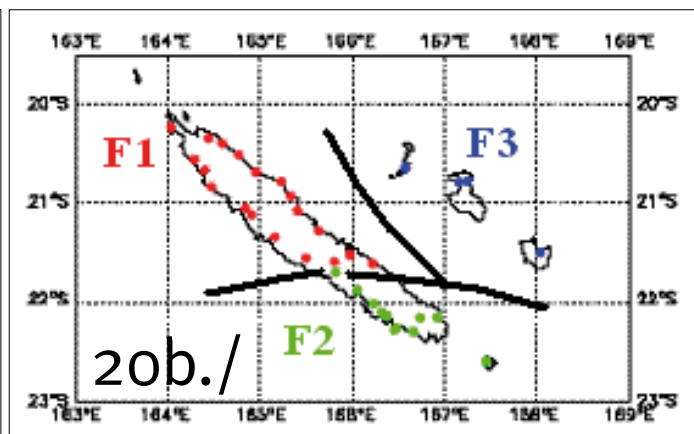
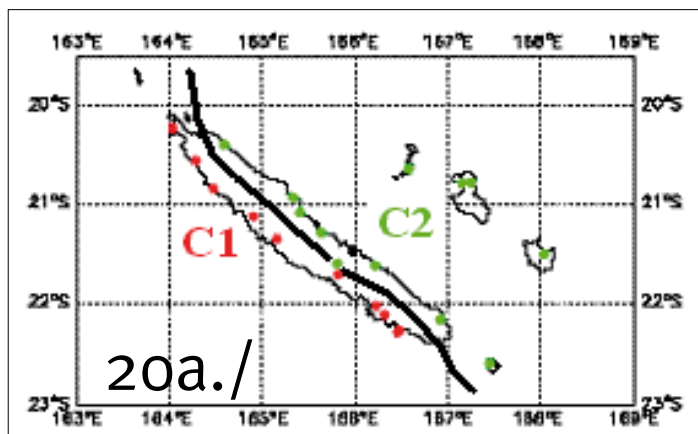
En 2006, dans le cadre du projet Européen ENSEMBLES, l'échéance de nos prévisions saisonnières habituellement limitée à 6 mois a été étendue à 10 ans. Le but de l'expérience est de tenter d'anticiper sur le changement du climat en introduisant l'évolution lente d'un océan convenablement initialisé, et, comme dans nos scénarios climatiques, les forçages liés aux gaz à effet de serre et aux aérosols.

L'expérience consiste à simuler deux décennies particulièrement contrastées : 1965-1974 et 1994-2003 avec 9 intégrations du modèle ARPEGE-climat. La figure 21 montre que le réchauffement observé sur l'hémisphère Nord (Figure 21a) est en accord qualitatif avec la « prévision » (Figure 21b), même si le refroidissement sur la Pacifique Nord n'est pas vu. Les limitations d'une telle pré-

vision apparaissent, dès lors que l'on considère l'indice NAO. En effet, celui-ci présente un changement de signe entre les deux décennies dans les observations : notre modèle, pas plus que celui du CEPMMT ni celui du Met Office qui participent à ENSEMBLES, ne prédit ce phénomène. De même, la série des températures de surface annuelles prévues en moyenne sur l'Europe au cours de la décennie 1994-2003 (qui dispose d'une meilleure connaissance de l'océan initial) est décorrélée des observations dès qu'on retire la tendance au réchauffement. Ces simulations sont donc surtout destinées à établir un pont entre la prévision saisonnière et les scénarios centennaux pour lesquels nous n'avons aucune donnée de vérification. En 2007, cette approche sera systématisée dans ENSEMBLES.

20./ Carte des zones obtenues pour les Précipitations (en haut à gauche), les températures minimales (en haut à droite) et maximales (en bas à gauche) et montrant la nature de la descente d'échelle possible pour la Nouvelle-Calédonie aux échéances saisonnières. Le zonage sur les précipitations ne permet pas d'apporter d'information supplémentaire.

21./ Différence entre la moyenne d'hiver (DJF) de la période 1994-2003 et la période 1965-1974 pour la température de la basse troposphère (850 hPa) : observations (a) et modèle (b). Isothermes 0.2 et 0.5°C.



AMMA

En 2006, l'implication du CNRM dans la campagne AMMA a été particulièrement importante. Les articles qui suivent montrent la diversité et la complexité des nombreuses actions conduites dans le cadre de cette campagne durant les 12 mois écoulés. Basé sur une initiative française, AMMA a été construit par un groupe scientifique international et est actuellement financé par un grand nombre d'agences, en particulier de France, du

Royaume-Uni, des États-Unis d'Amérique et d'Afrique. Il a été le bénéficiaire d'une contribution majeure du sixième Programme-cadre de recherche et développement de la Communauté européenne. Des informations détaillées sur la coordination scientifique et le financement sont disponibles sur le site d'AMMA International : <http://www.amma-international.org>

L'INFRASTRUCTURE D'OBSERVATIONS MISE EN PLACE EN COMPLÉMENT DES RÉSEAUX EXISTANTS

Période d'observation intensive de l'été 2006 de la campagne AMMA : premiers résultats

La partie expérimentale du programme international AMMA d'étude de la mousson ouest-africaine s'appuie sur la mise en œuvre 3 périodes d'observation imbriquées temporellement de 10 ans, 3 ans et une année. Cette dernière période d'observations intensives (POI) s'est déroulée en 2006 durant la phase sèche en janvier-février et de juin à septembre durant la phase humide de pénétration de la mousson sur le continent. Cette période de 4 mois s'est attachée à documenter les processus atmosphériques, océaniques, la surface, la chimie et les aérosols durant les 3 périodes clés : le saut de la mousson de la côte vers le Sahel (POI1 en juin), son maximum d'activité (POI2 de juillet à la mi-août) et son retrait (POI3 de la mi-août à septembre) favorable à la genèse des cyclones tropicaux à la transition continent-océan atlantique. Un grand nombre de moyens d'observations a été mis en œuvre durant ces périodes (*Figure 1*) avec un effort tout particulier pour renforcer le réseau d'observation de ra-

diosondages sur l'Afrique.

Sur ce plan, Météo France a plus particulièrement contribué par la mise en œuvre de deux des avions gérés par SAFIRE, et par le déploiement des profileurs UHF et VHF à Djouguou (Benin). Il faut également noter la contribution du CNRM aux 2 campagnes océaniques AMMA/EGEE dans le golfe de Guinée avant et après le déclenchement de la mousson. Par ailleurs, Météo-France a aussi participé à la mise en place du centre opérationnel de la POI à Niamey. Cette contribution a concerné 2 volets : la mise en place d'un réseau de transmission performant et la formation d'une équipe de 18 prévisionnistes africains. En collaboration avec l'ACMAD, Météo-France a mis à disposition de nouveaux produits de prévisions numériques via un site internet et grâce au système Synergie Retim-Afrique. Une méthode de prévision adaptée à l'Afrique de l'Ouest a été développée puis testée et améliorée avec les prévisionnistes.

La Campagne AMMA/EGEE3 dans le Golfe de Guinée

Le programme EGEE est la composante océanique du programme AMMA d'étude de la Mousson Africaine. Il vise à documenter la circulation océanique et les interactions océan-atmosphère dans le Golfe de Guinée. La campagne EGEE3, qui a fait suite aux campagnes EGEE1 et EGEE2 réalisées en 2005 par l'IRD, a eu lieu entre mai et juillet 2006 à bord du navire océanographique l'ATALANTE. En complément, les navires américain R/V RONALD H. BROWN et allemand R/V METEOR documentaient l'ouest du bassin Atlantique tropical. Les objectifs principaux de cette importante campagne étaient l'étude de la variabilité saisonnière et inter-annuelle de la circulation océanique et l'étude des processus de surface. Les températures de surface de la mer subissent une forte évolution saisonnière, dont le rôle est déterminant pour la mousson

en Afrique de l'Ouest. Lors d'environ 40 jours de mer, de nombreuses mesures de paramètres météo-océaniques et de flux ont été réalisées en continu à bord, ainsi que des radio-sondages bi-quotidiens. Les équipes du CMM ont participé à la mise à l'eau de bouées dérivantes, destinées à caractériser les couches mélangées océaniques. L'ensemble de ces données permettra de documenter le flux de mousson sur l'océan, de reconstituer et valider des champs de flux à fine résolution, de modéliser l'océan superficiel, de déterminer les processus océaniques de surface et de sub-surface responsables de l'évolution des températures de la mer, de valider les modèles opérationnels, de tester des méthodes de restitution de flux par satellite et enfin d'améliorer les paramétrisations de flux à l'interface air-mer. (*Figure 2*)

Contribution aux programmes Coriolis et Pirata

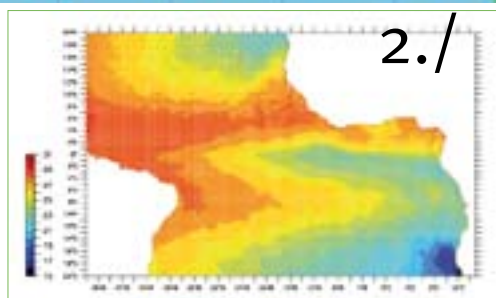
Météo-France participe au programme inter-organismes CORIOLIS qui a pour but de mettre en place une structure pérenne pour l'acquisition, la collecte, la validation et la diffusion en temps réel et différé de données in situ au niveau de l'océan mondial. Dans le cadre de la mise à disposition des données océanographiques, les fonctionnalités du SMT (Système Mondial de Transmissions) de l'OMM sont utilisées. Les données de courant de surface de la mer issues de la dérive de tous les flotteurs lagrangiens (bouées dérivantes munies d'une ancre flottante) sont également transmises une fois par semaine au centre CORIOLIS de Brest. Dans le cadre de ce programme, Météo-France contribue également à la maintenance du réseau des bouées fixes PIRATA localisées dans l'Atlantique Tropical. En 2006, lors des 2 legs de la Campagne AMMA/EGEE3, 12 bouées Marisonde ont été larguées à partir de l'ATALANTE dans le Golfe de Guinée. Ces bouées munies de capteurs atmosphériques (vent, température de l'air) et de chaînes de thermistances (11 capteurs de température répartis sur 150 ou 200 m) sont venues compléter le réseau des bouées fixes PIRATA ainsi que les mesures effectuées à bord du bateau. Mises à l'eau entre fin mai et le mois de juin, elles ont fourni des données continues jusqu'au mois d'octobre sur l'ensemble du Golfe. Elles donneront des renseignements précieux sur l'océan superficiel, notamment sur les profondeurs des couches mélangées et les gradients de température dans la thermocline supérieure. (*Figure 3*)



1./



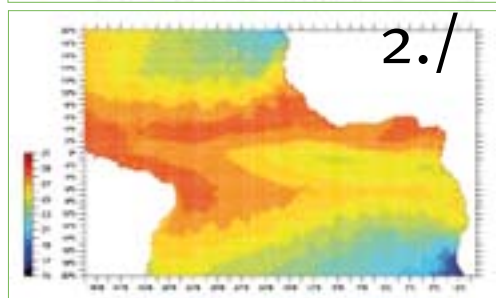
3./



2./



4./



2./



5./

1./Dispositif régional pour les campagnes POI.

Les sites de méso-échelle sont hachurés.

2./Cartes des températures de surface de la mer en juin 2005 (en haut) et juin 2006 (en bas) sur le bassin Atlantique Tropical (produit SAF-Océan, CMS Lannion). On notera la forte différence qui existait sur ce bassin entre ces deux années et plus spécialement dans la langue d'eau froide équatoriale.

3./Mise à l'eau d'une bouée Marisonde depuis l'Atalante pendant EGEE

4./Au 1^{er} plan radar UHF ; au 2^{ème} plan, au-dessus du grillage, radar VHF avec ses grandes antennes de 70 m de long - site de Nangatchiori

5./L'ATR 42 (au second plan) et le Falcon 20 (au premier plan) de SAFIRE sur le tarmac de l'aéroport de Niamey pendant la campagne AMMA juste avant un vol de mesure.

Les radars ST du site de Djougou (Bénin)

Les radars ST UHF et VHF du CNRM ont permis de définir le site de Nangatchiori (12 km au Sud/Est de Djougou) comme un super-site de mesures.

Ce site dispose du secteur triphasé 220 V, et le terrain pour cette installation a été généreusement prêté par le directeur de l'école du village. Un local en dur a été construit et restera la propriété de l'école. Le site radar a été entièrement créé par le CNRM (alimentation électrique, climatisations, protection des installations par paratonnerre et prises

de terre, clôture du site).

Un écran électromagnétique (65 m de long sur 2,5 m de haut), séparant le site radar de la station chimie du laboratoire d'aérodynamique, a été mis en place pour bloquer les « éventuels » risques de rayonnements parasites. Un mois de travail a été nécessaire pour le montage du site et du radar VHF. Les antennes, (surface de près de 5000 m²), ont été décalées de 30° par rapport aux orientations vraies N/S/E/O, pour limiter au maximum l'influence de l'ELECTROJET équatorial. Deux

onduleurs de 15 et 5 KVA ont été mis en service pour assurer une fiabilité de l'alimentation, et une isolation galvanique pour ne pas perturber la station de chimie.

La mousson 2006 a fourni de bons jeux de données d'observations. Seul le radar VHF restera sur le site jusqu'en octobre 2007 pour fournir un second jeu de données durant la mousson 2007.

(Figure 4)

Les avions de Safire dans AMMA

Le programme AMMA comportait un important volet observation incluant une période particulière de juin à septembre 2006, faisant appel jusqu'à cinq avions de recherche scientifique, au nombre desquels on comptait l'ATR42 et le Falcon 20 opérés par Safire au titre des tutelles que sont Météo-France, le CNRS-INSU et le CNES.

La participation des avions français avait pour but de contribuer aux investigations sur les conditions précédant l'arrivée de la mousson, la mise en place de celle-ci, le comportement des amas convectifs et leur évolution jusque sur l'océan où ils sont sus-

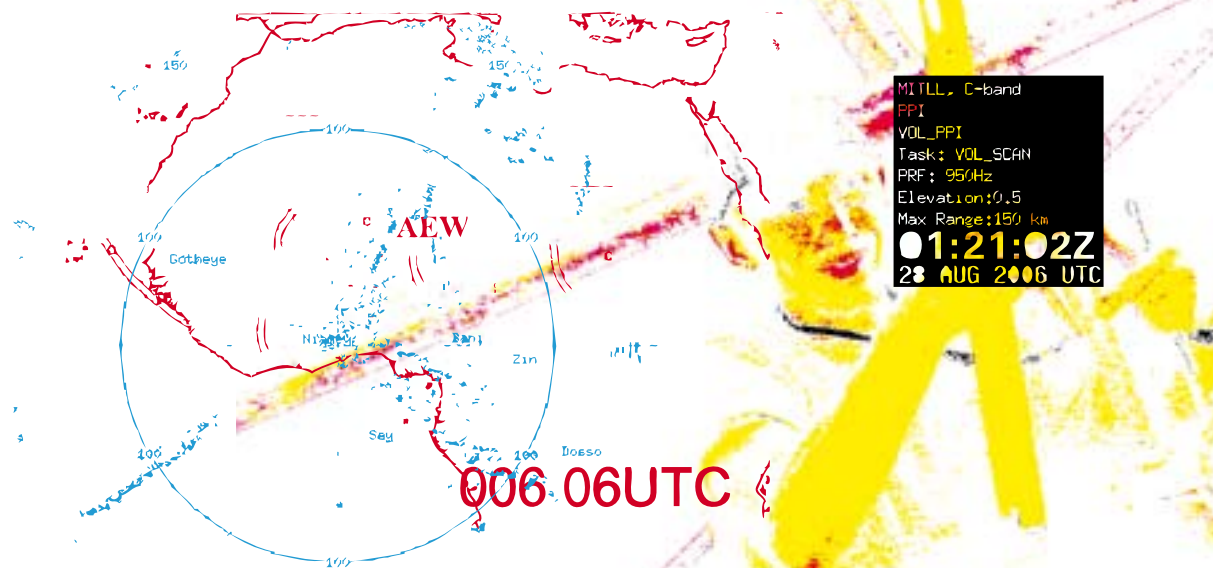
ceptibles de se transformer en cyclone.

L'arrivée des avions français sur le territoire nigérien, pourtant incertaine jusqu'au dernier moment, avait été anticipée depuis plus d'un an et demi. Cette préparation logistique a été une des clefs qui a permis d'opérer les avions au départ de Niamey et de Dakar.

Les avions avaient été préalablement bardés d'une instrumentation provenant de divers laboratoires français, afin d'instruire tant les aspects thermodynamiques que physico-chimiques de la mousson africaine et des amas convectifs.

Durant cette première campagne, les avions ont été mis à rude épreuve et quelques problèmes ont été rencontrés qui ont parfois perturbés la programmation des vols mais qui ont su être résolus suffisamment rapidement au prix d'ingéniosité, d'adaptation et parfois de courage.

Finalement, l'ATR et le Falcon 20 ont réalisé 400 heures de vol et ce dernier a largué environ 350 drop-sondes du 1^{er} juin au 30 septembre 2006 sur les terres africaines. Cette première sortie des avions français s'avère un succès inespéré, et il reste aux scientifiques à faire fructifier cette moisson de données. (Figure 5)



OUTILS ET MÉTHODES DE PRÉVISION EN SOUTIEN AUX OPÉRATIONS

La contribution de CTI à AMMA

L'équipe informatique du CNRM s'est vu confier fin 2005 l'étude et la mise en place du réseau informatique du Quartier Général (AOC : AMMA Opérationnel Center) d'AMMA à Niamey.

La première action menée a été une mise à niveau des postes de prévision (postes SYNERGIE) présents à l'ACMAD afin de pouvoir assurer la formation puis la prévision opérationnelle météorologique pendant la campagne.

Le réseau finalement installé a relié 3 sites distants d'environ 8 kilomètres : l'aéroport (civil et militaire), l'ACMAD et la DMN. Les sites étaient reliés par une liaison Radio (BLR). Chaque site permettait d'accueillir des scientifiques, qui se raccordaient sur le réseau par câble ou par WIFI. L'ensemble de cette infrastructure permettait d'accéder à Internet via satellite, et de partager l'ensemble des informations disponibles sur un serveur web alimenté en temps réel par les

secrétaires scientifiques présents à Niamey et par des informations concentrées sur des serveurs équivalents installés à Toulouse (Medias).

Afin d'assurer un maximum de sécurité informatique pendant le déroulement de la campagne, un contrôle d'accès au réseau et un cryptage des transmissions WIFI ont été réalisés. Une session de formation d'une journée a été organisée avant le début de la campagne permettant aux partenaires conservant l'infrastructure réseau après la campagne AMMA de se familiariser avec les technologies déployées sur leurs sites. Une administration sur place du réseau a été nécessaire pendant 3 mois et demi afin d'assurer l'accueil et le support utilisateur, la maintenance quotidienne avec les aléas climatiques (Figure 6b) et le relais des nombreux problèmes rencontrés vers l'opérateur local de liaisons radios et d'accès Internet.

La prévision numérique dans le cadre de la campagne AMMA

Pour les besoins de la POI (période d'observations intensives) de la campagne AMMA, un soutien important en prévision numérique a été mis en place. Il s'agissait de fournir en temps réel au centre opérationnel d'AMMA (AOC) situé à Niamey (dans les locaux de l'ACMAD) tous les éléments utiles pour réaliser des prévisions fiables et coordonner efficacement tous les moyens d'observations déployés sur le terrain.

Le soutien en prévision numérique déployé par METEO-France a permis de couvrir toutes les échelles : l'échelle synoptique (ARPEGE et ARPEGE-Tropiques, résolution ~ 55 km), la méso-échelle (ALADIN-AMMA, résolution ~ 10 km), et la très fine échelle (AROME, résolution ~ 2.5 km) en mode légèrement différé à titre expérimental.

Les modèles ARPEGE (grille variable) et ARPEGE-Tropiques (grille fixe) étaient initialisés par une analyse 4dvar (fenêtre d'assimilation 6h) permettant d'assimiler un grand nombre d'observations effectuées durant la POI.

Pour ALADIN-AMMA, la technique du 3dvar est utilisée. L'originalité par rapport au 4dvar ARPEGE, est la prise en compte des radiances MSG-1 (canaux vapeur d'eau sur tout le domaine, canaux infra-rouge sur mer uniquement) et des vents du diffusiomètre Quikscat. Un travail préalable a été nécessaire pour ALADIN-AMMA, afin d'estimer les fonctions de structure sur l'Afrique de l'Ouest dont la connaissance est indispensable à la mise en œuvre de l'assimilation variationnelle.

AROME était quant à lui initialisé par l'analyse ALADIN-AMMA. Ce modèle n'était lancé que sur alerte contrairement aux autres qui étaient opérationnels pendant toute la POI. La campagne AMMA a donc non seulement permis de tester et d'adapter nos modèles aux spécificités de l'Afrique de l'Ouest, mais a aussi été l'occasion d'un fructueux échange de connaissances entre prévisionnistes et spécialistes en prévision numérique.

(Figure 7)

Prévisions et informations temps réel pendant la campagne AMMA 2006

Pour répondre aux besoins opérationnels de l'AOC, une cellule de prévision a été mise en place à Niamey durant toute la durée de la POI (Juin à Septembre 2006). 18 prévisionnistes originaires de 12 pays de l'Afrique de l'Ouest ont participé à cette cellule de prévision. Un stage préalable de 2 semaines a été organisé pour une prise en main des nouveaux outils de prévisions mis à la disposition durant la campagne AMMA :

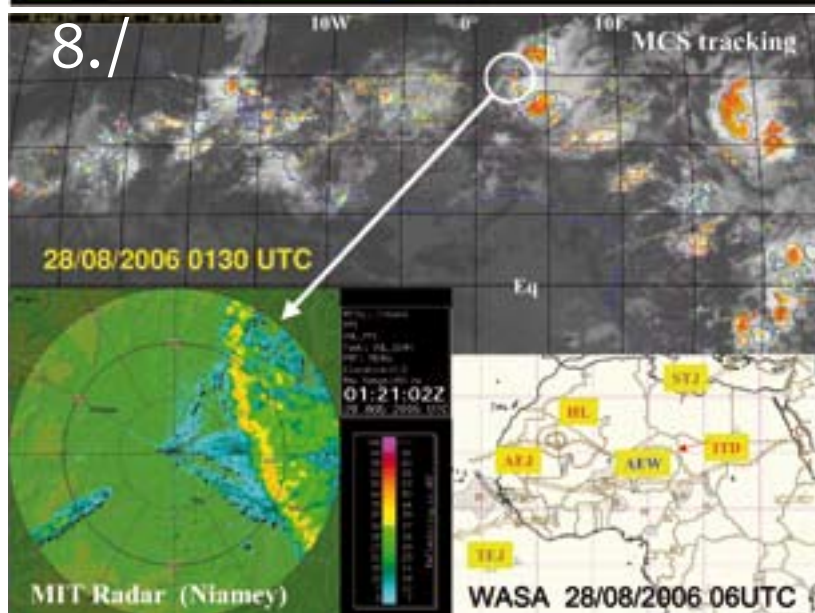
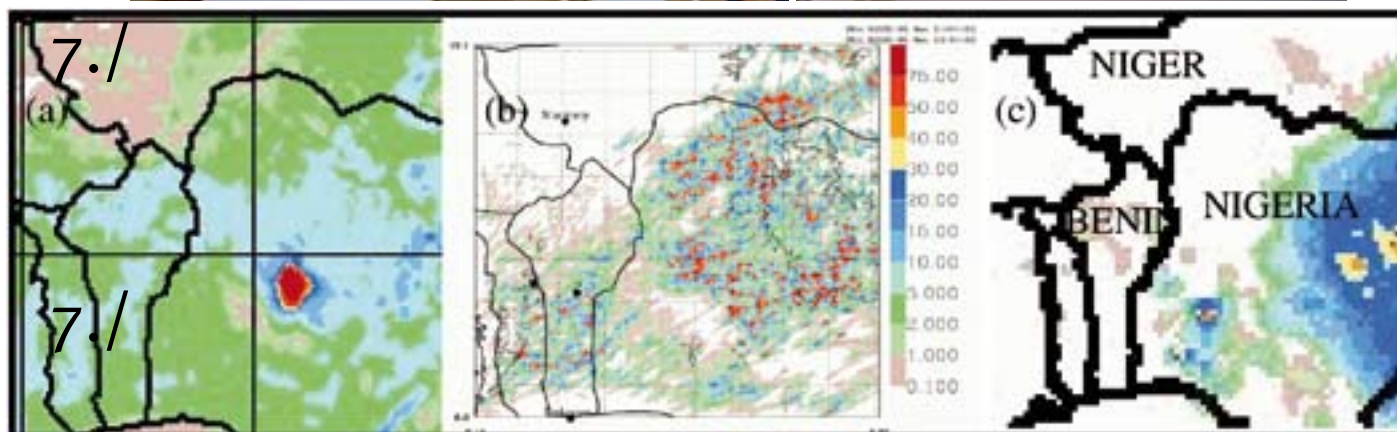
- Une version AMMA du système Synergie a été déployée.
- Un Anasyg/Presyg adapté à l'Afrique de l'Ouest durant la mousson a été développé. Cette approche dénommée WASA/F (pour West African Synthetic Analysis/Forecast) a été testée durant ces 4 mois et s'est avéré un outil puissant et bien adapté à la région.
- Une version AMMA du logiciel de suivi des SCM (Systèmes Convectifs de Méso-échelle) opérationnel sur la France pour la prévision immédiate, a été adapté à l'Afrique de l'Ouest.
- Des sorties complémentaires non disponibles sur Synergie ont été produites pour les modèles opérationnels et pour des modèles de recherche de méso-échelle.

Un site Internet (<http://aoc.amma-international.org/>) a été développé par le CNRM et Medias-France afin de concentrer toutes les informations utiles à la SOP (news, briefing météorologique, compte-rendu de mission de vol avion, observations, sorties complémentaires de modèles, produits recherche...).

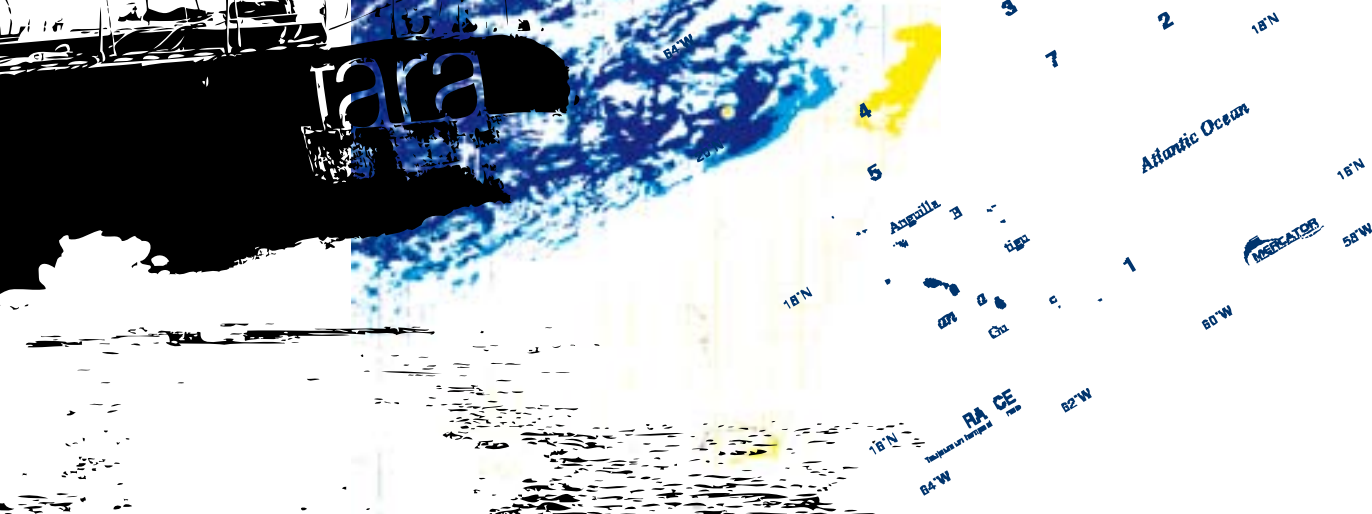
Une alimentation de ce site en temps réel et une copie en miroir vers les centres opérationnels AMMA de Niamey et Dakar ont favorisé l'aide à la prévision opérationnelle et le suivi de la campagne par tous les scientifiques concernés.

L'archivage des sorties temps réel et la mise à disposition rapide des quick looks des mesures offre une bibliothèque d'images disponibles dès la fin de la campagne de mesure pour une utilisation dans les études post-POI.

(Figure 8)



- 6a./ installation de l'antenne WIFI raccordant le radar du MIT au réseau AOC.
- b./ tableau électrique de la salle informatique après foudroisement.
- 7./ Cumul 24h de précipitation pour la période du 20 Août 2006 06UTC au 21 Août 2006 06UTC sur la région Bénin, Ouest Nigeria, Sud Niger : (a) ALADIN, (b) AROME, (c) estimation CPC (mm/24h).
- 8./ WASA (West African Synthetic Analysis), logiciel de suivi des SCM et réflectivité du radar du MIT basé à Niamey pour le 28 Août 2006 début de journée.



ÉTUDES CONDUITES DANS LE CADRE D'AMMA

Activité convective pendant la campagne AMMA 2006

Le logiciel de suivi des SCM (Systèmes Convectifs de Mésos-échelle) grâce aux images infrarouge du satellite MSG1, opérationnel sur la France pour la prévision immédiate, a été adapté à l'Afrique de l'Ouest pour la campagne de mesure AMMA 2006. Les prévisionnistes suivaient en temps réel la trajectoire, les caractéristiques morphologiques et radiatives ainsi que le stade de développement des SCM. Ce logiciel permet également a posteriori de les étudier statistiquement.

La donnée primordiale pour les Africains est la pluie. Il est donc pertinent de s'intéresser plus précisément aux SCM les plus importants, les plus rapides et les plus longs. Les lignes de grains, qui appartiennent à cette catégorie, donnent les plus forts cumuls de pluie sur la zone sahélienne. Quelques SCM traversent cette bande de 20° de longitude et 6° de latitude par jour, comme le montre la *figure 9a* pour la mousson 2006 et la moyenne sur la période 1996-2006. On notera une extrême variabilité du nombre de trajectoires aux alentours de l'onset, fin juin-début juillet, c'est-à-dire au début de la montée de la Zone de Convergence InterTropicale vers le nord, et d'une manière générale une grande variabilité pendant la saison des pluies. On constate également une arrivée tardive de ces SCM en 2006, avec un fort déficit, en nombre de trajectoires, en juin et un rattrapage fin juillet-début août. Par contre, en terme de nébulosité, sur cette même zone et les quatre mois d'été, on retiendra une nette diminution en 2006 par rapport aux années 1996-2003 (*figure 9b*).

Ces anomalies de nébulosité, croisées à celles d'autres paramètres météorologiques ou de surfaces terrestres et océaniques, permettront de mieux comprendre la cause du déficit de pluie, un des principaux buts du projet AMMA.

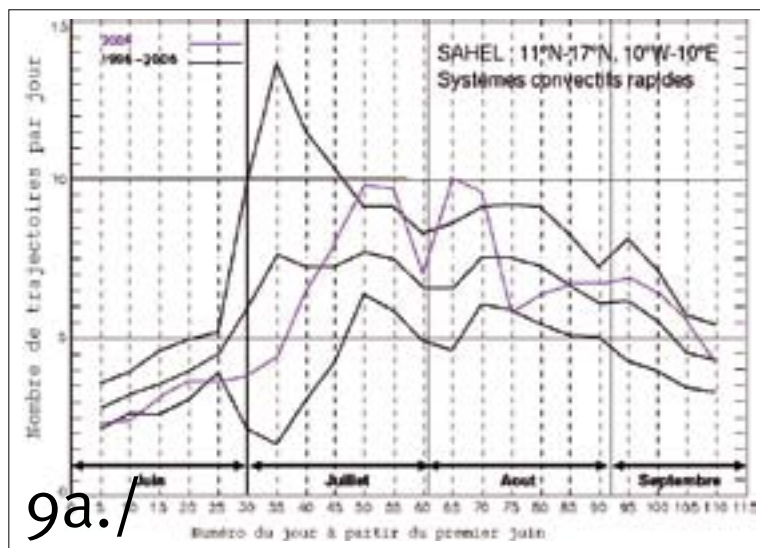
Intercomparaison et amélioration des schémas du surface dans le cadre du projet AMMA

Un des objectifs d'AMMA est d'améliorer notre compréhension de la variabilité intra-saisonnière et interannuelle de la mousson de l'Afrique de l'ouest. L'intensité du gradient nord sud de flux surface-atmosphère (lié à ceux de l'humidité du sol et de la végétation) influence fortement la position du front tropical et probablement l'intensité de la mousson, ce qui détermine le lieu et la quantité de pluie. Ces aspects sont critiques pour les économies locales principalement agraires. Ainsi, une priorité d'AMMA est de mieux comprendre et modéliser l'influence de la variabilité spatio-temporelle des processus de surface sur la circulation atmosphérique et le cycle régional de l'eau.

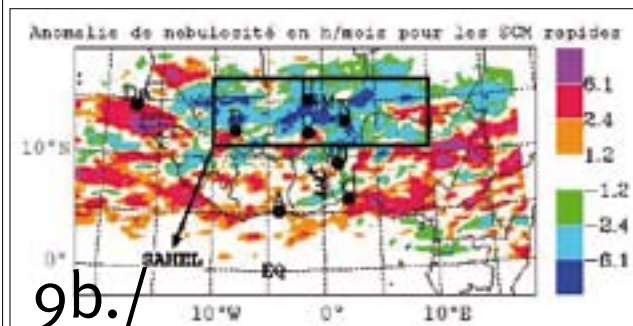
Avant d'appréhender un système entièrement couplé, il est judicieux de commencer par étudier la surface en mode « offline ». Cela signifie qu'au lieu d'être utilisés comme la condition limite inférieure d'un modèle atmosphérique, les modèles de surface sont forcés par des données atmosphériques provenant d'observations, de produits satellite et de modèles. L'idée est de forcer des modèles de surface (LSMs) avec les forçages de meilleure qualité possible, et de plus haute résolution spatio-temporelle disponible pour mieux comprendre les processus clefs et leurs échelles correspondantes. Afin de préciser la capacité des LSMs à simuler les processus sur l'Afrique occidentale, les résultats d'un ensemble de modèles sont comparés dans le cadre du Projet AMMA d'Intercomparaison Modèle (ALMIP). Cette étape permettra de déterminer les processus manquants ou mal modélisés par la génération actuelle de LSMs sur cette région. Une représentation améliorée des processus de surface devrait contribuer à une meilleure compréhension et prévision du système de mousson utilisant des modèles entièrement couplés terre océan atmosphère. Cela devrait ensuite mener à l'analyse de scénarios de changement de climat améliorés et aider à une meilleure gestion des ressources en eau dans cette région. (*Figure 10*)

Modélisation des poussières désertiques – Rétro-action sur la dynamique ouest-africaine

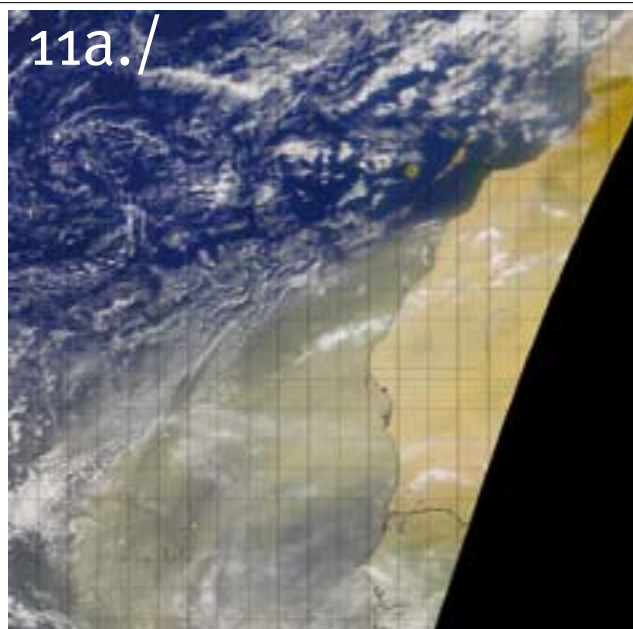
L'impact des poussières désertiques sur la dynamique atmosphérique est une préoccupation majeure. D'une part, la prédiction de leur champs de concentration est un réel problème pour les questions de visibilité aéronautique. D'autre part, leurs propriétés radiatives antagonistes complexifient substantiellement la prévision atmosphérique dans les régions où elles sont émises et transportées. C'est dans ce contexte qu'un module dynamique d'émission de poussières désertiques introduit dans le modèle de surface SURFEX a été couplé à un module de transport - sédimentation - lessivage dans le modèle atmosphérique MesoNH. Ensuite, le couplage du cycle des aérosols désertiques pronostiques avec le schéma radiatif de MesoNH a permis d'établir son impact sur la dynamique atmosphérique. Ainsi, une première analyse détaillée à partir de la campagne SHADE a mis en évidence des modifications du régime de vent de basse couche ainsi que des zones de déclenchement de la convection. De plus, une étude du Laboratoire d'Aérodynamique a clairement mis en évidence une amélioration des scores de prévision de MesoNH, en particulier dans les zones convectives de l'Afrique de l'ouest. Différentes questions scientifiques sont aujourd'hui abordées via l'utilisation de ce nouveau module de poussière désertiques, en particulier celles portant sur la dynamique de la mousson africaine, ou sur l'hygroscopicité et la redistribution convective des poussières désertiques. Ce module qui fait actuellement l'objet d'une collaboration avec l'Office National de Météorologie Algérien pour être introduit dans ALADIN sera aussi prochainement porté dans le modèle AROME. Il devrait apporter une amélioration notable de la prévision atmosphérique méso-échelle dans les nombreuses régions du monde qui sont sous l'influence des poussières désertiques. (*Figure 11*)



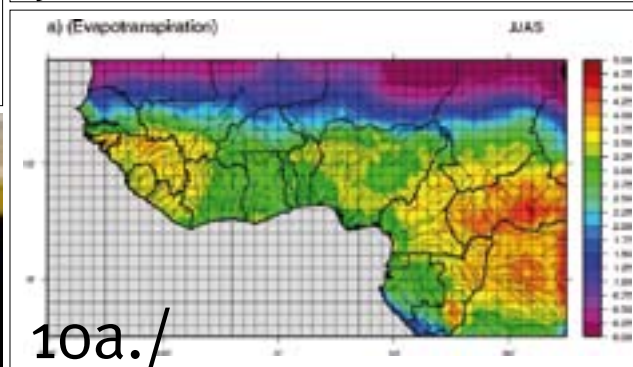
9a./



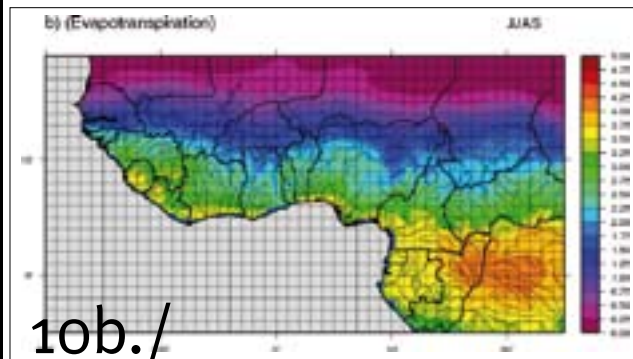
9b./



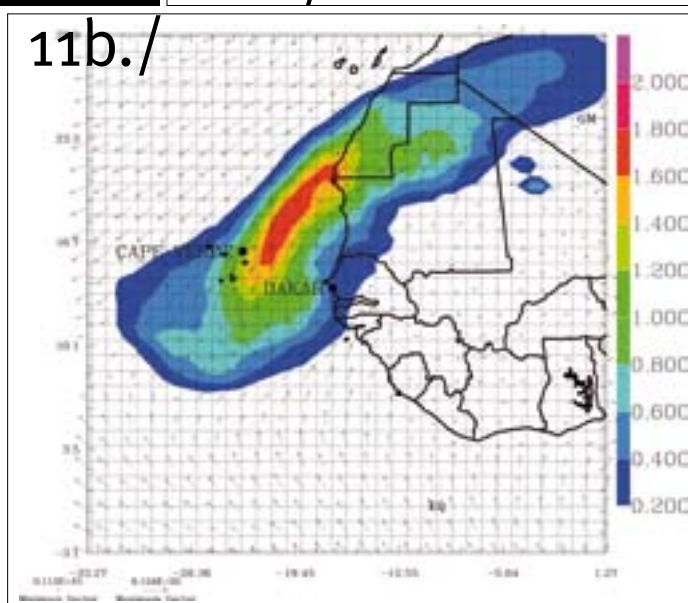
11a./



10a./



10b./



11b./

9a./ Nombre de trajectoires de SCM (dont la surface a atteint 5000 km² à -40°C, de durée au-moins une heure et de vitesse moyenne vers l'ouest supérieur à 10 m/s), dans le cadre sahélien dessiné sur la figure 9b, en fonction du temps à partir du premier juin en moyenne glissante sur 10 jours tous les 5 jours. En violet pour l'année 2006, en noir pour les 11 années 1996-2006 avec moyenne et écart-type.

b./ Anomalies de nébulosité des SCM décrits en figure 9a de l'année 2006 par rapport aux 9 années 1996-2003 (heures par mois).

10./ L'évapotranspiration (mm jour⁻¹) moyennée sur la saison de la mousson (juin-septembre) simulée par deux modèles de surface pour 2005 : le modèle ISBA du CNRM (panneau a) et le modèle TESSEL du Centre Européen de Prévision (CEP) (panneau b). La spatialisation de l'évapotranspiration est similaire, mais l'amplitude des flux est différente à cause des diversités dans la physique des modèles, la végétation et les propriétés du sol. Cela implique une quantité différente potentiellement significative de recyclage de précipitation dans le mode entièrement couplé. Deux objectifs importants d'ALMIP sont de déterminer pourquoi les résultats sont différents et quels résultats sont les plus réalistes.

11a./ Images satellite seaWiFS du 26 Septembre 2000 (12 UTC), montrant le panache de poussières désertiques se propageant depuis l'Afrique de l'Ouest vers l'océan atlantique.

b./ Epaisseur optique des aérosols désertiques et vent de surface simulés le 26 Septembre 2000 à 12 UTC par le modèle MesoNH.

Les interactions océan mousson africaine dans les simulations du GIEC

Les populations sub-sahariennes le savent bien : les saisons des pluies se succèdent mais ne se ressemblent pas. Ainsi, les années où la mousson ne « monte » pas très au nord, le Sahel est confronté à la sécheresse. De nombreuses études ont montré que l'océan joue un rôle important dans ces fluctuations inter-annuelles de la mousson : cela est-il bien reproduit par les modèles ?

Les simulations effectuées dans le cadre du GIEC sont une formidable opportunité pour comparer les modèles couplés océan-atmosphère. Ici, 12 modèles ont été analysés pour évaluer leur capacité à reproduire les téléconnexions entre les Températures de Surface de l'Océan (TSO) et les précipitations de mousson en Afrique de l'ouest.

Seuls deux modèles ne présentent aucun lien significatif entre la mousson et les TSO. Les autres modèles montrent par contre une influence prédominante de l'océan Pacifique : ce lien est souvent beaucoup plus fort que dans les observations, et présente des caractéristiques très diverses selon les modèles.

Pour le modèle couplé du CNRM, ce sont les anomalies de TSO sur l'ouest du Pacifique qui ont une forte influence sur la mousson, en particulier sur l'est du Sahel. Avec le modèle de l'IPSL, la réponse est différente, mais pas plus réaliste puisqu'un événement Niño correspond à un excédent de précipitations. Dans les deux cas, le lien mis en évidence explique plus du quart de la variance totale des précipitations de mousson (contre 10% dans les observations).

A l'issue de cette étude, il semble donc important d'étudier les mécanismes atmosphériques qui lient les TSO à la mousson africaine dans le modèle du CNRM. Bien reproduire les téléconnexions semble en effet essentiel pour bien simuler la réponse de la mousson en prévision saisonnière et dans les scénarios climatiques. (Figure 12)

Liens entre l'activité des ondes d'est africaines et la saison cyclonique du bassin atlantique

La cyclogénèse atlantique est intimement liée aux conditions climatiques sur l'Afrique de l'Ouest, notamment à la quantité de précipitations reçue sur le Sahel au cours de la mousson. De plus, on sait que 80% des cyclones majeurs proviennent d'une onde d'est africaine. A l'aide de la ré-analyse ERA40 du CEPMMT et de la base de données des ouragans (HURDAT), nous avons cherché à mettre en évidence les liens, à l'échelle saisonnière, qui peuvent exister entre l'activité cyclonique et celle des ondes d'est africaines (OEA). Cette dernière est caractérisée par une décomposition spectrale de la variance du tourbillon relatif à 850 hPa. A l'aide d'un filtrage spatio-temporel approprié, on peut isoler la part de variance associée aux OEA. La figure 1 montre un composite de la variance des OEA pour les 13 années (resp. 15 années) ayant compté le plus (resp. moins) grand nombre de trajectoires de tempêtes. Hormis l'activité plus (resp. moins) intense des OEA sur l'océan atlantique lors des années comptant beaucoup (resp. peu) de systèmes, il est intéressant de noter la forte (resp. faible) activité sur le nord du Sahel. Ainsi, la liaison reliant les deux phénomènes ne se limite pas à des conditions sur l'océan favorisant le développement d'ondes en cyclones mais bel et bien de conditions de mousson africaine particulières. Cela ne permet pas, néanmoins, de déterminer si une relation de cause à effet existe entre les deux systèmes ou s'il s'agit d'une même réponse à un forçage extérieur. L'étude de simulations forcées à une résolution de 0.5° indique que cette relation est plus ou moins bien reproduite par le modèle ARPEGE-Climat, ce qui permettra, dans l'avenir, de chercher quelle part de la variabilité de l'activité cyclonique peut être directement imputée à l'activité des OEA. (Figure 13)

Validation de paramétrisations de la turbulence et de la convection en zones tropicales

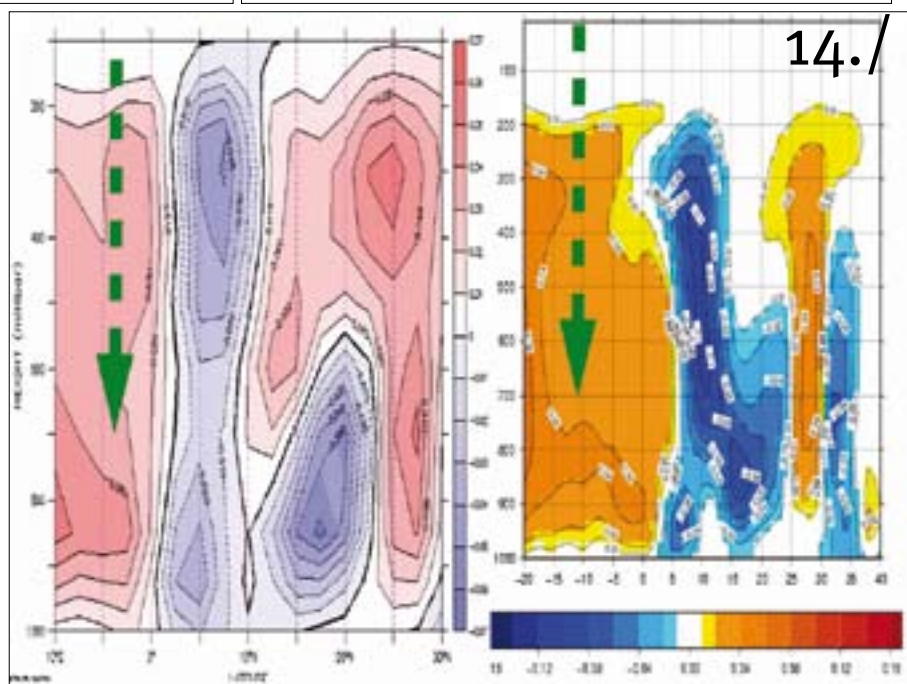
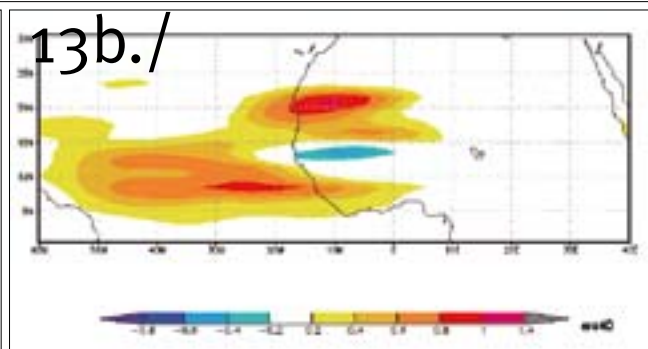
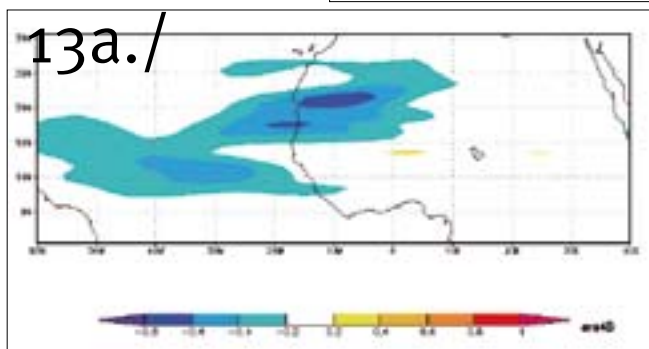
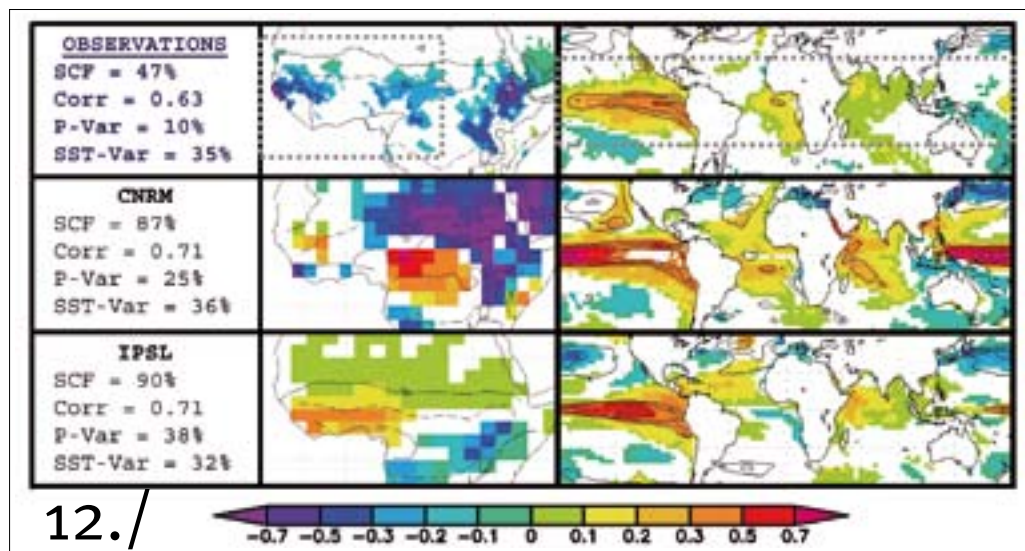
Dans les modèles météorologiques, les processus d'échelle inférieure à la maille du modèle sont résolus à l'aide de jeux d'équations regroupés dans différents schémas de paramétrisations physiques. Le but de cette étude est de comparer plusieurs schémas traitant des processus turbulents, de la convection et de la microphysique sur la zone de l'Afrique de l'Ouest.

Les travaux réalisés au CNRM et à l'ENM ont pour objectif d'analyser des simulations réalisées avec le modèle ARPEGE-CLIMAT le long d'une coupe altitude-latitude (20S-40N) moyennée entre 10°Ouest et 10°Est. Les grandes structures de la mousson d'Afrique de l'ouest ont été étudiées.

Les schémas les plus élaborés permettent de tenir compte de l'entraînement au sommet de la couche limite qui correspond à une injection d'air sec et stable de l'atmosphère libre (zone faiblement influencée par les échanges avec la surface) vers la couche limite atmosphérique. L'impact de cette paramétrisation est positif, car il permet à priori une meilleure description des nuages bas cumuliformes sur le golfe de Guinée et un champ de vitesse verticale en meilleur accord avec le champ des réanalyses (Figure 14). Par ailleurs, des défauts ont été repérés dans la simulation de la dépression thermique saharienne, qui mettent en lumière l'importance de la représentation des processus turbulents.

Pour mieux comprendre les mécanismes responsables de cette anomalie, une dépression thermique saharienne 'théorique' a été étudiée. Les simulations numériques ont été réalisées avec la version colonne d'ARPEGE-CLIMAT et une résolution verticale d'une vingtaine de mètres. Les résultats sont évalués par rapport à ceux obtenus avec un modèle capable de traiter explicitement les plus gros tourbillons turbulents.

La prise en compte de l'entraînement et des thermiques permet d'homogénéiser le profil vertical de la température dans la couche limite et de se rapprocher du profil de référence.



12./Premier mode de covariabilité entre les Températures de Surface de l'Océan (TSO) et les précipitations de mousson en Afrique de l'ouest. On compare ici le lien observé au 20e siècle (en haut), aux simulations du CNRM et de l'IPSL réalisées dans le cadre GIEC (en bas). Les structures covariantes de précipitations (à gauche) et de TSO (à droite) sont représentées en couleurs lorsque les corrélations sont significatives, et les isolignes indiquent la climatologie du modèle (moyenne des précipitations et écarts-type des TSO).

Dans la colonne de gauche :

- SCF = fraction de covariance expliquée
- Corr = corrélation des composantes principales
- P-var = variance expliquée pour les précipitations
- SST-var = variance expliquée pour les TSO.

13./Anomalie de la variance des OEA, dans la ré-analyse ERA40, pour les 13 années (a) ayant compté le plus de trajectoires de tempêtes et les 15 années en ayant compté le moins (b).

14./Coupes altitude-latitude sur l'Afrique de l'Ouest moyennée entre 10°W- 10°E : champ de vitesse verticale analysées à gauche (ERA40) et simulées à droite (Arpège-climat). La flèche verte représente la subsidence de grande échelle dont l'intensité et l'épaisseur sont bien reproduites par Arpège-Climat avec la physique la plus élaborée et la prise en compte de l'entraînement au sommet de couche.

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 2006 a été marquée notamment par la poursuite des travaux sur la cyclogénèse, et par une extension des utilisations du modèle de surface Surflex.

ETUDE SUR LA CYCLOGÉNÈSE ET LA PRÉVISIBILITÉ

Étude d'une tempête grâce à une extraction quasi-automatique de sa structure en altitude et l'inversion du tourbillon potentiel

L'étude dynamique et la prévision des tempêtes synoptiques qui se forment sur l'Océan Atlantique et frappent régulièrement les côtes européennes demeurent des enjeux importants de la météorologie actuelle. Ces tempêtes mettent souvent en jeu un tourbillon situé en altitude, vers 9km, qui interagit avec la tempête au sol dans un courant-jet d'ouest intense. Il en fut ainsi de la tempête du 27-28 Décembre 1999 qui causa d'importants dégâts sur la moitié Sud de la France. Il est donc intéressant d'identifier et d'isoler son tourbillon d'altitude de manière objective.

L'extraction est faite grâce à un nouvel algorithme basé sur la transformée en ondelettes. Le tourbillon est extrait dans le champ de tourbillon potentiel sur l'ensemble des couches de la troposphère. Puis, l'inversion du tourbillon potentiel permet de recomposer les champs de température, géopotential

et vent afin d'analyser sa structure. Des prévisions avec le modèle global ARPEGE après suppression de ce tourbillon ont également été lancées. Les résultats montrent que ce tourbillon d'altitude explique une accentuation locale du courant-jet, un « rapide de jet ». De plus, la suppression de ce tourbillon empêche la formation de la tempête, comme le montrent les figures de pression prévue au niveau de la mer.

L'extraction automatique des structures cohérentes de tourbillon potentiel ouvre ainsi de nouvelles perspectives pour la compréhension de la dynamique des tempêtes et pour l'étude de leur climatologie. De plus, elle permettrait une nouvelle définition des perturbations initiales pour la prévision d'ensemble, qui consisterait à modifier les caractéristiques de ces tourbillons à fort impact sur la prévision. (Figure 1)

Clé des tempêtes sur l'Europe, le régime zonal possède une variabilité interne de grande échelle insoupçonnée

Les régimes de temps identifient les configurations préférées, fréquentes, des champs météorologiques à l'échelle de la semaine et d'un bassin océanique. Sur l'Atlantique, il en existe 4. Il est maintenant bien connu que les régimes de temps influencent directement le comportement des dépressions synoptiques : les fortes tempêtes frappant l'Europe occidentale se développent généralement lorsque le régime de temps est zonal. Cependant, le développement et les trajectoires de dépressions évoluant dans deux régimes zonaux à première vue semblables peuvent fortement différer. Le régime zonal possède-t-il une variabilité interne insoupçonnée?

Afin de répondre à cette question, les régimes zonaux ont été classés en fonction d'un paramètre dynamique récemment mis en valeur : la déformation effective. L'ensemble des dates des régimes zonaux de tous les hivers de 1957 à 2002 a donc été classée en

fonction des propriétés de la déformation effective. 6 classes ont été obtenues pour cet ensemble de 2364 jours dont 3 sont représentées sur la figure. Une des classes correspond à la circulation de fin décembre 1999 (vignette a) et représente 16% des régimes zonaux, soit à peu près 5% des dates d'hiver. La vignette b est associée au régime zonal qui a eu lieu durant le mois de février 1997, c'est à dire durant toute une partie de la campagne de mesures FASTEX. Enfin, la dernière tempête marquante en France qui a frappé le nord du territoire le 17 décembre 2004 s'est formée dans la catégorie de régime figurant sur la vignette c.

La suite de l'étude devrait permettre de détailler les différents mécanismes de croissance des tempêtes hivernales qui frappent l'Europe Occidentale en fonction des différentes configurations des régimes zonaux. (Figure 2)

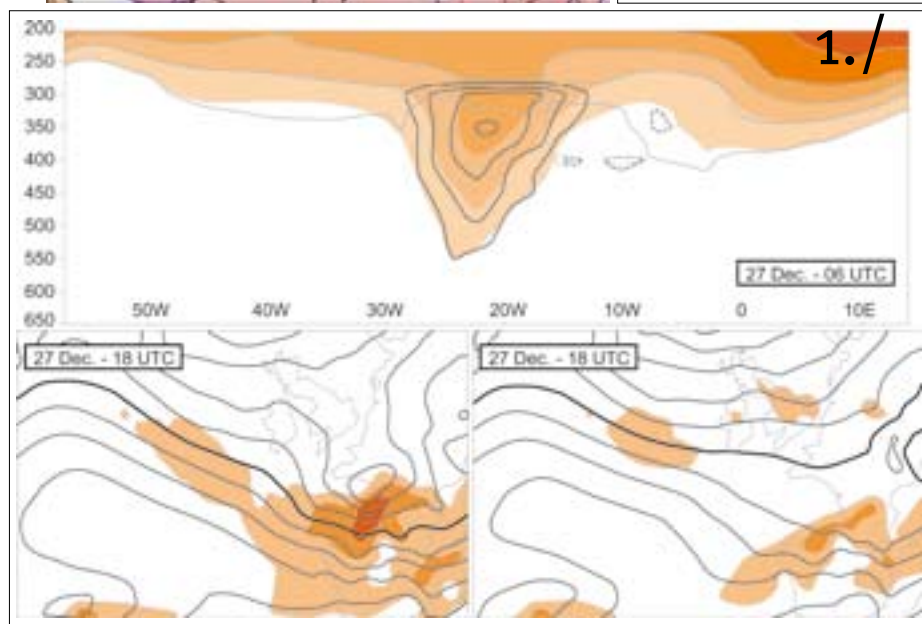
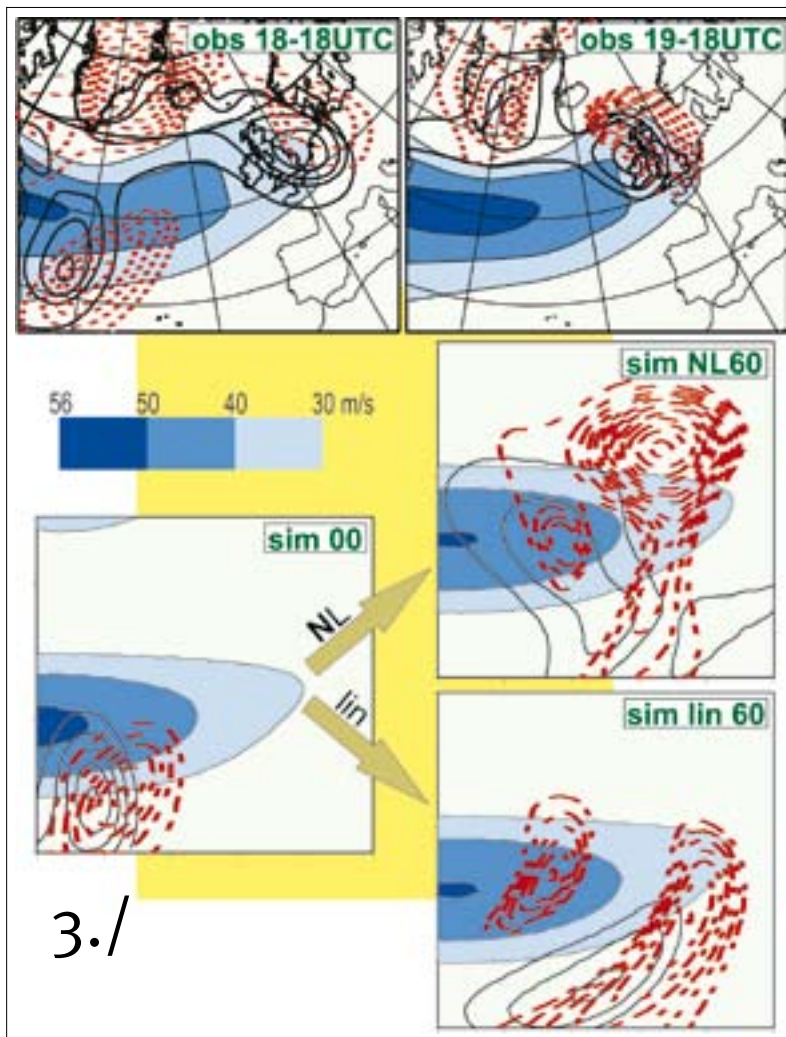
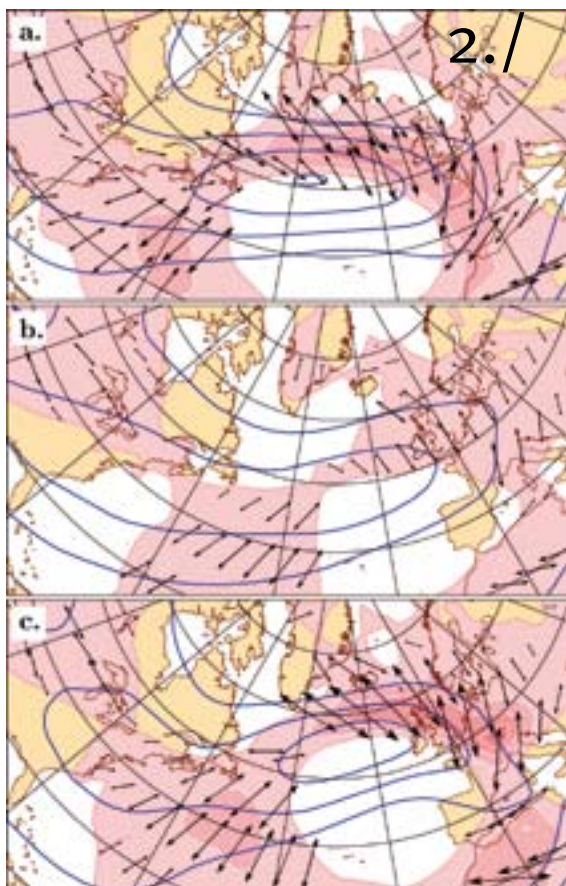
Étude idéalisée de cyclogénèses en sortie de courant-jet

La campagne de mesure FASTEX, mais également des données réanalysées sur de longues périodes (ERA40), ont montré que les dépressions telles que la tempête du 26 décembre 1999 se creusent brutalement dans la zone de sortie du courant-jet, zone qui voit le tube de vent fort d'altitude (le jet) ralentir. Les théories classiques ne rendent pas compte de cette réalité plus systématique qu'on l'a longtemps pensé. Pour moderniser ces théories, le cas de la cyclogénèse explosive en sortie de courant-jet du 18 février 1997 a été reconstitué dans un laboratoire virtuel permettant de contrôler tous les ingrédients, dans un cadre simplifié, « filtré ». Une telle zone de sortie de jet idéalisée a été peu étudiée à ce jour, car difficile à reconstituer.

Un certain nombre de traits caractéristiques de l'évolution de la perturbation observée sont bien reproduits dans la simulation idéalisée non-linéaire : traversée du courant-jet, changement de forme de la perturbation à la suite de cette traversée et intensification du creusement lors du passage sous l'axe du jet. Une comparaison avec une simulation linéaire tangente (dans laquelle la perturbation est infinitésimale) ne montre aucune traversée du courant-jet ni de changement d'orientation de la perturbation : des interactions non-linéaires semblent au cœur des cyclogénèses rapides.

Cette étude a montré qu'il était possible de recréer dans un cadre simplifié des courants-jets à évolution assez lente relativement réalistes et que des perturbations en leur sein avaient des comportements similaires à ceux observés. Le caractère idéalisé de ce formalisme ouvre la porte à une exploration des paramètres intervenant dans le mécanisme de croissance en sortie de courant-jet.

(Figure 3)



1./En haut, coupe verticale (le long du parallèle 51°N, coordonnée pression) du tourbillon potentiel (intervalle des isolignes : une unité de tourbillon potentiel) le 27 Décembre 1999 à 06 UTC. La structure extraite (traits pleins noirs) correspond bien au front d'altitude (pic inversé visible sur le champ initial en plages de couleur orange). Une nouvelle distribution de tourbillon potentiel (traits pointillés) est obtenue après suppression de la structure extraite. En bas, pression réduite au niveau de la mer (ligne grasse : 1000 hPa, intervalles 5 hPa) et vitesse du vent en basses couches (plages oranges, à partir de 20 m/s, intervalle 10 m/s) prévu pour le 27 Décembre à 18 UTC à partir du réseau 06 UTC. A gauche, l'état initial comprend la structure et à droite la structure d'altitude initiale a été retirée. On voit ainsi que la structure d'altitude extraite joue un rôle essentiel dans la formation de la tempête.

2./Trois configurations différentes de régime zonal. En bleu, le module de vent de grande échelle à 300hPa (environ 9km d'altitude, intervalle : 10 m/s pour valeurs supérieures à 20 m/s) et en plages de rouge, la déformation effective associée (intervalle : 5 10-10 s-2). Les 3 dernières tempêtes les plus violentes ayant frappé la France ces 10 dernières années (fin décembre 1999 et mi-décembre 2004) se sont créées dans les classes correspondant aux vignettes a et c.

3./Etat observé en haut (séparation environnement et perturbations basse/haute fréquence par un filtre de moyenne glissante sur huit jours) et simulation très simplifiée en bas (non-linéaire au milieu et linéaire en bas, taille du domaine de visualisation : 5000 km). A gauche, état initial (18 février 1997 à 18UTC pour les observations) et à droite état « final » (19 février 1997 à 18UTC pour les observations, 60 heures de simulation). Module du vent basse-fréquence, environnement d'altitude (plages de bleu) montrant le courant-jet, anomalies de géopotentiel en altitude (valeurs négatives seules, traits pleins noirs, intervalle approx. 50 mgp) et en basses couches (valeurs négatives seules, traits tiretés rouges, intervalle approx. 25 mgp).

Classification des environnements synoptiques favorables aux épisodes pluvieux méditerranéens intenses

Une étude préliminaire sur la période hivernale (novembre-mars) a montré l'existence d'une classification à six régimes de temps méditerranéens et leur interdépendance avec leurs analogues atlantiques. Un lien statistique significatif existe entre ces régimes et les épisodes de précipitations intenses dans le sud-est de la France.

Une nouvelle étude a donc été entreprise cette fois sur la période septembre-décembre, de 1957 à 2001. Les champs météorologiques proviennent de la ré-analyse ERA40. On trouve une classification significative à sept régimes de temps où l'on retrouve les régimes de la période novembre-mars et un spécifique de cette saison. Néanmoins, aucun de ces régimes ne discrimine à lui seul une majorité de ces événements de pluies fortes. Une autre approche partant de ces cas et remontant vers leur environnement synoptique a donc été tentée.

A partir des données pluviométriques de Météo-France, on extrait un ensemble d'Environnements Précipitants Caractéristiques (EPC) du Sud-Est de la France dont les environnements synoptiques se décomposent en quatre structures types. De plus, les distributions spatiales moyennes de pluies associées à ces filières synoptiques sont nettement différenciées. Une classe en particulier, la plus fréquente, est associée à près de 50% des EPC les plus intenses. Ses traits marquants sont l'alternance zonale d'un thalweg et d'une dorsale en moyenne troposphère, et un puissant jet advectant de l'air chaud et humide en basses couches. Cette étude permet donc de détailler les ingrédients de grande échelle nécessaires à une majorité des épisodes de fortes pluies sur le Sud-Est de la France.

(Figure 4)

Sensibilité des prévisions en Méditerranée

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 des phénomènes de l'échelle synoptique et employées avec succès sur l'Atlantique pendant la campagne FASTEX en 1997 et le NATreC (Northern Atlantic THORPEX Regional Campaign) en 2003.

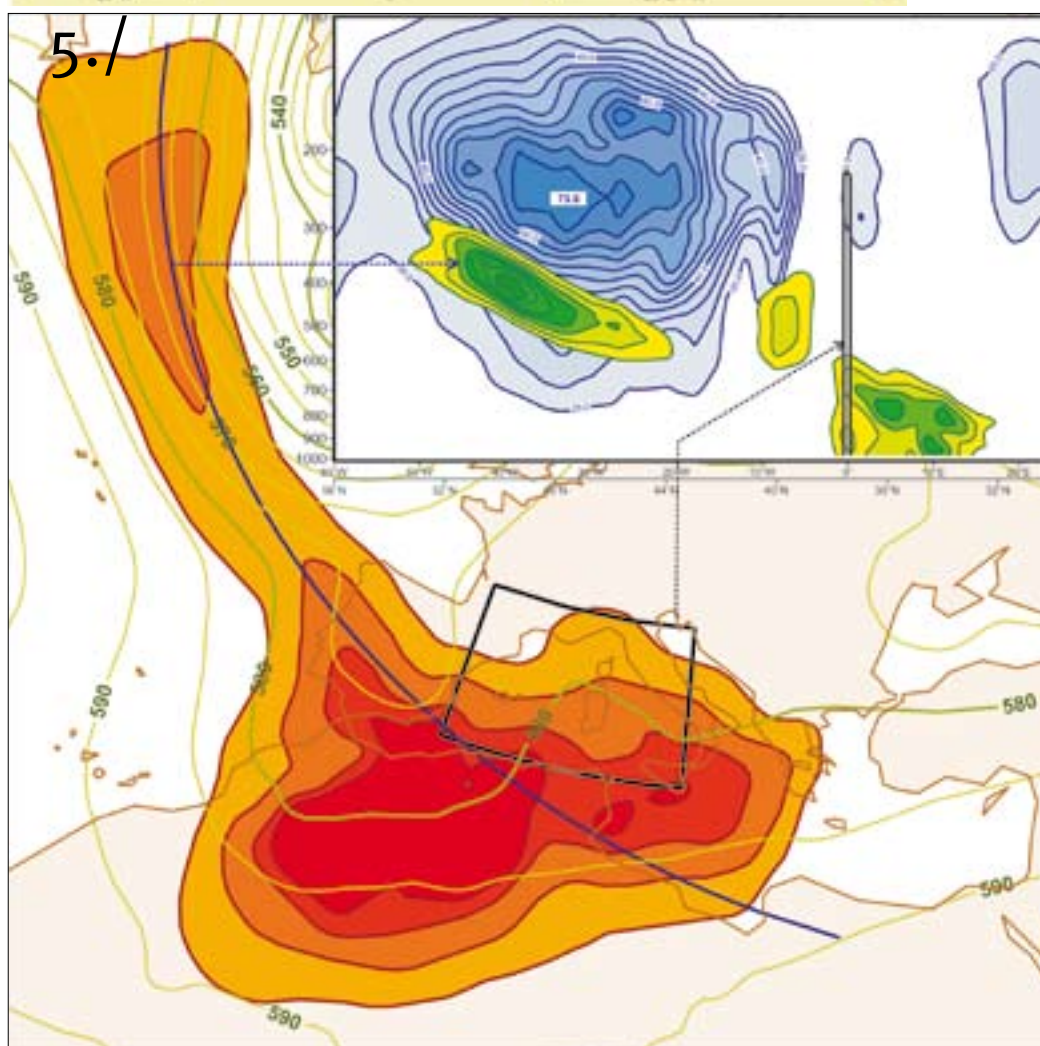
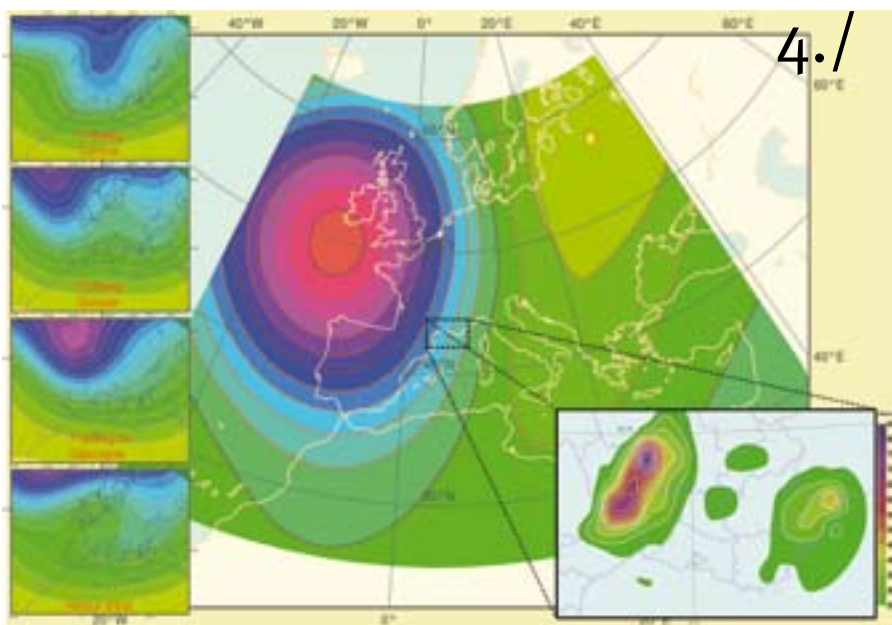
En Méditerranée, les phénomènes à étudier (vents forts et précipitations intenses) sont de plus petite échelle. L'importance des processus humides, très non-linéaires, y est accrue, ce qui peut rendre inadéquates les techniques habituelles. Cependant, nombre de situations méditerranéennes d'intérêt sont conditionnées par l'écoulement de plus grande échelle. On se propose donc de se focaliser d'abord sur de tels cas Méditerranéens, dont une sélection est en voie de constitution.

Un outil quantitatif capable de comparer les bénéfices espérés pour diverses simulations alternatives d'un réseau d'observation adaptatif est utilisé. Cette méthode doit être dérivée de la sensibilité aux observations dans ARPEGE. Dans le projet national CYPRIM, les cas sont d'abord étudiés avec les anciennes techniques qualitatives afin de préparer des déploiements qui doivent être évalués par la nouvelle méthode.

La figure montre la zone sensible dérivée de vecteurs singuliers, perturbations qui maximisent la croissance d'une énergie (par exemple, ou d'une autre mesure), sur un cas de forte précipitations de septembre 2006. L'influence de la grande échelle sur ce cas se note (sur la coupe verticale) par la longue extension vers le nord-ouest et en altitude (en vert, à 400 hPa) juste sous le courant jet (en bleu). (Figure 5)

4./Seuls quatre des sept régimes de temps Méditerranéens de l'automne (à gauche sur la figure, les plages de couleurs représentent la moyenne du géopotential de basse fréquence à 500hPa) sont associées à des épisodes de pluies significatifs. Les types de temps associés à ces épisodes sont à leur tour décomposables en 4 classes dont la plus fréquente (au centre de la figure, les plages de couleurs représentent l'anomalie de géopotential à 500hPa) est majoritairement associée aux événements de pluies exceptionnels. En bas à droite de la figure, carte de la moyenne des valeurs de pluies exceptionnelles pour cette classe.

5./zone sensible calculée pour le cas du 14 sep. 2006 à 12TU (précipitations en mer Tyrrhénienne et Corse) dans la zone d'intérêt délimitée en noir. La zone sensible est déterminée 36 heures avant l'événement (13 sep. à 00TU) et occupe des surfaces de 1,2,4 et 8 106 km². Elle provient de la combinaison de l'énergie totale de 6 vecteurs singuliers calculés sur cette période de 36 heures (norme type énergie totale). Elle est calculée sur une prévision à 12 heures issue de l'analyse du 12 sep. à 12TU. Le champ météorologique (vert olive) superposé est la prévision 12h de la Z500, valide pour cette date (intervalle : 6 damg). Coupe verticale (en haut à droite) : coupe dans la zone sensible 3D (en vert) et du module du vent (bleu) selon l'arc bleu signalé sur la carte et passant par le coin sud-ouest de la zone d'intérêt (barre verticale noire sur la coupe).



PHÉNOMÈNES DE MÉSO-ÉCHELLE

Externaliser pour mieux coupler : le système SURFEX (surface externalisée)

De nombreuses applications de Météo-France telles que la prévision numérique du temps, les simulations climatiques, les simulations en mode forcé ou encore l'assimilation de données, utilisent des modèles simulant l'évolution des caractéristiques des surfaces naturelles et urbaines ainsi que des lacs et de la mer. Pour ces différents types de surface, des modèles spécifiques comme ISBA ou TEB ont été développés au CNRM. SURFEX réunit l'ensemble des modèles de surface et propose une interface simple pour traiter les échanges entre une surface donnée et l'atmosphère qui lui correspond.

Dans le domaine de la prévision numérique, les efforts ont porté sur le couplage entre SURFEX et les modèles ARPEGE/ALADIN, SURFEX étant déjà couplé avec les modèles de méso-échelle meso-NH et AROME. Après

la validation du couplage entre SURFEX et ALADIN en 1D, les premiers essais en 3D ont été réalisés. Lorsque le niveau de validation sera suffisant, le couplage de SURFEX avec le modèle global ARPEGE sera fait. SURFEX a également été utilisé en mode forcé dans le cadre des projets GEOLAND ou AMMA. Le CNRM a aussi participé à SNOWMIP2 (une expérience d'intercomparaison de modèles de neige), ce qui a permis d'évaluer les schémas de neige de SURFEX.

La migration des différentes applications de surface de Météo-France se poursuivra en 2007. Cette organisation permettra à l'avenir à tous les modèles applicatifs utilisant les codes de surface de bénéficier rapidement des améliorations scientifiques réalisées sur la modélisation des processus de surface. (Figure 6)

Modélisation régionale du gaz carbonique : application à l'expérience CarboEurope Regional Experiment Strategy (Ceres)

L'expérience Ceres (mai – juin 2005) dans le Sud Ouest de la France a permis de réunir une base de données très complète sur la variation spatiale et temporelle du CO₂ atmosphérique en relation avec les processus atmosphériques dans la couche limite. Le modèle MésoNH couplé avec le schéma de surface Isba-A-gs simulant la photosynthèse et le flux de CO₂ à la surface, a été utilisé pour interpréter une journée sélectionnée : le cas du 27 mai 2005. Le modèle de surface est capable de simuler le cycle diurne des échanges de carbone et d'eau entre la végétation et l'atmosphère. Une représentation simplifiée des échanges de carbone sur la mer ainsi qu'une carte des émissions anthropiques ont été rajoutées à MésoNH.

Les mesures aéroportées ont mis en évidence une grande variabilité spatiale et temporelle du gaz carbonique dans la couche limite atmosphérique : un gradient horizontal de l'ordre de 10 ppm sur quelques dizaines de km a été observé au cours de la journée. Le modèle MésoNH s'est montré capable de reproduire ce gradient (figure 7a) ainsi que la très forte variabilité de la hauteur de la couche limite atmosphérique dans le domaine (figure 7b). Ainsi le modèle de méso-échelle est utilisé pour expliquer l'origine de ces fortes variations de CO₂ sous l'effet (i) des variations des flux de surface de CO₂ liées à l'occupation du sol (forte assimilation de CO₂ par les cultures d'hiver à l'est du domaine) et (ii) des circulations de méso-échelle se développant dans le domaine telle que la brise de mer emmenant de l'air plus riche en CO₂ sur la partie ouest du domaine.

Evaluation de l'albédo POLDER/ADEOS-2 par rapport aux modèles de prévision

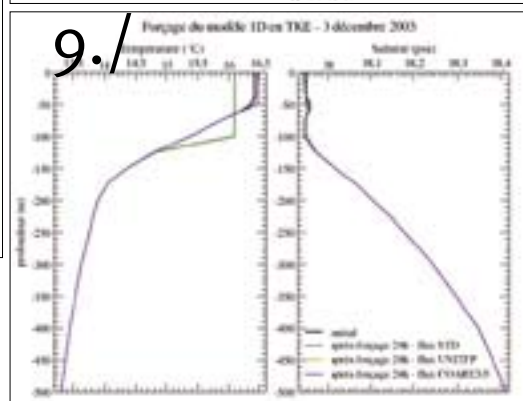
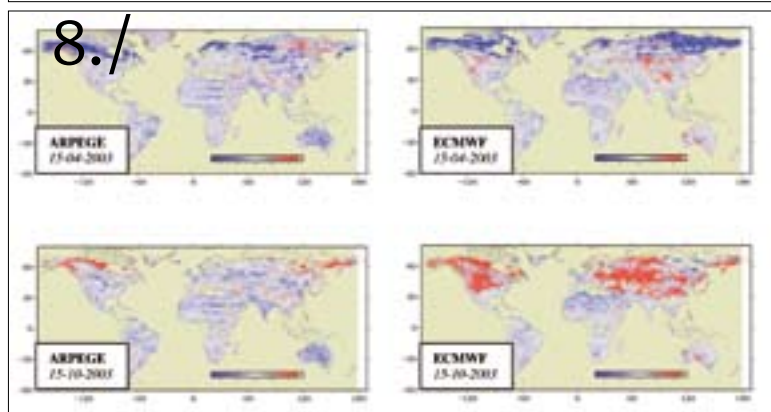
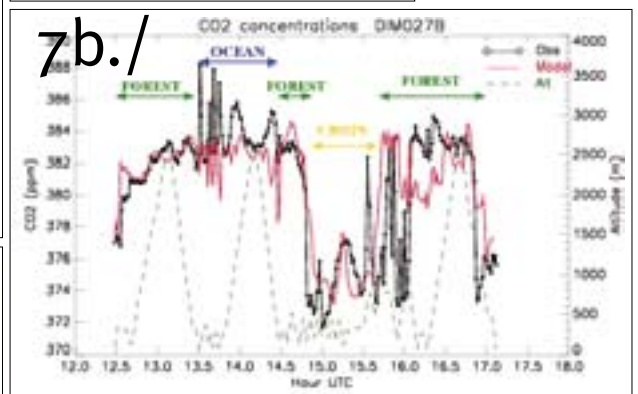
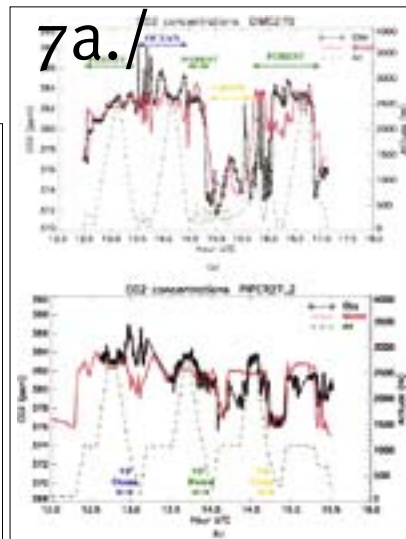
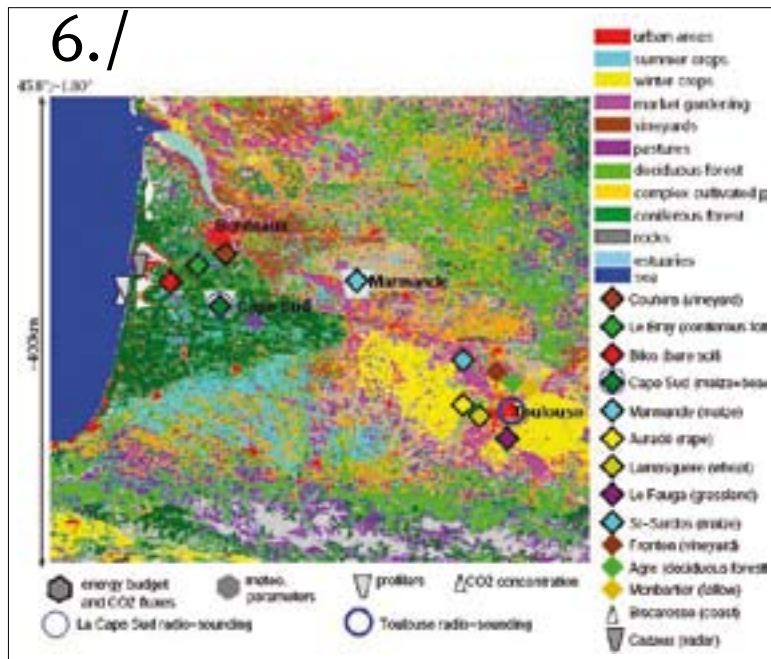
L'albédo de la surface est essentiel car il quantifie la proportion de rayonnement absorbé par la surface. Une étude a consisté à évaluer les champs globaux de l'albédo de surface pour 2003 à partir des observations de l'instrument optique multi-angulaire POLDER à bord de la plate-forme spatiale polaire Japonaise ADEOS-2.

L'exercice de validation a consisté en une analyse de la variabilité spatiale et de l'évolution temporelle, typiquement sur un cycle annuel. Il a reposé sur une comparaison avec des mesures de terrain et des produits similaires issus d'autres systèmes spatiaux d'observation, en particulier le capteur polaire Américain MODIS.

La particularité de l'étude a été une évaluation de l'albédo de surface POLDER à une échelle de 0.5 degré compatible avec la résolution de grille des modèles de circulation générale ARPEGE et IFS (modèle déterministe opérationnel au CEPMMT), considérés ici en particulier pour évaluer l'albédo neige.

Alors que les produits satellitaires sont comparables, les albedos de surface issus des bases climatiques présentent des différences importantes pour la neige. Les modèles de climat surestiment l'albédo de la neige pour les régions montagneuses et aux latitudes moyennes pour certaines périodes. Cette tendance s'inverse aux hautes latitudes car l'albédo neige sous végétation haute est mal représenté dans les modèles, avec toutefois de meilleures performances pour ARPEGE.

A partir de cette étude, une assimilation de l'albédo de surface satellitaire dans les modèles de prévision du temps est programmée. Cela devrait permettre d'améliorer dans les modèles, la qualité de la prévision de la température de surface et des précipitations, génératrices de neige. (Figure 8)



Développement d'un couplage océan-atmosphère pour l'étude des pluies intenses méditerranéennes

Lors de précédentes études, il a été montré que les prévisions à haute résolution (2-3 km) des événements de pluie intense en région méditerranéenne sont très sensibles à la température de surface de la mer, ainsi qu'à la paramétrisation des flux turbulents sur mer.

Dans le but d'étudier l'impact des fortes précipitations et du fort vent marin observés dans ces situations sur la couche de mélange océanique, le développement d'une modélisation totalement couplée entre l'océan et l'atmosphère a été entrepris. Ce couplage, à haute résolution, est réalisé entre le modèle atmosphérique de recherche Meso-NH via son modèle de surface SURFEX et un modèle océanique 1D en mélange vertical d'énergie cinétique turbulente. A cette occasion, ont été introduites la prise en compte de la ba-

thymétrie dans le modèle océanique et la possibilité d'initialiser les variables océaniques et la température de surface de la mer à partir d'analyses MERCATOR.

Le forçage pendant une durée de 24 heures pour quelques points dans le golfe du Lion du modèle océanique 1D par les flux de surface obtenus en combinant les données atmosphériques d'une prévision Meso-NH et les données océaniques d'une analyse Mercator, montre déjà, dans le cas fortement précipitant du 3 décembre 2003, un impact significatif d'un changement de formulation des flux turbulents sur la couche de mélange océanique. Ces résultats devront être confirmés à l'avenir avec des tests avec le système couplé complet sur des situations de pluie intense. (Figure 9)

6./ Carte d'occupation des sols de Surfex et dispositif expérimental pour le sud-ouest de la France, utilisés lors de la campagne Ceres du projet CarboEurope pour modéliser les échanges de CO₂ entre la surface (Surfex) et l'atmosphère (Meso-NH).

7a./ Simulation régionale du gaz carbonique sur la forêt des Landes et les cultures au cours de l'expérience Ceres (mai-juin 2005).

b./ Simulation du gaz carbonique et observation par l'avion Dimona à différents niveaux dans la couche limite atmosphérique. Le CO₂ simulé a été interpolé dans l'espace et le temps sur la trajectoire de l'avion instrumenté.

8./ Cartes des différences entre les albédos solaire POLDER et des modèles de climat pour deux dates. Les zones bleues et rouges indiquent, respectivement, une sous-estimation et une surestimation des modèles de climat par rapport au satellite.

9./ Profils en température et salinité du modèle 1D en ECT (Energie Cinétique Turbulente) dans le golfe du Lion, pour l'épisode fortement précipitant du 3 déc. 2003. Le profil initial est en noir. En couleurs, les profils finaux après un forçage de 24h obtenu à partir des flux issus de différentes paramétrisations en combinant les données atmosphériques d'une prévision Meso-NH et les données océaniques de l'analyse Mercator : en vert avec la paramétrisation standard de Meso-NH, en orange avec la paramétrisation unifiée, en violet avec l'algorithme COARE3.0. Des réponses différentes en terme de refroidissement et d'approfondissement de la couche de mélange océanique sont obtenus selon la paramétrisation utilisée.

Caractérisation de l'environnement météorologique des pluies intenses méditerranéennes à l'aide d'analyses diagnostiques à méso-échelle

Le sud de la France est fréquemment soumis à des épisodes de pluie intense potentiellement associés à des crues-éclair dévastatrices. Une approche climatologique est actuellement développée pour caractériser l'environnement de méso-échelle (~ 10 km) dans lequel ces systèmes se développent.

Cette climatologie basée sur des analyses 3D-var de méso-échelle est réalisée pour des épisodes de pluie intense sur une période de 4 ans (pluie quotidienne dépassant 200 mm depuis 2002 entre le 15 août et le 31 décembre). Les données analysées proviennent d'un réseau dense d'observations de surface, des radiosondes et des données satellitaires. Les données foudre et précipitations horaires sont utilisées pour identifier les phases initiale, mature et finale de ces épisodes. Ces analyses, réalisées toutes les 6 heures durant le cycle de vie de ces systèmes, permettent de documenter l'évolution temporelle d'ingrédients-clé tels que les jets

de basses couches (intensité, orientation...), l'instabilité convective disponible et le degré d'humidité de l'atmosphère.

Afin d'identifier des caractéristiques de l'environnement de basses couches différentes selon la localisation des précipitations, 4 zones géographiques sont considérées (Languedoc-Roussillon, Cévennes-Vivarais, Alpes du sud et Corse). Des analyses composites sont ainsi produites en moyennant les diagnostiques pour chaque zone et chaque phase. La figure montre différentes conditions de basses couches associées aux événements affectant deux de ces zones. L'humidité et l'instabilité sont transportées par les jets de basses couches vers la région cible où se produisent les fortes pluies.

Cet effort sera poursuivi en considérant aussi les événements de précipitations quotidiennes dépassant les 150 mm sur la période 2002-2006. (Figure 10)

Potentiel éolien et dispersion de polluants à Tahiti

La production d'électricité sur l'île de Tahiti répond à un besoin croissant ; de très fortes contraintes, notamment d'approvisionnement en énergies fossiles, ainsi que de pollution atmosphérique due aux rejets soufrés par les cheminées des centrales thermiques, ont amené les acteurs locaux à demander à Météo-France d'étudier d'une part le potentiel éolien de plusieurs sites tahitiens, d'autre part l'impact des rejets de la centrale électrique de la vallée de la Punaaru.

Le CNRM, ayant déjà travaillé sur l'interaction entre le relief et l'atmosphère pour une étude aéronautique, possédait une maquette au 1/20000ème de Tahiti ; c'est donc naturellement vers sa veine de simulation hydraulique que les services de Météo-France

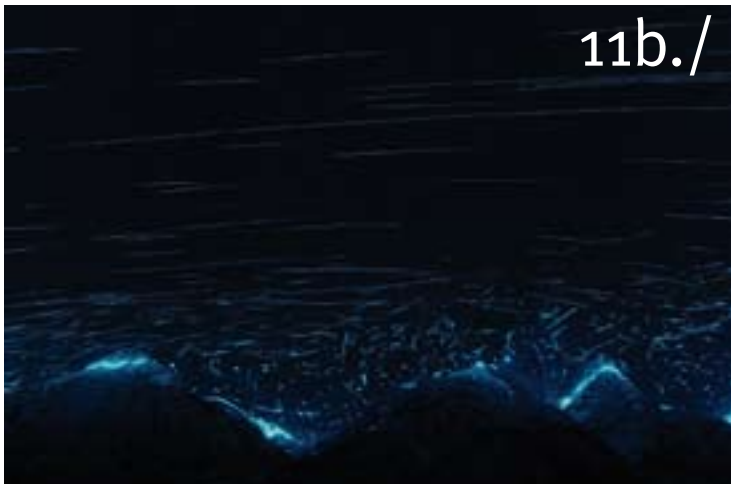
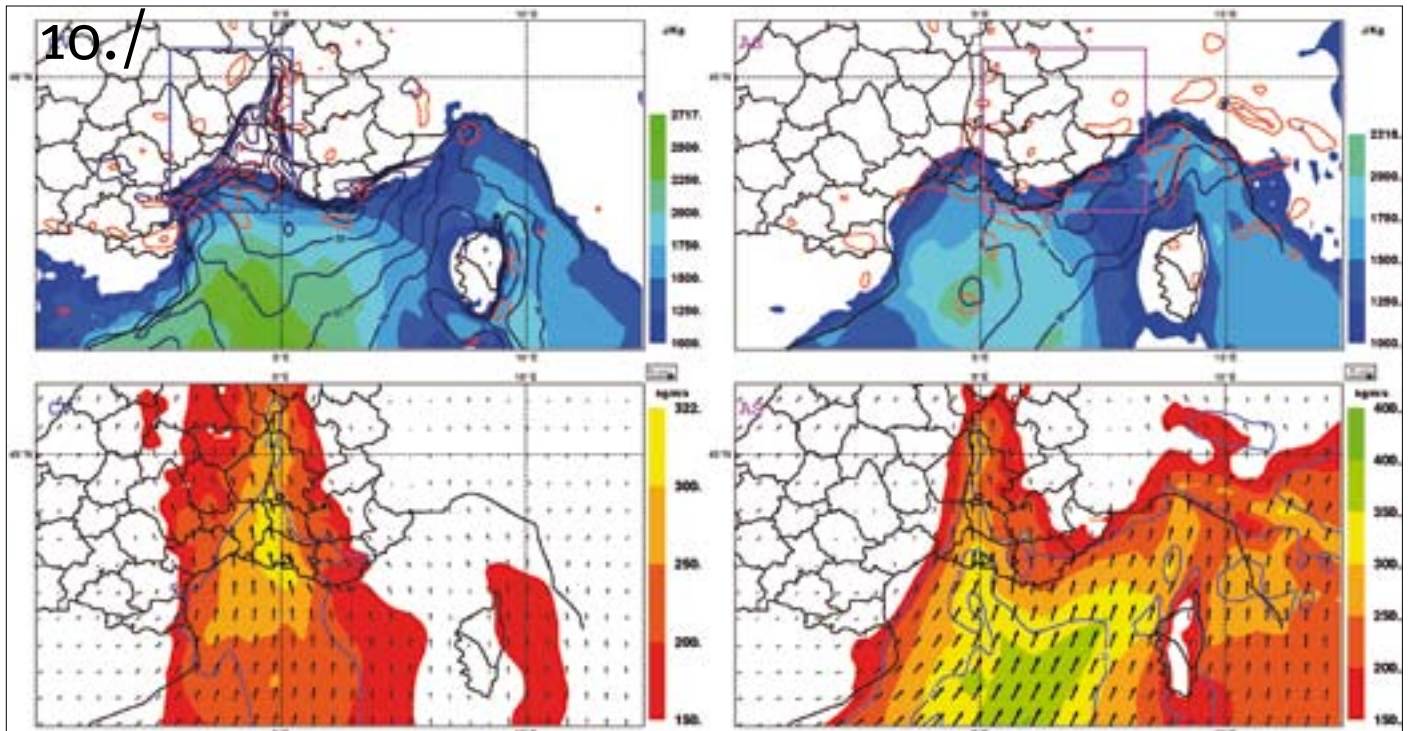
en Polynésie se sont tournés pour décrire ces phénomènes turbulents. Plusieurs mois d'expériences en canal hydraulique ont permis de décrire l'influence du relief tourmenté sur la qualité du vent sur les crêtes susceptibles d'accueillir des éoliennes ; l'émission d'un panache polluant à Punaia a également été simulée à l'aide de fluorescéine. Des techniques de visualisation et de mesure laser ont été mises en œuvre dans les cinq directions de vent les plus fréquentes. Les résultats vont maintenant être comparés aux mesures locales et aux simulations numériques réalisées par la Direction de Météo-France en Polynésie Française (DIRPF) et les bureaux d'études associés, afin de contribuer à la prise de décisions quant à l'aménagement de ce territoire. (Figure 11)

Turbulence de grille décroissante en milieu fortement stratifié stable

La turbulence est un phénomène complexe que l'on rencontre dans de nombreux cas en géophysique. Bien que les équations régissant les écoulements turbulents soient connues depuis plus d'un siècle, la résolution de ces équations par simulation numérique directe n'est viable que pour des géométries relativement simples aux plus petites échelles et vitesses. Dans la plupart des cas pratiques, et surtout en géophysique, la prévision numérique de l'écoulement fait appel à une modélisation des effets de la turbulence à un niveau donné. Comme il n'existe aucune théorie unifiée de la turbulence, une modélisation correcte nécessite une bonne connaissance de la dynamique turbulente. Dans les cas océaniques ou atmosphériques, la rotation de la terre et la stratification verticale de densité influencent aussi la dynamique de la turbulence.

L'équipe SPEA du CNRM étudie en laboratoire et depuis de nombreuses années la turbulence sous l'effet de la stratification. Le laboratoire peut réaliser un écoulement turbulent sans avoir recours à un modèle de turbulence, et ainsi contribuer au développement de modèles de turbulence. En particulier, de nombreux régimes et parties intéressants qui peuvent être étudiés en laboratoire ne peuvent pas l'être aujourd'hui en simulation numérique directe (DNS). Ainsi, les sillages en stratifié sont étudiés à SPEA depuis le début des années 1990, mais c'est seulement maintenant que sont développés des codes DNS spéciaux capables d'étudier même de simples écoulements comme ceux-ci.

Un des projets entrepris récemment à SPEA, en collaboration avec des chercheurs de l'IMFT (Toulouse) et des USA vise justement à atteindre des régimes pour lesquels les connaissances en dynamique turbulente sont encore limitées. Une grille, déplacée dans une cuve contenant un gradient de saumure, génère une turbulence stratifiée. Des techniques particulières sont mise au point pour mesurer les fluctuations de vitesse turbulentes – en 3D- avant de ressentir l'impact complet de la stratification. (Figure 12)



- 10./ Analyse composite pour les événements fortement précipitants (2002-2005) ayant affectés la zone Cévennes-Vivarais (12 cas, colonne de gauche) et la zone Alpes du Sud (7 cas, colonne de droite), les zones sont indiquées par des rectangles. En haut : CAPE - énergie convective potentielle disponible- (surfaces colorées, tous les 250 J/Kg), eau précipitable (lignes bleues, contours tous les 1 mm au-dessus de 30 mm) et convergence d'humidité à 2 mètres (lignes rouges, contours tous les $1E^{-6}s^{-1}$). En bas : flux d'humidité intégré sur la couche 1000-700 hPa (flèches et surfaces colorées, tous les 50 Kg/m/s) et intensité du vent à 925 hPa (lignes bleues, contours tous les 5 m/s au-dessus de 10 m/s).
- 11a./ Mise en place des repères expérimentaux sur la maquette de l'île de Tahiti.
- b./ Visualisation en plan vertical de l'écoulement turbulent sur la crête de Papenoo et alentours.
- 12./ Réglage du positionnement de la grille dans le canal moyen.

Climat et changement climatique

L'année 2006 a été une année d'intense préparation des rapports qui seront publiés par le GIEC tout au long de l'année 2007. Les travaux du CNRM se sont en particulier focalisés sur l'analyse des changements du cycle hydrologique, sur

la régionalisation du changement climatique et les extrêmes climatiques, sur l'analyse des changements dans les régions polaires, ou encore sur la détection de changements climatiques à l'échelle de la France.

Détection du changement climatique

La détection d'un changement climatique s'apparente à la détection d'un signal qui s'écarterait, au sens statistique, du bruit de la variabilité interne au système climatique. Cette analyse a été conduite sur les données d'observations de précipitations en France.

Pour mener à bien l'étude, il est nécessaire de disposer de longues séries de données corrigées des ruptures d'homogénéités, qui résultent en particulier du déplacement de stations ou du changement des capteurs. Ces données homogénéisées, couvrant le 20^e siècle avec un pas de temps mensuel, ont été produites par la Direction de la Climatologie sur environ 300 sites répartis sur l'ensemble de la métropole.

La méthode employée, dite des « empreintes digitales », requiert aussi de disposer d'une estimation du signal de changement provenant de simulations de scénarios de changement climatique en réponse à une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre. Nous avons utilisé un ensemble de 8 scénarios réalisés par le CNRM avec le modèle climatique régional ARPEGE-Climat, d'une résolution d'une cinquantaine de kilomètres sur la France.

La confrontation des résultats du modèle aux observations permet de conclure à la détection d'un signal de changement climatique sur les tendances sur 30 ans des précipitations hivernales. Ce signal, pour les toutes dernières décennies, montre un changement des précipitations cohérent avec celui qui est calculé par le modèle climatique régional en réponse aux émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine.

Ce travail sera poursuivi par une étude analogue conduite sur les débits de certains fleuves français afin de disposer d'un nouvel indicateur d'évolution du cycle de l'eau en France. (Figure 13)

Réponse du cycle hydrologique au changement climatique

La réponse du cycle hydrologique aux forçages anthropiques pris en compte dans les scénarios climatiques du 21^e siècle est, pour de nombreuses raisons, plus difficile à prévoir que celle des températures. Au-delà des inconnues liées aux différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, qui jouent principalement sur l'amplitude des anomalies simulées, les projections hydrologiques globales demeurent très variables d'un modèle à l'autre. Dans certains cas, c'est le signe même des impacts hydrologiques qui reste incertain. Les incertitudes sont cependant réparties de manière très hétérogène. Elles sont généralement importantes sous les Tropiques, plus faibles aux moyennes et hautes latitudes, en particulier sur l'Europe où la plupart des modèles s'accordent pour prévoir un assèchement estival marqué au Sud et une augmentation des précipitations hivernales au Nord. Globalement, on semble se diriger vers une accentuation des contrastes hydrologiques spatio-temporels qui devrait se traduire par une multiplication et une intensification des inondations et des sécheresses. Cependant, de nombreux points restent à éclaircir concernant la nature exacte et la répartition régionale des impacts, montrant la nécessité de mieux contraindre la réponse des modèles. Cette tâche prioritaire demeure difficile pour deux raisons principales :

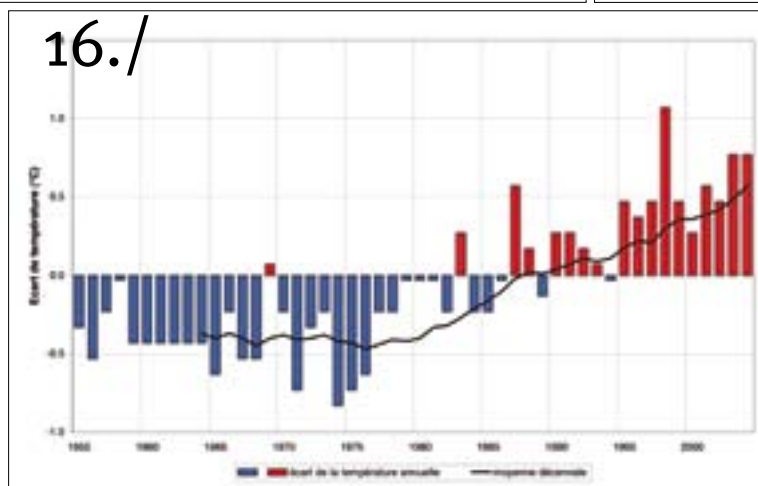
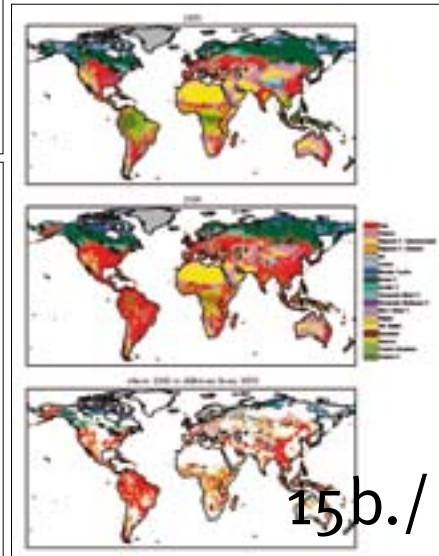
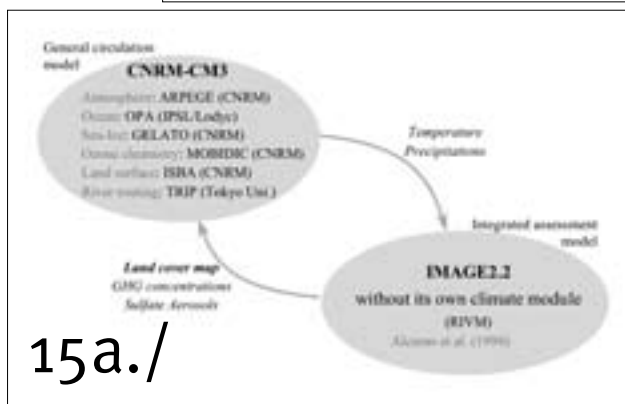
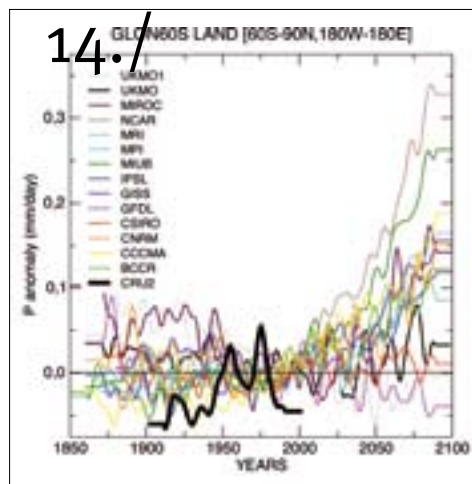
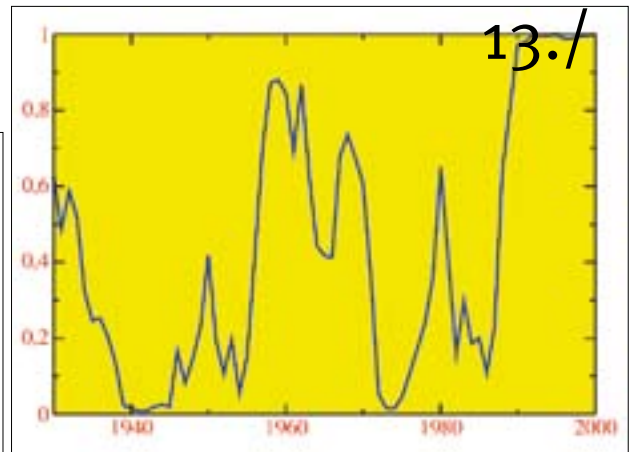
- la multiplicité et le caractère parfois grossissant des paramétrisations physiques qui contrôlent la sensibilité du cycle hydrologique,
- le manque de résultats probants concernant la détection des changements hydrologiques du fait de l'insuffisance des observations, des faiblesses des modèles, des incertitudes sur les forçages anthropiques du 20^e siècle et de leurs effets parfois antagonistes sur les précipitations. (Figure 14)

Scénario climatique avec modélisation des changements d'utilisation des sols

Les simulations climatiques du XXI^e siècle réalisées jusqu'alors au CNRM prenaient en compte des scénarios d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols, mais pas les changements de couverture végétale à la surface des continents. Pourtant, parmi les outils qui sont utilisés pour établir ces scénarios de concentration en gaz à effet de serre, certains simulent aussi l'évolution de la distribution de végétation. Ces outils sont appelés modèles d'impact intégré puisqu'ils servent à estimer les impacts des activités humaines sur l'environnement. Au CNRM, le modèle d'impact IMAGE2.2 (développé par la « Netherlands Environmental Assessment Agency ») a été utilisé, et a été couplé au modèle global de climat CNRM-CM3.

Dans le nouveau système mis en place, IMAGE2.2 fournit au modèle climatique des cartes de distributions de la végétation ainsi que les évolutions des concentrations des différents gaz à effet de serre, en réponse à l'activité humaine ainsi qu'au changement de climat. Le modèle climatique fournit en retour le changement de climat simulé à IMAGE2.2 (figure 15). L'intérêt de ce système, outre de permettre de prendre en compte l'évolution de la végétation, est d'utiliser des forçages anthropiques simulés en cohérence avec le changement de climat simulé. Une première simulation test a pu être réalisée avec ce système ; si elle a démontré la faisabilité de ce couplage, elle a aussi fait apparaître la nécessité de porter plus de soin à l'initialisation des simulations.

Ce système préfigure l'avenir de la modélisation climatique : la construction de modèles dits « système Terre » qui intègrent le plus possible de composantes du système climatique et économique afin d'en étudier les interactions.



- 13./** Probabilité de détection d'un signal de changement. La valeur d'une année particulière s'applique à la tendance des précipitations d'hiver sur les 30 années qui la précèdent.
- 14./** Anomalies filtrées de précipitations annuelles moyennées sur l'ensemble des continents (sauf Antarctique) relativement à la climatologie 1971-2000. Les anomalies issues de 14 modèles couplés ayant contribué au 4ème rapport du GIEC montrent une forte dispersion à la fin du 21^e siècle (scénarios A2) et ne reproduisent pas l'évolution observée au cours du 20^e siècle (climatologie CRU en trait noir épais) dont la forte composante multi-décennale laisse suggérer une combinaison encore mal comprise de la variabilité climatique naturelle et des forçages anthropiques.
- 15a./** Schéma du couplage entre le modèle climatique CNRM-CM3 et le modèle d'impact intégré IMAGE2.2 (MNP).
- b./** Carte de végétation simulée par le système couplé CNRM-CM3/IMAGE 2.2 pour les années 1970 et 2100 ainsi que la carte de végétation de 2100 avec seulement les points pour lesquels la végétation a changé entre les deux dates.
- 16./** Évolution des anomalies de température moyenne annuelle en Guyane à Matoury (aéroport de Cayenne) sur la période 1955-2004. L'anomalie représente l'écart entre la température moyenne annuelle et la climatologie calculée sur la période 1971-2000.

Réchauffement climatique : l'Outre-Mer aussi

La constitution des séries de référence est aussi un impératif pour l'outre-mer. Toutes les séries de mesure ne sont pas exploitables pour l'analyse du changement climatique, car elles sont susceptibles de contenir des ruptures d'homogénéité. Les méthodes d'homogénéisation permettent de corriger ces ruptures et de disposer de séries fiables pour caractériser l'évolution du climat. Les récentes opérations de sauvegarde des données et d'homogénéisation des séries à Météo-France ont concerné l'outre-mer. Des séries homogénéisées sont maintenant

disponibles sur la Guyane, la Réunion et la Martinique. Ces séries montrent que le réchauffement climatique est aussi une réalité outre-mer, excepté sur la Réunion, où aucune tendance significative sur l'évolution de la température moyenne n'est détectée. Le réchauffement de la température moyenne annuelle en Guyane (Figure 16) atteint 0.35°C/décennie sur la période 1976-2004 à la station de Matoury (aéroport de Cayenne). Pour mémoire, en métropole, la température moyenne a augmenté de 0.56 °C/décennie sur la même période.

Les premières analyses sur l'évolution des températures moyennes annuelles en Guadeloupe, et Polynésie Française indiquent un réchauffement comparable sur la période 1976-2004. Une étude de la DIRNC conclut également à un réchauffement en Nouvelle Calédonie. La hausse de la température moyenne annuelle est de l'ordre de 0.32°C/décennie sur la période 1976-2003, mais la température y est très sensible aux phases de l'ENSO (El Niño Southern Oscillation).

L'évolution de la banquise arctique au cours du 21^e siècle dans les scénarios du Giec

Si en Antarctique, le climat n'a que relativement peu évolué au cours des dernières décennies, il n'en va pas de même en Arctique, où depuis 30 ans le réchauffement a été nettement plus important que sur les autres régions du globe. L'une des conséquences visibles de cette évolution climatique est le recul très marqué de la limite estivale de la glace de mer, particulièrement depuis le début des années 90. Ainsi, les observations satellitaires montrent qu'entre 1990 et 2005, la surface recouverte de banquise en Arctique au mois de septembre est passée de 8 millions de km² à seulement 5,5 millions de km², soit un retrait équivalent à 5 fois la surface de la France. Cette tendance observée a des implications importantes, notamment sur l'écosystème de l'Océan Arctique et sa navigabilité. L'un des objectifs du dernier rapport d'évaluation du Giec, paru début 2007 et auquel Météo-France a

contribué, était donc de fournir des projections d'évolution de la glace de mer dans cette région. Pour cela, différents modèles ont été utilisés. Tous s'accordent pour simuler une banquise arctique en régression rapide au cours du 21^e siècle, et la plupart d'entre eux indiquent qu'elle pourrait disparaître complètement en été, mais la date à laquelle ce phénomène pourrait se produire pour la première fois reste incertaine. À cela deux raisons : d'une part, pour un modèle donné, le réchauffement climatique simulé, qui induit une fonte de banquise, varie selon le scénario de concentration de gaz à effet de serre envisagé. D'autre part, les formulations physiques, comme par exemple les échanges d'énergie entre l'océan, la glace et l'atmosphère, diffèrent selon les modèles. C'est sur ce dernier point qu'il reste possible de réduire les incertitudes, tant par l'observation que par la modélisation. (Figure 17)

Adaptation de la paramétrisation linéaire de la chimie atmosphérique aux substances rejetées par les moyens de transport

Dans le cadre du projet européen QUANTIFY pour l'étude de l'impact des différents moyens de transport (terrestre, maritime et aérien) sur l'atmosphère, le CNRM doit effectuer des simulations climatiques de 1900 à 2100 avec son modèle de climat (CNRM-CM3). Ce modèle simule l'interaction entre l'atmosphère (modèle ARPEGE-Climat), l'océan (modèle OPA) et la glace de mer (modèle GELATO).

Pour la partie atmosphérique, ARPEGE-Climat inclut une représentation linéaire de la photochimie de l'ozone rendant compte de l'évolution de la couche d'ozone en fonction de la température (influent sur la chimie atmosphérique), de la quantité d'ozone située au-dessus de chaque point de grille du modèle (filtrant le rayonnement solaire) et du chlore qui pilote la destruction de la couche d'ozone, notamment en Antarctique. Cette approximation est rendue nécessaire par l'important coût informatique de CNRM-CM3

qui rend à ce jour impossible une modélisation comprenant une chimie détaillée. Néanmoins, en l'état actuel, cette représentation simplifiée ne peut simuler les effets des moyens de transport. En collaboration avec le CERFACS, un développement spécifique a donc été mis en place afin de considérer ces effets sur la couche d'ozone, et finalement sur le climat.

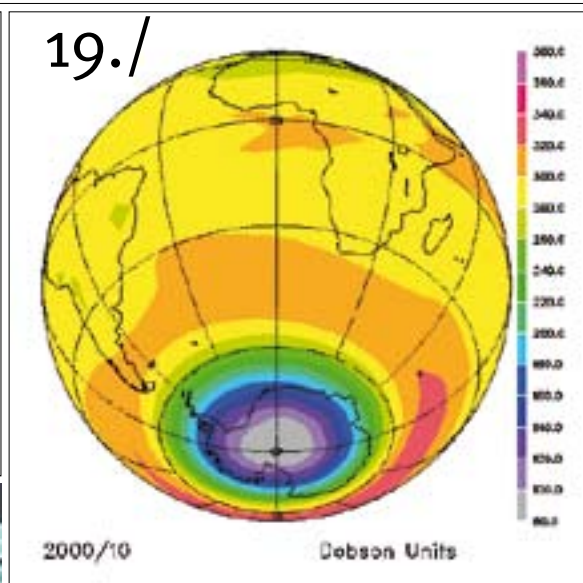
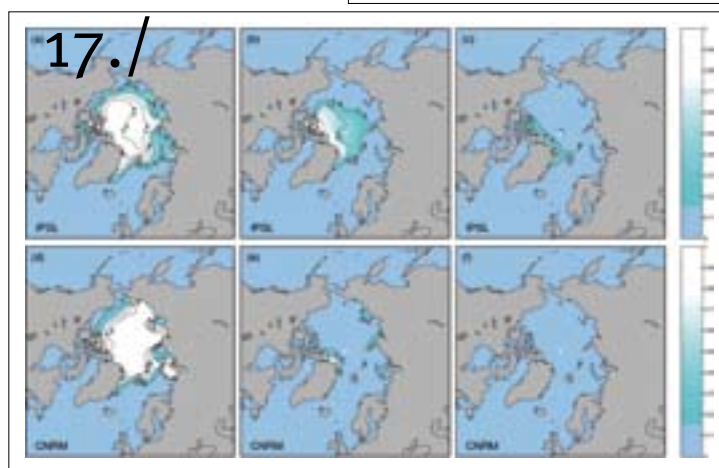
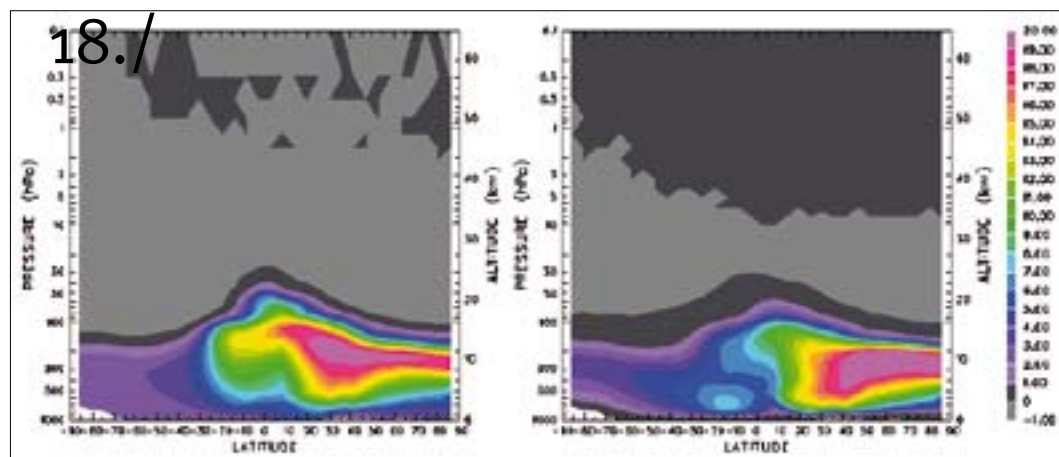
Désormais, l'impact des principaux gaz rejetés, que sont les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO) et la vapeur d'eau, est pris en compte et permet de reproduire un comportement similaire (voir figure) à celui d'un modèle de chimie-transport (MOCAGE) incluant une chimie atmosphérique détaillée. Ainsi, la flotte aérienne génère une augmentation d'ozone dans la troposphère et une destruction dans la stratosphère. Cette nouvelle paramétrisation permet ainsi de couvrir les besoins de QUANTIFY.

(Figure 18)

Le couplage entre ARPEGE-Climat et MOCAGE

Toujours dans le cadre du projet QUANTIFY mentionné dans l'article précédent, et dans le but de valider les résultats du modèle de climat CNRM-CM3 incluant une chimie simplifiée, des développements ont été apportés au modèle de chimie-transport MOCAGE qui simule une chimie détaillée. Désormais, MOCAGE peut utiliser le forçage météorologique en 3D (vents, pression, température) mais aussi à la surface (albédo du sol, température du sol, ...), issu du modèle de circulation générale ARPEGE-Climat pour calculer l'évolution des composants chimiques atmosphériques. Cette action du modèle météorologique sur le modèle de chimie représente classiquement l'impact de la météorologie sur les distributions des gaz atmosphériques. La rétroaction de la chimie sur le climat est également prise en compte dans le modèle couplé ARPEGE-Climat/MOCAGE via l'ozone déterminé par MOCAGE, calculé à l'équilibre photochimique avec les autres gaz atmosphériques, et qui est transmis à ARPEGE-climat pour déterminer l'équilibre thermodynamique de l'atmosphère. Ainsi, le modèle couplé reproduit un trou d'ozone Antarctique pour octobre 2000 (Figure 19) cohérent avec les observations satellitaires disponibles.

Cette rétroaction de la chimie sur le climat sera complétée par l'adjonction d'espèces supplémentaires comme la vapeur d'eau, le protoxyde d'azote (N₂O) ou les chloro-fluoro-carbures (CFCs), qui sont respectivement des sources d'oxydes d'azote et de chlore dans l'atmosphère, mais également des gaz participant à l'équilibre radiatif de l'atmosphère. Ces gaz, avec l'ozone, permettront ainsi de mieux prendre en compte l'évolution de la chimie atmosphérique et son impact sur le climat du XXI^e siècle.



Coordination des activités climatologiques menées dans le cadre du Programme Climatique Mondial

En tant que Président de la Commission de Climatologie (CCI) de l'OMM, le rôle dévolu à P. Bessemoulin comporte principalement les actions suivantes :

- coordination de la CCI en liaison avec le secrétariat du Programme Climatique Mondial de l'OMM et le Groupe de Gestion de la CCI, et mise en place d'une nouvelle structure pour cette CCI.
- participation à diverses réunions de groupes d'experts (veille climatique, climat et santé).
- contribution au développement d'un nouveau site Web de la Commission : <http://www.wmo.ch/web/wcp/ccl/> où l'on peut trouver tous les renseignements sur les groupes de travail : termes de référence, composition, plans d'actions, librairie virtuelle,...
- contribution aux thèmes transversaux de

l'OMM (Prévention et Atténuation des Catastrophes naturelles ; Démarche Qualité ; SMOC ; Programme spatial de l'OMM ; Mise en œuvre du programme quinquennal de la CCNUCC sur les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique ; 3ème conférence mondiale sur le Climat ; Plan à long terme de l'OMM ; Groupe consultatif sur le Climat et l'Environnement ; Evolution des SMHNS et de l'OMM).

- relecture du projet de contribution du Groupe 1 du GIEC au 4ème rapport d'évaluation du GIEC (AR4), intitulé « les bases scientifiques du changement climatique ».

Par ailleurs, tous les groupes d'experts ont terminé leur plan d'actions pluriannuelles fin 2006, qui définira leurs activités jusqu'à fin 2009. (Figure 20)

17./ Fraction de glace de mer, en moyenne pour le mois de septembre (extension minimale) en Arctique, simulée par les modèles CNRS/IPSL-CM4 (haut) et Météo-France/CNRM-CM3 (bas). (a), (d) : période 1960-1989. Ces résultats sont très proches des observations par satellite dont on dispose actuellement; (b), (e) : 2070-2099, scénario SRES-B1; (c), (f) : 2070-2099, scénario SRES-A2.

18./ Moyennes zonales (latitude/pression) de l'impact (en %) d'une injection d'oxydes d'azote sur la couche d'ozone calculées avec MOCAGE en utilisant une chimie atmosphérique détaillée (référence, à gauche) et avec la nouvelle représentation simplifiée (à droite), pour le mois d'août 2003.

19./ Moyenne mensuelle d'octobre 2000 de la colonne totale d'ozone (en unités Dobsons) simulée par le modèle couplé ARPEGE-Climat / MOCAGE.

20./ Séance de travail de la commission de climatologie de l'OMM à Genève.

Etudes environnementales liées à l'atmosphère

En 2006, de multiples développements ont été menés en hydrométéorologie, en nivométéorologie, ainsi que dans les domaines de l'observation marine ou de la modélisation en

chimie atmosphérique. Sur ce dernier aspect, le caractère très prometteur des premiers résultats obtenus avec le nouveau modèle Arome-Chimie est à souligner.

HYDROMÉTÉOROLOGIE

Prévision des crues rapides dans le cadre du projet PREVIEW

Le projet PREVIEW (PREVENTION, INFORMATION and EARLY WARNING pre-operational services to support the management of risks, <http://www.preview-risk.com/>), projet européen intégré du 6ème PCRD, concerne les risques industriels et naturels dont ceux liés à l'atmosphère. Le CNRM est impliqué sur le thème particulier de la prévision des crues éclaircies en région Méditerranéenne, en partenariat avec l'ARPA Piemonte (Italie), le LTHE (France), NOA-IERSD (Grèce), Meteo-Swiss (Suisse) et Noveltis (France).

La première phase du projet en cours vise à développer et valider des systèmes intégrés de prévision des crues, dans lesquels des modèles hydrologiques sont couplés aux modèles atmosphériques à haute résolution qui seront utilisés dans quelques années en opérationnel par les centres nationaux météorologiques. Ces systèmes sont en cours d'évaluation sur des épisodes de pluie intense sur les bassins versants des Cèven-

nes et du Piémont italien. Un ensemble de simulations à haute résolution (2-3km) a ainsi été réalisé à l'aide de différents modèles atmosphériques (Almo2, Lami, Meso-NH et MM5). Ces modèles ont fourni des prévisions jusqu'à 18 heures d'échéance couvrant l'ensemble des épisodes pluvieux, avec des conditions initiales réactualisées toutes les 12 heures. Les cumuls horaires de précipitation ont ensuite été fournis aux modèles hydrologiques pour évaluer la pertinence des prévisions des modèles atmosphériques à haute résolution pour des applications hydrologiques.

Par ailleurs, les partenaires français développent et évaluent plus particulièrement un système de prévision des crues rapides reposant sur un couplage interactif le modèle de surface SURFEX des modèles Meso-NH et AROME, avec un modèle hydrologique basé sur les concepts de TOPMODEL. (Figure 1)

Retour d'expérience sur les crues de 1856

La Direction de la Climatologie de Météo-France enrichit le patrimoine climatologique national en séries fiables et exploitables. Cette démarche s'inscrit dans le cadre général de l'étude des changements climatiques et permet aussi l'étude d'événements particuliers.

Les crues de 1856 sur le Rhône ont été étudiées dans le cadre du colloque anniversaire organisé par la Société Hydrotechnique de France. Deux mécanismes de la crue ont été mis en évidence :

- la pluviométrie d'avril et mai 1856 due à de nombreux événements pluvieux d'origine océanique.
- le rôle de l'épisode pluvieux d'origine méditerranéenne à la fin du mois de mai.

La figure ci-jointe illustre ce premier point et l'intérêt de disposer d'une chronique longue pour rendre compte du caractère exceptionnel de l'événement.

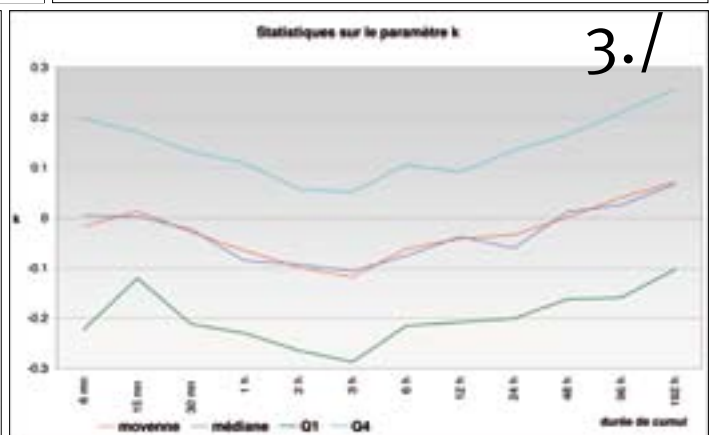
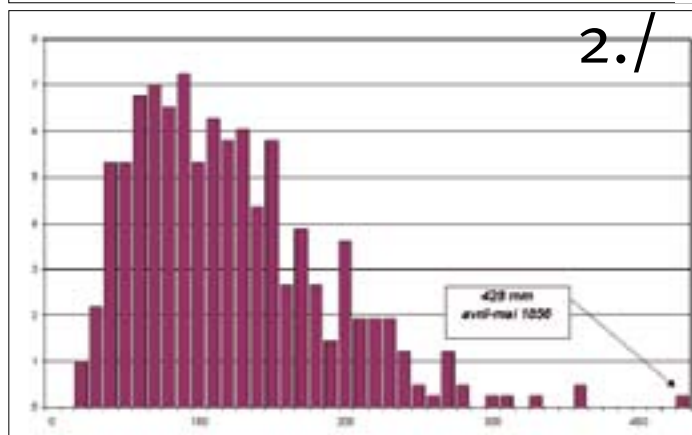
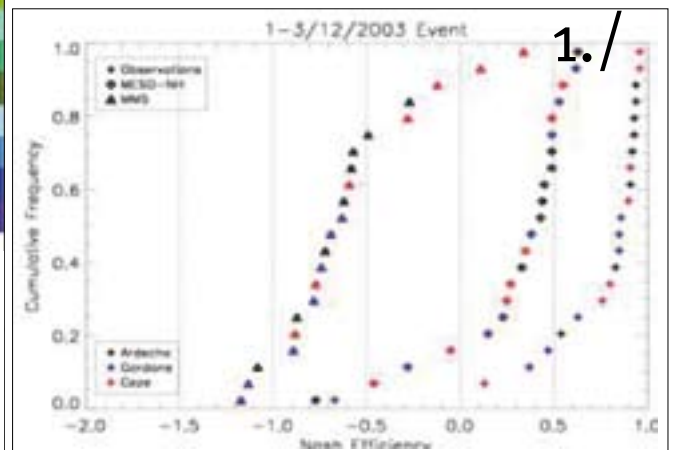
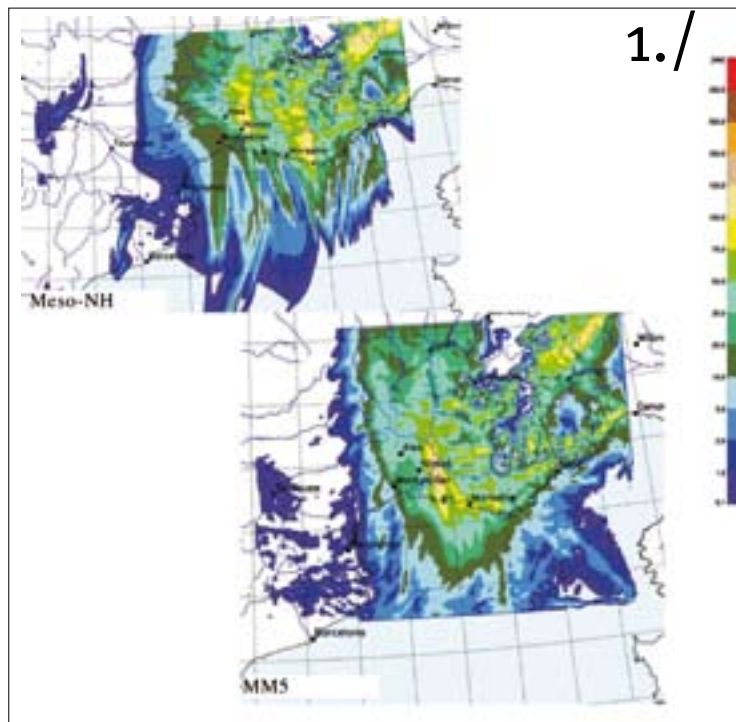
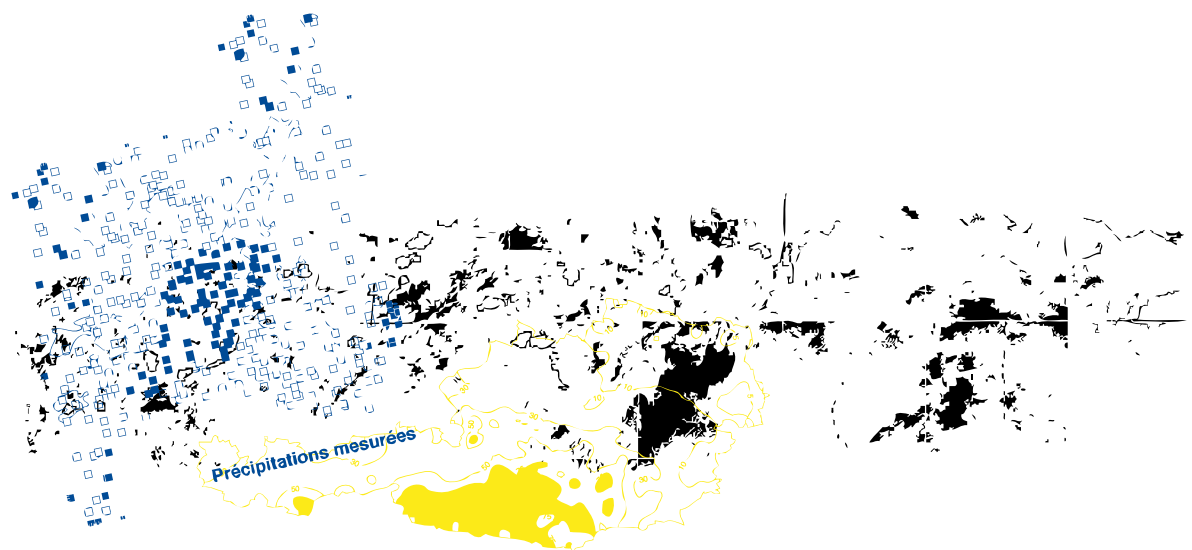
Les sols saturés en eau par les précipitations d'avril et mai puis cet épisode pluvieux intense ont conduit à des débits de plus de 10 000 m³/s à Beaucaire le 31/5, plusieurs dizaines de km² étant inondés à l'amont de Lyon. L'arrivée des crues au printemps a accru leur impact sur l'agriculture. La poursuite des numérisations dans le cadre du programme de sauvetage des données anciennes permettra de compléter cette analyse et de décrire d'autres crues du XIX^e siècle. Ces travaux illustrent les possibilités d'améliorer le retour d'expérience bien des années après la survenue de l'événement. (Figure 2)

Durées de retour de précipitations intenses : amélioration de la méthode du renouvellement grâce à l'utilisation d'une loi de Pareto généralisée

La durée de retour d'un phénomène est l'intervalle de temps moyen séparant deux apparitions de ce phénomène. Ce concept se différencie d'une fréquence car il concerne des extrêmes, se produisant rarement, et nécessite la mise en oeuvre d'un modèle statistique pour ajuster les observations et aboutir aux extrapolations recherchées. Chaque année, une base de données de durées de retour de pluies est mise à jour à l'aide de deux méthodes : la loi Généralisée des Valeurs Extrêmes et la méthode du renouvellement.

Des améliorations de ces méthodes sont testées régulièrement. Ainsi, une modification de la méthode du renouvellement a été étudiée. Cette méthode utilise un échantillon de base constitué des valeurs de pluies supérieures à un seuil, et la combinaison de deux lois pour ajuster les observations. L'une d'elles, la loi exponentielle, produit un ajustement linéaire des événements rares. Il est envisagé de la remplacer par une loi de Pareto généralisée, qui dispose d'un paramètre supplémentaire, dit de forme (qui vaut zéro pour une loi exponentielle) et dont le signe détermine la concavité de la courbe d'ajustement. Les queues de distribution s'en trouvent mieux approchées. De plus, il est à noter que ce paramètre évolue en fonction de la durée de cumul de pluie traitée. L'adaptation du paramètre de forme à chaque échantillon et à chaque durée de cumul permet une réelle amélioration du traitement de chaque cas.

Lors de la prochaine mise à jour de la base de données de durées de retour de la Direction de la Climatologie, cette nouvelle version de la méthode du renouvellement sera donc utilisée. (Figure 3)



1./ Pluie intense des 1-3 décembre 2003 sur le sud de la France : Précipitations cumulées (mm) le 2 décembre 2003 de 00 UTC à 18 UTC par les modèles Meso-NH et MM5. Les conditions initiales sont fournies par différentes analyses de grande échelle du 2 décembre 2003 à 00 UTC. Le graphe (en bas) présente le coefficient de Nash obtenu pour des simulations hydrologiques réalisées avec TOPMODEL sur 3 bassins versants Cévenols et forcés par les précipitations observées, et les précipitations simulées par Meso-NH et MM5 sur l'évènement.

2./ Cumul sur deux mois des précipitations à Fort Lamotte (Lyon) lors de la période 1842-1879. Cumul (en mm) en abscisse, fréquence (en %) en ordonnée.

3./ Évolution des valeurs du paramètre de forme k en fonction de la durée de cumul traitée.



Validation de l'analyse météorologique SAFRAN à l'échelle de la France

L'analyse SAFRAN est utilisée pour estimer les variables météorologiques près de la surface : température, vent, humidité, précipitations et rayonnements solaire et infrarouge. SAFRAN utilise pour cela des observations de surface des réseaux humains, automatiques et climatologiques, ainsi que des sorties de modèle météorologiques. L'analyse est faite par zone (dans le cas de l'application SAFRAN/France, il s'agit des zones symposiums, soit 600 zones environs sur la France).

Afin d'évaluer la qualité des analyses, les champs météorologiques produits par SAFRAN ont été validés en utilisant toutes les observations disponibles dans la base de données climatologique de Météo France, pour les années hydrologiques 2001/02 et 2004/05. SAFRAN reproduit de manière satisfaisante les champs de température et d'humidité, par contre la vitesse du vent est légèrement sous-estimée. L'analyse des précipitations est robuste. Du point de vue spatial, l'erreur d'analyse est plus importante sur la région méditerranéenne à cause de la plus grande hétérogénéité des précipitations dans cette région, liée à leur caractère convectif. Les analyses de rayonnement sont de moindre qualité car SAFRAN utilise un modèle de transfert radiatif, et non les observations, comme pour les autres paramètres.

SAFRAN apparaît comme une analyse robuste, capable d'estimer les variables près de la surface à partir de données conventionnelles et de sorties de modèles météorologiques. Les résultats de cette étude seront utilisés dans le cadre des validations plus globales des résultats de la chaîne hydrométéorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU. (Figure 4)

Prévision d'ensemble des débits avec la chaîne Safran-Isba-Modcou

La demande croissante des pouvoirs publics et des populations en terme d'anticipation des événements hydrologiques extrêmes (crues, sécheresse) et de leurs conséquences, a conduit à l'émergence dans la communauté hydrologique internationale de nouveaux thèmes de travail, comme la production de prévisions d'ensemble en hydrologie.

Le CNRM a mis en place une chaîne temps réel de prévisions d'ensemble des débits sur l'ensemble de la France, basée sur la chaîne Safran-Isba-Modcou, communément appelée SIM (Figure 5a). Cette chaîne est alimentée par les prévisions d'ensemble atmosphériques du CEPMMT, soit 51 scénarios à 10 jours d'échéance. Un traitement a été mis en place pour désagréger ces données à la résolution d'Isba en tenant compte des effets de relief (Figure 5b). La chaîne de prévisions d'ensemble est initialisée par les sorties de la chaîne SIM opérationnelle, elle produit chaque jour 51 scénarios de débits à 10 jours d'échéance, pour 900 stations françaises.

Afin de qualifier les capacités de la chaîne de prévisions d'ensemble, une étude statistique a été réalisée sur une période d'une année en comparant les prévisions d'ensemble à la simulation de référence SIM, et met en lumière de bons résultats, avec en particulier des taux de détection et de fausses alarmes très corrects, même à longue échéance. La période utilisée ayant été particulièrement sèche, cette analyse statistique a été complétée par une étude de cas particuliers de grandes crues récentes, en particulier la crue du Rhône de décembre 2003 (Figure 5c). En parallèle à cette chaîne de prévision d'ensemble des débits, un travail a commencé afin d'évaluer les performances d'une chaîne similaire basée sur les prévisions d'ensemble Arpège (PEARP) à courte échéance.

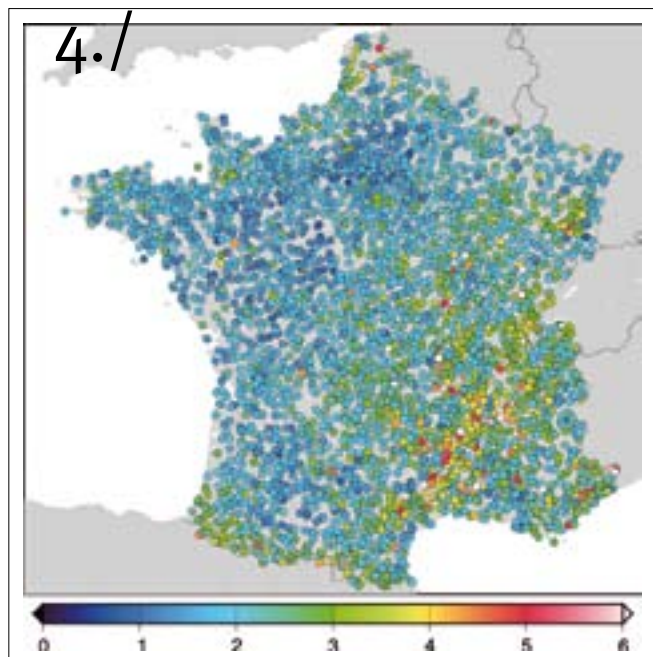
Améliorations du système SIM-France

Le système hydrométéorologique SIM (Safran-Isba-Modcou) qui permet un suivi opérationnel temps réel de la ressource en eau sur la France a bénéficié en 2006 de plusieurs améliorations.

La première amélioration apportée au système concerne l'augmentation du nombre de postes pluviométriques utilisés par le module Safran pour la reconstitution de la lame d'eau précipitante (liquide et solide) avec dorénavant une moyenne de 1200 à 1300 postes utilisés quotidiennement sur le pays. La paramétrisation du drainage sous-maille, dans le schéma de surface Isba (Interactions – Surface – Biosphère – Atmosphère), a également été modifiée afin d'autoriser une infiltration de l'eau dans le sol pour des contenus en eau du sol inférieurs au contenu en eau au point de flétrissement. Cette deuxième amélioration obtenue par calibration sur les débits d'étiage observés permet, d'une part, d'assurer un meilleur soutien des débits d'étiage et, d'autre part, d'assurer une meilleure initialisation quotidienne du système de prévisions d'ensemble de débits déterminées à partir du modèle SIM.

La climatologie du modèle SIM qui couvrait jusqu'ici la période 1995-2006 a été étendue, cette année, à la période 1981-2006, en utilisant aussi cette nouvelle paramétrisation du drainage sous-maille. Cette extension sera poursuivie en 2007 afin de couvrir la période 1970-2006.

L'augmentation de la période couverte par la climatologie du modèle permet de disposer dorénavant d'une période de référence plus importante, en particulier, pour la qualification d'une saison hydrologique donnée. (Figure 6)



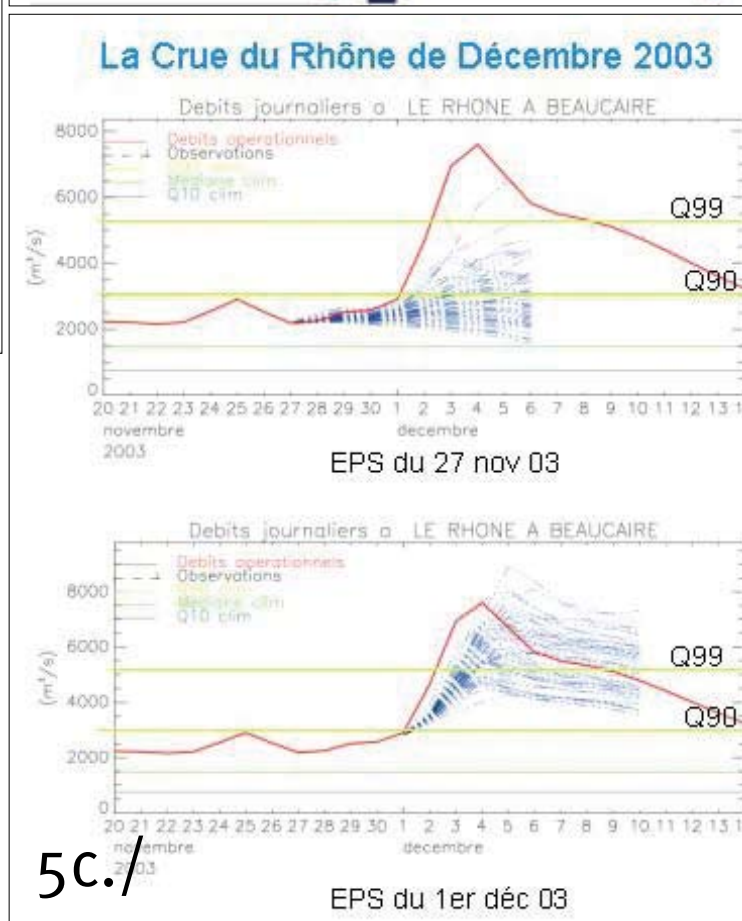
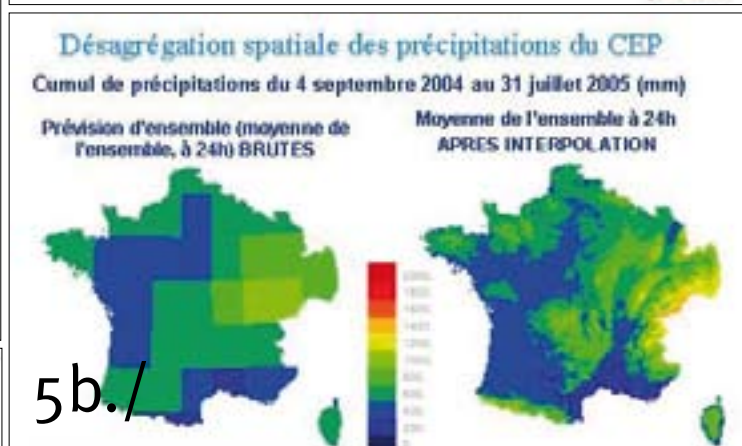
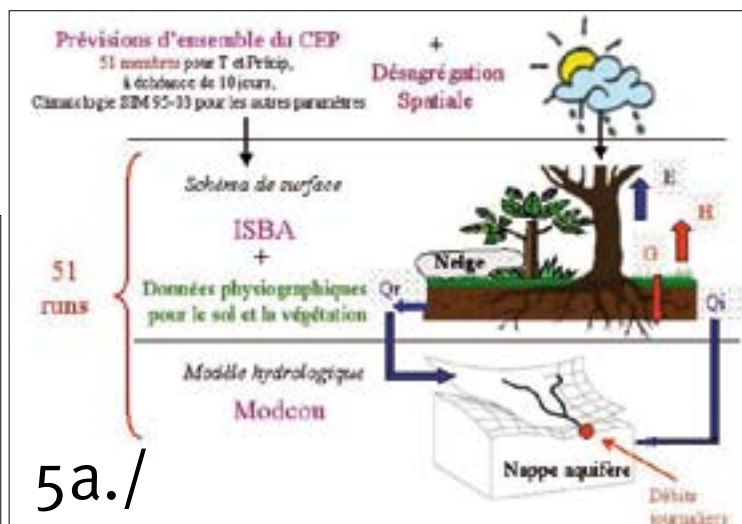
4./ Erreur quadratique moyenne annuelle de l'analyse de précipitation (mm/l) sur les postes d'observation utilisés pour la validation de l'analyse SAFRAN pour l'année hydrologique 2004/05.

5a./ Principe de fonctionnement de la chaîne de prévision d'ensemble des débits.

b./ Résultat de la désagrégation spatiale des prévisions d'ensemble de précipitation du Centre Européen, Cumul de 04/09/04 au 31/07/05 (mm), analyse SAFRAN à gauche, Moyenne de l'ensemble à 24h à droite.

c./ Prévisions d'ensemble de la crue du Rhône de Décembre 2003, Débits du Rhône à Beaucaire (m³/s), prévision du 27 nov (en haut) et du 1^{er} déc (en bas).

6./ Indice d'humidité des sols moyen du mois de juillet sur la période 1982-2005.



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. E-Surfmar, dont Météo-France assure la responsabilité, comprend les navires sélectionnés par les services météorologiques européens ainsi que les bouées dérivantes et ancrées. Le programme est doté de deux groupes de conseils techniques, l'un pour les navires, l'autre pour les bouées. En 2006, son budget s'élevait à près de 750 k€.

Alors que les observations réalisées par les navires conventionnels sont en diminution constante, celles effectuées par des stations automatiques embarquées à bord de navires européens ont doublé en l'espace de 4 ans. Le nombre d'observations par jour est ainsi passé de 300 à 600 en moyenne dans l'Atlantique Nord et la Méditerranée.

Fin 2006, plus de 80 bouées dérivantes financées par le programme transmettaient plus de 1600 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. D'importants développements ont été réalisés dans ces directions en 2006.

Le succès du programme a conduit le Conseil Eumetnet à renouveler sa confiance envers Météo-France pour assurer la responsabilité de ce programme durant les cinq années à venir. (Figure 6)

Mesures de rayonnement sur la bouée-phare d'Ouessant

La bouée-phare maintenue par les Phares et Balises au large d'Ouessant est instrumentée en capteurs météorologiques depuis quelques années.

Les données des capteurs de rayonnement (pyranomètre et pyr géomètre) sont transmises régulièrement au Centre de Météorologie Spatiale de Lannion où ils permettent de valider dans le cadre du SAF (Satellite Application Facility) Océan les données en provenance des satellites.

Des mesures ont été également transmises aux équipes de recherche en charge de la modélisation numérique à Toulouse, afin de constituer un jeu de données de référence pour valider les flux en sortie des modèles de prévision. (Figure 7)

Mesures météorologiques à bord du TARA

A l'occasion de l'Année Internationale Polaire (2007), le voilier TARA (ex-ANTARCTICA) a entrepris une dérive de deux ans dans les glaces de l'Océan Arctique à partir du mois de septembre 2006. Le navire est ainsi une plateforme d'observations et d'expérimentation.

Une station MINOS destinée à être installée à bord de différents navires pour développer l'observation en mer a été modifiée pour pouvoir fonctionner dans des conditions extrêmes.

Cette station automatique est composée

d'un baromètre, d'une sonde de température de l'air sous abri, d'un récepteur GPS et d'un émetteur Argos. Toutes les heures, la station fournit sa position, la pression atmosphérique et sa tendance au cours des 3 dernières heures et la température de l'air.

Plus de 700 messages par mois sont ainsi reçus depuis l'Arctique avec des températures ayant dépassées les -30°C au début du mois de décembre 2006. (Figure 8)

Iridium, nouveau moyen de transmission pour les bouées dérivantes

Depuis des années, Météo-France utilise le système Argos pour la transmission des données et la localisation des bouées dérivantes. Ce système souffre d'un défaut majeur qui est le délai élevé de transmission. Pour pallier ce problème le CMM étudie la possibilité d'utiliser d'autres systèmes satellitaires pour la récupération des données. Iridium, qui n'est pas un système entièrement dédié à l'environnement mais qui possède une grosse constellation de 66 satellites défilants, pourrait être une solution. Deux prototypes de bouées utilisant le service SBD (Short Burst Data) d'Iridium ont été construits et mis à l'eau en haute mer après des essais en rade de Brest. Ce service SBD permet de récupérer rapidement des données brutes par messagerie électronique. Ces données sont ensuite traitées puis codées en message FM18-BUOY pour être transmises sur le SMT.

Les premiers résultats sont encourageants : les messages sont reçus immédiatement après leur émission, et quasiment aucune perte de données n'est à déplorer. (Figure 9)

Amélioration de la transmission des données de navires

Des travaux, menés au Centre de Météorologie Marine (CMM), ont permis de diviser par 7 les coûts unitaires de transmission des stations automatiques Batos via Inmarsat-C. Le Kuzh Heol, chalutier de Loctudy, a été le premier navire équipé du nouveau logiciel. L'expérience ayant été concluante, il a été décidé de configurer les stations Batos afin qu'elles effectuent des mesures toutes les heures et non seulement aux heures synoptiques, et d'étendre cette amélioration à tous les navires équipés. Fin 2006, plus de la moitié des stations exploitées par Météo-France disposaient du nouveau logiciel.

L'augmentation du nombre d'observations automatiques de navires sert directement le principal objectif du programme E-Surfmar à savoir, mieux échantillonner la pression atmosphérique en surface dans l'Atlantique Nord et la Méditerranée.

Les navires non équipés de stations automatiques devraient voir aussi leurs coûts de transmission abaissés. La version 4.0 du logiciel TurboWin développé par le KNMI, service météorologique des Pays-Bas, intègre un module de compression développé par le CMM permettant de diviser les coûts de transmission par 2,5. Comme pour les stations Batos, les données brutes sont reçues et traitées à Météo-France avant d'être transmises sur le Système Mondial de Transmission (SMT) de l'OMM. Si l'expérience s'avère concluante, elle pourra être étendue à l'ensemble des navires sélectionnés européens. (Figure 10)

6./ Carte de pointage des observations marine de surface dans la zone Eucos en septembre 2006.

7./ Installation des capteurs sur la Bouée-Phare.

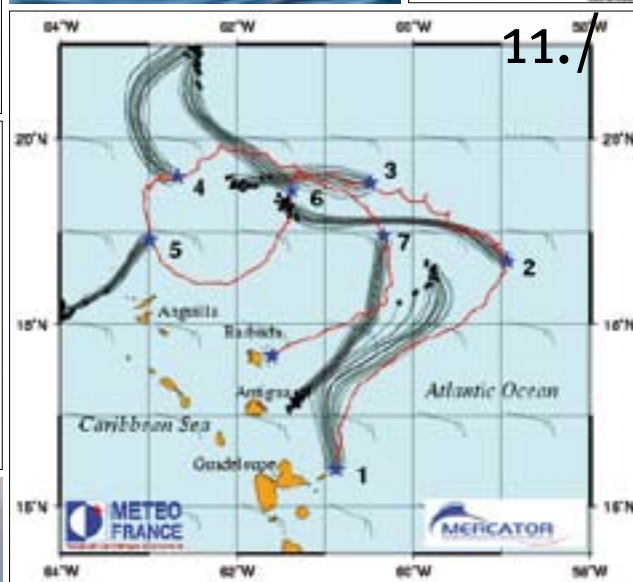
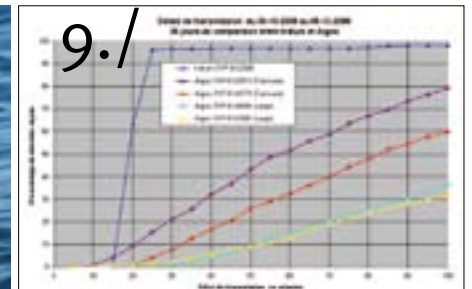
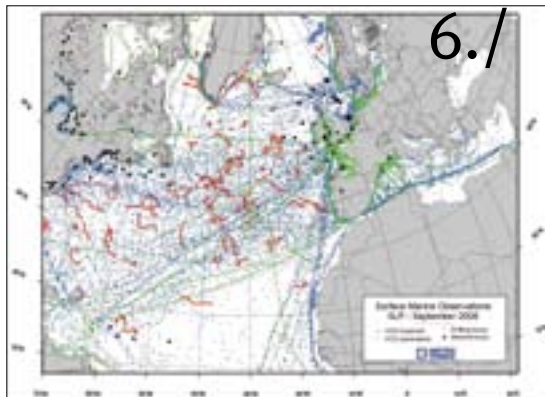
8a./ Photo du TARA (Copyright F.Latreille/Tara Arctic).

b./ Courbe de température de l'air.

9./ Photo Bouée dérivante en mer. Graphe des délais.

10./ Chalutier Kuzh Heol.

11./ Dérive (3 juillet - 11 septembre 2005) d'une bouée, observée (rouge) et simulée de 10 jours en 10 jours, par Mothy, avec prise en compte du courant de surface analysé par Mercator-Océan PSY2V1 (gris).



Utilisation de l'océanographie opérationnelle dans la prévision de dérive

Dans le cadre de ses responsabilités nationales et internationales, Météo-France met en oeuvre le modèle Mothy de prévision de dérive. Il associe un modèle d'océan à surface libre (calcul du courant en réponse au vent et du courant de marée) 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 (Marine Environment and Security for the European Area) a consisté justement à en évaluer l'apport.

La dérive d'une bouée houlographique, récupérée le 11 septembre 2005 après avoir perdu son ancre le 3 juillet, a été utilisée. Sa dérive au Nord-Est de la Guadeloupe a été suivie grâce à son émission régulière. Du fait de son câble de 100m traîné sous l'eau, la bouée offrait peu de prise au vent et sa dérive était surtout pilotée par les courants. La figure ci-après montre le résultat (pour un ensemble de 17 trajectoires en gris de 7 simulations Mothy (une par décade) utilisant le courant de surface analysé par Mercator-Ocean Psy2V1, superposé à la trajectoire observée de la bouée (en rouge). Si les 3 premières décades sont assez bien modélisées,

les 3 suivantes le sont beaucoup moins bien. Durant ces 30 jours, la bouée a été prise dans un tourbillon océanique de 100 km de diamètre que les analyses Mercator plaçaient plus au Sud. Comparé à d'autres systèmes européens, Mercator a toutefois donné les meilleurs résultats sur cette dérive.

La prise en compte opérationnelle de ces courants dans les modèles de dérive, en misant aussi sur les progrès de leur modélisation au sein des modèles océanographiques, est maintenant la prochaine étape à franchir. (Figure 11)

AROME-C : un nouveau modèle déterministe de la qualité de l'air

La prédiction de la qualité de l'air est un sujet d'intérêt majeur pour Météo France et plus largement pour les décideurs. Actuellement, le principal modèle développé par le CNRM (MOCAGE) utilise une approche disjointe (découplée) entre le modèle de prévision atmosphérique et les modules de réactions entre espèces chimiques (modèle dit CTM). Or, à haute résolution, la connexion entre phénomènes dynamiques tels que les brises, la convection résolue, la turbulence, et les espèces polluantes, devient importante. Le découplage entre le transport et la chimie peut s'avérer pénalisant, en particulier pour les espèces polluantes directement émises (aérosols, gaz primaires).

Dans ce sens, les modules chimiques du modèle MésoNH, ont été introduits dans le modèle AROME (AROME-C). Cette introduction permet de conserver le même transport et les mêmes paramétrisations pour les espèces chimiques que pour les autres variables dynamiques du modèle AROME. En outre, le couplage « en-ligne » entre météorologie et chimie permet d'introduire à chaque pas de temps les caractéristiques de nébulosité, de température et d'humidité prédites dans le cœur chimique du modèle (réactions).

AROME rejoint donc la nouvelle génération de modèles méso-échelle tels que WRF (NCAR) qui sont déjà munis d'un couplage en-ligne avec un module de réactions chimiques. AROME-C est aujourd'hui couplé avec le modèle MOCAGE et offre un coût numérique raisonnable (50 fois plus rapide que MésoNH-Chimie). Par sa résolution de 2.5 km, AROME-C sera à l'avenir un outil intéressant pour l'analyse de la pollution à l'échelle de l'agglomération des principales villes. Il devrait servir de support pour répondre à des questions scientifiques d'aménagement du territoire ou d'impact sanitaire de la pollution atmosphérique à fine résolution. (Figure 12)

La prévision de la qualité de l'air avec MOCAGE : impact de la prévision météorologique

MOCAGE fournit depuis 2001 des prévisions quotidiennes de qualité de l'air à 3 jours d'échéance. Il est mis en œuvre en opérationnel depuis 2005 et les prévisions rentrent dans le dispositif national Prévoir l'air (<http://www.prevoir.org>). Le recul possible après près de 5 années permet de caractériser les éléments qui déterminent la qualité des prévisions sur la France.

Les variables météorologiques fournies au modèle chimique sont l'un des éléments d'in-

certitude des prévisions de qualité de l'air. Il apparaît par exemple que ces dernières se dégradent avec l'échéance, indiquant bien le poids des conditions météorologiques fournies en entrée. Les relations quantitatives entre prévisions de qualité de l'air et prévisions météorologiques ont été examinées. L'objectif était de mieux comprendre l'impact de la météorologie sur la prévision d'ozone en surface avec MOCAGE et de dégager les paramètres météorologiques à privilégier pour améliorer les prévisions chimiques.

Les prévisions d'ozone de MOCAGE sont globalement très réalistes et reproduisent bien les extrêmes. Les erreurs interviennent surtout quand le champ d'ozone est hétérogène, situation favorisée par de fortes valeurs de la température de surface ou par un champ de pression hétérogène. Les biais dépendent en grande partie du biais sur la température et sur la reproduction des fortes nébulosités ; l'erreur quadratique moyenne est reliée essentiellement à l'écart-type de pression. Il apparaît ainsi que la prévision météorologique synoptique est déterminante et qu'il est très intéressant de bénéficier d'une assimilation météorologique fréquente et de très bonnes prévisions de température et de nébulosité. MOCAGE utilisera dès 2007 les prévisions AROME, en parallèle à la version opérationnelle. (Figure 13)

MOCAGE-accident : vers l'opérationnel

La prévision de la dispersion dans l'atmosphère de rejets de sources ponctuelles est une activité importante de Météo-France, qui s'inscrit dans le cadre de sa mission institutionnelle de protection des personnes et des biens, et de ses responsabilités internationales auprès de l'OMM, de l'AIEA et de l'OACI. Depuis plusieurs années, les prévisionnistes mettent en œuvre en situation de crise le modèle eulérien MEDIA pour le suivi à grande échelle des accidents technologiques et des rejets volcaniques.

Une version du modèle MOCAGE adaptée aux situations de crise est aujourd'hui disponible. Cette configuration, appelée MOCAGE-accident, présente plusieurs avancées par rapport à MEDIA. Notamment, elle peut prendre en compte le forçage météorologique ALADIN. Elle prend en compte par ailleurs le transport par la convection et le lessivage de façon détaillée. Enfin, elle peut être employée en mode « inverse » et remonter à rebours dans le temps pour déterminer d'où provient une masse d'air.

MOCAGE-accident a fait l'objet de nombreux travaux de validation. Il a été employé notamment pour simuler le panache issu de l'incendie du dépôt de carburant de Buncfield, survenu dans la région de Londres le

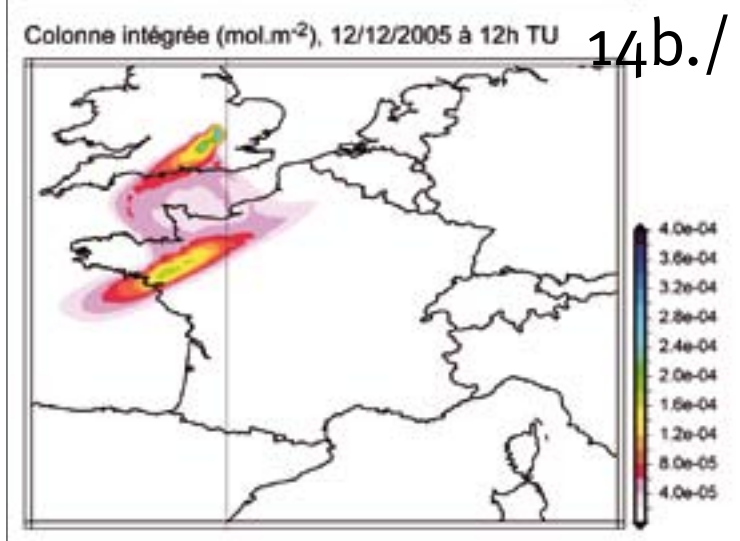
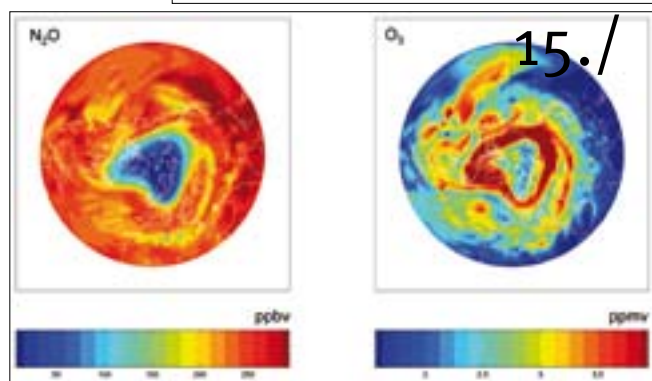
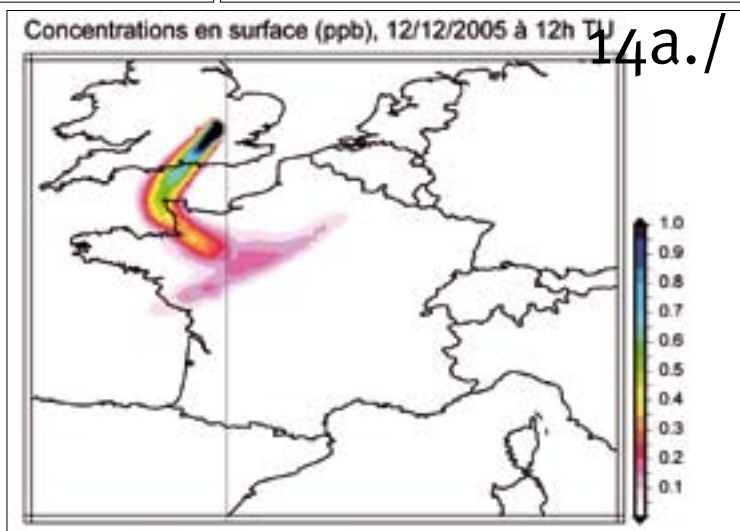
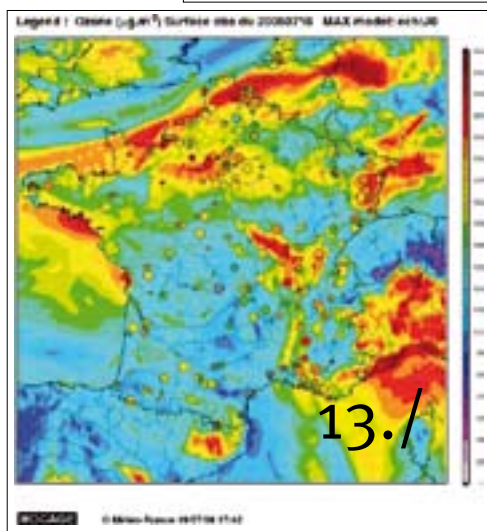
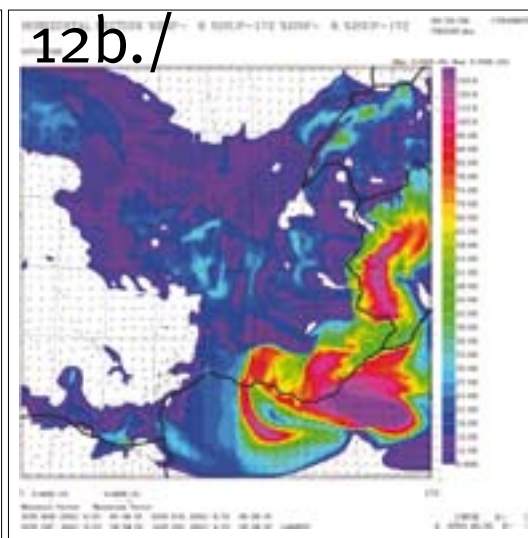
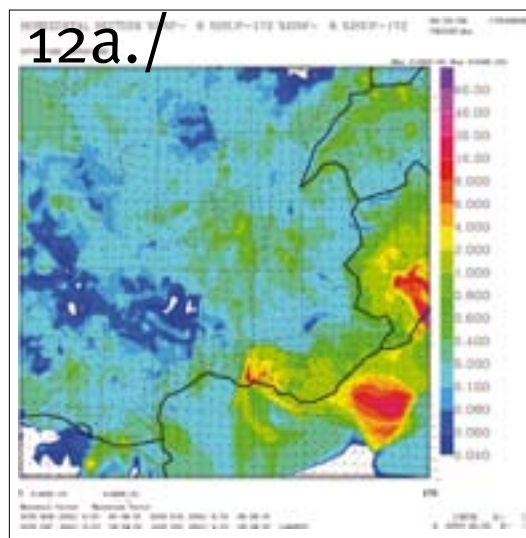
11/12/2006. La figure présente la concentration à la surface d'un traceur correspondant à l'émission des feux, ainsi que la colonne intégrée sur la verticale de ce même traceur. On constate que le nuage a été essentiellement transporté en altitude, survolant le Nord de la France et la Normandie avant de se dissiper sur l'Atlantique. Les très faibles précipitations intervenues le 12/12 sur le Nord-Ouest ont pu entraîner au sol une partie des suies. La mise à disposition de MOCAGE-accident dès 2007 constituera un renfort appréciable pour l'aide à la décision en situation de crise. (Figure 14)

Utilisation de l'assimilation de données chimiques pour la compréhension de la chimie stratosphérique

L'assimilation de mesures chimiques satellitaires vise à caractériser les distributions tridimensionnelles des espèces chimiques. L'objectif est d'en tirer une information sur les phénomènes couplés de chimie et de dynamique dans l'atmosphère, notamment dans la perspective d'améliorer la prévision météorologique. Météo-France dispose de deux outils complémentaires : l'un est une extension du système opérationnel d'assimilation météorologique ARPEGE ; l'autre est basé sur le modèle chimique MOCAGE et le logiciel PALM du CERFACS.

L'utilisation de l'assimilation pour étudier la composition chimique de la stratosphère peut s'avérer fort pertinente. Le cas de l'hiver boréal 2004/2005 en est un exemple éloquent. Celui-ci a été marqué par des températures stratosphériques polaires exceptionnellement froides. De telles conditions pouvaient laisser attendre un épisode marqué de destruction d'ozone, qui ne s'est finalement pas révélé dans les observations. Cette situation n'était qu'imparfaitement comprise à l'aide des simulations du modèle chimique MOCAGE et que partiellement documentée dans les mesures ; l'assimilation était un outil idéal pour combiner les informations du modèle et des observations, afin de reconstituer le déroulement de l'hiver.

Le système MOCAGE-PALM a été mis en œuvre pour assimiler les mesures d'ozone (O_3) et du protoxyde d'azote (N_2O) du sondeur américain AURA/MLS par une technique variationnelle 3d-fgat. Les analyses de N_2O ont permis d'étudier en détail la dynamique du vortex polaire. L'étude conjointe des analyses de O_3 et de N_2O a finalement permis d'identifier les phénomènes dynamiques (subsidence diabatique et transport méridien) particuliers qui expliquent quantitativement la relativement faible destruction chimique d'ozone. (Figure 15)



12a./ Oxydes d'Azotes (NOx, ppb en couleur) et flèches de vent en surface simulés par AROME le 24 Juin 2001 à 14 UTC en surface.
b./ Ozone (O₃, ppb en couleur) et flèches de vent en surface simulés par AROME le 24 Juin 2001 à 14 UTC en surface.
13./ Maxima d'ozone prévus par MOCAGE à 24h (fond de carte) et observés par les Associations Agréées de Surveillance de la

Qualité de l'air (disques) pour la journée polluée du 18 juillet 2006.
14./ Concentration (14a) et colonne intégrée verticalement (14b) d'un traceur correspondant aux émissions des feux du dépôt de carburant de Buncefield, simulé par MOCAGE-accident pour le 12 décembre 2006 à 12h TU.

15./ Analyses de N₂O (en ppbv, à gauche) et O₃ (en ppmv, à droite) pour le 14 février 2005 sur le niveau isentropique 500 K (~20 km). A l'intérieur du vortex polaire, marqué ici par les valeurs de N₂O inférieures à 120 ppbv, on observe la destruction d'ozone.

Vers une utilisation opérationnelle des mesures de composition chimique collectées à bord d'avions de lignes commerciales

Le projet IAGOS (Integration of routine Aircraft measurements into a Global Observing System) a pour objectif la pérennisation de la collecte d'observations de rapport de mélange d'ozone, vapeur d'eau, CO et d'oxydes d'azote réalisée depuis 1994 à bord d'avions de ligne Airbus au sein des projets de recherche MOZAIC. Leur transformation en une infrastructure pour la surveillance du climat et de l'environnement contribue à la composante IGACO (Integrated Global Atmospheric Chemistry Observations) des systèmes d'observation mondiaux de l'OMM et répond aux besoins en observations des futurs centres opérationnels de prévision de la qualité de l'air à l'échelle régionale préparés par l'initiative GMES (Global Monitoring for Environment and Security) de l'Union Européenne et de l'Agence Spatiale Européenne. Les études de conception en cours visent à faciliter la participation des compagnies aériennes, de manière à disposer dans une décennie d'une vingtaine d'avions équipés.

Le CNRM et la DSO préparent la fourniture en temps réel des observations chimiques aux services météorologiques par l'intermédiaire d'AMDAR et du Réseau Mondial de Télécommunications. Les observations recueillies au décollage ou à l'atterrissage au-dessus des aéroports européens donnent le détail de la structure verticale de la composition chimique de fond influencée par le transport à longue distance, les intrusions stratosphériques et l'évolution de la couche limite. Ces données serviront à valider les prévisions des modèles chimiques, puis seront utilisées en assimilation lorsque la densité des observations augmentera. IAGOS a été récemment labellisé par l'ESFRI (European Strategy Forum for Research Infrastructures) pour les propositions faites dans le cadre du 7^{ème} PCRD. (Figure 16)

Une approche intégrée de la ville

Mieux comprendre et modéliser le fonctionnement intégré de la ville, tel est l'objectif ambitieux poursuivi par divers organismes dans le cadre de la réflexion Agora 2020, en collaboration avec le CNRS/INSU. Une première étape du projet vise à développer une modélisation intégrée de la ville prenant en compte ses spécificités propres en interaction forte avec les conditions environnementales. La réflexion a conduit à jeter les premières bases d'une plate-forme de modélisation (voir figure) capable de simuler les processus physiques urbains (stockage de chaleur par les bâtiments, consommation énergétique...) et

les propriétés de l'atmosphère à l'intérieur et au voisinage des villes (simulation des micro-climats urbains...). Cette plate-forme de modélisation doit permettre d'étudier l'impact des aménagements à moyen et long terme, de l'évolution du bâti et des transports, de l'évolution du climat urbain dans le cadre du réchauffement climatique, et d'événements naturels ou accidentels. La modularité de la plate forme doit permettre de considérer une large gamme de scénarios météorologiques (scénarios de crise ou de changement climatique), ainsi que des caractéristiques variées de la zone urbaine étudiée (cadastres d'occupation du sol, cadastres d'émission de polluants rejetés dans l'atmosphère...). Les différents modules qui seront activables doivent permettre de simuler une grande diversité de mécanismes tels que les échanges de chaleur, l'hydrologie, la réponse au champ de vent, la propagation du bruit ou encore les émissions de polluants. A terme, cette plate forme de modélisation devrait pouvoir servir de démonstrateur pour des applications opérationnelles ou comme outil d'aménagement. (Figure 17)

La campagne de mesures PARISFOG dédiée aux brouillards

Les brouillards sont des phénomènes météorologiques très difficiles à prévoir avec précision. Cependant, de nombreux domaines, les transports aériens ou routiers par exemple, sont fortement perturbés par les réductions de visibilité. Des travaux de recherches sont donc menés au CNRM afin d'approfondir nos connaissances et ainsi à terme d'améliorer la qualité de la prévision du brouillard.

Le brouillard est le résultat d'un équilibre complexe entre différents processus physiques (processus turbulents, radiatifs et microphysiques). Pour mieux comprendre ceux-ci, une campagne de mesure spécifique a été initiée. L'objectif celle-ci, baptisée PARISFOG, est de mettre en place, de coordonner et de valoriser un ensemble d'observations permettant de documenter de manière simultanée l'ensemble des processus intervenant dans le cycle de vie d'une couche du brouillard, depuis sa formation jusqu'à sa dissipation. Ceci a été possible grâce à la mise en commun des moyens d'observations des partenaires de ce projet (IPSL, CEREa et CNRM) et à l'intégration de ces moyens d'observations sur le site du SIRTa en région parisienne dans le cadre d'une campagne de mesures qui s'est déroulée de novembre 2006 à avril 2007.

Les données recueillies au cours de la campagne de mesures PARISFOG permettront d'aborder des problèmes fondamentaux et de concevoir de nouvelles paramétrisations physiques adaptées aux brouillards et destinées aux futurs modèles météorologiques de la méso-échelle à la micro-échelle. (Figure 18)

Étude des propriétés micro-physiques du brouillard naturel à l'aide d'une plate-forme expérimentale

La formation et la dissipation du brouillard n'impliquent pas nécessairement les mêmes processus physiques. La formation est un processus essentiellement thermodynamique qui fait surtout intervenir la sursaturation de la vapeur d'eau. En revanche, la dissipation peut être sensible au nombre de noyaux de condensation des micro-gouttelettes qui forment le brouillard. Dans une atmosphère polluée, les noyaux sont plus nombreux, si bien que les gouttelettes grossissent moins facilement que dans un environnement propre. La sédimentation des gouttelettes qui contribue à la dissipation du brouillard s'en trouve diminuée. Dans un environnement pollué, le brouillard pourrait ainsi persister plus longtemps.

Le dispositif mis en place à partir de novembre 2006 par le CNRM sur le site du SIRTa (Palaiseau), dans le cadre du projet PARISFOG, vise à documenter la hauteur et le sommet de la couche de brouillard à l'aide d'un sodar, les processus thermodynamiques de l'atmosphère ainsi que les propriétés micro-physiques des aérosols. Pour ces dernières, différents types de granulomètres ont été mis en place afin de mesurer simultanément les concentrations de particules d'aérosols entre 0.01 et 10 µm, les concentrations de gouttelettes de brouillard entre 0.4 et 40 µm et le contenu en eau liquide.

Les paramètres mesurés sont de première importance pour la modélisation du cycle de vie du brouillard basée sur le modèle de couche COBEL pour lequel de fortes incertitudes concernent le rôle des aérosols. L'utilisation du module d'aérosol récemment introduit dans MesoNH-C constituera une aide précieuse pour réduire ces incertitudes. Enfin, on disposera d'une base de données représentative des événements de brouillards, qui pourra alors servir à la mise au point des techniques de prévision des faibles visibilités. (Figure 19)

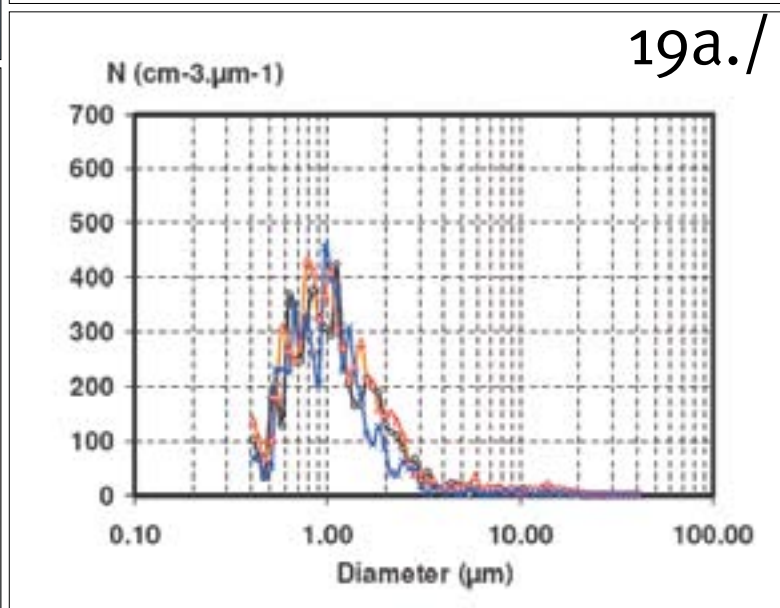
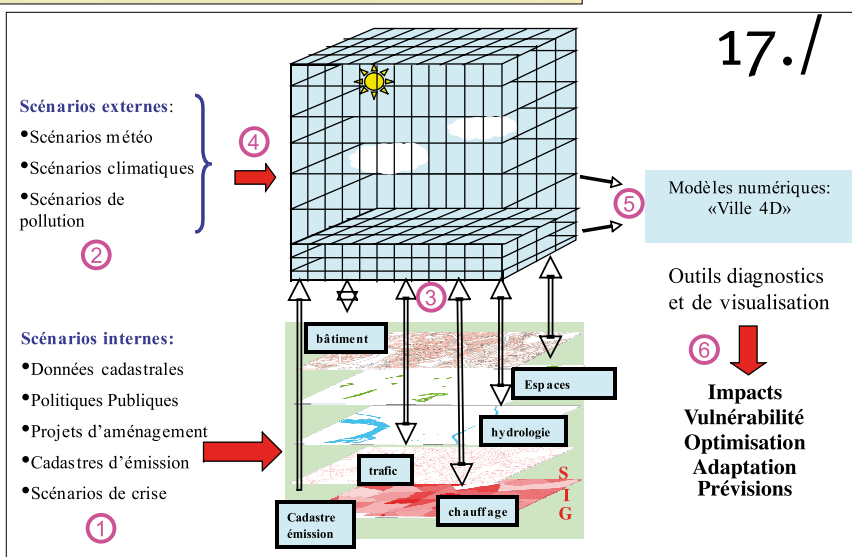
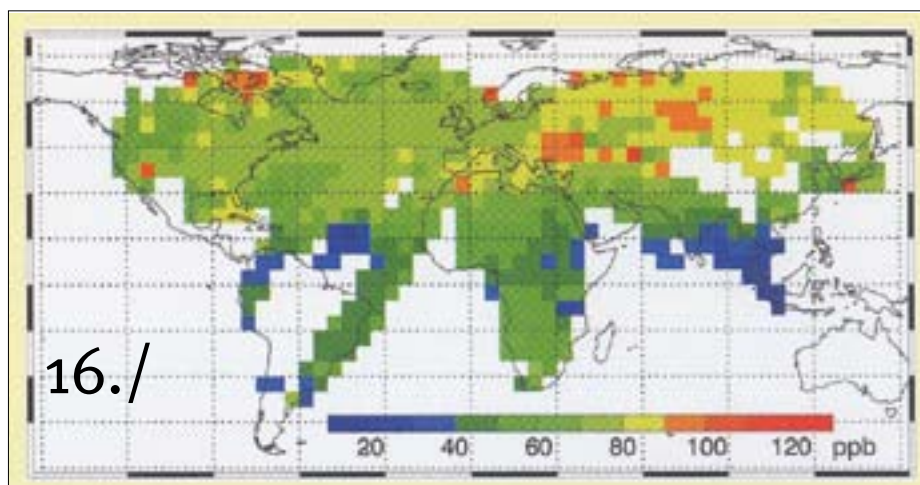
16./ Répartition de l'ozone dans la haute troposphère d'été observée par le programme MOZAIC (rapport de mélange volumique en ppb 10-9).

17./ Schématisation d'une modélisation intégrée de la ville.

18./ Ballon captif lors d'une période d'observation intensive PARISFOG.

19a./ Exemples de spectre dimensionnel de gouttelettes (dN/dLogD) obtenu en brouillard naturel.

b./ Instruments de mesure (compteurs, granulomètres...) mise en place durant la campagne PARIS-FOG.



Simulations numériques 3D d'expériences en chambre froide de déformation mécanique de la neige

Ces dernières années, le Centre d'Etudes de la Neige a développé un modèle numérique tridimensionnel pour pouvoir simuler, à l'échelle macroscopique, l'état des contraintes dans la neige, quand celle est soumise à des déformations lentes sans rupture. Ce modèle utilise le code de calcul Flac3D de la société ITASCA, dans lequel a été implantée une loi de comportement visco-élastique non-linéaire de la neige avec des paramètres qui dépendent de la densité et de la température, mais aussi des vitesses de déformation.

Ce modèle a été appliqué, avec de bons résultats, pour simuler différentes expériences mécaniques réalisées en chambre froide sur la neige : d'abord pour des expériences du L.G.G.E. (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement à Grenoble), au cours desquelles la neige était déposée dans un canal avec convergent et comprimée à différentes vitesses (entre 1 et 10 $\mu\text{m/s}$) ; puis pour reproduire des essais mécaniques triaxiaux présentés par l'IFENA (Institut Fédéral Suisse d'Etudes de la Neige et des Avalanches).

Ce modèle va permettre de développer des analyses en 3D de l'instabilité potentielle de manteaux neigeux déposés sur des topographies ou pentes irrégulières types, en prenant mieux en compte les déformations lentes et les zones de fortes contraintes ainsi générées. Il peut également être considéré comme un outil intéressant pour analyser des résultats d'expériences en les reliant à des paramètres mécaniques de la neige, variables pour différents modes de sollicitation à l'échelle macroscopique. De prochaines études du CEN devraient à cet égard permettre d'intégrer à terme la microstructure de la neige au niveau de ces paramètres mécaniques. (Figure 20)

Etude de l'évolution du couvert nival éphémère déposé sur une zone non englacée de la Haute montagne andine (Massif du Charquini, 4795 m, Bolivie)

Depuis une vingtaine d'années, le fonctionnement des glaciers tropicaux des Cordillères Andines, leur lien glacier-climat, ainsi que leur contribution aux ressources en eau des populations locales, ont été de plus en plus documentés. Cependant, l'évolution à échelle fine du couvert nival des zones non englacées

n'avait jusqu'alors jamais été abordée. Elle a donc fait l'objet d'un projet de recherche en hydrologie mené par l'IRD et par le CNRM. Pour simuler la fonte des manteaux neigeux fugaces des zones morainiques de la haute montagne tropicale (Andes), les modèles ISBA et ISBA/CROCUS, ont été appliqués sur un site de la Cordillère Royale dans le massif du Charquini en Bolivie (4795 m, 16°17' Sud, 68°32' Ouest). Les forçages météorologiques ont été collectés par une station automatique, du 14 mai 2002 au 15 juillet 2003. Au regard des conditions climatiques des montagnes alpines, celles de la haute montagne andine se caractérisent par le type des cristaux des précipitations neigeuses et surtout par la très forte intensité du rayonnement solaire. Cela conduit le sol, lorsqu'il est déneigé, à accumuler des quantités de chaleur peu communes dont une part conséquente est ensuite restituée aux manteaux neigeux qui se forment préférentiellement au cours de la saison humide. Adaptés à ces conditions particulières, les modèles, bien aptes à représenter l'enneigement du site (Figure 21), sont une aide à une meilleure compréhension des processus physiques qui gouvernent la fonte : flux du sol, transfert de chaleur des zones déneigées vers les zones enneigées... A l'avenir, ce travail permettra de mieux évaluer l'hydrologie des hauts bassins versants, à composantes hydrologiques à la fois nivoglacière et nivale, comme celui du bassin du glacier Zongo.

Tendance climatique des principaux paramètres nivométéorologiques des 50 dernières années dans les Alpes Françaises : l'évidence d'un réchauffement récent et de son impact sur l'enneigement

Une climatologie fine de l'enneigement alpin de 1958 à nos jours à partir de données modélisées par la chaîne Safran/Crocus avait été réalisée en 2004 en utilisant les ré-analyses du CEPMMT et les observations disponibles à cette époque. Ce travail s'est poursuivi en 2005 et 2006 avec une phase de validation des températures de l'air et des précipitations simulées par rapport aux mêmes données observées pour 43 postes des Alpes Françaises et sur la même période. Les résultats étant concluants avec un écart quadratique moyen faible, une recherche des tendances par massif alpin en température de l'air, précipitations et hauteur de neige au sol a été réalisée.

Pour les températures de l'air, la tendance est à une hausse de 1 à 2,5 °C vers 1800 m, essentiellement depuis le milieu des années 1980. Pour les Alpes du nord, cette tendance haussière est plus marquée en hiver qu'en été. Par contre dans l'extrême sud des alpes, l'augmentation

est plus marquée en été qu'en hiver.

Pour ce qui est des précipitations, les cumuls annuels en lame d'eau à 1800 m ne montrent pas d'évolution significative.

Quant à la hauteur de neige au sol, celle-ci reflète bien l'évolution de la température de l'air et des précipitations neigeuses. A 1800 m d'altitude, la hauteur moyenne de neige au sol en hiver a plutôt augmenté dans la période 1960-1980 et a subi une baisse significative depuis le milieu de la décennie 1980. Par contre au-dessus de 2000m, la hauteur moyenne de neige au sol n'a pas subi d'évolution notable.

Ce projet va se poursuivre avec la climatologie puis l'analyse des tendances pour les massifs des Pyrénées et de la Corse. Cette climatologie pourra ensuite servir de référence pour des études d'évolution de l'enneigement sous l'effet d'un réchauffement climatique. (Figure 22)

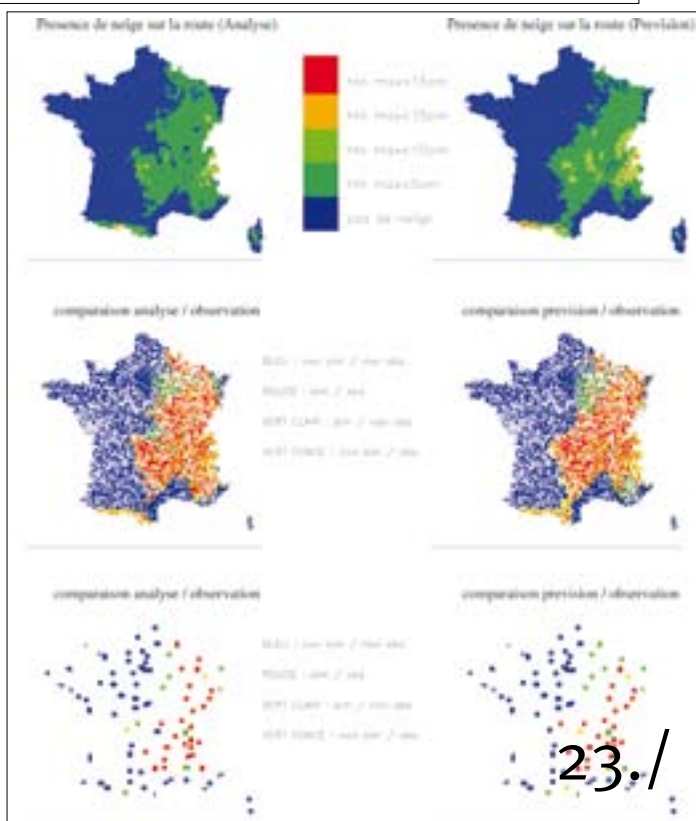
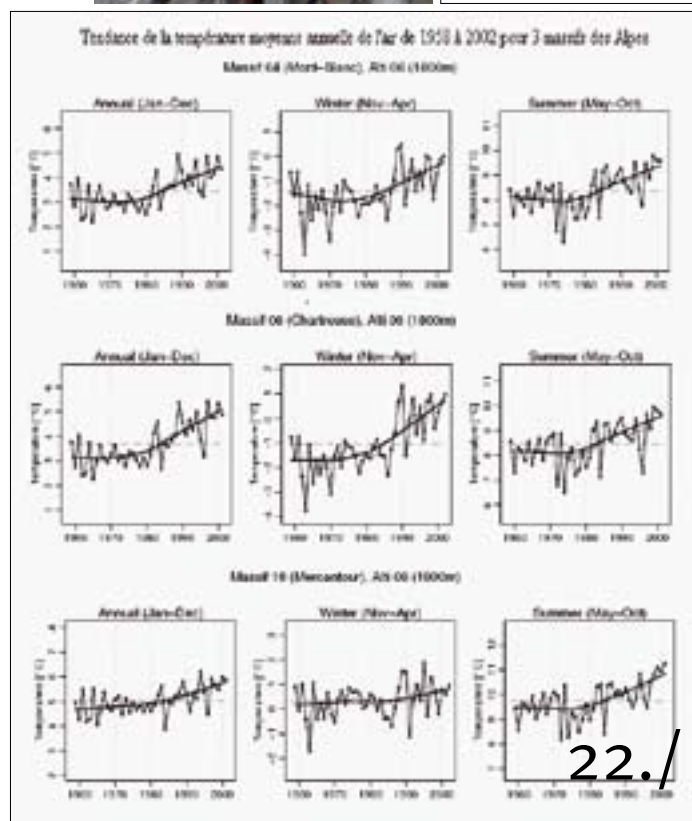
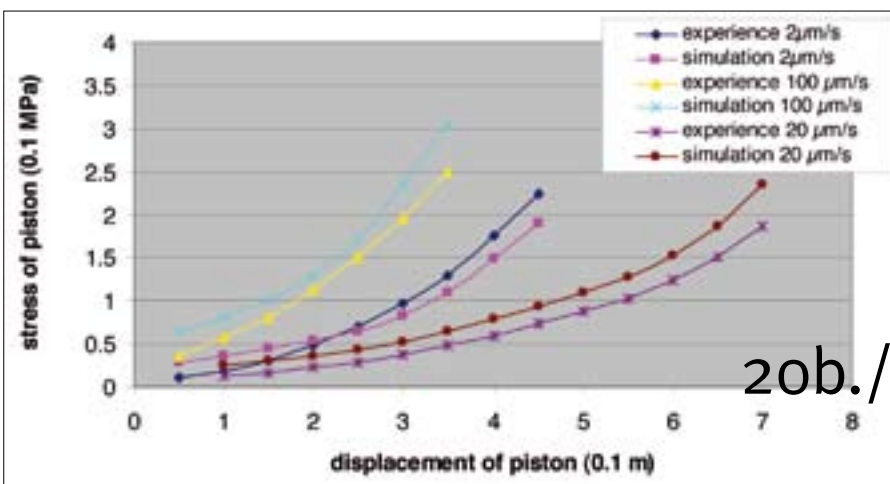
Vers une prévision de l'état des routes en hiver

En période hivernale, la présence de verglas ou de neige sur les chaussées peut avoir de graves conséquences sur le trafic routier. Dans le but de servir d'outil d'aide à la décision pour les services d'exploitation routiers, un modèle permettant de simuler le comportement d'une couche de neige se déposant sur une chaussée a été développé. Ce modèle résulte du couplage des modèles ISBA et CROCUS, respectivement modèles de sol et de neige de Météo-France et préalablement adaptés à la problématique de la route.

Le modèle a été validé à partir d'épisodes de chute de neige sur chaussées observés au cours d'une campagne expérimentale antérieure à ce travail (au cours des hivers 1997/98, 1998/99 et 1999/2000), menée sur le site expérimental de Météo-France au Col de Porte (1320m, Isère). La validation a été effectuée d'abord avec les données météorologiques mesurées, puis dans un contexte de prévision à partir des prévisions du modèle SAFRAN.

Les prévisions sur le site expérimental se sont révélées satisfaisantes, ainsi le modèle a été spatialisé à l'échelle de la France avec une résolution horizontale de 8km. L'hiver 2004/2005, comportant de nombreux épisodes de chutes de neige sur chaussées, a été simulé. La validation a été effectuée à partir de données issues de stations météorologiques de diverses autoroutes et de mesures des stations de Météo-France.

Les premiers résultats à l'échelle de la France sont encourageants et devraient permettre d'améliorer la prévision de la température de surface et des épisodes neigeux sur les routes à l'échelle nationale. (Figure 23)



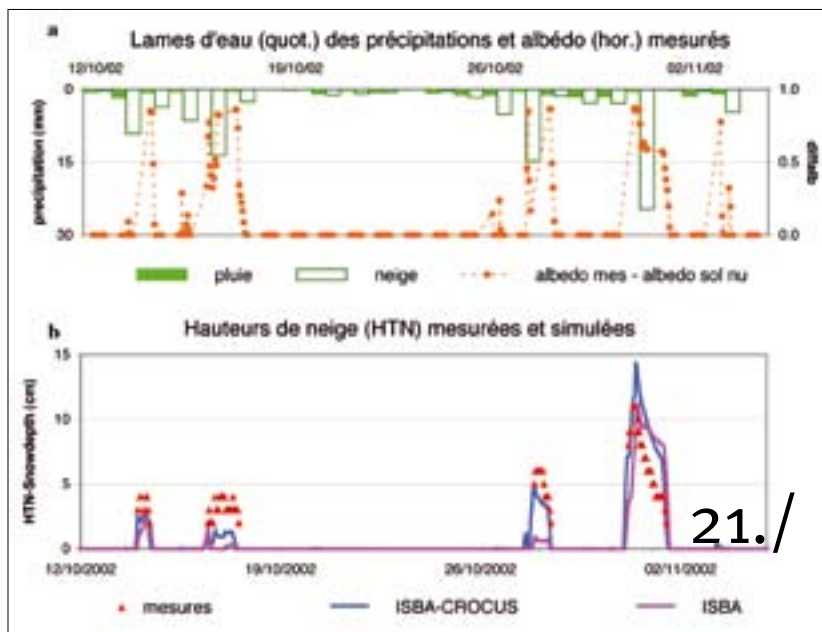
20a./ Photo de l'appareillage utilisée par le LGGE en chambre froide : canal avec convergent et système de compression à vitesses contrôlées.

b./ Comparaison entre expériences et simulations : évolution des contraintes du piston pour des compression à différentes vitesses. Densité initiale : 360 kg/m^3 pour $2 \text{ } \mu\text{m/s}$ et $100 \text{ } \mu\text{m/s}$, mais 240 kg/m^3 pour $20 \text{ } \mu\text{m/s}$.

21./ Simulation de l'enneigement du site du Charquini du 12 octobre au 4 novembre 2002. Sur le panneau a sont tracées les lames d'eau des précipitations quotidiennes (neige et pluie) ainsi que les valeurs du paramètre horaire de validation diffalb (diffalb = albédo mesuré – albédo sol nu). Sur le panneau b sont tracées les hauteurs de neige (HTN) mesurées (triangles rouges) ainsi que celles simulées par ISBA (ligne bleue claire) et le modèle couplé ISBA-CROCUS (ligne bleue foncée).

22./ Tendence de la température moyenne (hivernale ou estivale) de l'air depuis 1958 jusqu'à 2002 pour les massifs alpins du Mont Blanc (Haute Savoie), de la Chartreuse (Isère) et du Mercantour (Alpes Maritimes) à l'altitude de 1800 m.

23./ Résultat des simulations de présence de neige sur les routes (en haut) avec le forçage analysé et de la prévision pour l'épisode du 28 au 29 décembre 2004. Comparaison de ces résultats avec les occurrences de précipitation neigeuse (au milieu) et avec les occurrences de neige sur sol naturel (en bas) issues de la base de données climatologiques de Météo-France.



Instrumentation pour la recherche

L'événement phare de l'année 2006 aura sans conteste été la mise en vol des avions de SAFIRE, qui couronne plusieurs années d'efforts du CNRM et de ses partenaires.

INSTRUMENTATION AÉROPORTÉE

La mise en vol des avions de Safire

Comme prévu, les 29 et 30 mai 2006, les deux nouveaux avions de recherche scientifiques français s'envolèrent l'un après l'autre pour l'Afrique vers leur première campagne de mesure AMMA. Mais combien d'obstacles aura-t-il fallu franchir pour être présent à ce rendez-vous majeur !

L'aventure a commencé au milieu des années 90 quand la communauté scientifique française décide de renouveler sa flotte d'avions de recherche. Début 2000, Météo-France lance l'acquisition et la modification d'un turbopropulseur qu'elle confiera en juin 2002 à la société EADS SOGERMA Services sur la base d'un ATR42. En décembre 2002, le CNRS-INSU avec le concours du CNES lance l'acquisition et la modification d'un bi-réacteur auprès de Dassault-Falcon-Services sur la base d'un Falcon 20.

Les études sont complexes, les chantiers délicats et les certifications très exigeantes. Les

avions attendus pour fin 2003, ne seront disponibles pour Safire qu'en décembre 2005. Débute alors la course contre la montre. La plupart des équipements scientifiques des avions ont déjà été commandés, les protocoles de certifications complémentaires ont été pré-définis avec la DGAC. Il faut alors intégrer capteurs thermodynamiques, instrumentation, système d'acquisition temps réel, postes de travail, ... ainsi que les instruments des divers laboratoires participant à AMMA. Des corrections, des ajustements s'imposent, mais rien n'est bloquant, des solutions étant à chaque fois trouvées. Ce ne sont pas moins de 3 aménagements scientifiques complets qui seront installés, testés, validés et certifiés sur l'ATR et 4 sur le Falcon ... en 4 mois !!!

Fin mai 2006, les avions de Safire sont opérationnels, AMMA peut compter avec les deux nouveaux appareils français. (Figure 1)

EUFAR, le réseau européen des avions de recherche pour l'environnement

EUFAR (European Fleet for Airborne Research) constitue le réseau européen des avions de recherche dans le domaine des sciences de la Terre. Coordonné par Météo-France, ce programme regroupe vingt-quatre partenaires institutionnels et privés, qui mettent une trentaine d'avions instrumentés au service de la communauté scientifique. Doté d'un budget de 5 millions d'euros pour quatre ans (2004-2008), EUFAR est une « Initiative d'Infrastructures Intégrée » du 6ème programme cadre de la Commission Européenne. Les avions de recherche permettent de mieux observer les phénomènes atmosphériques en les échantillonnant in-situ et ainsi de mieux comprendre la grande diversité des processus physiques, dynamiques, microphysiques, chimiques et radiatifs. L'échantillonnage de l'atmosphère des plus basses couches jusqu'à la stratosphère, avec des charges scientifiques de quelques centaines de kg à plusieurs tonnes, nécessite une large panoplie

d'avions instrumentés. Aucun des pays de l'union ne dispose d'une gamme complète, mais la flotte européenne dans son ensemble recouvre presque toutes les spécifications requises. La coordination des activités des opérateurs d'avions européens est donc cruciale pour offrir à la communauté scientifique les infrastructures les mieux adaptées à la diversité de ses thématiques de recherche.

EUFAR a ainsi pour objectif de partager les connaissances, de faciliter l'accès transnational aux avions instrumentés et de promouvoir la recherche aéroportée.

L'évolution récente de la culture de coopération entre les opérateurs d'avions européens atteste de l'effet structurant d'EUFAR. À plus long terme, des accords multilatéraux entre les pays européens consolideront définitivement le réseau d'avions de recherche. (Figure 2)

INSTRUMENTATION IN SITU ET TÉLÉDÉTECTION

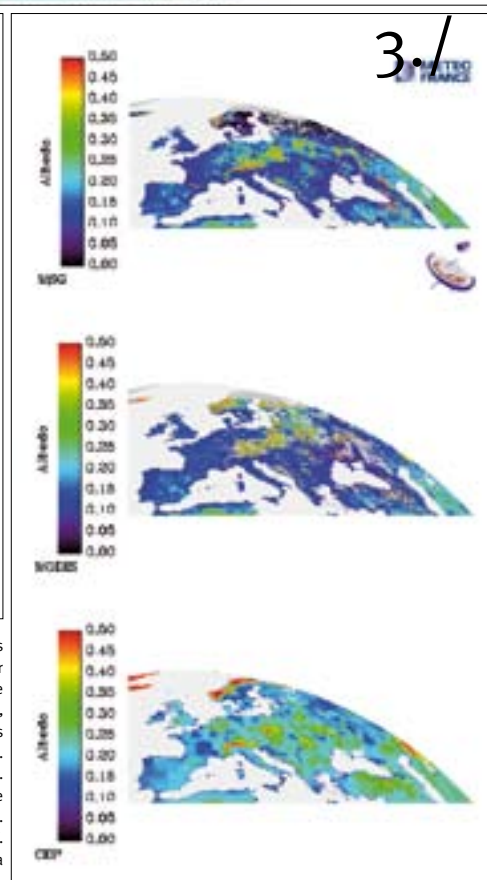
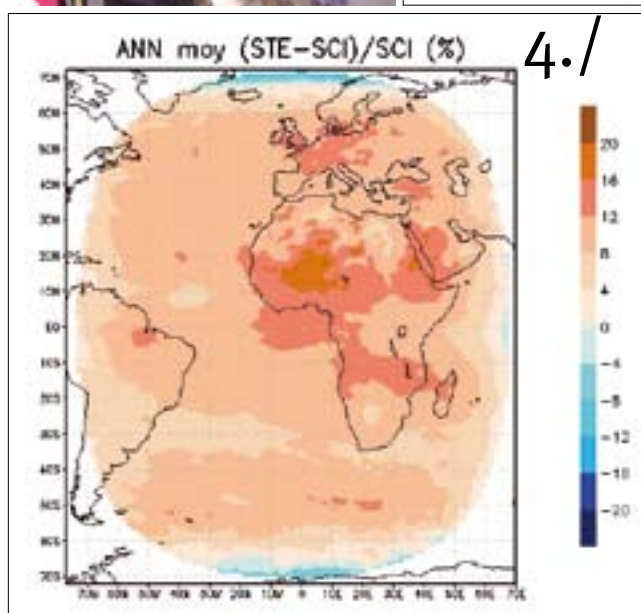
Le programme SAF pour l'Analyse des Terres Émergées

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. Le SAF ATE est placé sous le contrôle d'EUMETSAT qui en a confié la responsabilité du pilotage et de la production à l'Institut Météorologique du Portugal. Le consortium est constitué de 8 entités coopératives dont 4 sont des Services Météorologiques Nationaux (Belgique, Finlande, France, Portugal). Le projet basculera en phase opérationnelle en mars 2007.

Le projet comprend 5 types de produits (opérationnels, internes opérationnels, candidats opérationnels, démonstratifs, expérimentaux) 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 en charge du développement algorithmique des produits albédo et rayonnement optique dont il assure la validation. Celle-ci repose principalement sur une comparaison avec des mesures des réseaux sol et sur la confrontation avec des produits satellitaires équivalents. La conformité des résultats obtenus en rapport aux spécifications des utilisateurs pousse désormais à une utilisation des produits du SAF ATE dans SURFEX. Un effort important a été réalisé en 2006 pour servir la communauté utilisatrice AMMA.

Le travail programmé en 2007 consistera à préparer la fusion des données MSG et EPS, pour une amélioration de la résolution spatiale et une extension de la couverture géographique Européenne aux hautes latitudes. (Figure 3)



- 1./ Trois configurations ont été intégrées, validées et certifiées dans l'ATR42. Celle présentée sur la photo comprend au premier plan le bâtis instrumenté associé à la veine AVIRAD, à gauche les deux baies instrumentées de la veine Communautaire, la baie chimie et les trois baies du système d'acquisition temps réel, à droite les postes de travail.
- 2./ Descriptif synthétique des différentes interfaces d'Eufar.
- 3./ Cartes comparatives des albedos solaires pour la période du 17 Novembre au 2 Décembre 2005.
De haut en bas : SAF ATE, MODIS, CEPMMT.
- 4./ Biais relatif de la colonne d'ozone MSG par rapport à la colonne SCIAMACHY déduit d'une série annuelle d'observations.

Évaluation des colonnes d'ozone déduites de MSG/SEVIRI

Après la première année de fonctionnement opérationnel de Météosat Seconde Génération, le produit de colonne d'ozone développé par le CNRM dans le cadre du Centre d'Applications Satellitaires pour la surveillance de l'ozone (SAF Ozone) a été contrôlé pour évaluer ses erreurs systématiques. Une étude portant sur une cinquantaine d'images plein disque couvrant l'année 2004 complète à raison d'une image par semaine a permis de comparer des colonnes parfaitement simultanées : celles obtenues au KNMI par assimilation des données de l'instrument SCIAMACHY du satellite ENVISAT déjà validées

par comparaison au réseau de stations de spectrophotomètres Dobson, celles produites de manière opérationnelle par EUMETSAT ainsi que celles du CNRM. Ces dernières résultent d'un algorithme nouveau où les régressions multilinéaires ont été recalculées pour un jeu de profils atmosphériques plus cohérent et tenant mieux compte de la géométrie d'observation géostationnaire. A l'issue de ce travail, les erreurs systématiques ne présentent plus de dépendance en fonction de la distance zénithale et de la latitude, sauf aux latitudes très élevées supérieures à 60 degrés où la mesure de SCIA-

MACHY est également moins précise. On observe un biais constant de +10% de MSG par rapport à SCIAMACHY au-dessus des océans avec des valeurs atteignant 15% au-dessus des continents en raison d'une contribution de l'ozone troposphérique. Le produit opérationnel présente un biais de même signe compris entre 5 et 25% avec des variations en fonction de la latitude. Le CNRM dispose ainsi d'un produit de bonne qualité au-dessus des océans qui peut, au même titre que les images des canaux de vapeur d'eau, être utilisé par les prévisionnistes pour la validation des analyses. (Figure 4)



Mesure du profil d'humidité avec le profileur de vent combiné au radiomètre et au GPS

Hormis la mesure traditionnelle du vent en altitude, les profileurs UHF et VHF peuvent fournir le profil d'humidité à partir des données de puissance et de largeur du signal sur les spectres reçus. A cet effet, il faut connaître également le profil de température et une donnée ponctuelle ou intégrée d'humidité. De ce fait, cette technique est particulièrement adaptée à une synergie avec d'autres instruments de télédétection comme le radiomètre ou le GPS.

La restitution de l'humidité avec le profileur de vent a déjà été testée avec succès en diverses

parties du monde sur les radars de recherche de type MST capables de sonder la mésosphère (MU au Japon, Gadanki en Inde). En collaboration avec plusieurs laboratoires européens (UKMO, Université de L'Aquila et Université de Bilbao), le CNRM l'a testé à son tour sur un radar UHF en Suisse (Meteo Swiss/Payerne), puis sur un VHF en France (CNRM/Toulouse) lors de campagnes de mesures offrant une étude statistique par une comparaison systématique avec plusieurs dizaines de radiosondages lâchés dans la même zone.

Le radiomètre profileur de température et

d'humidité, malgré des mesures relativement grossières, s'avère très utile pour apporter le complément d'information nécessaire à l'application de cette technique, mais ses mesures d'humidité ne peuvent servir de référence que si le profileur de vent couvre une gamme d'altitude supérieure à 4 km. Dans ces conditions, le système permet le suivi automatique en continu du profil d'humidité avec un gain significatif de précision, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives d'affiner la qualité de la prévision météorologique à courte et moyenne échéance. (Figure 5)

Préparation de la mission spatiale ADM-AEOLUS (lidar vent)

Dédiée à la mesure du vent depuis l'espace, la mission de lidar vent spatial ADM-Aeolus de l'Agence Spatiale Européenne devrait être mise en orbite à la fin de l'année 2008. Livrées en moins de 3 heures, les données seront utilisées en priorité par les services de prévision météorologique.

D'un point de vue technique, de nombreuses étapes ont été franchies en 2006 dont des tests réalisés avec succès sur le laser émetteur, l'un des composants les plus difficiles à fabriquer.

En parallèle, la mise en place du segment sol s'est accélérée. Le CNRM y a contribué par sa participation au développement des

processeurs de niveau 1b, 2a et 2b. Confié à un industriel, le processeur de niveau 1b restitue des profils de vent à partir des signaux lidar. Avec ses partenaires, le CNRM a proposé et testé des améliorations incluses dans la version opérationnelle n°2 du processeur. Le processeur de niveau 2a fournit des informations sur les propriétés optiques de l'atmosphère. Partant d'algorithmes définis par un partenaire, le CNRM a écrit puis testé un code prototype. Le processeur de niveau 2b, enfin, sera mis en œuvre dans les centres de prévision numérique. A l'aide des ébauches de prévision, il corrige et complète les informations de niveau 1b afin de les rendre « assimilables ». Le CNRM a joué un rôle

important dans le développement d'une première version de ce processeur, livrée à l'ESA en décembre 2006.

Enfin, le CNRM a apporté un soutien à la réalisation de la première campagne de mesure au cours de laquelle le démonstrateur aéroporté du lidar ADM (A2D) a été testé (au sol). L'analyse des résultats a démarré.

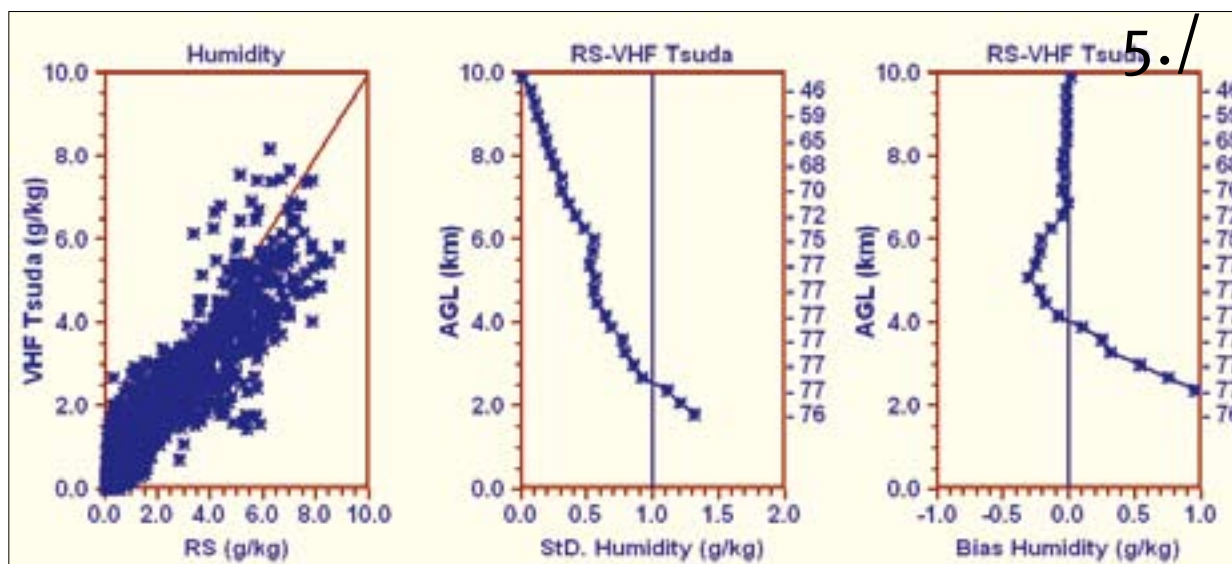
La date de lancement approchant, l'année 2007 sera très chargée avec la poursuite des travaux sur les processeurs, la première campagne aéroportée de l'A2D, et le démarrage d'activités pour préparer la validation en vol de l'instrument spatial. (Figure 6)

Un nouvel abri météorologique pour Airbus-France

Airbus France a fait appel à Météo-France pour la conception d'un système de mesure de la température de l'air et de la température du point de rosée pour réaliser les campagnes de certification acoustique de ses avions. Ce système de mesure est destiné à réaliser des mesures au sol à partir d'un mât à différentes hauteurs. Les précisions des mesures exigées étaient de ± 0.5 °C pour la température sèche et la température de

point de rosée dans des conditions météorologiques excluant les précipitations, avec un temps de réponse de l'ordre de 10 s pour la mesure de température sèche. A partir d'un abri météorologique et d'un hygromètre couramment utilisés par Airbus, Météo-France a sélectionné le capteur de température et a réalisé l'étude d'intégration de l'ensemble pour permettre d'atteindre les performances attendues. Cette étude comprenait la concep-

tion du nouveau système, la réalisation d'un prototype, la validation de ses performances, la réalisation d'un dossier de fabrication mécanique et la définition des consignes d'installations et de mise en œuvre. Le prototype et le dossier de définition et de fabrication livrés en 2006 permettront à Airbus de faire réaliser les instruments nécessaires à ses campagnes de certification acoustique. (Figure 7)



- 5./ Comparaison des mesures d'humidité spécifique obtenues entre le profileur VHF et le radio sondage (RS) au cours de la campagne MAP (09-11/1999, Lonate, Italie). De gauche à droite sont représentés la distribution générale (nuage des points), l'écart-type et le biais en altitude. A droite de ces dernières figures, on indique le nombre de valeurs servant à la comparaison statistique.
- 6./ Image d'artiste du lidar vent spatial ADM-Aeolus sondant l'atmosphère de son faisceau laser (copyright ESA).
- 7./ Le prototype du nouvel abri en cours de validation au CNRM.

Communication

La communication et la valorisation des activités de recherche revêtent d'année en année une importance plus grande. En ce domaine, l'action majeure du CNRM en 2006 fut la Nuit

des Chercheurs, manifestation durant laquelle le Centre de Recherche a ouvert ses portes à plus de 1000 invités.

LA NUIT DES CHERCHEURS

1 000 passionnés à la rencontre des scientifiques de la Météopole

Le 22 septembre 2006, la nuit toulousaine a été le théâtre d'une manifestation originale avec la première participation du CNRM, de la CELENV et du CERFACS à la manifestation européenne, intitulée « Nuit des chercheurs ». Une centaine d'intervenants étaient mobilisés pour recevoir plus de 1000 invités, salariés des entreprises de l'ouest toulousain.

Dans une ambiance magique, où seuls les bâtiments visités restaient illuminés, semblant jaillir de la nuit sans lune, nos visiteurs ont pu dialoguer, en tête-à-tête, avec des passionnés des métiers de la recherche

en météorologie. Fascinés par les lasers de la veine hydraulique, ébahis par le décollage nocturne d'un ballon de radiosondage, concentrés pendant les conférences, durant lesquelles l'amphithéâtre du CIC s'avéra trop étroit, les visiteurs ont été de surprises en découvertes tout au long de cette soirée.

Les échanges ont été nombreux et une complicité est née entre les employés ou cadres des entreprises voisines et les météorologistes, heureux de vulgariser les grands enjeux à venir de la planète (changement climatique, pollution, météo urbaine, modélisation...).

La soirée était entrecoupée d'intermèdes culturels, où certains chercheurs ont donné de la voix, du pied (danse irlandaise), ou de la batterie (groupe rock). Ces prestations ont permis à nos visiteurs de découvrir que le chercheur est une femme ou un homme abordable, passionné par son métier et par les enjeux de la recherche météorologique. Les nombreux messages de remerciement recueillis à l'issue de cette manifestation tendent à prouver que les dernières avancées dans le domaine des sciences de l'environnement et du climat sont une préoccupation majeure de nos concitoyens, à laquelle nous nous devons de répondre.



Malgré le temps humide, les visiteurs se pressent pour assister au radiosondage nocturne.



Publications

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DANS LES REVUES À COMITÉ DE LECTURE 2006

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

1. Abarca-Del-Rio R. & Mestre O., 2006 : Decadal to secular time scales variability in temperature measurement over France. *Geophys. Res. Lett.* 33, L13705. doi:10.1029/2006GL026019.

2. Aouf L., J.-M. Lefèvre et D. Hauser : Assimilation of synthetic SWIMSAT directional wave spectra in wave model WAM. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* Vol. 23, No. 3, pages 448-463, 2006.

3. Asencio, N. and J. Stein, 2006 : Origins of the reverse flow over the windward alpine foothills during MAP IOP3 and IOP8. *Q.J.R.Meteorol. Soc.*, 132, pp 297-316.

4. Bader, J.C., J.-P. Piedelièvre et J.-P. Lamagat, 2006 : Prévision saisonnière du volume de crue du fleuve Sénégal : utilisation des résultats du modèle Arpège Climat. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 51, no. 3, pp. 406-417.

5. Bastin, S., P. Drobinski, V. Guénard, J.-L. Caccia, B. Campistron, A. M. Dabas, P. Delville, O. Reitebuch, et C. Werner, 2006 : On the interaction between the sea breeze and a summer Mistral event at the exit of the Rhône valley. *Monthly Weather Review*, 134, 1647-1668

6. Bauer, P., F. Gérard, J.-F. Minster, 2006 : "Observing the earth : an international Endeavour", C. R. Geoscience (2006), doi:10.1016/j.crte.2006.09.011

7. Belo Pereira, M., and L. Berre, 2006 : The use of an ensemble approach to study the background error covariances in a global NWP model. *Mon. Wea. Rev.*, 134, p 2466-2489.

8. Berre, L., S. E. Stefanescu and M. Belo Pereira, 2006 : The representation of the analysis effect in three error simulation techniques. *Tellus*, 58A, pp 196-209.

9. Bessemoulin, P., 2006 : Compte rendu de la 6ème Conférence EMS/ECAC. *La Météorologie*, n°55, 11-12.

10. Boé J., Terray L., Habets F., Martin E. (2006) : A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling, *J. of Geophys. Res.*, 111, D23106, doi:10.1029/2005JD006889

11. Bony, S., R. Colman, V. Kattsov, R.P. Allan, C. S. Bretherton, J.-L. Dufresne, A. Hall, S. Hallegatte, M. M. Holland, W. Ingram, D. A. Randall, B. J. Soden, G. Tselioudis, M. J. Webb, 2006 : How well do we understand and evaluate climate change feedback processes ?, *Journal of Climate*, Vol 19(15)

12. Boone, A., N. Mognard, B. Decharme, H. Douville, M. Grippa, and K. Kerrigan, 2006 : Impact of

simulated soil temperatures on the estimation of snow depth over Siberia from SSM/I compared to a multi-model climatology. *Remote Sens. Env.*, 101, p 482-494.

13. Bouilloud, L., and E. Martin, 2006 : A coupled model to simulate snow behaviour on roads. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45(3), p 500-516.

14. Bourras, D., G. Caniaux, H. Giordani, et G. Reverdin, 2006 : Influence d'un tourbillon océanique sur l'atmosphère. *La Météorologie*, 53, 30-37.

15. Bouyssel F., Y. Bouteloup, P. Marquet, 2006 : A prognostic large scale cloud and semi-Lagrangian precipitation scheme in ARPEGE and ALADIN models. *WGNE « Blue Book » annual report "Parameterization of important atmospheric and surface processes, effects of different parameterizations" Ed. J. Côté.*

16. Bouttier, F., G. Hello, Y. Seity and S. Malardel, 2006 : Progress of the Arome mesoscale NWP project. *CAS/JSC WGNE « Blue Book » annual report « Research Activities in Atmospheric and Ocean Modelling », Ed. J. Côté.*

17. Brenot, H., V. Ducrocq, A. Walpersdorf, C. Champollion and O. Caumont, 2006 : GPS Zenith delay sensitivity evaluated from high-resolution NWP simulations of the 8-9 september 2002 flash-flood over southeastern France. *Publié au JGR*, vol.111, n°D15, D15105 doi : 10.1029/2004JD005726

18. Burlando, P., R. Rosso, D. Schertzer, and D. Veneziano, 2006 : Hydrofractal'03, *Journal of Hydrology*, 322, 1, 2006.

19. Cariolle, D. and J.-J. Morcrette : A linearized approach to the radiative budget of the stratosphere : influence of the ozone distribution. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L05806, doi:10.29/2006GRLO25597, 2006.

20. Caroff P., S. Westrelin, 2006 : Cyclone en vue : mieux vaut prévenir... *Ponts et Chaussées Magazine*, janvier 2006.

21. Caumont, O., V. Ducrocq, G. Delrieu, M. Gosset, J. Parent du Chatelet, J. P. Pinty, H. Andrieu, Y. Lemaître, and G. Scialom, 2006 : A Radar Observation Operator for high-resolution Non-hydrostatic Numerical Weather Prediction. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, : vol.23, n°8, pp 1049-1067.

22. Cavaleri L, F. Ardhuin, L. Bertotti, J. Bidlot, V. Filippetto, J.-M. Lefevre and Paul Wittmann, 2006 : Comparison of Wind and Wave Measurements and Models in the Western Mediterranean Sea ». *Ocean Engineering*.

23. Chancibault, K., S. Anquetin, V. Ducrocq and G.-M. Saulnier, 2006 : Hydrological evaluation of high-resolution precipitation forecasts of the Gard

flash-flood event (8-9 September 2002). *Q.J.Roy. Meteor. Soc. Publié* : n° 617, avril 2006 Part. B, pp 1091-1117.

24. Chapnik, B., G. Desroziers, F. Rabier and O. Talagrand, 2006 : Diagnosis and tuning of observational error in a quasi-operational data assimilation setting. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, n° 615, Part B, volume 132, pp 543-565.

25. Chauvin, F., J.-F. Royer and M. Dequé, 2006 : Response of hurricane-type vortices to global warming as simulated by Arpege-Climat at high resolution. *Climate Dynamics*, DOI:10.1007/s00382-006-0135-7. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-006-0135-7>

26. Collins, W.D., V. Ramaswamy M. D. Schwarzkopf, Y. Sun, R. W. Portmann, Q. Fu, S. E. B. Casanova, J.-L. Dufresne, D. W. Fillmore, P. M. D. Forster, V. Y. Galin, L. K. Gohar, W. J. Ingram, D. P. Kratz, M.-P. Lefebvre, J. Li, P. Marquet, V. Oinas, Y. Tsushima, T. Uchiyama, and W. Y. Zhong, 2006 : Radiative forcing by well-mixed greenhouse gases : Estimates from climate models in the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Fourth Assessment Report (AR4)*. *J. Geophys. Res. Atm.*, 111, D14317, doi:10.1029/2005JD006713.

27. Conil, S., H. Douville, S. Tyteca, 2006 : The relative roles of soil moisture and SST in climate variability explored within ensembles of AMIP-type simulations. *Climate Dyn.* doi:10.1007/s00382-006-0172-2.

28. Couvreur F., F. Guichard, V. ; Masson and J.L. Redelsperger, 2006 : Negative water vapour skewness and dry tongues in the convective boundary layer : observations and LES budget analysis. *Boundary Layer Meteorology*. DOI : 10.1007/s10546-006-9140-y (<http://www.springerlink.com/content/1573-1472/?Content+Status=Accepted>)

29. Cuxart, J., A.A.A. Holtslag, R.J. Beare, E. Bazile, A. Beljaars, A. Cheng, L. Conangla, M. Ek, F. Freedman, R. Hamdi, A. Kerstein, H. Kitagawa, G. Lenderink, D. Lewellen, J. Mailhot, T. Mauritsen, V. Perov, G. Schayes, G.-J. Steeneveld, G. Svensson, P. Taylor, W. Weng, S. Wunsch and K.-M. Xu , 2006 : Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer. *Boundary Layer Meteorology*, Volume 118, Number 2, p 273-303.

30. Decharme, B., H. Douville, 2006 : Introduction of a sub-grid hydrology in the ISBA land surface model. *Climate Dyn.*, 26, 65-78, DOI 10.1007/s00382-005-0059-7.

31. Decharme, B., H. Douville, A. Boone, F. Habets and J. Noilhan, 2006 : Impact of an exponential profile of saturated hydraulic conductivity within the ISBA LSM : simulations over the Rhône basin. *Journal of Hydrometeorology*, 7, p 61-80.

32. Decharme, B. and H. Douville, 2006 : Uncertainties in the GSWP-2 precipitation forcing and their impacts on regional and global hydrological simulations. *Climate Dynamics*, 27, 695-713, DOI:10.1007/s00382-006-0160-6.
33. Dedieu, J.P., M. Niang, Y. Durand, G. Guyomarc'h, L. Mérindol et C. Sergent, 2006 : Potentiel des données ASAR-Envisat en bande C pour la détermination des caractéristiques de la neige humide en environnement alpin. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n°179 (2005-3), pp18-27.
35. Derrien M. and H. Le Gléau, 2006 : MSG/SEVIRI cloud mask and type from SAFNWC. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4707-4732.
36. De Rosnay, P., J.-C. Calvet, Y. Kerr, J.-P. Wigneron, F. Lemaître, M.-J. Escorihuela, K. Saleh, J. Barrié, G. Bouhours, L. Coret, G. Chereil, G. Dedieu, R. Durbe, N.E.D Fritz, F. Froissard, J. Hoedjes, A. Kruszewski, F. Lavenu, D. Suquia, P. Waldteufel, 2006 : Smosrex - A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing. *Remote Sens. Env.*, Vol. 102, No. 3-4, pp. 377-389.
37. Desroziers, G., L. Berre, B. Chapnik and P. Poli, 2006 : Diagnosis of error statistics in observation space. CAS/JSC WGNE « Blue Book » annual report « Research Activities in Atmospheric and Ocean Modelling », Ed. J. Côté.
38. Dolman A.J., J. Noilhan, P. Durand, C. Sarrat, A. Brut, B. Piguet, A. Butet, N. Jarosz, Y. Brunet, D. Loustau, E. Lamaud, L. Tol, R. Ronda, F. Miglietta, B. Gioli, E. Magliulo, M. Esposito, C. Gerbig, S. Körner, P. Glademard, M. Ramonet, P. Ciais, B. Neininger, R. Hutjes, J. Elbers, R. Macatangay, O. Schrems, G. Pérez-Landa, M. Sanz, Y. Scholz and G. Facon, E. Ceschia, P. Béziat, 2006 : The CarboEurope Regional Experiment Strategy, *BAMS*, 1367-1379, doi : 10.1175/BAMS-87-10-1367.
39. Douville, H., 2006 : Impact of Regional SST Anomalies on the Indian Monsoon Response to Global Warming in the CNRM Climate Model. *Journal of Climate*, 19, p 2008-2024.
40. Douville, H., 2006 : Detection-attribution of global warming at the regional scale : How to deal with precipitation variability? *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02701, doi:10.1029/2005GL024967.
41. Douville H., K. Laval, D. Cariolle, S. Planton, J.-C. André, 2006 : Eau et Climat. « Les Eaux Continentales ». Rapport sur la Science et la Technologie, Académie des Sciences, Editions Tech. & Doc., Chapitre 4, 201-238.
42. Douville, H., D. Salas-Méla and S. Tyteca, 2006 : On the tropical origin of uncertainties in the global land precipitation response to global warming. *Climate Dynamics*, 26, 367-385, DOI 10.1007/s00382-005-0088-2.
43. Drobinski P., S. Bastin, A. Dabas, P. Delville, O. Reitebuch, 2006 : Variability of three-dimensional sea breeze structure in southern France : observations and evaluation of empirical scaling laws. *Annales Geophysicae*, 24, p 1783-1799.
44. Drobinski, P., J.-L. Redelsperger, and C. Pietras, 2006 : Evaluation of a planetary boundary layer subgrid-scale model that accounts for near-surface turbulence anisotropy. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L23806, doi:10.1029/2006GL027062.
45. Dufresne, J.-L., D. Salas-Méla, S. Denvil, S. Tyteca, S. Bony, P. Braconnot, P. Brockmann, P. Cadule, A. Caubel, F. Chauvin, M. Déqué, H. Douville, L. Fairhead, M.-A. Foujols, P. Friedlingstein, J.-F. Gueyremy, F. Hourdin, A. Idelkadi, P. Marquet, O. Marti, I. Musat, S. Planton, J.-F. Royer (2006) : Simulation de l'évolution récente et future du climat par les modèles du CNRM et de l'IPSL, *La Météorologie* No. 55, nov. 2006.
46. Elias, T., S. Ana Maria, N. Belo, S. Pereira, P. Formenti, G. Helas and F. Wagner, 2006 : Aerosol extinction in a remote continental region of the Iberian Peninsula during summer. *J. Geophys. Res.*, Vol. 111, No. D14, D14204.
47. Elias, T., A. M. Silva, N. Belo, S. Pereira, P. Formenti, G. Helas, and F. Wagner : Aerosol extinction in a remote continental region of the Iberian peninsula during summer, *J. Geophys. Res.*, 111, D14204, doi:10.1029/2005JD006769.
48. Etchevers, P., 2006 : A snowpack and surface meteorological parameters climatology for the French Alps from 1958 to 2004. *Brochure 2006 du CEP*.
49. Felder, M., P. Poli, et J. Joiner, 2006 : Errors induced by ozone field horizontal inhomogeneities into simulated nadir-viewing orbital backscatter UV measurements, *J. Geophys. Res.*, 112, D01303, doi:10.1029/2005JD006769.
50. Fischer, C., T. Montmerle, L. Berre, L. Auger and S.E. Stefanescu, 2006 : An overview of the variational assimilation in the ALADIN/France NWP system. *QJRMS* Number 613, October 2005 Part C 131. pp. 3477-3492.
51. Fischer, C., T. Montmerle, L. Auger et B. Lacroix : 2006 : L'assimilation de données opérationnelle régionale à Météo-France. *La Météorologie* n° 54-août 2006.
52. Fourrié, N., D. Marchal, F. Rabier, B. Chapnik et G. Desroziers, 2006 : Impact Study of the 2003 North Atlantic THORPEX Regional Campaign, *QJRMS* Number 615, January 2006 Part B, pp. 275-295.
53. Fox, S., A. Pitman, A. Boone and F. Habets, 2006 : The relationship between inter-model differences and surface energy balance complexity in the Rhone Aggregation Intercomparison Project. *J. Hydrometeorol.*, 7, p 81-100.
54. Fox-Rabinovitz, M., J. Côté, B. Dugas, M. Déqué and J. L. McGregor, 2006 : Variable resolution general circulation models : Stretched-grid model intercomparison project (SGMIP), *J. Geophys. Res.*, 111, D16104, doi:10.1029/2005JD006520.
55. Franks S., Uhlenbrook S. and Etchevers P., (2006) : Hydrological simulation modelling. In : *Hydrology 2020 : An Integrating Science to Meet World Water Challenges* (edited by T. Oki, C. Valeo and K. Heal), IAHS Publication 300, pp 105-122.
56. Friedrich, K., U. Germann, J.J. Gourley, and P. Tabary, 2006 : Effects of radar beam shielding on rainfall estimation for polarimetric C-band radar, accepted in *J. Atmos. Oceanic Technol.*
57. Gaffard, C., L. Bianco, V. Klaus and M. Matabuena, 2006 : Evaluation of moments calculated from wind profiler spectra : a comparison between five different processing techniques. *Meteorologische Zeitschrift*, vol 15, n°1, p 73-85.
58. Geer, A.J., W.A. Lahoz, S. Bekki, N. Bormann, Q. Errera, H.J. Eskes, D. Fonteyn, D.R. Jackson, M.N. Juckes, S. Massart, V.-H. Peuch, S. Rharmili and A. Segers, 2006 : The ASSET intercomparison of ozone analyses : method and first results. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 5445-5474, 2006.
59. Geleyn, J.-F., F. Vana, J. Cedelnik, M. Tudor and B. Catry, 2006 : An intermediate solution between diagnostic exchange coefficients and prognostic TKE methods for vertical turbulent transport. CAS/JSC WGNE « Blue Book » annual report : « Research Activities in Atmospheric and Ocean Modelling », Ed. J. Côté, pp. 4-11-4-12.
60. Gérard E., T. Montmerle, F. Rabier, 2006 : Assimilation of New Sounder Data in the Operational System at Météo-France. CAS/JSC WGNE « Blue Book » annual report « Research Activities in Atmospheric and Ocean Modelling », Ed. J. Côté.
61. Gérard, L., J.-M. Piriou and J.-F. Geleyn, 2006 : Advances in the integration of deep convection and microphysics for the meso-scale. CAS/JSC WGNE « Blue Book » annual report « Research Activities in Atmospheric and Ocean Modelling », Ed. J. Côté.
62. Gerbaux M., Genthon C., Etchevers P., Vincent C., Dedieu J.-P. (2006) : Surface mass balance of glaciers in the French Alps : distributed modeling and sensitivity to climate change. *Journal of Glaciology*, Vol. 51, No. 175. pp. 561-572.
63. Gibelin, A., J. Calvet, J. Roujean, L. Jarlan, and S. O. Los, 2006 : Ability of the land surface model ISBA-A-gs to simulate leaf area index at the global scale : Comparison with satellites products. *J. Geophys. Res.*, 111, D18102, doi:10.1029/2005JD006691.
64. Giordani, H., L. Prieur, and G. Caniaux, 2006 : Advanced insights into sources of vertical velocity in the ocean. *Ocean Dynamics*, doi :10.1007/s10236-005-0050-1.
65. Gourley, J.J., P. Tabary and J. Parent-du-Chatelet, 2006 : Data quality of the Météo-France C-band polarimetric radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 23, No. 10, 1340-1356.
66. Grini, A., P. Tulet and L. Gomes, 2006 : Dusty weather forecasts using the Meso-NH mesoscale atmospheric model. *J. Geophys. Res.*, 111, D19205, doi:10.1029/2005JD007007.
67. Guérin, R., G. Desroziers and Ph. Arbogast, 2006 : 4D-Var analysis of potential vorticity pseudo-observation. *QJRMS*, April 2006, Part B, vol. 132, n° 617, pp 1283-1298.
68. Guidard, V., C. Fischer, M. Nuret, A. Dziedzic, 2006 : Evaluation of the ALADIN 3D-VAR with observations of the MAP campaign, *M.A.P.*, vol. 92, pp. 161-173.
69. Hall N. M. J. and P. Peyrillé, 2006 : Dynamics of the West African Monsoon. *J. Phys.* IV, France, 139, 81-99. © EDP Sciences, Les Ulis. DOI : 10.1051/jp4:2006139007.
70. Hallegatte S., 2006 : A Cost-Benefit Analysis of the New Orleans Flood, Protection System. *Regulatory Analysis* 06-02. AEI-Brookings Joint Center, Mar 2006.
71. Hallegatte S., A. Lahellec, J.Y. Grandpeix, 2006 : An elicitation of the dynamic nature of water vapor feedback using a 1D model, *Journal of Atmospheric Science*, Vol 63(7).
72. Holmes, T. R. H., P. de Rosnay, R. de Jeu, R. J.-P. Wigneron, Y. Kerr, J.-C. Calvet, M. J. Escorihuela, K. Saleh and F. Lemaître, 2006 : A new parameterization of the effective temperature for L band radiometry. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07405, doi:10.1029/2006GL025724.
73. Hontarrède M., 2006 : Climats du passé – 150 ans de mesure, D'après articles et exposés de Jean-Marc Moisselin et avec la collaboration de Sylvie Jourdain, *Revue MetMar*, septembre 2006, n° 212.

74. Jia-Lin Lin, George, N. Kiladis, Brian E. Mapes, Klaus M. Weickmann, Kenneth R. Sperber, Wuyin Lin, Matthew C. Wheeler, Siegfried D. Schubert, Anthony Del Genio, Leo J. Donner, Seita Emori, Jean-Francois Guerey, Frederic Hourdin, Philip J. Rasch, Erich Roeckner and John F. Scinocca, 2006 : Tropical Intraseasonal Variability in 14 IPCC AR4 Climate Models. Part I : Convective Signals. *J. Climate*, 19, 2665-2690
75. Joly, M., A. Voldoire, H. Douville, P. Terray, J-F. Royer, 2006 : African monsoon teleconnections with tropical SSTs in a set of IPCC4 coupled models. *Climate Dyn.*, doi :10.1007/s00382-006-0215-8.
76. Karbou, F., E. Gérard, and F. Rabier, 2006 : Microwave land emissivity and skin temperature for AMSU-A & -B assimilation over land. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, *QJRM.S.*, Vol. 132, No. 620, Part A.
77. Klaus, V., L. Bianco, C. Gaffard, M. Matabuena and T.J. Hewison, 2006 : Combining UHF radar wind profiler and microwave radiometer for the estimation of atmospheric humidity profiles. *Meteorologische Zeitschrift*, vol 15, n°1, p 87-97.
78. Laaidi, K., M. Pascal, M. Ledrans, A. Le Tertre, S. Medina, G. Salines, P. Bessemoulin, J. Manach, B. Strauss, J.C. Cohen, P. Empereur-Bissonet, 2006 : Relation between meteorology and mortality : the French heat health warning system. *Annalen der Meteorologie*, 41(1) : 291-2.
79. 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 Clarman, 2006 : The Assimilation of Envisat data (ASSET) projet, *Atmos. Chem. Phys. Disc.*, discussion en ligne.
80. Lebeaupin, C., V. Ducrocq and H. Giordani, 2006 : Sensitivity of Mediterranean torrential rain events to the Sea Surface Temperature based on high-resolution numerical forecasts, *Journal of Geophysical Research*, volume 111, D12110, doi : 10.1029/2005JD006541.
81. Leenhardt, D., D. Wallach, P. Le Moigne, M. Guérif, A. Bruand and M.A. Casterad, 2006 : Using crop models for multiple fields, in *Working with Dynamic Crop Models*, Edited by D. Wallach, D. Makowski and J. W. Jones, Elsevier, Chapter 7, p 209-248.
82. Lemonsu, A.; Pigeon, G.; Masson, V. et Mopert, C., 2006 : Sea-town interactions over Marseille : 3D urban boundary layer and thermodynamic fields near the surface. *Theor. Appl. Climatol.* 84(6), 171-178.
83. Levin, Z., J. L. Brenguier, and W. Cotton, 2006 : The WMO/IUGG International Aerosol Precipitation Science Assessment Group (IAPSAG). Chapter 5 : Observational Studies of the Effect of Aerosols on Clouds and Precipitation
84. Li L., Bozec A., S. Somot, K. Béranger, P. Bouruet-Aubertot, F. Sevault, M. Crépon (2006) : Regional atmospheric, marine processes and climate modelling (chapter 7). In : *Mediterranean Climate Variability*, Lionello, P. and Malanotte, P. and Boscolo, R.(eds), Elsevier B.V., pp. 373-397
85. Lilley, M., S. Lovejoy, N. Desaulnier-Soucy, and D. Schertzer, 2006 : Multifractal large N limit in Rain, *J. Hydrology*, 328, 20-37, 2006. DOI 10.1016/J.jhydrol.2005.11.063.
86. Lovejoy, S., and D. Schertzer, 2006 : Multifractals, cloud radiances and rain, *J. of Hydrol.*, 322, 59-88, 2006.DOI 10.1016/J.jhydrol.2005.02.042.
87. Masson, V., 2006 : Urban surface modeling and the mesoscale impact of cities. *Theoretical and Applied climatology.*, 84, 35-45.
88. Merchant, C. O. Embury, P.Le Borgne and B. Bellec, 2006 : Saharan dust in night-time thermal imagery : detection and reduction of related biases in retrieved sea surface temperature, *Remote Sensing of Environment*, 104, 15-30.
89. Michel, Y. et F. Bouttier, 2006 : Automated tracking of dry intrusions on satellite and synthetic water vapour imageries. *QJRM.S.*, Vol. 132, Number 620, October 2006 Part A pp. 2257-2276.
90. Milelli, M, M.C. Llasat and V. Ducrocq, 2006 : The cases of June 2000, November 2002 and September 2002 as examples of Mediterranean floods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol 6, pp 271-284.
91. Moisselin, J.M. et B. Dubuisson, 2006 : Evolution des extrêmes en France au cours du XXème siècle. *La Météorologie*, 54, pp 33-42
92. Montmerle, T., J.-P. Lafore, L. Berre and C. Fischer, 2006 : Limited Area Model error statistics over Western Africa : comparisons with mid-latitude results. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, vol 18, n°614, p 213-231.
93. Niang, M., M. Bernier, E. Van Boschove, Y. Durand, 2006 : Précision de l'estimation de l'équivalent en eau de la neige obtenue avec la sonde SnowPower au Québec. *La Houille Blanche*, n° 2, mai 2006.
94. Ogawa, N, F. Flin and J.B. Brzoska, 2006 : Representation of two curvatures of surface and its application to snow physics. *Memoirs of the Hokkaido Institute of Technology*, N° 34 , ISSN 0385-0862.
95. Oliso, A., Y. Inoue, S. Ortega-Farias, J. Demarty, J-P. Wigneron, I. Braud, F. Jacobs, P. Lecharpentier, C. Ottlé, J-C. Calvet and N. Brisson, 2006 : Future directions for advanced evapotranspiration modeling : assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. *Irrigation and Drainage Systems*, Vol. 19, pp 377-412.
96. Parker, D.J., A. Diongue, R.J. Ellis, M. Felton, C.M. Taylor, C.D. Thorncroft, P. Bessemoulin, 2006 : The diurnal cycle of the west African monsoon in observations and numerical model analyses. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, vol 131, no. 611, p. 2839-2860.
97. Pascal M, Laaidi K, Ledrans M, Baffert E, Caserio-Schonemann C, Le Tertre A., Manach J. and al. 2006 : France's heat health watch warning system. *Int J Biometeorol* 2005;1-10.
98. Pawlowska, H., W.W. Grabowski, and J.-L. Brenguier, 2006 : Observations of the width of cloud droplet spectra in stratocumulus, *Geophysical Research Letters*, VOL. 33, L19810, doi:10.1029/2006GL026841, 2006
99. Pellarin, T., J-C. Calvet and W. Wagner, 2006 : "Evaluation of ERS Scatterometer soil moisture products over a half-degree region in Southwestern France". *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 33, L17401, doi:10.1029/2006GL027231.
100. Peter, A.C., M. Le Hénaff, Y. DuPenhoat, C.E. Menkes, F. Marin, J. Vialard, G. Caniaux, and A. Lazar, 2006 : A model study of the seasonal mixed layer heat budget in the Equatorial Atlantic. *J. Geophys. Res.*, 111, C06014, doi :10.1029/2005JC003157.
101. Pigeon, G., A. Lemonsu, N. Long, J. Barrié, V. Masson, and P. Durand, 2006 : Urban thermodynamic island in a coastal city analysed from an optimized surface network. *Boundary-Layer Meteorology*, volume 120, pp 315-351.
102. Poli, P., 2006 : Assimilation of GNSS Radio Occultation Data into Numerical Weather Prediction, dans *Atmosphere and Climate : Studies by Occultation Methods*, Springer-Verlag, Eds. Kirchengast, G. Foelsche, U., Steiner, A.K., pp. 196-204, 2006, ISBN-10-3-540-34116.
103. Pradier, S., J.-L. Attié, M. Chong, J. Escobar, V.-H. Peuch, J.-F. Lamarque, B. Khattatov and D. Edwards, 2006 : Evaluation of 2001 springtime CO transport over West Africa using MOPITT CO measurements assimilated in a global chemistry transport model, 2006, *Tellus*, 58B, 163-176.
104. Rabier F., 2006 : Overview of data assimilation developments in NWP centres : *QJRM.S.* Number 613, Part C 131, pp. 3215-3233.
105. Rabier, F., 2006 : The importance of data : a meteorological perspective : Chapitre 12 (pp343 à 360) du livre « Chassignet, E.P., and J. Verron (Eds.), /Ocean Weather Forecasting : An Integrated View of Oceanography./ Springer, 577.
106. Redelsperger, J.C., A. Diedou, C. Flamant, S. Janicot, J.P. Lafore, T. Lebel, J. Polcher, B. Bourlès, G. Caniaux, P. De Rosnay, M. Desbois, L. Eymard, B. Fontaine, K. Ginous, M. Hoepffner, C. Kane, K. Lau, C. Mari, B. Marticorena, E. Mougin, J. Pelon, C. Peugeot, A. Protat, F. Roux, B. Sultan, et E. Van Den Akker, 2006 : Amma : le projet international d'étude de la mousson Africaine et de ses impacts. *La Météorologie*, 54, 22-32.
107. Redelsperger, J.-L., C.D. Thorncroft, A. Diedhiou, T. Lebel, D. J. Parker, and J. Polcher, 2006 : African Monsoon Multidisciplinary Analysis - An International Research Project and Field Campaign. *American Meteorological Society*, Doi:10.1175/BAMS-87-12-1739.
108. Rivière, G. and A. Joly, 2006 : Role of the low-frequency deformation field on the explosive growth of extratropical cyclones at the jet exit Part I : barotropic critical region. *J. Atmos. Sci.* Volume 63, Issue 8.
109. Rivière, G. and A. Joly, 2006 : Role of the low-frequency deformation field on the explosive growth of extratropical cyclones at the jet exit Part II : baroclinic critical region. *J. Atmos. Sci.*, Volume 63, Issue 8.
110. Rojas S., L. Gomes, P. Laj, and P. Villani, 2006 : Behavior of CCN to CN fraction during aging and mixing processes of atmospheric particles, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 6, 9545-9562, 2006.
111. Saleh, K., J-P. Wigneron, P. de Rosnay, J-C. Calvet, Y. Kerr, P. Waldteufel, M.J. Escorihuela, 2006 : Impact of rain interception by vegetation and mulch on the L-band emission of natural grass. *Remote Sens. Env.*, Vol. 101, pp. 127-139.
112. Saleh, K., J.-P. Wigneron, P. de Rosnay, J.-C. Calvet, Y. Kerr, 2006 : « Semi-empirical regressions at L-band applied to surface soil moisture retrieval over grass, » *Remote Sens. Env.*, volume 101, pp 415-426.
113. Samain, O., B. Geiger, and J.L. Roujean, 2006 : Spectral normalisation and fusion of optical sensors for the retrieval of BRDF and albedo; Application to Vegetation, Modis and Meris data sets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 44, 11, Part 1, 3166- 3179, 2006.
114. Sanchez Gomez E., and L. Terray, 2006 : Large-scale atmospheric dynamics and local intense precipitation episodes. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L24711.

115. Sandu I., P. Tulet, and J.L. Brenguier, 2006 : Parameterization of the Cloud Droplet Single Scattering Albedo Based on Aerosol Chemical Composition for LES Modelling of Boundary Layer Clouds. *Geophys. Research Letters*, Vol. 32, No. 19, L19814
116. Sarraz C., A. Lemonsu, V. Masson and D. Guedalia, 2006 : Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmospheric Environment*, Volume 40, issue 10, p 1743-1758.
117. Schertzer, D., P. Bernardara, A. Biauou, I. Tchiguirinskaia, M. Lang, E. Sauquet, H. Bendjoudi, P. Hubert, S. Lovejoy, and J.M. Veyssière, 2006 : Extrêmes et multifractals en hydrologie : résultats, validations et perspectives, La Houille Blanche, 5, 112-119, 2006
DOI 10.1051/lhb : 2006095.
118. Soci, C., C. Fischer and A. Horanyi, 2006 : Sensitivity of high resolution forecasts using the adjoint technique at the 10 km scale. *MWR*, vol. 134, pp. 772-790.
119. Somot, S., F. Sevault and M. Dequé, 2006 : Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the twenty-first century using a high-resolution ocean circulation model. *Climate Dynamics*, <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-006-0167-z>, vol. 27, n° 7-8, pp. 851-879.
120. Stefanescu, S. E., L. Berre and M. Belo Pereira, 2006 : The evolution of dispersion spectra and the evaluation of model differences in an ensemble estimation of error statistics for a limited area analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 134, p 3456-3478.
121. Stoffelen, A., G.-J. Marseille et F. Bouttier, 2006 : Doppler wind lidar observation system simulation experiment. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, vol 132, 1927-1948.
122. Stoffelen, A., G.-J. Marseille, F. Bouttier, D. Vasiljevic, S. de Haan and C. Cardinali, 2006 : ADM-Aeolus Doppler wind lidar Observing System Simulation Experiment. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, vol 132, 1927-1948.
123. Tabary, P., F. Guibert, L. Périer and J. Parent-du-Châtelet, 2006 : An operational triple-PRT Doppler scheme for the French radar network, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 23, No 12, 1645-1656.
124. Terray, P., F. Chauvin, H. Douville, 2006 : Impact of southeast Indian Ocean sea surface temperature anomalies on monsoon-ENSO-dipole variability in a coupled ocean-atmosphere model. *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-006-0192.
125. Thouret V., J.-P. Cammas, B. Sauvage, G. Athier, R. Zbinden, P. Nédélec, P. Simon and F. Karcher, 2006 : Tropopause referenced ozone climatology and inter-annual variability (1994-2003) from the MOZAIC programme, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Page(s) 1033-1051. SRef-ID : 1680-7324/acp/2006-6-1033.
126. Toffoli A., J.-M. Lefèvre, E. Bitner-Gregersen, J. Monbaliu, 2006 : Towards the identification of warning criteria : Analysis of a ship accident database. *Applied Ocean Research*, Elsevier.
127. Tomas, S. and V. Masson, 2006 : A parameterization of Third Order Moments for the convective boundary layer. *BLM*, 120, pp 437-454.
128. Tulet, P., A. Grini, J. Robert, R. Griffin and S. Petitcol, 2006 : Orilam-SOA, A computationally efficient model for predicting secondary organic aerosols in 3D atmospheric models, *J. Geophys. Res.*, 111, D23208, doi:10.1029/2006JD007152
129. Ulbrich U., W. May, P. Lionello, J.G. Pinto, S. Somot (2006) The Mediterranean Climate Change Under Global Warming (chapter 8). In : *Mediterranean Climate Variability*, Lionello, P. and Malanotte, P. and Boscolo, R.(eds), Elsevier B.V, pp. 399-415
130. Valeo C., Etchevers P., Franks S., Heal K., Hubbard S., Karambiri H., Oki T. and Uhlenbrook S. (2006) : Hydrological measurement. In : *Hydrology 2020 : An Integrating Science to Meet World Water Challenges* (edited by T. Oki, C. Valeo and K. Heal), IAHS Publication 300, pp 69-103.
131. Voltaire, A., 2006 : Quantifying the impact of future land-use changes against increases in GHG concentrations. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L04701, doi:10.1029/2005GL024354.
132. Wigneron, J.-P., C. Mätzler, S.J. English, A. Jupp, E.P. Dinnat, J. Boutin, J. Shi, M. Schwank, C. Prigent, P. de Rosnay, B. K. Hornbuckle, A. Van de Griend, P. Ferrazzoli, L. Guerriero, T. Pellarin, J.-C. Calvet, K. Saleh, Y. Kerr, A. Wiesmann, J. Pulliainen, M. Hallikainen, R. T. Tonboe, G. Heygster, L. T. Pedersen, S. Andersen, 2006 : Surface emission in thermal microwave radiation – applications for remote sensing. C. Mätzler, P.W. Rosenkranz, A. Battaglia and J.P. Wigneron (Eds.), *Institution of Electrical Engineers Electromagnetic Wave Series*, London, UK, Vol. 52, p 225-425.
133. J.-I. Yano, 2006 : Interactive comment on "Evaluation of a new convective cloud field model : precipitation over the maritime continent" by H.-F. Graf and J. Yang. *Atmos Chem. Phys. Discuss.*, vol 6, S1-S9.
134. Yates, E. S. Anquetin, V. Ducrocq, J.-D. Creutin, D. Ricard and K. Chancibault, 2006 : Point and areal validation of forecasted precipitation fields. *Meteorological Applications*. 2006 pp 1-20.
135. Zbinden R., J.-P. Cammas, Thouret V., Nédélec P., F. Karcher and P. Simon, 2006 : Mid-latitude tropospheric ozone contents from the MOZAIC programme : Climatology and inter-annual variability. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Page(s) 1053-1073. SRef-ID : 1680-7324/acp/2006-6-1053.
- Chosson, F., 2006 : Transfert radiatif dans les nuages de couche limite hétérogènes. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 27 février 2006.
- Dahoui, M., 2006 : Vers une assimilation variationnelle des radiances satellitaires nuageuses. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 19 juin 2006.
- Dufour, A., 2006 : Simulation et prévision de la qualité de l'air aux échelles continentale et régionale. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 11 décembre 2006.
- Paci, A., 2006 : Processus et variabilité méso-échelle de l'océan superficiel dans l'Atlantique nord-est dans le cadre du programme POMME. Thèse de doctorat de l'Université de Paris VI, discipline Océanographie Physique, soutenue le 29 juin 2006.
- Peyrille, P., 2006 : Etude idéalisée de la mousson de l'Afrique de l'Ouest à partir d'un modèle numérique bidimensionnel. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 20 janvier 2006.
- Rojas, S., 2006 : Etude du rôle des propriétés de surface de l'aérosol sur ses propriétés hygroscopiques appliquées à différents types de masse d'air. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 29 juin 2006.
- Samain, O., 2006 : Fusion des données multicateurs pour la réalisation des paramètres géophysiques de surface. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 30 janvier 2006.

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Déqué, M, 2006 : Contribution à l'étude de la formulation probabiliste des prévisions saisonnières. Habilitation à Diriger des Recherches auprès de l'Université Toulouse III, discipline Physique de l'Atmosphère, soutenue le 22 septembre 2006.

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://intranet.meteo.fr/bibliotheque/>, rubrique « documentations scientifiques et techniques ».

SOUTENANCE DE THÈSE

Auger, L., 2006 : Influence de la dynamique turbulente sur la cinétique chimique dans une couche limite atmosphérique polluée. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 26 juin 2006.

Belo Pereira, M., 2006 : « Estimation and study of forecast error covariances using an ensemble method in a global NWP model ». Thèse de doctorat en cotutelle entre l'UPS et l'Université d'Evora (Portugal), soutenue le 29/05/2006. Thèse ALADIN avec le support d'ALATNET.

Bouilloud, L., 2006 : Prévision de l'état de surface d'une chaussée en condition hivernale. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, discipline Océan Atmosphère et Environnement, soutenue le 13 octobre 2006.

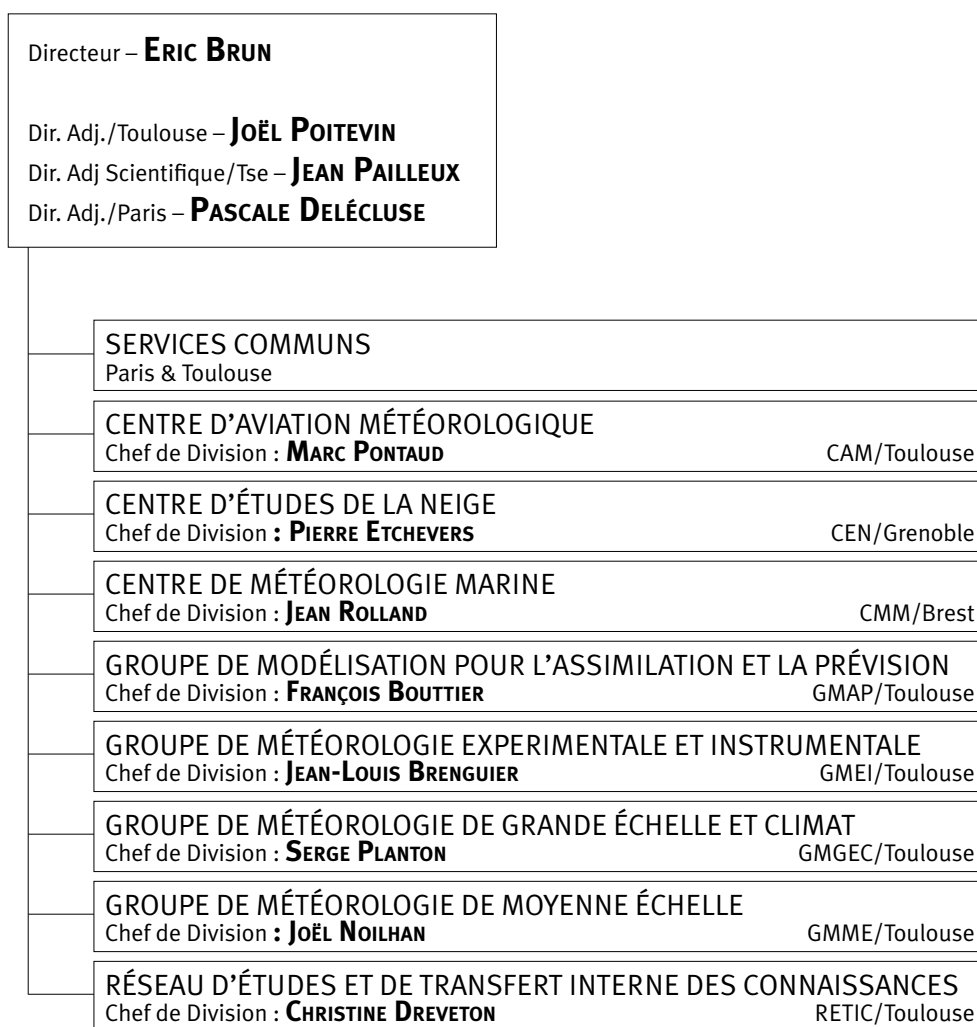
Brenot, H., 2006 : Potentiel de la mesure GPS SOL pour l'étude des pluies intenses méditerranéennes. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier (Grenoble), discipline géophysique, soutenue le 18 janvier 2006.

Acronymes et abréviations

3D-VAR	Assimilation variationnelle tridimensionnelle	DP	Direction de la Production (Météo-France)
4D-VAR	Assimilation variationnelle quadrimensionnelle	DRAST	Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques du ministère des transports
4M	Moyens Mobiles de Mesures Météorologiques	DSA	Détection Sismique des Avalanches
ACARS	Aircraft Communication Addressing and Recording System	DSI	Direction des Systèmes d'Informations (Météo-France)
ADEME	- Système de communication de messages aéronautiques	DSO	Direction des systèmes d'observation (Météo-France)
AEOLUS	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie	ECMWF	Sigle anglais pour CEPMMT (European Centre for Medium Range Weather Forecasts)
AIEA	Mission Lidar vent spatial	E SURFMAR	EUCOS Surface Marine
AIRS	Agence Internationale de l'Énergie Atomique	ECOLIMAP	Base de données de paramètres de surface
ALADIN	Advanced Infra-Red Sounder	EGOS	European Group on Oceanic Stations
ALADIN-NH	Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement International	ELMASIFA	Programmes d'études sur le climat du bassin méditerranéen
AMDAR	Version Non Hydrostatique d'Aladin	ENM	École Nationale de la Météorologie
AMIP	Aircraft Meteorological Data Relay. Ce programme de l'OMM vise à la récupération et à la valorisation des mesures météorologiques aéroportées.	ENSO	El Nino Southern Oscillation
AMMA	Atmospheric Model Intercomparison Project	ENVISAT	ENVironnemental SATellite (ESA)
AMMA-CROSS	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine	EPS	Satellite météorologique défilant européen
	Etude comparative entre comportements de modèles et observations sur une section (CROSS) Nord-Sud dans le cadre d'AMMA	ESA	European Space Agency
ARAMIS	Application RAdar à la Météorologie Infra-Synoptique	ESCOMPTE	Expérience sur Site pour Contraindre les Modèles de Pollution atmosphériques et de Transports d'Émissions
AROME	Application de la Recherche à l'Opérationnel à Mésio-Echelle	ESCRIME	Étude des scénarios climatiques réalisés par l'IPSL et Météo-France
ARPEGE	Applications de la Recherche Petite Échelle Grande Échelle	ETEX	Campagne liée au modèle de pollution Morage-Accident
	Modèle global de prévision numérique opérationnel de Météo-France	EUCOS	EUMetnet Composite Observing System
ARPEGE-CLIMAT	Modèle de recherche de Météo-France (CNRM) sur le climat	EUFAR	European Fleet for Airbone Research
AASQA	Associations agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air	EUMETNET	EUropean METeorological NETwork
ASSET	ASSimilation of Envisat data	EUMETSAT	EUropean organisation for the exploitation of METeorological SATellites
ATE	Analyse des Terres Émergées	EURO-SIP	EUROpean Seasonal Inter-annual Predictions - prévisions européennes saisonnières à interannuelles (projet du 6ème PCRD visant à créer un syst. Multimod.)
ATOVs	Sondeur embarqué sur les satellites de la NOAA	FASTEX	Front and Atlantique Storm-Track Experiment, Expérience sur le «rail» des dépressions atlantiques et les fronts conduite en Atlantique nord
ATR 42	Nouvel avion instrumenté de Météo-France	FULL POS	Logiciel de post traitement des résultats de modèles numériques
BATOS	Station automatique d'observation sur navire	GAME	Groupe d'Étude de l'Atmosphère Météorologique
CAPITOUL	Canopy and Aerosol Particles Interaction in Toulouse Urban Layer.	GELATO	Modèle dynamique et thermodynamique de banquise
CARBOEUROPE	Campagne expérimentale sur les flux de gaz carbonique	GELCRO	Projet portant sur les interactions entre neige et chaussée
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique	GEOLAND	GEOphysical LAND surface products at regional and global scales
CEN	Centre d'Essais Atomiques	GIEC	Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat (IPCC en anglais)
CEPMMT	Centre d'Études de la Neige (Météo-France)	GMAP	Groupe de Modélisation pour l'Assimilation et la Prévision
	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme	GMEI	Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale
CEREA	Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement	GMES	Initiative de surveillance européenne de l'environnement et des risques naturels (Global Monitoring for Environment and Security)
CERES	Atmosphérique, laboratoire commun ENPC et EDF R&D	GMGEC	Groupe de Météorologie de Grande Échelle et Climat
CERFACS	CarboEurope Regional Experiment Strategy	GMME	Groupe de Météorologie de Moyenne Échelle
	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique	GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite (NASA)
CESBIO	Centre d' Études Spatiales de la BIOSphère	GPS	Global Positionning System
CMM	Centre de Météorologie Marine (Météo-France)	GRIB	GRId Binary data
CMS	Centre de Météorologie Spatiale (Météo-France)	HIRLAM	High Resolution Limited Area Model - Modèle de prévision numérique à aire limité
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales	HIRS	High Resolution Infrared Radiation Sounder
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques (Météo-France)	IAGOS	Integration of routine Aircraft measurements into a Global Observing System
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique	IASI	Interféromètre infra rouge satellital
COBEL	COde de Brouillard à l'Échelle Locale	ICE	International Cirrus Experiment
CORINE	COordination of INformation on the Environment	IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER
CORIOLIS	Projet International visant à coordonner l'observation océanographique (in-situ et télédétection)	IGBP	International Geosphere Biosphere Program
	Consortium for Small scale MOdelling (modélisation)	INERIS	Institut National de l'Environnement et des Risques
COSMO	Coopération Européenne Scientifique et Technique	INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
COST	Modèle d'évolution du manteau neigeux	IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
CROCUS	CYClogenèses et PRécipitations Intenses en région Méditerranéenne	IRD	Institut de Recherche pour le Développement
CYPRIM	Development of an European Multimodel Ensemble system for seasonal to inTERannual prediction	ISBA	Interaction sol-végétation-atmosphère
DEMETER	DIAGnostic PACKAge : Logiciel d'analyse pour la prévision immédiate		
DIAGPACK	Deutsche zentrum für Luft und Raumfahrt		
DLR	Danish Met Institute		
DMI			

JASON	Satellite de mesures océanographiques	RETIM	Réseau TéléInformatique Météorologique : système de diffusion satellitaire
KNMI	Institut royal météorologique des Pays-Bas	SADIS	Système de Distribution de Données Aéronautiques
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées	SAF	Satellite Application Facilities
LEGOS	Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales	SAFIRE	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement
LGGE	Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement	SAFRAN	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige
LIDAR	Light Induced Detection And Ranging	SAMHA+	Station Automatique de Mesure de paramètres Hydrologiques et Aérologiques
LISA	Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques	SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager (MSG)
LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique	SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
LOCEAN	Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentation et Approches Numériques	SIG	Système d'Information Géographique
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement	SIM	Modèle couplé Safran Isba Modcou
MEDD	Ministère de l'Écologie et du Développement Durable	SIO	Scripps Institution of Oceanography
MEDIA	Modèle Eulérien de Dispersion Atmosphérique	SIRTA	Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique, service d'observation muni d'un ensemble d'instruments de télédétection implantés à Palaiseau
MEPRA	Modèle Expert de Prévision du Risque d'Avalanche		
MERCATOR	Projet de modèle opérationnel de l'océan mondial à très haute résolution	SMDSM	Système Mondial de Détresse et de Sécurité en Mer
MERSEA	Marine Environment and Security for the European Area	SMF	Société Météorologique de France
MESO-NH	Modèle à MÉSO-échelle Non Hydrostatique	SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity
METEOSAT	Satellite météorologique géostationnaire (Europe)	SMOSREX	Surface Monitoring of the Soil Reservoir Experiment
MET- OFFICE	Service Météorologique Anglais	SODAR	Sonic Detection and Ranging system
METOP	Futur satellite européen défilant à orbite polaire	SOP	Période d'Observations intensives (campagne AMMA)
MINOS	Station de mesure installée sur le navire Tara	SSM/I	Imageur micro-ondes du satellite DSMP
MM5	Modèle de prévision météorologique du NCAR (USA)	SST	Température de Surface de la Mer
MOCAGE	MOdélisation de la Chimie Atmosphérique de Grande Échelle (modélisation)	SURFEX	Surface Externalisée
MODCOU	MODèle hydrologique COUplé surface-souterrain.	SYNERGIE	Système Numérique d'Exploitation Relationnelle et de Gestion Interactive et Évolutive (poste de travail du prévisionniste à Météo-France)
MOTHY	Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures		
MSG	Satellite Météosat de Seconde Génération	TBM	Terrestrial Biogeochemical Model (modélisation)
NAO	Oscillation Nord-Atlantique (l'indice NAO, valeur allant de -5 à +5, représente une différence de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande)	TEB	Town Energy Budget
NASA	National Administration Space Agency		
NCAR	National Center of Atmospheric Research	THORPEX	The Observing system Research and Predictability Experiment
NCEP	National Centers for Environmental Prediction	TOGA-COARE	Tropical Ocean and Global Atmosphere-Coupled Ocean Atmosphere REsponse
NIVOSE	Station automatique de Haute montagne	TOMS	Total Ozone Mapping Spectrometer (Nasa)
NOAA	National Ocean and Atmosphere Administration		
NSF	National Science Foundation	TOPEX	Spectromètre imageur d'ozone total
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale	POSEIDON	TOPography of the ocean EXperiment
OASIS	Programme de couplage de modèles atmosphérique et océanique		
OLIVE	Outil de Lancement Interactif et de Visualisation d'Expériences	TOVS	Satellite franco-américain d'observation de la Terre
OMM	Organisation Météorologique Mondiale	UHF	Tiros Operationnal Vertical Sounder
OMP	Observatoire Midi-Pyrénées	UKMO	Ultra High frequency
ONERA	Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales	UTC	Meteorological Office of United Kingdom
OPA	Océan PARallélisé	VAAC	Temps Universel Coordonné
	Modèle de simulation océanique	VHAC	Volcanic Ash Advisory Center
PALM	Projet d'Assimilation par Logiciel Multi-méthodes	VHF	Very High Frequency
PCRD	Programme Cadre de Recherche et Développement		
PEARP	Prévision d'Ensemble ARPège		
PERLE	Modèle de modélisation de la dispersion des polluants		
PIRATA	Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic		
PNTS	Programme National de Télédétection Spatiale		
POI	Période d'Observation Intensive		
POLDER	Polarization and Directionality of the Earth's Reflectance		
POMME	Programme Océanographique Mutidisciplinaire Méso-Échelle		
PREV'AIR	Prévisions et observations de la qualité de l'air en France et en Europe (MEDD)		
QUICKSCATT	Diffusiomètre embarqué sur satellite		
RADOME	Réseau d'Acquisition de Données d'Observations Météorologiques Étendu		
RDT	Rapid Developping Thunderstorm, produit de prévision des orages à partir des données de MSG		
RETIC	Réseau d'Études et de Transfert Interne de la Connaissance		

Organigramme du 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> - Mail : contact@cnrm.meteo.fr

Édition Météo-France
Direction commerciale et de la communication.
Achevé d'imprimer sur du papier écologique, sur les presses de l'imprimerie de Météo-France D2C/IMP, labellisée Imprim'vert®.
Direction artistique et maquette www.be-poles.com



Météo-France 1 quai Branly 75340 Paris Cedex 07 Tél. 01 45 56 71 71 Fax. 01 45 56 70 05 - www.meteo.fr
Météo-France est certifié ISO 9001-2000 par BVQI - © Météo-France, 2007 - Dépôt légal mai 2007 - ISSN 1166-732 X



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance