

# Sommaire



Editorial	p. 2
Modèles pour la prévision	p. 4
Etude des phénomènes météorologiques	p. 10
Etude du climat et du changement climatique	p. 18
Etudes environnementales liées à l'atmosphère	p. 22
Instrumentation pour la recherche	p. 36
Organigramme du CNRM	p. 40



# Editorial

L'année 2005 a marqué un tournant dans la prise de conscience de la société vis à vis de la gravité des problèmes posés par le changement climatique. Cela s'est traduit notamment par une sollicitation sans précédent des scientifiques de Météo-France pour intervenir sur les médias à ce sujet, en particulier lors de l'épisode de forte chaleur de juin qui a frappé la France, durant la saison cyclonique particulièrement active en Atlantique et en fin d'année 2005 dans le contexte de la Conférence des parties qui s'est tenue à Montréal.

Le CNRM est évidemment très fier de contribuer à la consolidation des bases scientifiques qui permettent d'aborder ce problème de société en toute objectivité et de limiter autant que possible les incertitudes sur les conséquences possibles du changement climatique pour notre planète, en particulier pour la France. Cette contribution porte sur de nombreux domaines et fait l'objet de coopérations étroites, notamment avec la Direction de la Climatologie, le Cerfacs, l'IPSL et de nombreux organismes de recherche et services météorologiques européens.

Dans le domaine général de l'étude du changement climatique, les équipes de Météo-France ont fait aboutir plusieurs projets importants :

- l'analyse et la publication des premiers résultats des simulations de scénarios climatiques réalisées par le CNRM avec le modèle Arpège-Climat dans le cadre de notre contribution au 4e rapport du Giec qui sera publié en 2007. Cette analyse, incluant les résultats du modèle LMDZ de l'IPSL, consolide de façon générale l'hypothèse d'un réchauffement considérable de 3 à 5°C à attendre d'ici la fin du XXIème siècle sur l'Europe dans le cadre du scénario A2 basé sur la poursuite de l'augmentation à un rythme soutenu des gaz à effet de serre.
- la fin du projet Imfrex sur l'impact du changement climatique sur les extrêmes dans le cadre du programme GICC (Gestion des Impacts du Changement Climatique) du MEDD. Ce projet a notamment porté sur les fréquences des vagues de chaleur, des tempêtes et des cyclones dans le cadre de différents scénarios de changement climatique. Les résultats de ce projet fournissent des résultats de première importance pour la

Eric Brun, Directeur de la recherche, présente les activités du CNRM à Pierre-Etienne Bisch, PDG de Météo-France, lors de sa récente prise de fonction.



définition par les organismes concernés de certaines mesures d'adaptation qu'il est nécessaire d'anticiper.

- la modélisation de l'évolution du manteau neigeux à partir des réanalyses du CEPMMT sur la période de 1958 à 2002. Cette étude a permis de reconstituer par modélisation numérique du manteau neigeux la climatologie nivale des Alpes françaises. Elle constitue ainsi une source d'informations de première importance pour l'étude de l'évolution récente de l'enneigement et du climat dans les Alpes françaises. Dans le cadre d'une collaboration avec le CNRM, le LGGE a utilisé cette modélisation pour simuler de façon réaliste le bilan de masse de deux glaciers des Alpes du Nord. Le recours à des méthodes essentiellement basées sur la physique a permis d'établir des scénarios possibles d'impact du changement climatique sur le bilan de masse et confirmé la forte probabilité de voir disparaître d'ici la fin du siècle bon nombre des glaciers français, et ceci même si l'augmentation des gaz à effet de serre se poursuivait selon un scénario aussi modéré que le scénario B1 du Giec.

- La campagne expérimentale Ceres/Carbo-Europe sur les flux de gaz carbonique. De nombreuses équipes du CNRM se sont fortement impliqués dans la coordination et la réalisation de cette phase du programme européen Carbo-Europe. La campagne expérimentale, qui s'est déroulée dans les Landes en juin 2005, a permis de mesurer à partir de systèmes d'observations au sol et sur avion les concentrations en CO<sub>2</sub> et les flux correspondants à l'interface sol/végétation-atmosphère. Même si ce projet de recherche ne concerne pas directement le changement climatique, le jeu de données ainsi collecté va permettre d'étudier et de modéliser à très fine échelle les flux naturels de gaz carbonique et de vapeur d'eau en lien avec les conditions météorologiques, l'état de la végétation et l'humidité des sols. Cette étape est indispensable pour le développement de futurs modèles de climat simulant de façon interactive les gaz à effet de serre. La qualité des données météorologiques collectées durant cette campagne permet également de tester la capacité des modèles Mésos-NH et Arome à représenter l'évolution détaillée de la couche limite atmosphérique.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Eric Brun'.

Eric Brun

L'année 2005 a vu la poursuite des développements approfondis sur le modèle Arome et de nombreuses avancées en terme d'assimilation de données. Enfin, les efforts ont été poursuivis en matière de prévision saisonnière.

## Prévision numérique synoptique

### Mise en service d'une d'assimilation de données à haute résolution dans le système de prévision Aladin sur la métropole

Le modèle Aladin est le fruit de la collaboration de Météo France et des services météorologiques de quatorze pays. Il fournit aux prévisionnistes une information d'échelle fine sur un domaine limité.

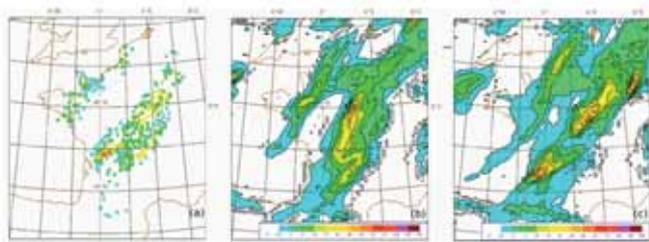
Jusqu'à présent, Aladin démarrait sa prévision à partir de conditions initiales fournies par le modèle de prévision global Arpège. Depuis le 25 juillet 2005 le modèle Aladin opérationnel est pourvu de sa propre assimilation de données. Ainsi, l'état initial de l'atmosphère fourni au modèle (l'analyse) bénéficie d'un apport d'information amené par des observations indépendantes. Celles ci sont de tous types, tant des observations « traditionnelles » comme les radiosondages, que des observations satellitaires.

Des développements ont été nécessaires, par exemple pour que l'information amenée par les observations soit exploitée au mieux par un modèle à échelle fine. Un autre effort a porté sur la prise en compte de nouvelles observations. Aladin est le premier des modèles exploités par Météo France à prendre en compte dans sa chaîne opérationnelle les observations provenant de l'instrument Seviri du satellite MSG.

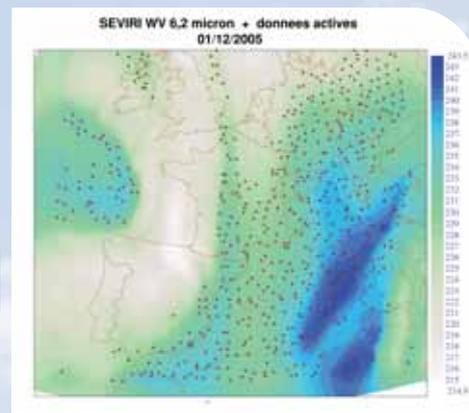
Des résultats encourageants sanctionnent les deux années d'efforts nécessaires à cette mise en place : l'assimilation réduit l'erreur commise au cours des douze premières heures de prévision. Cela est particulièrement vérifié pour les paramètres vent et température.

D'autre part, des études de cas ont révélé que la structure des zones pluvieuses prévues par le modèle, leur localisation et leur réalisme, sont améliorées par l'assimilation d'observations (figure).

L'assimilation de données d'Aladin, qui préfigure l'assimilation du futur modèle à échelle fine Arome, reste un domaine important de recherche et de développement au CNRM.



Température de brillance (en °K) observée par le canal WV 6,2 microns de Seviri le 1<sup>er</sup> décembre 2005 à 18 UTC. Les points représentent les pixels pris en compte dans la minimisation 3Dvar de Aladin.



### Importance des données Météosat dans l'assimilation de données Aladin

Depuis le 25 juillet dernier, Aladin, le modèle opérationnel de prévision à maille fine de Météo-France, fonctionne avec son propre cycle d'assimilation de type 3D-Var. L'utilisation d'un cycle d'assimilation, basé sur un système variationnel adapté à sa plus haute résolution, permet dorénavant à Aladin de tenir compte à la fois des structures atmosphériques de petite échelle engendrées par la prévision à 6 h du réseau précédent (l'ébauche) et des observations à petite échelle. Concernant ce dernier point, Aladin se démarque du modèle Arpège en prenant en compte, à haute résolution, les radiances infrarouges mesurées dans cinq canaux du radiomètre Seviri embarqué sur le satellite géostationnaire Météosat 8. Une classification nuageuse produite par le CMS permet de conserver uniquement les observations non contaminées par les nuages lors de la minimisation (figure).

Ce radiomètre (notamment les canaux sensibles à l'émission dans la vapeur d'eau) permet de recalculer quatre fois par jour le modèle vers un état plus proche de ce qui est observé. Il en résulte un réalisme accru de l'état initial d'Aladin et, par suite, de ses prévisions. Cette avancée permet une amélioration sensible de la qualité des prévisions Aladin pour les 12, voire 18 premières heures d'échéance sans dégradation des performances au-delà.

Cette avancée est importante pour une gamme d'échéances de prévision cruciale en matière de sécurité et constitue une étape décisive pour l'assimilation de données du futur modèle Arome qui permettra d'effectuer opérationnellement des prévisions à très fine échelle à l'horizon 2008.

Observations pluviométriques (a) comparées à des prévisions Aladin de cumuls de pluie entre 6h et 12h de prévision sans assimilation (b), et avec assimilation (c), pour la journée du 18 juillet 2004.

## Optimisation statistique du poids des différents types d'observation dans l'assimilation des données Arpège

Le but des systèmes d'assimilation de données est de chercher une description de l'atmosphère proche de l'ensemble des données disponibles, tout en prenant en compte les précisions respectives de ces différentes sources d'information. Ces précisions sont introduites dans le schéma d'analyse sous la forme de statistiques d'erreur d'observation. Alors que ces statistiques sont relativement bien connues pour des données conventionnelles, comme celles fournies par les radiosondages, les statistiques de données nouvelles comme celles associées aux instruments satellite sont beaucoup moins bien estimées.

D'autre part, le contrôle de la qualité des observations se fait en les comparant à une prévision du modèle, qui nécessite de connaître également la statistique de l'erreur de prévision à l'emplacement de ces observations. Ces statistiques d'erreur de prévision ne sont pas, de la même manière, parfaitement connues, ce qui peut jouer sur la prise en compte d'observations erronées ou au contraire le rejet d'observations pertinentes.

En s'appuyant sur la cohérence statistique des analyses vis-à-vis de ces erreurs spécifiées pour les observations, nous avons proposé une méthode simple et peu coûteuse pour optimiser la spécification de ces erreurs.

La méthode a été appliquée à l'ensemble des données assimilées par l'analyse opérationnelle associée au modèle global Arpège. Les nouvelles statistiques ainsi réglées apparaissent cohérentes et pourront être prises en compte dans le processus d'analyse. On observe en particulier que la précision des données satellite étaient préalablement plutôt sous-estimée. La précision des données conventionnelles, comme les données des radiosondages, est également légèrement re-calibrée.

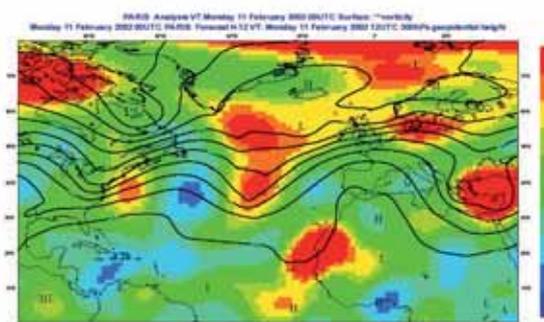
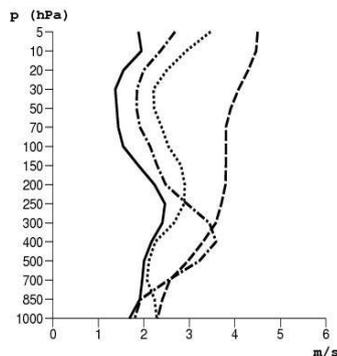
## Une technique ensembliste prenant en compte la prévisibilité de l'atmosphère dans l'assimilation de données Arpège

Les systèmes d'assimilation de données tels que ceux des modèles Arpège et Aladin permettent de corriger les prévisions à l'aide des observations. Cela est fait en tenant compte notamment des écarts types d'erreur de prévision. La correction apportée par les observations est ainsi plus forte dans les régions où la prévision est plus incertaine. L'amplitude des erreurs de prévision varie en effet assez fortement en fonction de la situation météorologique locale. Les écarts types tendent notamment à être plus grands lorsque la situation météorologique est instable, ce qui n'est pas pleinement pris en compte dans le système d'assimilation actuel.

Une méthode basée sur un ensemble d'assimilations perturbées a été mise en oeuvre pour estimer ces variations spatio-temporelles d'écart type. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure, qui représente les écarts types d'erreur du tourbillon à 500 hPa, superposés avec le champ de géopotentiel à cette altitude. Il apparaît que les écarts types sont plus forts dans les régions instables (thalwegs, ...) que dans les régions stables (dorsales, ...).

Ces résultats ont été obtenus avec un ensemble de petite taille, réduit à six membres. Cela permet d'envisager une mise en oeuvre opérationnelle d'un tel ensemble à faible coût. Une technique de filtrage spectral a été appliquée pour extraire les grandes structures spatiales, qui sont celles qui s'avèrent les plus robustes statistiquement. Le recours à un petit ensemble et à ces techniques d'extraction du signal s'avère donc une voie prometteuse pour estimer et représenter la dépendance des incertitudes de la prévision en fonction de la situation météorologique. Au-delà de l'optimisation du système d'assimilation, cela peut aussi permettre de caractériser la prévisibilité des différents événements météorologiques.

Profils verticaux des erreurs pour le vent des radiosondages. Les courbes en trait tireté et pointillé correspondent respectivement aux erreurs d'observation avant et après réglage. De la même manière, les courbes en trait tireté-pointillé et plein correspondent respectivement aux erreurs de prévision à l'emplacement des observations avant et après réglage.



Écarts types des erreurs de prévision du tourbillon à 500 hPa (en couleurs), superposés au géopotentiel (en isolignes). Les fortes valeurs d'écart type (en rouge) apparaissent près des thalwegs, tandis que les faibles valeurs (en bleu) se trouvent près des dorsales.

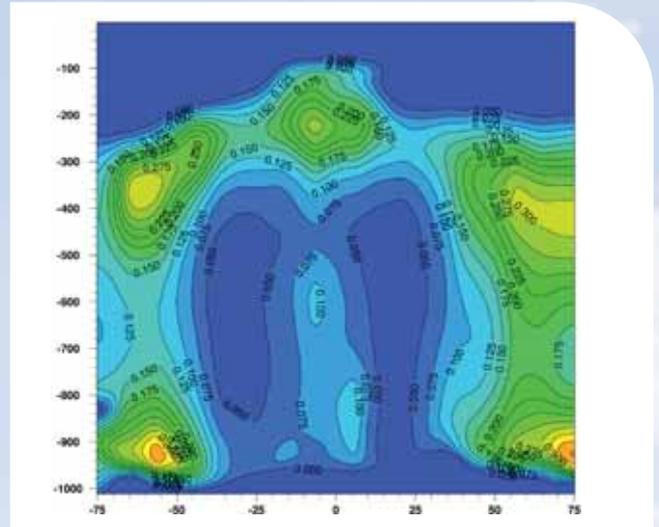
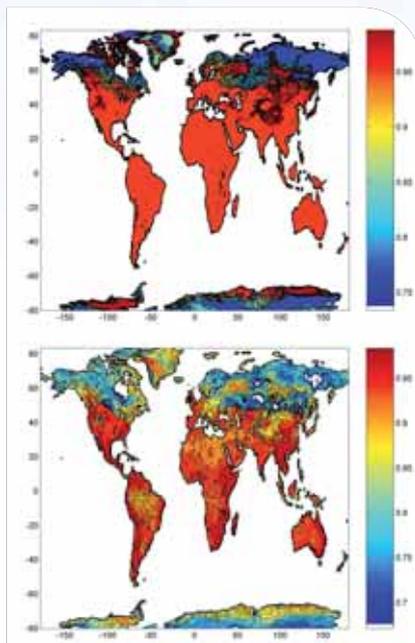
## Impact d'une meilleure estimation de l'émissivité de surface sur les continents

La constellation des satellites d'observation de la Terre s'est enrichie régulièrement depuis trente ans. Ces satellites permettent l'acquisition de données sur l'ensemble du globe avec des fréquences de mesures adaptées aux besoins des modèles de prévision du temps. A l'origine, ces observations ont été effectuées dans le domaine du visible et de l'infrarouge. Par la suite, des instruments micro-ondes ont été développés. Les observations micro-ondes sont moins sensibles aux nuages que les mesures infrarouge et visible. Toutes ces observations peuvent ainsi être combinées de façon optimale afin d'améliorer la description de l'atmosphère pour alimenter les modèles de prévision.

Aujourd'hui, cependant, malgré leur contenu en information, l'exploitation des observations micro-ondes et infra-rouge reste limitée aux canaux non sensibles à la surface. Cette restriction, plus importante au-dessus des continents, s'explique par la difficulté de séparer les contributions de la surface et de l'atmosphère dans le signal mesuré par le satellite.

De récents travaux menés au CNRM ont porté sur l'amélioration de la caractérisation de la surface continentale par le biais de l'émissivité de surface en vue de l'assimilation des radiances micro-ondes et infrarouge sur les continents. La figure compare les atlas d'émissivité de surface dans la situation actuelle et pour une nouvelle configuration de la surface. Avec cette nouvelle configuration de la surface, on montre qu'il est possible d'assimiler beaucoup plus d'observations satellitaires. En effet, une meilleure modélisation de la surface permet de mieux simuler « l'équivalent modèle » des observations et par conséquent de mieux les prendre en compte lors de l'assimilation. Cette avancée contribuera à l'amélioration des prévisions.

Emissivité moyenne de surface en mars 2005 pour le canal 15 du radiomètre AMSU-A : définie dans le système opérationnel (en haut), et avec une nouvelle configuration de surface (en bas).



Fraction nuageuse en moyenne zonale obtenu avec le schéma microphysique pronostique sur janvier 2005.

## Utilisation d'une microphysique pronostique dans les modèles Arpège et Aladin

Dans le cadre de l'action CNRM/Game visant au développement d'une physique commune pour la prévision opérationnelle du temps et la simulation du climat, le schéma pronostique de nuages et de précipitations résolues, développé dans le cadre d'une thèse effectuée au CNRM, a été testé intensivement. Ce schéma inclut un schéma statistique de nuages pour décrire la condensation et l'évaporation nuageuses et représente les processus microphysiques d'autoconversion, de collection, d'évaporation, de sublimation et de fonte associés aux précipitations. L'évolution temporelle de l'eau nuageuse (liquide et solide) et l'eau précipitante (pluie et neige) est réalisée de manière pronostique pour une description temporelle plus exacte des processus physiques. L'utilisation d'un schéma d'advection verticale semi-lagrangien pour traiter la chute des précipitations est un point fort et original du schéma car il permet l'utilisation de longs pas de temps associés aux prévisions opérationnelles.

Plusieurs modifications importantes du schéma ont été réalisées pour améliorer sa précision et sa robustesse. La validation a été réalisée conjointement avec le schéma de rayonnement opérationnel au CEPMMT également utilisé dans Méso-NH et Arome et le schéma de turbulence modifié pour diffuser les variables conservatives nuageuses.

Ces nouvelles paramétrisations physiques sont en phase de tests pré-opérationnels. Les bénéfices attendus sont une amélioration de la prévision des nuages (cirrus et nuages bas). La surestimation des précipitations sur relief est réduite et la structure spatiale des champs de pluie est améliorée. Enfin l'utilisation d'une microphysique pronostique présente également un potentiel important pour l'assimilation des radiances nuageuses, des réflectivités radars et le couplage du modèle Arome.

## Swapp/Olive : un cadre logiciel pour le lancement et le suivi des expériences de Prédiction Numérique

Les applications d'assimilation de données et de prévision numérique sont des systèmes à l'ordonnancement complexe nécessitant de larges ressources informatiques, potentiellement distribuées. La capacité de mise en oeuvre de tels systèmes par une large communauté d'utilisateurs requiert un cadre logiciel spécifique.

Le CNRM a donc initié un projet afin de disposer d'un Outil de Lancement Interactif et de Visualisation d'Expériences (Olive). Le caractère très générique de nombreuses spécifications a conduit à développer un environnement logiciel capable de servir de réceptacle à des applications de ce type. Ce système, baptisé Swapp, est conçu comme un VFS (Virtual File System) structuré de façon analogue à l'arborescence des répertoires et des fichiers Unix, mais dont les composants sont des objets Perl stockés dans des bases de données rapides. Les méthodes d'accès sont multiples : intranet / internet au travers de serveurs Apache, en ligne de commande ou par une interface de programmation.

Olive permet à des utilisateurs toujours plus nombreux (chercheurs, stagiaires Aladin) de s'associer dans une communauté de travail pour concevoir, partager, paramétrer et exécuter aisément leurs expériences, avec une efficacité accrue. Les tâches de calcul associées sont lancées sur un ensemble de machines cibles (super-calculateurs, serveurs Linux, etc.) par l'entremise de l'utilitaire SMS (Scheduling and Monitoring System) du CEPMMT. Un miroir des sorties d'expériences, associé à une politique d'archivage personnalisée, est également disponible. Enfin, des applicatifs de diagnostics physiques, de visualisation et de calcul de scores complètent l'environnement de Swapp/Olive.

## Prédiction numérique Mésoscale

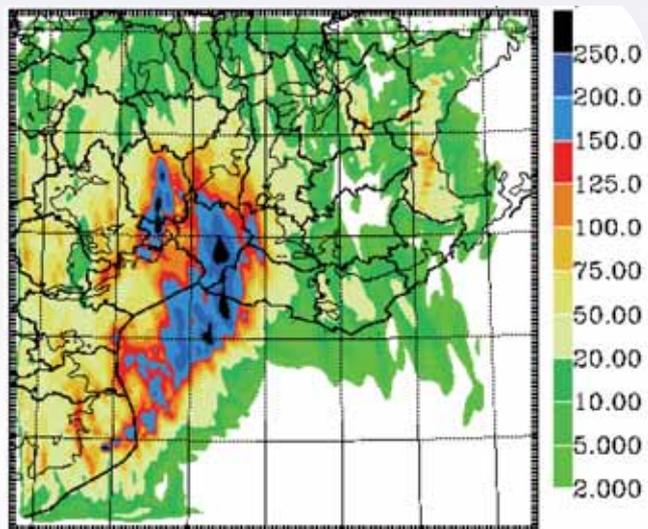
### Première expérimentation quotidienne du modèle Arome en mode prévision

Depuis juin 2005 sur le quart sud-ouest de la France, et depuis septembre 2005 sur le quart sud-est, un prototype du futur modèle opérationnel à échelle fine Arome est testé quotidiennement.

Ce prototype, à 2.5km de résolution, qui utilise la dynamique Non-Hydrostatique du modèle Aladin ainsi qu'une physique provenant du modèle de recherche Mésoscale-NH, effectue des prévisions à 24h d'échéance. A cette résolution, la convection profonde est supposée explicitement résolue. Démarrant de l'analyse opérationnelle Aladin du réseau de 00 UTC, il est couplé toutes les 3 heures avec les prévisions d'Aladin France.

Parmi les 300 prévisions réalisées, aucune explosion numérique n'a été à signaler.

L'examen des résultats du modèle reste pour l'instant subjectif avec l'étude de situations particulières, mais des calculs de scores objectifs seront développés en 2006. Des cas de bonnes, mais aussi de mauvaises prévisions ont été observés. Sur un événement météorologique majeur de 2005, la situation de vigilance rouge du 6 septembre, Arome a été capable de bien localiser le maximum de précipitations sur le Gard. Il a reproduit une évolution temporelle réaliste de l'arrivée, de la stationnarisation et de l'évacuation du système convectif vers l'est. D'ici la mise en opérationnel d'Arome en 2008 grâce au nouveau calculateur, l'aire du domaine géographique sera multipliée par 4 pour couvrir la France métropolitaine. L'amélioration de la physique sera poursuivie, et Arome sera doté d'un système d'assimilation de données de mésoéchelle. Ce système d'assimilation, dont est dépourvu le prototype actuel, sera développé en 2006.



Cumul de précipitations en 24h prévu par le prototype Arome pour la journée du 6 Septembre 2005.

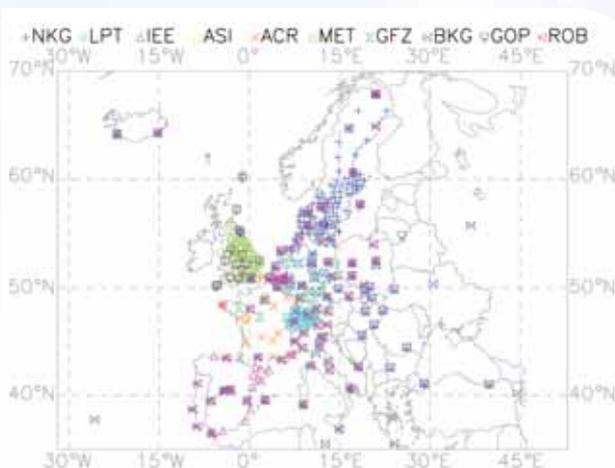
## Impact sur la prévision numérique des données issues de réseaux européens de stations GPS

Depuis 2004, Météo-France reçoit en temps réel des données de plus de 300 stations européennes réceptrices de signaux du Global Positioning System (GPS). On peut en effet obtenir pour chaque station réceptrice une mesure du délai zénithal total induit par l'atmosphère (ZTD en anglais). Le ZTD est la superposition de deux signaux météorologiques : poids d'une colonne d'air (ou pression de surface) et contenu intégré en vapeur d'eau. La principale caractéristique des données de ZTD reçues est leur haute résolution temporelle de 5 à 60 minutes. De plus, toute l'Europe est aujourd'hui couverte.

Les études passées d'assimilation des observations GPS de ZTD dans les modèles de prévision numériques européens avaient donné des résultats positifs dans les cas de précipitations intenses. Toutefois, l'impact dans les cas de précipitations non intenses était plus mitigé.

A l'aide d'un pré-traitement strict des données de ZTD et d'une utilisation optimale de l'information temporelle grâce à l'assimilation 4DVAR dans le modèle de prévision Arpège, les résultats obtenus se démarquent des études précédentes. Sur trois saisons différentes, les prévisions obtenues lorsque les données GPS de ZTD sont utilisées présentent des erreurs réduites en terme de prévision des géopotentiels, mais aussi de prévision des précipitations entre 12 et 36 heures d'échéance.

Cette étude se situe dans le contexte où l'augmentation de la résolution des modèles nécessite des observations à toujours plus haute résolution, à la fois spatiale et temporelle. D'ici fin 2006, le réseau Teria d'une centaine de stations GPS sera déployé sur la France. Les retombées seront multiples pour la recherche, à la fois pour les risques sismiques et météorologiques.



Carte des stations GPS européennes dont les données sont disponibles pour la météorologie.

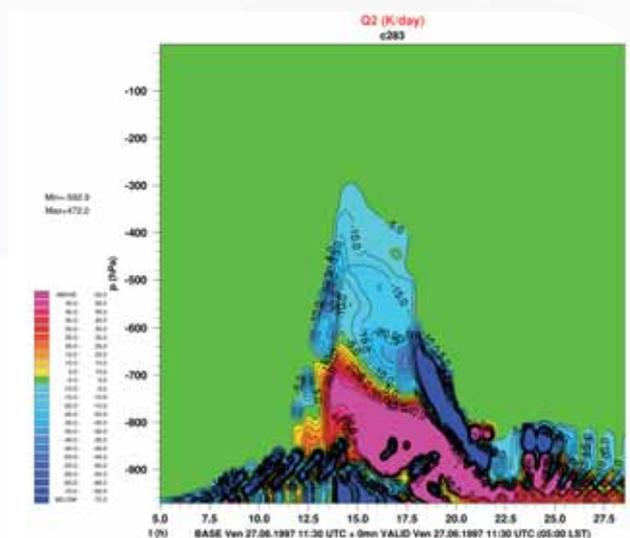
## Un verrou saute dans la prévision du cycle diurne de la convection orageuse

La convection atmosphérique est un phénomène connu de tous qui se manifeste, à nos yeux, par ses cumulus "de beau temps". Lorsqu'elle est puissante, la convection entraîne la transformation des simples cumulus en nuages bien plus épais, les cumulonimbus. Mais en combien de temps et par quel mécanisme ? Ce point mobilise la communauté de recherche internationale depuis plusieurs années, car le problème est plus complexe qu'on pourrait le croire a priori.

Les observations indiquent qu'il s'écoule huit heures en moyenne entre la formation des premiers cumulus (vers 11h locales) et l'extension verticale maximale des nuages convectifs (vers 19h locales). Le mécanisme précis de cette transition étant mal compris, l'ensemble des modèles de prévision numérique sous-estime à ce jour cette durée, prévoyant ainsi des cumulonimbus trop tôt dans la journée.

Les résultats de travaux récents effectués au sein du projet de recherche européen Eurocs viennent d'apporter, à l'aide de modèles à très haute résolution, une contribution significative à cet effort en permettant de comprendre que la croissance graduelle des cumulus en cumulonimbus est un mécanisme collectif, faisant intervenir plusieurs nuages : l'évaporation des précipitations des uns joue un rôle central dans le développement des autres. Ce mécanisme indirect met du temps à se mettre en place, d'où le retard observé.

Ce mécanisme étant compris grâce aux modèles à très haute résolution, il devient possible d'en déduire un concept simplifié, représentable dans un modèle moins coûteux (Arpège, 10000 fois moins coûteux), permettant d'espérer dans un futur proche de prévoir ce temps de retard convectif avec les modèles opérationnels de prévision du temps (figure).



Assèchement convectif simulé à l'aide du nouveau concept, et du modèle le moins coûteux Arpège. L'horizontale représente le temps, en heures solaires locales, la verticale l'altitude. Le modèle simule bien un développement graduel des nuages (visible par le sommet de la zone bleutée), s'étalant de 8h du matin à 16h (alors que la plupart des modèles opérationnels actuels prévoient sur ce cas une extension rapide dès le matin : entre 8 et 11h).

## Première école Arome à Poiana Brasov, Roumanie (21-25 novembre 2005)

Organisée conjointement par le CNRM et le NMA (National Meteorological Administration) de la Roumanie, la première école Arome s'est tenue à Poiana Brasov du 21 au 25 novembre 2005. Cette école a réuni une cinquantaine de participants regroupant une vingtaine de nationalités différentes appartenant aux principaux consortiums européens de prévision numérique appliquée au domaine de l'aire limitée (Aladin, Hirlam et Cosmo). Les aspects généraux et techniques d'Arome ont été présentés ainsi que les aspects plus scientifiques au cœur du modèle. En particulier, ont été abordées la dynamique non-hydrostatique avec le concours de nos partenaires Aladin et la physique du modèle avec également la participation d'intervenants issus de la communauté Méso-NH. Cette première école a permis de former et de motiver nos partenaires à l'utilisation d'Arome. Elle a également été l'occasion de rassembler une première documentation scientifique et technique du modèle Arome.



Les participants de la première école Arome à Poiana Brasov.

## Signature méridienne des modèles de grande échelle sur l'Afrique de l'Ouest : Amma-Cross

Les forts gradients méridiens de surface rencontrés en Afrique de l'Ouest induisent des circulations atmosphériques spécifiques, telles le Jet d'est africain (JEA). La variabilité inter-annuelle de la mousson s'y accompagne de modifications de ces structures de base. La variabilité synoptique est dominée par les ondes d'est africaines, elles-mêmes reliées dynamiquement au Jet (JEA). La structure et la variabilité de ces signatures de grande échelle résultent d'interactions complexes avec les processus intervenant au niveau du sol et de la surface, et les processus convectifs, interactions qui se manifestent à différentes échelles.

L'objectif est ici de préciser la capacité des modèles de grande échelle (MCG) à reproduire ces structures fondamentales de la mousson et leurs variabilités intra-saisonnière et inter-annuelle. Une bande nord-sud est utilisée pour confronter les simulations climatiques avec les ré-analyses et des produits d'observation sur deux années contrastées, 2000 (sèche) et 2003 (humide). La figure montre que les simulations climatiques reproduisent qualitativement les structures dynamiques analysées. Elles s'en écartent quantitativement cependant, et de plus, elles diffèrent entre elles, par exemple sur la position et l'intensité du Jet (JEA). Ces différences expliquent en partie le désaccord observé sur les champs de pluie simulés, en termes d'extension méridienne. Les ré-analyses ne fournissent pas de meilleurs résultats sur ce point. Finalement, certains modèles reproduisent une variabilité inter-annuelle cohérente avec l'observation. Les produits d'observation élaborés dans le cadre d'Amma permettront de relier ces signatures aux bilans énergétiques, et de préciser leur réalisme dans les simulations.

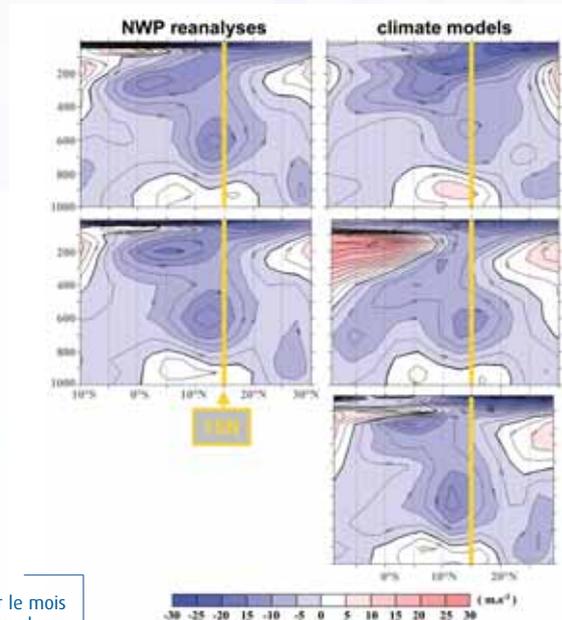


Diagramme latitude-altitude du vent zonal en moyenne sur le mois d'août 2000 pour la bande [10°O,10°E], à gauche issu des réanalyses Era-40 et NCEP/NCAR, à droite issu des simulations climatiques. On constate que les simulations climatiques reproduisent qualitativement les structures dynamiques analysées.

Cette année, de nombreux travaux sur la modélisation de la mousson africaine ont été menés en vue de la préparation de la campagne Amma. Parallèlement, les efforts ont été poursuivis sur les processus de surface, les dépressions et la convection nuageuse.

## Etude cyclogénèse et prévisibilité

### Impact d'une assimilation/prévision à aire limitée sur la prévision cyclonique.

Un nouveau modèle à aire limitée, Aladin-Réunion (chaîne assimilation/prévision), a été construit sur l'océan Indien sud-ouest. Dans un premier temps, son originalité réside dans les caractéristiques suivantes : a) un gain significatif en résolution d'analyse et de prévision (maille de 21 km contre 187km/55km pour son coupleur, le modèle global Arpège-Tropiques) qui permet de mieux décrire la structure du cyclone ; b) des ingrédients d'assimilation (fonctions de structure) ciblés sur la zone et la période d'intérêt (saison cyclonique sur l'océan indien).

Sur les quelques cas de cyclones éprouvés, l'erreur de position du cyclone prévu par le modèle Aladin-Réunion croît sensiblement moins vite avec l'échéance que celle du modèle global Arpège-Tropiques. Le modèle à aire limitée analyse et prévoit des intensités plus proches de la réalité. Par contre, la position à l'état initial n'est pas améliorée.

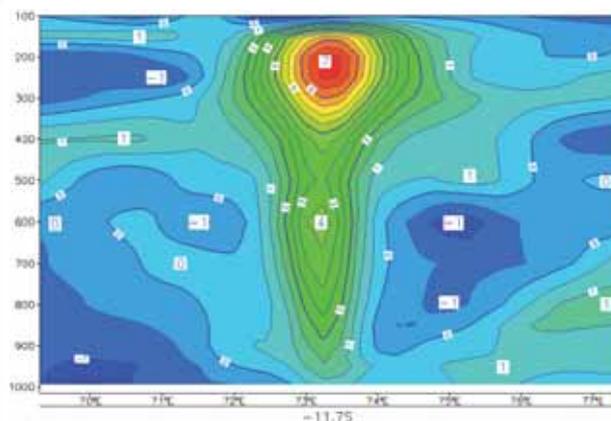
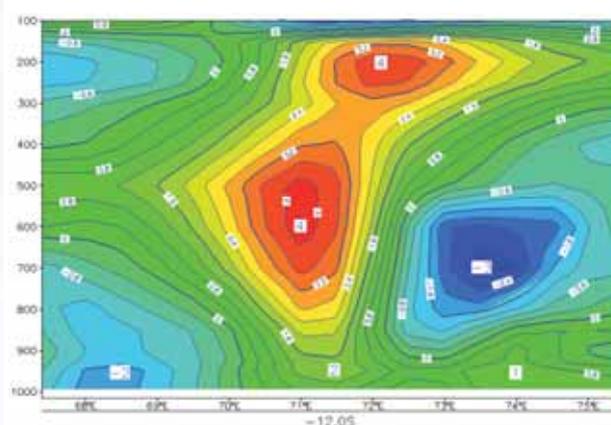
Plus en détails, il apparaît que c'est la capacité du modèle à aire limitée à simuler une structure de cyclone plus réaliste qui bénéficie à la prévision de son évolution (position et intensité). Comparé à Arpège-Tropiques, le rayon de vent maximum simulé par le modèle Aladin-Réunion est plus petit, les vents maximaux plus élevés, et le coeur chaud mieux situé en haute troposphère (figure).

Cette première version du modèle est appelée à évoluer en intégrant les améliorations issues des recherches et développements en cours telles que : une diminution de la résolution horizontale à 10 km, une adaptation tropicale de l'assimilation, une assimilation des données satellitaires à haute résolution et une meilleure analyse de la position du cyclone.

Coupe verticale (échelle verticale en hPa) ouest-est de l'anomalie de température (K) passant par le centre du cyclone Bento simulé (base : 24/11/2004 00 UTC, échéance 36h) par le nouveau modèle Aladin-Réunion (panneau du bas) et par le modèle Arpège-Tropiques (panneau du haut).

Histogramme : distribution des valeurs de la dispersion de l'ensemble du CEPMMT dans les zones sensibles issues de vecteurs singuliers du CEPMMT (jaune) et de l'ETKF du Met Office (violet).

Carte : cas du 02 déc. 2003, dispersion du géopotentiel à 500 hPa (zone en vert > 5 dam ; intervalle : 2 dam), zones sensibles issues des vecteurs singuliers (orange) et de l'ETKF (violet) (taille 2 x 106 km<sup>2</sup>).

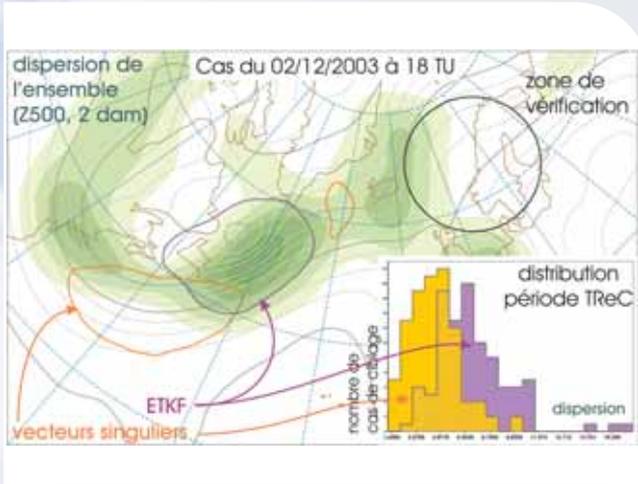


## Régimes de pluies intenses sur la côte Méditerranéenne française

On cherche à caractériser de façon objective une classe d'environnements de grande échelle favorisant les situations de précipitations intenses sur une zone comprenant la côte Languedoc-Roussillon et le massif des Cévennes.

Les données de pluies proviennent de la base de données des Séries Quotidiennes de Référence de Météo-France, garantissant leur homogénéité sur la plus grande période possible. A partir d'une classification automatique des régimes de temps méditerranéen, élaborée sur les 40 années de la ré-analyse du CEPMMT, on a quantifié la discrimination de plusieurs classes de pluies intenses durant la période hivernale (de novembre à mars) par ces régimes. Cette discrimination est excellente puisque selon l'histogramme de la figure, le régime B est représentatif à lui seul de 67% des cas de précipitations les plus intenses, où 20% au moins des stations du domaine excèdent leur quantile 99% de précipitations. Dans ce cas, le régime E est complémentaire du régime B, puisque leur union totalise près de 97% des cas, alors que 6 régimes quasi équiprobables existent.

Pour mieux visualiser à quoi correspond le régime B, la figure représente aussi les champs moyens pour les jours du régime B associées aux pluies intenses. Cela permet de décrire à grands traits la situation météorologique à l'échelle synoptique associée à cette classe de pluies intenses. Elle apparaît fortement cyclonique en moyenne troposphère, favorisant la circulation de dépressions de surface atteignant la côte française méditerranéenne. Ce résultat montre la possibilité d'extraire directement de climatologies de grande échelle des caractéristiques de temps associées à des phénomènes intenses de petites échelles.



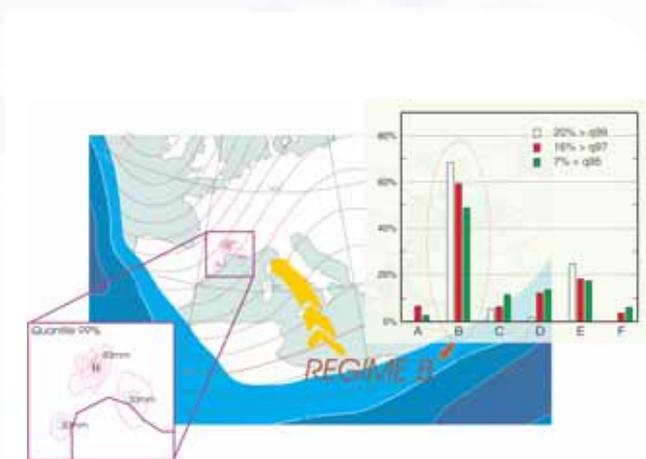
## Observation adaptative, diagnostics sur le TRc 2003, investigation physique des zones sensibles

La prévisibilité est le contexte de l'observation adaptative qui est conçue comme un contrôle partiel de la première. L'observation adaptative prévoit d'ajouter des observations dans un futur proche (J+2) afin de réduire les erreurs de prévision d'un phénomène devant survenir plus tard encore (J+4) dans une région prescrite. Pour cela, il existe plusieurs techniques qui désignent des zones géographiques, dites sensibles, où déployer ces observations dites ciblées.

Pour un cas météorologique donné de la campagne TRc 2003, la comparaison des zones sensibles amène à constater un désaccord entre les diverses techniques citées ci-avant, qui reposent sur des bases théoriques différentes. Les études menées tentent donc de comprendre la nature météorologique de ces différences.

L'approche choisie pour cela est la comparaison systématique des zones sensibles avec des diagnostics pertinents de l'atmosphère. Ainsi, la dispersion d'une prévision d'ensemble sert à estimer l'incertitude dans la prévision contemporaine aux zones sensibles. Parmi d'autres diagnostics, l'indice de baroclinie caractérise la croissance des erreurs potentielles dans cette même prévision.

Parmi les techniques du TRc 2003, celle basée sur la prévision d'ensemble (ETKF) montre évidemment une plus forte corrélation avec le diagnostic de dispersion que les techniques issues des vecteurs singuliers (figure). Il en est de même pour le diagnostic de l'indice de baroclinie. Ce dernier résultat est inattendu et on ne l'explique pas encore totalement. Ces techniques ont trait à la prévision sur des régions limitées. Les zones sensibles seraient alors peu corrélées avec l'incertitude sur la prévision à l'échelle globale telle que traduite par les diagnostics utilisés ici.



L'histogramme représente la fréquence d'observation des régimes selon des classes de pluies intenses (du moins intense au plus intense : 7% des stations excèdent leur quantile 95%, respectivement 16% des stations le quantile 97% et 20% des stations le quantile 99%). L'encadré représente la répartition géographique de la valeur en mm d'eau du quantile 99% pour chaque station, soit le seuil de pluie qui n'est atteint que par 1% des valeurs de la base de données. Le champ sur le fond de carte représente, pour les jours de régime B associées à la classe de pluie la plus intense, la composante de basse fréquence du géopotential à 500 hPa (isolignes marron), et le module du vent basse fréquence à 300 hPa (plages de couleur bleue).

## Identification objective de systèmes météorologiques en tant que structures cohérentes

Fronts, dépressions, jets, anomalies de tourbillon désignent des organisations persistantes de l'atmosphère que les météorologistes peuvent identifier, suivre et qu'ils utilisent dans leur interprétation. Dans d'autres domaines, on parle de "structures cohérentes", et l'enjeu est de transposer les techniques associées afin de pouvoir les trouver et les manipuler numériquement dans nos modèles, à des fins de prévision ou d'étude.

En projetant le champ synoptique de tourbillon potentiel sur une base d'ondelettes orthogonales, il est ainsi possible d'extraire des structures locales en conservant un nombre réduit de degrés de liberté (une dizaine en pratique). La figure ci-jointe présente l'extraction du précurseur d'altitude de la tempête T2 qui frappa la France le 27 décembre 1999. Ainsi extraite, cette anomalie peut-être déplacée ou amplifiée ou encore comparée à des observations. Ceci est très utile si l'on se souvient que les prévisions numériques de la tempête T2 a été manquée, par la plupart des modèles opérationnels en Europe en 1999, faute d'avoir su suivre correctement ce précurseur sur l'Atlantique.

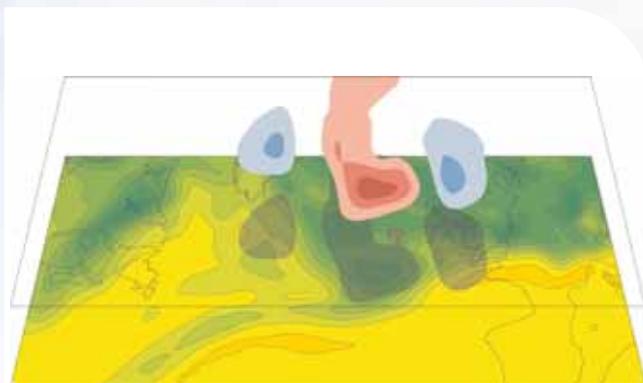


Illustration de l'extraction du précurseur d'altitude de la tempête T2 de Noël 1999, le 27 décembre à 6h UTC. En vert et jaune, le champ représenté est le tourbillon potentiel en altitude (niveau isentrope 315 K). On y voit le précurseur de la tempête T2 au large de l'Irlande, ainsi que le régime zonal. La structure associée à T2 a été isolée du champ total et est dessinée au dessus. Ce n'est pas une anomalie simple: elle comporte trois lobes, un pôle principal de tourbillon potentiel positif (en rouge) et deux pôles négatifs (en bleu).

## Utilisations nouvelles de l'inversion du tourbillon potentiel : modification de l'environnement d'une perturbation

L'inversion du tourbillon potentiel, déjà utilisée pour étudier ou prévoir des tempêtes en modifiant directement les perturbations associées, a servi cette année à modifier le courant jet et plus généralement l'environnement de ces perturbations.

Etat initial le 24/12/99 à 18h UTC (gauche) et prévision à 36h issue de cet état (droite), vent à 300 hPa en plages de bleu et tourbillon relatif à 850 hPa en isolignes rouges. En haut : trajectoire de référence non modifiée; en bas : trajectoire avec un environnement limité à la seule grande échelle, obtenue par inversion du tourbillon potentiel. On constate le développement de la perturbation en terme de tourbillon relatif à 850 hPa, qui est même plus intense, alors que le jet est bien plus faible en intensité.

La tempête T1 a ainsi été replacée dans un autre contexte de grande échelle pour étudier son développement et la mesure dans laquelle celui-ci était lié aux autres structures de petite échelle ou à la force exceptionnelle du courant jet.

Le développement a eu lieu, même en l'absence d'autres perturbations initiales, et avec un courant jet nettement moins fort puisque celui-ci était restreint à la partie lente du signal.

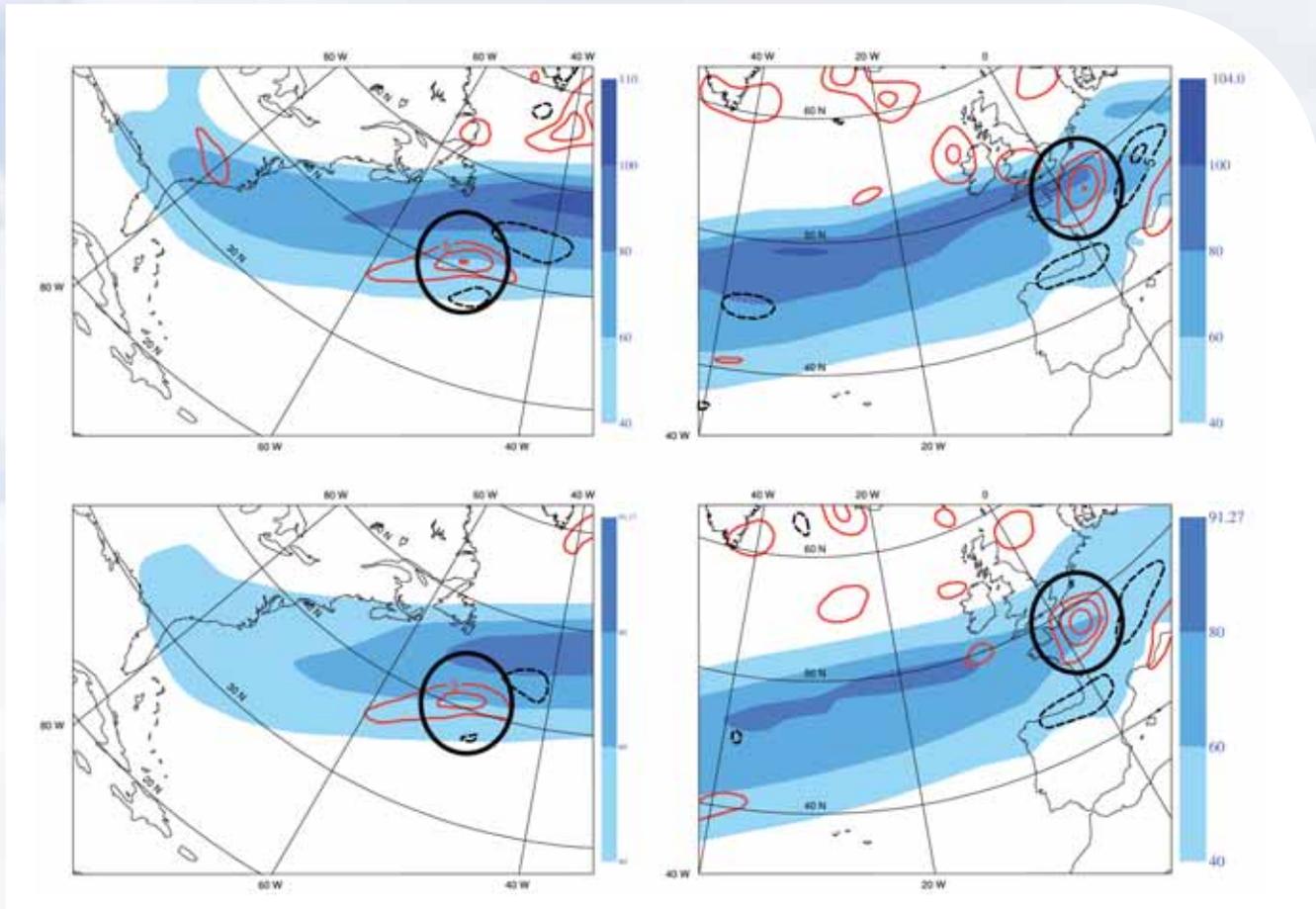
Le développement de la tempête T1, visible sur la figure, est même plus intense avec le jet limité à la seule grande échelle. En outre, les trajectoires sont identiques dans les deux expériences, ce qui est conforme à la théorie proposée par les chercheurs du CNRM en 2003 : la basse fréquence suffit à localiser la trajectoire. Puisque cette basse fréquence seule suffit au développement, les calculs énergétiques doivent séparer les contributions des grandes échelles de celles des petites échelles : l'inversion du tourbillon potentiel nous fournit également le moyen de le faire.

## Phénomène de méso - échelle

### Externalisation de la surface : le système Surfex

Météo-France utilise dans des applications variées des modèles simulant l'évolution des caractéristiques de la surface : sol nu, végétation, zones urbaines, surfaces liquides (lacs ou mers). Ces applications sont nombreuses (prévision numérique du temps, simulations climatiques, simulations en mode forcé, assimilation). Le CNRM a décidé de réunir dans un code de surface unique les modules des différents types de surface, au premier rang desquels Isba et Teb. Ce code, appelé Surfex pour surface externalisé, constitue un tout et peut être utilisé dans les différentes configurations. Il possède ses propres diagnostics et entrées/sorties.

Surfex est d'ores et déjà utilisé dans le modèle de recherche à méso-échelle Méso-NH ainsi que dans le prototype du futur modèle Arome. Dans le domaine de la prévision numérique, les efforts ont surtout porté sur le couplage entre Surfex et les modèles Arpège/Aladin. La difficulté était de réaliser un couplage très étroit entre les deux modèles, permettant l'utilisation de pas de temps les plus longs possibles sans risque d'instabilité numérique. Les tests sur la version 1D du modèle sont concluants et seront portés rapidement



vers le modèle 3D. Surfex a aussi été utilisé en mode forcé, et dans le cadre du projet Geoland une assimilation du LAI (indice foliaire) a été développée sur le Sud-Ouest de la France.

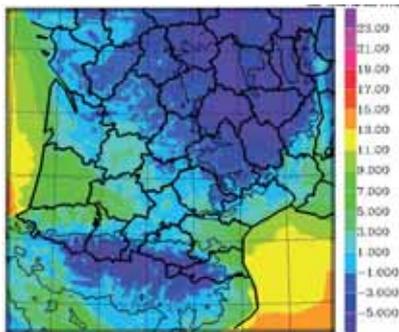
La migration des différentes applications de surface se poursuivra en 2006. Cette organisation permettra à l'avenir à tous les modèles et applicatifs utilisant les codes de surface de bénéficier rapidement des améliorations scientifiques réalisées sur la modélisation des processus de surface.

**Le programme Ecoclimap-II : une nouvelle classification des surfaces pour la région sud-ouest de la France**

Le programme Ecoclimap est constitué à la fois d'une carte d'occupation des sols et d'une base de données de paramètres de surface dérivée de la classification précédente. Une nouvelle classification de la végétation en zones thématiquement et fonctionnellement homogènes a été réalisée sur le sud-ouest de la France pour les besoins du projet CarboEurope. La méthodologie repose d'une part sur l'inventaire des surfaces de la base de données Corine2000 d'une résolution de quelques centaines de mètres ; d'autre part sur une analyse multi-annuelle de l'évolution saisonnière de l'indice de végétation mesuré par le système satellitaire Spot/Vegetation.

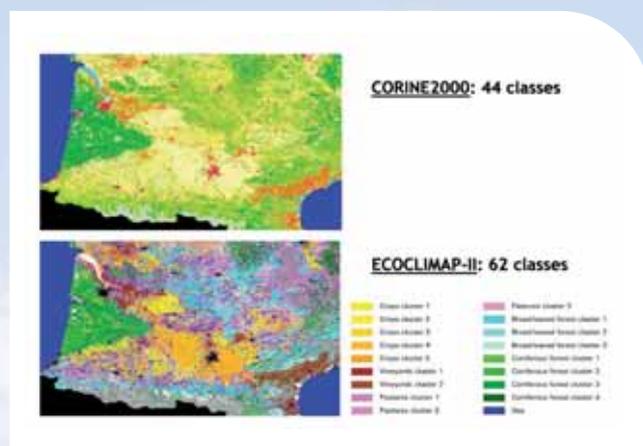
La technique de classification par nuées dynamiques fait ressortir les écosystèmes homogènes. La très bonne cohérence spatiale est satisfaite par un éclatement de la classe « cultures » de Corine2000 en : a) des cultures d'hiver (blé, colza) de grande extension spatiale avec un pic végétal en avril-mai ; b) des cultures d'été surtout localisées sur le pourtour pyrénéen ; c) une zone de cultures maraîchères dans la vallée de la Garonne. Pour les classes 'forêts', on sait distinguer au sein de la forêt des Landes, des densités forestières plus

Prévision de la température à 2 mètres par le prototype du modèle Arome le 18 novembre 2005 au matin. On remarque les îlots de chaleurs urbains des agglomérations lyonnaises et toulousaines simulés par le module de ville Teb de Surfex.



ou moins grandes, ainsi que les landes sèche et humide. En dernier lieu, la classification urbaine met en évidence les zones urbaines denses, puis un dégradé de ces zones urbaines, ce qui est bien illustré pour les agglomérations de Toulouse et Bordeaux avec des valeurs de l'indice de végétation sensibles à la proportion de bâti.

Ce travail se poursuivra par l'application de la méthodologie à toute la France, puis à toute l'Europe. En parallèle, on évaluera l'impact de cette nouvelle classification sur les flux de surface restitués.



Comparaison des cartes d'occupation des sols Corine2000 et Ecoclimap-II sur le sud-ouest de la France. On note une plus grande précision de la nouvelle classification qui permettra de mieux évaluer l'impact de la surface du sol sur les flux d'énergie échangés entre le sol et l'atmosphère.

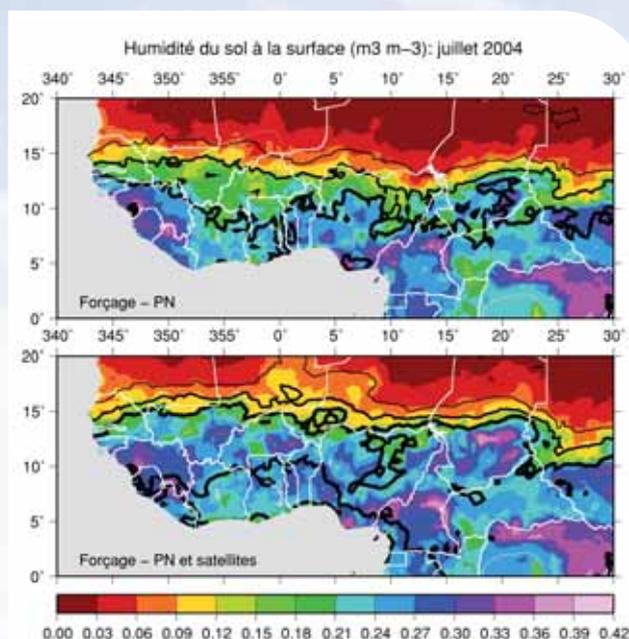
## Flux de surfaces et d'humidité de sol améliorés sur l'Afrique occidentale pour les modèles atmosphériques

Les rétroactions entre le sol et l'atmosphère jouent un rôle critique pour la prévision atmosphérique en Afrique occidentale. A petite échelle, la distribution spatiale de l'humidité du sol a un impact sur les cellules convectives dans les systèmes orageux, alors qu'à l'échelle régionale ce sont les gradients méridionaux de flux de surface qui peuvent influencer la circulation atmosphérique.

Une nouvelle approche de la modélisation s'est basée sur la construction d'une base de données de forçages multi-échelles (régionales, méso-échelle et locales). Elle est composée des paramètres physiologiques de surface à haute résolution spatiale extraits de la base de données Ecoclimap, et des forçages atmosphériques proches de la surface basés sur les prévisions du CEPMMT. On utilise des données de forçage « hybrides » utilisant plusieurs données de télédétection de précipitations et de flux radiatifs (validées d'après des observations) afin d'améliorer les données de forçage des modèles de Prévision Numérique. Le but est de générer des champs réalistes d'humidité du sol et de flux de surface qui peuvent alors être employés pour

améliorer la compréhension des principaux processus physiques.

La figure montre l'humidité du sol simulée par le modèle Isba utilisant le forçage du CEPMMT (en haut) et par le forçage « hybride » (en bas). L'extension plus nordique avec le forçage hybride est plus compatible avec d'autres données de précipitations (observées et télédéteectées). En plus, les champs d'humidité du sol sont en meilleur accord avec les mesures d'humidité du sol issues de la télédétection (AMSR-E). Ces nouveaux produits « humidité du sol » et « flux de surface » seront employés dans des expériences de prévision numérique dans l'expérience Amma sur l'Afrique.



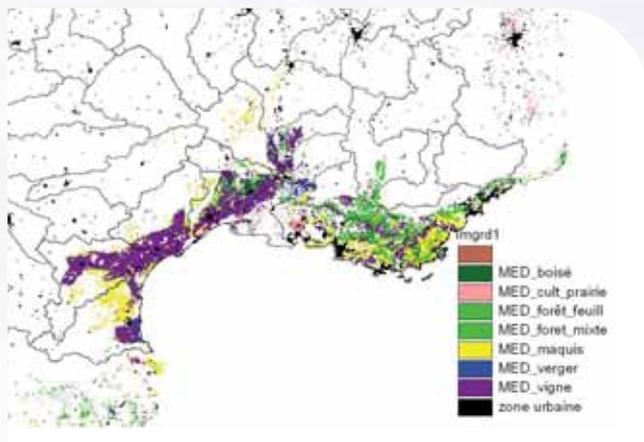
Humidité du sol et flux correspondant d'évapotranspiration simulés par le modèle de surface Isba. Les traits noirs de plus en plus épais correspondent respectivement aux taux d'évapotranspiration de 1, 2 et 3 millimètres par jour. En haut : champs simulés en utilisant les données de prévision numérique (CEPMMT) ; en bas : champs correspondants simulés en utilisant le forçage « hybride ». Le forçage hybride entraîne une meilleure position de la zone de pluie qui, combinée avec le gradient méridional d'évapotranspiration plus important, peut à son tour impacter la méso-échelle simulée et la circulation atmosphérique à l'échelle régionale.

## Validation de Safran-Isba-Modcou en zone méditerranéenne

Depuis plusieurs années, la chaîne Safran-Isba-Modcou (Sim) est développée afin de permettre la simulation à l'échelle de la France sur une maille de 8km des bilans énergétiques et hydriques des sols, ainsi que des débits des principaux fleuves français. Les modèles Safran et Isba fonctionnent maintenant de manière opérationnelle à la Direction de la Climatologie et sont utilisés pour fournir à différentes institutions un état du manteau neigeux au printemps, ainsi que des indices d'humidité du sol.

Le CNRM s'est focalisé cette année sur les résultats de Sim sur la zone méditerranéenne dans le cadre du projet européen Cyprim. Cette zone présente des caractéristiques très particulières, que ce soit pour les sols, avec de nombreuses zones calcaires favorables au développement de nappes souterraines karstiques, ou pour la végétation. Cette dernière est en effet spécifique à la région. Elle est très adaptée au climat très sec de la région et les racines peuvent extraire de l'eau très profondément dans le sol.

Une étude de sensibilité a montré l'influence de la profondeur de la zone racinaire sur le bilan d'eau. Lorsqu'elle augmente, la part de l'évapotranspiration augmente au détriment du débit des rivières. En présence de karst, le débit est modifié, parfois diminué à cause du stockage dans les nappes, parfois accéléré. Les tests effectués ont montré qu'il était possible d'améliorer de manière significative les simulations de bilans d'eau des sols de la région. Cette étude sera poursuivie en 2006 dans le cadre d'une thèse sur ce sujet.



Carte des différents types de végétation dans la zone méditerranéenne. Cette zone est caractérisée par des types de végétations particuliers, aux propriétés hydriques très différentes des autres types de végétation rencontrés en France

### Développement d'une couche limite turbulente en situation neutre

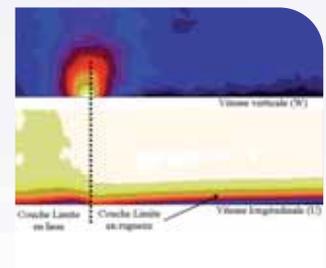
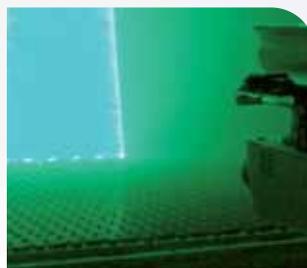
Le modèle colonne de Méso-NH ne permet pas de simuler les couches limites neutres. En effet, actuellement, le diagnostic de la hauteur de couche limite n'est pas opérationnel, l'hypothèse d'anisotropie qu'utilise ce modèle n'est pas valide pour de tels écoulements. Pour pallier ces problèmes, l'étude mise en place combine une approche expérimentale et numérique dans le but de reformuler les paramétrisations utilisées dans Méso-NH.

La veine hydraulique du CNRM a permis d'effectuer cette expérience. Le sol de la veine a été recouvert sur 12m de briques Lego® pour représenter la rugosité du sol. Ainsi, une couche limite neutre a été développée sur 12m avec

deux rugosités (figure 1) et à deux vitesses différentes. Des mesures (PIV) en différentes abscisses devraient permettre d'estimer les conditions initiales, les paramètres moyens et turbulents ainsi que les gradients verticaux et longitudinaux de ces couches limites neutres.

Un premier traitement des images par le logiciel VSV permet d'obtenir les champs de vitesses, d'énergie cinétique, de vorticité et de dissipation. Il est alors possible de visualiser l'évolution de la hauteur de couche limite, et notamment, au niveau du changement lisse/rugueux, le saut de rugosité est visible sur les champs de vitesses horizontales et verticales (figure 2). Un traitement plus poussé permettra d'extraire les données turbulentes ainsi que les gradients des quantités moyennes et turbulentes. Des simulations numériques (Large Eddy Simulations) vont documenter les mêmes cas de couches limites rugueuses, vérifiant les mêmes conditions initiales que pour l'expérience en veine. L'analyse des résultats expérimentaux et numériques constituera une base de données pour améliorer le schéma colonne de Méso-NH.

Plan laser sur un sol recouvert de briques Légo qui simule la rugosité naturelle et les frottements associés, dans la veine hydraulique du CNRM à Toulouse.



Coupe verticale de l'écoulement en veine hydraulique pour une situation neutre. On visualise l'évolution de la hauteur de couche limite. On voit très clairement, au niveau du changement lisse/rugueux, le saut de rugosité sur les champs de vitesses horizontales et verticales

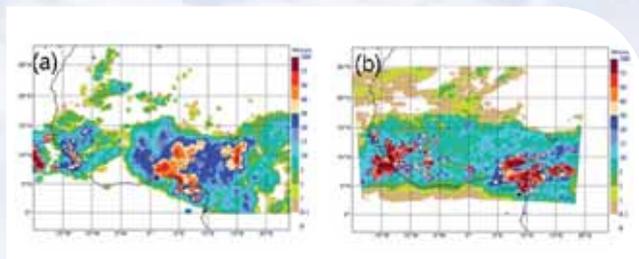
### Apport de l'assimilation 3DVar Aladin sur l'Afrique

Pour préparer la campagne Amma (étude de la mousson africaine) qui va se dérouler notamment durant l'été 2006 en Afrique de l'ouest, les chercheurs du CNRM ont effectué des simulations sur la mousson africaine 2005 avec le système de prévision numérique à méso-échelle Aladin.

Depuis juillet 2005, le modèle de méso-échelle Aladin (résolution ~10km) est initialisé par une analyse variationnelle 3DVar à la même échelle qui prend en compte les données conventionnelles classiques (observations de surface et d'altitude), ainsi que les données satellitaires fournies par les satellites à orbite polaire de type NOAA. L'innovation majeure porte sur la prise en compte des données du radiomètre Sevir du satellite géostationnaire Meteosat-8. En effet, compte tenu

du manque de données conventionnelles sur l'Afrique, l'assimilation de ces données (infra-rouge, vapeur d'eau ...) constitue un atout majeur pour la prévision numérique sur cette zone tropicale où ce jeu d'observations représente près de 70% des données disponibles. Les données du diffusiomètre Quikscatt (vent à partir de l'état de la mer ramené à 10m) disponibles sur le Golfe de Guinée sont elles aussi assimilées par le modèle. La figure 1 présente l'estimation d'un cumul sur 24 heures des précipitations observées en août 2005, comparée à la prévision Aladin pour la même période initialisée comme décrit précédemment. On voit que les 2 pôles majeurs d'activité convective sont bien décrits par le modèle, malgré une activité précipitante trop soutenue au centre du domaine.

Cette version d'Aladin (assimilation - modèle), en cours de réglage pour l'Afrique, devrait être mise en opérationnel durant l'été 2006 afin de fournir des prévisions au centre opérationnel de Niamey au Niger qui servira de soutien à la phase terrain de la campagne Amma.



Estimation du cumul sur 24 heures des précipitations observées entre le 28 Août 2005 - 06 UTC et le 29 Août 2005 - 06UTC (satellite NOAA/CPC), comparée à la prévision Aladin pour la même période initialisée grâce à l'assimilation des données des radiomètres Seviri et Quikscatt. On voit que les 2 pôles majeurs d'activité convective sont bien décrits par le modèle, malgré une activité précipitante trop soutenue au centre du domaine.

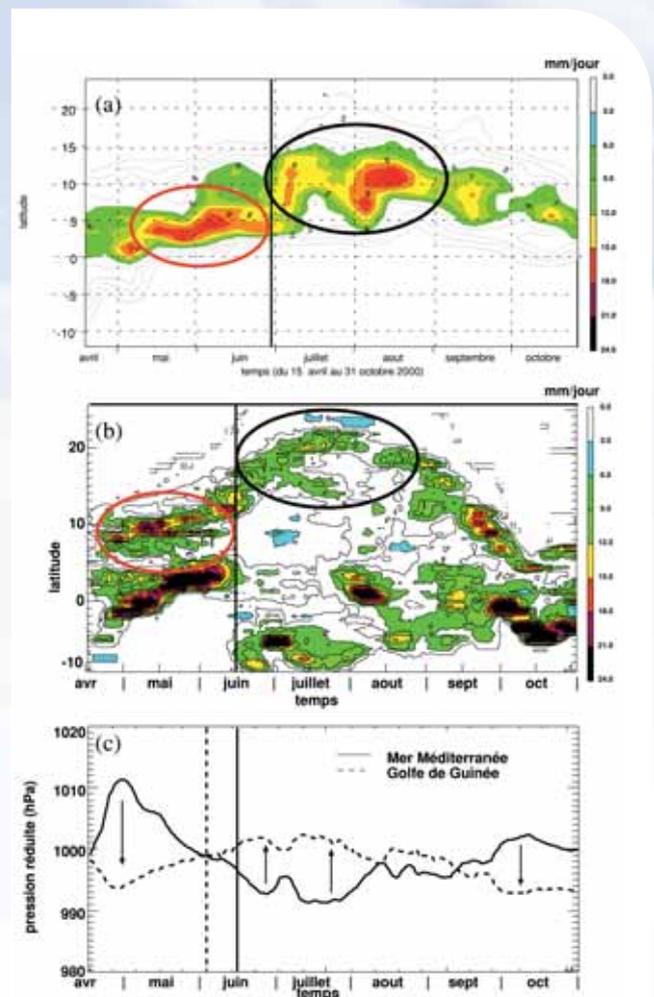
## Etude idéalisée de la mousson africaine

La mousson d'Afrique de l'Ouest peut être vue comme le déplacement de la zone de pluies associée à la Zone de Convergence Inter Tropicale de 5°N pendant le régime de pré-mousson (Mai-Juin) à une latitude moyenne de 10°N en juillet-août (Fig. a). La date de ce saut de mousson et la position de la zone de pluie, problèmes clés pour les populations locales, sont encore mal prévues et mal simulées par les modèles de circulation générale actuels.

Une alternative intéressante est de revenir à un modèle plus simple, de moindre complexité que les modèles de circulation générale, mais capable de représenter les ingrédients fondamentaux de la mousson. D'après les observations, la mousson se caractérise par une forte symétrie zonale permettant de la représenter dans un plan méridien-vertical. Le modèle numérique Mésos-NH a été utilisé pour simuler une mousson simplifiée à deux dimensions afin d'étudier les mécanismes clés de la mousson africaine. Cette hypothèse de travail est suffisante pour reproduire les principales caractéristiques de la mousson avec deux

régimes de pluies distincts au cours de la saison (figures a,b) même si le saut de mousson arrive un peu trop tôt dans le modèle.

L'approche idéalisée permet alors de mettre en évidence le rôles des bassins guinéen et méditerranéen sur le saut de mousson et peut aboutir à un indice de prévision du saut de mousson (figure c). Plus généralement, ce type d'étude facilite l'élaboration de schémas conceptuels et fournit des indications précieuses pour définir la stratégie d'observation de la campagne Amma.



Les grandes structures observées pendant le cycle saisonnier de la mousson (a) sont reproduites par le modèle idéalisée (b), malgré quelques défauts. Le rôle des bassins océaniques peut notamment être étudié avec ce modèle. En début de saison, les plus fortes (basses) pressions sont positionnées sur la Méditerranée (Golfe de Guinée), empêchant la montée vers le nord des pluies (c). Quelques jours avant le saut de mousson, la situation s'inverse, avec des basses pressions sur la Méditerranée qui vont favoriser le saut de mousson. Il correspond alors au renversement du gradient de pression Méditerranée-Guinée. (a) Diagramme temps-latitude des pluies observées sur l'année 2000, moyennées sur 10°W-10°E d'après GPCC. Le saut de mousson est indiqué par un trait noir, la première (deuxième) période de pluies par une ellipse rouge (noire). (b) Comme (a) mais pour le modèle idéalisée. (c) Série temporelle de pression réduite au niveau de la mer sur la Méditerranée et sur le Golfe de Guinée issues du modèle idéalisée. Le trait pointillé indique le renversement du gradient de pression, le trait plein, la date du saut de mousson.

## Caractérisation de la vapeur d'eau troposphérique par GPS : application aux pluies intenses en Méditerranée.

Dans le cadre d'une étude climatologique menée en collaboration avec le LDL, les données GPS sont utilisées pour caractériser la vapeur d'eau lors d'événements fortement précipitant sur le Sud-Est de la France. Utilisées à l'origine pour des applications de navigation et de positionnement, les stations GPS au sol se révèlent aussi utile pour fournir une information météorologique. En effet, le contenu en vapeur d'eau intégré sur la verticale (IWV) peut être déduit des délais zénithaux totaux (ZTD). Ces retards lors de la propagation du signal entre le satellite et la station réceptrice au sol sont liés à la réfraction due à l'atmosphère et en particulier à la vapeur d'eau.

Le réseau régional des stations GPS localisées sur le pourtour méditerranéen permet grâce à sa forte résolution de caractériser la variabilité spatio-temporelle du champ d'humidité. On peut ainsi étudier l'évolution de la vapeur d'eau avec une forte résolution spatiotemporelle lors d'un épisode fortement précipitant ou avoir une approche statistique de ces événements. Une comparaison entre les contenus en vapeur d'eau déduits des GPS et les précipitations observées pendant la période propice aux fortes précipitations (15 août-31 décembre) a été menée. En moyenne, les quantités de précipitations sont clairement corrélées aux valeurs de contenu en vapeur d'eau. Un flux d'humidité de basses couches est également estimé à partir des données GPS et des données de vent à 10 mètres : les jours avec les plus fortes pluies sont associées aux flux les plus intenses.

D'autres applications des données GPS pour la caractérisation et la prévision des pluies intenses en Méditerranée sont en cours de développement et d'évaluation : assimilation des ZTD, restitution de champ tridimensionnel de vapeur d'eau par tomographie, ...

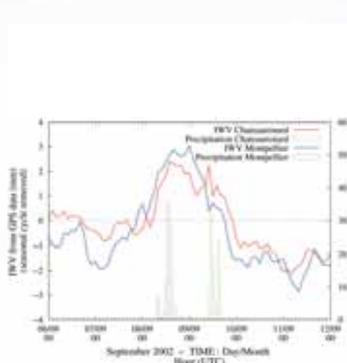


Image 1 : Evolution temporelle des contenus en vapeur d'eau intégrés et des précipitations horaires près de Châteaurenard et de Montpellier lors de l'événement de pluie intense des 8-9 septembre 2002. Cette figure illustre en particulier la variabilité spatiale et temporelle des contenus en vapeur d'eau (IWV). On note aussi les valeurs élevées des contenus en vapeur d'eau intégrés juste avant le déclenchement des précipitations.

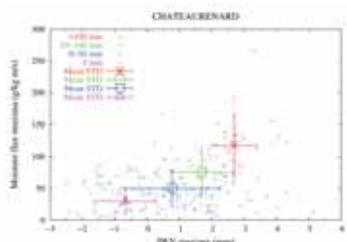


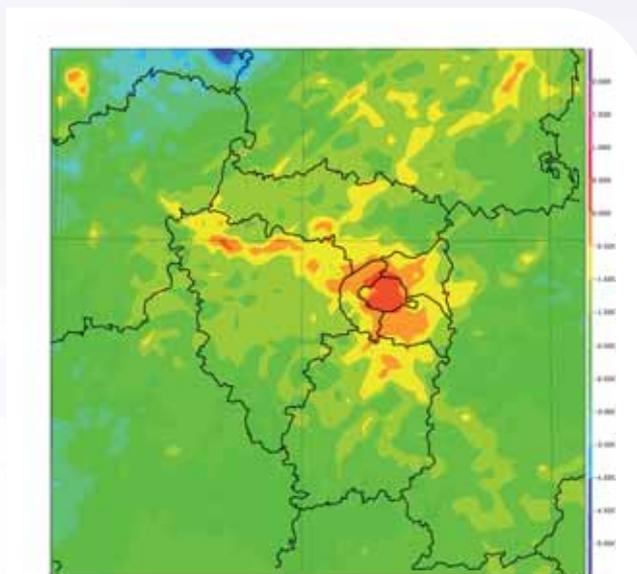
Image 2 : Maximum sur 24 heures des contenus en vapeur d'eau intégrés (IWV) pour lesquels on a enlevé le cycle saisonnier) et des flux d'humidité de basses couches (en dessous de 1000m) à Châteaurenard pour différentes quantités de précipitations quotidiennes (période : 15 août-31 décembre, 2002-2003). Les flux sont estimés à partir des IWV, et du vent à 10 mètres mesuré à la station météorologique la plus proche. Moyennes et écart-types pour 4 jeux de données.

## Des études sur la région parisienne

Météo-France mène ses actions de recherche au CNRM, mais également dans ces directions interrégionales où sont réalisés des développements liés aux caractéristiques climatiques du lieu.

La région Ile de France est le théâtre de nombreux événements météorologiques qui concernent une grande quantité de population. Les activités de recherche sur cette zone s'orientent autour de trois thématiques : l'environnement (risques industriels), l'hydrologie et la météorologie urbaine (qui inclut les problèmes de santé liés aux conditions météorologiques dans une grosse agglomération comme Paris).

Les études menées sont d'une part basées sur des logiciels statistiques avancés, d'autre part sur la modélisation fine de phénomènes météorologiques prenant en compte les effets de l'urbanisation. C'est dans ce cadre là qu'a été étudié récemment le rôle de la ville dans la formation de phénomènes de convection exceptionnels sur Paris (figure). Un autre aspect de l'urbanisation a été exploré afin d'étudier finement la météorologie dans la couche limite urbaine pendant les épisodes de canicule.



Îlot de chaleur sur la région parisienne (température à 2m) qui peut amplifier certains phénomènes de convection. L'îlot est maximum sur la capitale par rapport à la campagne environnante.

L'année 2005 a été marquée par la publication des scénarios du GIEC qui matérialise le fort investissement de Météo-France en matière d'étude du changement climatique et de ses conséquences sur l'environnement.

## Impact des nouvelles paramétrisations physiques du modèle Arpège-Climat.

Un des objectifs visés dans la stratégie de développement des représentations physiques au sein du modèle numérique Arpège-Climat était l'amélioration de la représentation des nuages bas dans l'est des bassins océaniques tropicaux.

On voit sur la première figure que le déficit moyen par rapport à une climatologie satellitaire peut atteindre -30% à -50% dans l'est des bassins (en rouge), avec à l'inverse des excédents atteignant +20% à +30% dans l'ouest des bassins (en vert). Ces problèmes ne sont pas propres à Arpège-Climat. Ils sont communs à l'ensemble des modèles de prévision, affectant les simulations climatiques comme les prévisions opérationnelles du temps.

Les développements initiés au cours du projet européen Eurocs visaient à tester les solutions qui ont été employées avec quelques succès dans les autres centres de prévision climatique, comme en Angleterre (UKMO) ou en Allemagne (Max Planck Institute).

On voit sur la deuxième figure que les résultats obtenus avec la nouvelle version du modèle de climat permettent en effet de diminuer l'ensemble des biais, avec une réduction à la fois des déficits et des excédents de nuages bas océaniques.

Cette nouvelle physique est basée sur des méthodes qui ne sont pas spécifiques aux modèles de climat. La synergie de développement actuellement en oeuvre entre les versions climat et Prévision Numérique du Temps (PNT) d'Arpège pourra déboucher sur des tests en mode PNT des solutions qui semblent prometteuses dans les simulations climatiques, en apportant aussi des processus physiques nouveaux dans Arpège, comme une meilleure prise en compte des différents effets indirects des aérosols.

## Validation d'une nouvelle modélisation hydrologique incluant les effets sous-maille

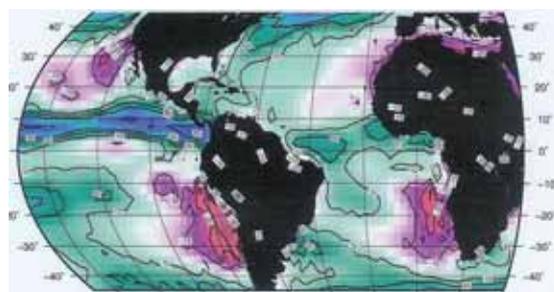
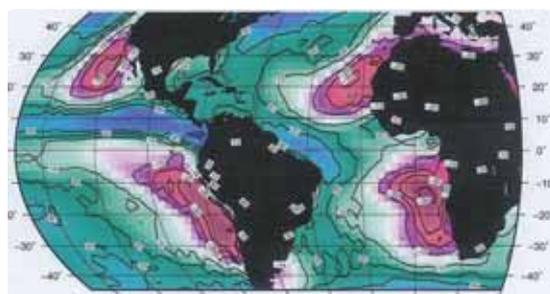
Dans les modèles climatiques du CNRM, l'hydrologie continentale repose sur le modèle de surface Isba et le modèle de routage Trip, qui permet de convertir le ruissellement de surface en débit de rivière. Isba calcule le bilan hydrique sur des mailles allant typiquement de 0.5 à 3°. A ces résolutions, la partition des précipitations annuelles entre évaporation et ruissellement est très dépendante de processus hydrologiques se produisant à des échelles spatiales beaucoup plus fines.

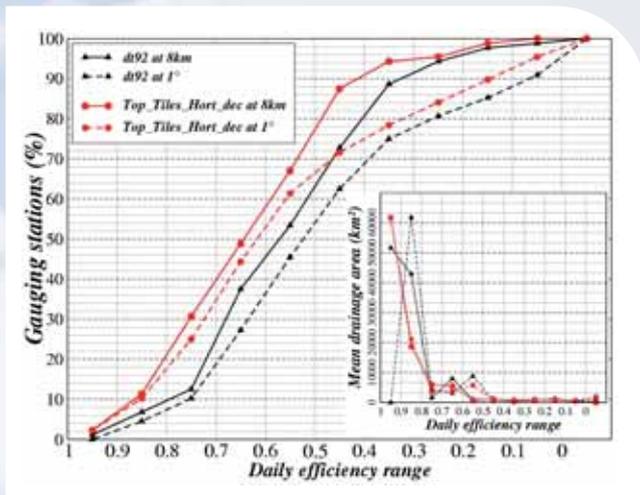
Cette variabilité dite « sous-maille » est due à plusieurs sources, telles que la topographie, la répartition des propriétés des sols et de la végétation, ainsi que du forçage atmosphérique. Elle est ici prise en compte dans le modèle Isba grâce au développement d'un jeu relativement complet et cohérent de paramétrisations. Il s'agit d'une approche « Topmodel » pour la répartition sous-maille de la topographie et d'une approche de type « mosaïque » pour celle de la végétation. Une répartition sous-maille des précipitations et un ruissellement sous-maille par excès d'infiltration sont également introduits.

L'ensemble de ces développements a été validé en mode forcé sur le bassin du Rhône (forçage atmosphérique issu des analyses Safran produites Centre d'études de la Neige), puis sur les principaux bassins versants à l'échelle du globe (forçage atmosphérique ISLSCP produit dans le cadre du projet Global Soil Wetness Project). Les résultats montrent une nette amélioration des débits et une moindre sensibilité du bilan hydrique simulé à la résolution horizontale de la grille de calcul, notamment pour les stations dont l'aire de drainage est la plus importante.

Figure 1 : Déficit moyen du modèle Arpège-Climat (physique actuelle) par rapport à une climatologie satellitaire. Il peut atteindre -30% à -50% dans l'est des bassins (en rouge), avec à l'inverse des excédents atteignant +20% à +30% dans l'ouest des bassins (en vert).

Figure 2 : Déficit moyen du modèle Arpège-Climat (nouvelle physique) par rapport à une climatologie satellitaire. On constate une meilleure estimation du modèle par rapport à la climatologie.





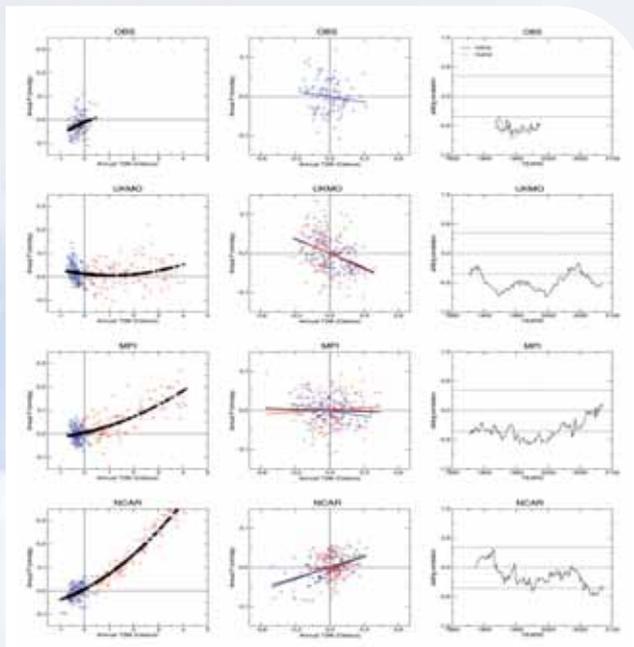
Distribution cumulée de l'efficacité des débits quotidiens simulés sur un réseau de 80 stations d'observation réparties sur le bassin du Rhône. L'efficacité est un critère objectif de qualité qui vaut 1 lorsque le modèle est parfait, 0.5 pour un modèle correct, et peut devenir négatif lorsque les simulations deviennent de mauvaise qualité. Le graphique permet de comparer la qualité des débits simulés par deux versions du modèle Isba (version originale en noir, version avec effets sous-maille en rouge) et à deux résolutions distinctes (8km en trait continu, 1° en pointillés). L'encadré indique la répartition des aires de drainage en fonction de l'efficacité obtenue.

## Comment réduire les incertitudes sur la réponse du cycle hydrologique au réchauffement global ?

Dans les récents scénarios climatiques réalisés en vue du 4ème rapport d'évaluation du GIEC sur le changement climatique, la réponse du cycle hydrologique à l'accroissement de l'effet de serre demeure très contrastée d'un modèle à l'autre. Se pose donc la question de la confiance que l'on peut accorder à chacun des modèles. Fournissent-ils des scénarios équiprobables ou peut-on au contraire contraindre la réponse des modèles en utilisant des observations ?

Une idée simple consiste à accorder plus de crédit aux modèles susceptibles de bien reproduire le climat de la fin du 20ème siècle. Différents travaux suggèrent cependant que le lien entre état moyen et sensibilité des modèles demeure le plus souvent équivoque. C'est pourquoi, on fait ici appel à la variabilité interannuelle pour contraindre la réponse hydrologique des modèles couplés océan-atmosphère au réchauffement global.

L'analyse porte sur des séries de température de surface et de précipitations en moyenne annuelle et globale. En filtrant les séries temporelles à l'aide d'une tendance polynomiale, on peut isoler la variabilité interannuelle et s'intéresser à la relation entre précipitations et températures à cette échelle de temps. On constate alors un lien apparent avec la réponse obtenue au réchauffement global. Ceci s'explique notamment par l'influence prépondérante de la variabilité interannuelle du Pacifique Tropical (Enso) sur les précipitations continentales, même si le réchauffement en surface lié au forçage anthropique se projette plus ou moins bien sur ce mode de variabilité. En résumé, les scénarios issus des modèles qui s'avèrent incapables de reproduire l'influence de l'Enso sur le climat actuel doivent être considérés avec beaucoup de prudence.



Comparaison du lien entre températures à 2m et précipitations continentales en moyenne annuelle et globale pour les observations et 3 modèles couplés dont la sensibilité du cycle hydrologique continental au renforcement de l'effet de serre est plus ou moins marquée.

Colonne de gauche : séries brutes pour le 20ème siècle (en bleu) et le 21ème siècle (en rouge) et régressions quadratiques sur l'ensemble de la période (en noir).

Colonne centrale : séries filtrées (hors changement climatique) pour le 20ème siècle (en bleu) et le 21ème siècle (en rouge) et régressions linéaires sur l'ensemble de la période (en noir), le 20ème siècle (en bleu) et le 21ème siècle (en rouge).

Colonne de droite : Corrélations glissantes sur des fenêtres de 31 ans entre les précipitations continentales en moyenne annuelle et globale et l'indice Niño-3 de température de surface de la mer en moyenne annuelle à partir des séries filtrées. La forte réponse hydrologique du modèle du NCAR au réchauffement global s'explique en partie par l'absence d'une rétroaction négative réaliste liée à la téléconnexion entre les précipitations continentales et la température de surface à l'Est du Pacifique Tropical.

## Analyse multifractale des précipitations simulées dans un scénario GIEC

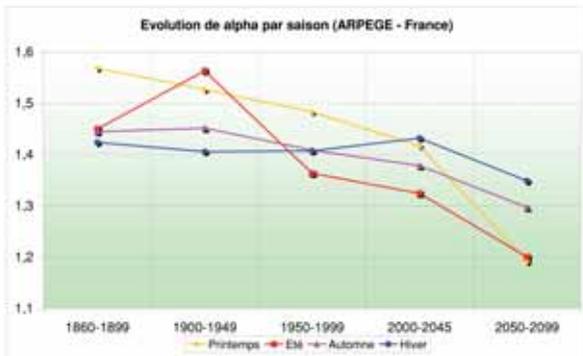
Dans le cadre du projet Mhym (Multiplicité d'Échelles en Hydro-Météorologie), les chercheurs de Météo-France ont commencé, en collaboration avec l'équipe de l'ENPC/Cereve, à appliquer des méthodes d'analyse multiéchelle à des séries temporelles de précipitation simulées par les modèles de climat.

Le but de ces études est de déterminer les caractéristiques d'invariance d'échelle qui pourront servir de base théorique à des méthodes de changement d'échelle, telles que la désagrégation des champs simulés, par exemple au moyens de modèles de cascade, pour représenter une variabilité à des échelles plus fines.

Comme premier test de ces méthodes, on a appliqué le formalisme multifractal au moyen de la méthode dite du « moment double trace », pour analyser les séries de précipitations simulées sur la France et sur l'Afrique de l'Ouest, dans des scénarios couplés réalisés au CNRM et à l'IPSL.

L'analyse a montré que le modèle multifractal universel donnait une bonne représentation des caractéristiques d'invariance d'échelle des précipitations journalières simulées. Les variations spatiales et saisonnières des deux paramètres de ce modèle qui représentent la multifractalité et l'intermittence, ainsi que leur évolution temporelle à long-terme en réponse au changement global (figure), montrent la sensibilité de cette méthode comme outil d'analyse de la variabilité des précipitations. On envisage donc de poursuivre l'application de cette méthodologie à d'autres régions, et à d'autres modèles, en approfondissant l'étude des caractéristiques multifractales et des singularités qui leur sont associées, en liaison avec l'occurrence de phénomènes extrêmes.

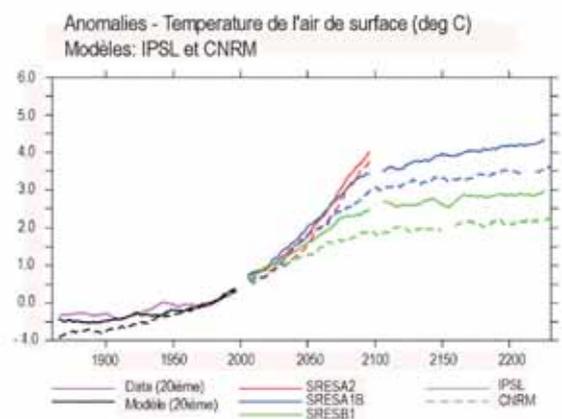
Evolution de la moyenne sur la France de l'indice de multifractalité (alpha : en haut) et du paramètre d'intermittence (C1 : en bas) caractérisant la loi d'échelle des précipitations journalières simulées par le modèle CNRM-CM3 pour les différentes saisons au cours d'un scénario de changement global (scénario A2 du GIEC)



## Évaluation des simulations GIEC réalisées par le CNRM et l'IPSL

En utilisant la version la plus récente de son modèle climatique couplé global, CNRM-CM3, les chercheurs de Météo-France ont réalisé l'ensemble des simulations demandées par le GIEC. Parallèlement, le CNRS/IPSL s'est prêté à même exercice avec le système IPSL-CM4, qui partage avec le modèle CNRM-CM3 le même modèle d'océan. Ces simulations serviront de base scientifique au 4ème rapport d'évaluation du GIEC, dont la sortie est prévue pour 2007. Les expériences réalisées comportaient notamment une simulation longue de référence, sans prise en compte de l'impact des activités humaines sur le climat (conditions « préindustrielles »), une simulation historique du climat du 20ème siècle, et plusieurs scénarios climatiques pour le 21ème siècle, prolongés jusqu'en 2300 en bloquant l'évolution des concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols atmosphériques à partir de 2100.

Cet exercice a conduit l'IPSL et le CNRM à produire de nouveaux jeux de données estimant l'évolution de l'atmosphère, de l'océan, de la banquise et des surfaces continentales dans des conditions de changement climatique. Afin de valoriser ces données, un projet de la communauté climatique française, Escrime, a été mis en place. De nombreux projets d'analyses seront menés dans ce cadre, portant par exemple sur l'étude du rôle des nuages, des connexions entre les tropiques et les moyennes latitudes, des régions de moussons, de la banquise, ou encore de l'impact du changement climatique sur l'évolution des événements extrêmes. De telles études, coordonnées au plan national, devraient également permettre de mieux comprendre et évaluer les incertitudes inhérentes aux simulations de changement climatique.



Évolution de la température de l'air en surface, en moyenne globale, en prenant pour référence la moyenne des années 1961-1990. Les traits pleins et pointillés représentent respectivement les simulations de l'IPSL et du CNRM. SRES-B1, A1B et A2 représentent quelques scénarios pour le 21ème siècle, faisant l'hypothèse de niveaux relativement bas, moyens ou élevés d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols.

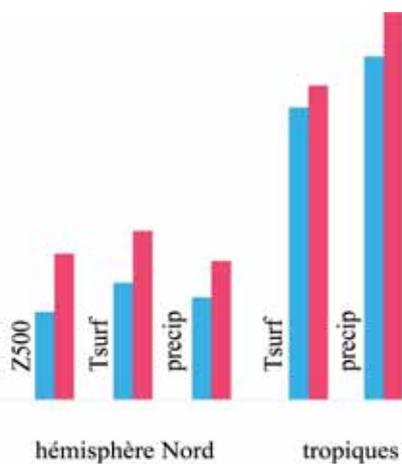
## Prévision saisonnière

### Prévision saisonnière : meilleure prise en compte de la stratosphère

Il est clair depuis le phénomène El Nino 1982-83 qu'une grande part de la prévisibilité à l'échelle saisonnière vient de l'océan tropical. Des expériences idéalisées et des analyses de corrélation ont montré que l'humidité du sol ou la couverture de neige jouaient également un rôle.

La stratosphère, malgré sa faible capacité thermique est le siège de phénomènes de grande régularité (e.g. l'oscillation quasi-biennale). Des considérations théoriques et statistiques ont récemment montré que la stratosphère pouvait agir avec un délai d'un mois sur la façon dont les courants jets tournent autour du pôle Nord.

On a vérifié dans les prévisions numériques d'Arpège que le mode annulaire de l'hémisphère Nord possédait une prévisibilité à l'échelle de la saison bien supérieure à celle de l'oscillation nord atlantique (NAO) : la corrélation pour l'hiver est de 0,4 contre 0,2. Cela nous a poussé à refaire une série de quarante quatre prévisions couplées à quatre mois d'échéance avec une version d'Arpège à 91 niveaux sur la verticale au lieu de 31. Les scores (figure) montrent un gain pour les tropiques aussi bien que pour les latitudes tempérées de l'hémisphère nord. Malgré son coût dix fois plus élevé que la version standard d'Arpegé, cette version stratosphérique pourrait, si les scores se confirment avec d'autres configurations, proposer un successeur crédible pour la prévision opérationnelle.

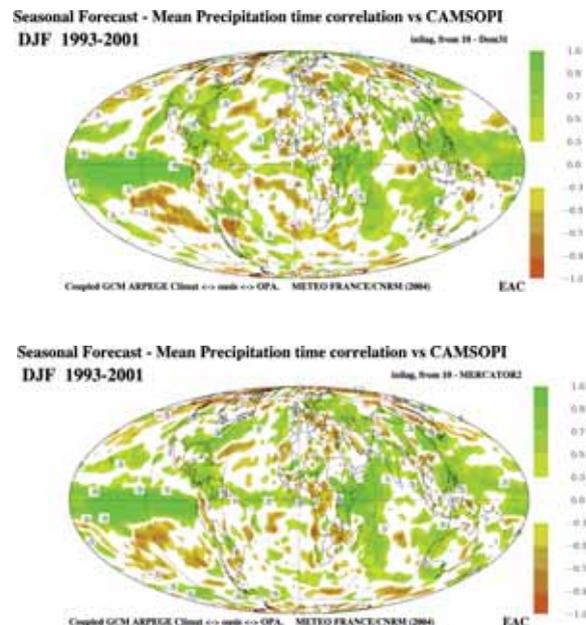


Comparaison des corrélations pour deux séries de 44 prévisions d'hiver (1958-2001), l'une avec la version standard d'Arpegé (bleu) et l'autre avec une version à haute résolution stratosphérique (rouge) : géopotential à 500 hPa, température de surface et précipitations.

### Amélioration des prévisions saisonnières par une meilleure estimation des données océaniques

Une grande part de la prévisibilité à l'échelle saisonnière est liée au comportement des océans tropicaux. Nos expériences récentes ont montré que, sur la plupart des scores, l'utilisation d'un modèle couplé l'emportait sur celle d'un modèle atmosphérique forcé par des températures de la mer prévues par un autre modèle couplé ou par un schéma statistique. Pour faire une bonne prévision, il faut partir d'un bon état initial. Pour une prévision saisonnière, l'état initial de l'océan est primordial. La méthode la plus simple, quand on ne dispose pas de données sous la surface, est de forcer le modèle d'océan seul par les flux de surface calculés par un modèle d'assimilation de données atmosphériques. Pour assurer un couplage minimal linéaire, un terme de rappel de la température de surface de l'océan est ajouté. La figure (a) montre les scores de corrélation pour décembre-janvier-février (prévision issue du 1er novembre) pour les précipitations.

Depuis la fin 2003, le groupe Mercator met, chaque mois, à la disposition des chercheurs français un jeu de conditions initiales océaniques qui prennent en compte les données altimétriques mesurées par satellite. Ainsi un réchauffement sur une grande profondeur de l'océan a une signature différente d'un réchauffement superficiel. La figure (b) montre les scores de prévision avec cette nouvelle technique. La prochaine étape, prévue pour l'été 2006, est d'introduire des données de sub-surface mesurées in-situ. Cela permettra d'affiner les données récentes et de fournir des états antérieurs à 1991, date des premiers satellites altimétriques.



Corrélation temporelle des précipitations pour une prévision de moyenne saisonnière décembre-janvier-février avec des états océaniques initiaux calculés par la méthode de forçage par les flux atmosphériques (a) et avec des états fournis par Mercator (b).

Cette année, de nombreux développements ont été menés comme le couplage océan/atmosphère en Méditerranée, de nouvelles méthodes d'assimilation dans le modèle global Morage de chimie atmosphérique, l'étude du cycle du carbone lors de la campagne Ceres ...

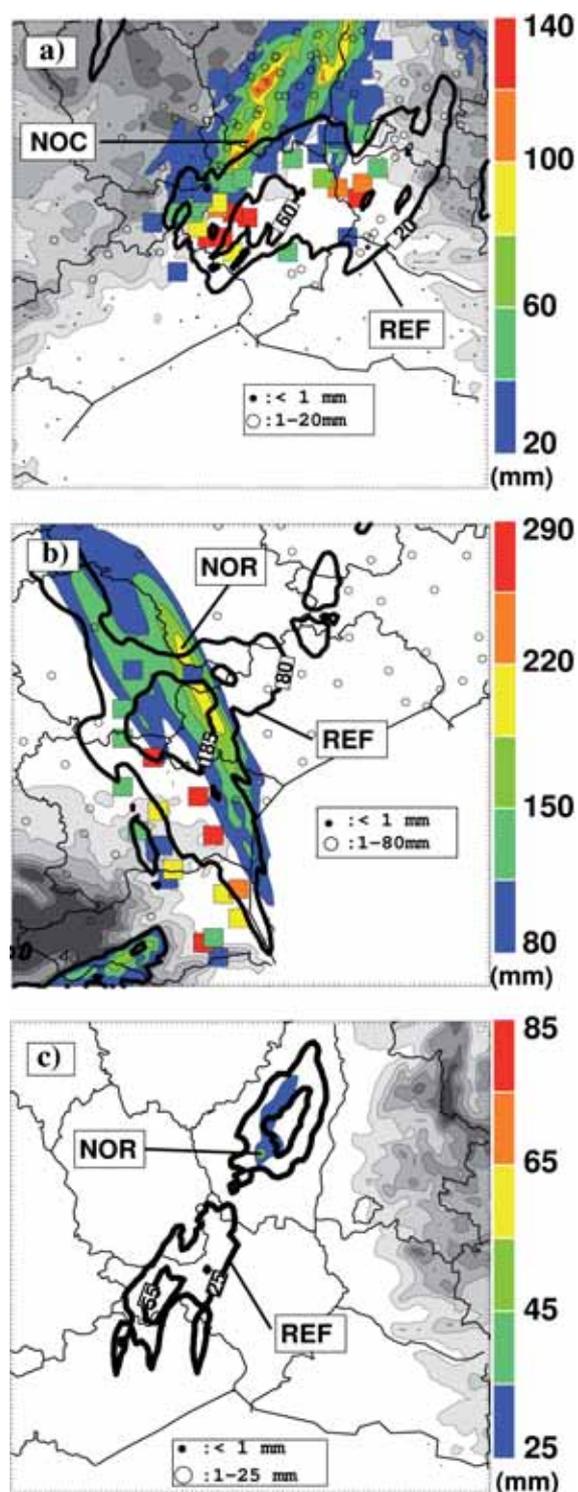
## Hydrométéorologie

### Stationnarité des épisodes fortement précipitants en région Méditerranéenne.

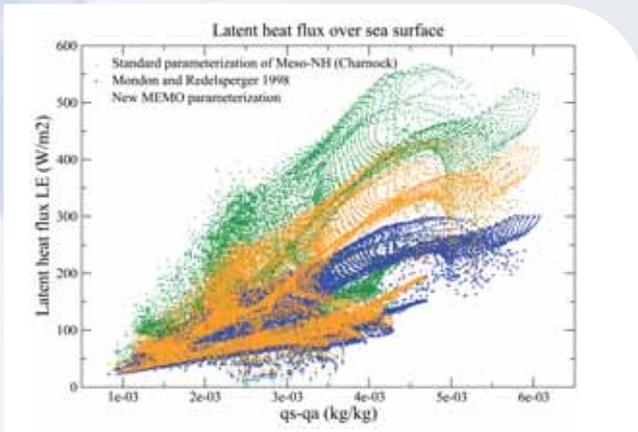
Comme d'autres régions de l'ouest du bassin Méditerranéen, le sud de la France est souvent soumis à des épisodes de crues-éclair dévastatrices. A l'aide de simulations numériques à haute résolution du modèle Més0-NH, on a étudié deux cas de systèmes convectifs de méso-échelle quasi-stationnaire ayant conduit à des cumuls de précipitations exceptionnels (> 500 mm en 24 heures), les 8-9 septembre 2002 sur le Gard et les 12-13 novembre 1999 sur l'Aude, et un autre cas plus typique d'épisode « Cévenol », celui des 13-14 octobre 1995 sur les Cévennes.

L'analyse du contexte météorologique indique des conditions à grande échelle propices au déclenchement de systèmes convectifs (un flux de sud divergent en altitude sur la région, un flux convergent de composante sud à est chaud et humide dans les basses couches butant contre le Massif Central, une configuration à échelle synoptique évoluant lentement,...). A méso-échelle, le forçage orographique est l'un des principaux facteurs qui explique, dans les cas typiques (Cévennes), la formation perpétuelle de nouvelles cellules orageuses au-dessus des mêmes régions par soulèvement et condensation des masses d'air humide venant de Méditerranée. Cependant, dans d'autres cas (inondations du Gard) peut intervenir un autre forçage moins prévisible tel que le soulèvement de l'air chaud et humide par un dôme d'air froid généré par l'évaporation des précipitations. Les expériences de sensibilité (figures) illustrent l'impact du relief et de cette plage froide sous orage sur le caractère stationnaire de ces systèmes convectifs.

Cette étude fait la synthèse des principaux mécanismes météorologiques à l'origine de la stationnarité des épisodes de crues-éclair sur le sud-est de la France. Elle sera poursuivie à travers une approche climatologique dans le projet Cyprim.



Précipitations cumulées pour divers cas : a) Gard entre 18 et 22 UTC le 8 septembre 2002, b) Aude entre 12 et 06 UTC le 13 novembre 1999, c) Cévennes entre 00 et 06 UTC le 14 octobre 1995 (cumuls de pluies ~ 250 mm en 24 heures). Les symboles géométriques représentent les observations à partir du réseau de pluviomètres. Les expériences de sensibilité (NOC= sans refroidissement sous orage et NOR = sans Massif Central) sont mises en surfaces colorées et les expériences de référence (REF) en isolignes. L'image a) montre que si le phénomène de refroidissement sous orage est supprimé, le système convectif simulé perd sa stationnarité sur les plaines du Gard et va s'ancrer sur les contreforts du Massif Central (expériences NOC). Les expériences NOR représentées en b) et c) illustrent par contre respectivement le facteur aggravant du relief sur les inondations (cas de l'Aude) et son rôle essentiellement déclencheur des fortes pluies (cas des Cévennes).



Validation off-line de la paramétrisation des flux de surface sur mer sur une prévision Més0-NH du cas des inondations de l'Aude (13 nov. 1999 00 UTC) : En vert le flux de chaleur latente LE (W/m<sup>2</sup>) simulé avec la paramétrisation standard ou directe de Més0-NH (Charnock), en bleu avec la paramétrisation itérative de Mondon et Redelsperger (1998) et en orange avec la nouvelle paramétrisation Memo basée sur une calibration multi-campagnes des coefficients d'échange neutres.

### Couplage océan-atmosphère lors des événements méditerranéens de pluie intense

Pour les événements fortement précipitants qui affectent souvent le sud de la France en automne, la mer Méditerranée constitue une importante source de chaleur et d'humidité. Pour progresser dans la prévision de ces événements, il est essentiel de mieux comprendre les interactions air-mer pendant ces épisodes ainsi que la sensibilité des prévisions atmosphériques aux conditions de surface.

Dans un premier temps, on a étudié la sensibilité des prévisions à haute résolution Més0-NH à la température de surface de la mer (SST) pour trois cas de pluie intense sévères. Il a ainsi été montré que l'intensité des précipitations était influencée par la valeur moyenne de la SST sur le bassin méditerranéen occidental, mais que la prévision était relativement peu sensible à une description à fine échelle du champ de SST.

Dans un second temps, la sensibilité à la paramétrisation des flux de surface sur mer a été examinée. Une nouvelle paramétrisation basée sur une calibration multi-campagnes des coefficients d'échanges neutres a été testée. Les résultats montrent que cette nouvelle paramétrisation donne des valeurs de tension de vent et de flux de chaleur au dessus de la mer plus réalistes comparée à la paramétrisation standard de Més0-NH. L'impact sur l'intensité et la localisation de la convection dépend du régime de vent et de la stabilité sur le bassin. Le flux de chaleur latente est diminué pour un régime de vents forts par exemple dans le cas des inondations de l'Aude et par conséquent la convection est moins intense avec de plus faibles cumuls de précipitation.

La prochaine étape s'intéressera à l'impact des fortes précipitations sur la couche de mélange océanique, en développant notamment un couplage entre un modèle de couche limite océanique avec le modèle Més0-NH.

### Constitution de la base de données Shyreg sur la Martinique

Avec l'aide du bureau d'études de la Direction Sud-Est de Météo-France, les paramètres quotidiens caractéristiques des pluies de la Martinique ont été calculés, puis régionalisés sur une grille au kilomètre. Ces paramètres permettent au Cemagref de décrire les paramètres horaires utilisés dans leur simulateur de chroniques pluvieuses.

Ainsi, comme cela a été fait pour l'ensemble de la France métropolitaine et de la Réunion, le Cemagref sera en mesure de calculer les cumuls de pluies pour différentes durées de retour et différents pas de temps à cette même échelle spatiale du kilomètre.

Une étude similaire sur les données de Guadeloupe sera menée en 2006.

### Inventaire des pluies extrêmes sur la région Antilles-Guyane

Une étude a été menée afin d'établir un inventaire des événements pluvieux les plus extrêmes, recensés depuis le début de l'enregistrement des mesures jusqu'à la fin 2004, pour la Guadeloupe, y compris les îles du Nord, la Guyane et la Martinique.

Un seuil de 190 mm a été retenu pour les Antilles et 160 mm pour la Guyane. Chaque événement répertorié a été cartographié, et documenté pour les plus récents. L'analyse de cet inventaire permet d'estimer la fréquence de ces événements pluvieux extrêmes à l'échelle de chaque commune.

Un CD-Rom permettant une consultation rapide de ces événements a été produit.



Inondations et pluies exceptionnelles sur la région Antilles-Guyane.

## Méthode d'inversion des réflectivités radar en paramètres assimilables par Arome

Dans le cadre du développement du prochain modèle de prévision à haute résolution, Arome, il est envisagé d'assimiler des données radar afin d'améliorer, entre autres, la prévision des événements fortement précipitants.

L'approche développée est constituée d'une première phase de restitution 1D de profils verticaux de paramètres du modèle à partir des réflectivités observées, puis d'une assimilation 3D-Var de ces profils. Les réflectivités sont ainsi exprimées en paramètres météorologiques à la fois utilisables par le modèle et susceptibles de l'influencer de manière significative (ex : l'humidité, la température, etc).

La relation entre la réflectivité et ces paramètres n'étant pas analytique, on fait appel à une méthode statistique afin de tirer parti des informations supplémentaires fournies par le modèle. De chaque colonne verticale de réflectivités observées, on déduit une colonne verticale de paramètres assimilables qui est une combinaison linéaire des colonnes produites par le modèle autour de la colonne observée. Les poids respectifs attribués à chaque colonne du modèle sont déterminés en simulant des réflectivités pour chacune de ces colonnes, et en évaluant leur écart à la colonne observée : plus l'écart est réduit et plus le poids affecté à la colonne du modèle est important. On privilégie ainsi les colonnes qui ressemblent le plus à la colonne observée.

Moyennant quelques ajustements, cette méthode d'inversion montre des résultats encourageants sur le champ d'humidité en corrigeant les écarts entre observation et simulation.

Par la suite, les paramètres obtenus seront assimilés par le système d'assimilation 3D-Var Aladin et il s'agira de quantifier leur impact sur la qualité de la prévision.

## Calibration hydrologique des radars des Antilles Françaises

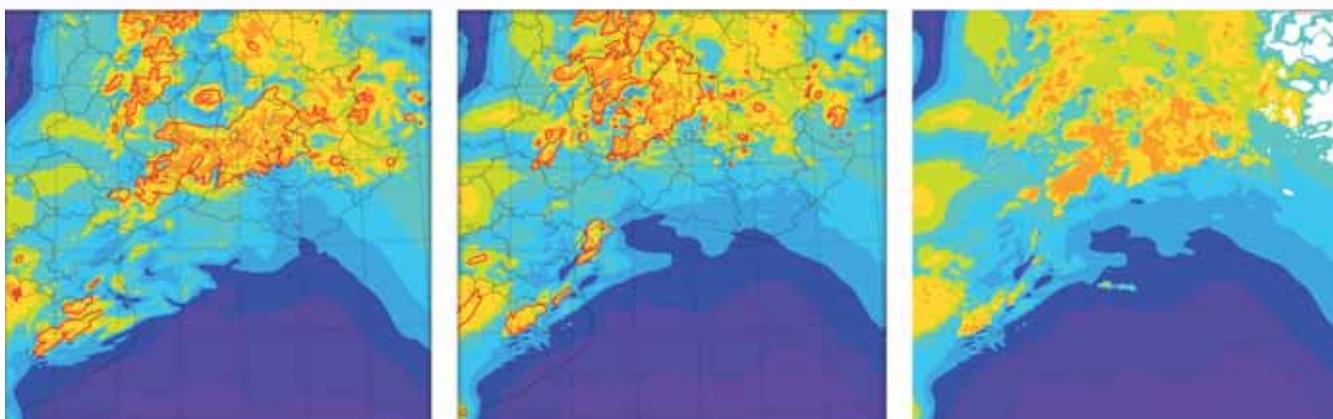
Cette étude a pour finalité l'ajustement des coefficients A et B de la loi empirique Z-R qui permet la conversion de la réflectivité radar (Z en mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup>) en intensité de pluie (R en mm/h) et donc l'obtention de lames d'eau issues des radars de Guadeloupe et Martinique.

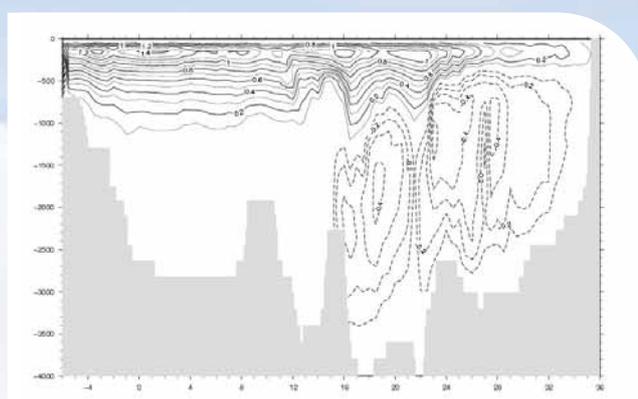
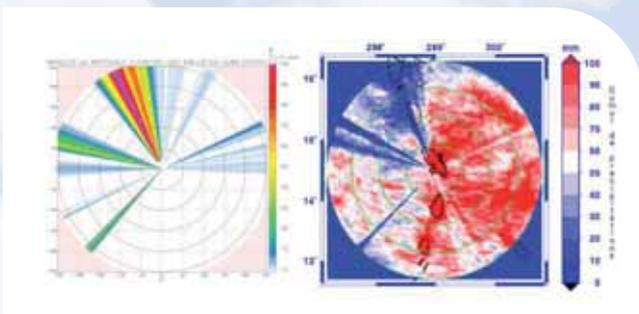
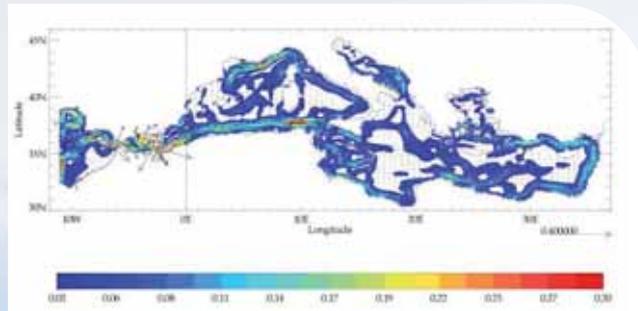
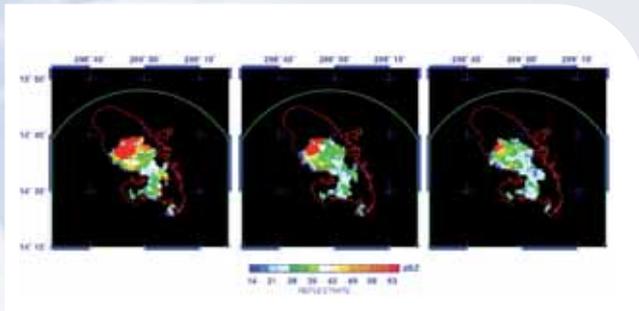
La première étape de l'étude a consisté à déterminer les échos de sols et zones de masque qui peuvent affecter la mesure radar. Les échos de sol ont été discriminés par un cumul sur une période d'une dizaine d'heures d'images non filtrées par journée sans précipitations (échos de pluie) notables. Ces cumuls ont été effectués à différentes élévations (typiquement entre 0.5 et 2.5 degrés par pas de 0.5 degré). La discrimination des zones de masques a été réalisée par un cumul sur une période de quelques mois d'images non filtrées au site de 0.5 degré compte tenu de l'archivage disponible. Cette détermination a été complétée par une étude théorique par l'utilisation du logiciel Surfillum associé à un Modèle Numérique de Terrain (Météo-France/DSO).

L'étape actuelle consiste à choisir le meilleur mode d'exploration des radars en tenant compte des contraintes de la prévision. Parallèlement, un choix des postes pluviométriques qui serviront de référence pour la comparaison des cumuls calculés avec la donnée radar avec les cumuls mesurés par pluviomètre est en cours. Compte-tenu de la dimension et de la topographie des îles, les comparaisons seront ponctuelles et non par couronnes concentriques autour des radars avec une spatialisations des précipitations.

L'année 2006 devrait permettre avec ces comparaisons mensuelles d'appréhender les lois Z-R les plus appropriées à la pluviométrie de la Guadeloupe et de la Martinique.

Champ d'humidité relative (%) à 2 km d'altitude simulé pour le 8 septembre 2002 à 18 UTC (les lignes de niveau rouges représentent des réflectivités de 10 dBZ). À gauche : observations simulées. Au centre : ébauche du modèle. À droite : champ obtenu par la méthode d'inversion.





Différents types de traitement sur les échos radar des Antilles

Image 1 : Intensité en m/s et direction du courant moyen en hiver à 34 m de profondeur sur 38 ans du modèle couplé régional.

Image 2 : Fonction de retournement zonale en Sverdrup (1 Sv = 106 m<sup>3</sup>/s) intégrée sur l'ensemble de la Méditerranée pendant 38 ans du modèle couplé régional. On a représenté en gris la profondeur maximale de la bathymétrie à une longitude donnée. Les valeurs négatives sont en tirets.

## Océanographie

### Modélisation climatique couplée du bassin méditerranéen.

La mer Méditerranée influence fortement le climat régional mais aussi planétaire par sa température de surface et sa circulation thermohaline. Simuler sa variabilité naturelle et ses tendances sur la fin du 20ème siècle est donc un défi majeur. Dans ce but, un modèle régional couplé océan-atmosphère (SAMM pour Sea-Atmosphere Mediterranean Model) focalisé sur le bassin méditerranéen a été développé. Ce modèle associe la version étirée du modèle Arpège-Climat (50 km de résolution) à une version régionale du modèle océanique Opa (10 km).

Ce modèle couplé régional, le premier de ce type pour la Méditerranée, représente correctement les échanges d'eau et de chaleur à l'interface air-mer ainsi que leur variabilité interannuelle. Il simule la convection profonde et la circulation thermohaline associée en accord avec les toutes dernières observations. Soumis à l'évolution des concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols de la fin du 20ème siècle, il reproduit l'augmentation observée des températures et des salinités dans les profondeurs de la Méditerranée.

L'étape suivante sera d'évaluer l'impact du réchauffement climatique sur la circulation thermohaline de la Méditerranée au cours du 21ème siècle. Cet outil permettra de comprendre si les tendances observées actuellement sont les prémices de la situation du 21ème siècle et comment l'évolution en Méditerranée peut avoir un impact sur la circulation thermohaline globale.

### Evaluation du nouveau mât de mesures de flux turbulents sur l'Atalante

Des mesures de flux seront réalisées durant la campagne Amma depuis le navire océanographique « l'Atalante ». L'instrumentation nécessaire sera installée sur une plate-forme spécialement étudiée, en haut du mât de misaine du bâtiment. La présence de ce mât, ainsi que celle du bateau, dévie les trajectoires de l'air et modifie la vitesse et la direction du vent au point de mesure.

La veine hydraulique du CNRM a donc été mise à contribution, comme cela avait été le cas pour d'autres installations du même type, afin de vérifier l'aptitude de l'emplacement projeté, et de calculer les paramètres caractérisant les modifications apportées à l'écoulement selon plusieurs attitudes (en azimut, roulis et tangage). A cet effet, des mesures comparatives de vélocimétrie laser ont été effectuées à l'emplacement des capteurs sur une maquette au 1/60ème du bateau, et 1m en amont de la maquette dans l'écoulement non perturbé par le navire (équivalent à 60m dans l'atmosphère).

Cette étude permet de fournir aux scientifiques qui utiliseront les données mesurées sur l'Atalante, les éléments de correction

qui leur permettront de rétablir des valeurs débarrassées des artefacts liés aux conditions de mesure.



Vue de l'écoulement autour de la maquette de l'Atalante, dans la veine hydraulique du CNRM.

## Le modèle de houle cyclonique aux Antilles françaises

Une étude a débuté afin d'améliorer le modèle de houle cyclonique dont les résultats ont montré les limites lors de plusieurs épisodes cycloniques sur la zone.

Le modèle de houle cyclonique est opérationnel depuis 2002 aux Antilles françaises. Il repose sur le modèle de vagues de Météo-France et sur un modèle analytique de cyclone établi à partir des équations de Holland. Il utilise des domaines imbriqués de résolution de plus en plus fine. Chacun des domaines imbriqués est initialisé sur sa bordure par les spectres de vagues calculés sur le domaine de résolution inférieure.

Des études comparatives ont montré que la houle simulée est mal appréhendée (décalage du pic de 6 à 12 heures, erreur de plus de 50 centimètres dans la hauteur significative) par rapport à la houle observée. Une première amélioration est attendue d'une meilleure définition en cours du champ de vent cyclonique en adaptant le modèle analytique de Holland. Une seconde amélioration passe par une meilleure initialisation du modèle avec notamment les spectres initiaux de l'état de la mer fournis par un modèle de grande échelle. Enfin, il serait souhaitable de disposer des champs de vents d'un modèle à résolution plus fine et bogussé avec les valeurs de pression du cyclone.

Cette action d'amélioration se poursuit et doit aboutir dans une zone où la fréquence des épisodes de fortes houles est beaucoup plus élevée que celle des vents cycloniques par exemple.



Houle cyclonique aux Antilles

## Mesure de la salinité dans le Golfe de Gascogne pour Cosmos

La campagne Cosmos ayant pour but de valider le fonctionnement de la mission Smos (Soil Moisture and Ocean Salinity) de l'Agence Spatiale Européenne a débuté au printemps 2005. Les mesures aéroportées n'ont pu être effectuées à la suite d'un problème de dernière minute sur l'avion. Les mesures de salinité in situ ont cependant été maintenues. Pour cette campagne, le Centre de Météorologie Marine a déployé trois de ses bouées dérivantes Metocean, et douze autres fournies par la Scripps Institution of Oceanography (SIO).

Les deux types de bouées sont des variantes du flotteur SVP. Les deux possèdent un capteur de conductivité SeaBird. Les quinze bouées ont été mises en mer dans le Golfe de Gascogne, trois par trois, au début des mois d'avril et de mai 2005. Globalement, l'expérience a été un succès : on n'a jamais obtenu tant de données de mesures de salinité de surface de la mer par bouées dérivantes que lors de cette campagne.

Cette campagne a permis de faire des inter-comparaisons entre les mesures des bouées et celles des thermosalinographes des navires de recherche.



Photo d'une bouée SVP BS (Métoccean et SIO)

## Evaluation du modèle Mercator (analyse Mera11) sur les données de la campagne Pomme

Compte-tenu de l'abondance des données recueillies lors de la campagne Pomme (Atlantique Nord-Est, automne 2000 / automne 2001) pour laquelle plusieurs équipes de Météo-France ont apporté une contribution active, une évaluation du modèle Mercator s'imposait.

Cette étude s'intègre dans le cadre d'une réponse à l'appel d'offres 2005 du GMMC. Le but est de comparer les diagnostics obtenus lors de cette campagne avec ceux d'une ré-analyse (Mera11) effectuée récemment par le Groupe Mercator.

Celle-ci couvre la période 1993-2002 et a utilisé toutes les données océaniques disponibles sur l'Atlantique. La validation est effectuée en examinant plus particulièrement les couches superficielles : flux à l'interface océan/atmosphère, températures et salinités de surface, profondeurs de couche mélangée, transports d'Eckman, vitesses verticales, etc.

Les résultats préliminaires soulignent l'excellente capacité de la ré-analyse à fournir des états réalistes, pour autant que les données d'observation soient en nombre suffisant. La figure illustre la profondeur des couches mélangées sur l'ensemble du domaine expérimental. Cette variable résulte de la compétition de nombreux processus, notamment de l'estimation correcte des flux de surface. On note le bon comportement de l'analyse Mera11 lors des phases d'approfondissement automnal et de retrait printanier, même si le maximum hivernal est légèrement sous-estimé et en avance sur ceux fournis par d'autres modèles. La résolution spatiale de la ré-analyse ne permet toutefois pas de retrouver les fines structures caractérisant ces champs.

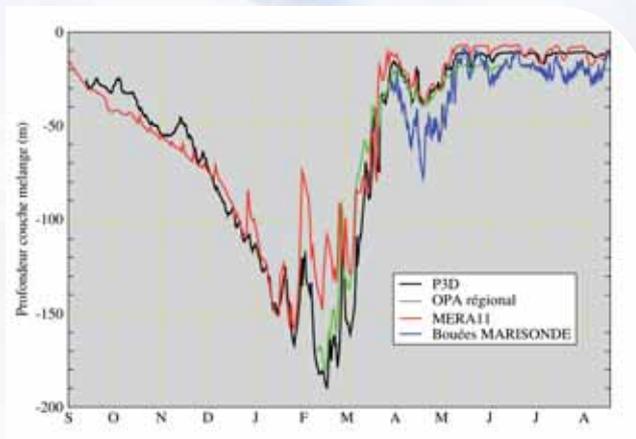


Photo de la bouée-phare d'Ouessant en Bretagne

### Essai d'une chaîne bathythermique sur bouée dérivante

La connaissance de la température de la mer dans la couche de mélange et son évolution revêt une importance capitale dans l'étude des interactions océan-atmosphère. Des développements ont été menés par les chercheurs de Météo-France pour permettre de mesurer ce paramètre sur les bouées dérivantes légères de type SVP.

Un dispositif de mesures a été conçu par les spécialistes du CNRM. Deux de ces bouées, équipées d'une chaîne de thermistances de 60 m de long, ont été mises à bord de navire l'Argonaute qui a réalisé les mouillages au début du mois de juillet dans le Golfe de Gascogne. Une des deux chaînes a été récupérée après une quinzaine de jours en mer par le navire océanographique Laperouse pour expertise. Les quelques difficultés rencontrées ont nécessité des modifications qui ont été menées à bien en cours d'année. Ce système s'avère globalement prometteur pour l'avenir.



Evolution des couches de mélange moyennes sur la zone de l'expérience Pomme, avec deux modèles régionaux (en noir et en vert), la ré-analyse Mera11 (en rouge) et d'après des données de bouées (en bleu).

### Nouveaux capteurs sur la bouée phare d'Ouessant

Le service des Phares et Balises (DDE) maintient par 48.5°N et 5.7°W au beau milieu du rail d'Ouessant une bouée-phare de près de 100 tonnes et de plus de 10 mètres de haut. On a instrumenté cette bouée de navigation en capteurs météorologiques depuis quelques années.

Depuis l'été 2005 de nouveaux capteurs ont été installés : il s'agit d'un anémomètre sonique, d'un pyranomètre et d'un pyrgeomètre. Ces deux derniers capteurs permettent d'obtenir des mesures de rayonnement en mer qui seront très utiles pour la validation des mesures satellitaires



Chaîne bathythermique de mesure de la température de la mer jusqu'à 60 m de profondeur.

## Des moyens de mesure en mer efficaces

Météo-France utilise divers moyens de mesures en mer. Des bouées sont déployées régulièrement dans le cadre du Data Buoy Cooperation Panel (DBCP) et contribue aux travaux de deux programmes : E-Surfmar et IBPIO. En 2005, 26 bouées ont été mises à l'eau dans l'Atlantique Nord en 2005, et 15 bouées dans l'Océan Indien en collaboration avec des océanographes américains. Par ailleurs, trois bouées ancrées ont été remplacées en cours d'année, celle qui est ancrée au large de la Martinique et les deux bouées de Méditerranée (Golfe du Lion et Côte d'Azur).

Neuf stations automatiques Minos sont en fonctionnement à ce jour à bord de différents navires. La dernière en date a été montée à bord du navire Tara, voilier polaire qui, à partir de la Géorgie du Sud, va entreprendre une dérive de deux ans dans les glaces de l'Océan Arctique, à l'occasion de l'Année Internationale Polaire de 2007.

Parallèlement, en réponse à une demande du programme d'observation marine européen E-Surfmar, on a développé pour les données Batos provenant de navires sélectionnés, un module de «compression/décompression /constitution» de messages Ship (issu de la mesure à bord du bateau) pour diminuer les coûts de transmission. Ce module permettra aussi de transmettre plusieurs fois le même message sur les bouées ancrées afin de limiter les risques de perte dus aux erreurs de transmission.

Enfin, une convention entre le Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales et Météo-France a été signée afin de faciliter l'échange de données in situ d'état de mer et la collaboration entre les deux organismes. Ainsi, les données «temps réel» in situ recueillies par les houlographes sont mis à la disposition de chacune des parties. Les données disponibles sont utilisées par la Direction de la Production à des fins de prévision météorologique.



Voilier polaire Tara équipé d'une station automatique Minos par Météo-France.



Bouée SVP-B en mer

## Bouées du programme E-Surfmar

Le programme E-Surfmar a été établi le 1<sup>er</sup> avril 2003 par le réseau météorologique européen Eumetnet dans le cadre de son programme d'observation composite Eucos. Ses principaux objectifs sont de coordonner, d'optimiser et progressivement d'intégrer les activités européennes concernant les observations de surface de la mer – comprenant les bouées dérivantes et ancrées et les navires sélectionnés. Quinze membres d'Eumetnet ont accepté de participer aux quatre premières années du programme (2003-2006), dont Météo-France est le responsable.

Selon la convention, signé en 2004 entre le Groupe Européen des Stations Océaniques (Egos) et E-Surfmar, il avait été décidé que, à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2005, E-Surfmar assumerait l'entière responsabilité des réseaux de bouées ancrées et dérivantes dirigés précédemment par Egos.

Une cinquantaine de bouées dérivantes ont été déployées en 2005 dans l'Océan Atlantique Nord. Trois flotteurs ont aussi été mis en mer en Méditerranée Occidentale pour tester la durée de vie de bouées dérivantes dans cette région. Le contrôle des données des bouées ancrées appartenant auparavant à Egos a été maintenu. A la fin de l'année 2005, vingt sept bouées ancrées étaient en fonctionnement.

L'étude de définition d'E-Surfmar recommandait le déploiement de près de 175 bouées de type SVP-B par année. Il est évident que pour des raisons financières il faudra plusieurs années pour atteindre cet objectif. Cependant, dès 2006, la composante «bouées dérivantes» sera entièrement intégré, avec prise en charge par le programme E-Surfmar des coûts d'achats des bouées et de communication Argos associés.

## Des satellites pour mieux prévoir les vagues.

Les observations spatiales relatives aux vagues ne sont exploitées que par quelques grands services météorologiques pour recalibrer les modèles de prévision de l'état de la mer. Les données de hauteur de vagues issues des altimètres des satellites Jason et Envisat sont ainsi utilisées de façon opérationnelle depuis plusieurs années, entraînant une amélioration des prévisions de vagues. En revanche, les données de spectres de houle délivrés par le radar à ouverture synthétique (Asar) du satellite Envisat ne sont que très peu exploitées alors qu'elles pourraient conduire à une amélioration supplémentaire des prévisions de vagues en apportant des informations complémentaires sur l'état de la mer. Des travaux sont donc en cours, visant à intégrer ces nouvelles données dans les modèles d'état de mer.

Dans un premier temps, les données de l'Asar ont été analysées afin d'établir des critères de qualité et de validité des données. En effet, la complexité des mécanismes d'interaction entre les vagues et les signaux radar entraîne des difficultés de restitution des spectres de vagues. Dans un deuxième temps, le réglage d'un certain nombre de paramètres liés à l'assimilation des données Asar a été effectué en réalisant des expériences d'assimilation sur des situations réelles.

Il a été démontré que l'assimilation des spectres directionnels des vagues permettait d'obtenir une meilleure description des paramètres moyens de la houle (hauteur significative, direction et période) et d'augmenter la durée de leur impact dans la prévision. Enfin, des travaux visant à intégrer conjointement les données du radar altimètre RA2 et celles de l'Asar ont été menés. Les résultats préliminaires (figure) montrent un impact positif sur la prévision des vagues.

Image 1 : Impact (en secondes) de l'assimilation combinée des données des altimètres RA2 et Asar sur la période moyenne des vagues à 12:00 UTC le 7 mars 2003.

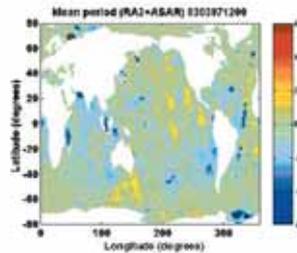
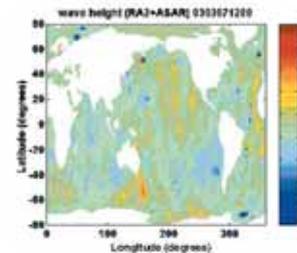
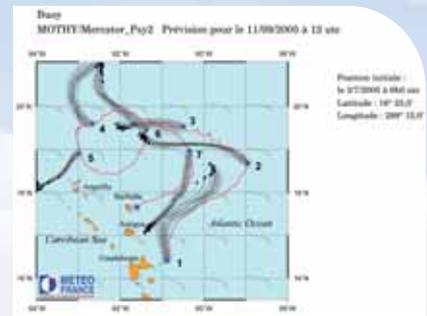


Image 2 : Impact (en mètres) de l'assimilation combinée des données des altimètres RA2 et Asar sur la hauteur significative des vagues à 12:00 UTC le 7 mars 2003.



Exemple de prévision de dérive en utilisant les systèmes d'océanographie opérationnelle Mercator (en bas) et Hycom (en haut). Le 3 juillet 2005, un houlographe rompt son ancrage au large de la Guadeloupe et dérive pendant plus de deux mois.

Des simulations de dérive (en gris) ont été réalisées tous les 10 jours à partir de positions observées et comparées avec la trajectoire réelle de la bouée (en rouge). La simulation donne de bons résultats pendant le premier mois, mais à peu près, pendant le deuxième mois de dérive, on observe des différences importantes entre les modélisations et la réalité.



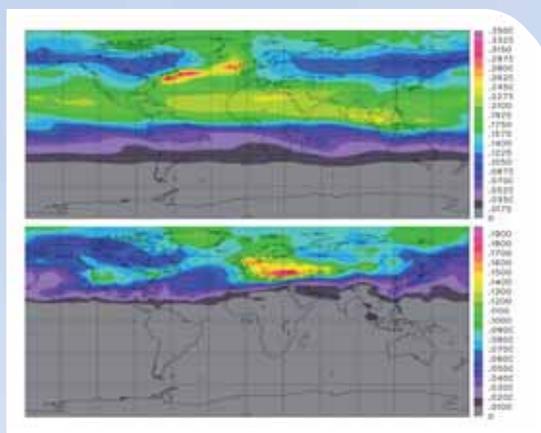
## Des avancées dans le domaine des dérives de nappe et d'objets flottants

Le Centre National de Prévision de Météo-France assiste les autorités chargées de la lutte antipollution et des opérations de recherche et sauvetage en leur fournissant des prévisions de dérive de nappes de pétrole ou d'objets flottants à la surface de la mer. Ces prévisions sont réalisées avec le modèle Mothy.

De nouveaux produits issus des systèmes d'océanographie opérationnelle tels que Mercator-Ocean (France), MFS (Italie), NCOF (UK), Topaz (Norvège) et Hycom (USA) sont maintenant disponibles et peuvent être intégrés dans le système de prévisions de dérives. La figure montre un exemple de prévision de dérive en utilisant les systèmes d'océanographie opérationnelle Mercator (en bas) et Hycom (en haut). Le 3 juillet 2005, un houlographe rompt son ancrage au large de la Guadeloupe et dérive pendant plus de deux mois. Des simulations de dérive (en gris) ont été réalisées tous les 10 jours à partir de positions observées et comparées avec la trajectoire réelle de la bouée (en rouge). La dérive simulée correspond bien à l'observation pendant le premier mois. Cependant, pendant le deuxième mois de dérive, des différences importantes entre les modélisations et la réalité sont observées.

Ainsi les systèmes d'océanographie opérationnelle peuvent être utilisés pour des prévisions de dérive. Cependant, la précision des courants de ces systèmes n'est pas toujours suffisante pour bien représenter la réalité. Cela est visible lors du deuxième mois de dérive, alors que le houlographe dérive dans une zone de divergence entre deux tourbillons de méso-échelle. L'amélioration des modèles, des observations et de leur assimilation dans les modèles amélioreront certainement ces prévisions dans le futur. Les résultats obtenus durant le premier mois de dérive sont très encourageants.

## Environnement atmosphérique et météo urbaine



Cartes de l'augmentation des oxydes d'azote NOx induite par une flotte aérienne, à 10 (en bas) et 17 km d'altitude (en haut) simulées par Mocage-Climat pour les années 2050. On notera sur la figure à 17 km d'altitude, la trace du couloir aérien au-dessus de l'Atlantique nord.

## Validation et évaluation de l'impact atmosphérique de l'aviation

Actuellement, les études climatiques s'intéressent à l'impact météorologique, mais négligent l'interaction entre chimie et atmosphère.

Une version climatique est donc développée à partir du modèle Mocage utilisé de manière opérationnelle à Météo-France pour la prévision de la qualité de l'air. Mocage-Climat décrit les champs globaux d'oxydes d'azote (NOx), d'ozone et de gaz à effet de serre. Il fournit des résultats très réalistes pour la couche d'ozone par rapport au radiomètre Toms ou pour les autres espèces par rapport à UARS ou Mozaic. L'évolution de Mocage-Climat passera par son intégration dans le modèle climatique représentant les interactions entre atmosphère, océan et glace de mer. Cela permettra ainsi de tenir compte de l'impact de la chimie atmosphérique sur l'ensemble du système climatique.

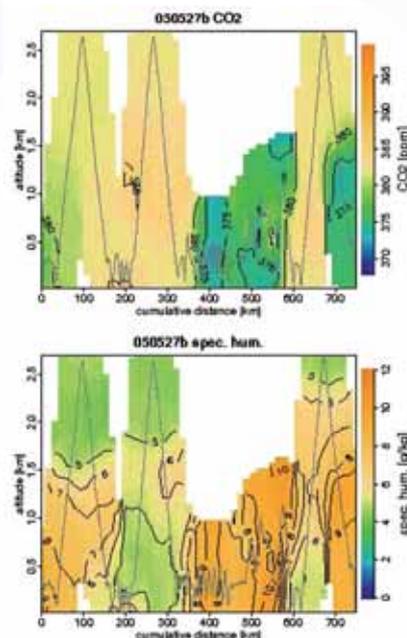
Mocage-Climat a évalué l'impact chimique de l'aviation sur l'atmosphère de 2050. La flotte est composée d'avions subsoniques (volant dans la troposphère) et supersoniques (volant dans la stratosphère). La perturbation due aux NOx (figure 1) rejetés par l'aviation se traduit par une augmentation générale de ce constituant : dans la troposphère, l'augmentation se « cantonne » aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère nord, alors qu'elle se propage jusque dans l'hémisphère sud aux altitudes supérieures. Dans la troposphère, l'aviation subsonique conduit à une augmentation de l'ozone. En revanche, l'ozone est détruit par l'excédent de NOx dans la stratosphère. Au total, cela aboutit à une augmentation de l'ozone (production troposphérique supérieure à la destruction stratosphérique), sauf pour le trou d'ozone antarctique qui montre une destruction légèrement accentuée, montrant les conséquences globales d'émissions pourtant localisées.

## L'expérience Ceres sur le cycle régional du CO2 atmosphérique

L'expérience Ceres, qui s'est déroulée dans le sud-ouest de la France en mai et juin 2005, est une des toutes premières expériences sur la variation et le bilan du CO2 atmosphérique à l'échelle régionale dans le cadre du projet européen CarboEurope.

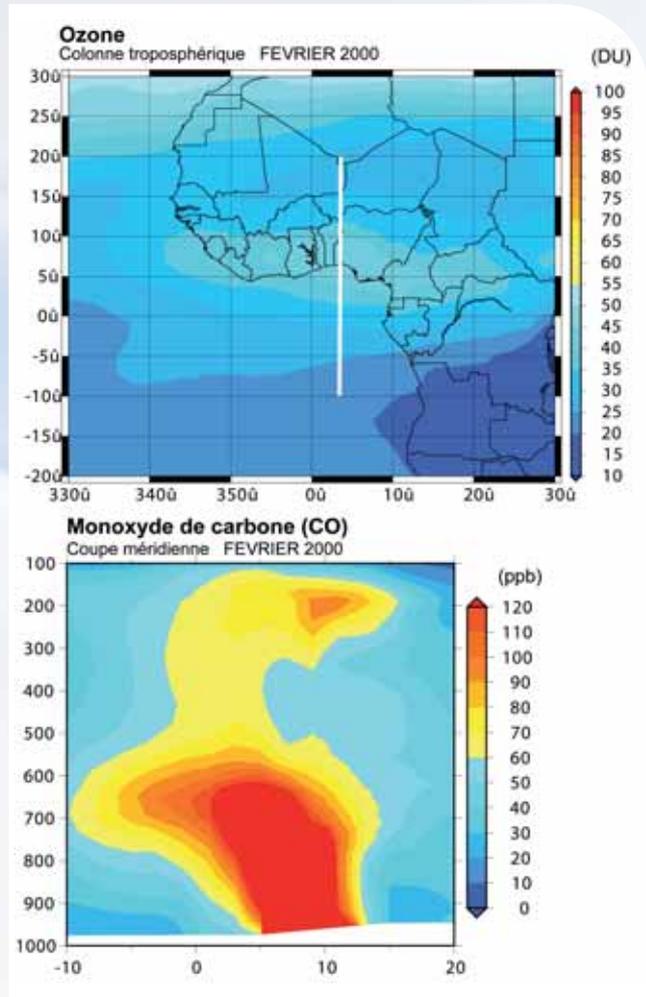
Le dispositif expérimental a été organisé autour d'un site central dans la forêt des Landes (flux d'énergie et de CO2 à la surface, radiosondages, profileurs...), d'un site secondaire à Marmande (sodar, scintillomètre et flux) et d'une tour de 50m à Biscarosse pour mesurer avec précision les concentrations en CO2 des masses d'air océaniques. Un réseau de 10 sites de mesures de flux de surface a été déployé sur les écosystèmes les plus représentatifs (cultures d'hiver et d'été, vigne, forêt, jachère...). Quatre avions instrumentés ont permis d'échantillonner les variations spatiales et temporelles du CO2 dans les 2000 premiers mètres d'atmosphère. Enfin, l'évolution de la biomasse et des contenus en eau des sols des divers sites ont été suivis. Au total, six Périodes d'Observations Intensives (POI), couvrant 22 journées, ont été déclenchées sur alerte en fonction des prévisions météorologiques.

La richesse de la base de données Ceres doit permettre de modéliser les évolutions diurnes du CO2 à petite échelle et d'estimer ainsi la contribution des divers écosystèmes aux variations de CO2 atmosphérique pour des conditions synoptiques variées. Une meilleure connaissance de sa variation spatiale et de son évolution journalière devrait aussi permettre d'améliorer le calcul de l'évapotranspiration, en partie contrôlée par l'assimilation de carbone par les végétaux. Ceres devrait ainsi permettre de tester le schéma Isba-A-gs dans une version couplée au modèle Més0-NH et de mettre en place des méthodes d'estimation des flux de CO2 à la surface par modélisation inverse en collaboration avec le LSCE/CEA.



Mesure aéroportée de la variation régionale de la concentration en CO2 et de la vapeur d'eau dans la couche limite atmosphérique (Ceres, cas du 27 mai 2005). Les fortes différences d'assimilation du CO2 entre la forêt des Landes et les cultures d'hiver se traduisent par de forts gradients de CO2 et de vapeur d'eau dans les basses couches atmosphériques.

Moyenne mensuelle simulée avec Mocage pour février 2000. En haut, la colonne troposphérique d'ozone présente un maximum local en phase avec les feux de savane actifs dans l'hémisphère nord. En bas, la coupe méridienne de CO passant par Lagos (6.6°N/3.3°E) illustre la redistribution verticale des espèces par les flux de grande échelle et les processus convectifs.



### Simulations chimiques préparatoires à Amma

Un des objectifs du programme Amma est d'améliorer notre compréhension de la mousson africaine et de son influence sur la dynamique et la composition chimique de l'atmosphère. A l'aide du modèle de chimie-transport multi-échelles Mocage, il est possible de simuler les concentrations de l'ozone et de ses précurseurs dans la troposphère et la basse stratosphère sur la zone d'intérêt (Afrique de l'Ouest). Avec des mégapoles en développement et les feux de biomasse, les sources d'émissions y sont particulièrement intenses. L'évolution chimique des espèces émises, les transports vertical et horizontal ainsi que le lessivage et le mélange par les processus convectifs présentent de nombreuses difficultés pour la modélisation numérique et les périodes d'observation spéciales de la campagne de terrain en 2006 permettront d'apporter des éléments de réduction des incertitudes.

L'année 2000 a été choisie comme année de référence pour réaliser des simulations préparatoires. Mocage a ainsi été mis en oeuvre pour simuler l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère sur la zone Amma, en utilisant les inventaires d'émissions recommandés dans le cadre de la préparation du prochain rapport du Giec, qui tiennent compte de la variation mensuelle des sources et donc notamment de la saisonnalité des feux de biomasse. Les simulations de l'année 2000 ont été comparés aux observations disponibles, in-situ (radiosondages, Mozaic) ou de télédétection spatiale (Gome, Toms, Mopitt), pour plusieurs composés dont l'ozone, le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote. Ces études montrent des résultats encourageants sur l'Afrique de l'Ouest. Le modèle sera mis en oeuvre pour des prévisions quotidiennes pendant les périodes d'observation spéciales de 2006 en support aux dispositifs de mesure.

### Assimilation d'ozone 4D-var avec Mocage-Palm

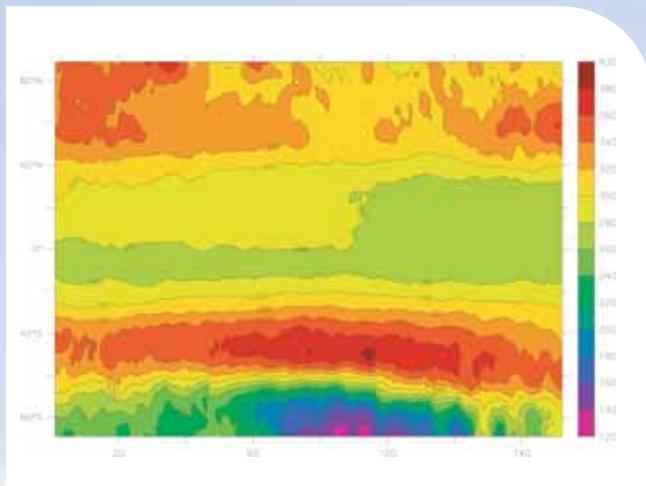
L'assimilation de données en chimie atmosphérique est en plein essor. L'assimilation de profils verticaux d'ozone est particulièrement étudiée du fait de l'importance de ce gaz pour la chimie, la dynamique et le rayonnement dans la haute

troposphère et la stratosphère. De nombreuses applications (rayonnement ultra-violet, qualité de l'air, prévision météorologique,...) bénéficieraient en effet d'une initialisation de la distribution tridimensionnelle de l'ozone.

Dans le cadre du projet européen Asset (Assimilation of Envisat data), Météo-France est associé au Cerfacs pour mener à bien des expériences d'assimilation chimique, en combinant le logiciel Palm et le modèle de chimie-transport Mocage. La période étudiée s'étend du 1er juillet au 30 novembre 2003. Elle est significative de la perte d'ozone stratosphérique observée à cette époque de l'année en Antarctique (« trou » d'ozone). Environ 1000 observations par jour, provenant du sondeur Envisat/Mipas (Agence Spatiale Européenne), sont assimilées.

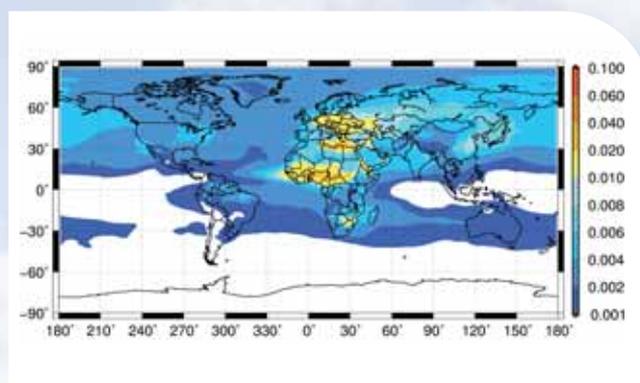
La technique d'assimilation mise en oeuvre est le 4D-Var (comme pour la prévision météorologique opérationnelle), de manière à tirer un plein bénéfice de la répartition dans le temps et dans l'espace des observations et des effets du transport atmosphérique. La flexibilité de l'outil Mocage-Palm permet d'évaluer quantitativement l'apport de cette technique d'assimilation par rapport à d'autres, comme le 3D-fgat, qui ne prennent pas pleinement en compte la dimension temporelle.

Les analyses d'ozone produites avec Mocage-Palm se comparent favorablement avec celles obtenues dans les principaux autres instituts européens de pointe dans ce domaine (CEPMMT, Université de Reading, UKMO, KNMI, IASB,...).



Evolution temporelle de la moyenne zonale de la colonne totale d'ozone (DU), obtenue par assimilation 4D-Var des profils d'ozone de l'instrument Envisat/Mipis (Agence Spatiale Européenne) dans Mocage-Palm. L'abscisse indique le numéro du jour à partir du 01/07/2003. Le trou d'ozone est visible entre les jours 60 et 120 environ, aux hautes latitudes de l'hémisphère sud.

désertiques, dont la source est paramétrisée suivant la méthode du Lisa ; sur l'Europe et l'Asie du Sud-Est (émissions d'aérosols carbonés par les activités industrielles) ; sur le Sud de l'Afrique (feux de biomasse). En comparant avec les observations de l'instrument Toms (Nasa), on remarque que le modèle a un bon comportement sur la zone Saharienne mais sous-estime généralement les épaisseurs optiques. Néanmoins, certaines sources désertiques (Chine et Australie notamment) ne sont pas représentées dans la simulation montrée ici. La prise en compte des autres composantes chimiques de l'aérosol contribuera aussi à améliorer le réalisme des simulations.



Epaisseur optique moyenne (poussières désertiques et carbone-suie) calculée avec le modèle Mocage pour le mois de novembre 2004.

## Evaluation de Mocage-aérosol

Le modèle de Chimie-transport Mocage vise à représenter l'aérosol atmosphérique. En effet, de nombreux thèmes de recherche (interactions chimie-climat, qualité de l'air, assimilation de mesures météorologiques satellitaires,...) nécessitent de modéliser de façon détaillée les distributions tridimensionnelles des particules en suspension dans l'atmosphère. Afin d'évaluer les simulations à l'échelle planétaire, il est utile de les comparer avec des observations de télédétection spatiale. Les satellites ne mesurent pas directement la nature, la concentration ou la granulométrie de l'aérosol mais des propriétés radiatives, comme l'épaisseur optique. L'épaisseur optique dépend de la concentration en aérosols qui absorbent le rayonnement, c'est-à-dire principalement les poussières désertiques et les aérosols carbonés. En considérant que les particules sont sphériques, l'épaisseur optique est calculée à partir des concentrations modélisées par Mocage pour ces deux composantes.

En observant la moyenne mensuelle de l'épaisseur optique modélisée pour le mois de novembre 2004, on remarque la présence de zones de valeurs fortes : sur le Sahara (poussières

## Impact de la ville sur l'atmosphère : la campagne expérimentale Capitoul

Du fait de l'influence des surfaces urbanisées et de l'activité humaine, les villes sont soumises à un micro-climat particulier, dont l'effet le plus connu est l'îlot de chaleur urbain. Afin de quantifier ces effets, la campagne expérimentale Capitoul s'est déroulée sur Toulouse de mars 2004 à mars 2005, mettant en œuvre de nombreuses mesures aussi bien en surface (stations météorologiques, mâts de mesures) qu'en altitude (radio-sondage, avion,...).

L'analyse des mesures effectuées tout au long de l'année sur un mât en centre-ville de Toulouse a permis de mettre en évidence de manière expérimentale, pour la première fois, l'importance des sources de chaleur issues des activités humaines (chauffage domestique et trafic automobile dans le quartier), ainsi que leur cycle annuel. Ainsi, ces sources « anthropiques » ont pu être comparées à l'apport d'énergie par le rayonnement solaire (figure 1).

En été, les sources anthropiques sont très faibles (pas de chauffage et peu de trafic), et l'énergie reçue ( $150\text{W/m}^2$ ) provient exclusivement du soleil. Par contre, en hiver, les apports radiatifs sont faibles (soleil bas sur l'horizon, nombreux nuages) et la quantité d'énergie évacuée vers l'atmosphère du fait des activités humaines devient prépondérante ( $80\text{W/m}^2$ ).

Ces résultats expérimentaux sont corroborés par les comparaisons aux quantités d'énergie consommées (électricité, essence,...) et par une modélisation statistique du chauffage domestique sur l'agglomération (figure 2).

Les îlots de chaleur sur Toulouse atteignent ainsi souvent 3 à 4°C en surface. L'exploitation des mesures se poursuit afin de comprendre, puis de modéliser l'impact en altitude, à la fois sur la météorologie et les aérosols urbains (sulfates, carbone suie, carbonés organiques).

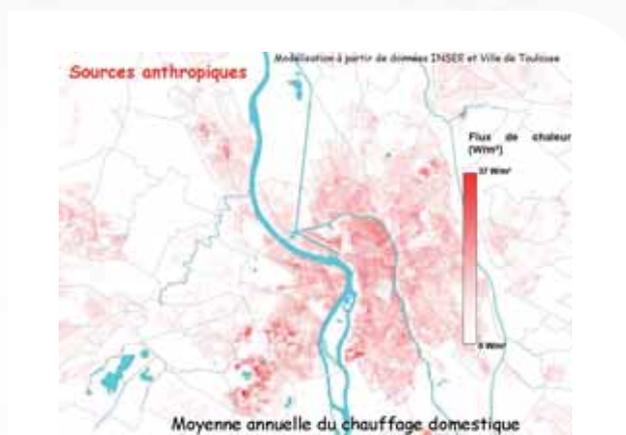
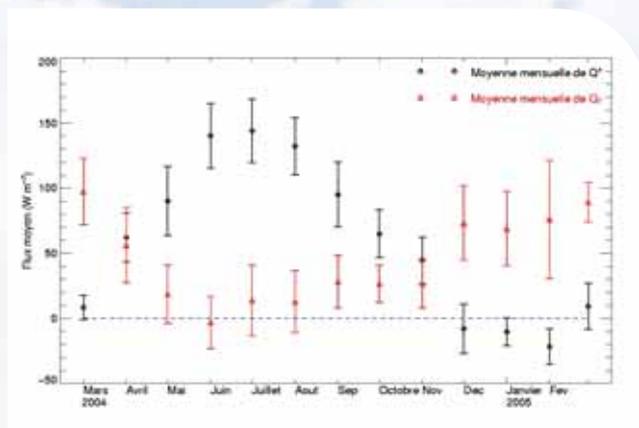


Image 1 : Cycle annuel de l'énergie transmise des surfaces urbaines à l'atmosphère : apports radiatifs, principalement solaire (en noir), apports anthropiques (chauffage domestique, trafic) (en rouge).

Image 2 : Moyenne annuelle du chauffage domestique sur l'agglomération toulousaine à partir de données Insee et d'une cartographie des bâtiments issue de photographies aériennes.

## Recherches en prévision numérique du brouillard

Des travaux de recherches sont menés depuis 2002 afin d'améliorer les prévisions des brouillards et nuages bas. En 2005, l'aboutissement de la première phase de ces travaux a permis la mise en opérationnel sur l'aéroport de Paris-CdG d'un système intégré de prévision numérique locale. Ce système s'appuie sur des observations spécifiques (mât instrumenté de 30m, mesures radiatives au sol et à 45m), sur une assimilation adaptative locale et sur le modèle numérique Cobel-Isba. Le déploiement d'un système de prévision identique est prévu sur les aéroports de Paris-Orly et Lyon-St Exupéry dans les deux ans à venir.

Parallèlement, un exercice d'intercomparaison de modèles numériques sur des cas observés à Paris-CdG a été coordonné par le CNRM. Cet exercice a réuni à la fois des modèles de recherches (Meso-NH, Cobel-Noah, tBM) et des modèles opérationnels (Hirlam-INM, Hirlam-DMI, Cobel-Isba), ce qui a permis l'évaluation d'une grande diversité de paramétrisations physiques et de résolutions verticales. Cet exercice fait apparaître une dispersion marquée entre les différents modèles, surtout par vent très faible. De plus, les modèles à faible résolution verticale dans la couche limite de surface (les premières dizaines de mètres d'atmosphère au dessus du sol), ne simulent pas correctement l'apparition et la dissipation d'une couche de brouillard, indépendamment des paramétrisations physiques utilisées.

Ces travaux montrent l'extrême sensibilité de la prévision du brouillard, que ce soit à la résolution verticale, aux paramétrisations physiques ou aux conditions initiales. Ces résultats cautionnent les travaux en cours sur un système numérique de prévision d'ensemble du brouillard.

## Un système de modélisation de la dispersion de polluants à courte distance

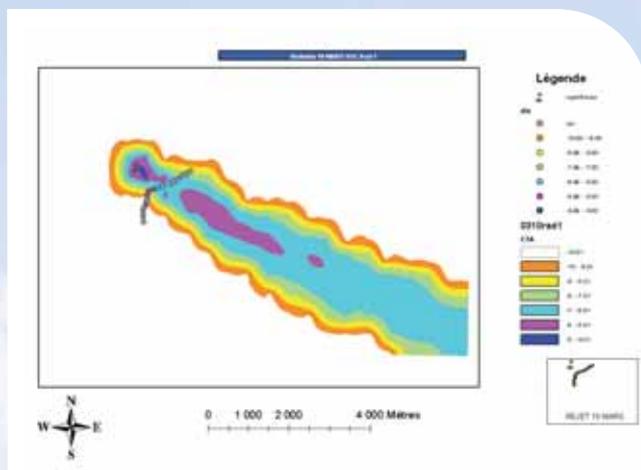
Perle est un système de modélisation de la dispersion de polluants à courte distance, développé pour les urgences environnementales, basé sur l'utilisation du modèle Meso-NH (résolution 2km) et d'un modèle lagrangien particulière. Il est devenu opérationnel en 2005, activable 24h/24, avec une visualisation des champs météorologiques et du panache prévu sur la console du prévisionniste, dans les 30 minutes qui suivent l'accident.

Son évaluation et son amélioration se poursuivent, grâce à des campagnes de mesure. La campagne Capitoul, dédiée à la Couche Limite Urbaine et aux aérosols urbains, a donné lieu à des lâchers de traceur passif SF6 inoffensifs durant six journées (9-10-11 mars et 1-2-3 juillet 2004), en collaboration avec l'IRSN, en zone péri-urbaine, avec mesures de concentration au sol et à 100m d'altitude à bord du Piper Aztec, à des distances entre 300m et 6km du point de rejet.

Les conditions météorologiques durant ces six journées étaient anticycloniques, associées à un vent faible et à une instabilité thermique modérée. Même à des résolutions spatio-temporelle aussi fines, Perle montre des résultats réalistes.

L'étude souligne aussi l'exigence d'une prévision de panache de pollution à partir d'une source ponctuelle : des erreurs météorologiques faibles en terme de temps sensible, sur la direction du vent, ou sur des flux de chaleur au sol, par exemple consécutives à la formation de petits cumulus, ont un impact très important sur la trace et les concentrations prévues d'un polluant près du sol.

Prévision de concentration de panache (normalisée par la quantité rejetée) le 10 mars 2004 avec superposition des observations.



Ces mesures automatiques ont été complétées par des observations humaines météorologiques et nivologiques (en particulier par des mesures de sublimation de la couverture neigeuse). L'objet de cette campagne est de mieux préciser l'évaluation des flux turbulents dans la couche limite située entre la surface du glacier et l'atmosphère (entre 0 et 10 m). Sous les tropiques, ces flux jouent un rôle plus marqué qu'aux latitudes tempérées sur les bilans de masse des glaciers. Ils sont difficiles à quantifier car ils dépendent fortement de la rugosité de la surface (souvent composée de pénitents de glace) et de la hauteur de la couche limite (localisée grâce à l'existence d'un maximum de vent au voisinage de celle-ci). Le dépouillement de cette campagne de mesures devrait permettre de parfaire nos connaissances en ce domaine.



(1) Le site d'études sur la zone d'ablation du glacier Zongo, (2) la station de bilan d'énergie, (3) le mât de vent, (4) la station de corrélation turbulente.

## Etudes manteau neigeux et avalanches

### Campagnes de mesure des flux turbulents sur un glacier Andin tropical

Sur la haute montagne andine, ressource en eau d'origine nivale ou glaciaire et relation glacier-climat font, depuis quelques années, l'objet d'études menées conjointement par le Centre d'Etudes de la Neige du CNRM et l'unité Greatec de l'IRD. Dans le cadre de l'Observatoire de Recherche en Environnement Glacioclim et d'un projet soutenu par le PNRH, une campagne de mesures a été conduite sur le glacier Zongo (16°15' S, 68°10' W) de la cordillère Royale en Bolivie du 1<sup>er</sup> septembre au 25 novembre 2005. Le dispositif automatique expérimental, installé à 5100m d'altitude sur la zone d'ablation du glacier, était constitué :

- d'une station de mesures du bilan énergétique de surface (vent, température et humidité de l'air, bilan radiatif),
- d'un mât de mesures de vent, humidité et température de l'air (8 niveaux de mesures entre la surface et une hauteur de 6m),
- d'une station de mesures de flux turbulents (par corrélation turbulente) composée d'un anémomètre ultra-sonique et d'un hygromètre de précision.

### Estimations de certains paramètres internes du manteau neigeux par télédétection spatiale.

Les chercheurs de Météo-France souhaitent compléter le réseau manuel d'observation nivologique afin d'améliorer l'estimation du risque d'avalanche et pour initialiser le modèle de neige Crocus. Les premières études ont concerné principalement l'observation du manteau neigeux dans le spectre solaire et ont permis de valider les modélisations sur l'albédo et l'absorption de la neige à ces fréquences et ensuite de comparer très favorablement le manteau neigeux simulé par le modèle Crocus avec ces données télédéteectées en terme de température de surface et de taille des grains. Mais l'environnement montagneux complexe et la grande variabilité du couvert neigeux nécessitent une grande finesse d'observation et une grande répétitivité des mesures qui sont souvent difficiles à obtenir.

Des expériences ont été menées en 2005 avec certaines hyperfréquences (ou micro-ondes) en émission active à partir d'un radar embarqué (polarisation, intensité et temps de parcours). Les longueurs d'ondes utilisées, de l'ordre du cm ou mieux du mm, sont mieux adaptées pour l'observation

d'un milieu poreux comme le manteau neigeux en métamorphose continue. L'onde émise pénètre dans les différentes strates neigeuses et subit différents phénomènes de diffusion avant d'être ré-émise, modifiée, vers sa source et étudiée. Sept orbites, en provenance du radar SAR monté à bord du satellite Envisat qui correspondent aux dernières campagnes de mesures terrain (figure), sont en cours de traitement. Les premiers essais d'inversion avec un modèle simplifié de retro-diffusion à une couche pour des manteaux neigeux composés majoritairement de neige humide permettent déjà de reconstituer une densité et une teneur en eau liquide moyennes avec une meilleure précision que la modélisation opérationnelle.



Mesures à Pied-Mouttet le 24 mars 2005.  
Crédit photo Météo-France (J. Roulle).

### Métamorphose de gradient à échelle fine : première observation, premières modélisations

La grande diversité des formes que la neige sèche peut prendre en se métamorphosant peut être classée en deux catégories qui correspondent à des comportements mécaniques et thermiques radicalement différents. Les formes arrondies qui apparaissent en conditions isothermes donnent une neige dure et cassante apparentée aux céramiques frittées. Leur évolution est en première approximation dictée par la seule courbure des interfaces air-glace et a pu être modélisée en 3D en l'absence de tassement (voir rapport 2003). La seconde catégorie est constituée de formes anguleuses qui n'apparaissent qu'en présence d'un gradient de température dans la neige. Ces microstructures présentent une faible cohésion mécanique et se retrouvent dans nombre de situations avalancheuses dans les massifs tempérés.

Le problème est cependant plus complexe car il fait intervenir l'orientation cristalline des grains ; un premier pas a été franchi avec la réalisation d'une métamorphose contrôlée dans laquelle plusieurs parties d'un même échantillon ont été soumises à des gradients différents. Outre la première

représentation 3D d'une neige de gradient, les images tomographiques obtenues à l'ESRF voisin ont révélé la coexistence de formes arrondies et facettées à partir de gradients aussi faibles que 2°C/m. Une analyse croisée des champs thermiques calculés sur la phase glace et de la carte des courbures vient d'être réalisée en collaboration avec l'ILTS Sapporo (Japon), afin de connaître localement l'écart positif ou négatif à la saturation. Cet écart apparaît clairement comme un facteur de discrimination locale entre les deux régimes de croissance, ce qui ouvre la voie à une modélisation de la métamorphose de gradient à partir d'outils qui ont fait leurs preuves pour la métamorphose d'isothermie.

### Première étude pour une localisation des avalanches par détection sismique

On a développé depuis plusieurs années un système autonome de Détection Sismique des Avalanches (DSA). Ce système s'appuie sur l'enregistrement et l'identification des signaux sismiques générés par l'écoulement des avalanches et permet d'avoir une évaluation de l'activité avalancheuse naturelle plus objective, indépendamment des conditions atmosphériques et en temps quasi-réel sur un secteur d'un massif.

Une étude a été lancée en 2005 afin d'évaluer la faisabilité d'un système de DSA basé sur plusieurs capteurs sismiques distants, selon une approche similaire à celle qui est utilisée en sismologie avec des antennes sismiques. Le principe de base de cette approche consiste à analyser les ondes sismiques enregistrées simultanément sur plusieurs capteurs distants (3 capteurs distants d'environ 20m dans notre cas) et à évaluer les décalages temporels d'arrivée des ondes entre les différents capteurs, afin de pouvoir définir automatiquement une direction d'origine du signal (ou azimuth) et éventuellement une évolution de cette direction (déplacement de la source-avalanche).

L'application de cette approche de type antenne sismique à la localisation des avalanches apparaît encourageante, mais nécessite des analyses complexes du fait de la forte hétérogénéité du sous-sol en montagne (phénomènes de réfraction, filtrage, ...) et des caractéristiques non-stationnaires des ondes sismiques émises par les avalanches. Cette étude est réalisée en collaboration avec le Laboratoire Images et Signaux de Grenoble – associé au CNRS.



Photographie du site d'étude sur la localisation des avalanches par détection sismique dans le massif de l'Oisans en Isère.

L'année a été marquée par la réception du nouvel avion instrumenté de Météo-France qui constitue en association avec un Falcon 20 et un Piper Aztec la nouvelle flotte scientifique française de l'unité mixte de service Safire. Parallèlement, plusieurs études ont été menées sur les instruments spatiaux et les radars.

## Instrumentation aéroportée

### Safire, la nouvelle unité mixte de service des avions de recherche français

Fort d'une longue expérience en mesure aéroportée, le CNRS/Insu, le Cnes et Météo-France ont décidé de regrouper au sein d'une même structure leurs différents moyens humains, financiers et matériels nécessaires à la gestion et à la mise en œuvre des avions de recherche et de l'instrumentation de base associée. Ainsi, a été créée le 12 février 2005, l'Unité Mixte de Service n°2859 « Safire » (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement).

Safire est localisé principalement sur la base militaire de Toulouse-Francazal avec une antenne parisienne sur le site CNRS de Meudon. Le site principal de Francazal est doté d'un hangar de plus de 2000 m<sup>2</sup>, de divers laboratoires thématiques (thermodynamique, microphysique, chimie, ...) et de 400 m<sup>2</sup> de bureaux. L'antenne parisienne est intégrée dans les locaux de la Division Technique de l'Insu à Meudon et bénéficie du support de ce service. L'effectif de Safire est essentiellement constitué d'une vingtaine d'ingénieurs et de techniciens appartenant à Météo-France et au CNRS/Insu spécialisés dans l'instrumentation de base aéroportée, le traitement de données temps réel ou la mise en œuvre des avions. Safire a aussi vocation à soutenir les laboratoires pour réaliser « l'avionisation » de leurs instruments, leur certification et leur intégration sur les avions.

Safire devient le portail d'accès aux moyens aéroportés de recherche scientifique, au nombre desquels on compte, le petit bimoteur Piper Aztec et surtout les deux nouveaux avions, le Falcon 20 du CNRS-Cnes et l'ATR42 de Météo-France.

Visite de P.E. Bisch, PDG de Météo-France, à l'unité Safire dans ses nouveaux locaux de Toulouse-Francazal. Marc Pontaud, responsable de l'unité, lui explique le fonctionnement d'un compteur de gouttelettes embarqué.



Photo de l'avion ATR 42 en vol de test au-dessus des Pyrénées.

### Les nouveaux avions de l'unité Safire

Dans le cadre de leurs activités de recherche, Météo-France, le CNRS/Insu et le Cnes ont coordonné leurs efforts afin de conduire conjointement le renouvellement de leurs avions scientifiques et de disposer en 2005 d'une flotte moderne et cohérente.

Météo-France a pris en charge le projet biturbopropulseur troposphérique sur la base d'un ATR42-320, alors que le CNRS-Insu et le Cnes ont conduit le projet avion haute altitude sur la base d'un Falcon 20.

Après un long chantier de modification réalisé par la Sogerma à Bordeaux, l'ATR42 a été réceptionné le 20 juillet 2005 à Francazal. Dès septembre, l'intégration et la certification de deux nouvelles veines de prélèvement d'aérosol ont occupé l'avion jusqu'à début novembre. Après une phase de maintenance et quelques vols d'entraînement, l'aménagement intérieur scientifique a pu commencer. Les deux configurations de l'ATR pour la campagne Amma devraient être installées, certifiées, puis validées d'ici avril 2006.

Parallèlement, le Falcon 20 suit un calendrier similaire. Il a été réceptionné, par Safire, à Creil, le 2 décembre 2005. Trois configurations devront être installées et certifiées avant mai 2006 pour la campagne Amma.

La communauté scientifique française dispose maintenant, avec le bimoteur Piper Aztec de Météo-France, d'un ensemble cohérent de trois avions instrumentés permettant d'explorer l'atmosphère de la couche limite de surface aux premières couches de la stratosphère. Mais pour l'instant, Safire se consacre à la préparation de son premier grand rendez-vous : les deux nouveaux avions devront rejoindre l'Afrique fin mai 2006 pour participer à la campagne Amma.

### Un nouveau système d'acquisition embarqué

Les avions de mesure de Safire embarquent un système d'acquisition et de visualisation de données en temps réel, permettant aux opérateurs de Safire et aux scientifiques de superviser les mesures au cours du vol. L'arrivée de l'ATR42 et du Falcon 20 ont nécessité le développement d'un système plus ouvert en raison d'une diversité plus grande des instruments emportés, et utilisant une technologie plus récente, car les technologies temps réel HP ne seront plus supportées à court terme. Ce développement est mené en collaboration avec le CNRS.

Maquette en laboratoire du poste de travail informatique dans l'ATR42.



Le cœur temps réel du nouveau système pour l'acquisition des instruments de Safire est basé sur un bus VME 64 bits.

L'ancienne application d'acquisition développée pour le Merlin IV a été portée sur une nouvelle machine et un nouveau système d'exploitation temps réel LynxOS.

La partie non temps réel du système est entièrement nouvelle. Son développement est dicté par le besoin d'intégrer et de dialoguer sur le réseau de bord avec des systèmes informatiques des différents instruments autonomes embarqués par d'autres laboratoires. Pour ceci, le système développé comporte un serveur de données recueillant les données de tous les instruments présents sur le réseau de bord, et une application unique de visualisation graphique des données écrite en langage IDL. Cette partie est développée sous Linux. L'ensemble des composants du système sont synchronisés et dialoguent principalement via un réseau Ethernet filaire.

Ce projet permettra d'avoir un système strictement identique sur tous les nouveaux avions de Safire. Il permettra une meilleure intégration des systèmes informatiques autonomes embarqués. Une première version du système sera testée et validée début 2006 pour être utilisé pendant la campagne Amma.

### La veine communautaire de prélèvement aéroporté de particules d'aérosols

La mise en service des nouveaux avions de recherche de la flotte française a nécessité la mise en œuvre d'un instrument à usage communautaire adapté à la collecte aéroportée des particules d'aérosols atmosphériques.

Il s'agit d'un dispositif destiné à prélever à un débit pouvant atteindre 125 l/mn et de façon isocinétique l'aérosol de taille inférieure à 3  $\mu\text{m}$  à l'extérieur de l'ATR-42, puis à l'introduire à l'intérieur de la cabine sans perturbation du flux, et à l'extraire de la cabine en bout de chaîne instrumentale. Pour cela, l'instrument est composé d'un manchon pour canaliser l'air, d'un diffuseur pour le ralentir, et d'un tube de rayon de courbure suffisamment élevé pour le conduire à l'intérieur de la cabine vers les instruments de mesure.

La société toulousaine Comat a réalisé l'étude et la fabrication de cette nouvelle sonde aéroportée, en collaboration étroite avec les équipes du CNRM et de Safire. Parallèlement, les chercheurs de Météo-France ont assuré le développement de différentes études afin que cette veine puisse finalement satisfaire, entre autres, aux conditions suivantes :

- Le prélèvement est maintenu isocinétique à l'aide d'un asservissement du système de pompage;

• Les écarts éventuels en incidence et dérapage de l'avion sont pris en compte grâce à un système de déplacement de la tête de veine à l'aide de moteurs pas à pas afin de corriger les défauts d'alignement de celle-ci par rapport à l'écoulement de l'air extérieur qui peuvent conduire à la perte d'une partie des particules ;

• La configuration instrumentale constituant la veine de prélèvement derrière l'inlet peut varier en fonction des études réalisées.

La veine sera utilisée pour la première fois, en Afrique, pendant l'expérience Amma.

Veine communautaire aérosol montée sur l'ATR-42



## Instrumentation in situ - Télédétection

### Préparation de la mission spatiale ADM-Aeolus (lidar vent)

La préparation de la mission de lidar vent spatial ADM-Aeolus a franchi cette année des étapes importantes. Le modèle mécanique et thermique du satellite (cf. photo) a passé avec succès les tests vibratoires et thermiques. Des difficultés demeurent sur l'approvisionnement de certains sous-systèmes - dont le laser - mais ceux-ci semblent en cours de résolution. Le lancement est toujours prévu en septembre 2008.

Le CNRM a participé à la mise en place du segment sol dans le cadre de cinq études commandées par l'Esa au sein d'équipes réunissant le CEPMMT, le KNMI (service météorologique néerlandais), le DLR (agence spatiale allemande), l'IPSL ou encore l'Onera. Il a contribué à la revue critique d'une première version du processeur de niveau 1 développé par l'industrie et à la définition d'améliorations algorithmiques. Placé sous sa responsabilité, le développement du processeur de niveau 2 a franchi une étape importante avec la mise au point d'une première version prototype qui sera testée et améliorée au cours du premier semestre 2006 avant livraison à l'Esa à l'automne 2006. Ce prototype inclut un algorithme de correction d'erreurs de mesure (dues à des effets de pression), et de température à la mise au point duquel le CNRM avait largement contribué au cours d'une étude achevée en septembre 2005.

Enfin, le démonstrateur aéroporté de lidar spatial a été livré en septembre 2005 et subi une première série de tests techniques au DLR. Malgré des difficultés techniques non encore résolues, il est apte pour la première campagne de validation au cours de laquelle il sera mis en œuvre au sol. Celle-ci aura lieu en avril 2006. Le CNRM y participera activement.

## Le programme Saf pour l'Analyse des Terres Emergées : entrée en phase opérationnelle initiale.

Le programme Saf (Satellite Application Facility) pour l'Analyse des Terres Emergées (Ate) consiste à fournir opérationnellement des produits de surface utiles aux études météorologiques à partir des observations des satellites MSG et Metop.

Le Saf Ate est piloté par l'Institut Météorologique du Portugal et sous contrôle d'Eumetsat. La phase opérationnelle initiale a démarré en janvier 2005 pour une durée de 26 mois. Le nouveau consortium comprend 8 entités coopératives dont 4 sont des Services Nationaux Météorologiques. Le projet inclut 5 gammes de produits : opérationnels, internes opérationnels, candidats opérationnels, démonstratifs, expérimentaux.

Les cinq produits opérationnels, avec en parenthèse leur fréquence, sont : l'albédo (1 jour), la température de surface (15 mn), les rayonnements optique et thermique (30 mn), la couverture neigeuse (1 jour). La résolution spatiale nominale est conservée, soit 3 km à l'équateur et environ 5 km aux moyennes latitudes. La production est faite au Portugal depuis avril sur l'Europe et depuis juillet sur tout le disque MSG. Météo-France coordonne le volet optique et réalise le développement algorithmique de l'albédo et du rayonnement optique.

La validation repose sur plusieurs étapes : l'intercomparaison avec des produits d'autres capteurs, la confrontation avec des mesures in situ, l'analyse avec des sorties de modèles de prévision. Les premiers résultats satisfont en général aux spécifications des utilisateurs.

La poursuite de ce travail est le peaufinage des algorithmes en marge des efforts de vérification et des retours d'expérience. Le lancement de Metop en juin 2006 contribuera à améliorer les produits actuels, pour une fourniture étendue aux hautes latitudes et au globe.

Lidar spatial ADM-Aeolus en préparation dans les ateliers de l'Agence Spatiale Européenne (courtesy ESA).

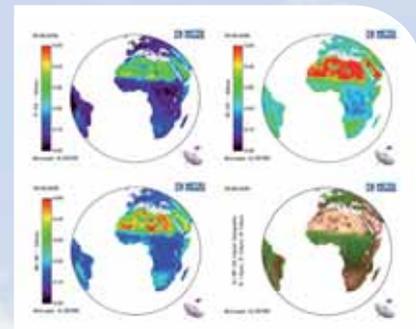


## Mesure du profil d'humidité à l'aide d'un système intégré de télédétection: Profileur de vent et radiomètre

Des avancées importantes ont été enregistrées dans la mesure du profil d'humidité par télédétection à partir du sol sans l'aide de ballons sondes.

Cette étude, menée à la fois dans le cadre national (CNRS/Game) et européen (Cost 720), vise à combiner un radiomètre et un profileur de vent UHF pour la mesure de l'humidité en altitude. Le radiomètre évalue la température et l'humidité avec une résolution verticale assez grossière. Le profileur mesure plus précisément les gradients verticaux d'humidité, mais il a besoin à cet effet du profil de température. Un point de référence en humidité est ensuite nécessaire pour connaître les valeurs absolues.

Produits albédo journaliers pour la date du 30 août 2005. (De haut en bas, de gauche à droite) : visible, proche infrarouge, solaire, composition colorée.



L'intégration de ces deux instruments, testée sur trois mois de mesure durant la campagne TUC (Temperature and Humidity Campaign, Payerne, Suisse, 11/2003-02/2004) a montré tout l'intérêt du radiomètre concernant la température, mais ses mesures d'humidité restent trop grossières pour servir de référence au profileur dans le champ de mesure considéré (0.3 à 2 km). Côté profileur, une information précise de l'humidité totale dans le champ de mesure améliore très sensiblement la qualité du profil d'humidité par rapport aux seules données du radiomètre (figure).

En 2006, l'expérience va se poursuivre avec un profileur plus puissant (0.3 à 5 km) en vue d'intégrer les mesures d'humidité du radiomètre sur un domaine plus large. On vise ainsi à définir à terme une station de télémessure au sol entièrement indépendante.

La capacité de mesurer à haute cadence des profils exploitables d'humidité sans matériel consommable représente un enjeu important pour la qualité de la prévision à courte et à moyenne échéance.

## Rénovation du réseau de stations mobiles de mesure du CNRM.

Afin de répondre au mieux aux besoins de la communauté scientifique, le CNRM a mis en chantier la rénovation de ses stations automatiques de mesures sol, qui lui permet de déployer un réseau de vingt stations en différents endroits du monde.

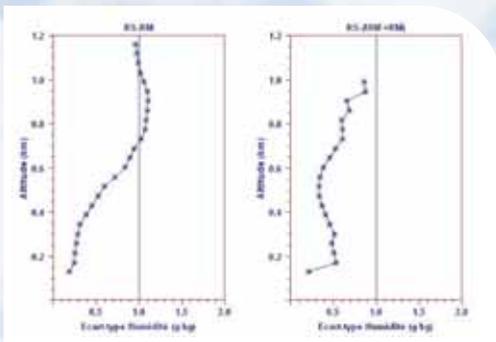
La nouvelle station mobile Samha+ (Station Automatique de Mesure de paramètres Hydrologiques et Aérologiques) permet l'acquisition de données météorologiques classiques (vent, température, humidité, pression, rayonnement, précipitations) mais aussi la mesure de l'humidité du sol et l'estimation des flux de chaleur et d'évaporation par la méthode aérodynamique simplifiée.

Cette station est construite autour d'un système d'acquisition Campbell Scientific robuste, éprouvé et fonctionnant en conditions sévères. Son architecture évolutive permet une adaptation aisée aux différentes configurations des campagnes et à la mesure de paramètres particuliers. L'infrastructure d'installation (mât, portiques) reprend la configuration de l'ancienne génération. Elle peut être utilisée soit de manière isolée, alimentée par panneaux solaires, soit en complément de systèmes de mesures de flux turbulents par la méthode Eddy corrélation.

Les données sont actuellement transmises par liaison téléphonique GSM, mais le système peut s'adapter à d'autres techniques de transmission. Le logiciel de concentration

Gauche - Comparaison (Ecart-types) des mesures d'humidité entre le radiomètre (RM) et le radio sondage (RS) à partir de 54 cas extraits de la campagne TUC (Temperature and hUmidity Campaign, Payerne, Suisse, 11/2003-02/2004).

Droite - Même légende où les mesures du radiosondage seul ont été remplacées par celles du système profileur de vent UHF + radiomètre (UHF + RM). On a intégré les mesures de température du radiomètre aux données du profileur en prenant comme référence la valeur de l'humidité totale fournie par les radio sondages dans le champ de mesure.



permet une surveillance et une mise à jour des logiciels à distance. Quatre stations de ce type ont été mises en œuvre pour la première fois dans le cadre de CarboEurope Regional Experiment et ont permis un taux de disponibilité des données proche de 100%. Le réseau complet permettra à terme de déployer quinze stations de ce type.

### Nouvelles technologies appliquées aux mesures radar du réseau Aramis

Les ingénieurs de la DSO réalisent des travaux d'études, en interne ou en sous-traitance, pour améliorer les produits issus des radars du réseau Aramis.

Le projet Panthere consiste, en partenariat avec la Direction de l'Eau du Ministère de l'environnement, à augmenter la couverture radar par l'ajout de 6 sites, à remplacer deux des radars les plus anciens, et à introduire dans ce réseau des "nouvelles technologies" comme le Doppler ou l'exploration volumique.

La technique Triple-PRT, qui permet d'étendre la gamme d'ambiguïté de +/- 30m/s jusqu'à +/- 60 m/s, a comme prévu été brevetée. L'évaluation de cette technique s'est poursuivie, en particulier par un conséquent travail de modélisation. La dopplérisation des radars du réseau a débuté en 2005. L'ensemble du réseau (sauf les 4 très anciens Mélodi) pourrait être dopplérisé fin 2006. Le but recherché est l'alimentation en vitesses radiales du futur modèle Arome qui sera opérationnel en 2008.

Parallèlement, la mise en opérationnel de la nouvelle lame d'eau est planifiée pour le début 2006. Un travail a été effectué pour préciser la relation entre le « poids qualité », fourni avec la mesure, et la valeur intrinsèque de la mesure, évaluée par comparaison avec les pluviomètres. La nouvelle lame d'eau a également été validée par comparaison avec le réseau de pluviomètres. Les calculs de PVR ont été validés, en particulier par comparaison avec des radiosondages.

Les études relatives à la calibration des lames d'eau radar par les données des pluviomètres ont été reprises et on pense conclure en proposant la mise en place opérationnelle courant 2006 d'une méthode qui permette de « rattraper » en temps légèrement différé (2 à 3 heures) les défauts les plus



Station automatique de mesures du CNRM. Le centre de recherche dispose d'un ensemble de stations automatiques mobiles « projetables » n'importe où dans le monde dans le cadre de campagnes de mesures scientifiques internationales.

importants.

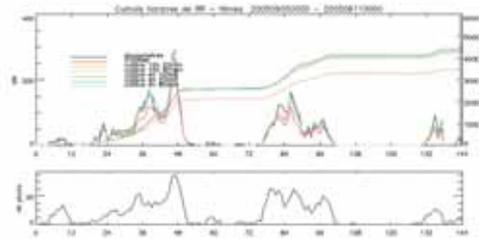
### Expérimentation de la double polarisation radar

L'étude a été menée par la DSO dans trois directions principales : artefacts, hydrologie et microphysique, auxquelles a été ajouté un travail approfondi de caractérisation des erreurs de mesures des observables double-polarisation (réflectivité différentielle, phase différentielle et corrélation).

Un algorithme de « logique floue » a été développé pour séparer les échos de précipitation des autres échos (échos de sol, de ciel clair, de leurre militaire, ..). Ce résultat montre qu'en dehors des avantages attendus sur l'hydrologie et la microphysique, la technique double polarisation est très efficace pour éliminer les nombreux artefacts radar.

Une première partie du travail de validation hydrologique a consisté à installer le logiciel ZPHI de la société Novimet en temps réel sur le radar. Cette action a nécessité plusieurs mois de mise au point. Le travail de validation proprement dit a pu alors commencer sur un nombre d'événements assez conséquent au début de l'été. Les résultats sont clairement en faveur de ZPHI qui corrige efficacement de l'atténuation et adapte efficacement la loi Z/R.

En parallèle avec cet effort, on a examiné la possibilité d'estimer l'atténuation par la pluie (sur Z et sur Zdr) à partir des observables polarimétriques. Un algorithme très simple, qui consiste à appliquer une correction qui dépend essentiellement de la phase différentielle, a été mis au point et testé. La relation entre phase différentielle et atténuation est établie par ajustement entre des mesures d'atténuation et des mesures de phase différentielle. L'algorithme permet de corriger les atténuations les plus fortes. Il pourra éventuellement être affiné par la suite si cela s'avère nécessaire.



Episode du 5 au 11 septembre 2005, radar de Nîmes. Exemple d'application de la calibration en temps réel de la donnée radar par les pluviomètres disponibles en temps réel. La courbe du haut représente les observations de pluie : par les pluviomètres (en noir), radar sans calibration (en rouge), radar avec calibration (différentes couleurs pour les différents réglages du filtrage de la courbe). On a également représenté en pointillés les cumuls des différentes estimations de la pluie. La courbe du bas représente le nombre de pluviomètres disponibles en temps réel.