



Centre National de Recherches Météorologiques

42, avenue Gaspard Coriolis
31057 Toulouse Cedex 1
France

Tél. : (33) 5.61.07.93.70

Fax : (33) 5.61.07.96.00

<http://www.cnrm.meteo.fr>

Mél : contact@cnrm.meteo.fr

Édition

Météo-France

Direction commerciale et de la communication

Conception graphique et réalisation

Chromatiques Editing : www.chromatiques.fr

*Achevé d'imprimer sur les presses
du groupe des imprimeries Morault / Paris*

© Météo-France, 2005 – Dépôt légal : juin 2005
ISSN 1166-732 X



Recherche & Développement 2004



Stratocumulus strat

Sommaire

Éditorial	p. 3
Modèles pour la prévision du temps	p. 4
Étude des phénomènes météorologiques	p. 11
Étude du climat et du changement climatique	p. 16
Études environnementales liées à l'atmosphère	p. 22
Instrumentation pour la recherche.....	p. 37
Organigramme du CNRM.....	p. 40

Recherche & Développement 2004



Éditorial



Cumulus médiocris

Les équipes de Météo-France impliquées dans le domaine de la recherche et du développement ont été engagées durant l'année 2004 sur des projets très importants pour l'avenir de l'Établissement, tant pour la prévision du temps et des phénomènes étroitement liés aux conditions météorologiques que pour l'étude du changement climatique et de ses impacts.

Dans le domaine de la prévision météorologique, les efforts ont porté sur le développement du système de prévision numérique Arome. La résolution horizontale visée (2 à 3 km) permettra dès l'année 2008, et pour la première fois, de simuler explicitement en contexte opérationnel la convection atmosphérique sur un territoire aussi vaste que la France et d'améliorer ainsi et de façon considérable la prévision des systèmes convectifs et des précipitations intenses associées. Un premier prototype du modèle a été développé en 2004 et comparé avec succès aux résultats du modèle Mésoscale-NH sur des situations du passé ayant donné lieu à des phénomènes très actifs tels que l'épisode pluvieux catastrophique qui a touché le Gard en septembre 2002. Un effort particulier porte sur l'assimilation d'observations à méso-échelle qui ne sont pas utilisées aujourd'hui par nos modèles de prévision numérique. Il s'appuie sur l'analyse 3D-Var développée dans le cadre du partenariat Aladin qui a été étendue à l'assimilation des radiances de Météosat Seconde Génération. Une action de recherche très importante porte actuellement sur l'assimilation des réflectivités radar, en collaboration étroite avec la communauté scientifique française regroupée autour de l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais dont une des ambitions est de développer des systèmes numériques intégrés pour la prévision des crues éclair.

Développer des modèles opérationnels tels qu'Arome ne signifie pas pour autant que la connaissance des processus atmosphériques de méso-échelle ne nécessite pas des approfondissements. Des efforts expérimentaux sont encore indispensables pour progresser dans la compréhension et la modélisation des processus qui interagissent, au sein de l'atmosphère ou à ses interfaces principales que sont les

surfaces continentales et l'océan. C'est ainsi que se prépare la campagne expérimentale intensive sur la mousson africaine qui se déroulera en 2006 dans le cadre du programme international Amma. Le CNRM y joue un rôle très important, tant pour les aspects coordination scientifique du programme que pour ceux liés à l'expérimentation, à la modélisation et aux interactions de grande échelle dans le cadre de l'étude du climat. La campagne Amma sera le premier objectif majeur du nouvel avion instrumenté de Météo-France, un ATR42, dont la recette commencera début 2005.

Toujours pour mieux comprendre et modéliser les phénomènes de méso-échelle, un effort considérable a porté sur la couche limite urbaine dans le cadre de Capitoul, une expérimentation d'un an en région toulousaine, débutée en mars 2004. Avec ce jeu de données unique, des progrès considérables pourront être faits dans le domaine de la météorologie urbaine mais aussi dans la compréhension et la prévision du brouillard qui a donné lieu à des observations détaillées à l'occasion de Capitoul. Ces efforts contribueront également à améliorer la prévision de la qualité de l'air pour laquelle Météo-France développe le modèle Mocage dont les résultats ont été intégrés en 2004 à la plate-forme Prev'Air mise en place par l'Ineris pour le compte du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable.

Le CNRM a par ailleurs accentué son engagement dans l'étude du changement climatique en réalisant en 2004 une grande partie des scénarios climatiques recommandés par le Giec pour l'élaboration de son quatrième rapport. Dans ce cadre, le CNRM et l'IPSL ont par ailleurs décidé de collaborer à l'analyse commune des résultats de leurs modèles de climat. Parallèlement se poursuivent les études d'impact du changement climatique sur les phénomènes extrêmes (canicules, tempêtes et cyclones) et sur les ressources en eau, en particulier sur l'enneigement et les bilans glaciaires. La canicule qui a frappé la France en 2003 a fait l'objet d'une étude détaillée qui a porté sur les causes du phénomène et sa prévisibilité à l'échelle saisonnière, en étroite collaboration avec le Cerfacs.

Directeur de la recherche

Eric BRUN



Altocumulus floccus

Modèles pour la prévision du temps

L'année 2004 a été marquée par une intensification des développements autour du programme Arome et de nombreuses avancées en terme de prévision immédiate, qui constituent une forte priorité de la recherche météorologique. Enfin, les efforts ont été poursuivis en matière de prévision saisonnière.

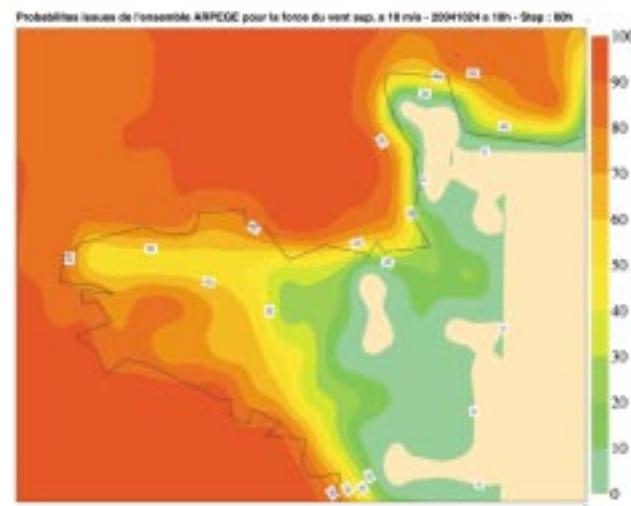
Prévision numérique synoptique

Le système de prévision d'ensemble Arpège

Un système de prévision d'ensemble pour la courte échéance a été développé à Météo-France pour la détection d'événements extrêmes comme les cyclogénèses atlantiques et les phénomènes de vent associés.

Cet ensemble basé sur le modèle Arpège se compose de onze prévisions (dix « perturbées » + une prévision de contrôle). Les perturbations des conditions initiales sont élaborées en calculant 16 vecteurs singuliers ciblés sur l'Atlantique Nord et l'Europe de l'Ouest de façon à sélectionner les structures ayant une influence directe sur la prévision à courte échéance sur notre zone d'intérêt. Les prévisions utilisent la même géométrie que le modèle Arpège opérationnel (T358 c2.4), ce qui permet de disposer d'un ensemble à haute résolution.

Probabilités à 60 h issues de l'ensemble Arpège pour observer une force du vent supérieur à 10 m/s (état initial du 24 octobre 2004 à 18h). Valeurs en %.



Ce système est intégré sur la chaîne opérationnelle (18 UTC) depuis juin 2004. Des produits sont disponibles sur le web en attendant une visualisation via la station Synergie.

Cet ensemble Arpège fait l'objet de différentes collaborations externes : développement d'un super-ensemble européen dans le cadre du projet européen Eurorisk, évaluation de l'incertitude dans la production d'énergie éolienne avec EDF et l'Ecole des Mines de Paris, fourniture de conditions initiales et de conditions aux limites perturbées pour un ensemble Aladin hongrois. Il est utilisé aussi en interne à Météo-France : choix de prévisions de l'ensemble pour l'identification de la Trajectoire Synoptique de Référence, prévisions probabilistes courtes échéances, fourniture de distributions pour le modèle de surcotes de Météo-France.

D'autres développements sont prévus afin d'optimiser l'échantillonnage de l'incertitude initiale, de prendre en compte l'incertitude « modèle » et de tester l'apport du modèle Aladin pour les fortes précipitations.

La surface « externalisée »

Les échanges d'énergie et de masse entre surface (continentale ou maritime) et l'atmosphère sont cruciaux pour une bonne représentation de la dynamique de l'atmosphère. Ceci concerne à la fois les courtes échelles de temps, puisque les échanges de quantité de mouvement, de chaleur, d'eau ou encore d'espèces traces (CO₂, gaz polluants, particules) influencent la couche limite atmosphérique dans laquelle nous vivons, mais aussi le climat régi par ces échanges à la surface du globe et leur variabilité spatiale et temporelle.

Afin de modéliser ces échanges, les scientifiques ont développé des schémas de surface. Le CNRM s'est engagé dans une voie d'une gestion simplifiée de ceux-ci, afin qu'ils soient utilisables et interchangeables d'un modèle atmosphérique à l'autre, que ce soit dans les modèles de recherche (Mésos-NH) ou de prévision à méso-échelle (Arome), ou dans les prochaines années dans les modèles globaux comme Arpège ou Arpège-Climat.

Ainsi, les développements récents de la physique de ces schémas, mis au point par les équipes spécialisées de Météo-France, seront disponibles dans tous ces modèles :

- initialisation des paramètres de surface à partir de la base de données Ecoclimap ;
- amélioration des flux à l'interface océan-atmosphère ;
- représentation des villes par un schéma dédié, Teb, afin de permettre de meilleures prévisions du temps sur les zones habitées ;
- modélisation fine du sol (gérant les phénomènes de gel et dégel) ;
- nouveau schéma de manteau neigeux ;
- simulation de la photosynthèse, des échanges de CO₂ et de la croissance interactive des plantes, effet primordial dans les scénarios de changement climatique ;
- les émissions anthropogéniques, biogéniques et les dépôts de polluants, d'espèces trace et d'aérosols.

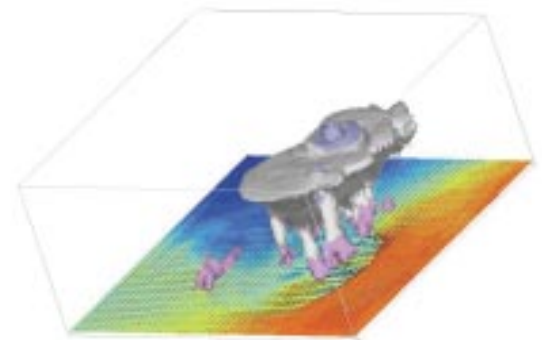
Un prototype pour le futur modèle de prévision Arome

Le futur système de prévision numérique opérationnelle à échelle fine, Arome, dont l'entrée en fonction est prévue pour 2008, s'appuiera sur un modèle non-hydrostatique en aire limitée sur la France, de résolution 2.5 km, avec une physique de nouvelle génération. Durant l'année 2004, une première version « prototype » de ce modèle, dénommé Arome, a été élaborée, via une collaboration entre les diverses unités de recherche du CNRM.

La partie dynamique du modèle est basée en grande partie sur le code Arpège/Aladin/IFS existant. Le cœur dynamique du modèle Arome est en effet la version non-hydrostatique du modèle Aladin. La physique, importée du modèle de recherche Mésos-NH est quant à elle totalement différente de la physique

Aladin. Elle comprend une paramétrisation de la microphysique (cinq hydrométéores pronostiques supplémentaires par rapport à Aladin), de la turbulence (énergie cinétique turbulente pronostique), un schéma de surface et une paramétrisation du rayonnement plus avancés. La convection à la résolution de 2.5 km est supposée résolue explicitement par le modèle et ne fait donc plus l'objet d'une paramétrisation. Des tests de validation tout d'abord sur cas académiques, puis sur cas réels ont été réalisés. On peut citer notamment l'épisode des inondations du Gard en septembre 2002, ainsi qu'une situation de ligne de grain sur l'Île de France (figure). Sur les divers cas testés, le prototype Arome reproduit bien les

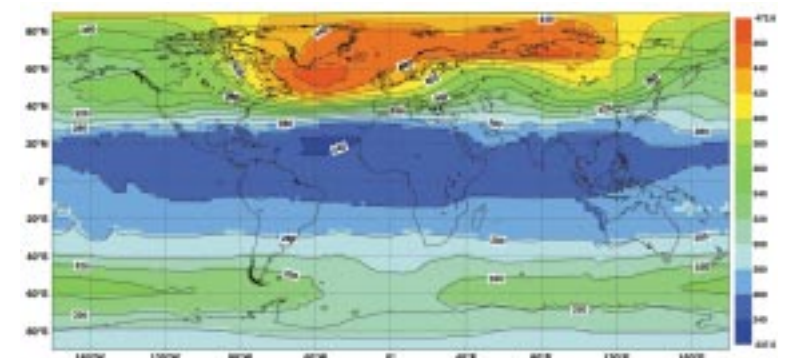
résultats du modèle de référence Mésos-NH, pour un coût numérique environ dix fois plus faible, grâce à l'allongement du pas de temps permis par les nouvelles techniques numériques non-hydrostatiques récemment mises au point.



Ligne de grain sur l'Île-de-France simulée par le nouveau modèle Arome : représentation en trois dimensions des hydrométéores et tracé au sol du champ de température potentielle et du vent.

Modélisation des effets radiatifs dans les modèles opérationnels

D'importantes modifications ont eu lieu dans la modélisation des effets radiatifs des modèles opérationnels Arpège et Aladin. Elles concernent le code de rayonnement lui-même ainsi que la représentation des contenus en ozone et aérosols.



Colonne totale d'ozone en Dobson de la climatologie de l'UGAMP pour le mois de janvier. Ces valeurs sont à comparer aux 284 Dobson du profil unique précédent.

La paramétrisation des effets radiatifs est maintenant la même que celle du modèle utilisé pour les simulations climatiques. C'est une ancienne version du code de rayonnement du CEPMMT (Morcrette 1990). Ce code qui possède deux intervalles spectraux dans le solaire et six dans l'infrarouge est plus précis, mais également plus coûteux et ne peut donc être appelé que toutes les trois heures dans Arpège et toutes les heures dans Aladin.

La concentration en ozone était jusqu'à présent définie par un profil vertical unique constant géographiquement et temporellement. Ce profil était construit à l'aide d'une fonction analytique à trois

Modèles pour la prévision du temps

Figure 1 : Nombre de données assimilées le 1^{er} mai 2004 en fonction des divers instruments embarqués sur les satellites. On note la nette amélioration liée à la retransmission via Eumetsat (projet EARS).

paramètres. Cette fonction a été conservée, mais les trois paramètres ont été ajustés, mois par mois et point de grille par point de grille, à la climatologie de l'UGAMP. La climatologie de l'UGAMP a été réalisée au département de météorologie de l'Université de Reading. C'est une distribution quadri-dimensionnelle de l'ozone atmosphérique qui a été construite à partir de différents types d'observations.

De manière assez similaire un profil unique était utilisé pour les aérosols. Une modification du code permet maintenant d'utiliser la climatologie mensuelle de Tegen, également utilisée au CEPMMT.

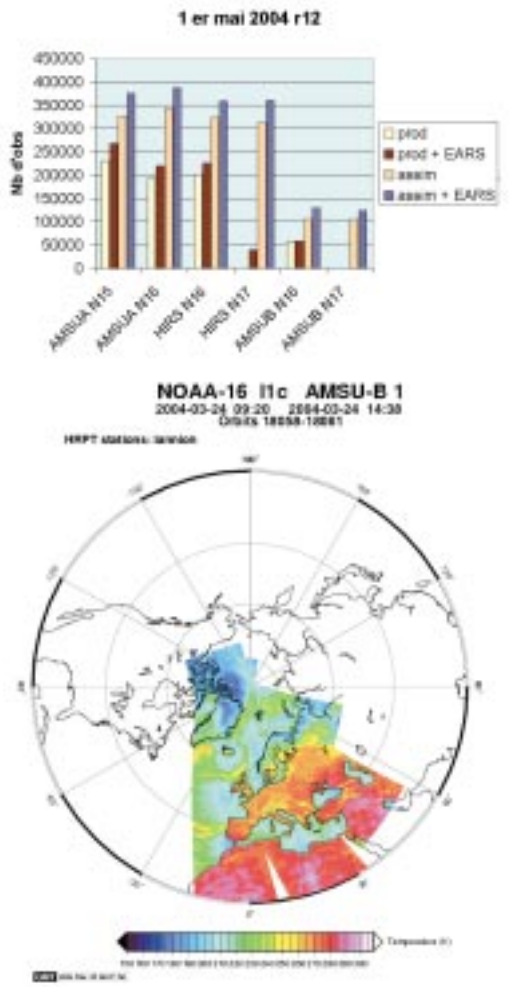
L'ensemble de ces modifications a eu un impact positif sur la qualité des prévisions, aussi bien en terme de scores objectifs qu'en terme de jugements subjectifs par les prévisionnistes.

Assimilation de nouvelles données de sondeurs

Depuis octobre 2004, la version opérationnelle d'Arpège assimile de nouvelles données des sondeurs Atovs embarqués sur les satellites de la Noaa. On rappelle que le sondeur Atovs comprend trois instruments (Amsu-A, Amsu-B et HIRS). Pour l'instant, les données des instruments Amsu-A et HIRS utilisées, fournissaient de l'information sur les profils de température et d'humidité atmosphériques. L'insertion des données d'Amsu-B a été testée cette année, avec des résultats très positifs en termes de scores de prévision pour le géopotentiel et des changements importants pour l'analyse d'humidité au-dessus des continents. Un inconvénient des données Atovs est que celles-ci sont reçues par la Noaa (USA), puis transmises vers l'Europe, ce qui entraîne un retard important, préjudiciable pour les analyses Arpège dites « de production » servant à lancer le modèle de prévision dans des délais très serrés.

Un complément au traitement de ces données globales est d'utiliser des données traitées dans des stations de réception locales, et retransmises par Eumetsat dans de brefs délais (projet EARS). Celles-ci sont mises en forme par le CMS qui reconstitue des orbites pour garantir la meilleure homogénéité de ces données, comme illustré sur la figure 1. Ce traitement nous permet d'insérer davantage de données dans les analyses de production, mais également dans les analyses d'assimilation servant à fournir la meilleure description de l'atmosphère en temps légèrement différé, comme on peut le constater sur la figure 2. Grâce à ces changements, les chercheurs de Météo-France exploitent pleinement les

données des sondeurs Atovs, et se concentreront désormais sur les nouveaux sondeurs, notamment les sondeurs avancés AIRS de la Nasa et l'interféromètre Iasi du satellite Metop.



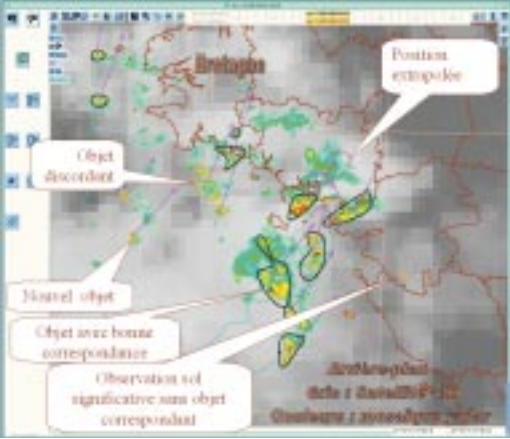
Coopération homme-machine en « Prévision Immédiate »

La « Prévision Immédiate » est la description du temps qu'il fait, et qu'il fera dans les quatre heures à venir ; les données d'observation y sont essentielles, et parmi elles les données télédéteectées (radar, satellite, foudre), mais elles ne suffisent pas, et leur combinaison optimale à l'expertise du prévisionniste réclame de l'innovation.

Le projet de Base de Données d'Expertise en Prévision Immédiate (BDEPI) traite de cette question, pour les phénomènes « significatifs » et à l'aide d'une méthodologie orientée objet : des automatismes traduisent les données d'observation télédéteectées en ébauches d'objets, lesquelles sont soumises à la supervision d'un prévisionniste ; son rôle est de prescrire leurs effets en temps sensible et la tendance de

leur activité. Une boucle continue de contrôle entre objets expertisés, nouvelles ébauches et observations sol, permet d'assurer la cohérence entre prévisions et réalité. Divers produits de prévision peuvent être élaborés en aval de la base.

En 2004, une expérimentation a été menée sur les orages, à l'aide d'ébauches fournies par les « OPIC-radar » (voir le sujet OPIC p.9), et d'une interface homme-machine intégré au poste de travail Synergie. Elle a montré un potentiel certain, d'une part dans les ébauches automatiques d'objets-orage, d'autre part dans la production d'avertissements individualisés et de descriptions en langage clair, à l'échelle d'un département, de la localisation et du déplacement des orages dans l'heure à venir. Par contre, des améliorations doivent être apportées à la maquette, pour que le travail d'expertise soit acceptable par les prévisionnistes.

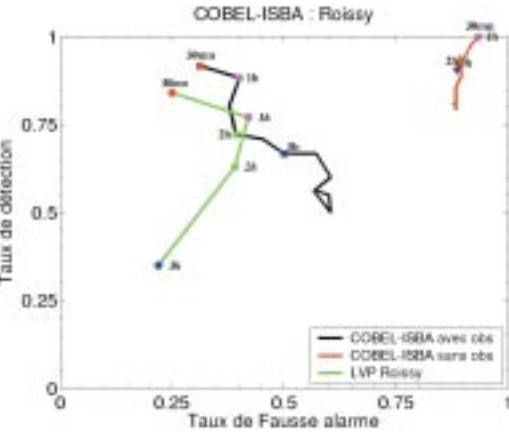


Prévision numérique méso-échelle

La prévision du brouillard à Roissy – Charles-de-Gaulle

Les chercheurs de Météo-France mènent des recherches depuis maintenant deux ans afin d'aboutir à une amélioration de la qualité des prévisions à très courte échéance des brouillards et nuages bas sur l'aéroport international de Roissy – Charles de Gaulle, sixième aéroport mondial en terme de trafic. Ce programme de recherche réunit à la fois une composante « observation » et une composante « modélisation numérique ». Le volet « observation » s'appuie sur une campagne de mesures qui a débuté en décembre 2002 et qui inclut des mesures radiatives à deux niveaux, un mât instrumenté de 30 mètres

et des mesures dans le sol. Le volet « modélisation numérique » est basé sur le modèle numérique de couche limite atmosphérique Cobel-Isba - développé en collaboration entre le CNRM et le Laboratoire d'Aérodologie - permettant une représentation fine des processus de couche limite, tel que le brouillard.



Cette méthode de prévision locale a été testée au cours des hivers 2002-2003 et 2003-2004. Ces tests montrent qu'une approche intégrée « observations-assimilation locale-modélisation locale » fournit une prévision de bonne qualité à très courte échéance, avec un gain significatif par rapport à la prévision effectuée par les prévisionnistes (figure). Ces tests ont également permis de montrer le caractère indispensable des observations et du schéma d'assimilation locale afin d'obtenir des conditions initiales et donc des prévisions de qualité.

A la suite de ces recherches, cette méthode de prévision numérique des brouillards et nuages bas est utilisée en mode opérationnel sur l'aéroport de Roissy-CDG depuis l'hiver 2004-2005.

Le système d'assimilation hybride à mésoéchelle

Le système d'assimilation hybride à mésoéchelle développé au CNRM a pour objet de doter le modèle Méso-NH d'un module d'assimilation de données à mésoéchelle. C'est aussi une plate-forme de tests pour mieux définir ce que sera l'assimilation de données du futur système Arome de prévision à mésoéchelle de Météo-France. Il est bâti autour du schéma d'analyse variationnelle d'Aladin et du modèle Méso-NH. Ainsi, dans le système hybride, l'écart aux observations est calculé par rapport aux prévisions du modèle Méso-NH, alors que la minimisation de la fonction coût est réalisée par le 3D-Var Aladin.

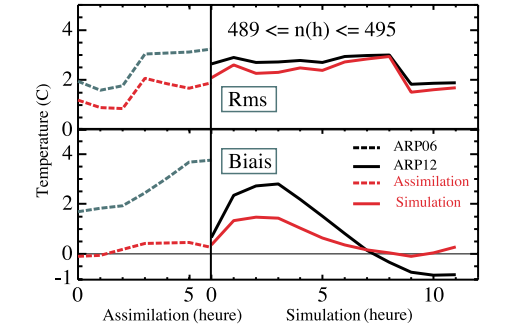
Evaluation de la qualité de la prévision numérique Cobel-Isba sur l'aéroport de Roissy – Charles de Gaulle pour les hivers 2002-2003 et 2003-2004 : évolution des taux de détection en fonction du taux fausse alarme pour la prévision Cobel-Isba avec les observations spécifiques (noir) et sans les observations spécifiques (rouge) pour différentes échéances de prévision. La qualité de la prévision effectuée par les prévisionnistes de Roissy est rappelé en vert.

Maquette de l'interface homme-machine du prévisionniste pour la BDEPI : sur fond d'image radar et satellite, les objets soumis à l'expertise sont représentés par un contour noir ; il est orange pour ceux sur lesquels l'attention du prévisionniste est attirée pour arbitrer une discordance entre état prévu et état observé. Les observations de rafales de vent sont aussi signalées en orange, par un triangle, quand aucun objet ne justifie leur intensité. Les flèches violettes représentent une extrapolation sur une heure des vitesses de déplacement diagnostiquées.

Impact de l'assimilation des données de surface sur les prévisions Mésos-NH à 2.5 km pour le cas des inondations du Gard des 8-9 septembre 2002 : Ecart types (en haut) et biais (en bas) par rapport aux observations horaires de température à 2m dans un domaine de 500 x 500 km² centré sur la région du Gard : i) pour les prévisions Mésos-NH issues de l'analyse Arpège de 06 UTC le 8 septembre 2002 (trait tireté noir) et de l'analyse Arpège de 12 UTC le 8 septembre 2002 (trait plein noir) et ii) pour l'assimilation des observations horaires de surface de 6 UTC à 12 UTC (trait tireté rouge) suivies d'une prévision Mésos-NH (trait plein rouge). L'assimilation des observations de surface conduit à de meilleurs scores aussi bien dans la période d'assimilation que dans la période de prévision.

L'apport de ce système d'assimilation de données à mésoéchelle (maille inférieure à 10 km) est attendu sur la représentation des phénomènes locaux, associés à la convection et/ou au relief, comme les lignes de convergence de basses couches, les refroidissements sous orage ou en fond de vallée. En effet, d'une part le modèle de mésoéchelle est capable de simuler ces phénomènes, mais de plus, les observations les décrivant comme les données de surface peuvent être introduites – et acceptées – dans l'analyse. Les premiers tests réalisés avec le système d'assimilation hybride ont porté notamment sur l'assimilation des données de surface à 10 km et 2.5 km sur la situation des inondations du Gard des 8 et 9 septembre 2002.

En l'absence d'un échantillon significatif de prévisions du modèle Mésos-NH, les statistiques d'erreur du modèle nécessaires au 3D-Var Aladin ont été dérivées de celles du modèle opérationnel Aladin en y apportant quelques modifications pour autoriser par exemple à 2.5 km plus de divergence du vent dans les basses couches et une portée horizontale plus faible, de l'ordre de 30 km. À partir de ces réglages, on a ainsi pu confirmer l'impact positif sur la prévision Mésos-NH de l'assimilation des observations de surface sur le cas du Gard.

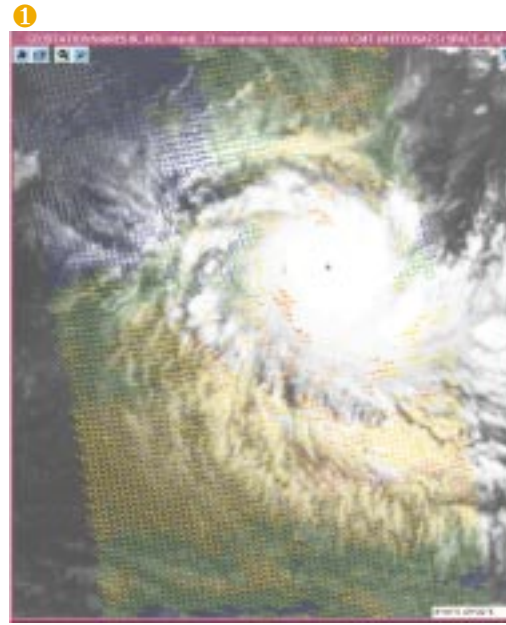


Assimilation des données Quikscat

Le diffusiomètre Seawind du satellite polaire Quikscat (Nasa) est un instrument qui permet d'obtenir le vent de surface sur mer, à partir de l'agitation des vagues dans le spectre microonde (90 % des océans couverts par jour). Ces données sont utiles pour la description de nombreux systèmes météorologiques, et plus particulièrement pour les cyclones tropicaux.

La figure 1 montre un exemple de couverture du cyclone Bento le 23 novembre 2004. L'assimilation de ces données dans le modèle de prévision global Arpège a été testée, avec une mise en œuvre opérationnelle en octobre 2004. Des études ont été menées par le Centre de Recherche sur les Cyclones sur une

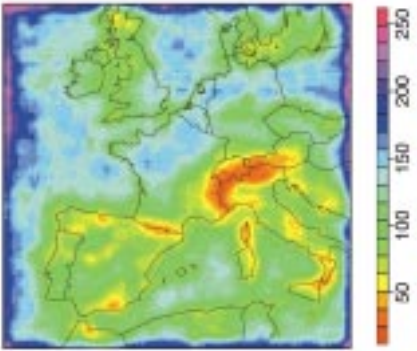
période de quelques semaines pour évaluer l'impact des données sur la prévision cyclonique. La figure 2 montre les moyennes d'erreurs de prévision pour la distance entre les minimums de pression du cyclone observé et prévu en fonction de l'échéance de prévision. Plusieurs modèles peuvent ainsi être comparés. On constate que le modèle du CEPMMT en rouge est le meilleur pour la moyenne échéance, alors que celui du Met Office anglais, qui utilise des données simulées dites de « bogus » élaborées par les prévisionnistes, est le meilleur pour la courte échéance.



L'impact des nouvelles données de diffusiomètres contribue à l'amélioration de la prévision du modèle Arpège. Cette amélioration est notable et conduit à une performance équivalente à celle du modèle Arpège-tropicales qui est une version à maille régulière du modèle Arpège-Métropole et qui utilise de plus des données de « bogus » permettant de mieux analyser les cyclones. Des données similaires seront bientôt fournies, en 2006, par le satellite Metop prochainement lancé par Eumetsat.

Représentation en ondelettes des structures locales pour le 3D-Var Aladin

L'assimilation des observations s'appuie sur des informations statistiques, décrivant notamment les structures spatiales des erreurs de prévision : sachant que ces erreurs sont corrélées spatialement, il est possible de propager les informations qui sont observées localement. Dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut Météorologique Royal de Belgique, le potentiel des ondelettes a pu être mis en évidence, concernant la modélisation des corrélations pour le 3D-Var Aladin.



Les ondelettes sont des fonctions mathématiques qui possèdent à la fois une information de position géographique et une information d'échelle spatiale. Elles permettent ainsi de représenter efficacement les structures locales des erreurs, spécifiques à chaque région.

Cette propriété est illustrée par la figure. Les ondelettes permettent de modéliser les variations géographiques des portées de corrélation (qui mesurent leur échelle spatiale caractéristique). Par exemple, les corrélations sont de plus petite échelle dans les régions montagneuses que sur mer.

Ces caractéristiques devraient permettre d'optimiser l'interprétation et la propagation des informations observées, en fonction des régions concernées.

Modélisation du cyclone tropical Dina près de l'île de La Réunion avec le modèle Mésos-NH

Le passage du cyclone Dina près des côtes réunionnaises le 22 janvier 2002 a été simulé avec le modèle à aire limitée Mésos-NH. Une configuration en grille imbriquée (4 domaines de résolution 36, 12, 4 et 1 km) a permis de décrire la convection explicitement au cœur du cyclone. L'étude a été réalisée à partir de champs d'analyses de grande échelle issues du modèle opérationnel du CEPMMT. Un vortex cyclo-

nique plus réaliste et équilibré déduit d'observations à fine échelle (3 km) par radar Doppler terrestre a été substitué à la perturbation cyclonique peu intense et mal positionnée de l'analyse opérationnelle par la méthode d'initialisation « Radar and Dropwind-sonde Vortex Conditioning ».

Outre une trajectoire nettement améliorée grâce à l'apport de la petite et de la moyenne échelle, les résultats obtenus après une simulation de 21 heures sont très prometteurs. Après une phase d'équilibrage du modèle avec son environnement, Mésos-NH parvient à recréer les caractéristiques dynamiques et thermodynamiques réalistes d'un cyclone intense : une zone centrale, l'œil, plus ou moins dégagée de nuages, un mur de cumulonimbus très développés et des bandes nuageuses et pluvieuses s'enroulant en spirales autour du cœur du cyclone. La circulation primaire associée au vent tangential est bien restituée : les vents sont maximaux dans les basses couches dans le mur de l'œil (figure 1). Le modèle reproduit bien la circulation secondaire dans le cyclone avec la convergence du flux radial de basses couches, l'ascendance inclinée dans le mur de l'œil, les courants subsidants à l'intérieur de l'œil et le long du mur de l'œil ainsi que la divergence du flux en altitude. Le réchauffement et l'humidification à la base du cyclone par les flux de surface sont bien restitués par un maximum de température potentielle équivalente q_E (figure 2).

Figure 1

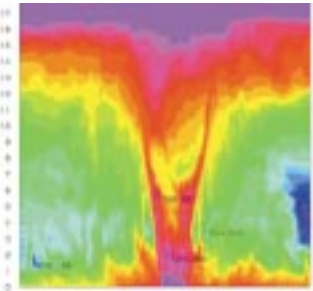
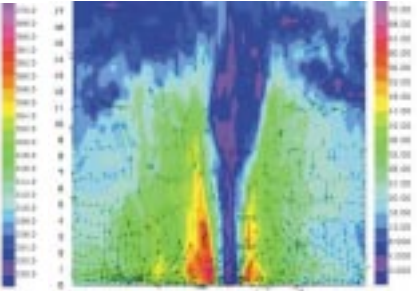


Figure 2



Diagnostics orientés Objet pour la Prévision Immédiate de la Convection

Les diagnostics orientés-objet sont une manière de synthétiser le flux des nombreuses données d'observation et/ou de prévision mises à la disposition du prévisionniste ; ceci est essentiel en Prévision Immédiate, où la réactivité est primordiale. Ces diagnostics représentent aussi une interprétation automatique, qui constitue une étape dans la réalisation de produits finis de signalisation ou de prévision.

Les Opic, Objets pour la Prévision Immédiate de la Convection, ont un intérêt d'autant plus fort que la

Carte des portées de corrélation, obtenue avec une modélisation en ondelettes : les ondelettes permettent par exemple de représenter le raccourcissement des portées dans les régions montagneuses.

Suivi automatique des orages. Sur l'image radar composite du 17 août 2004 à 15h50, les contours oranges délimitent les objets Opic-radar qui sont caractérisés et suivis automatiquement. Les lignes rouges montrent la trajectoire passée de ces orages et témoignent tant de la qualité du suivi que du potentiel de faisabilité d'avertissements à très courte échéance basés sur de tels diagnostics.

prévision opérationnelle des orages reste un défi. L'année 2004 a connu d'une part la mise en service opérationnel d'Opic basés sur la seule donnée satellite, et d'autre part plusieurs développements des Opic utilisant d'autres données.



Une chaîne opérationnelle de calcul d'Opic a été mise en place à partir des données du satellite MSG. Elle est basée sur l'exploitation, au Centre de Météorologie Spatiale, de la composante ad hoc du système logiciel du Saf Nowcasting, développée par Météo-France. Les objets qu'elle génère sont complétés, sur le système Diapason, par une description de leur activité électrique, et le produit final peut être visualisé en technologie web par les services de prévision.

Les développements autour des OPIC ont concerné principalement l'utilisation de la donnée radar. Une adaptation de la chaîne de traitement, assortie d'un réglage approprié, s'est avéré efficace pour une identification et un suivi des orages basés sur les structures de réflectivité (figure). Une coopération est menée avec Météo-Suisse sur ce sujet. Par ailleurs, la complémentarité des Opic-satellite et des Opic-radar a été étudiée, sous l'angle d'un relais entre un suivi précoce basé sur le satellite et un suivi de la phase mature basé sur le radar.

Prévision saisonnière

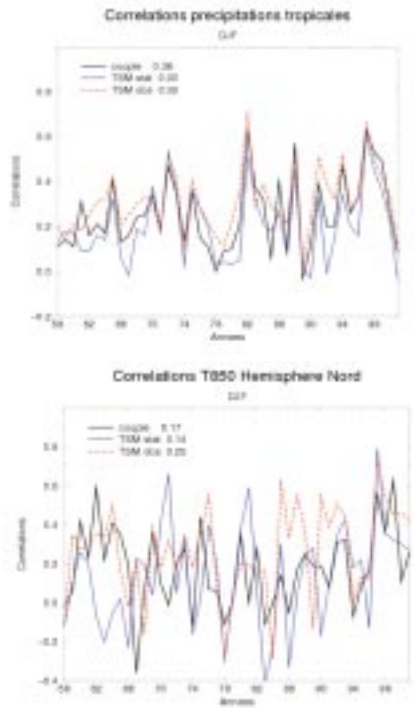
Comparaison de prévisions saisonnières couplées et non-couplées

Le projet Demeter, cofinancé par l'Union Européenne, a été l'occasion d'une comparaison de prévisions saisonnières couplées et non-couplées sur la période 1958 à 2001 du projet. Trois types de prévisions ont

été effectuées : prévisions avec les modèles Arpège-Climat et OPA (Lodyc), couplés à l'aide d'Oasis (Cerfacs), prévisions atmosphériques forcées par des températures de surface de la mer (TSM) produites par un modèle statistique (autorégression d'ordre 1, additionnée à un bruit blanc) et prévisions atmosphériques forcées par les TSM observées fournissant ainsi une mesure de la prévisibilité potentielle (modèle océanique « parfait »). Des corrélations spatiales entre la moyenne d'ensemble (9 prévisions par ensemble) et la réanalyse Era40 du CEPMMT pour la saison décembre-février de chacune des années permettent de comparer la qualité des trois types de prévisions.

Pour les précipitations tropicales, la prévision couplée donne un meilleur résultat en moyenne sur toute la période que la prévision avec TSM statistique, résultat assez proche de la prévision avec « océan parfait ». Les meilleurs scores (> 0.4) sont obtenus de manière cohérente pour les trois types de prévisions lors d'années extrêmes de l'Enso (Niño : 65, 72, 82, 94, 97 et Niña : 75 et 88).

Concernant les températures à 850 hPa sur l'hémisphère nord, la prévision couplée donne également un meilleur résultat en moyenne sur toute la période que la prévision avec TSM statistique, résultat cette fois-ci plus éloigné de la prévision avec « océan parfait ». Les scores sont plus bruités pour ce domaine géographique, mais on retrouve une assez bonne cohérence pour le test couplé et le « TSM obs » avec les meilleurs scores (> 0.4) de ces deux types de prévision obtenus lors d'années extrêmes de l'Enso (Niño : 97 et Niña : 65 et 75).



Coefficients de corrélation entre la moyenne d'ensemble des prévisions saisonnières (couplées, forcées par des températures de surface de la mer statistiques et des températures de surface de la mer observées) et la réanalyse Era40 du CEPMMT pour la saison décembre-février ; précipitations tropicales et températures à 850 hPa sur l'hémisphère nord. On considère que la corrélation est bonne si les scores dépassent 0.4.

Étude des phénomènes météorologiques



Stratocumulus perlu

L'étude de la prévisibilité des phénomènes atmosphériques constitue un défi important que les équipes de recherche du CNRM s'attachent à relever. L'année 2004 a ainsi permis de mener de nombreuses études sur les dépressions et la convection nuageuse.

Étude cyclogénèse et prévisibilité

Une nouvelle approche des basses couches dans l'inversion du tourbillon potentiel à équilibre implicite

Depuis plusieurs années, une nouvelle manière d'appréhender la dynamique atmosphérique émerge, il s'agit de l'utilisation du tourbillon potentiel. Grâce à l'inversion du tourbillon potentiel, on peut reconstituer un état atmosphérique à partir d'un état donné de tourbillon potentiel et d'une condition aux limites. Cette inversion permet de pratiquer de la « chirurgie » sur une situation météorologique. En enlevant ou ajoutant des structures de tourbillon potentiel, on peut mieux comprendre comment les différentes structures composant un état atmosphérique interagissent entre elles pour amener, par exemple, une tempête sur la France.

La méthode utilisée au CNRM est originale car le modèle Arpège fournit la condition d'équilibre nécessaire à la solution de l'inversion. Ceci est un plus par rapport aux méthodes utilisées ailleurs. Un des défauts

de notre outil jusqu'à présent était d'obtenir, dans une des étapes de l'inversion, des champs incohérents entre eux en cas d'anomalies de basses couches. Ainsi obtenait-on des creux de géopotentiels de plus en plus marqués avec l'altitude associés à un refroidissement à 850hPa et une circulation anticyclonique (figure). Ceci venait de la pression de surface qui n'était pas correctement modifiée. La solution a été d'utiliser une nouvelle formulation qui intègre sur la verticale les relations existant entre ces mêmes champs.

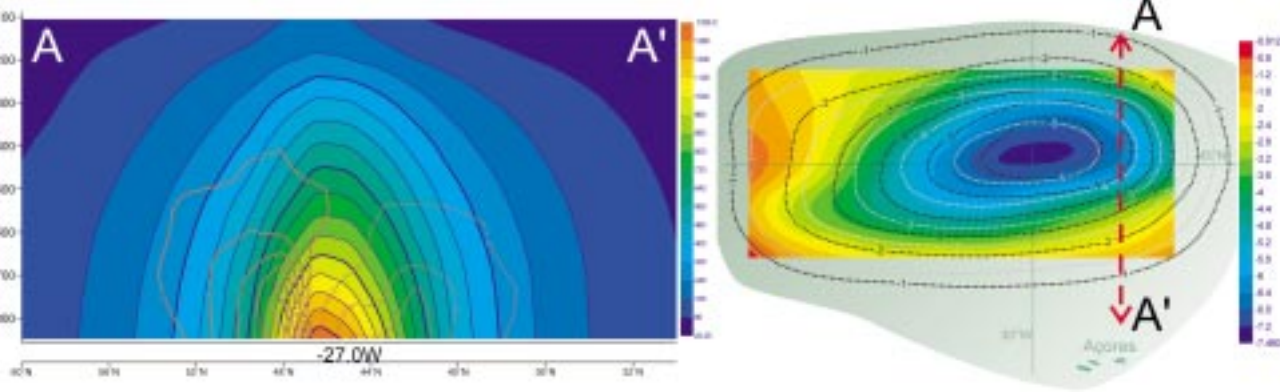
Cette nouvelle formulation de correction de la pression de surface permet une convergence plus rapide de l'inversion. Elle apporte aussi de meilleurs résultats dans les basses couches, où la pression obtenue est plus réaliste, mais également sur toute la couche inversée puisque la pression de surface conditionne la cohérence des champs obtenus dans les niveaux supérieurs.

Intercomparaison de méthodes d'observation adaptative

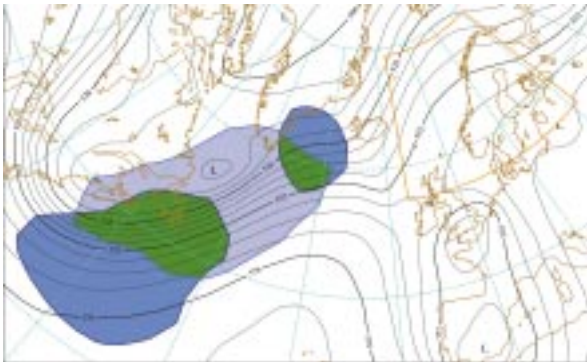
L'année 2004 constitue la phase d'études diagnostiques et d'impact qui suit la campagne de ciblage des observations qui a eu lieu sur l'Atlantique Nord à la fin de 2003. Cette campagne se déroulait dans le cadre du programme Thorpex (OMM) sous la tutelle de Eucos (http://www.wmo.int/thorpex/atlantic_ob_system.html).

On s'est focalisé sur le comportement des techniques de ciblage durant cette campagne. Elles émanent de cinq centres : CEPMMT, Met-Office, Météo-France,

Inversion effectuée le 25 décembre 1999 à 12TU sur l'Atlantique, sur la jeune tempête T1 du 26 décembre. A gauche : coupe verticale le long du méridien 27W entre 60N et 30N. En couleurs : anomalies de géopotential issues de la partie quasigéostrophique linéaire de l'inversion avec correction de pression de surface. En isolignes : composante zonale du vent. A droite : anomalies de température à 850 hPa souhaitées, obtenues sans correction de pression en gris et avec correction de pression en noir. On note la cohérence des champs entre eux lorsqu'on corrige la pression de surface ainsi qu'une meilleure convergence vers l'anomalie de température voulue.



NCEP, NRL. Elles produisent des zones sensibles (dénominateur commun à chaque technique) qui indiquent où déployer les observations supplémentaires. Mais ces techniques diffèrent en philosophie et en complexité. Disons que l'on peut séparer ces techniques en deux familles qui sont, d'une part les techniques de l'adjoint et d'autre part, celles basées sur des ensembles ; mais aussi en deux catégories : celles qui quantifient le bénéfice espéré du ciblage et celles qui ne le font pas.



Recouvrement des zones sensibles de grand format (4.10^6 km^2) sur le cas du 2 Déc. 2003 à 18 UTC. La zone sensible du CEPMMT (bleu) et la zone du Met Office (lavande), prévues 66 h à l'avance, partagent une région de $1,6.10^6 \text{ km}^2$ (en vert). Les isolignes indiquent la prévision à 66 h du champ de géopotentiel à 500 hPa (date initiale 30 Nov. 2003 00 UTC). La zone rectangulaire orange figure la zone de vérification valide pour le 4 Déc. à 12 UTC. Les deux techniques de ciblage ne désignent pas la même zone à échantillonner.

L'expérience montre que toutes les zones sensibles calculées sur un cas de ciblage donné ne sont pas similaires, même si les calculs sont effectués pour des modalités de ciblage identiques. Une comparaison avec des zones calculées *a posteriori* complète cette vérification.

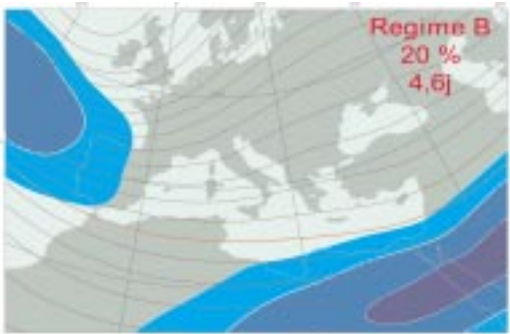
Après avoir classé et déterminé quelles zones sensibles sont directement comparables, car concourrant sur le même cas de ciblage, on a évalué leur similarité par recouvrement mutuel. Cet indice est d'autant plus élevé que l'on considère des zones sensibles vastes : la figure montre un cas de recouvrement dans le cas d'une taille $L = 4.10^6 \text{ km}^2$. Cet exemple illustre combien la significativité de cette approche reste délicate : les deux formes de zones sensibles partagent peu de points communs, avec une taille supérieure ($XL = 8.10^6 \text{ km}^2$). Ce désaccord est peu détectable (figure).

Des régimes de temps en Méditerranée

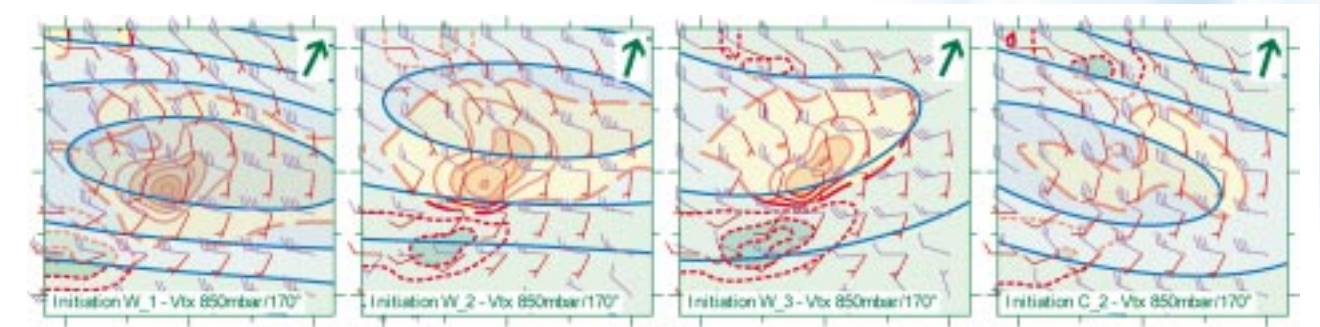
Après la réalisation d'un suivi automatique de dépressions sur le jeu de ré-analyse Era40, on s'intéresse aux liens que l'on peut faire entre les cas méditerranéens et leur environnement de grande échelle. Une question initiale subsistait quant à l'existence ou non de structures fréquentes de grande échelle (régimes de temps) à caractère persistant en Méditerranée, selon Era40.

Sur le domaine 21-60 N et 21 W-45 E, avec une résolution de 1,5, pour des périodes hivernales (novembre-mars) de 1957 à 2001, les chercheurs du CNRM ont découvert l'existence de six régimes à partir du géopotentiel à 500 hPa (figure). La méthode de classification est celle des nuées dynamiques, améliorée par l'outil ANAXV (LMD, INLN) qui permet le calcul d'un indice de classifiabilité permettant de détecter les nombres de classes admissibles entre 2 et 9.

Les régimes méditerranéens ont des durées légèrement moindres que leur homologues atlantiques (4 jours en moyenne contre 7 pour l'Atlantique) et leur distribution est homogène. Si l'on observe les aspects de variabilité du temps à l'intérieur de chaque régime, on retrouve, pour la basse fréquence, l'influence Atlantique à travers l'incursion plus ou moins prononcée dans le domaine méditerranéen du courant-jet, et l'influence tropicale par la présence et l'intensité du jet sub-tropical sur la bordure sud du bassin. Les régimes montrent aussi leur aptitude à reproduire certains aspects de la forte variabilité. Une analyse de l'écart type de la partie haute fréquence (2-6 j) du vent à 850 hPa montre la relation entre régimes et vents régionaux tout autour du bassin. En 2005, on s'intéressera aux liens entre événements extrêmes, trajectoires et régimes en liaison avec le projet Medex, et éventuellement dans le cadre de la préparation au projet Cyprim.



	A	B	C	D	E	F
A	14 % 4,7j	2 %	4 %	2 %	3 %	4 %
B	1 %	20 % 4,6j	4 %	6 %	4 %	5 %
C	3 %	5 %	17 % 3,6j	1 %	4 %	5 %
D	5 %	3 %	2 %	17 % 4,5j	3 %	3 %
E	3 %	5 %	3 %	3 %	15 % 3,9j	1 %
F	3 %	3 %	5 %	4 %	1 %	17 % 3,7j



La création à distance d'une nouvelle dépression par une autre

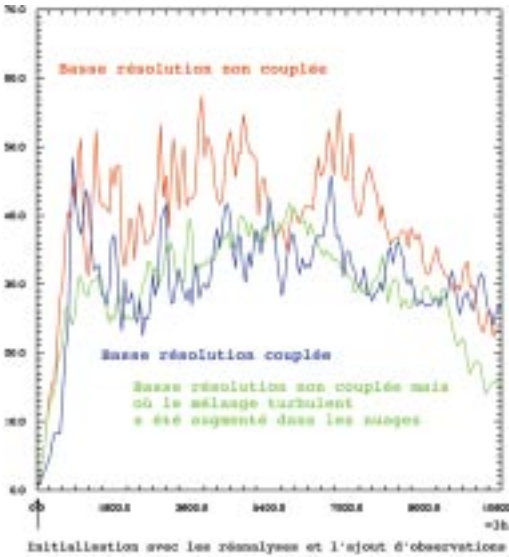
Les longues ré-analyses permettent de renouveler en profondeur la description des caractéristiques des cyclogénèses synoptiques et sous-synoptiques. Cette approche très neuve a été explorée par un chercheur du CNRM, qui donne un certain nombre de situations types de deux phases essentielles de la vie des dépressions : le moment de leur apparition et leur stade mature. Ces situations types prennent la forme de champs intégrant au moins une centaine de cas.

La recherche du mécanisme physique à l'origine des créations, à partir de l'énergétique d'une partition entre perturbation et environnement, en fonction d'une échelle, ne donne pas de résultats convaincants. Une approche inspirée par un des principaux résultats du projet Fastex a été essayée (approche ayant permis de comprendre l'apparition du cas 41 de Fastex) : elle consiste à séparer l'écoulement autour de systèmes bien identifiés, plutôt qu'en terme d'échelle. En revenant aux trajectoires de tempêtes, on met en évidence la présence de ces systèmes précurseurs. Des propriétés leurs sont attribuées par une inversion élémentaire : on observe que, pour plusieurs des composites, en particulier ceux de formation du côté chaud du courant-jet, l'interaction entre un tel précurseur situé dans les basses couches et le reste du contexte, fournit un noyau marqué de gain d'énergie là où la nouvelle dépression apparaît. Quand le précurseur est absent d'après les trajectoires, le calcul montre qu'en effet, sa présence ne donnerait rien. Les fréquences d'occurrence de chaque type étant connues, ceci permet d'affirmer que le mécanisme trouvé dans le cas 41 de Fastex explique en fait près d'un quart des formations de dépressions (figure).

Phénomène de méso-échelle

Traitement du mélange en nuages dans le code Méso-NH et impact sur les vitesses verticales extrêmes dans les orages

Dans des situations convectivement très instables, le code Méso-NH simule des vitesses verticales dans les tours convectives, irréalistes aux résolutions horizontales de 2-3 km, jusqu'à 40, voire 60 m/s, contraignant le pas de temps à de plus petites valeurs. Un manque d'énergie cinétique turbulente et de trop faibles flux turbulents ont été diagnostiqués à basse résolution (2-3 km) grâce à des simulations à haute résolution (400 m), effectuées à l'aide de la technique des modèles emboîtés.



En effet, des mélanges, dits turbulents, se produisent à des échelles plus fines que la maille (quelques dizaines de mètres seulement), à l'intérieur du nuage mais surtout à son interface. Un environnement sec en moyenne troposphère renforce l'interface (transition plus mince) par des processus thermodynamique (évaporation) et dynamique (cisaillement

Quatre des douze configurations types donnant naissance à une nouvelle dépression sur l'Atlantique, dont trois (à gauche) dues au mécanisme d'interaction expliqué dans le texte et un contre-exemple utile à la validation (à droite). Les isolignes rouges matérialisent l'énergie créée dans la basse troposphère par l'interaction, intervalle $0,2 \text{ Wm}^2$, valeurs négatives pointillées. Le vent pointé en rouge est le vent à 850 hPa attribué au précurseur de basses couches, en mauve le vent associé à tout le reste, la somme donnant la composite de vent initial. En surfaces bleues transparentes, la force du vent de l'environnement évoluant lentement à 300 hPa tous les 5 ms^{-1} à partir de 20 ms^{-1} , caractérise le contexte synoptique.

Evolution temporelle des vitesses verticales extrêmes dans le cas d'une ligne de grains sur l'île de France du 4/08/94. A basse résolution horizontale (2,5 km) (courbe rouge), les vitesses verticales extrêmes sont trop fortes par rapport à la moyenne à 2,5 km des vitesses verticales issues du modèle à haute résolution (800 m) (courbe bleue). A basse résolution, l'augmentation du brassage turbulent dans les nuages réduit à bon escient ces vitesses (courbe verte).

Coupe verticale du rapport de mélange de vapeur d'eau (a) simulée (les iso-contours tracent la vitesse verticale) et (b) observée par un lidar Dial. (c) Profil vertical des longueurs caractéristiques associées aux variables thermodynamiques : vapeur d'eau (RV), température potentielle (TH), température potentielle virtuelle (THV) et vitesse verticale (W).

de vent). Cette instabilité d'interface facilite le brassage à la frontière du nuage qui n'est pas suffisamment pris en compte à des résolutions de 2-3 km, dimension des cellules convectives.

La solution simple proposée consiste à augmenter la longueur de mélange en nuage dans le schéma de turbulence tri-dimensionnel de Méso-NH en fonction de critères d'instabilité. Ainsi, l'augmentation ciblée des échanges turbulents aux basses résolutions bénéficie t'elle aux vitesses verticales et aux flux simulés, qui deviennent raisonnables par rapport à la haute résolution. Les structures convectives sont plus dynamiques et les précipitations supérieures.

Ce problème n'est pas rencontré dans le nouveau modèle de méso-échelle Arome grâce à la nature plus diffusive du schéma temporel implicite.

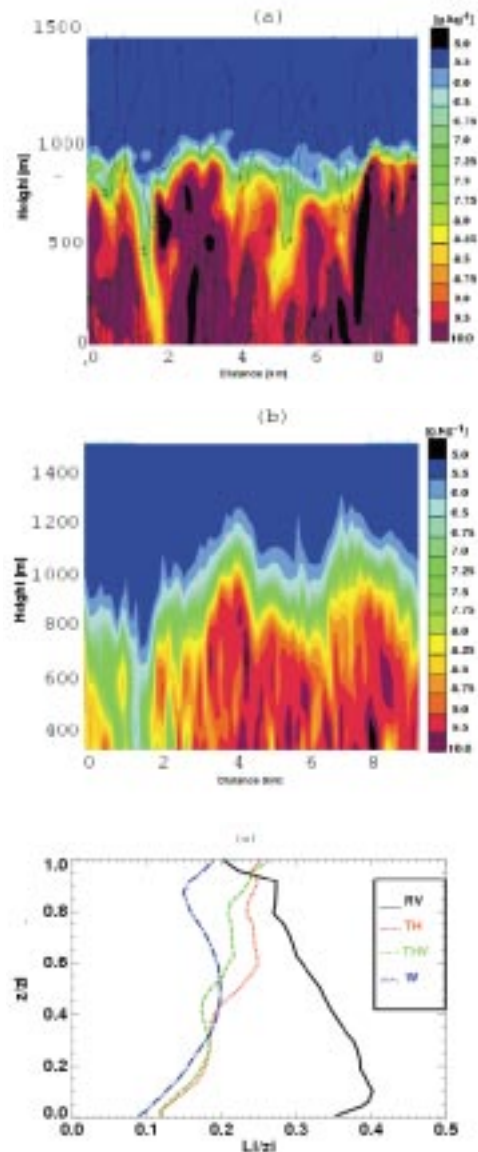
Descentes d'air sec dans la couche limite simulées par Méso-NH et observées par lidar Dial

La connaissance des variations de l'humidité à fine échelle s'avère indispensable si l'on veut déterminer correctement où et quand la convection nuageuse est initiée. La simulation à fine échelle permet d'explorer ces modes de variabilité, et d'identifier les mécanismes qui en sont à l'origine.

Ainsi, le modèle MésoNH a permis de reproduire et d'analyser un cas observé de développement diurne de couche limite convective. Ce cas est issu de l'expérience IHOP qui s'est déroulée au printemps 2002 au dessus des grandes plaines américaines. IHOP est dédiée à la mesure de l'humidité à fine échelle et à ses liens avec l'initiation de la convection ; elle a ainsi fourni un jeu de données riche et unique.

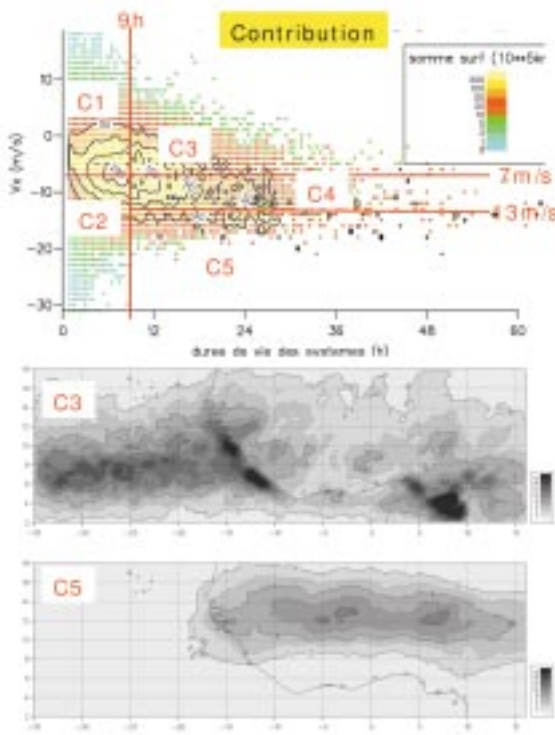
La simulation, comme les observations du lidar (radar laser) Dial aéroporté, indique l'existence de descentes d'air sec plongeant sous forme de filaments et atteignant des niveaux assez bas dans la couche limite (figure a et b). Ces descentes jouent un rôle important sur la variabilité de la vapeur d'eau puisqu'elles expliquent plus de 50 % de la variance de la vapeur d'eau dans la couche limite. Elles sont également à l'origine d'une échelle caractéristique plus grande que celle des autres variables notamment la vitesse verticale et la température potentielle (figure c). La figure (a) illustre aussi cette disparité d'échelles puisqu'à une anomalie positive sont associées plusieurs anomalies en vitesse verticale. Si la simulation validée auparavant a permis de détailler les mécanismes principaux à

l'origine de la variabilité du champs d'humidité, elle permet maintenant d'étudier, via la simulation numérique, l'impact d'une telle variabilité sur l'initiation des petits cumulus.



Développement d'une classification et d'une climatologie des systèmes convectifs sur l'Afrique de l'Ouest

Le projet d'Analyses Multidisciplinaires de la Mouson Africaine (Amma) a consolidé en 2004 sa dimension internationale avec, entre autres, l'obtention du soutien de l'Europe à travers le projet intégré Amma-EU. La préparation de la période d'observations intensives (SOP) en 2006 mobilise les forces de la communauté. Le CNRM a entrepris de nombreux travaux de modélisation, assimilation et climatologie pour mettre en œuvre des outils adaptés à ce projet.



Un effort a ainsi été fourni pour développer une climatologie des systèmes convectifs de méso-échelle (MCS) sur l'Afrique de l'Ouest en s'appuyant sur l'algorithme Isis de suivi automatique de ces systèmes identifiés à partir de l'imagerie infra-rouge de Meteosat, initialement développé pour étudier les MCS sur l'Europe. Après une adaptation aux particularités de l'Afrique de l'Ouest, une étude des distributions des caractéristiques des MCS (nébulosité, taille, durée de vie, vitesse de propagation...) a permis de proposer une classification en cinq classes en fonction de leur durée de vie et de leur vitesse de propagation zonale.

Cette classification appliquée à la période 1996-2003 a démontré l'intérêt de l'approche pour caractériser l'activité convective (structure et intensité) suivant

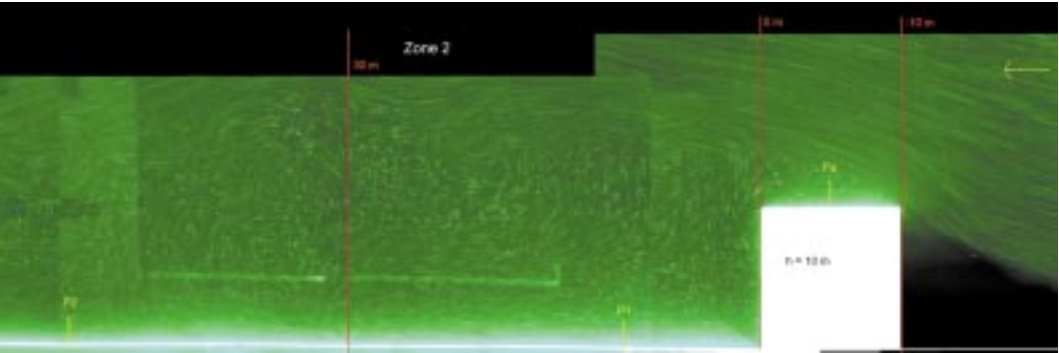
la région considérée et sa variabilité intra-saisonnière et inter-annuelle. Par exemple la zone Sahélienne est dominée par des systèmes à longue durée de vie, se propageant rapidement et ayant toujours la même taille. Au contraire sur l'océan Atlantique et dans les zones côtières, les MCS sont moins bien organisés, de durée de vie plus faible et se propagent plus lentement. Cette climatologie permettra de mieux identifier les types de MCS qui seront documentés durant Amma et d'évaluer leur représentativité suivant la région, la période de la saison et l'année.

Vent traversier sur une digue portuaire

D'importants travaux d'aménagement d'un port breton étant prévus dans le cadre d'un retrait partiel de la Marine Nationale, la Société d'Économie Mixte en charge du projet a pris contact avec Météo-France pour une expertise météorologique sur certaines hypothèses à l'étude.

L'éventuelle création d'un port de plaisance nécessitant une protection contre les houles de sud par une digue, il a été demandé au CNRM de réaliser une simulation en veine hydraulique pour étudier les conséquences de l'ouvrage, selon plusieurs configurations dues à la marée, sur le vent en aval de cette construction.

Une maquette de la digue, émergée à marée basse, marée haute et en position intermédiaire a donc été positionnée dans le grand canal hydraulique du CNRM. D'une échelle du 1/50 ème, elle a permis d'observer la formation de tourbillons parfois importants et d'en déduire le vent à 2 m au-dessus de la surface entre 10 m et 300 m en aval de la digue. Des mesures en vélocimétrie laser Doppler à 4 cm au-dessus du plancher de la veine, jusqu'à 6m en aval de la maquette ont donc été effectuées, ainsi que des visualisations par tomographie laser en photographie et vidéo numérique.



Climatologie des systèmes convectifs (MCS) sur l'Afrique de l'Ouest durant la mousson (Juin-Août) pour la période 1996-2003 : (a) densité de contribution des MCS à la nébulosité dans la haute troposphère en fonction de leur durée de vie (heures) et de leur vitesse de propagation zonale (m/s). Il est ainsi proposé une classification en cinq classes dont la distribution géographique est illustrée pour deux classes C3 (b) et C5 (c) correspondant à des systèmes persistant la nuit (durée de vie > 9h) et se propageant lentement ou rapidement (<7 et >13 m/s).

Formation de tourbillons de vent au passage d'une digue (visualisation de particules traceuses par plan laser).



Cirrus et cirrocumulus

Étude du climat et du changement climatique

Le changement climatique reste un enjeu majeur pour la recherche de Météo-France. L'utilisation de modèles globaux couplés permet des progrès importants dans les simulations climatiques et leurs conséquences sur l'environnement.

La canicule 2003 : un avant-goût du climat estival du XXI^e siècle

À nos latitudes, les épisodes prolongés de canicule sont des phénomènes relativement rares dont les conséquences peuvent être dramatiques. Il est donc crucial de quantifier l'impact du renforcement de l'effet de serre sur ces phénomènes. Dans ce but, un indice régional et saisonnier, HSI, est défini comme la fraction du domaine pour laquelle l'été considéré fait partie des 10 % les plus chauds sur la période 1950-1999. Symétriquement, l'indice CSI est estimé comme la fraction pour laquelle la température moyenne estivale est inférieure au quantile 10 %.

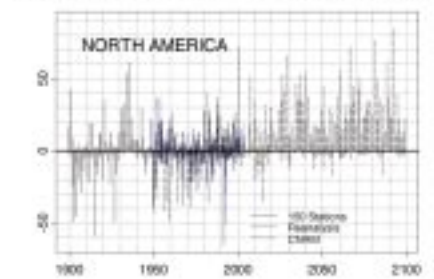
La méthode a été appliquée à des observations *in situ* sur l'Amérique du Nord, aux réanalyses NCEP-NCAR,

ainsi qu'à un scénario climatique du CNRM (1950-2099). On vérifie grâce aux mesures *in situ* que les réanalyses permettent d'estimer correctement les indices observés (figure a). Sur l'Europe, les réanalyses confirment l'importance de la canicule 2003, qui est en valeur saisonnière le phénomène le plus marquant jamais observé depuis 1948 (figure b).

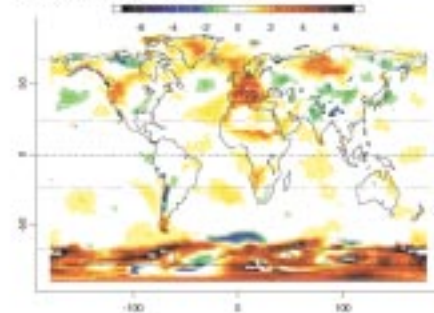
Cette canicule semble associée à un train d'ondes stationnaires, avec des anomalies froides de part et d'autre de la zone concernée (figure c). De manière intéressante, les corrélations globales entre l'indice HSI et les températures de surface issus du scénario climatique reproduisent assez bien cette structure (figure d). Les indices simulés indiquent par ailleurs que les canicules seront de plus en plus fréquentes et étendues au cours du XXI^e siècle. Ils suggèrent également que la canicule 2003 est un phénomène exceptionnel pour le XX^e siècle, mais pas pour le début du XXI^e siècle puisque le scénario du CNRM produit un événement théorique comparable en 2008 sur l'Europe et dès 2000 sur l'Amérique du Nord. Il est donc probable qu'avant la fin du siècle, les Européens ne se souviendront plus de l'été 2003 comme d'un phénomène climatique exceptionnel.

a) Séries observées, analysées et simulées des indices HSI (positif) et CSI (négatif) sur l'Amérique du Nord ; b) Séries analysées et simulées des indices HSI et CSI sur l'Europe ; c) Répartition globale des anomalies de température de l'air en surface en 2003 par rapport à la climatologie 1950-2000 ; d) Corrélations globales entre l'indice HSI sur l'Europe et les températures de l'air simulés sur la période 1950-2050. La simulation correspond à un scénario de type B2, avec des hypothèses relativement basses sur les quantités de gaz à effet de serre émis au cours du XXI^e siècle.

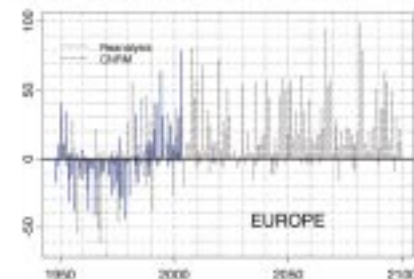
a) Indices HSI & CSI sur l'Amér. du Nord



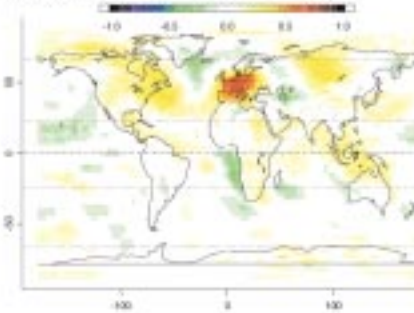
c) Anomalies Tair - été 2003



b) Indices HSI & CSI sur l'Europe



d) Cor(HSI-Tair) - étés 1950-2099



Températures et précipitations extrêmes : projection globale pour les années 2050-2099

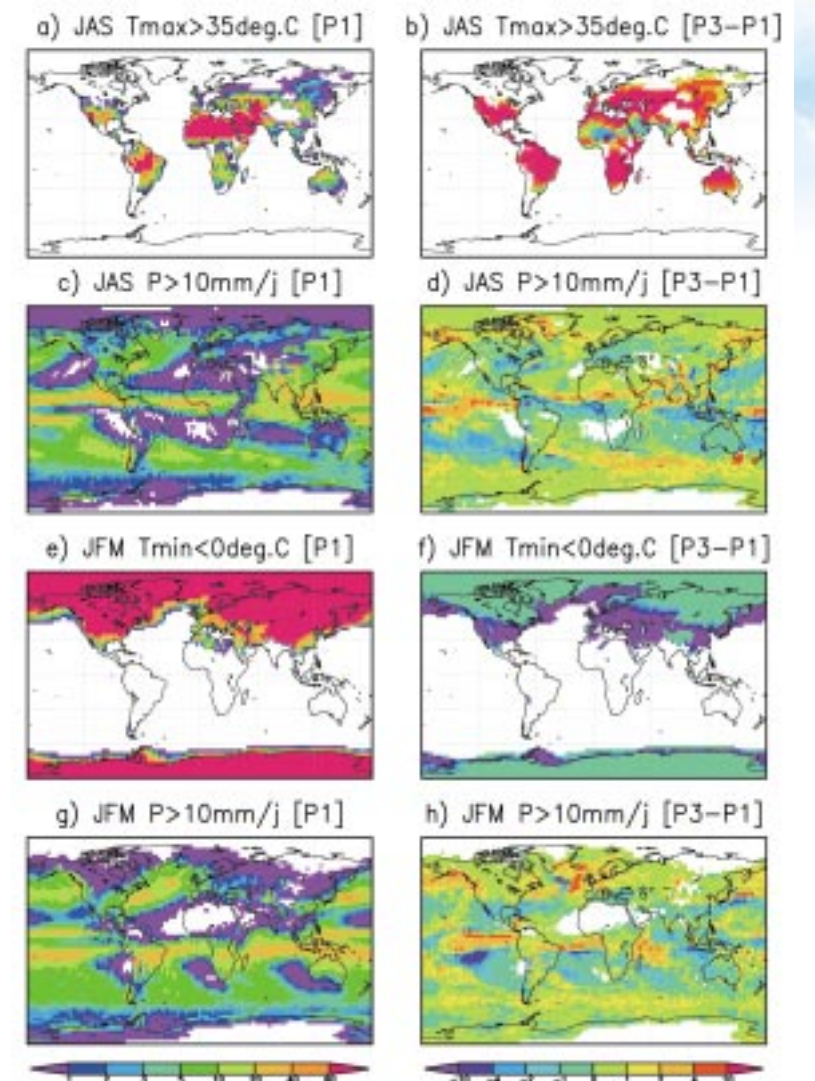
Au-delà des normales saisonnières, le réchauffement global de la planète pourrait fortement perturber la variabilité climatique. Grâce aux modèles couplés océan-atmosphère, on peut tenter de prévoir l'évolution des extrema de température et de précipitation, en réponse à un accroissement des concentrations de gaz à effet de serre au cours du XXI^e siècle.

Plutôt que d'étudier les extrema annuels, on peut se donner des seuils correspondant à des événements plus fréquents et pour lesquels on pourra fournir une estimation plus robuste des changements prévus. Ici, on s'intéresse au nombre de jours où la température est supérieure à 35 °C en été (inférieure à 0 °C en hiver), et où les précipitations excèdent 10 mm en moyenne sur la période 1950-1999 (P1) ainsi que les changements prévus en 2050-2099 (P3).

Sans surprise, on constate que le réchauffement global s'accompagne d'une raréfaction des jours de gel aux hautes latitudes, et d'une augmentation quasi-générale de la fréquence des jours de canicule. Seule une ceinture tropicale, allant de l'Afrique de l'Ouest à l'Inde, échappe à la règle en raison d'une intensification des pluies de mousson qui limite le réchauffement en surface dans ces régions. La réponse des fortes précipitations est beaucoup moins homogène et varie selon la saison. En Europe de l'Ouest, on peut s'attendre à une augmentation du nombre de jours en hiver, mais pas en été. Au-delà de leur fréquence, l'intensité de ces événements pourra également se trouver modifiée. Dans nos scénarios, elle augmente le plus souvent en ce qui concerne les canicules et les fortes pluies. En revanche, les épisodes de gel seront de moins en moins sévères.

L'évolution du risque de tempêtes avec le changement du climat

La circulation atmosphérique peut être caractérisée par certains états nommés régimes de temps qui possèdent des propriétés dynamiques importantes comme la récurrence, la persistance et la stationnarité. Des travaux précédents du LMD identifient quatre régimes sur l'Atlantique. Le régime zonal (courant d'ouest marqué) est associé au plus grand nombre et aux plus fortes tempêtes sur l'Europe du Nord. Le régime zonal sud forme le décor dans lequel évoluent les tempêtes venant par le Golfe de



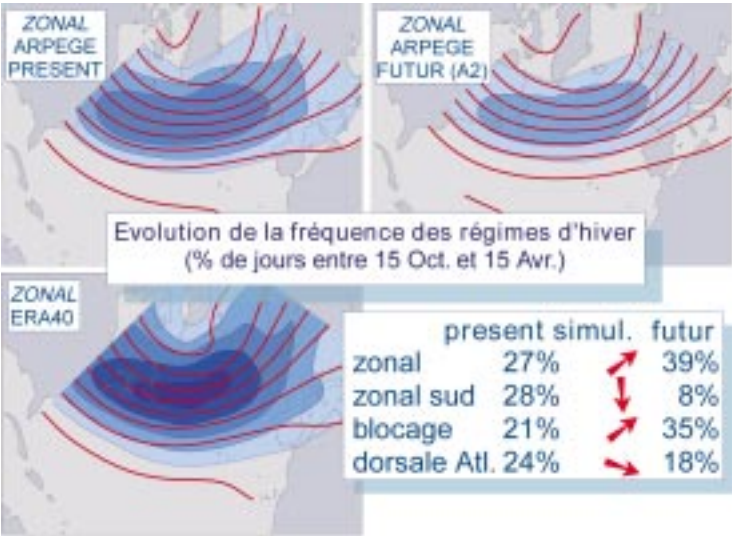
Gascogne. En revanche, le régime de blocage et celui de dorsale Atlantique sont pauvres en dépressions touchant la France.

Ainsi, si les tempêtes restent difficiles à simuler exactement avec un modèle de climat, les régimes en constituent un indicateur de grande échelle, à la portée des modèles. On a utilisé les simulations du modèle Arpège-Climat (climat présent et climat futur sous le scénario A2) pour déterminer l'évolution de la fréquence de ces régimes de temps. L'hypothèse de travail est que la variabilité climatique se traduirait par une modification des fréquences d'occurrence de certains régimes de circulation préexistants et pas par l'apparition d'un nouvel état.

Pour l'identification des régimes simulés, on a mis au point une méthode de projection sur les régimes calculés avec la ré-analyse Era40. Alors que les simulations ne reproduisent pas bien la variabilité associée aux dépressions, la méthode d'identification des régimes permet d'en prévoir l'évolution résumée

Nombre moyen de jours pour lesquels : a,b) la température maximale de surface est supérieure à 35 °C en juillet, août, septembre ; c,d) les précipitations sont supérieures à 10 mm en juillet, août, septembre ; e,f) la température minimale de surface est inférieure à 0 °C en janvier, février, mars ; g,h) les précipitations sont supérieures à 10 mm en janvier, février, mars. A gauche, climatologie simulée sur la période de référence 1950-1999. A droite, changements prévus entre 2050-2099 et la période de référence. La simulation correspond à un scénario de type B2, avec des hypothèses relativement basses sur les quantités de gaz à effet de serre émis au cours du XXI^e siècle.

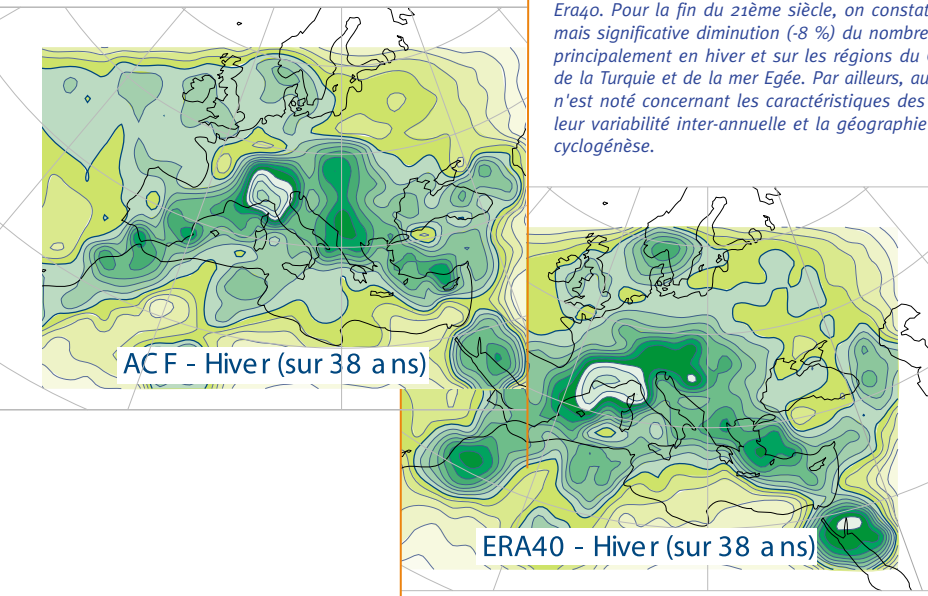
(tableau). On en retient une augmentation modérée du risque de tempêtes touchant la moitié nord de la France, mais surtout une très forte diminution du régime zonal sud et donc de ses tempêtes de sud-ouest et des dépressions plus modestes, importante ressource en eau de l'Espagne et du sud de la France.



Fréquence des régimes de temps sur l'Atlantique Nord en pourcentage de jours de saison hivernale dans une simulation du climat présent et une simulation du climat futur par le modèle Arpège-Climat dans le scénario A2. Les cartes illustrent le cas particulier du régime zonal, dont la fréquence augmente. Les isolignes représentent le géopotentiel moyen à 500 hPa, intervalle de 100 mgp entre 5000 et 6000 mgp. Les surfaces donnent la variance des perturbations de courtes périodes, donc les dépressions vues par les simulations (intervalle 10 mgp entre 30 et 80 mgp) : on note une perte de variance dans les simulations qui justifie l'approche indirecte adoptée.

Cyclogénèse en Méditerranée : validation d'Arpège-Climat et scénario régional de changement climatique

Les dépressions méditerranéennes sont connues comme étant des systèmes d'échelle sous-synoptique. Leur cyclogénèse et leur trajectoire sont de plus largement influencées par l'orographie complexe entourant la mer Méditerranée, ainsi que les contrastes terre-mer et les flux air-mer.



Une étude de ces systèmes a été entreprise avec le modèle Arpège-Climat à maille variable (résolution de 50 km sur le bassin méditerranéen). Deux simulations ont été réalisées : une représentant le climat présent (1960-1998) et une le climat de la fin du XXI^e siècle (2070-2099) sous l'hypothèse du scénario A2 du Giec.

Afin de valider Arpège-Climat, on a comparé la simulation du climat présent avec la période équivalente de la réanalyse Era40. Le nombre de trajectoires, leur variabilité interannuelle et les principales caractéristiques des dépressions méditerranéennes (durée, vitesse, distance parcourue) sont bien représentées. De plus, Arpège-Climat est capable de simuler correctement le positionnement et la variabilité saisonnière des différentes zones de cyclogénèse (figure).

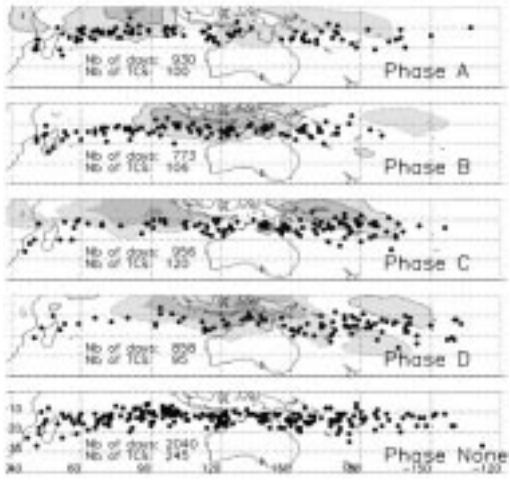
Pour la fin du XXI^e siècle, une diminution (-8 %) du nombre de cyclogénèse est obtenue. Elle a lieu principalement en hiver et sur les régions du Golfe de Gênes, de la Turquie et de la mer Egée. A contrario, on observe une augmentation en juillet et août.

Parallèlement, on note également une forte réponse sur les précipitations associées aux dépressions, en fonction de la saison. En été, pour la cyclogénèse du Golfe de Gênes, la quantité de pluie associée à un cyclone donné diminue de 30 % entre le climat présent et la fin du XXI^e siècle. En automne et au printemps (saisons de forts événements pluvieux), la situation est opposée et on observe une augmentation des précipitations associées aux cyclones nés dans cette même région (respectivement, +17 et +23 %).

Densité de cyclogénèse en hiver sur le bassin méditerranéen (moyenne sur la période 1960-1998), à gauche, pour la simulation du modèle Arpège-Climat (ACF) et, à droite, pour la réanalyse Era40. Pour la fin du 21^{ème} siècle, on constate une faible mais significative diminution (-8 %) du nombre de cyclogénèse principalement en hiver et sur les régions du Golfe de Gênes, de la Turquie et de la mer Egée. Par ailleurs, aucun changement n'est noté concernant les caractéristiques des trajectoires, leur variabilité inter-annuelle et la géographie des zones de cyclogénèse.

Prévision statistique de l'activité cyclonique hebdomadaire dans l'hémisphère sud

L'oscillation de Madden-Julian (MJO) est le principal mode connu de variabilité de l'atmosphère tropicale à l'échelle intra-saisonnière. La MJO influence, entre autres, l'activité cyclonique. Par ailleurs, l'état de la MJO est prévisible jusqu'à environ vingt jours d'échéance.



Un schéma statistique, utilisant la régression logistique, a été développé afin de prévoir en temps réel la probabilité qu'au moins un cyclone se forme ou se produise dans les sept jours à venir dans une région donnée de l'hémisphère sud. L'hémisphère sud a été divisé en quatre zones : deux sur l'océan Indien et deux sur le Pacifique.

L'hypothèse sur laquelle se fonde le modèle est que l'activité cyclonique est influencée par certains paramètres de grande échelle qui ont une certaine prévisibilité ou une certaine mémoire. De tels paramètres de grande échelle incluent la MJO, d'ENSO (El Niño-Southern Oscillation), de la position dans le cycle saisonnier et de l'oscillation quasi-biennale (QBO), et peut-être d'autres. Les effets de la MJO sur l'activité cyclonique sont bien pris en compte par un indice temps-réel de la MJO. La variabilité inter-annuelle associée aux anomalies de températures de surface de la mer permet une bonne prise en compte de l'Enso et de la variabilité de l'océan Indien. Néanmoins, l'utilisation d'indices de QBO n'a pas montré de véritable apport au modèle.

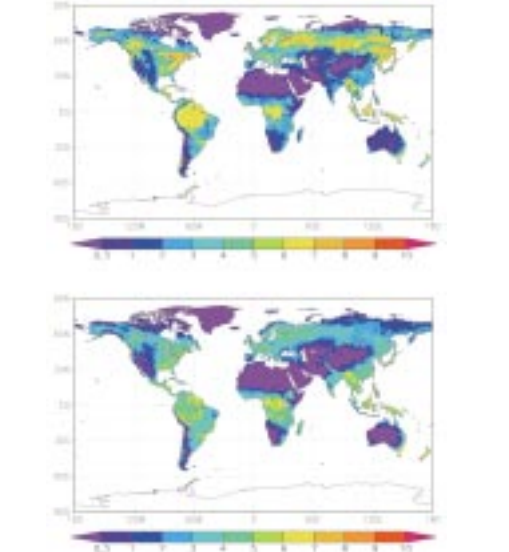
Les performances du modèle ont été évaluées dans les conditions du temps réel par validation strictement croisée. La prévision est non-biaisée. La prise en compte de la MJO améliore significativement la prévision aux deux premières semaines d'échéance.

Modélisation interactive de la végétation à l'échelle globale

L'étude des changements climatiques d'origine anthropique nécessite d'inclure des processus biogéochimiques dans les modèles de climat, afin de représenter les interactions entre l'atmosphère et le cycle du carbone. Dans ce cadre, le modèle de surface continentale Isba-A-gs (Interactions entre le Sol, la Biosphère et l'Atmosphère), a été adapté à l'échelle globale. Ce modèle permet de simuler la surface foliaire (LAI, ou Leaf Area Index) et la conductance du couvert végétal, deux paramètres essentiels qui contrôlent les échanges d'énergie et de matière entre la surface continentale et l'atmosphère.

Une méta-analyse de données publiées dans la littérature et une étude de sensibilité ont permis de déterminer les paramètres pour chacun des types de végétation représentés par le modèle. Une simulation globale en mode forcé de dix ans a été réalisée en utilisant la base de données de paramètres de surface Ecoclimap. La comparaison des LAI simulés à des données satellitaires montre que le modèle est capable de reproduire les principales caractéristiques spatiales et temporelles observées de la végétation, ainsi que la variabilité interannuelle de celle-ci, sur la plupart des régions du globe.

La paramétrisation de la respiration hétérotrophe du sol sera prochainement ajoutée au modèle Isba-A-gs, afin de simuler le cycle du carbone terrestre complet. Ce nouveau modèle sera utilisé par les chercheurs de Météo-France pour simuler les flux de carbone naturels dans le cadre du projet Geoland. Il sera aussi couplé au modèle de circulation générale Arpège-Climat pour étudier les interactions entre la végétation et le climat.



Lieu de genèse des cyclones en saison cyclonique (du 1^{er} novembre au 30 avril, de 1969/1970 à 1998/1999) et OLR (Outgoing Longwave Radiation) moyenne (données de 1974 à 1999) pour chaque phase de l'oscillation de Madden-Julian (MJO). Contours en pointillés pour les anomalies positives (convection réduite) et en trait plein pour les anomalies négatives (convection accrue). Les tons de gris marquent les anomalies supérieures à 7.5, 15, 22.5, 30 W/m² et inférieures à -7.5, -15, -22.5, -30 W/m².

Indice de végétation (LAI) maximum annuel (moyenne sur la période 1986-1995). Haut : LAI déterminés à partir des données satellitaires ISLSCP2 ; bas : LAI simulés par le modèle Isba-A-gs.

Réponse des ouragans au réchauffement anthropique

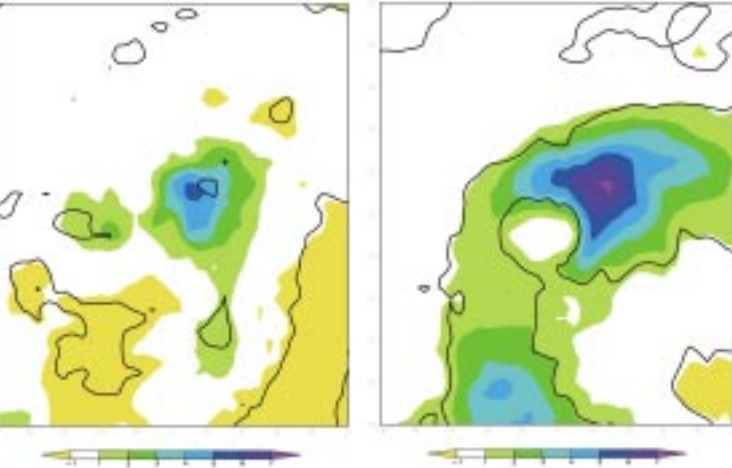
Les ouragans sont des systèmes cycloniques intenses qui se développent habituellement sur l’océan Atlantique tropical entre les mois de juillet et octobre. Parmi les facteurs influençant ces phénomènes figurent les températures de surface de la mer qui peuvent être considérées comme la trace du contenu thermique de l’océan, un des moteurs des ouragans, par la production de chaleur latente qu’il autorise.

Dans le cadre du projet Imfref, le CNRM s’est intéressé à l’impact du réchauffement anthropique sur l’activité des ouragans. À partir de simulations uniformes à très fine résolution spatiale (50 km) et à résolution variable, avec pôle d’intérêt sur l’Atlantique (permettant une représentation fine des phénomènes au pôle au détriment des antipodes), on a calculé les trajectoires des ouragans simulés par le modèle, à l’aide d’un logiciel de suivi de trajectoires mis au point à Météo-France en 2000 et adapté à la problématique des ouragans.

Avec les mêmes réglages du logiciel de suivi de trajectoires, les simulations à résolution uniforme et variable donnent des représentations réalistes des trajectoires pour le climat présent. Par contre, la réponse au réchauffement anthropique du nombre de trajectoires est opposée entre les deux simulations. Ces différences peuvent provenir de leur configuration (elles ne proviennent pas du même scénario d’augmentation du CO₂) ou des fluctuations d’échantillonnage, du fait de la rareté des événements étudiés. Les deux simulations s’accordent, néanmoins, sur une augmentation des précipitations associées à l’ouragan (figure) sans changement majeur des paramètres dynamiques.

Le travail futur s’attachera à préciser les facteurs responsables de la divergence des deux simulations.

Anomalie de précipitation autour du centre du cyclone, composée à partir de toutes les occurrences obtenues par le logiciel de suivi. À gauche, expérience uniforme (10 ans) ; à droite, expérience à résolution variable (30 ans). L’abscisse (respectivement l’ordonnée) représente les longitudes (respectivement les latitudes) réparties autour du centre du cyclone. Les unités sont en mm d’eau/jour.



Réalisation de scénarios climatiques pour le GIEC

Le CNRM a entrepris la réalisation des nouveaux scénarios climatiques couplés qui serviront de base scientifique au quatrième rapport d’évaluation du GIEC en 2007.

Ces simulations ont été réalisées avec la dernière version du système couplé global CNRM-CM3. Une première expérience de contrôle de 500 ans, avec les conditions préindustrielles correspondant à l’année 1860, est en cours pour établir l’équilibre naturel du système climatique. À partir d’un état initial extrait de cette expérience, une simulation historique a été réalisée sur la période 1860-2000 en utilisant l’évolution observée de la concentration des gaz à effet de serre et des aérosols. Cette simulation servira à valider l’évolution climatique simulée par rapport aux observations. Elle a été poursuivie jusqu’en 2100 en gardant constantes les concentrations de 2000 (hypothèse de stabilisation). L’état obtenu en l’an 2000 dans cette simulation a servi de point de départ pour réaliser les trois scénarios climatiques prioritaires du GIEC (A2, A1B et B1) sur le XXI^e siècle. Les scénarios A1B et B1 doivent être poursuivis jusqu’en 2300 avec leurs concentrations respectives de l’année 2100 pour étudier leur stabilisation.

Ces simulations, dont les résultats vont entrer dans la base de données du GIEC, seront analysées conjointement avec celles des autres modèles participant à l’exercice. Elles seront également utilisées pour le projet Européen Ensembles et valorisées sur le plan national dans le cadre du projet Escrime, par une analyse coordonnée avec les expériences similaires menées à l’IPSL.

Évolution des extrêmes au XX^e siècle à partir des Séries Quotidiennes de Référence

À l’occasion du projet pluridisciplinaire Imfref du programme GICC soutenu par le Ministère de l’Écologie et du Développement Durable, la Direction de la Climatologie a développé une méthode de constitution de séries instrumentales quotidiennes de référence pour l’étude des changements climatiques. Ces séries permettent la calibration et la validation des modèles de climat ainsi que l’évaluation de l’évolution des extrêmes au cours des dernières décennies.

Différents indices permettent de mesurer l’évolution des extrêmes. Parmi eux, les indices relatifs présentent le nombre de dépassements d’un percentile

quotidien défini pendant une période de référence (ici 1971-2000). L’indice Tn10p (10 % des températures minimales les plus froides) définit les nuits « relativement froides », relativement devant être compris par rapport à la saison et le climat local. L’indice Tn90p définit les nuits « relativement chaudes ». Ces définitions précises d’indices facilitent les comparaisons d’un pays à l’autre.

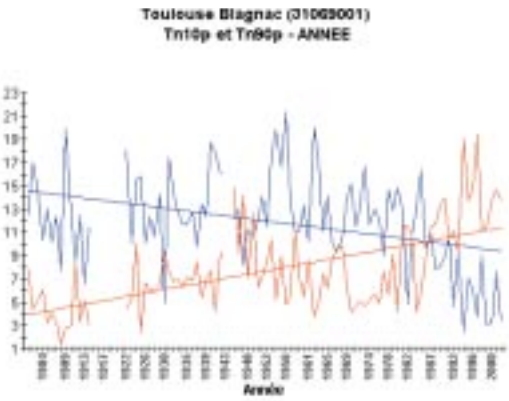
On note que sur la série de Toulouse, Tn10p diminue et Tn90p augmente : c’est une conséquence du réchauffement à Toulouse des températures nocturnes au cours du XX^e siècle (réchauffement de l’ordre 0.13 °C/décennie). Les courbes ne présentent pas de symétrie systématique : cela illustre l’intérêt de travailler sur d’autres paramètres que la moyenne (nombreuses nuits froides à la fin des années 50, peu de nuits chaudes au début des années 1970). Les deux courbes sur les dix dernières années s’éloignent de la courbe de tendance : cela traduit une accélération du réchauffement.

Prudence : un projet européen de régionalisation climatique

Le projet Prudence soutenu par la commission européenne, s’est achevé fin 2004 après trois ans de collaborations internationales et de recherches. Le but de ce projet était de produire des scénarios climatiques sur l’Europe à échelle 50 km pour la fin du XXI^e siècle.

Dix modèles régionaux, dont Arpège-Climat en résolution variable, trois modèles couplés océan-atmosphère globaux, et deux scénarios de concentration des gaz à effet de serre ont été utilisés. Une base de données centralisée au Danemark a permis d’évaluer les incer-

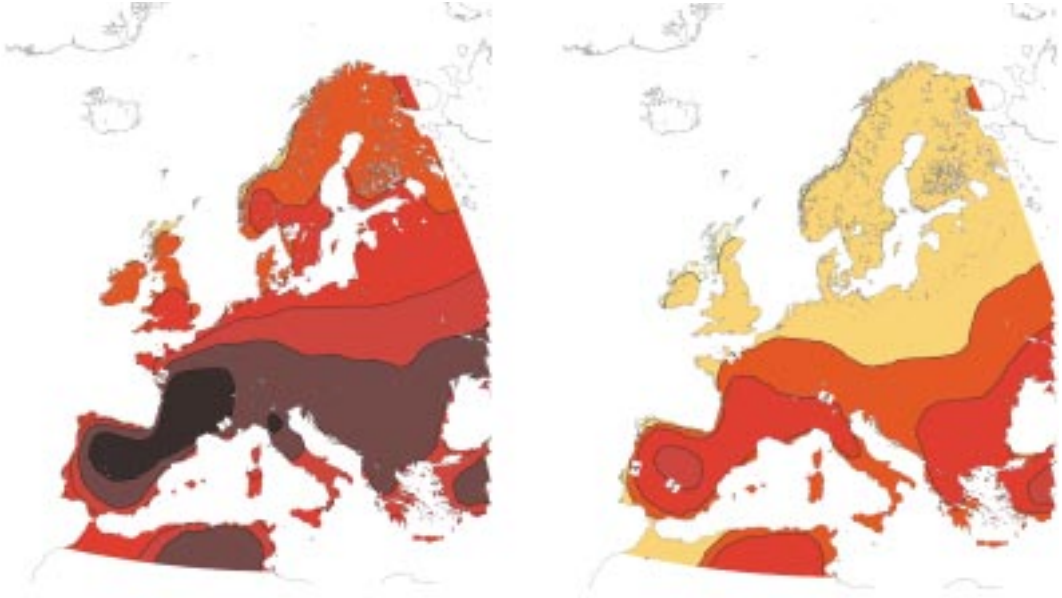
titudes liées aux différentes façons de calculer le changement climatique. Il ressort que la principale cause d’incertitude vient des modèles globaux utilisés pour le forçage et le calcul de l’évolution de l’océan.



Réponses minimale (a) et maximale (b) des simulations du projet Prudence (intervalle à 99 %) en ce qui concerne la température en été ; intervalle des isothermes 1K.

À partir de là, on a pu construire un intervalle de confiance (figure) pour chaque variable, qui encadre la réponse moyenne de l’ensemble des simulations disponibles. Les chercheurs du CNRM ont pu montrer que l’utilisation de modèles à aire limitée ou l’utilisation de modèles globaux à haute résolution conduisait à des réponses climatiques similaires. Pourtant les divers modèles ont une représentation du climat présent variable d’un modèle à l’autre.

Le deuxième volet de Prudence était l’évaluation des impacts par les participants spécialisés (agriculture, phénomènes extrêmes). Les phénomènes de sécheresse au Sud de l’Europe et de risque de tempête et d’inondation au Nord ont fait l’objet d’une attention particulière. Les chercheurs de Météo-France se sont aussi intéressés aux impacts sur la mer Méditerranée et sur les dépressions qui la traversent.



Réponses minimale (a) et maximale (b) des simulations du projet Prudence (intervalle à 99 %) en ce qui concerne la température en été ; intervalle des isothermes 1K.



Altocumulus

Études environnementales liées à l'atmosphère

L'année 2004 fut marquée par un très gros investissement en matière de météorologie urbaine avec la campagne Capitoul. Parallèlement, de nombreux développements ont été menés comme la mise au point de prévision d'ensemble de débits de rivière, d'une climatologie fine de l'enneigement alpin, ou les nouvelles méthodes d'assimilation dans le modèle global Mocage de chimie atmosphérique.

Hydrométéorologie

Développement d'un opérateur d'observation/simulateur radar pour les modèles de mésoéchelle

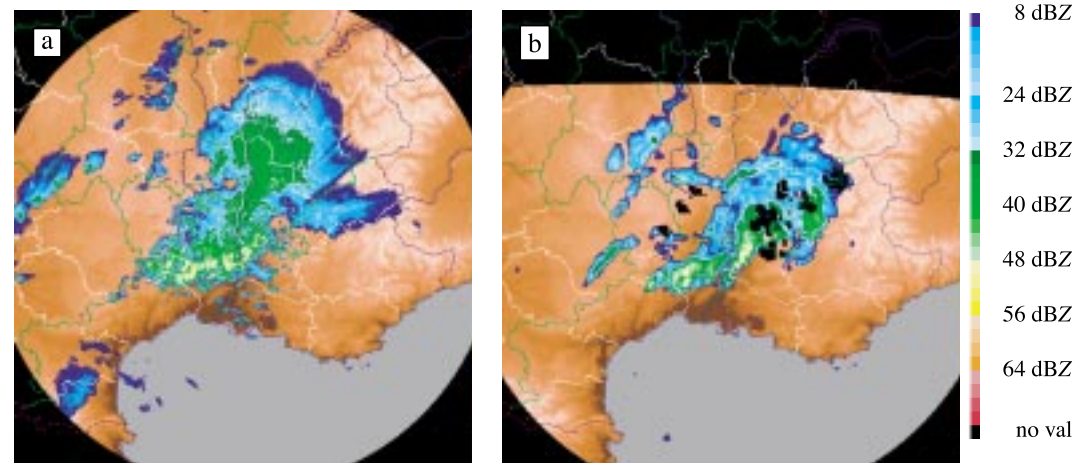
Dans le cadre du développement du prochain modèle de prévision numérique à haute résolution, Arome, il est envisagé d'assimiler des données radar afin d'améliorer entre autres la prévision des événements fortement précipitants. Le système d'assimilation variationnelle envisagé pour Arome nécessite le développement d'un opérateur d'observation, c'est-à-dire d'un logiciel capable de simuler les observations radar à partir des variables thermodynamiques et microphysiques du modèle. Cet outil sera également utile pour le contrôle des sorties du modèle en permettant une comparaison directe aux mesures de réflectivité radar.

Afin de définir cet opérateur d'observation, les chercheurs du CNRM ont développé un simulateur radar au sein du modèle de recherche Méso-NH qui possède un certain nombre de caractéristiques retenues pour le modèle Arome (système d'équations non-hydrostatique, même schéma microphysique). Ce simulateur a été conçu sous forme de modules relativement indépendants et représentant chacun un phénomène physique lié à la mesure de la réflectivité (forme de l'émission, géométrie du faisceau, modèles de rétro-diffusion, atténuation...). Pour chacun des modules, plusieurs modélisations sont proposées. Par exemple, pour la diffusion par les hydrométéores, quatre modèles ont été implantés : modèles de Rayleigh, de Rayleigh-Gans, de Mie ou encore méthode dite de la matrice T. En étudiant la sensibilité de chacun de ces modules indépendamment, on a pu déterminer une combinaison de méthodes définissant l'opérateur d'observation le plus approprié pour Arome, en recherchant un compromis optimal entre la nécessité de reproduire finement les observations et de satisfaire aux exigences techniques (temps de calcul, architecture de l'assimilation de données...).

Influence de la Méditerranée sur les prévisions de pluies intenses

Le sud-est de la France est soumis en automne à des épisodes de pluies intenses engendrant d'importants

Réflectivités observées (a) et simulées (b) pour le radar de Bollène à une élévation de 1,2° le 8 septembre 2002 à 21 heures UTC. La simulation est obtenue par utilisation du simulateur radar appliqué aux résultats de Méso-NH. Les valeurs indéterminées sont représentées en noir : en haut de la figure, il s'agit de pixels radar en dehors du domaine de simulation de Méso-NH, les pixels près du centre correspondent aux endroits où le faisceau radar intercepte le relief du modèle.



cumuls de pluie et causant parfois de graves inondations. L'influence de la mer Méditerranée sur l'occurrence et l'intensité de ces événements a été examinée à l'aide de simulations à haute résolution Méso-NH sur trois situations :

- les crues éclair dans l'Aude des 12 et 13 novembre 1999,
- les inondations du Gard des 8 et 9 septembre 2002,
- les pluies diluviennes du 3 décembre 2003.

Des champs de température de surface de la mer (SST) ayant différentes origines ont ainsi été prescrits à la surface : celui issu de l'analyse Arpège et un autre à plus haute définition issu du satellite AVHRR. D'autres tests plus idéalisés ont été réalisés en augmentant/diminuant globalement de 1,5 °C à 3 °C le champ de SST Arpège.

Les résultats montrent une sensibilité de la prévision des précipitations à la valeur moyenne de la SST sur le bassin Méditerranéen occidental, même pour des prévisions en deçà de 24 heures d'échéance. Plus la valeur moyenne de la SST est élevée, plus la convection est intensifiée et les cumuls de pluie augmentés, et inversement. Par contre les anomalies de fine échelle de SST sur le bassin Méditerranéen semblent peu influencer l'évolution de la convection prévue, c'est donc avant tout la valeur moyenne sur le bassin qui joue un rôle dans l'évolution de la convection.

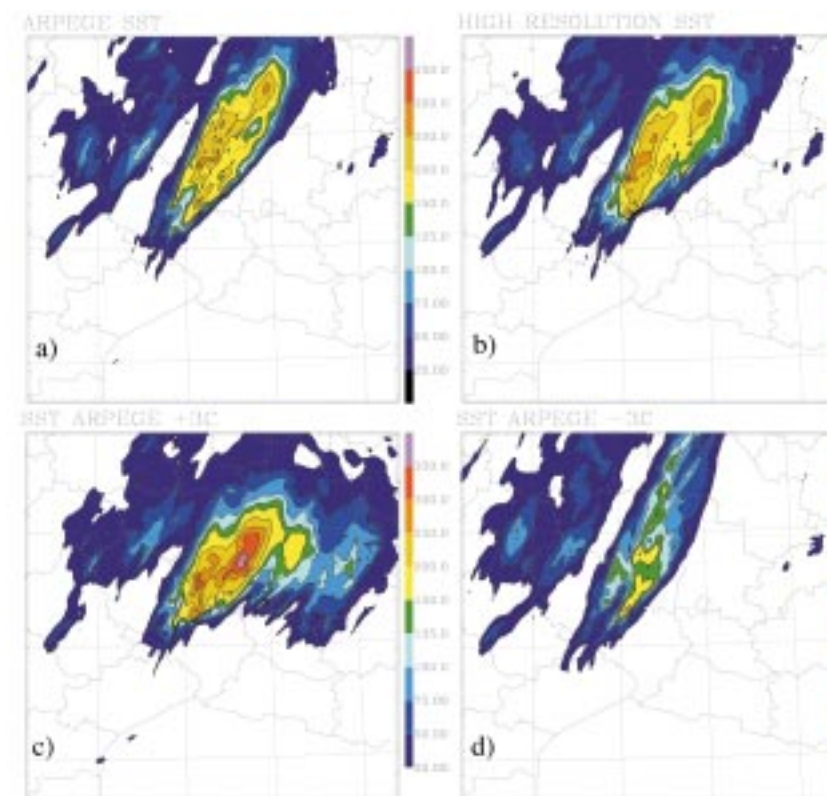


Figure 1 : Désagrégation spatiale des précipitations (cumul sur 10 jours, prévision du 17 octobre 2004, en mm)
a) Champs originaux sur les mailles CEPMMT.
b) Désagrégation sur les zones Symposium.
c) Résultat final, après la prise en compte des gradients d'altitude.

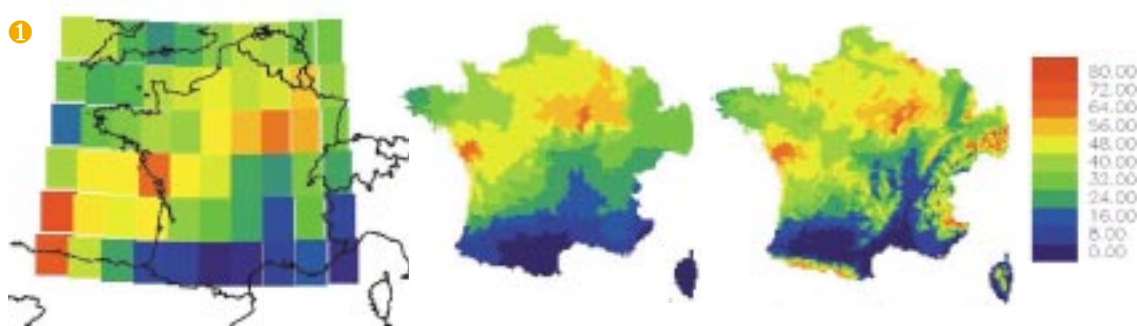
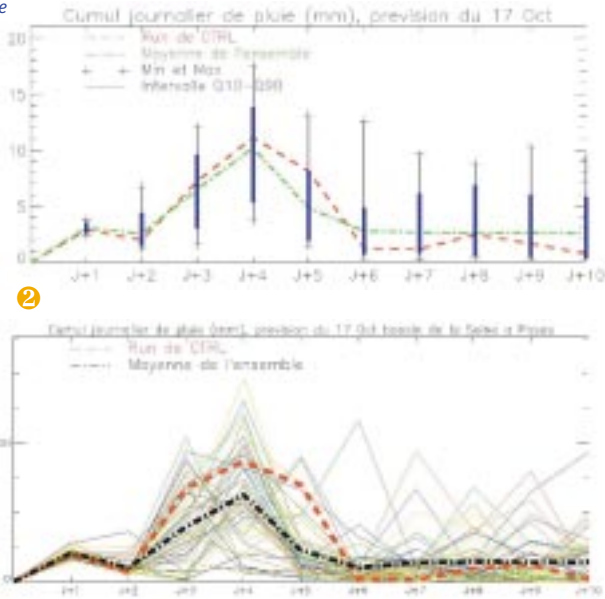


Figure 2 : Cumul journalier de pluie prévu à 10 jours, prévision du 17 octobre 2004, en mm, après désagrégation spatiale
a) En moyenne sur la France, valeurs moyenne de l'ensemble, maximale, minimale, intervalle Q10-Q90 et run non perturbé
b) En moyenne sur le bassin de la Seine, pour les 50 ensembles et le run de contrôle.



SIM-France : test sur la répartition spatio-temporelle des précipitations et de la végétation

Figure 1 : Evolution de l'indice d'humidité du sol simulé par Isba. La zone hachurée correspond à la période où les précipitations J98b ont été utilisées à la place des analyses Safran. L'impact sur le contenu en eau se fait sentir plus de deux mois après.

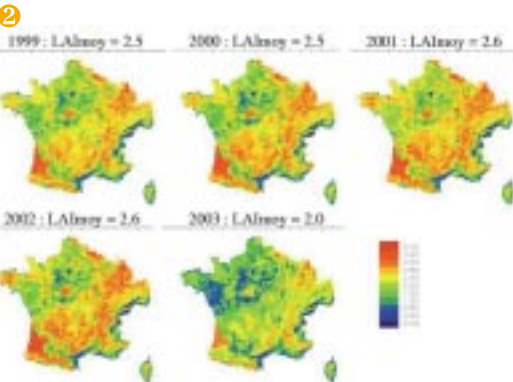
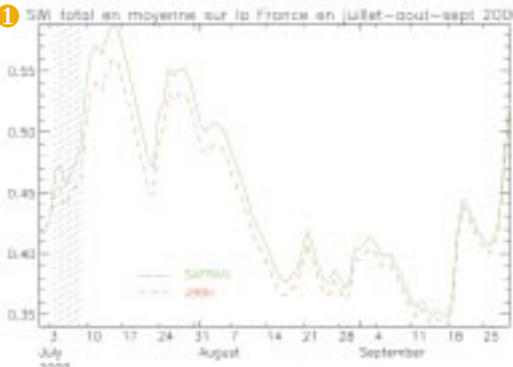
Deux composantes importantes du système hydro-météorologique Safran-Isba-Modcou, SIM, ont été testés en 2004 : les analyses de précipitations et l'évolution inter-annuelle de la végétation.

La méthode J98b, mise au point au CNRM, permet d'obtenir en temps quasi-réel une estimation des distributions spatiale et temporelle des précipitations, en combinant des données radar et des stations automatiques. Ces précipitations peuvent être beaucoup plus précises que celles obtenues par Safran, qui ne prend en compte que des données journalières. L'utilisation des précipitations J98b sur deux périodes de huit jours a montré un impact significatif et durable sur le contenu en eau du sol (figure 1).

Figure 2 : Evolution inter-annuelle de l'indice foliaire pour la deuxième décade d'août. L'impact de la sécheresse est nettement visible en août 2003, avec une réduction très marquée de l'indice foliaire sur une grande partie de la France.

Cependant, étant donné la courte durée des tests, les impacts sur les débits sont relativement faibles. La méthode J98b s'avère néanmoins très pertinente, et pourrait remplacer avantageusement les analyses de pluie Safran. Mais, pour cela, deux étapes sont nécessaires : valider les analyses sur les zones montagneuses où les radars sont inopérants, et corriger les biais liés à l'utilisation de stations automatiques de mesures de pluie.

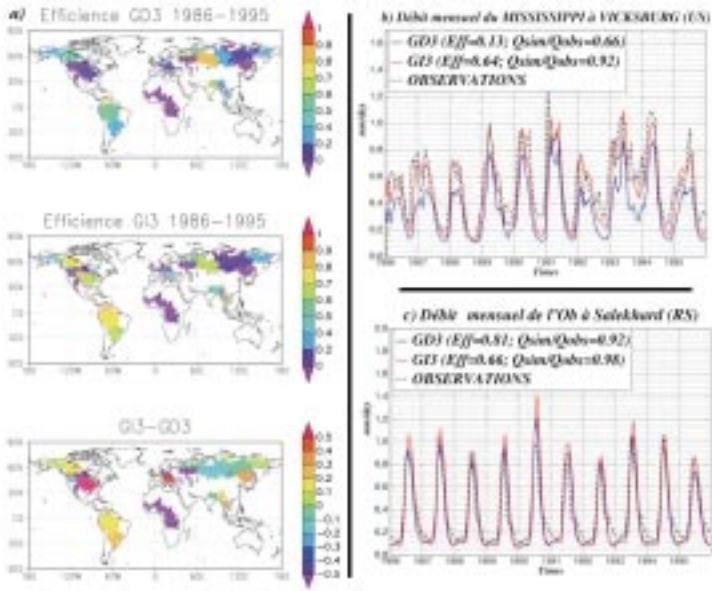
L'évolution décennale de la végétation a été obtenue grâce à l'analyse des données de l'instrument Spot-Végétation sur la période 1999-2003. Les variations inter-annuelles sont assez marquées, avec notamment une végétation très peu développée en hiver 2002, maximale en mai 2003, et très faible en août 2003 (figure 2). Cependant, l'impact sur les simulations a été négligeable, du fait de la compensation entre les composantes de l'évaporation associées à du sol nu ou de la végétation. Cette étude se poursuivra néanmoins avec la nouvelle base de données Ecoclimap-2.



Amélioration de la modélisation hydrologique continentale à grande échelle

Il est aujourd'hui crucial de pouvoir simuler les débits des grands fleuves, afin de valider le bilan hydrique des surfaces continentales dans les modèles de climat, ainsi que de prévoir l'évolution de ces débits en réponse à une anomalie climatique donnée (prévisions saisonnières et/ou changement climatique).

La modélisation hydrologique globale du CNRM repose sur le modèle de surface Isba et le modèle de routage Trip qui permet de convertir le ruissellement total produit par Isba en débits. Le modèle Isba est couplé au modèle atmosphérique Arpège-Climat et calcule le bilan hydrique sur des mailles de 50 à 300 km de côté. À cette résolution, la qualité des simulations est très dépendante de la prise en compte de divers processus se produisant à des échelles spatiales beaucoup plus fines (répartition de la topographie, de la végétation, des précipitations et des propriétés d'infiltration des sols).



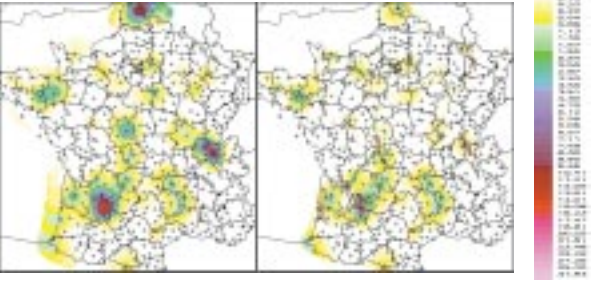
La comparaison des débits simulés aux débits observés entre l'ancienne version de Isba et la nouvelle version incluant ces processus sous-maille montre une amélioration sensible des résultats sur de nombreux bassins (figures a et b). Néanmoins, certains fleuves restent encore mal simulés du fait de la non prise en compte des barrages ou de vastes zones d'inondation. Aux hautes latitudes (figure c), les problèmes sont plutôt liés à une paramétrisation trop simpliste de l'impact du gel sur l'infiltration et/ou à l'estimation des profondeurs de sol et des vitesses d'écoulement.

L'étape suivante est donc de proposer des améliorations du modèle Trip pour rendre compte de vitesses d'écoulement plus réalistes, mais aussi de l'apparition d'inondations saisonnières qui influencent la dynamique des débits de différents fleuves tels que l'Amazone, l'Ob ou le Niger.

Lame d'eau horaire à partir des données pluviométriques et radar

Les besoins d'une « analyse spatialisée » des précipitations, pour différentes durées de cumuls, sont multiples : du suivi de la situation météorologique en temps réel aux applications hydrologiques. Réseaux de pluviomètres et radars météorologiques sont les deux sources principales d'observations. Bien que beaucoup étudiée, l'utilisation conjointe de ces données dans un contexte opérationnel temps réel n'a pas encore aboutie.

Une action interne à Météo-France, dénommée J98b, a associé le CNRM et la DSO pour développer et valider une méthode permettant la production d'une lame d'eau « temps réel » à partir des réseaux opérationnels de Météo-France Radome (résolution ~ 33 km) et Aramis (14 radars en 2000). Ces principales spécifications sont « cumul horaire » et « couverture complète » sur la France quelle que soit la distance au radar.



La méthode originale mise au point, cherche à tirer le meilleur parti de chaque type de données. Elle montre un net avantage par rapport aux méthodes « mono-source » disponibles actuellement avec lesquelles elle a été quantitativement comparée sur les 53 journées les plus pluvieuses de l'année 2000. Comme on pouvait s'y attendre, l'amélioration est particulièrement importante par rapport à la lame d'eau « radar seul » dans les situations « stratiformes » et par rapport aux « interpolations » des mesures pluviométriques seules dans les situations « convectives » (figure). À la suite de cette action, une mise en œuvre opérationnelle par la DSO a été retenue.

(a) Efficience des simulations de l'ancienne version du modèle Isba et de la nouvelle version incluant ces processus sous-maille (répartition de la topographie, de la végétation, des précipitations et des propriétés d'infiltration des sols) aux stations les plus en aval des grands bassins fluviaux mondiaux. Plus l'efficience est proche de 1, meilleure est la dynamique des débits simulés. Les débits mensuels du Mississippi (b) et de l'Ob (c) sur la période 1986 à 1995 sont aussi montrés. Ici, eff représente l'efficience et Qsim/Qobs le rapport des débits simulés aux débits observés, la quantité des débits simulés étant bonne lorsque ce dernier est proche de 1.

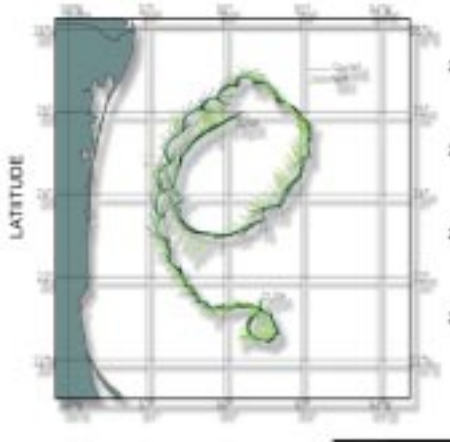
Dans la situation convective du 7 mai 200x à 17 h, l'estimation automatique de la lame d'eau horaire (en mm) par la méthode « mixte » (à gauche) est nettement améliorée par rapport au « krigage » (à droite) utilisant uniquement les cumuls horaires des pluviomètres (localisés par des croix).

Océanographie

Océanographie opérationnelle Coriolis

Météo-France participe au programme inter-organismes Coriolis. Dans le cadre de la mise à disposition des données océanographiques, le Centre de Météorologie Marine fournit des mesures de courant de surface de la mer à partir des dérives des bouées lagrangiennes. La chaîne de traitement est alimentée par les données de position récoltées sur le Système mondial de transmission. Le courant de surface est issu de la dérive de tous les flotteurs lagrangiens (bouées munies d’une ancre flottante) identifiés au niveau de l’océan mondial. Une fois par semaine, les données obtenues sont transmises au centre Coriolis de Brest de manière automatique avec des mesures de vent « co-localisées » issues du CEPMMT.

Évolution du nombre de bouées dérivantes d'Egos sur l'Atlantique Nord de 1996 à 2004.



Trajectoire d'une bouée en avril 2004 avec vent/courant et données altimétriques au large du Mexique.

Les bouées de mesure

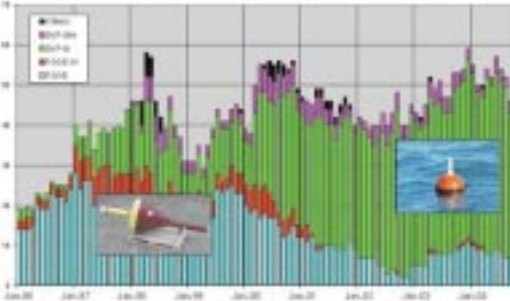
Météo-France déploie régulièrement des bouées en mer dans le cadre du Data Buoy Cooperation Panel (DBCP) et contribue aux travaux de deux groupes d’action : le groupe européen pour les stations océaniques Egos et le programme international de bouées dans l’Océan Indien, IBPIO.

Les bouées dérivantes mesurent la pression atmosphérique, la température de surface de la mer, certaines le vent. Le système Argos est utilisé pour leur localisation et la transmission de leurs données. Vingt-six bouées ont été mises à l’eau dans l’Atlantique Nord en 2004, et quinze bouées ont été déployées dans l’Océan Indien en collaboration avec des océanographes américains.

En plus des deux stations océaniques tenues sur le Proche Atlantique en coopération avec le Met Office du Royaume-Uni, deux bouées sont ancrées au large

des Antilles sur des fonds de 5 500 mètres et deux en Méditerranée sur des fonds de 2 700 mètres. Il s’agit de structures flottantes d’un poids de 3,7 tonnes, 2,8 mètres de diamètre et 6 mètres de haut. Ces bouées transmettent leurs données par Meteosat.

Les deux bouées, Brittany et Gascogne, du Proche Atlantique, la bouée Côte d’Azur et la bouée Guadeloupe ont été remplacées en cours d’année. Les capteurs de la bouée ancrée du Golfe du Lion ont été changés lors d’une mission de maintenance.



E-Surfmar : un programme d’observation de la surface de la mer dans l’Atlantique Nord et les mers limitrophes

E-Surfmar est un programme optionnel du système d’observations en surface Eucos. En 2004, quinze services météorologiques européens sur les dix-neuf membres d’Eumetnet participent à ce programme dont l’objectif est de coordonner, d’optimiser et d’intégrer progressivement les activités d’observations de la surface de la mer dans le réseau opérationnel Eucos. Météo-France, en tant que membre d’Eumetnet, s’est vu confier la responsabilité du programme.



© Marine Nationale

E-Surfmar comprend les navires volontaires sélectionnés (VOS) des participants et les bouées actuellement coordonnées par le groupe européen des stations océaniques (Egos). Ces deux composantes comprennent chacune un groupe technique qui aide le responsable du programme.

Un des objectifs principaux d’Eucos est l’optimisation du système d’observation en surface pour améliorer la prévision numérique à courte échéance au niveau européen. Dans ce contexte, une proposition pour la réalisation d’un réseau *ad hoc* d’observation de la surface de la mer a été proposée par E-Surfmar afin de satisfaire aux demandes de l’OMM en matière de mesures satellitaires.

La mesure de salinité de surface de la mer par bouée dérivante

La connaissance de la salinité des océans et son évolution revêt une importance capitale dans l’étude des changements climatiques. Des développements sont en cours pour permettre de mesurer ce paramètre sur les bouées dérivantes. En 2004, deux de ces bouées ont été mises à bord du navire Borda qui en a réalisé les mouillages à la fin du mois de mars. Une bouée s’est éteinte peu après la mise à l’eau. La seconde a perdu son ancre flottante le 11 mai, rendant les données de salinité inexploitables. La bouée qui dérivait au large du Cap Finisterre, a été récupérée au début du mois de juillet par le navire, la Thalassa. Les modifications nécessaires ont été faites en cours d’année pour renforcer la fixation du capteur de salinité.

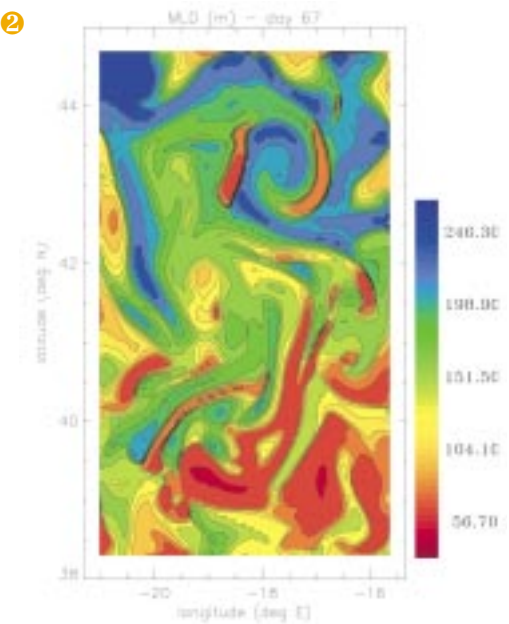
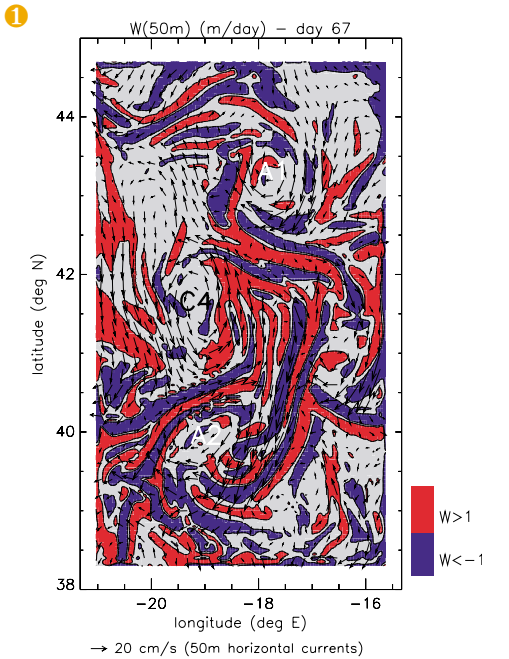
Rôle des flux et des couches océaniques superficielles sur la formation des masses d’eau : l’expérience Pomme

Trois ans après la fin de cette campagne, les résultats prennent forme et révèlent des aspects inattendus, notamment en ce qui concerne le rôle des petites échelles dans le processus de formation des masses d’eau.

La campagne Pomme, qui s’est déroulée de septembre 2000 à octobre 2001 entre les Açores et le Portugal, a fait l’objet d’une très forte implication du CNRM. Différentes équipes se sont ainsi mobilisées pour contribuer d’une part à la collecte de données *in situ* (mesure des flux à l’interface océan-atmosphère, lancement de radiosondages pendant les périodes d’observation intensive, mise à l’eau de bouées Marisonde et d’une

bouée ancrée), d’autre part aux activités de modélisation, via la mise en œuvre de modèles numériques. Les résultats majeurs indiquent que :

- les bilans de chaleur et d’eau douce obtenus sur l’ensemble de la zone expérimentale sont bien plus importants que ne l’indiquaient les climatologies et les modèles numériques opérationnels ;
- les flux correspondants ont permis d’intégrer des modèles numériques fournissant d’excellents résultats comparativement aux observations. Ces simulations montrent que les échanges entre couches de surface et océan profond se font par l’intermédiaire des fines échelles de temps et d’espace, dans des régions bien identifiées ;
- les vitesses verticales dans les couches superficielles de l’océan jouent un rôle fondamental



1) Courants verticaux et horizontaux simulés avec une version régionale du modèle OPA pendant la campagne Pomme. 2) Profondeurs des couches de mélanges simulées pendant la campagne Pomme.

dans la structure et l'évolution du champ de profondeur de la couche mélangée, notamment au cours de la restratification printanière.

Ces résultats, très novateurs, auront des conséquences importantes tant pour la connaissance des flux à l'interface océan-atmosphère que pour la modélisation de l'océan superficiel.

Apport de l'observation spatiale pour la prévision des états de mer

Les satellites sont les supports les mieux adaptés pour observer les vagues de vent à l'échelle du globe. Météo-France est très impliqué dans l'altimétrie spatiale dont il est également l'un des principaux clients opérationnels. Des prévisions des états de mer sont réalisées chaque jour à l'aide de modèles numériques assimilant les données altimétriques disponibles en temps réel, et aussitôt transmises aux marins, dans le cadre de la mission de sécurité des personnes et des biens, ou d'assistances spécifiques pour des opérations particulières.

Jason-1, successeur de Topex/Poseidon et Envisat successeur d'ERS-2 fournissent en temps réel des mesures de hauteur de vagues et de vitesse du vent tous les 7 km le long de leur trace au sol. Après avoir participé à la calibration et à la validation des données vent/vagues issues de ces satellites, Météo-France insère pour le CNES les données vent/vagues Jason sur le SMT depuis juillet 2003, les rendant ainsi disponibles en temps réel à la communauté internationale. Les adaptations nécessaires à l'assimilation de données issues de plusieurs satellites ont été réalisées et le système de prévision de l'état de la mer de Météo-France utilise de façon opérationnelle les données de Jason et se prépare à remplacer les données d'ERS-2 par celles d'Envisat. Par ailleurs, des études visant à évaluer l'apport de données spectrales comme celles délivrées par le SAR d'Envisat ou comme celles qui pourraient être mesurées à partir d'un radar à ouverture réelle (projet Swimsat) se poursuivent avec le support du CNES.



Graphe comparant la hauteur significative des vagues durant décembre 2002 près de Hawaïi pour : les observation in situ (données bouées), le modèle de vagues sans assimilation de données satellitales, le même modèle assimilant les données altimétriques de ERS, puis de ERS+JASON et enfin de ERS+JASON+GFO (Geosat Follow On, satellite de la Navy). On observe que les résultats du modèle s'améliorent nettement lorsque le nombre de satellites utilisés augmente, en mode analyse comme en mode prévision.

Mothy et la dérive d'objets

En 2004, Mothy a fêté ses dix ans d'emploi opérationnel. Ce Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures, qui associe un modèle d'océan et un module de dérive de polluant, peut non seulement être activé en cas de pollution marine, mais aussi pour calculer la dérive d'objets. Mothy est connu, car il a beaucoup servi – et sert encore trop souvent – pour les hydrocarbures et les polluants chimiques. Pourtant, en 2004, c'est le soutien aux opérations de recherche et sauvetage, et donc l'emploi moins connu de Mothy pour des calculs de dérives d'objet, qui a dominé l'activité des équipes de prévision marine.

29 % des événements – pour une moyenne s'élevant à un peu plus d'un cas réel par semaine – ayant donné lieu au lancement de Mothy en 2004 étaient liés à des pollutions marines. Les autres cas l'étaient pour des recherches d'objets : 23 % étaient liés à la recherche d'un homme à la mer ; 25 % à celles d'embarcations à la dérive ; 11 % pour des conteneurs ; 7 % pour des cétacés... Météo-France travaille en pareilles circonstances pour les Cross, le CEDRE ou les Préfectures Maritimes, chargées de l'Action de l'État en Mer. Les eaux métropolitaines ne sont pas les seules zones où surviennent les accidents : 13 % des demandes émanaient ainsi des Cross situés dans nos Dom-Tom.

Une réflexion est aujourd'hui engagée avec la DAMGM qui souhaite rénover ses outils et méthodes en matière de recherche et sauvetage. Pour le SAR (*Search And Rescue*), les opérationnels des Cross le diront, il ne suffit pas de disposer d'une prévision de dérive : il faut un plan d'attaque ou *SAR planning*. Comme cela a été fait pour la pollution marine en étroite collaboration avec le CEDRE, Météo-France va désormais travailler avec ses partenaires des Cross pour mieux intégrer les prévisions de dérive de Mothy et les conditions d'environnement météo-océanique aux outils de *SAR planning* de la DAMGM.

Environnement atmosphérique et météo urbaine

La recherche en météorologie urbaine : la campagne Capitoul

Les villes influencent l'atmosphère sus-jacente. L'effet le plus connu est « l'îlot de chaleur urbain », lorsque l'air en ville est plus chaud qu'à la campagne, prin-

ciement la nuit. Cependant, d'autres effets sont peu ou pas connus, comme l'impact sur l'humidité ou l'impact sur l'ensemble de la couche limite, au dessus de la ville ou en aval.



Afin de répondre à ces questions, la campagne de mesures Capitoul, qui se déroule entre mars 2004 et mars 2005, observe les interactions entre surface urbaine et atmosphère, durant tout un cycle annuel. Les objectifs principaux sont de :

- 1) Quantifier les échanges de chaleur, d'eau, de CO₂ et de particules d'aérosols entre la surface et l'atmosphère. Les mesures continues sur un an à l'aide d'un mât de 30 m en centre-ville permettront d'étudier ces aspects pour des conditions météorologiques variées (hiver, été, pluies, averses, vent...).
- 2) Montrer quels sont les effets urbains sur l'ensemble de la couche limite atmosphérique (échanges énergétiques en surface) et de les lier à leurs causes : îlot de chaleur, structure du champ d'humidité, brise urbaine ou panache urbain, brouillard...
- 3) Étudier les transformations des aérosols urbains (microphysique, physique, évolution chimique des particules), depuis les zones d'émission jusque dans le panache urbain (50 km en aval).
- 4) Étudier la structure thermique de la ville par télédétection, à partir d'avions et de satellites.

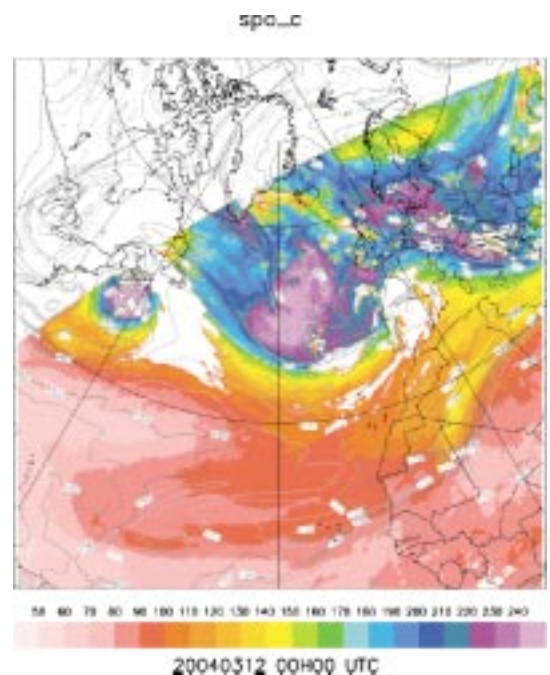
Pour remplir ces objectifs, le dispositif expérimental comprend à la fois de nombreuses mesures continues en surface sur l'ensemble de l'agglomération, mais aussi des mesures par radar, radiosondage ou avion (*figure*). L'année 2004 a d'ores et déjà permis d'engranger une masse de données importantes.

Nouvelles images d'ozone avec Météosat Seconde Génération

Depuis la mise en service opérationnel de Météosat Seconde Génération en janvier 2004, le nouveau canal ozone à 9,7 microns dans l'infrarouge thermique

donne des images d'une précision jamais encore obtenue sur la couche d'ozone de la basse stratosphère. Par rapport à l'instrument de référence qu'est le TOMS (*Total Ozone Measuring Spectrometer*) pour la mesure de la colonne d'ozone à partir de l'espace, les résolutions spatiale et temporelle sont meilleures de plus d'un ordre de grandeur.

L'observation depuis l'orbite géostationnaire permet d'observer le mouvement de l'ozone associé à l'écoulement dans la basse stratosphère et la haute troposphère qui sera mis en œuvre pour l'estimation des échanges entre troposphère et stratosphère. Les observations, intéressantes pour la chimie atmosphérique, le sont aussi pour la prévision à courte échéance en cas de cyclogénèse très active. L'idée est de combiner les images de colonnes d'ozone à celles des canaux de vapeur d'eau de manière à mieux valider les analyses de tourbillon potentiel et de corriger le cas échéant la dynamique du modèle en fonction des observations recueillies par MSG au-dessus de l'Atlantique (*figure*). En collaboration avec DP/Prévi/Labo, une étude de situations difficiles à prévoir est en préparation avec ces nouvelles observations, dans le cadre de la réponse à un appel d'offres émis par Eumetsat.



*Divers instruments
utilisés pendant
la campagne Capitoul
d'étude de la
météorologie urbaine
sur la ville de Toulouse
et ses alentours.*

Superposition du géopotentiel de la surface de 1,5 unités de tourbillon potentiel avec une image de colonne d'ozone de MSG traitée au CNRM pour le 12 mars 2004 à 0 h TU (un changement de couleur correspond à une variation de 10 dobsons). Les contours en trait plein représentent le géopotentiel de la surface 1,5 unités de tourbillon potentiel provenant de l'analyse Arpège à la même heure (écartement des isolignes : environ 500 mgp).

GMES-atmosphère : les projets GEMS et Promote

La Commission Européenne et l’ESA se sont engagés dans la mise en œuvre de l’initiative GMES, qui vise à doter l’Europe d’une capacité opérationnelle de surveillance globale de l’environnement et des risques naturels répondant à ses impératifs de développement et de sécurité. GMES correspond à la contribution de l’Europe au programme Géo lancé au sommet du G8 à Washington en juillet 2003.

Les capacités GMES doivent être développées dans le cadre de Projets Intégrés du sixième PCRD et de projets GSE. Suite à divers appels d’offres et au succès de nombreuses équipes françaises, celles-ci, et Météo-France en leur sein, ont aujourd’hui une contribution forte au sein des projets dans les différents domaines d’application de GMES : océanographie, surfaces continentales, risques naturels, composition chimique de l’atmosphère... Dans ce dernier domaine, un Projet Intégré (GEMS) et un projet GSE (Promote) ont été financés en 2004.

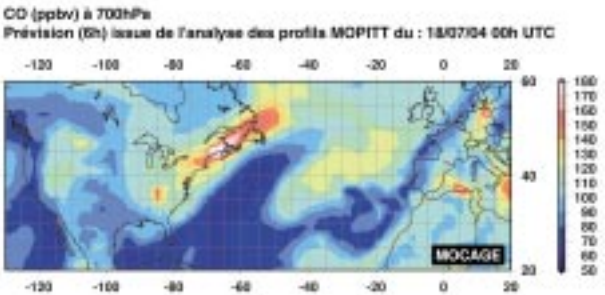
Le projet Promote a débuté en avril 2004. La contribution française à ce projet est pilotée par le Lisa et les activités associées correspondent, dans la phase d’étude préliminaire actuellement en cours, à la valorisation au plan européen de la plate-forme nationale de prévision de la qualité de l’air Prév’Air. Le Projet Intégré GEMS débute pour une durée de quatre ans en mars 2005. Il est coordonné par le CEPMMT et consiste à étendre les concepts et les outils d’assimilation et de prévision météorologique actuels au suivi de l’évolution des concentrations de gaz à effet de serre et des flux associés, au suivi et à la prévision à l’échelle planétaire de la composition en gaz réactifs et en aérosol et enfin, au suivi et à la prévision de la qualité de l’air en Europe. Le CNRM pilote ce dernier sous-projet et s’implique également dans les questions d’échelle globale, en s’appuyant sur les fonctionnalités du modèle Mocage.

Assimilation en temps réel d’observations troposphériques de monoxyde de carbone du sondeur Mopitt dans Mocage

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz émis par les feux et les combustions, naturels ou anthropiques. Il a une durée de vie de quelques semaines et l’étude de sa distribution dans l’atmosphère renseigne sur les transports intercontinentaux de polluants. Le CO joue un rôle important dans la chimie troposphérique

en influençant la capacité oxydante et en tant que précurseur de l’ozone.

Le radiomètre Mopitt est l’un des premiers instruments permettant de mesurer depuis l’espace des profils troposphériques de CO. L’assimilation de ces observations dans Mocage est effective depuis 2002, grâce à une collaboration entre le Laboratoire d’Aérodologie, le NCAR et le CNRM. L’analyse est effectuée en utilisant une technique de filtre de Kalman-Bucy, développée au NCAR. Mocage peut ainsi fournir des analyses tridimensionnelles de CO à l’échelle planétaire, qui servent ensuite de base à des prévisions.



Cette configuration a été employée en routine lors de la campagne Itop, volet européen d’une grande initiative américaine qui s’est déroulée en juillet 2004. Itop avait pour objectif de documenter la pollution et son transport sur l’Atlantique Nord. Les prévisions Mocage ont contribué au ciblage des masses d’air polluées par les avions instrumentés. Un traitement accéléré des mesures Mopitt a permis d’effectuer des analyses en temps faiblement différé, base pour des prévisions à 96h d’échéance utilisant le forçage météorologique Arpège. L’analyse et les prévisions, calculées à Toulouse, étaient mises quotidiennement à disposition de la communauté internationale. Les prévisions issues de l’analyse du 18 juillet à 0 h UTC, et incluant toutes les observations Mopitt de la journée du 17, montrent de fortes concentrations de CO sur l’Atlantique liées aux émissions de la Côte Est ainsi qu’à des feux en Alaska.

Assimilation de mesures chimiques avec Mocage-Palm

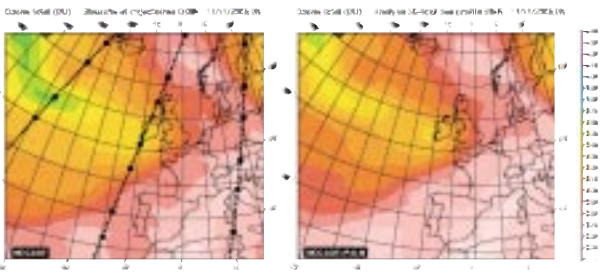
Avec la disponibilité croissante de mesures spatiales, l’assimilation de données chimiques connaît un essor marqué avec des finalités importantes : mieux connaître les distributions de constituants chimiques et les processus sous-jacents, améliorer le forçage radiatif dans les modèles de circulation générale atmosphérique, ou encore utiliser le déplacement observé de certaines espèces pour en déduire de l’information sur les vents.

Un pôle toulousain s’est constitué sur cette thématique, associant le CNRM avec le Cerfacs et le LA, et utilisant le modèle Mocage couplé au logiciel Palm. Mocage-Palm constitue une plate-forme flexible et performante pour assimiler des mesures de profils verticaux à l’échelle planétaire.

Dans le cadre du projet européen Asset, des expériences d’assimilation de mesures d’ozone dans la moyenne et basse stratosphère issues des sondeurs ERS2/Gome et Envisat/Mipas ont été effectuées, avec une technique variationnelle 3D-FGAT (First Guess at Appropriate Time). Cette technique est par ailleurs comparée à une méthode plus sophistiquée, le 4D-VAR, qui prend en compte la dimension temporelle au cours de l’assimilation.

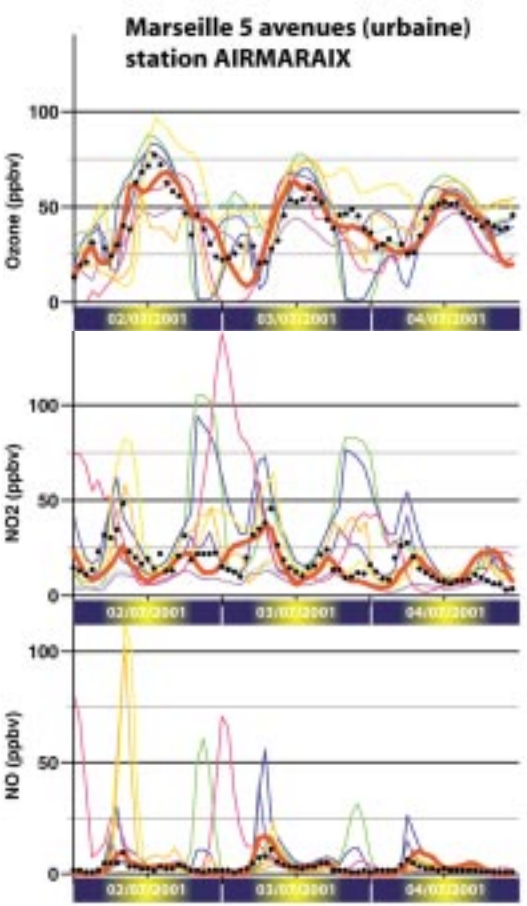
L’originalité de l’installation de cette dernière technique dans Mocage-Palm réside dans l’utilisation de la paramétrisation linéarisée de l’ozone du CNRM, qui permet une mise en œuvre à coût informatique accessible. Les simulations faites à partir de profils verticaux d’ozone issus d’un autre instrument, Odin/SMR, montrent que la simulation Mocage est améliorée par l’assimilation Palm.

Ces travaux débouchent sur des expériences d’assimilations simultanées de mesures de plusieurs sondeurs, et la mise en œuvre en temps réel dans la perspective de la phase opérationnelle du programme européen GMES.



L’exercice international de modélisation Escompte

L’objectif de la campagne Escompte était de documenter plusieurs épisodes de pollution dans la région de Marseille, en surface comme en altitude. La base des données recueillies au cours de l’été 2001 a peu d’équivalents au plan international, et permet d’évaluer les performances de Modèles de Chimie-Transport (MCT) d’échelle régionale employés pour les études de processus, de scénarii d’émissions, ou la prévision de la qualité de l’air.



Simulation de plusieurs modèles pour une station de mesures de l’Aasqa Airmaraix à Marseille, pour différents composés chimiques : ozone (O₃), monoxyde d’azote (NO) et dioxyde d’azote (NO₂). Les observations sont représentées par des points, la simulation du modèle Mocage de Météo-France par un trait rouge épais et la simulation des autres modèles par des traits fins.

Un exercice international d’intercomparaison de MCT a débuté en 2004. Il est piloté par les organismes financeurs d’Escompte et est coordonné par le CNRM. Au-delà de l’évaluation ponctuelle d’un panel de onze MCT, l’objectif est de fournir un outil complet et pérenne d’évaluation de modèles. Cet outil comprendra à terme les données de la base Escompte, le cadastre des émissions locales, un ensemble de conclusions relatif à l’exercice en cours (permettant, par exemple, de situer les performances d’un nouveau modèle), ainsi que des outils statistiques et graphiques. L’exercice permet d’avoir une vue d’ensemble de l’état de l’art des modèles régionaux de qualité de l’air ainsi que des incertitudes associées au budget de l’ozone et de ses précurseurs à cette échelle. L’exploitation des mesures d’aérosol d’Escompte sera proposée ultérieurement.

Un exemple de confrontation des simulations des modèles pour la troisième POI d’Escompte, réalisées « en aveugle » (les données d’observation avaient été maintenues cachées), est présenté. La figure illustre pour une station à Marseille de l’Aasqa Airmaraix la difficulté de nombreux modèles à simuler simultanément ozone (O₃), monoxyde et dioxyde d’azote (NO et NO₂) dans un site urbain à représentativité locale.

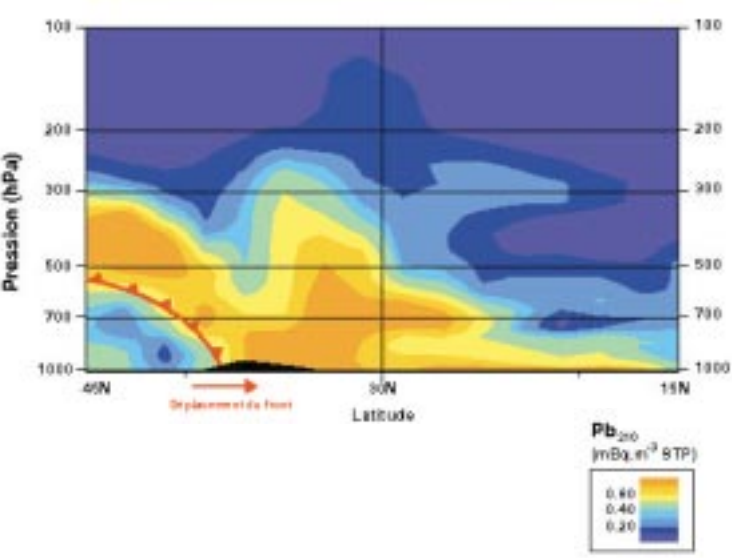
Exemple d’assimilation de profils verticaux d’ozone de l’instrument, Odin/SMR. A gauche : la simulation Mocage seul ; à droite : l’analyse corrigée par l’usage du logiciel Palm. On constate que, pour cet épisode, la simulation initiale Mocage sur l’Atlantique et l’Europe de l’Ouest présente des colonnes d’ozone trop élevées, qui sont efficacement réduites dans l’analyse.

Transport et lessivage des espèces chimiques dans la troposphère globale

Les processus de transport et de lessivage par les précipitations jouent un rôle fondamental dans l'évolution des distributions atmosphériques des composés chimiques. Ils sont représentés avec attention dans le modèle de chimie-transport Mocage. L'influence des précipitations sur la concentration des espèces a été particulièrement étudiée en 2004. Une paramétrisation très complète du lessivage a été introduite et l'évaluation effectuée en étudiant les concentrations d'un traceur inerte et très soluble, l'isotope plomb (210 Pb).

Deux années de simulation (2001 et 2002) ont permis d'estimer la capacité du modèle à reproduire les concentrations de 210Pb dans l'air ainsi que les dépôts, à différentes échelles de temps et d'espace. Les simulations ont été évaluées par rapport à des climatologies mensuelles calculées pour une vingtaine de sites répartis en latitude, démontrant un bon comportement d'ensemble. Elles ont ensuite été comparées à des observations de surface pour des lieux et des périodes particulières. Une étude sur la Guyane a permis de conclure sur le comportement satisfaisant du modèle en présence de phénomènes précipitants essentiellement convectifs. En Finlande, où les précipitations sont surtout stratiformes, les concentrations quotidiennes de 210Pb dans l'air sont également bien reproduites.

L'étude s'est poursuivie en utilisant la campagne Trace-P, qui s'est déroulée au printemps 2001 au large de l'Asie et permet de disposer de données observées sur la verticale grâce à une bonne couverture aéroportée. Le comportement du modèle est très réaliste (figure).

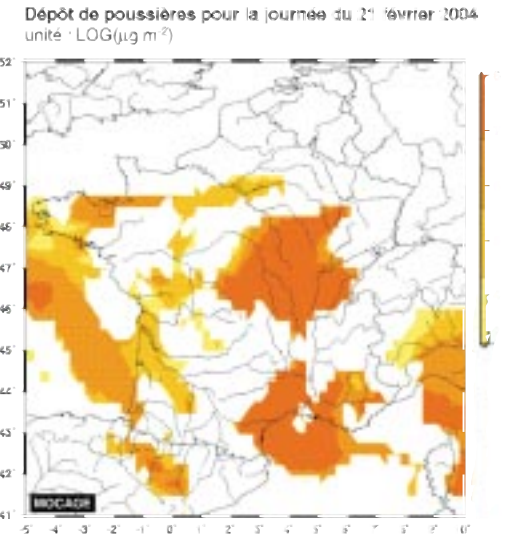


Dépôt de poussières simulé par le modèle Mocage pour la journée du 21/02/2004. Du fait de la pluie, on constate un important dépôt de poussières désertiques dans la vallée du Rhône et en Bourgogne. Cet épisode a obligé la SNCF au nettoyage de plusieurs lignes.

Coupe verticale à 140°E de longitude, le long d'un front documenté par l'un des vols. On constate le soulèvement de la masse d'air chargée en 210Pb à l'avant du front, et en-dessous, la diminution des concentrations due au lessivage. Faible concentration en bleu, forte concentration en orange.

Simulation d'épisodes de dépôt de poussières désertiques sur la France

Lors de certaines situations météorologiques, des poussières désertiques provenant de zones arides ou semi-arides peuvent être transportées jusque sur le territoire français et s'y déposer, avec des conséquences sur certaines infrastructures comme les réseaux électrique ou ferroviaire. Il est intéressant de modéliser et de prévoir le transport et le dépôt de ce type d'aérosol, car l'annonce à l'avance de tels épisodes permettrait de protéger les installations.



Les chercheurs du CNRM ont implanté le schéma d'émissions dynamiques développé au Lisa au sein du modèle Mocage. Ce schéma représente le flux de particules émises sous l'effet du vent à la surface, dans les zones arides et semi-arides du Sahara, de la péninsule Arabique et du Moyen-Orient ; il s'agit des principales sources susceptibles d'affecter la France.

Le modèle Mocage permet de caractériser l'évolution du nuage de poussières : son trajet, la masse et la granulométrie des poussières contenues dans l'atmosphère, les zones touchées par le dépôt, essentiellement avec la pluie. Plusieurs épisodes ont été simulés, comme celui du 21 février 2004. Ce jour là, la pluie a provoqué un important dépôt de poussières désertiques, particulièrement dans la Vallée du Rhône et en Bourgogne (figure). Cet épisode a obligé la SNCF à procéder au nettoyage de plusieurs lignes. Afin d'évaluer les résultats de Mocage, des comparaisons avec des observations au sol (réseaux et campagnes de mesures) et par satellite (mesures d'épaisseurs optiques) ont été menées.

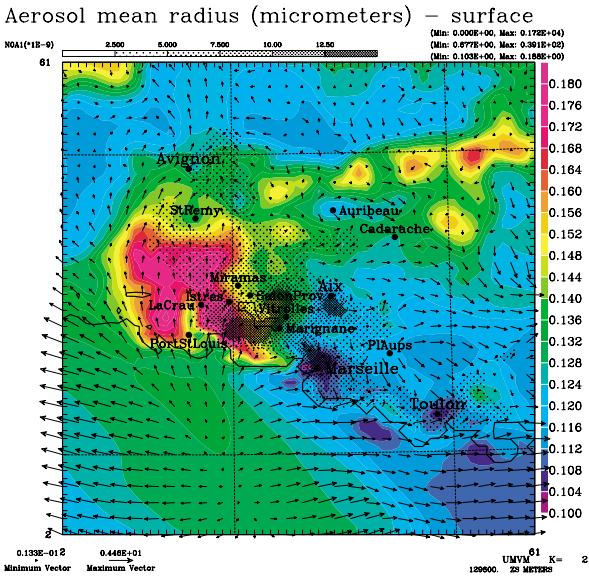
L'extension de la zone d'émission à d'autres déserts tels que les déserts chinois est prévu, notamment en

collaboration avec le service météorologique coréen. Cette application pourrait être testée dans des conditions opérationnelles sur la France dès l'été 2005.

Modélisation des aérosols

Depuis deux ans, le CNRM s'investit dans le développement d'un nouveau modèle d'aérosol, Orilam, capable de caractériser les aérosols atmosphériques par leur composition chimique (minéraux, carbone suie et carbone organique), leur concentration et leur spectre dimensionnel. Disposer d'un tel modèle permet de prédire la pollution particulaire, les effets radiatifs direct, semi-direct et indirect et ouvre la possibilité de couplage entre différents schémas microphysiques nuageux et la composition chimique atmosphérique.

Ce modèle est basé sur une approche log-normale afin de réduire le nombre d'espèces pronostiques (et donc son coût de calcul) nécessaire à la représentation des trois modes classiques d'aérosols (aitken, accumulation et grossier). Les processus microphysiques de nucléation, de condensation/absorption, coagulation, sédimentation sont représentés en équilibre avec la phase gaz et la thermodynamique atmosphérique.



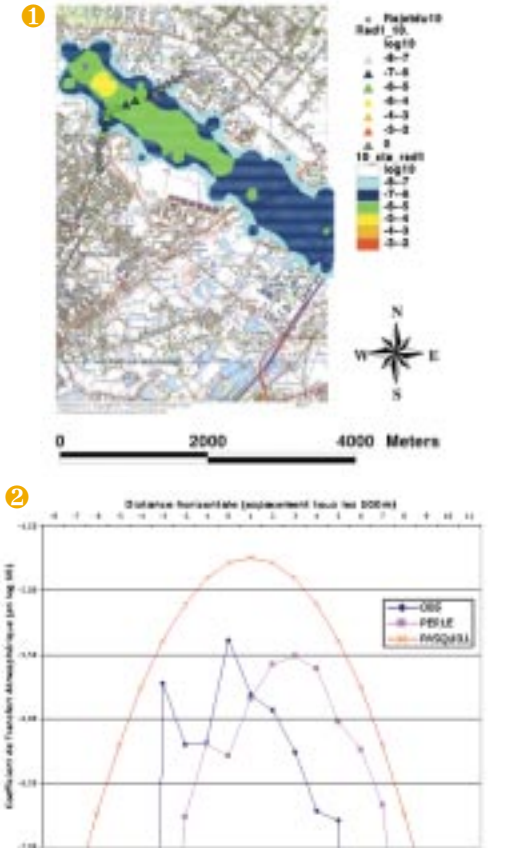
Actuellement disponible en-ligne en version 0D/1D et 3D dans le modèle MesoNH-C, Orilam sera prochainement intégré dans le système Mocage permettant de fait une plus grande souplesse d'utilisation.

La figure illustre l'évolution du rayon moyen du spectre granulométrique (en couleur) et du nombre de particules d'aérosol (hachures) lors de la campagne Escompte. Les aérosols issus de Marseille

(milieu urbain) possèdent une fraction organique primaire importante et hydrophobe, contrairement aux aérosols émis par la zone industrielle de Fos-Berre, fortement sulfatés (hydrophiles). Le modèle Orilam simulent correctement leur évolution (grossissement...) lors de leur déplacement. On observe même l'advection par le sud de vieilles particules en provenance de la Catalogne (Espagne).

Évaluation de Perle sur Capitoul

La campagne Capitoul, dédiée à la Couche Limite Urbaine et aux aérosols urbains, a donné lieu à des lâchers de traceur passif, dans le but de valider des modèles de dispersion et notamment Perle. Le modèle Perle est un système de modélisation de la dispersion de polluants à courte distance, dédié aux urgences environnementales, basé sur l'utilisation du modèle Meso-NH (résolution 2 km) et sur un modèle lagrangien particulaire. En collaboration avec l'IRSN, des lâchers de traceur SF6 inoffensifs ont eu lieu durant six journées (9, 10, 11 mars et 1, 2, 3 juillet), avec des mesures de concentration au sol et à 100 mètres d'altitude à bord du Piper Aztec de Météo-France, à des distances entre 300 mètres et 6 km. Les conditions météorologiques durant ces six journées étaient anticycloniques, associées à un vent faible et à une instabilité thermique modérée.



Simulation de la POI 2 Escompte par Meso-NH-C le 24 juin 2001 à 18 UTC. Coupe horizontale en surface du rayon moyen de la distribution du premier mode d'aérosol (iso contours en micromètres, références à droite). Concentration en aérosol (hachurés en milliards de particules/m³, références en haut), flèches de vents (référence en bas à gauche). Les aérosols issus de Marseille (milieu urbain) possèdent une fraction organique primaire importante et hydrophobe. Le rayon moyen du spectre de distribution évolue peu lors du transport des aérosols vers l'est du domaine (Marseille, Plan d'Aups, Toulon). A contrario, les aérosols émis par la zone industrielle de Fos-Berre, fortement sulfatés (hydrophiles), subissent un fort grossissement lors de leur déplacement vers le nord (le rayon moyen du spectre augmentant de 30 à 70 % dans la zone Port St Louis, Istres, St Remy).

Figure 1 : Modélisation des concentrations du panache par le système de modélisation de la dispersion de polluants à courte distance, Perle, pour le lâcher du 10 mars 2004, avec superposition des concentrations observées.

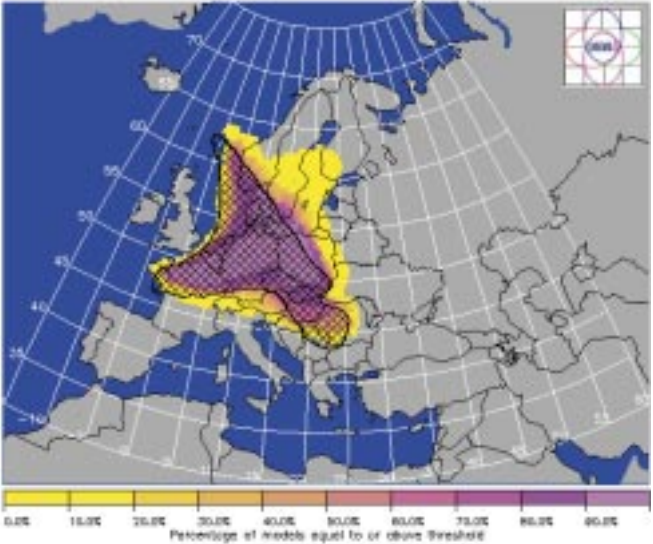
Figure 2 : Coefficient de transfert Atmosphérique en fonction de la distance horizontale pour le lâcher du 10 mars 2004, avec superposition des observations, de la modélisation Perle et du modèle de Pasquill.

Les simulations Perle ont montré des résultats réalistes durant la Période d’observation intensive (POI) de mars, en terme de concentration intégrée et de largeur de panache, alors que les modèles gaussiens surestiment la diffusion horizontale. Sur la POI de juillet, la turbulence de basses couches induit un panache plus dispersé, dont la largeur est un peu sous-estimée par Perle.

Évaluation du modèle Mocage-accident sur Etex

Le système d’intercomparaison des modèles de dispersion à l’échelle synoptique Ensemble a permis d’évaluer Mocage-Accident sur les données de la campagne Etex. Les références de comparaison sont les mesures d’une part, et le modèle médian d’autre part, obtenu comme le percentile 50 des seize modèles disponibles du projet Ensemble.

Sur cet exercice, le modèle Mocage-Accident a un comportement réaliste et en particulier représente bien la position et l’extension du panache. Il est aussi pertinent que le modèle médian en première partie d’épisode, mais sous-estime les concentrations au sol en seconde partie, du fait d’un transport vertical excessif. Ces résultats sont encourageants, et l’évaluation se poursuivra en 2005 sur Tchernobyl et au travers des exercices d’intercomparaison du projet Ensemble sur des cas fictifs.

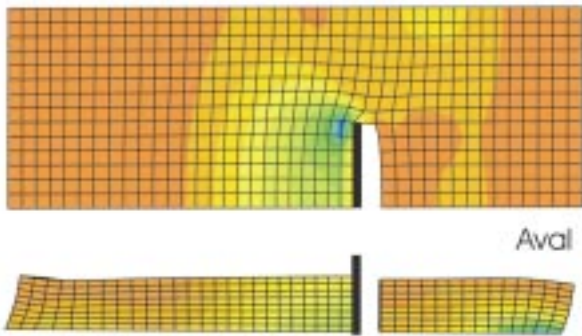


Extension d’un panache de pollution dans le cadre de la campagne Etex. En couleur le pourcentage de nombre de modèles dont la concentration intégrée sur 60 h est supérieure ou égale au seuil de 0.1 ng.h.m-3. En surface hachurée superposée le contour 0.1ng.h.m-3 de la concentration intégrée sur 60 h du modèle Mocage-Accident.

Étude manteau neigeux et avalanches

Simulation numérique des efforts de poussée d’un manteau neigeux sur des ouvrages paravalanches

Le fluage et le glissement sur le sol du manteau neigeux génèrent des efforts de poussée importants sur les filets et râteliers paravalanches. Ces déformations plus ou moins lentes du manteau neigeux dépendent évidemment de la topographie, mais aussi des ses caractéristiques physiques et mécaniques, qui évoluent en fonction des conditions météorologiques.



Météo-France a développé en 2004 un modèle numérique pour simuler le comportement visco-élastique de la neige et les déformations lentes, sans rupture macroscopique, d’un manteau neigeux multicouches. Ce modèle utilise le code de calcul Flac3D de la société Itasca. Cette modélisation tridimensionnelle a d’abord été évaluée en reproduisant une expérience physique réalisée par le LGGE en chambre froide ; puis elle a été appliquée pour simuler la densification et la reptation d’un manteau neigeux déposé sur une pente, et les efforts de poussées ainsi générés sur des filets paravalanches.

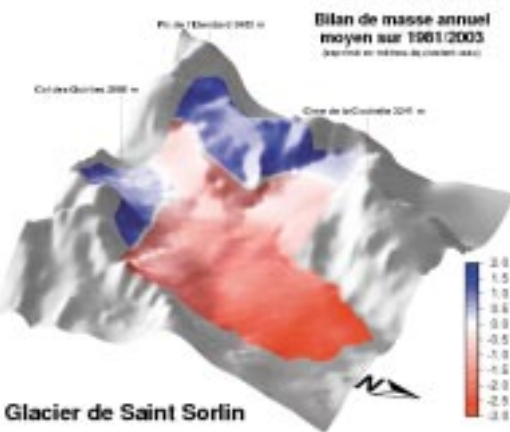
Ces simulations ont pu être comparées avec des mesures d’efforts, enregistrées par le Cemagref sur des ancrages de filets d’un site expérimental en Haute Savoie. Cette étude a été développée dans le cadre du projet PRANE (ouvrage de PROtection soumis à l’Action de la NEige), auquel participaient également le Cemagref-Etna, le LGGE , le Laboratoire Sols-Solides-Structures et l’entreprise EI Montagne. Des développements prochains devraient permettre d’appliquer ce type de modélisation et de simulation à des études sur la fissuration et sur l’instabilité du manteau neigeux, dans l’optique de la prévision du risque d’avalanches.

Simulation du bilan de masse du glacier de Saint-Sorlin de 1981 à 2002 à l’aide des modèles Safran et Crocus

Dans le cadre d’une collaboration entre le LGGE et le CNRM, les modèles Safran et Crocus ont été utilisés pour modéliser les échanges de masse et d’énergie à la surface du glacier alpin de Saint-Sorlin (massif des Grandes Rousses, entre 2 700 et 3 300 mètres d’altitude).

Ces modèles, initialement développés pour la prévision du risque d’avalanche, permettent de modéliser le manteau neigeux en haute montagne avec une très bonne résolution spatiale et temporelle. Certaines paramétrisations ont été adaptées afin de prendre en compte les spécificités glaciaires, telles que les propriétés radiatives de la glace et les redistributions locales de la neige par le vent et les avalanches. Le glacier de Saint-Sorlin a ainsi été modélisé de 1981 à 2004 avec une maille de 200 mètres, au pas horaire.

Les résultats ont été comparés à des bilans de masse issus de l’observation, soit par le biais de perches relevées régulièrement sur l’ensemble du glacier, soit grâce à des reconstitutions photogrammétriques. La diminution annuelle moyenne observée depuis une vingtaine d’années (environ un mètre d’équivalent en eau sur toute la surface du glacier) est ainsi bien estimée par le modèle, de même que les variations interannuelles du bilan. Une validation plus fine est en cours, consistant à comparer l’altitude de la neige saisonnière calculée par le modèle avec celle déduite d’images satellitaires ou de photos prises depuis le sol.



Une fois le modèle complètement validé, il pourra être utilisé pour l’étude du lien entre la variabilité climatique et les variations du bilan de masse

glaciaire. Une application importante sera l’évaluation de l’impact d’un changement climatique sur les glaciers alpins.



Le glacier de Saint-Sorlin, situé dans le massif des Grandes Rousses en Isère.

© M. Gerbaux

Validation du couplage Crocus/Isba au Col de Porte

Dans un but de mise au point d’un outil d’aide à la décision pour l’exploitation des routes en conditions hivernales, un projet de recherche nommé Gelcro a été développé par le CEN de Météo-France, le LCPC, les CETE de Nancy et de Lyon et la DDE38.

Cet outil d’aide à la décision est basé sur un modèle numérique. La tenue de la neige au sol, ainsi que son évolution à l’interface (présence de neige totalement saturée en eau liquide, regel...) est fortement conditionnée par l’état thermique et hydrique de la route au moment de la chute de neige. C’est pourquoi le modèle utilisé résulte du couplage du modèle de sol Isba-Route (adaptation à la problématique des routes du modèle d’hydrologie Isba) et du modèle de neige Crocus. Le couplage de ces deux modèles permet de simuler avec précision l’évolution thermique et hydrique de l’interface sol/neige.

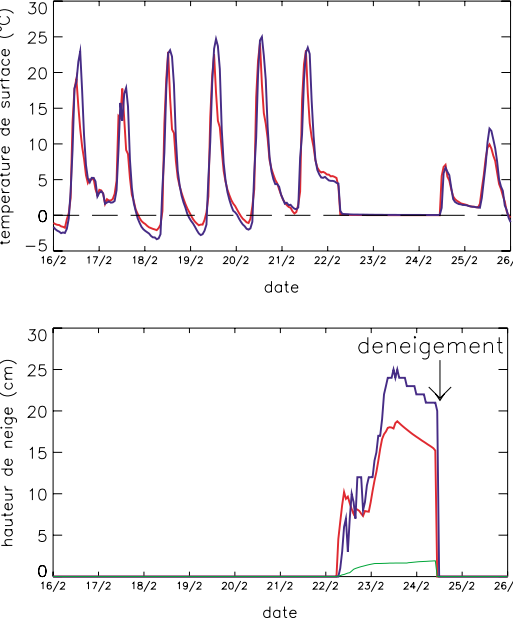
Pour la validation du modèle, le projet Gelcro a débuté par une vaste campagne de mesure effectuée au laboratoire de Météo-France du Col de Porte (1 320 mètres, Alpes), équipé pour les besoins du projets de chaussées expérimentales, au cours des hivers 97/98, 98/99 et 99/00. Cette campagne a permis

Bilan de masse annuel moyen calculé sur le glacier de Saint-Sorlin pour la période 1981-2003 (en mètres d’équivalent eau).

de constituer une base de données comportant 60 épisodes neigeux. La validation du modèle a ainsi été effectuée grâce aux simulations sur les trois hivers de la température de surface de la chaussée et de la hauteur de neige sur le sol, comparées aux mesures.

La poursuite du projet Gelcro consiste à étudier la faisabilité de la prévision et à apporter au modèle de nouvelles paramétrisations permettant de se rapprocher des conditions réelles (prise en compte partielle des effets du trafic, des fondants routiers...) afin d'utiliser le modèle dans un contexte opérationnel.

Exemple de la validation du couplage Isba/Crocus pour une chaussée expérimentale au Col de Porte, pour la période du 16 au 26 février 1998 comprenant un déneigement manuel : a) Comparaison de la température de surface mesurée (courbe bleue) et simulée (courbe rouge). b) Comparaison de la hauteur de neige mesurée (courbe bleue) et de la hauteur de neige simulée (courbe rouge). Le graphique montre également la simulation d'une couche de neige saturée en eau liquide à l'interface chaussée/neige, effectivement observée lors du déneigement.



Une climatologie fine de l'enneigement alpin de 1958 à nos jours

Aucune climatologie de l'enneigement alpin sur les quarante dernières n'avait encore vu le jour en France en raison du manque de séries de données suffisamment longues et bien documentées. Le CNRM innove donc en créant une climatologie pour les Alpes françaises à l'échelle de massifs montagneux climatiquement homogènes, qui couvre l'ensemble des expositions et des altitudes.

La climatologie de l'enneigement s'appuie sur les modèles Safran et Crocus, développés pour la prévision du risque d'avalanche et la modélisation du manteau neigeux en montagne. Ce système a été étendu sur quarante années grâce à la mise à disposition par le CEPMMT des ré-analyses Era40 (en particulier de profils atmosphériques sur les Alpes).

Ces données sont complétées par l'ensemble des observations de surface archivées dans les bases de données climatologique et nivologique de Météo-France et du CEPMMT.

L'analyse des résultats obtenus pour les hauteurs de neige fait apparaître deux grandes régions des Alpes : les Alpes du Nord-Ouest, très bien enneigées sous l'effet des perturbations Atlantiques, et les Alpes du Sud, moins arrosées et plus chaudes sous l'influence de perturbations méditerranéennes. La chronologie de l'enneigement à 1 800 mètres (figure) met en relief les années les mieux fournies (fin de la décennie 70, années 1975 à 1985) et les plus déficitaires (en particulier les années 1988 à 1993).

L'analyse des résultats se poursuit, avec en particulier la recherche de tendances sur l'évolution des hauteurs de neige et des conditions météorologiques en fonction des massifs et de l'altitude. Cette climatologie pourra ensuite servir de référence pour des études d'évolution de l'enneigement sous l'effet d'un réchauffement du climat.



Ecart relatif (en %) de l'enneigement moyen annuel à 1 800 mètres par rapport à la moyenne sur 44 ans. Chaque graphique représente pour une année entre 1958 et 2002 la partie française de l'arc alpin (du lac Léman à la Méditerranée), divisée en 23 massifs considérés comme homogènes d'un point de vue climatique.

Instrumentation pour la recherche



L'année a été marquée par les travaux autour des nouveaux avions instrumentés, et la création de l'unité mixte de service Safire, entre le CNES, le CNRS-INSU et Météo-France pour la mise en œuvre de la nouvelle flotte scientifique française. Parallèlement, on a connu les premières retombées du programme SAF sur les terres émergées.

Instrumentation aéroportée

L'ATR42 de Météo-France en courte finale

Dans le cadre de leurs activités de recherche, Météo-France, le CNRS-Insu et le Cnes coordonnent 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 supporte le projet biturbopropulseur troposphérique sur la base d'un ATR42-320, alors que le CNRS-Insu et le Cnes supportent le projet avion haute altitude sur la base d'un Falcon 20.

Le chantier de modification de l'ATR42 réalisé par la Sogerma à Bordeaux s'achève. Il aura fallu, depuis juin 2002, de nombreuses réunions entre les ingénieurs de Sogerma et les agents du CNRM et de l'INSU pour que les modifications soient scrupuleusement définies, validées et finalement peu à peu intégrées dans l'avion. L'achèvement des phases de validations et de certifications débordera largement sur 2005. Il en sera de même de l'équipement intérieur et de l'étalonnage de l'avion qui seront finalisés d'ici l'été 2005 permettant alors une pleine utilisation scientifique.

Parallèlement, le Falcon20 suit un calendrier similaire et sera également disponible pour les vols scientifiques à la mi-2005.

La communauté scientifique française disposera alors, 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 strato-

sphère. Le premier grand rendez-vous des deux nouveaux avions sera l'Afrique avec la campagne Amma en 2006.



L'ATR42 en présentation sur la base de Franczal le 8 octobre 2004 lors du meeting Eufar.

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, il a été créée 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-Franczal avec une antenne parisienne sur le site CNRS de Meudon. Le site principal de Franczal est doté d'un hangar de plus de 2 000 m², de divers laboratoires thématiques (thermodynamique, microphysique, chimie...) et de 400 m² 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.

La veine communautaire Safire pour l'échantillonnage des aérosols sur l'ATR-42

Les veines aéroportées de prélèvement d'aérosols permettent d'acquérir in situ de l'information sur les propriétés physico-chimiques et optiques des particules atmosphériques, et ce dans toute la colonne troposphérique et sur des échelles horizontales très larges. Ce type d'information est primordial lorsqu'il s'agit de quantifier l'impact radiatif direct des particules, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique, ou leur rôle sur les propriétés radiatives des nuages.

Une veine communautaire d'échantillonnage des aérosols a été développée en 2004 pour utilisation sur l'avion de recherche ATR-42 par l'Unité Safire. Elle résulte d'un travail d'étude en coopération entre les scientifiques de Météo-France, de l'UMS Safire, du Lamp et la société toulousaine Comat qui l'a réalisée.

Veine de mesures aéroportées embarquée sur l'ATR 42 de Météo-France.



Cette nouvelle sonde permet un échantillonnage isocinétique de particules d'aérosols de taille inférieure à 3 µm, avec une efficacité de collecte proche de 100 % sur toute la gamme submicronique, et en fournissant un débit utile de l'ordre de 120 l/mn (pour une vitesse d'air de 100 m/s) aux instruments connectés en aval. Conceptuellement, la sonde d'entrée est basée sur celle construite par la Nasa et intègre la plupart des recommandations faites à l'issue du meeting d'experts européens Eufar (Leipzig 2003). La veine de prélèvement sera complétée en 2005 par un rack « aérosol » de pilotage, de mesures et d'acquisition, placé en sortie de veine.

Au-delà de l'expérience Amma de 2006, cette veine aéroportée a des applications scientifiques larges qui devraient séduire la communauté scientifique qui s'intéresse aux aérosols. D'autre part, Safire contribue fortement au programme européen Eufar en proposant cette veine dans les instruments de base disponibles sur l'ATR-42.

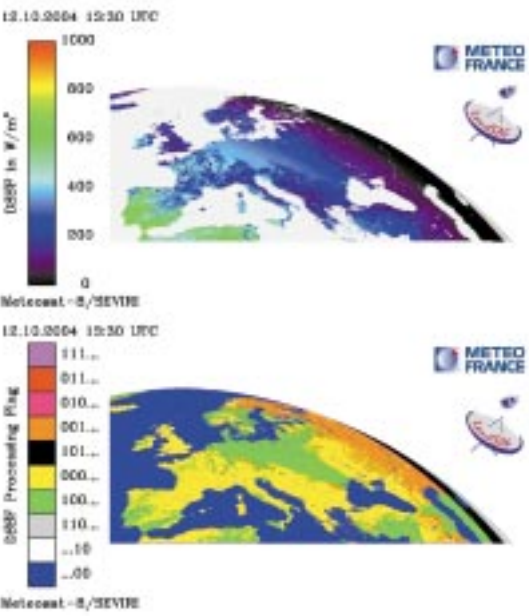
Estimation du flux de rayonnement ondes-courtes descendant pour le 12 octobre 2004 à 13h30 UTC (haut) et de l'indice de qualité correspondant (bas).

Instrumentation in situ – télédétection

Le programme Saf pour l'Analyse des Terres Émergées : évaluation des premiers produits

Le programme Saf pour l'Analyse des Terres Émergées (ATE) est placé sous la responsabilité de l'Institut Météorologique du Portugal et sous le contrôle d'Eumetsat. Sa vocation est de fédérer des collaborations scientifiques et techniques entre les huit états membres représentés. Elle vise la mise au point de méthodes opérationnelles d'estimation de paramètres de surface utiles aux prévisions météorologiques et climatiques.

Dans une première étape, le programme Saf ATE repose sur la seule exploitation des données du satellite géostationnaire MSG. L'analyse actuelle sera complétée à partir de 2006 par le satellite polaire Metop pour couvrir les hautes latitudes et le globe. Une gamme étendue de produits est proposée dont cinq seulement ont été retenus pour démarrer. Il s'agit de l'albédo, de la température, de la couverture de neige, et des rayonnements ondes-courtes et thermique. La cadence de fourniture varie de quinze minutes, soit le pas de temps d'observation de MSG, pour le rayonnement, à trente minutes pour la température, puis la journée pour l'albédo et la couverture de neige. La résolution spatiale est celle du satellite, proche de cinq km.



Depuis juillet 2004, ces paramètres sont générés sur l'Europe en routine depuis le Portugal pour une première analyse avérée encourageante. Les traite-

ments amont incluent des champs auxiliaires tel que le masque nuages du Saf Prévision Immédiate et la colonne vapeur d'eau du CEPMMT. La validation des produits repose sur l'analyse satellitaire comparée et la confrontation avec des données sol de réseaux pérennes. La phase de recherche et développement de cinq ans s'achève pour laisser la place à la phase pré-opérationnelle qui durera vingt six mois.

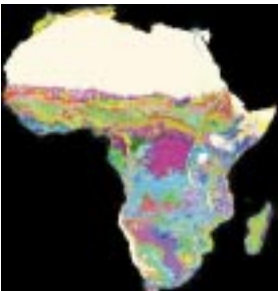
Ecoclimap-2 : vers une nouvelle version de la base globale kilométrique de paramètres de surfaces continentales

Ecoclimap-1 est une base globale kilométrique de paramètres de surface (indice foliaire, fraction de végétation, albédo...) qui fournit les paramètres d'entrée aux schémas de surface à n'importe quelle résolution et permet aussi une approche par thème de végétation. Elle a été élaborée à partir de cartes d'occupation des sols, de cartes de climat et de données satellitaires (NOAA/AVHRR). Cette base utilisée à Météo-France et dans plusieurs projets européens, est actuellement en test au CEPMMT.

Cependant, il apparaît nécessaire de disposer de bases encore plus précises notamment pour les modèles à méso-échelle, aussi bien pour le futur modèle opérationnel Arome que pour le modèle de recherche Méso-NH. Une résolution de 250 mètres sur l'Europe semble être un bon compromis. De plus, la disponibilité de cartes d'occupation des sols plus récentes ainsi que des données de capteurs de télédétection mieux résolus va se traduire par une amélioration notable.

Le CNRM a défini une nouvelle stratégie pour réaliser une nouvelle base Ecoclimap-2 à la résolution de 250 mètres sur l'Europe et de 1 km en global qui s'appuiera sur :

- 1 • la carte globale GLC2000 d'occupation des sols au kilomètre réalisée à partir de données Spot/Végétation de l'année 2000 ;
- 2 • Corine 2000, une carte d'occupation des sols en 44 classes sur l'Europe (plus petite unité de 25 ha) ;
- 3 • les données Spot/Végétation de 1999 à 2004.



Le CNRM a mis au point un algorithme original qui permet de définir des écosystèmes homogènes par des techniques de classification (figure) ; on dérive ensuite tous les dix jours l'ensemble des paramètres de surface pour chaque écosystème en utilisant la

saisonnalité de l'indice de végétation NDVI de Spot/Végétation. L'effort sera mis en priorité sur l'Europe et l'Afrique.

Préparation de la mission spatiale lidar vent ADM-Aeolus

Le futur lidar vent spatial ADM-Aeolus de l'ESA est actuellement en cours d'assemblage pour un lancement prévu en 2008. Le CNRM intervient dans la mise en place du segment sol à travers sa participation à trois études commanditées par l'ESA. L'une dirigée par le DLR allemand consiste à analyser le processeur de niveau 1 en cours de production dans l'industrie et à y apporter toutes les améliorations utiles. Dans la deuxième dirigée par l'IPSL, les chercheurs de Météo-France sont chargés de définir des méthodes de traitement numérique pour corriger l'impact de phénomènes parasites. La troisième portant sur la production opérationnelle des données de niveau 2 a été confiée au CEPMMT. Le CNRM y a pris la responsabilité de développer le processeur de niveau 2B. Celui-ci a pour fonction d'ajouter aux données de niveau 1 toutes les modifications, corrections et additions requises par l'assimilation. L'ensemble de ces activités devrait durer un peu plus de deux ans et s'achever vers la fin de l'année 2006 ou le début de 2007.

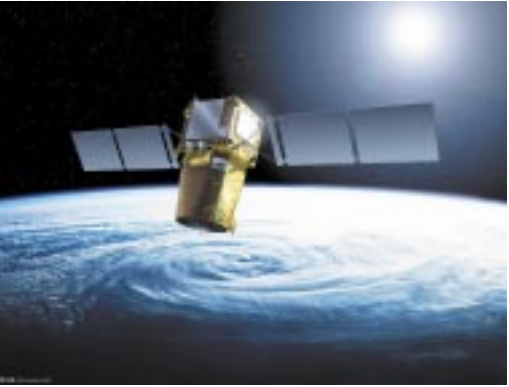


Image simulée du lidar vent spatial ADM-Aeolus. Courtesy of the European Space Agency.

En parallèle, le CNRM est impliqué dans un programme de validation d'un prototype aéroporté d'ADM-Aeolus. Assemblé par l'industrie à partir d'éléments construits pour démonstration technologique, celui-ci sera très proche du lidar spatial. Il sera confié au DLR en 2005 pour validation au sol, puis en vol à bord d'un Falcon 20. A la demande de l'ASE et du DLR, Météo-France a contribué à la phase de définition de l'instrument en participant à des revues critiques et a collaboré également à l'élaboration des campagnes de validation auxquelles ses équipes seront associées. La première de celles-ci aura lieu à l'automne 2005. D'une durée de quatre semaines, elle aura pour but de tester l'instrument au sol. Deux autres campagnes aéroportées suivront en 2006 et 2007.

Cartographie de l'Afrique en 90 écosystèmes par application d'un algorithme utilisant la carte d'occupation des sols GLC2000 à la résolution kilométrique et la saisonnalité de l'indice de végétation (NDVI) de l'instrument Spot/Végétation.



Organigramme du CNRM



Glossaire des sigles, acronymes et abréviations

4D-VAR	Assimilation variationnelle quadridimensionnelle	HSI	Indice régional et saisonnier
AASQA	Association Agréée de surveillance de la qualité de l'air	IASI	Interféromètre infra rouge satellital
AEOLUS	Mission Lidar vent spatial	IHOP	International H2O exPeriment
AIRS	Advanced Infra-Red Sounder	IMFREX	IMPact des changements anthropiques sur la FRéquence des phénomènes EXtrêmes de vent, de température et de précipitations
ALADIN	Version à domaine limité du modèle Arpège		
AMMA	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine	INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
AMSU	Advanced Microwave Sounding Unit	IOP	Période d'Observations Intensives
ARAMIS	Réseau opérationnel de radars précipitations de Météo-France	IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
AROME	Application de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle	IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
ARPEGE	Modèle global de prévision numérique opérationnel de Météo-France	ISBA	Interactions entre le Sol, la Biosphère et l'Atmosphère
		ISIS	Algorithme de suivi automatique des systèmes identifiés à partir de l'imagerie infra-rouge de Météosat
ARPEGE-CLIMAT	Modèle de recherche de Météo-France (CNRM) sur le climat		
ATE	Analyse des Terres Emergées	ITOP	Campagne de documentation de la pollution et son transport sur l'Atlantique Nord
ATOVS	Sondeur embarqué sur les satellites de la NOAA		
ATR 42	Nouvel avion de Météo-France	JASON	Satellite d'observation des océans
AVHRR	Radiomètre perfectionné à très haute résolution	LA	Laboratoire d'Aérologie (CNRS/Université Paul Sabatier de Toulouse)
BDEPI	Base de Données d'Expertises en Prévision Immédiate	LAI	Leaf Area Index
CAM	Centre d'Aviation Météorologique (Météo-France)	LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
CAPITOUL	Canopy and Aerosol Particles Interaction in TOulouse Urban Layer	LEGOS	Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales
CEDRE	CEntre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentation sur les pollutions accidentelles des eaux	LGGE	Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement
		LIDAR	Radar à laser
CEN	Centre d'Etudes de la Neige (Météo-France)	LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
CEPMMT	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme	LODYC	Laboratoire d'Océanographie DYnamique et de Climatologie
		MCS	Systèmes Convectifs de Méso-échelle
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique	MCT	Modèle de Chimie Transport
		MEDEX	MEDiterranean EXperiment on cyclones that produce High Impact Weather in the Mediterranean
CMM	Centre de Météorologie Marine (Météo-France)		
CMS	Centre de Météorologie Spatiale (Météo-France)	MERCATOR	GIP en charge de la mise en œuvre d'un modèle opérationnel d'océanographie globale
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales		
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques (Météo-France)	MESO-NH	Modèle non-hydrostatique de recherche
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique	METEOSAT	Satellite météorologique géostationnaire européen
COBEL	COde de Brouillard a l'Echelle Locale	METOP	Futur satellite européen défilant à orbite polaire
CROCUS	Modèle d'évolution du manteau neigeux	MOCAGE	Modèle planétaire de chimie de la troposphère et de la stratosphère
CROSS	Organisme chargé de l'action de l'Etat en mer	MODCOU	Modèle hydrologique
CSI	Indice régional et saisonnier	MOPITT	Radiomètre de mesure des profils troposphériques
CYPRIM	CYclogenèses et PRécipitations Intenses en région Méditerranéenne	MOTHY	Modèle Océanique de Transport d'HYdrocarbures
		MSG	Satellite Météosat de Seconde Génération
DEMETER	Development of an European Multimodel Ensemble system for seasonal to inTERannual prediction	NASA	National Administration Space Agency
		NCAR	National Center of Atmospheric Research (USA)
DIAL	Radar laser aéroporté	NOAA	Administration Américaine pour les Océans et l'Atmosphère
DP	Direction de la Production (Météo-France)	OASIS	Modèle de climat du CERFACS
DSO	Direction des Systèmes d'Observation (Météo-France)	OMM	Organisation Météorologique Mondiale
EARS	Projet de retransmission des données météorologiques via Eumetsat	OPIC	Objets pour la Prévision Immédiate de la Convection
		PCRD	Programme Cadre de Recherche et Développement de la Commission Européenne
ECOCLIMAP	Base de données de paramètres de surface		
EGOS	Groupe Européen pour les Stations de mesures Océaniques	PERLE	Modèle d'Évaluation des Rejets Locaux d'Éffluents
ENM	Ecole Nationale de la Météorologie (Météo-France)	POMME	Programme Océanographique Mutidisciplinaire Méso-Echelle
ENVISAT	ENVironnemental SATellite	QBO	Oscillation quasi-biennale
ERA	Ré-analyse de situations météorologiques passées par le CEPMMT	RADOME	Réseau d'Acquisition de Données d'Observation Météorologiques Etendu
ERS	European Remote sensing Satellite		
ESA	European Space Agency	SAF	Satellite Application Facility
ESCOMPTE	Campagne de mesures sur la pollution menée dans la région de Marseille	SAFIRE	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement
		SAFRAN	Système d'analyse des données nivo-météorologiques
ETEX	Campagne liée au modèle de pollution Mocage-Accident	SAR	Search And Rescue
EUCOS	EUmetnet Composite Observing System	SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
EUFAR	European Fleet for Airbone Research	SMT	Service Mondial de Transmission
EUMETNET	Réseau de services météorologiques européens	SOP	Période d'Observations Spéciales (campagne AMMA)
EUMETSAT	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques	SST	Température de Surface de la Mer
		SYMPOSIUM	Système automatisé multi-usagers de diffusion de prévisions par zones climatiques homogènes
FASTEX	Expérience sur le « rail » des dépressions atlantiques et les fronts, conduite en Atlantique nord		
GAME	Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique (Unité de Recherche Associée 1357 CNRS/Météo-France)	SYNERGIE	Système Numérisé d' Exploitation Relationnelle et de Gestion Interactive et Evolutive
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat		
GMES	Initiative de surveillance européenne de l'environnement et des risques naturels	TEB	Schéma de surface pour la modélisation des zones urbaines
		UHF	Gamme des « Ultra Hautes Fréquences »
GPS	Global Positionning System	UTC	Temps Universel Coordonné
HIRS	High Resolution Infrared Radiation Sounder	VHF	Gamme des « très hautes fréquences »