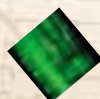
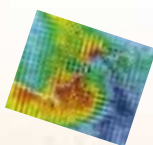


Sommaire

Modélisation	4
Processus atmosphériques	6
Campagnes expérimentales	12
Étude du climat et de l'environnement de la planète	16
Développements instrumentaux	24
Activités de développement	28
Organigramme du CNRM	32

Recherche et Développement 2000



Glossaire des sigles, acronymes et abréviations

3D-VAR	Assimilation variationnelle tridimensionnelle
4D-VAR	Assimilation variationnelle quadridimensionnelle
AASQA	Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air
ACE 2	Campagne internationale sur les aérosols et leur influence sur le climat
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ADEOS	Satellite d'observation de la terre en orbite polaire (USA)
AIRPARIF	Association chargée de la surveillance dela qualité de l'air en Ile-de-France
ALADIN	Projet de Lidar vent satellital
ALADIN	Version à domaine limité du modèle Arpège
ARAT	Avion de recherche Atmosphérique et de Télédedétection
ARGOS	Système de positionnement d'un mobile par satellite
ARPEGE	Modèle de prévision numérique opérationnel de Météo-France
ARPEGE-CLIMAT	Modèle de recherche de Météo-France (CNRM) sur le climat
ASPIC	Expérimentation dans le domaine de la prévision immédiate
ASPOC	Application de Signalisation et de Prévision d'Orages pour le Contrôle aérien
AVHRR	Radiomètre perfectionné à très haute résolution
CAM	Centre d'Aviation Météorologique (Météo-France)
CEN	Centre d'Etudes de la Neige (Météo-France)
CEPMMT	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CESBIO	Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère
CETP	Centre d'Etude des Environnements Terrestre et Planétaires
CLOUDY COLUMM	Composante de l'expérience ACE2 relative au couplage entre Propriétés physico chimiques des aérosols et propriétés radiatives des nuages
CMM	Centre de Météorologie Marine (Météo-France)
CMS	Centre de Météorologie Spatiale (Météo-France)
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques (Météo-France)
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
COARE	Expérience sur les réactions du système couplé océan-atmosphère
COST	Coopération Européenne Scientifique et Technique
CROCUS	Modèle d'évolution du manteau neigeux
DDE	Direction Départemental de l'Equipement
DIR	Direction Interrégional de Météo-France
DLR	Organisation national allemand de recherche et d'essais dans les Domaines spatial, atmosphérique et environnemental
DP	Direction de la production (Météo-France)
DRAST	Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques du Ministère des Transports
DSI	Direction des systèmes d'informations (Météo-France)
DSO	Direction des systèmes d'observation (Météo-France)
ECSN	Réseau de soutien européen aux études climatiques
EGOS	Groupe européen sur les stations de mesures en mer
ENVISAT	Projet de satellite européen d'étude de l'environnement
ENM	Ecole Nationale de la Météorologie (Météo-France)
EQUALANT	Expérience d'étude de la variabilité de la circulation océanique et des interactions océan-atmosphère dans l'Atlantique équatorial
ERS1 et ERS2	Satellites européens de télédétection de la Terre
ESA	Agence Spatiale Européenne
ESCOMPTE	Expérience sur Site pour Contraindre les Modèles de Pollution Atmosphérique et de Transports d'Emissions (Fos-Berre, été 2001)
ESQUIF	Etude et Simulation de la Qualité de l'Air en Ile-de-France
EUCREX	Expérience européenne sur les nuages et le rayonnement (1994)
EUMETSAT	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques
FASTEX	Expérience sur le " rail " des dépressions atlantiques et les fronts, conduite en Atlantique nord début 1997
GAME	Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique (Unité de Recherche Associée 1357 CNRS/Météo-France)
GELATO	Modèle dynamique et thermodynamique de banquise
GELCRO	Projet portant sur les interactions entre neige et chaussée
GIEC	Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
GIVRAGE	Etude du givrage des avions
GPS	Système de positionnement par satellite
GSWP	Programme de recherche sur l'humidité des sols
HAPEX	Expérience pilote sur les relations entre les facteurs hydrologiques et atmosphériques
IASI	Interféromètre infra rouge satellital de EPS
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

IFS	Modèle de prévision numérique du CEPMMT
IGBP	Programme international " Géosphère-Biosphère "
IMFT	Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
INERIS	Institut National de l'Environnement et des Risques
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
ISBA	Schéma numérique d'échanges sol-végétation-atmosphère
LA	Laboratoire d'Aérologie
LACE	Programme de recherche en prévision numérique
LEGOS	Laboratoire d'études en Géophysique et Océanographie Spatiales
LGGE	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
LIDAR	Radar à laser
LISA	Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques
LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
LOA	Laboratoire d'Optique Atmosphérique
LODYC	Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie
LTHE	Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement
MAP	Projet international et expérience de terrain associée relatifs à l'étude des phénomènes de méso-échelle sur les Alpes
MASSIF	Projet relatif à l'étude des aspects météorologiques de IASI
MEPRA	Système expert d'aide à la prévision des avalanches
MERCATOR	Projet de modèle opérationnel de l'océan mondial
MESO-NH	Modèle Non-Hydrostatique de recherche
METEOSAT	Satellite Météorologique géostationnaire européen
METOP	Futur satellite européen défilant à orbite polaire
MOCAGE	Modèle planétaire de chimie de la troposphère et de la stratosphère
MODCOU	Modèle hydrologique
MOZAÏC 2	Mesure de l'Ozone sur des avions Airbus Commerciaux
MOZART	Mesures d'Ozone à bord d'Avions Régionaux et de Trains à Grande Vitesse
MSG	Satellite Météosat de Seconde Génération
NIVOSE	Station automatique de Haute montagne
NOAA	Administration Américaine pour les Océans et l'Atmosphère
OASIS	Programme de couplage de modèles atmosphérique et océanique
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
ONERA	Office Nationale d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
OPA	Modèle de simulation océanique
PATOM	Programme Atmosphère et Océan à Méso-Echelle
PIRATA	Réseau (pour la recherche) de bouées ancrées dans l'Atlantique Tropical
PNCA	Programme Nationale de Chimie Atmosphérique
PNEDC	Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat
PNRH	Programme National de Recherche en Hydrologie
PNRN	Programme National Risques Naturels
PNTS	Programme National de Télédétection Spatiale
POI	Période d'Observation Intensive
POLDER	Radiomètre embarqué sur le satellite Adeos
POMME	Programme Océanographique Multidisciplinaire Méso-Echelle
PYREX	Expérience relative à l'influence d'un relief montagneux sur
RAMCES	Réseau Atmosphérique des Gaz à Effet de Serre L'écoulement atmosphérique (Pyrenées, 1990)
RANDOME	Réseau d'Acquisition de Données d'Observation Météorologiques Etendu
RASS	Système de sondage acoustique de l'atmosphère associé à un radar ST
REPROBUS	Modèle de chimie stratosphérique
SAF	Satellite Application Facility
SAFRAN	Système d'anlyse des données nivo-météorologiques
SEVIRI	Imageur visible et infra rouge du futur satellite Météosat seconde génération
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
SYAGE	Programme d'étude des tourbillons de sillage des aéronefs (aéroport de Toulouse Blagnac)
SYMPOSIUM	Système automatisé multi-usagers de diffusion de prévisions par zones climatiques homogènes
TEB	Schéma de surface pour la modélisation des zones urbaines
TOGA	Programme d'étude des océans tropicaux et de l'atmosphère du globe
TOVS	Sondeur vertical opérationnel des satellites défilants américains
UHF	Gamme des " ultra haute fréquences "
UKMO	Service Météorologique du Royaume-Uni
UTC	Temps Universel Coordonné
VHF	Gamme des " très hautes fréquences "
WAMP	Projet relatif à l'étude de la mousson d'Afrique de l'ouest
WIND	Lidar Doppler Aéroporté

Recherche et Développement

Rapport d'activité

2000

Avant-propos

L'année 2000 a été marquée par le franchissement de plusieurs étapes symboliques pour la recherche à Météo-France. En particulier, les objectifs initiaux du projet Arpège, affichés voilà plus de dix ans, ont été pleinement atteints avec la mise en service du système d'assimilation variationnelle quadridimensionnelle (4D-VAR).

On mesure difficilement la quantité de travail, la patience et la constance déployées par les équipes de développement du CNRM et du CEPMMT pour atteindre ce résultat. Comme dans tout projet de recherche de cette envergure, des difficultés ont été rencontrées, que l'on a surmontées ou contournées, et de nouvelles directions ont parfois dû être prises. C'est ainsi qu'est apparue la nécessité de construire, en complément du modèle Arpège à maille variable, un modèle à méso-échelle et à domaine limité. Le projet Aladin, placé dans le cadre d'une coopération fructueuse avec nos partenaires de l'Europe de l'Est, a répondu à ce besoin.

Parallèlement, le projet Méso-NH, plus orienté vers les besoins de la recherche amont, est également arrivé cette année à sa pleine maturité. L'ensemble des fonctionnalités du modèle et son optimisation sur le calculateur multiprocesseur étant maintenant effectives, il est utilisé de manière exhaustive pour analyser des mesures recueillies pendant l'expérience MAP de 1999.

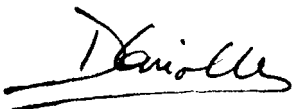
Mais il faut d'ores et déjà penser à l'avenir et bâtir sur ces acquis pour élaborer le futur système de prévision, susceptible de devenir opérationnel à l'horizon 2008. L'objectif, rappelé dans le plan stratégique de l'établissement, est d'atteindre à cette échéance un modèle travaillant à des échelles de quelques kilomètres et doté d'un système d'assimilation adapté.

Un autre gros dossier engagé en 2000 concerne le remplacement de la flotte d'avions pour la recherche atmosphérique, Météo-France prenant la maîtrise d'œuvre de l'acquisition d'un avion troposphérique emportant plus de deux tonnes de matériel scientifique. En concertation avec le CNRS-Insu et le Cnes, le cahier des charges de ce porteur a été finalisé, les documents administratifs préparés, et l'on devrait lancer l'appel d'offres début 2001 pour une mise en service en 2003.

Concernant les programmes de recherche amont, des avancées significatives ont été obtenues dans de nombreux domaines. Sans vouloir être exhaustif, on citera l'élaboration d'une carte d'occupation des sols à 1 km de résolution sur l'ensemble de la planète, les premières simulations du modèle Mocage de chimie de l'atmosphère dont la validation sera poursuivie pendant la campagne Escompte de 2001 ou encore les travaux visant à l'utilisation optimale par les modèles de prévision numérique des données des sondeurs spatiaux de nouvelle génération, Airs et Iasi.

Pour finir, mentionnons l'évaluation très positive du Game, laboratoire associé au CNRS constitué des équipes toulousaines du CNRM, qui a conduit à son renouvellement pour quatre années, avec des objectifs redéfinis dans le cadre du plan prospectif recherche adopté l'an dernier. De plus, sur le plan européen, le CNRM a contribué aux réflexions d'élaboration du contenu thématique du 6^e Programme cadre de recherche et développement.

Directeur de la recherche

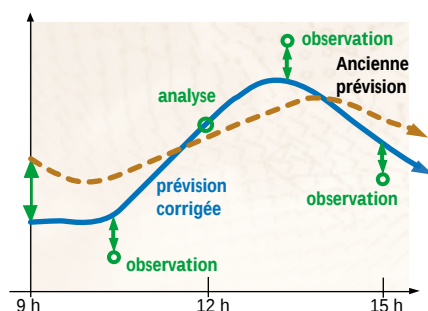


D. Cariolle

Modélisation

Pour l'activité de modélisation, l'événement de l'année a été le passage en opérationnel de l'assimilation 4D-VAR. Mais on n'oubliera pas que la simulation des tempêtes de 1999 a constitué un banc d'essai redoutable.

L'assimilation variationnelle continue 4D-VAR devient opérationnelle



Principe de l'assimilation météorologique 4D-VAR sur une fenêtre temporelle de 6 h allant de 9 h à 15 h UTC (axe horizontal). L'axe vertical représente l'ensemble des paramètres du modèle de prévision servant à décrire l'atmosphère. Le schéma 4D-VAR remet à jour l'ancienne prévision (en rouge) pour produire la nouvelle trajectoire du modèle (en bleu), qui passe au plus près des observations disponibles de 9 à 15 h UTC et qui représente la meilleure estimation de l'état atmosphérique sur la fenêtre 9 h - 15 h.

Le 20 juin 2000, Météo-France a effectué un important changement dans son assimilation opérationnelle de données : l'installation d'un algorithme dit 4D-VAR. Avant cette date, l'assimilation de données produisait une analyse quatre fois par jour, à 0, 6, 12 et 18 h UTC. Pour cela, les observations voisines de l'instant t étaient interpolées dans l'espace à trois dimensions. L'assimilation 4D-VAR permet d'effectuer l'interpolation temporelle plus rigoureusement et de façon cohérente avec le modèle, et donc avec ses équations qui représentent la dynamique de l'atmosphère. On peut dire que, sur une fenêtre temporelle de 6 heures, le 4D-VAR réajuste la trajectoire ancienne du modèle en utilisant les observations, pour produire une nouvelle trajectoire.

Le 4D-VAR est devenu opérationnel à Météo-France en même temps qu'un autre changement important : l'utilisation des radiances du sondeur Atovs du satellite NOAA 15. Ces modifications avaient au préalable été testées sur des périodes de plusieurs semaines. Comme attendu, l'usage des données Atovs améliore les prévisions du modèle Arpège dans l'hémisphère sud, ainsi que dans la stratosphère sur tout le globe.

Le 4D-VAR apporte ainsi une amélioration très sensible aux prévisions numériques Arpège et Aladin, particulièrement en hiver sur les phénomènes météorologiques rapides, comme les tempêtes de décembre 1999. Son installation opérationnelle a été rendue possible par l'arrivée à Météo-France du superordinateur Fujitsu VPP5000.

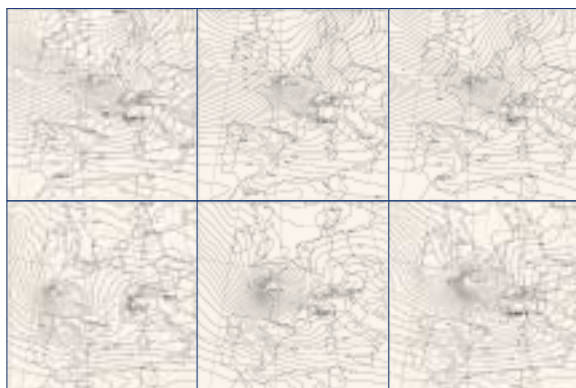
L'utilisation opérationnelle du 4D-VAR est l'aboutissement du projet de recherche IFS-Arpège, mené en collaboration avec le CEPMMT depuis 1987. Des détails sur ce projet et sur le 4D-VAR figurent dans le numéro spécial de *La Météorologie* paru en juin 2000 et consacré à la prévision numérique du temps.

Étude rétrospective de la prévision des tempêtes de 1999 par Arpège

Les tempêtes de la fin de l'année 1999 ont posé un triple problème aux équipes de prévision numérique : améliorer la cohérence de la prévision de la deuxième tempête, le modèle de l'époque ayant oscillé, d'un réseau à l'autre, entre d'excellentes indications et des ratés inquiétants, faiblesse heureusement compensée

par le travail d'interprétation des prévisionnistes ; comprendre les raisons pour lesquelles Arpège avait été et reste, après un an d'études partout en Europe, le seul modèle à avoir correctement prédit la première tempête à une échéance supérieure à 24 heures ; enfin, ne pas dégrader la simulation rétrospective des deux tempêtes lorsque des changements sont introduits dans la version opérationnelle.

Le troisième objectif a été atteint, essentiellement parce qu'il découlait beaucoup des deux premiers. Pour le premier objectif, on a su très tôt dans l'année 2000 qu'on pouvait se fier au passage en préparation de l'assimilation



Champ de pression au niveau de la mer le 26/12/99 à 6 h UTC (en haut) et le 27/12/99 à 18 h UTC (en bas). Comparaison entre les données observées (au milieu), les prévisions opérationnelles de l'époque à 18 et à 54 heures d'échéance (à gauche) et la simulation rétrospective avec les ingrédients du système opérationnel de début 2001 (à droite).

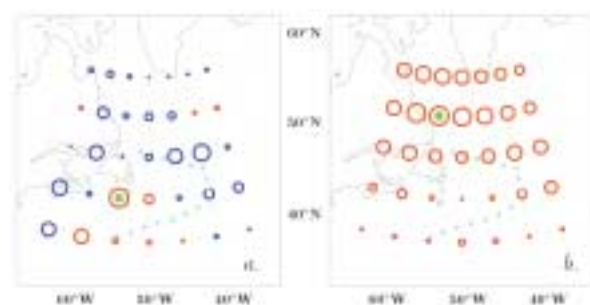
intermittente 3D-Var à l'assimilation continue 4D-Var et qu'en fait, une fois ce pas opérationnel franchi, ce qui fut chose faite en juin 2000, Arpège aurait une qualité homogène sur les simulations a posteriori de l'ensemble de la période du 25 au 27 décembre 1999.

Paradoxalement, c'est la compréhension des raisons de ce succès qui a posé le plus de problèmes. En simplifiant légèrement, on peut dire que la qualité des prévisions d'Arpège s'explique essentiellement par le réalisme de sa trajectoire le long des données assimilées. En effet, lors de simulations rétrospectives, d'autres modèles se comportent très bien lorsqu'ils repartent de cette trajectoire. Mais ce n'est ni le choix des données analysées ni la technique de leur prise en compte qui font la différence ; celle-ci provient de certains ingrédients physiques du modèle Arpège qui assurent la cohérence temporelle de cette trajectoire. Il reste à comprendre comment des détails apparemment aussi anodins que le taux de pénétration de l'air troposphérique au sommet de couches de surface caractérisées par une forte stabilité statique sur toute leur profondeur peuvent avoir une telle influence dans ces cas extrêmes.

Vers la détermination de la position optimale d'une observation

Un apport prometteur du renouveau en cours de la météorologie dynamique réside dans la notion d'observation adaptative : il s'agit de déployer au mieux des observations supplémentaires dans des zones sensibles pour la prévision à faire, par exemple celle d'une tempête, zones que l'on peut déterminer a priori mais qui ne sont pas les mêmes d'un événement à l'autre. Or l'étude de la sensibilité du système de prévision numérique — Arpège pour Météo-France — à la nature et à la position de telles observations doit a priori prendre en compte l'algorithme d'assimilation (ici, on a retenu une version 3D-VAR), et aussi la répartition des observations du réseau conventionnel de base, ce qui n'était pas fait dans les premières approches de ciblage mises en œuvre durant l'expérience Fastex 1997.

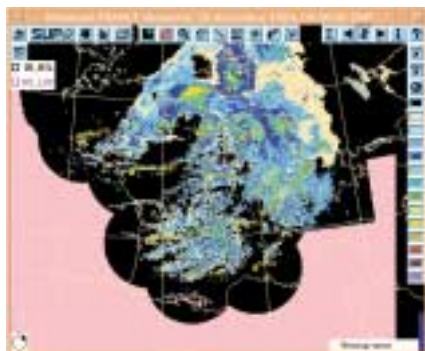
À une étape donnée de la démarche itérative d'inclusion successive d'observations isolées (un lieu, un paramètre), le critère de sélection d'une observation est fondé sur la réduction de la variance d'une fonction coût définie sur le résultat de la prévision associée, c'est-à-dire en définitive sur la réduction de l'incertitude de la prévision obtenue en incluant l'observation en question. L'observation sélectionnée à une étape donnée de la démarche est ensuite considérée comme conventionnelle pour l'étape suivante. On constate que le fait de tenir compte du système d'assimilation a effectivement une grande influence sur la sélection d'une position optimale.



Sélection d'une observation adaptative de température à 600 hPa parmi 35 positions. La position sélectionnée est repérée par l'étoile verte. À gauche, le critère utilisé ne tient pas compte du mode d'assimilation de la donnée ajoutée alors qu'à droite, il en tient compte.

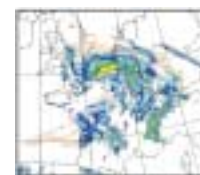
Le modèle Mésos-NH dispose de l'ensemble de ses fonctionnalités

Le modèle Mésos-NH, développé conjointement par le CNRM et le Laboratoire d'Aérodynamique, fonctionne maintenant sur de nombreux types d'ordinateurs : VPP Fujitsu de Météo-France et du CEPMMT, Nec SX5 de l'Idris, Origin2000, mais aussi stations de travail et PC sous Linux. À côté des procédures complètes adaptées à une gestion centralisée pour des utilisateurs de Mésos-NH partageant le même supercalculateur, il existe une procédure simplifiée d'installation pour des utilisateurs isolés. L'initialisation sur des cas réels accepte en entrée des données fournies par différents modèles : Arpège, Aladin, CEPMMT et Mocage pour les espèces chimiques.



Toutes les fonctionnalités d'une simulation, y compris les simulations emboîtées, sont parallélisées. L'efficacité de la version multiprocesseur est correcte grâce au travail d'optimisation. De nombreux diagnostics de post-traitement ont été ajoutés afin de faciliter le dépouillement des simulations.

Le modèle Mésos-NH a été testé sur la première tempête de décembre 1999. Il donne des résultats comparables à ceux du modèle Arpège, dont il emprunte les conditions initiales, ce qui confirme que la dynamique hydrostatique est suffisante pour ce cas. Le coût de cette simulation est environ 30 fois supérieur au coût de la simulation Arpège de référence. Ce cas a aussi montré le fort potentiel de la technique des modèles emboîtés, qui permet d'obtenir une description fine d'un phénomène rapide et violent sans aucun problème de couplage aux frontières.



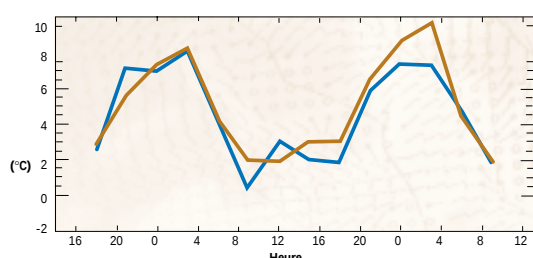
Champ d'intensité de précipitations le 26 décembre 1999 à 6 h UTC. Simulation par le modèle Mésos-NH en configuration "simulations emboîtées" (résolution 10 km).

Échos observés par la mosaïque radar pour la même situation que ci-dessus.

Processus atmosphériques

Indispensable pour l'amélioration de la compréhension et de la prévision des phénomènes météorologiques et climatiques, l'étude des processus atmosphériques se conduit à toutes échelles, et met en jeu une subtile complémentarité entre expérimentation physique et utilisation de modèles comme de véritables laboratoires numériques.

Simulations numériques à échelle fine sur la région parisienne



Évolution de l'écart de température entre Paris et la campagne du 11 juillet 1994 à 18 h au 13 juillet à 8 h. En rouge, simulation par le modèle Mésos-NH ; en bleu, observation.

L'étude de la météorologie urbaine fait partie des priorités de Météo-France. La structure tridimensionnelle d'une ville ainsi que les matériaux de construction eux-mêmes provoquent des perturbations radiatives, énergétiques, hydrologiques et aérodynamiques. De ce fait, la ville modifie considérablement le climat à l'échelle locale. Le modèle Mésos-NH est employé pour décrire et quantifier ces effets dynamiques et thermodynamiques sur l'atmosphère dans le cas de Paris. Cette étude a porté sur une dizaine de cas de tempêtes, de brouillard ou de conditions anticycloniques.

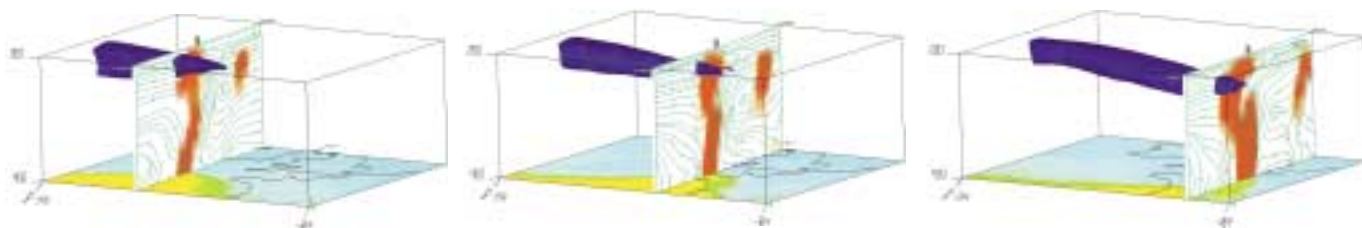
Le schéma de surface TEB, prenant en compte la géométrie urbaine tridimensionnelle, a été développé et inclus dans le modèle Mésos-NH. Les différentes simulations à 1 km de résolution ont été validées grâce au réseau d'observation au sol et au radiosondage de Trappes.

Il en ressort que la ville a peu d'influence sur la couche limite pour les cas de tempête. Pour les autres cas, le modèle Mésos-NH restitue très fidèlement (au degré près) l'îlot de chaleur urbain, ainsi que sa variabilité temporelle (écart maximum la nuit entre la ville et la campagne). La ville est aussi plus sèche que la campagne, surtout en journée. La formation d'une brise urbaine intense (5 m/s) est mise en évidence pour des vents synoptiques faibles (moins de 5 m/s), alors qu'un panache urbain se développe pour des vents plus forts. De même, sur les deux cas d'étude, la formation, l'extension spatiale et la dissipation du brouillard sont simulées de manière assez réaliste.

Vers une meilleure compréhension des tempêtes de décembre 1999

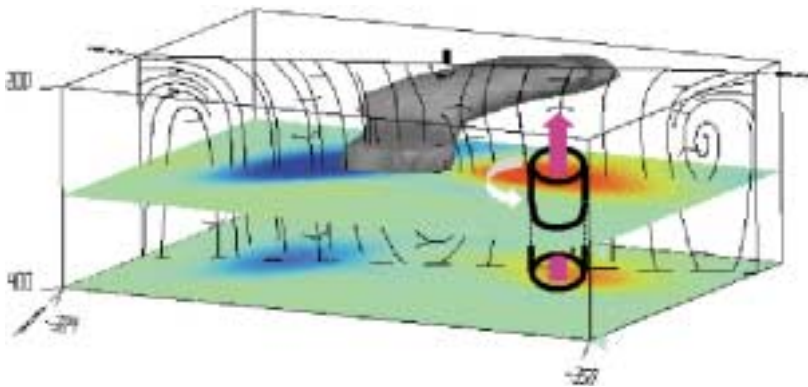
Une synthèse des mécanismes mis en jeu lors des deux tempêtes de décembre 1999 a été réalisée et largement diffusée sur le site Internet de Météo-France. Elle s'appuie largement sur les enseignements de la campagne de mesures Fastex de 1997. Rappelons quelques éléments clés de la dynamique de ces deux tempêtes. En quelques jours, un puissant courant-jet d'ouest s'installe sur l'Atlantique. Mais, à lui seul, un courant-jet ne permet pas l'apparition rapide de dépressions. La zone d'accélération (l'entrée du courant-jet), la zone de décélération (sa sortie), des tourbillons qui circulent le long du jet sont autant d'éléments capables de faire apparaître des dépressions nouvelles ou d'amplifier des tourbillons déjà présents.

Dans le cas, classique, de la seconde tempête, un tourbillon précurseur situé au voisinage de la tropopause est l'élément clé de la dynamique. Le cycle d'évolution de la première tempête est plus complexe.



Une dépression naît le 24 décembre sous la zone d'accélération du courant-jet au large de Terre-Neuve. Jusqu'au 26 décembre à 0 h UTC, la dépression se propage vers l'est sous l'effet du jet et d'un tourbillon précurseur situé à la tropopause. À partir de cet instant, la dépression se trouve sous l'effet du mouvement ascendant associé à la sortie du courant-jet. Le développement explosif de la tempête se produit lors de la traversée du courant-jet. Enfin, le 26 décembre à 6 h UTC, au moment où la tempête frappe l'Ile-de-France, l'interaction entre le tourbillon de basses couches et le courant-jet cesse. La phase de développement explosif est achevée.

Inversion du tourbillon potentiel : condition d'équilibre généralisée et accès direct à l'attribution de la vitesse verticale



Les dépressions des moyennes latitudes naissent et se développent sous l'effet de l'interaction entre des structures préexistantes situées dans les basses couches et au voisinage de la tropopause. Une seule variable, le tourbillon potentiel, suffit à décrire complètement les structures d'altitude. Grâce à l'inversion du tourbillon potentiel, il est possible d'attribuer le vent et la température ici, à un élément de tourbillon potentiel situé là. On peut ainsi

quantifier les relations de cause à effet que l'on échafaude. Or, pour inverser le tourbillon potentiel, on doit spécifier une condition d'équilibre reliant le vent et la température.

Une nouvelle méthode d'inversion du tourbillon potentiel utilisant implicitement la condition d'équilibre la plus générale et la moins filtrante que l'on puisse imaginer a été développée au Cnrm. En pratique, l'utilisation de l'initialisation dynamique du modèle Arpège au sein même de l'inversion permet à la solution d'être dans le même état d'équilibre que si elle était le résultat d'une prévision. Grâce à cette nouvelle méthode, on peut calculer la vitesse verticale associée à un élément de tourbillon potentiel. L'exemple de la figure montre que l'on peut ainsi identifier la contribution du précurseur d'altitude à la cyclogénèse de surface.

La figure représente le précurseur de la tempête des 27 et 28 décembre 1999 repéré le 27/12 à 0 heure au milieu de l'Atlantique (en gris) et la vitesse verticale (représentée par des lignes de courant et par des plages de couleur) qui lui est associée. Le cylindre représente un élément de volume de fluide soumis à l'influence du mouvement vertical associé au précurseur. Plus précisément, le mouvement vertical (résumé par les flèches blanches) contribue à l'étirement du volume de fluide qui entraîne la croissance du tourbillon de basses couches caractéristique de la tempête naissante.

Vers la possibilité d'assimiler des observations d'eau nuageuse ou précipitante.

Un schéma de condensation de grande-échelle qui permet de prévoir explicitement l'évolution des contenus tridimensionnels en eau nuageuse et précipitante, a été introduit dans le modèle global Arpège, et validé sur des systèmes nuageux extratropicaux de la campagne Fastex, au moyen de différents types de données observées (satellites, radar, avion) ou simulées par des modèles à haute résolution.

Dans l'optique d'une assimilation variationnelle d'observations nuageuses ou de précipitations fournies par les instruments des satellites ou les radars au sol, les versions linéaire-tangente et adjointe du schéma de condensation ont été codées et testées.

Le bon comportement de la version linéarisée du schéma, essentiel dans l'assimilation variationnelle de données, a été vérifié sur des périodes de quelques heures.

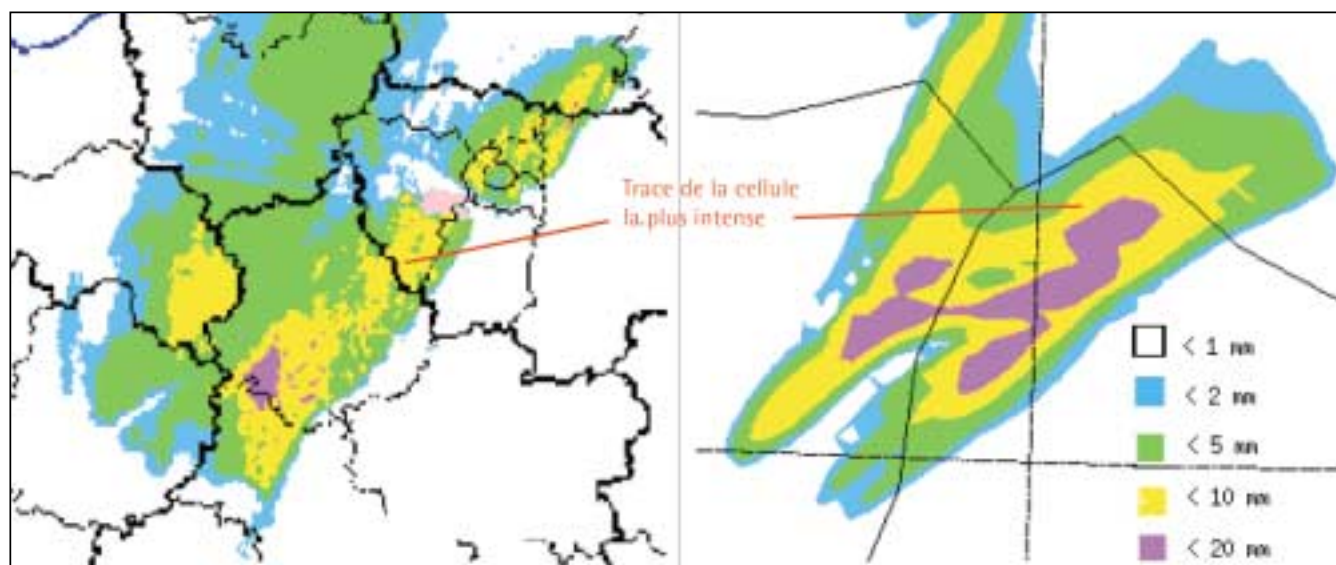
La version adjointe du schéma a été ensuite utilisée pour mener à bien des expériences de sensibilité. Il s'agit d'estimer comment un aspect choisi de la prévision est modifié lorsqu'on perturbe légèrement l'état du modèle plusieurs heures à l'avance. Ces premiers calculs indiquent que des perturbations d'eau condensée peuvent influencer de manière significative les autres champs météorologiques quelques heures plus tôt, par le biais des couplages entre variables au cours de l'intégration du modèle adjoint.

Ces résultats prometteurs permettent d'envisager l'utilisation du schéma développé dans des expériences d'assimilation d'information sur les nuages et les précipitations, dont la complexité ira croissante.

Étude numérique de l'orage du 30 mai 1999

Le dimanche 30 mai 1999, entre 8 h et 9 h UTC, un orage violent a balayé Paris et sa région, faisant trois victimes et occasionnant de gros dégâts matériels. Cet orage était un système monocellulaire caractérisé par de très fortes rafales de vent (112 km/h au Bourget) et des précipitations conséquentes, mais sur un laps de temps assez court.

Une cellule est née sur la Touraine, sur le flanc sud-est d'un plus gros système. Sur l'Eure-et-Loir, cet orage qui se déplaçait dans une direction nord-est s'est séparé en deux cellules distinctes. À l'ouest, une cellule, peu intense, a continué à progresser vers le nord, alors que la cellule située plus à l'est s'est intensifiée jusqu'à Paris et sa banlieue nord-ouest.



À gauche : Cumul de pluie observé par le radar de Trappes le 30 mai 1999 de 6 h à 9 h 30 UTC. À droite : Cumul de pluie sur une durée de 2 h 45, simulé par le modèle Mésos-NH. Le modèle reproduit la séparation d'une cellule en deux, la cellule de droite étant la plus intense, en accord avec les observations et la théorie.

Des simulations numériques à échelle fine (2,5 km) ont été effectuées avec le modèle Mésos-NH dans le but de mieux comprendre ce système. Mésos-NH a bien reproduit le phénomène de séparation d'une cellule en deux cellules distinctes — même si les échelles spatio-temporelles sont différentes. On a pu ainsi retrouver nombre des éléments des théories établies pour les systèmes supercellulaires affectant les États-Unis (production de tourbillon horizontal par cisaillement vertical et conversion en tourbillon vertical, rôle des précipitations dans la séparation en deux cellules, etc.). Le CNRM cherche également à confirmer sur ce cas l'intérêt de certains diagnostics utilisés aux États-Unis pour la prévision de tels systèmes.

Simulation d'une ligne de grains Sahélienne grâce au modèle Mésos-NH : comparaison avec les observations

Pour la première fois il a été possible de simuler explicitement le cycle de vie complet d'une ligne de grains Sahélienne, observée durant l'expérience Hapex-Sahel.

Un domaine de grande étendue à moyenne résolution (30 km) permet la simulation des structures de grandes échelles au sein desquelles se développe la ligne de grains. Celle-ci, simulée à plus forte résolution (5 km) sur un domaine plus réduit, se déclenche naturellement par effet diurne sur le relief de l'Aïr, conformément aux observations. La ligne de grains atteint sa phase mature rapidement et se propage ensuite vers Niamey, qu'elle atteint une douzaine d'heures plus tard.

Les comparaisons avec les observations sol, radar et satellites sont remarquables. Cette simulation est initialisée et forcée latéralement à l'aide des réanalyses Era du Ccpmm. Par contre, il est important de corriger certains excès d'humidité conduisant à des instabilités inconditionnelles, et de prescrire l'humidité des sols selon la climatologie Gswp.

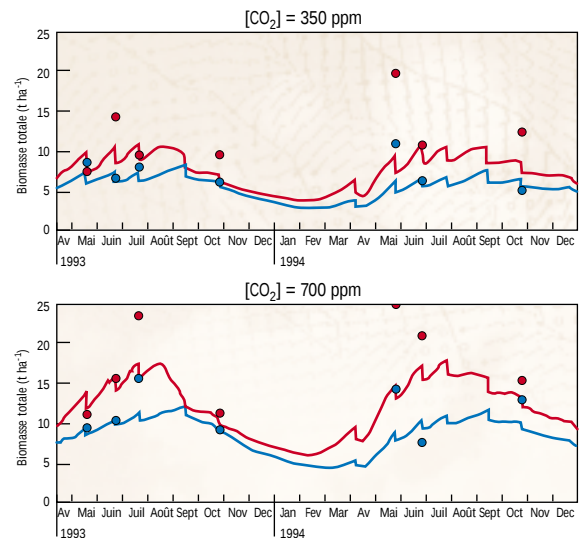
Interaction entre l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique et la disponibilité en azote du sol

L'effet du climat sur la végétation doit être décrit pour accroître le réalisme des simulations climatiques. Une nouvelle version du modèle Isba-A-gs a été développée afin de mieux prendre en compte l'ensemble des facteurs limitants de l'environnement sur la croissance des végétaux.

Tout en conservant la simplicité de l'approche Isba et un nombre de paramètres réduit, le nouveau modèle permet de simuler de manière réaliste la réponse de la biomasse et de la surface foliaire d'un couvert végétal à un changement climatique, quel qu'il soit (augmentation de température, de concentration en CO₂, etc.).

Ce nouveau schéma a été validé sur des données de la station Inra d'Agronomie de Clermont-Ferrand portant sur une culture en serre d'un gazon (ray-grass) en 1993 et 1994. Dans ce jeu de données, l'effet sur de nombreuses caractéristiques du couvert végétal de divers traitements d'alimentation azotée et des conditions atmosphériques (y compris la concentration en CO₂) est décrit.

Ces mesures ont permis de vérifier les bonnes performances du modèle. La figure décrit l'évolution de la biomasse totale (feuilles et racines) pour quatre traitements. Les variations rapides de biomasse correspondent aux 11 tontes réalisées. On voit que l'enrichissement en CO₂ atmosphérique a un effet comparable à l'enrichissement en azote sur la biomasse totale du ray-grass, conformément aux observations.



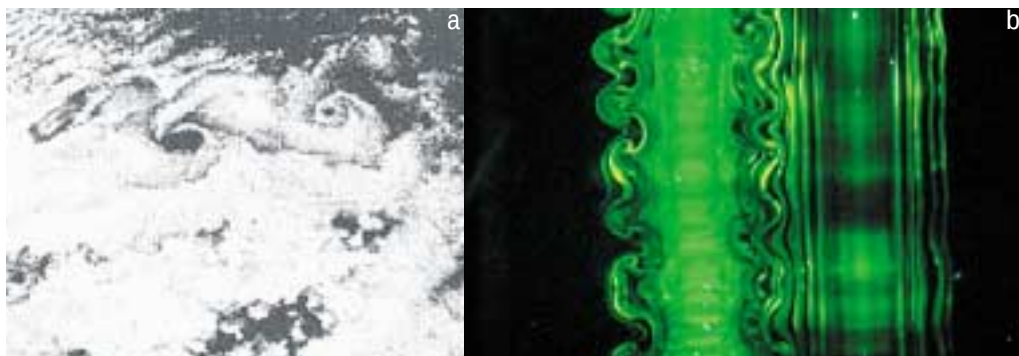
Evolution simulée (courbes) et observée (points) de la biomasse totale d'une culture de ray-grass régulièrement tondue, en conditions de concentration en CO₂ actuelle (CO₂ = 350 ppm) et concentration en CO₂ doublée (CO₂ = 700 ppm), pour un apport d'engrais azoté de 160 kg ha⁻¹ an⁻¹ (en bleu) et de 530 kg ha⁻¹ an⁻¹ (en rouge).

Pourquoi certains anticyclones sont-ils invisibles ?

Contrairement aux cyclones, les anticyclones de taille moyenne (quelques dizaines de kilomètres de diamètre) sont rarement observés dans l'atmosphère. La photo satellite (figure (a)) montre, par exemple, des tourbillons dans le sillage de l'île de la Guadeloupe. Seuls les cyclones sont visibles, il n'y a pas d'anticyclones bien qu'a priori ceux-ci devraient être présents.

Pour étudier ce phénomène au Cnrm, nous utilisons une plaque tournante (diamètre 2.5m) sur laquelle est placée une cuve remplie de fluide stratifié. Deux tourbillons contra-rotatifs verticaux sont générés à l'aide de deux volets que l'on referme rapidement.

Pour des vitesses de rotation des tourbillons du même ordre que celle de la cuve, on observe que le cyclone et l'anticyclone ne se comportent pas de la même manière. Ce dernier est sujet à des instabilités tandis que le cyclone reste stable. La figure (b) montre une coupe verticale passant par l'axe des deux tourbillons. Cette coupe a été réalisée à l'aide d'un plan lumineux laser et les tourbillons sont colorés par de la fluoresceïne. On constate ainsi que l'anticyclone, qui est à gauche, présente une série d'anneaux tourbillonnaires sur sa périphérie. Ces tourbillons sont dus à une instabilité centrifuge et désorganisent complètement l'anticyclone. Une instabilité oscillatoire affectant l'anticyclone a également été observée pour une autre gamme de paramètres. Il y a donc fort à penser que les anticyclones au dessus de la Guadeloupe sont détruits par de telles instabilités et sont donc inexistantes.



(a) Photo satellite au-dessus de la Guadeloupe (Etling, Geowew, 8, pp 91-120 (1990)).

(b) Coupe verticale au sein des deux tourbillons : l'anticyclone est à gauche et le cyclone à droite.

Mesures de la stabilité du manteau neigeux sur les pentes de La Botte



Test de stabilité,
dit du "bloc glissant".

Chaque année, des skieurs sont emportés dans des avalanches qu'ils ont généralement déclenchées eux-mêmes. Mieux comprendre comment une seule personne arrive à mettre en mouvement des masses de neige atteignant souvent plusieurs centaines de tonnes permettra de mieux prévoir ces avalanches. L'échelle spatiale choisie pour cette étude est celle d'une pente "suffisamment raide". Des mesures (sondage par battage, profil stratigraphique, tests de stabilité) y sont effectuées pour répondre à plusieurs objectifs : appréhender les effets locaux en comparant les mesures in situ aux résultats de la chaîne Safran-Crocus-Meptra de modélisation de l'évolution du manteau neigeux et du risque d'avalanche à l'échelle du massif ; acquérir une connaissance pratique des tests existants de stabilité du manteau neigeux ; évaluer la représentativité des profils et sondages dans des pentes, compte tenu de la variabilité de l'enneigement ; étudier les mécanismes de rupture de plaque (répartition des contraintes, propagation des cassures, influence

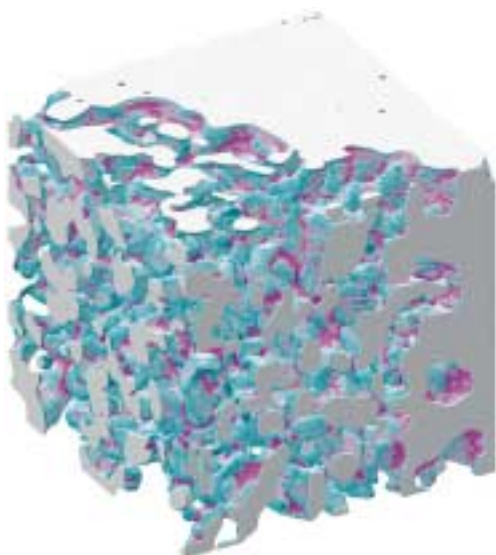
des températures ou de la présence de fines croûtes de regel) ; alimenter un modèle numérique à trois dimensions de comportement mécanique de la neige sur une pente.

Le site choisi est la montagne de La Botte, dans le massif de Belledonne vers 2200 m d'altitude, qui répond à plusieurs critères dont l'accessibilité, la topographie avec des pentes régulières d'expositions variées, la présence d'un poste du réseau d'observation nivométéorologique. La campagne de l'hiver 1999-2000 a surtout permis de tester la faisabilité de ces mesures. Cette expérimentation va se poursuivre en essayant de cibler, lors des prochaines saisons, des situations nivologiques plus instables.

Extraction de paramètres géométriques de surface de la neige à partir d'images 3D

Les comportements physiques et mécaniques de la neige, très changeants, sont régis par l'évolution de la forme des grains (métamorphoses) et de leur agencement dans l'espace (microstructure). En l'absence de gradients thermiques notables, la nature de ces évolutions est régie par la répartition spatiale des courbures locales sur l'assemblage des grains. La vitesse d'évolution dépend quant à elle principalement de la surface spécifique de la neige considérée.

Un modèle d'évaluation des courbures à partir d'images numériques 3D a été mis au point il y a 2 ans au Cnrm. Ces images, qui provenaient au départ de coupes sériées en chambre froide, sont désormais obtenues par tomographie aux rayons X à l'Esrif (Synchrotron de Grenoble). La neige, d'abord consolidée sur le terrain par un produit de remplissage, est gardée au froid et à l'abri du givre au cours de la tomographie dans une petite enceinte réfrigérée transparente (développée conjointement avec le Lgge).



Carte de courbures d'un échantillon de neige fragile (faces planes) prélevé sur une cassure d'avalanche. Taille du cube : 5 mm. Les régions convexes apparaissent en bleu et les concavités en mauve.

Le principe de la tomographie consiste à radiographier l'échantillon sous tous les angles (~1000 images), puis à reconstruire numériquement son image 3D. Les qualités particulières du rayonnement synchrotron (brillance, parallélisme) associées à une caméra très performante (type Frelon) permettent d'obtenir des images de 6003 voxels avec une résolution de 10 microns (figure).

En complément de la courbure, un modèle de calcul de la surface spécifique vient d'être développé au Cnrm : ce paramètre, caractéristique de l'énergie de surface disponible d'un type de neige, devrait permettre de paramétrer de manière physique les métamorphoses dans le modèle Crocus. Un travail de thèse est actuellement en cours pour simuler les métamorphoses d'isothermie et de neige humide à partir d'images 3D, par itération sur les calculs de courbure.

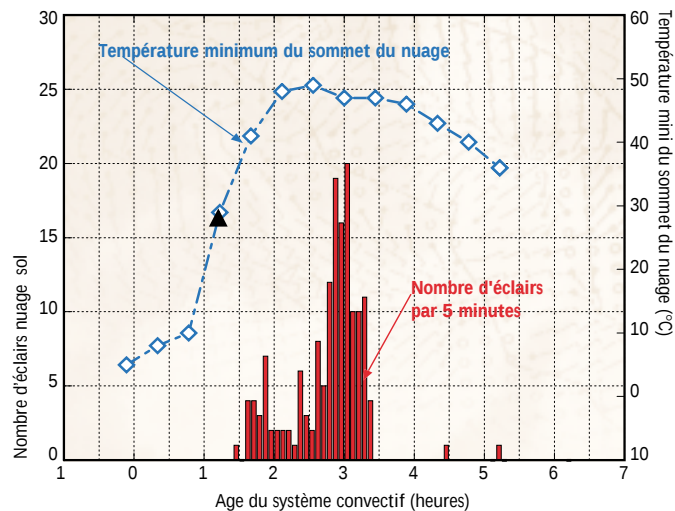
Activité électrique initiale des systèmes convectifs

De récents travaux, menés principalement aux Etats Unis, indiquent que l'activité électrique des systèmes convectifs est un bon marqueur de leurs développement et régénération. Dans le but d'évaluer leur applicabilité en Europe pour la prévision immédiate, Météo-France a développé et affiné une méthode automatique d'association des éclairs nuage-sol observés par le réseau Météorage, aux enclumes nuageuses diagnostiquées par le système Isis basé sur l'exploitation de l'imagerie infrarouge de Météosat.

La méthode prend en compte le décalage temporel entre le passage du radiomètre de Météosat sur la France et les données de foudre, ainsi que l'erreur de parallaxe sur la localisation d'un pixel Météosat relatif à un nuage élevé. Des corrections compensent le mouvement du système convectif entre la date de l'éclair et celle du passage du radiomètre sur ce système, et l'inclinaison du nuage qu'engendre le cisaillement du vent.

Cette paramétrisation, dont le but est de bien décrire le cycle de vie électrique des systèmes convectifs, a permis de traiter un très large jeu de données composé de 1582 systèmes. On a ainsi pu étudier la précocité de détection de ces systèmes par Isis, et la température du sommet du nuage à partir de laquelle apparaissent les premiers éclairs.

60 % des systèmes convectifs sont ainsi détectés avant toute occurrence d'éclairs nuage-sol. Les premiers éclairs d'un système convectif apparaissent de manière significative à partir du moment où la température du sommet du nuage est inférieure ou égale à -10°C . On a pu montrer objectivement dans quelle mesure une grande proportion des systèmes convectifs étudiés présente un fort développement vertical au moment de l'apparition de leurs premiers éclairs (figure).



Variations temporelles du nombre d'éclairs par intervalle de 5 minutes (histogramme) et de la température du sommet du nuage (en losange bleu) d'un système convectif diagnostiqué par le système Isis le 28 juillet 1994. Le premier éclair (triangle noir) apparaît pendant la phase rapide du développement vertical du système.

Préparation d'actions en Prévision Immédiate

La Prévision Immédiate, qui recouvre la signalisation des phénomènes météorologiques significatifs et leur prévision pour les échéances inférieures à six heures, est un des domaines prioritaires pour Météo-France. Afin d'améliorer ces prestations, un travail d'état des lieux a été mené en 2000, sous la forme d'un avant-projet, qui a retenu diverses actions prioritaires.

Dans le domaine de l'observation, les priorités portent sur l'expérimentation des moyens automatiques d'observation au sol, au travers du programme Radome de stations conventionnelles à autonomie de signalisation, sur le développement des outils de supervision de ces données et enfin sur la définition d'un réseau de capteurs de temps présent.

Certaines actions engagées autour du programme Aramis et du Centre d'Application Satellite en Prévision Immédiate de Météosat Seconde Génération doivent aussi être confortées, comme la mise à disposition d'une mosaïque radar améliorée et extrapolée et des développements de classification nuageuse et de suivi de systèmes convectifs.

Concernant l'organisation de la production en Prévision Immédiate, la formalisation accrue de la fonction de signalisation est envisagée à partir d'une "Base de données Expertisée de Phénomènes Prévus". La poursuite de l'action de refonte des procédures d'alertes figure aussi dans les priorités.

Enfin, en matière de production, les trois axes envisagés sont l'élaboration automatique de messages d'alertes, la prévision automatique de précipitation à deux heures d'échéance, et l'expérimentation d'une prévision immédiate à forte composante experte sur quelques lieux géographiques, dont Paris.

L'examen de ces priorités, de leur impact sur les services, et des modalités de leur possible mise en œuvre, a été entamé.

Campagnes expérimentales

Dans le domaine des programmes expérimentaux, auquel contribue activement le CNRM, l'activité de l'année 2000 a concerné toute une famille de campagnes à divers stades de leur déroulement : gestation, expérience de terrain et travail de fond sur les données récoltées durant les années précédentes.

Pomme, une expérience à multiples facettes

Le programme Pomme a pour objectif de comprendre les mécanismes qui contrôlent la subduction des eaux dans l'Atlantique nord-est. Lorsqu'elles s'enfoncent dans la thermocline, ces eaux modales emportent avec elles les propriétés qu'elles ont acquises au cours de l'hiver au contact de l'atmosphère : chaleur, contenu en sel, carbone, etc. Ce programme nécessite de collecter de nombreuses mesures sur une large gamme d'échelles, étalées sur une année de l'automne 2000 à l'automne 2001, dans la zone comprise entre les Açores et le Portugal, et inclut un important volet consacré aux interactions entre l'océan et l'atmosphère. Il rassemble une large communauté d'océanographes, de biologistes, de météorologistes venant de laboratoires du CNRS, du Shom, de l'Ifremer et du CNRM.

À la fin du mois d'août 2000, dans le cadre de Pomme, Météo-France a participé à la mise à l'eau d'une bouée ancrée par le navire océanographique *D'Entrecasteaux* du Shom sur des fonds de 2100 mètres par 41,5° N et 20° W. Il s'agit d'une structure flottante d'une masse de 3,7 tonnes, de 2,8 mètres de diamètre et de 6 mètres de haut, équipée de deux stations météorologiques indépendantes et d'un ensemble de capteurs de rayonnement.

Ancrage,
pour la campagne
Pomme, d'une bouée
au large des Açores
par 2100 m de fond.



L'expérience Ozone régional

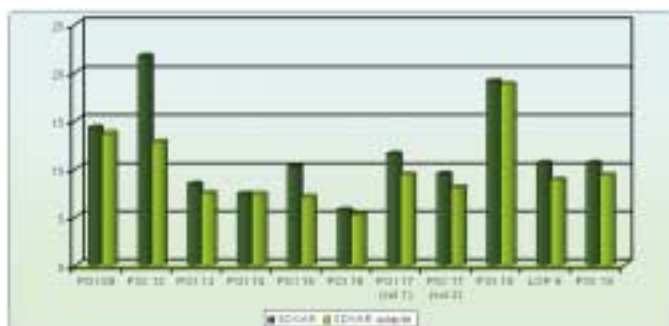
L'objectif de cette expérience organisée par le Laboratoire d'aérologie était d'étudier l'extension régionale des épisodes d'ozone en basses couches, en relation avec les données au sol des réseaux de surveillance de la pollution atmosphérique du nord et du sud de la France.

La campagne s'est déroulée du 1^{er} juin au 31 juillet 2000, les vols du *Merlin IV* de Météo-France étant déclenchés sur alerte, pour un total de 40 heures de vol. Cet été a été particulièrement peu propice aux situations de pollution puisque seulement 6 vols de mesure ont été effectués, soit 12 heures de vol. Le Merlin a sillonné la France de Brétigny à Rouen, Strasbourg, Toulouse, Nice, Marseille et retour.

Prévision ciblée de dépressions : Test d'un schéma 3D-Var adaptatif

Le concept des observations ciblées (observations visant à contrôler l'erreur initiale d'un élément prévu donné) pour la prévision des dépressions a été testé pour la première fois au cours de la campagne de mesures Fastex sur l'Atlantique. Ce test en grandeur réelle a été suivi d'autres sur l'océan Pacifique, ce qui a conduit à une mise en œuvre opérationnelle par les services américains. L'évaluation de ce type de données sur Fastex a montré l'importance de la méthode utilisée pour les assimiler. En particulier, il a été montré que l'apport des observations ciblées pour la prévision des dépressions est globalement nul avec une assimilation 3D-Var et globalement positif avec une assimilation 4D-Var.

C'est dans cet esprit que le Cnrm a testé une modification du 3D-Var qui permette d'optimiser la prise en compte de ces observations. L'idée est d'introduire localement dans le schéma 3D-Var une structure dite " sensible ", dont l'importance dans l'analyse est réglée par les données. Cette structure projette l'information des observations d'une manière adaptée à l'évolution de la dépression visée,



et non d'une manière climatologique. On peut dire que l'on adapte l'analyse 3D-Var à la prévision de la dépression. On retrouve alors le résultat établi en 4D-Var : une prise en compte optimale pour la prévision des dépressions de Fastex de ces observations, mais pour un coût en temps calcul plus modique correspondant à celui d'un schéma 3D-Var.

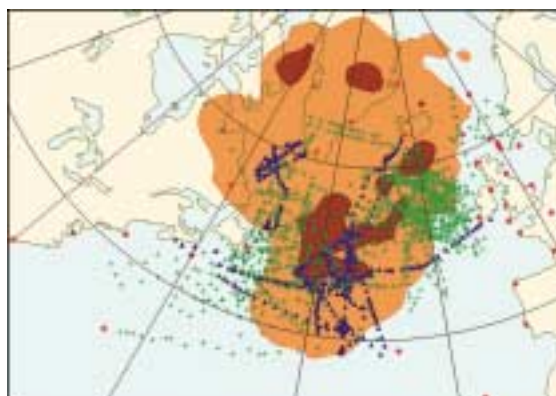
Erreur de prévision des dépressions de Fastex par comparaison aux observations à l'aide d'un score intégré sur tous les types d'observations. L'erreur est systématiquement réduite dans le cas du processus d'analyse adaptatif.

Impact des données Fastex dans la ré-analyse de l'expérience

La campagne Fastex a fait l'objet d'une ré-analyse complète avec le nouveau schéma d'assimilation 4D-Var. Cette ré-analyse constitue une description de référence de l'ensemble des cyclogénèses sur l'Atlantique Nord pendant les mois de janvier et février 1997. On tire ainsi bénéfice du jeu exceptionnel de mesures additionnelles collectées durant cette période : en particulier les radiosondages plus fréquents sur le pourtour du bassin Nord Atlantique ou fournis par les quatre bateaux déployés durant l'expérience, auxquels s'ajoutent les lâchers de dropsondes effectués durant les différentes phases du cycle de vie des systèmes observés. Deux ré-analyses supplémentaires de l'expérience ont été réalisées : une en mode 3D-Var et une autre en mode 4D-Var, mais sans les données propres à l'expérience dans le but d'évaluer l'impact de ces données.

On notera que ces ré-analyses ont constitué un banc d'essai du schéma 4D-Var avant son basculement en mode opérationnel : la comparaison de la ré-analyse 4D-Var à la ré-analyse jumelle en mode 3D-Var a montré un avantage sensible du 4D-Var pour la qualité des prévisions issues de ces analyses.

La statistique des écarts, sur les deux mois, entre les analyses avec et sans données Fastex montre que ces différences sont du même ordre de grandeur que l'incertitude sur l'analyse dans cette zone (voir figure). Elle montre aussi une structure des écarts orientée le long du trajet moyen des dépressions. Ces éléments indiquent un poids significatif des données Fastex dans la description du cycle de vie des dépressions fournie par la ré-analyse des situations de l'expérience.



Ecart-type des écarts entre les ré-analyses 4D-Var avec et sans données Fastex pour le géopotentiel à 500 hPa (statistique sur 2 mois ; valeurs > 5 msp en ocre clair et > 7 msp en ocre foncé). Sondages Fastex : bateaux (triangles verts), dropsondes (croix bleues) et côtiers (points rouges).

Premiers résultats de l'expérience MAP

Cette année a vu le début de l'exploitation scientifique du programme MAP 1999, avec des travaux sur le foehn et sur le développement de la convection sur les Alpes. Des simulations numériques ont été effectuées avec le modèle Mésos-NH en descendant jusqu'à l'échelle kilométrique nécessaire à l'étude de

ces deux phénomènes. Trois périodes d'observations intensives (POI n° 2, 3 et 14) ont été plus particulièrement étudiées et les simulations ont été comparées aux mesures réalisées pendant la campagne.

On constate que le foehn dans la vallée du Rhin est essentiellement relié aux ondes de gravité qui se développent sur le relief alpin. Il se traduit par une descente de l'air qui se comprime et se réchauffe. Cet air chaud est fortement canalisé et accéléré par les

reliefs de petite échelle, mais le déclenchement du phénomène est piloté par les conditions de grande échelle, qui fixent le régime d'écoulement sur le massif alpin dans son ensemble. Ce comportement a pu être confirmé sur le cas de la POI n° 2, pendant laquelle la vitesse du vent augmente tout au long de la journée, amenant un renforcement et un déferlement des ondes au-dessus de la vallée du Rhin.

De même, la convection sur la plaine du Pô se développe par flux de sud sur des convergences entre l'air chaud et humide qui franchit les Apennins, en amont des Alpes suisses, et le vent de barrière qui souffle le long de ce massif. Ici encore, c'est le régime général de l'écoulement sur l'ensemble des Alpes et sur les massifs secondaires qui semble déterminer la distribution des pluies orageuses. Ce régime varie fortement avec la vitesse du vent de sud, qui se renforce à l'approche de fronts froids en favorisant le soulèvement orographique et la libération de l'énergie potentielle convective.

Toga-Coare : Interactions entre les jets subtropicaux et l'activité convective

La base de données Toga-Coare a permis d'étudier les interactions entre les jets subtropicaux et l'activité convective. Après avoir caractérisé l'activité des ondes associées aux jets sub-tropicaux à l'aide de la méthode spectrale d'Hayashi, les corrélations spatio-temporelles décalées entre l'activité convective et l'écoulement analysé à 200 hPa par le Ccpmm ont été étudiées.

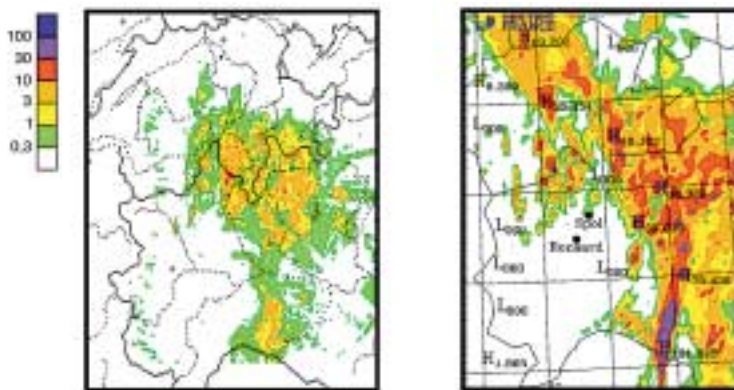
On montre ainsi que les phases de forte activité convective durant Toga-Coare sont précédées (20-25 jours) par un flux de nord issu des oscillations du jet sub-tropical nord (~30°N) de 3 à 4000 km plus à l'ouest. Un signal du même type, mais plus faible est également détecté au sud. Il se pourrait que ce fort signal soit en relation avec les phases de suppression de la convection précédant les phases actives, à travers le mécanisme d'intrusion d'air sec. Cette analyse met également en évidence des modes de type Madden-Julian.

La campagne Ramcès

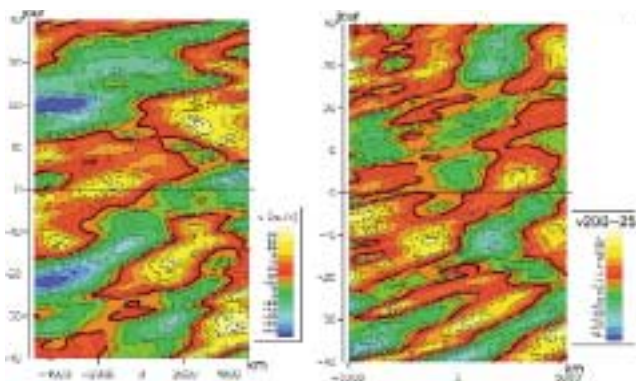
La campagne Ramcès a pour but l'étude des gaz à effet de serre (CO₂, CH₄) au dessus de la forêt d'Orléans. Le Piper Aztec de Météo-France participe à cette campagne pour la deuxième année consécutive. Il effectue régulièrement un vol tous les quinze jours. L'avion acquiert les paramètres météorologiques standard et réalise aussi des prélèvements d'air en bouteilles qui sont analysés après le vol.

Intensité de précipitations (en mm/h) le 20 septembre 1999 à 1 h UTC sur un domaine couvrant la plaine du Pô et la Suisse (échelle logarithmique de 0,33 à 100 mm/h).

À gauche, observation du radar de Monte-Lema, près du Lac Majeur ; à droite, simulation par le modèle Mésos-NH. Dans la partie nord-est de la figure, le radar ne peut détecter la pluie en raison des masques orographiques, ce qui explique le désaccord avec le modèle.



Analyse des corrélations retardées entre l'activité convective sur la zone équatoriale Pacifique Est durant l'expérience Toga-Coare et l'activité des ondulations des jets subtropicaux nord et sud. On note au nord un signal précurseur de l'activité convective (~20-25 jours), caractérisé par un fort écoulement vers le sud environ 4000 km plus à l'ouest.

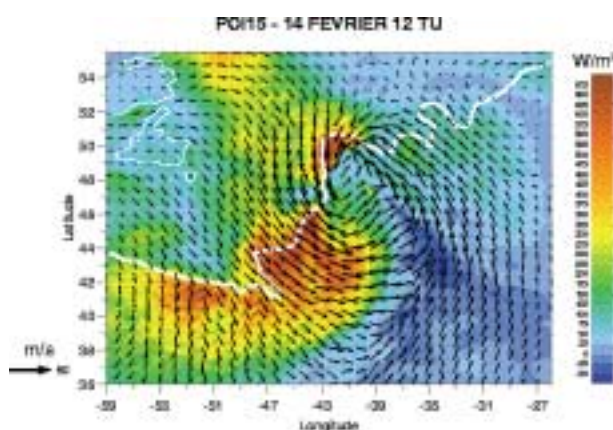


La sonde Nevzorov du GKSS (mesure de la teneur en eau totale).



Impact des flux de surface sur les perturbations atmosphériques

Lors de la période d'observation intensive n°15 (1997) de la campagne Fastex, une dépression atmosphérique a traversé le bassin Atlantique Nord entre Terre-Neuve et l'Islande. La baisse de pression atteignait 17 hPa en 7 heures lors de la traversée du courant Dérive Nord Atlantique du côté froid vers le côté chaud. Afin de comprendre le rôle des flux de surface sur la dynamique de cette dépression, trois simulations numériques ont été effectuées : l'une avec des températures de surface de la mer réalistes et deux autres avec des températures de surface uniformes à 3°C et 15°C.



Dans la simulation réaliste, les flux sont négatifs dans le secteur chaud et deviennent très fortement positifs dans le secteur froid (figure). L'occlusion de la perturbation s'intensifie lorsqu'elle rentre en phase avec le front de températures de surface de la mer. Cette configuration accroît la source de vitesse verticale associée au flux de flottabilité. Avec la suppression du front de températures de surface, les flux de surface sont profondément différents et modifient la dynamique de la perturbation : a) les températures uniformes réduisent l'intensité du front froid ; b) la source des vitesses verticales par flux de flottabilité dans l'occlusion est plus faible avec des

températures de surface uniformes basses; c) de même avec des températures de surface élevées, mais dans ce cas l'épaisseur du réchauffement dans l'occlusion par les flux de surface est augmentée.

Carte des flux de flottabilité et des vents de surface dans une perturbation simulée avec le modèle Mésa-Nh. Le trait gras matérialise le front océanique qui, dans le bassin de Terre-Neuve, sépare les eaux comprises entre 3 et 7°C de celles comprises entre 13 et 17°C. Le front océanique est associé à la Dérive Nord-Atlantique.

Mesures par télédétection lors de l'expérience Carl

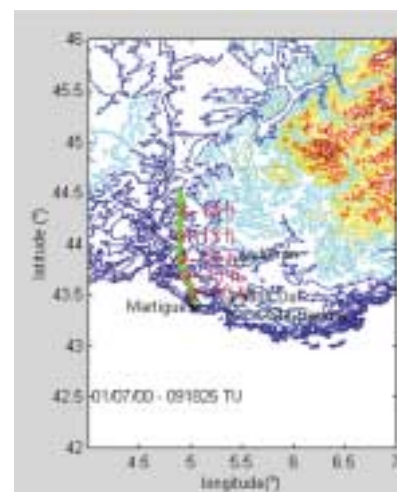
Les objectifs de la campagne Carl concernent l'amélioration de la restitution des paramètres radiatifs et dynamiques des nuages par télédétection. Des mesures conjointes par radar, lidar, radiométrie et "in situ" ont été effectuées pour restituer les paramètres nuageux grâce à l'avion instrumenté, Merlin IV, de Météo-France. Une première campagne de mesures avait été effectuée en 1999 en région parisienne, particulièrement peu propice pour ce type de mesures en matière de circulation aérienne. La campagne 2000 a donc été organisée à Brest. Un problème mécanique a malheureusement cloué le Merlin au sol pendant neuf jours et seuls trois vols ont pu être réalisés.

La campagne préliminaire du projet Escompte

L'expérience Escompte de l'été 2001 vise à documenter des épisodes de pollution photochimique sur la région de Fos, Berre et Marseille. En 2000, une campagne préliminaire entendait élucider diverses questions comme le dispositif expérimental nécessaire pour appréhender un épisode de pollution, les caractéristiques spatio-temporelles des circulations de brise, les performances des prévisions numériques de trajectoires de panache et les procédures opérationnelles envisageables dans cette région complexe à fort trafic aérien.

Le dispositif expérimental comprenait les réseaux de surveillance de la qualité de l'air, deux avions, le *Fokker 27* équipé par l'Insu et le *Piper Aztec* du CNRM, des stations de mesure de surface, fixes et mobiles, des ballons plafonnants suivant les panaches, des radars profileurs de vent et le radiosondage mobile du CNRM. La DIR Sud-Est abritait le PC de campagne et assurait la prévision. Sur la période d'alerte (19 juin au 9 juillet), un seul épisode intéressant a été observé ; peu caractéristique en termes de niveau de pollution, cet événement bien documenté a cependant offert une palette de situations très utile pour la préparation de la campagne 2001. Le dispositif de celle-ci, beaucoup plus ambitieux avec en particulier sept avions, français et allemands, est maintenant arrêté. Le programme Escompte est coordonné par le Laboratoire d'aérodynamique et le CNRM, et principalement soutenu par l'Ademe, le ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, l'Insu et Météo-France.

Trajectoire du BVC6
site de lacher
Martigues

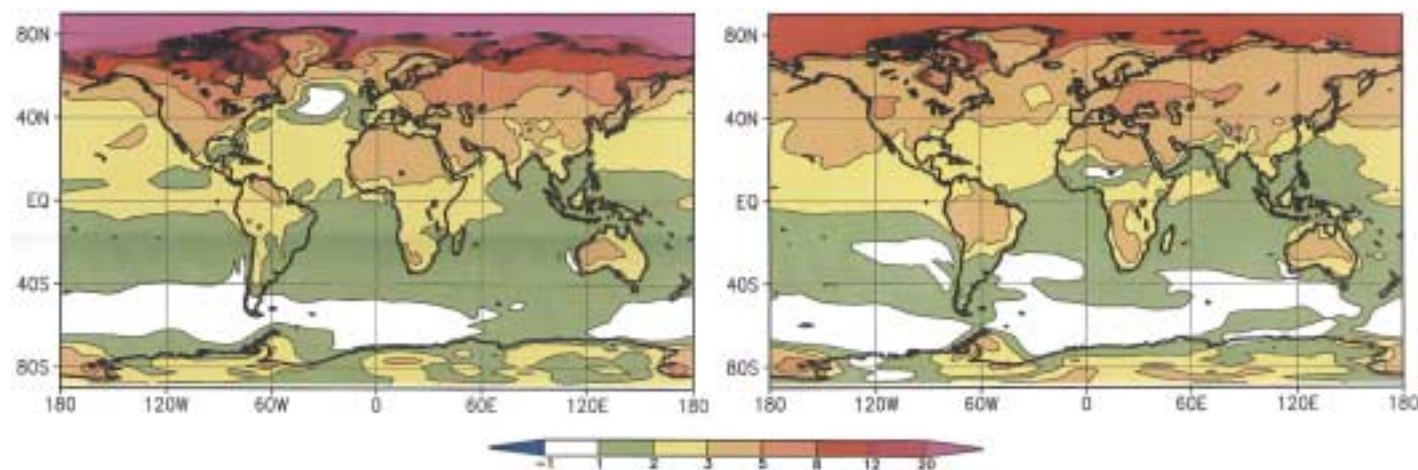


Étude du climat et de l'environnement de la planète

Gros effort sur la chimie atmosphérique avec, en particulier, l'avènement du modèle Mocage, perfectionnement continu des modèles de simulation du climat, expériences de scénarios et d'impacts, études de sensibilité et de phénomènes climatiques : en 2000, on a continué à préparer les outils pour répondre, dans un champ complexe s'il en est, aux interrogations pressantes de la société.

La réponse du système climatique à un scénario d'évolution des gaz à effet de serre et des aérosols

Une simulation de l'évolution du climat sur la période 1950-2100 a été effectuée à l'aide du modèle Arpège-Climat de Météo-France, couplé par l'intermédiaire du coupleur Oasis du Cerfacs avec le modèle de circulation océanique Opa du Lodyc et le modèle de banquise Gelato du CNRM. La concentration des principaux gaz à effet de serre au cours du prochain siècle a été prescrite selon le scénario d'évolution moyenne Sres-B2 du Giec, dans lequel la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère atteint 600 ppm vers 2100. Le modèle prend également en compte l'effet radiatif des aérosols soufrés d'origine anthropique et l'évolution de l'ozone qui est calculée à l'aide du modèle bidimensionnel de photochimie Mobidic.



Répartition géographique du changement de la température en surface simulée pour la période 2070-2099 par rapport à celle de 1961-1990, en hiver (à gauche) et en été (à droite). L'échelle de couleur indique le réchauffement en °C.

Par rapport à une simulation de contrôle, dans laquelle la concentration des gaz à effet de serre est fixée à sa valeur de 1950, le scénario climatique montre un réchauffement croissant en surface au cours du XXI^e siècle en réponse à l'augmentation du forçage radiatif infrarouge produit par les gaz à effet de serre. Ce réchauffement n'est pas réparti de façon uniforme à la surface du globe, mais se trouve amplifié dans certaines régions, notamment en hiver dans les régions polaires, ainsi qu'à l'intérieur des continents, ce qui conduit à des modifications importantes de la circulation générale de l'atmosphère et du climat de nombreuses régions. Les résultats de tels scénarios climatiques peuvent être utilisés pour étudier les conséquences environnementales du changement climatique.

La simulation hydrologique globale : un outil de validation et de prévision

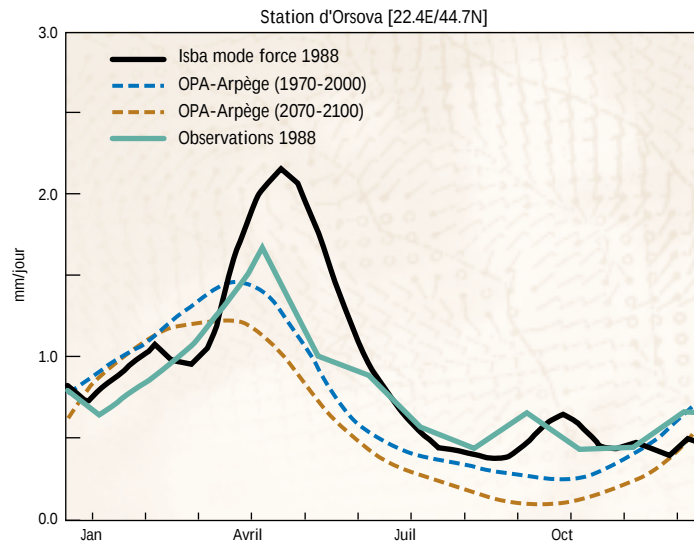
Le schéma de surface Isba de Météo-France a pour fonction de calculer le bilan hydrique en surface. Ce schéma, couplé au modèle Arpège, nécessite un réglage afin d'éliminer des biais systématiques. Grâce au jeu de données ISLSCP, on dispose d'un forçage atmosphérique global issu d'observations et d'analyses météorologiques qui permet de simuler le bilan hydrique des surfaces continentales de 1987 à 1988.

Ces données permettront de valider le schéma Isba sur de grands bassins versants. Pour cela, le Cnrm utilise le modèle hydrologique global Trip développé par l'Université de Tokyo, susceptible de transformer le ruissellement total simulé par Isba en véritables débits comparables aux observations. Le modèle Trip repose sur un maillage à un degré du réseau hydrographique global et sur une équation pronostique de conservation des eaux fluviales.

Le Cnrm a donc mené une simulation de l'évolution des débits décennaux du Danube en 1988 au point de grille le plus proche d'une station de jaugeage grâce au modèle Trip et aux ruissellements produits par le schéma Isba forcé par les données atmosphériques de la même année. On constate que la simulation est correcte, aussi bien dans l'amplitude que dans la phase du cycle annuel.

Dans un avenir proche, le modèle Trip pourra être intégré au modèle climatique couplé Opa-Arpège afin d'estimer précisément les flux d'eau douce des continents vers l'océan dans des expériences de scénarios climatiques.

En attendant de pouvoir effectuer ces calculs en temps réel, on a déjà pu simuler l'évolution à long terme des débits des grands fleuves en utilisant a posteriori les ruissellements obtenus dans un scénario simulant l'évolution du climat entre 1950 et 2100. La figure montre une diminution du débit du Danube au cours du 21ème siècle, notamment au printemps et en été.



Simulations et observations du débit du Danube :

- a) en vert, les observations de 1988;
- b) en noir, le débit simulé par le modèle Trip en utilisant les sorties du schéma Isba forcé par des données atmosphériques observées en 1988 ;
- c) en bleu, le débit simulé par TRIP en utilisant les sorties du modèle climatique Opa-Arpège moyennées sur la période 1970-2000 (climat présent) ;
- d) en rouge, le débit simulé en utilisant les sorties du modèle climatique Opa-Arpège moyennées sur la période 2070-2100 (climat futur).

Analyse de l'impact des gaz à effet de serre sur l'Enso

Le phénomène Enso est une anomalie interannuelle d'échelle planétaire résultant d'interactions non linéaires entre l'océan et l'atmosphère. La composante océanique chaude, appelée El Niño, est caractérisée par une augmentation des températures de surface sur les parties centrale et est du Pacifique. La composante atmosphérique est appelée Oscillation Australe. Sur l'Europe, l'impact de l'Enso se caractérise par un décalage vers le sud des dépressions baroclines pendant les hivers d'un événement El Niño. L'anomalie opposée froide, dénommée la Niña, se traduit par les phénomènes inverses des événements cités ci-dessus.

Les modèles climatiques couplés océan/atmosphère constituent l'outil privilégié pour analyser une éventuelle réponse de l'Enso à l'augmentation des gaz à effet de serre. La simulation de l'Enso et de ses conséquences a été analysée dans les simulations de plusieurs dizaines d'années effectuées avec plusieurs modèles couplés : Arpège-Climat/Opa, Lmd/Opa, Arpège-Climat/Opa/Gelato.

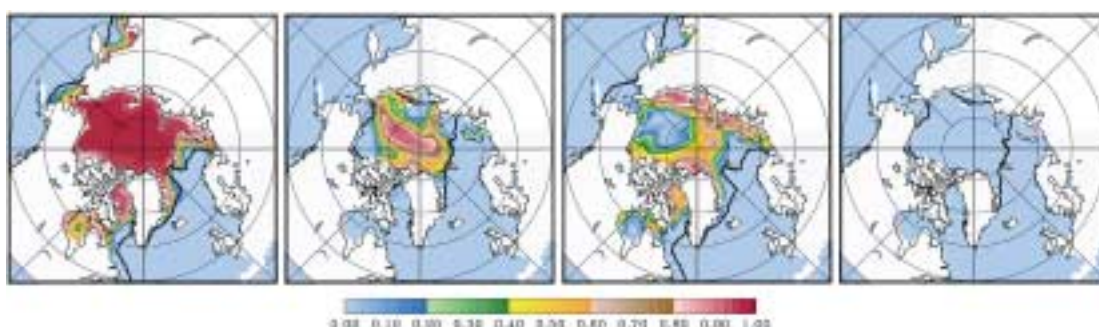
Ces trois modèles couplés simulent correctement des événements Enso assez réalistes, à la fois dans la localisation géographique et dans l'intensité des anomalies de la température de surface, ainsi que dans la réponse atmosphérique à ces anomalies.

L'impact des gaz à effet de serre sur l'Enso a été étudié avec les modèles A et C. Dans les deux cas, l'impact "direct" est faible. Cependant, avec le modèle A, les conséquences de l'Enso sur l'Europe sont renforcées. Ce renforcement est lié à une diminution de la fréquence d'anomalies froides sur l'Arctique, donc à des modifications associées au changement climatique. L'observation d'un renforcement de l'impact de l'Enso sur l'Europe depuis les années 1950 semble confirmer ce résultat.

Un scénario d'évolution de la banquise au XXI^e siècle

La banquise représente une composante importante du système climatique terrestre. Son évolution possible au cours du XXI^e siècle a été analysée dans le cadre des expériences de contrôle et de scénario climatique menées au CNRM et décrites ci-dessus.

Couverture de la banquise, en moyenne sur les années 2070 à 2099 : mars (a) et septembre (b) pour l'expérience de contrôle, mars (c) et septembre (d) pour l'expérience de scénario climatique.



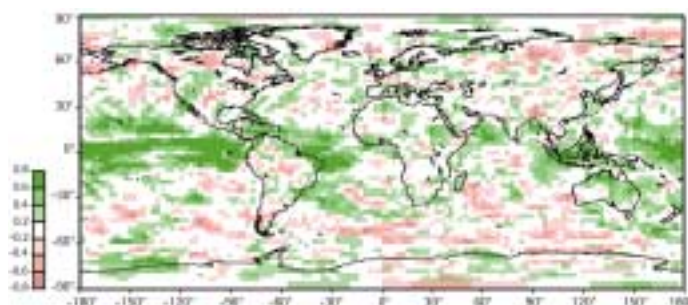
La banquise se formant à la surface des océans, son évolution est intimement liée à celle du climat et de la circulation générale océanique. Une expérience de contrôle a été menée afin de valider le modèle de banquise Gelato. On constate alors que, suite à une surestimation du flux de chaleur solaire atteignant la surface marine en Antarctique, la température de l'océan tend à augmenter excessivement et, par suite, la banquise simulée par le modèle reste trop peu étendue par rapport aux observations. En Arctique, en revanche, les étendues et volumes de banquise dérivent relativement peu dans le temps et se stabilisent au cours des 50 dernières années de la simulation. En hiver, le bord de glace modélisé est proche de celui qui est observé actuellement par satellite ; mais, en été, son extension est trop limitée suite à des températures de surface de la mer trop élevées dans le bassin arctique. Par ailleurs, on peut noter que l'épaisseur modélisée de la banquise reste trop faible tout au long de l'année, mais cela n'influe pas significativement sur l'état de l'atmosphère et de l'océan.

Dans la simulation effectuée dans le cadre d'un scénario climatique de doublement du gaz carbonique, on assiste à une diminution graduelle du volume et de la surface de la banquise arctique, jusqu'à sa disparition totale en été à partir de l'année 2060. En hiver, vers la fin de l'expérience, une couverture de glace est maintenue, mais sa concentration reste très faible au centre du bassin arctique. En Antarctique, la banquise se comporte de façon très similaire à ce que l'on avait pu observer dans l'expérience de contrôle.

Les prévisions saisonnières en mode couplé

La température de surface des océans, et principalement des océans tropicaux, constitue la principale source de prévisibilité atmosphérique à l'échelle saisonnière. Les prévisions météorologiques à l'échance d'une saison se font dans de nombreux centres météorologiques à partir d'une extrapolation statistique des températures initiales de surface de la mer. Le schéma le plus simple consiste à superposer une anomalie constante à un cycle annuel climatologique. On peut raffiner la technique en atténuant l'amplitude de l'anomalie au cours du temps ou en ajoutant une composante aléatoire pour représenter l'erreur. C'est facile à mettre en œuvre, peu coûteux, mais limité. En effet, il y a peu d'espoir de révolutionner cette technique à court terme car les statistiques sont fondées sur les mesures des 50 dernières années. D'autre part, au-delà de trois à quatre mois, les statistiques ne savent pas prédire autre chose que la climatologie.

Scores de prévision (corrélations) pour les prévisions de précipitations pour la saison janvier-février-mars. Les plages vertes correspondent aux régions où les prévisions pour la période 1979-1993 ont correspondu aux observations.



Le modèle Arpège-climat a donc été couplé au modèle d'océan OPA du Lodyc. En attendant la disponibilité d'états initiaux opérationnels de l'océan, proposés par le projet Mercator, une analyse rudimentaire a été créée, en combinant les températures de surface et les flux atmosphériques observés. Une prévision a posteriori des années 1979-1993 a été effectuée à partir de prévisions à quatre mois d'échéance en hiver et en été, constituées chacune de neuf intégrations couplées. La comparaison des scores montre que les prévisions de précipitations sous les tropiques sont meilleures que lorsque la température de la mer est prévue statistiquement.

Un climat possible pour la fin du XXI^e siècle sur l'Europe

À la suite de la simulation de 150 ans (1950-2100) effectuée en mode couplé, le CNRM dispose d'un scénario d'évolution des températures de surface de la mer et d'extension de la banquise en réponse au forçage par les gaz à effet de serre et les aérosols. Ce scénario s'appuie d'une part sur les données observées (1950-2000) et, d'autre part, sur les estimations proposées par le Giec sous le nom d'hypothèse B2 (période 2000-2100 de la simulation). Dans la longue simulation couplée, la résolution horizontale est d'environ 300 km, ce qui est insuffisant pour représenter même grossièrement le relief de l'Europe.

Deux simulations de 30 ans (1960-1990 et 2070-2100) ont donc été effectuées avec le modèle Arpège non couplé en résolution variable : de 50 km sur la Méditerranée à 500 km sur le Pacifique sud. Les résultats sur l'Europe commencent à être analysés et comparés aux expériences antérieures. Le réchauffement sur l'Europe, plus marqué en été et au sud, se confirme. L'augmentation des précipitations hivernales se retrouve, mais sous une forme plus atténuée que dans un scénario effectué avec une version antérieure du modèle. Cet apport d'eau supplémentaire n'empêche pas la diminution de la réserve en eau du sol l'été.

Ce changement climatique pour les années 2070-2100 n'est pas une prévision au sens d'annonce de ce qui va se passer dans le futur, mais une illustration de ce qui risque de se passer si les concentrations de gaz radiativement actifs augmentent conformément aux hypothèses.



Impact sur la température estivale (°C) du changement climatique simulé en réponse au scénario Giec-B2. Les carrés rouges correspondent à une augmentation comprise entre 3 et 4 °C.

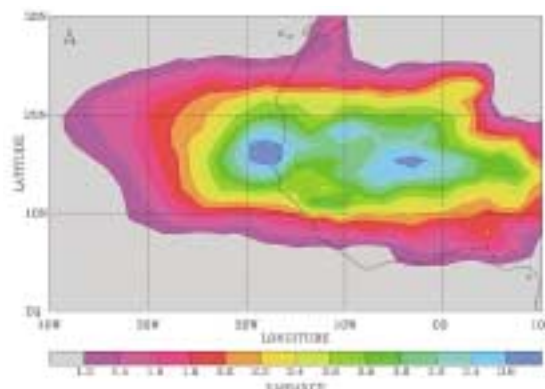
Simulation des ondes d'Est africaines par le modèle Arpège-Climat à maille variable

Les Ondes d'Est constituent une composante importante du climat africain. Elles se développent durant l'été sur l'Afrique de l'Ouest au Nord de l'équateur, en liaison avec le jet d'est africain qui s'établit dans la moyenne troposphère. Elles sont caractérisées par une période de 3 à 5 jours et une longueur d'onde de 2500 à 4000 km.

Ces ondes jouent un rôle important dans les précipitations africaines puisqu'elles peuvent engendrer des conditions favorables à l'apparition des lignes de grains. Elles sont aussi d'une importance considérable sur l'Atlantique car elles peuvent y initier le développement de cyclones tropicaux.

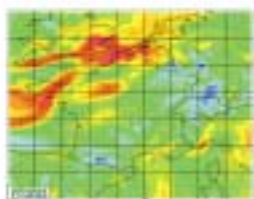
Bien que l'existence de ces ondes soit connue depuis plusieurs années, certains de leurs aspects font toujours l'objet de recherches scientifiques. La compréhension des processus physiques qui régissent ces ondes est importante pour mieux les simuler et améliorer la prévision du climat africain. L'étude de l'activité des ondes d'Est africaines a été entreprise dans le cadre du projet européen Wamp.

Des simulations ont été réalisées sur la période 1980-1993 par le modèle Arpège-Climat à maille variable avec le pôle d'étirement placé à 0° longitude et 0° latitude, permettant une haute résolution sur l'Afrique de l'Ouest. Les ondes d'Est évoluent dans un environnement où elles sont superposées à des conditions météorologiques de grande échelle. L'utilisation de méthodes statistiques est nécessaire pour isoler et étudier les caractéristiques de ces ondes. Les structures des ondes d'Est dans la gamme 3-5 jours sont correctement reproduites par le modèle (figure).



Champ de variance moyen sur 14 années (1980-1993) du vent méridien à 850 hPa filtré dans la gamme 3-5 jours, calculé pour la période juin-septembre à partir des simulations (a) et comparé à celui des ré-analyses du centre européen (b).

Prévision de la qualité de l'air avec le modèle Mocage



Champ d'ozone en surface sur la France simulé par le modèle Mocage pour le 24 juillet 1999 à 15 h UTC (valeurs croissantes du bleu au rouge).

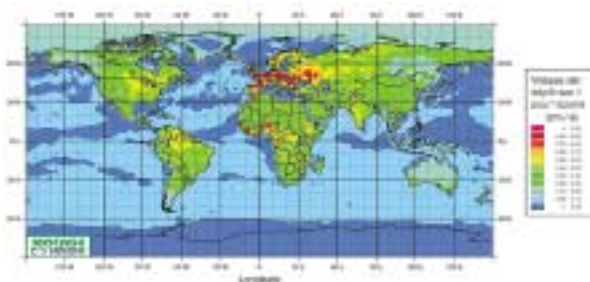
Mocage, le nouveau modèle de chimie atmosphérique à grande échelle de Météo-France, est maintenant au point. Pourvu de 47 niveaux verticaux, il permet de considérer simultanément la troposphère et la moyenne et basse stratosphère. Mocage est interfacé avec les modèles météorologiques opérationnels Arpège et Aladin ; il peut donc être utilisé en mode prédictif.

Pour les applications de prévision de la qualité de l'air, des domaines emboîtés à résolution horizontale croissante sont employés et permettent des simulations à la résolution d'Aladin (une dizaine de kilomètres sur la France). La validation du modèle a débuté en 2000. Elle s'appuie sur les campagnes de mesures récentes Ozone occitan (été 1998 sur la région toulousaine) et Esquif (étés 1998 et 1999 sur la région Ile-de-France), mais aussi sur les mesures régulières effectuées par les associations de surveillance de la qualité de l'air en France et par les organismes homologues de plusieurs pays européens.

Outre les applications de simulation de la pollution photo-oxydante des basses couches, Mocage est utilisé pour des études climatologiques de la pollution reposant sur des simulations pluriannuelles, ainsi que pour étudier les interactions entre chimie et climat ou encore l'impact des avions sur l'atmosphère. Enfin, en collaboration avec le Laboratoire d'aérogologie, les aérosols ont été introduits dans le modèle Mocage.

Les échanges en surface de constituants chimiques

Vitesse de dépôt de l'ozone (cm/s), en moyenne mensuelle à 12 h UTC pour juillet 2000. On visualise bien la variabilité spatiale de la vitesse de dépôt pour l'ozone ainsi que son cycle diurne marqué sur les continents.



Le modèle Mocage prend en compte à la surface les flux d'émissions et de dépôt sec d'espèces chimiques gazeuses et de particules. Ces flux, à l'instar des échanges énergétiques, dépendent fortement des conditions météorologiques, ainsi que des types de sol et de végétation. Une interface a été développée entre Mocage et les prévisions météorologiques opérationnelles.

Pour ce qui concerne les émissions, un cadastre global est employé; il a été construit essentiellement à partir des inventaires Geia et Edgar, qui ont des résolutions temporelles annuelle, saisonnière ou mensuelle suivant les espèces chimiques, et une résolution spatiale de un degré. Certaines émissions sont modulées temporellement en fonction de l'heure de la journée, comme la source due au trafic routier par exemple, ou des conditions prévues d'ensoleillement et des précipitations, comme les émissions par la végétation et les sols notamment. Sur l'Europe, le cadastre Eurotrac/Genemis est en cours d'intégration et permettra de considérer des émissions à plus fortes résolutions temporelle et spatiale.

Le dépôt sec a été paramétrisé selon le schéma Wesely, en utilisant les champs de surface de la chaîne Arpège/Aladin. Plusieurs modifications sensibles ont été apportées : par exemple, la formulation de la résistance stomatale est calculée suivant le schéma Isba, et celle de la résistance de surface sur les sols mouillés et les étendues d'eau prend en compte de nouvelles observations. Les vitesses de dépôt calculées ont été comparées aux observations disponibles et les distributions spatiales et temporelles ont été analysées sur deux saisons (figure).

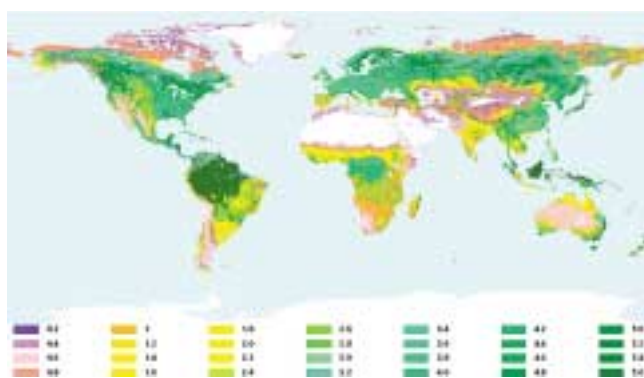
Une nouvelle carte globale de végétation à résolution kilométrique

L'occupation des sols est l'une des composantes importantes qui intervient dans les échanges entre le sol et l'atmosphère. Le schéma Isba qui modélise les processus de surface dans les différents modèles de Météo-France aussi bien à l'échelle globale qu'à méso-échelle, nécessite des paramètres d'entrée qui sont pour l'instant essentiellement dérivés de cartes d'occupation des sols.

Une nouvelle carte d'occupation des sols à la résolution kilométrique a été élaborée à l'échelle globale en fusionnant les données Corine Land Cover et les données Pelcom sur l'Europe, et la carte d'occupation du sol de l'Université du Maryland hors Europe. Ces cartes d'occupation du sol sont issues

de classifications faites à partir des données du radiomètre Avhrr, sauf pour la carte Corine établie à partir de données satellite haute résolution. Afin de définir des écosystèmes homogènes en terme de climat, la carte globale d'occupation des sols est croisée avec la carte mondiale des climats de Koppe. Après regroupements de classes basés sur l'analyse de l'indice de végétation Ndvi, ceci permet de définir environ 230 écosystèmes sur le globe, dont 90 sur l'Europe.

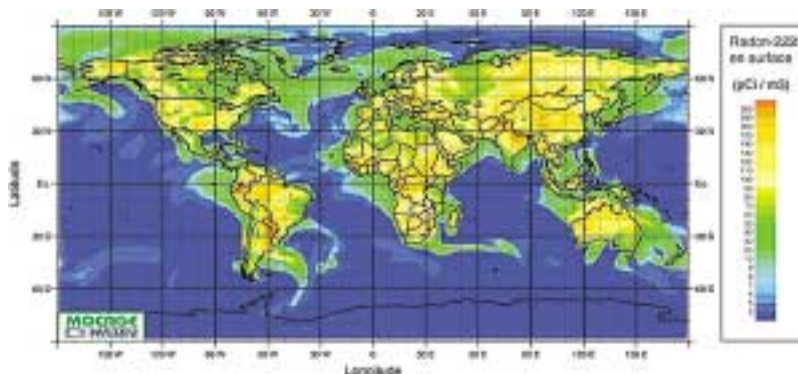
Pour chaque classe, les paramètres biophysiques mensuels tels que l'indice foliaire Lai ou la fraction de végétation sont dérivés du profil temporel de l'indice de végétation Ndvi qui est un indicateur de la phénologie de la végétation. La méthode a donc permis d'établir des fichiers de conditions de surface en tout point du globe à la résolution du kilomètre, déjà utilisés dans le modèle Mésio-NH et très prochainement dans les modèles Arpège et Aladin.



Carte d'indice foliaire (LAI) du mois de juillet à la résolution kilométrique pour l'ensemble du globe.

La validation du transport dans Mocage

Le transport des traceurs, gaz ou particules, dans le modèle Mocage se divise en deux parties. D'une part, l'advection est calculée avec un schéma semi-lagrangien ; d'autre part, le transport aux échelles non résolues par le modèle passe par des schémas de paramétrisations. En particulier, deux schémas optionnels de transport par la convection sont utilisables dans le modèle Mocage : celui de Tiedtke (1989) et celui de Bechtold (2001), mis en place cette année dans le cadre d'une collaboration avec le Laboratoire d'Aérodynamique.



La représentation du transport dans la géométrie à plusieurs domaines imbriqués de Mocage a été testée dans des expériences académiques, avec des traceurs passifs. Ces expériences illustrent l'intérêt des fines résolutions et l'apport du couplage à double sens entre les différents domaines.

Distribution de Radon-222 en surface calculée par le modèle Mocage pour le 15/06/1999 à 0 h UTC. Le modèle simule pour ce jour-là, une langue de radon, issue du Sud de l'Afrique, qui atteint l'île d'Amsterdam (77E,37S) et engendre des teneurs anormalement hautes en radon. Ces estimations ont été effectivement confirmées par les mesures.

La validation du module de transport s'est poursuivie dans des conditions plus réalistes, forcées par les analyses opérationnelles d'Arpège. Le radon-222, traceur radioactif dont la demi-vie est compatible avec l'échelle de temps caractéristique de la troposphère, et pour lequel un nombre important d'observations de routine en surface sont disponibles, a été utilisé. Une simulation de l'année 1999 a été réalisée. Les moyennes zonales saisonnières sont en bon accord avec la littérature récente. Les valeurs simulées ont aussi été comparées à des observations bi-horaires au sol ; les résultats sont très satisfaisants avec une corrélation de 0.85 sur l'ensemble de l'année pour plusieurs sites.

Paramétrisation de la chimie dans un modèle à multi-échelles

Une des caractéristiques du modèle Mocage est de pouvoir traiter simultanément plusieurs échelles spatiales, du global au régional, à des résolutions horizontales croissantes. De ce fait, la paramétrisation de la chimie troposphérique doit être à même de représenter une gamme de conditions chimiques très variées, depuis les milieux éloignés jusqu'aux zones urbaines et péri-urbaines.

Ce besoin est nouveau au sein de la communauté de modélisation de la chimie de l'atmosphère puisque jusqu'alors, des modèles et des schémas chimiques différents étaient employés suivant l'échelle d'intérêt. Dans le cadre d'une étude des échanges de polluants trans-frontières, le CNRM a débuté une étude sur les schémas chimiques aujourd'hui disponibles.

Cette étude consiste :

- d'une part en une expertise de 9 schémas publiés dans la littérature au moyen du modèle Mocage, sur des périodes courtes de simulation (1 mois d'été boréal). Un des objectifs est de quantifier en tridimensionnel les différences constatées en l'absence de toute dynamique.
- d'autre part, en un développement d'un nouveau schéma adapté au modèle Mocage en collaboration avec le Lisa. Cette collaboration porte notamment sur le développement d'un " Master Chemical Mechanism ", prenant en compte environ 10000 espèces chimiques et 100.000 réactions. Ce schéma, utilisé comme référence, permettra de quantifier les biais introduits par les différentes hypothèses de réduction communément employées pour construire les schémas actuels, quantification non existante à ce jour. Cette évaluation se fera au moyen de la version 1D-colonne du modèle Mocage, développée cette année, puisque les contraintes informatiques associées à un tel schéma sont incompatibles avec les moyens de calculs actuels de Météo-France.

Effet indirect des aérosols sur le climat

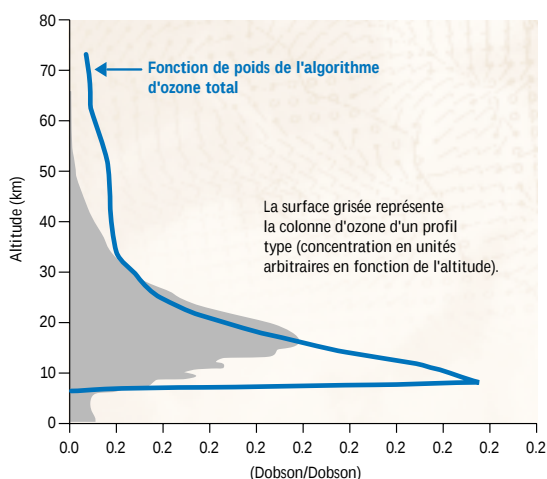
Le dernier rapport de l'Ipcc (2000) reconnaît le rôle crucial des aérosols dans l'évolution du climat, et rappelle que la principale source d'incertitude dans sa prévision est liée à la manière dont les aérosols peuvent modifier les propriétés radiatives des nuages étendus, via un changement de leurs propriétés microphysiques. Le Cnrm a coordonné une campagne de mesures des propriétés physico-chimiques des aérosols, des propriétés microphysiques des nuages et de leurs propriétés radiatives sur le nord-est Atlantique, une région océanique qui peut être affectée par des sources européennes de pollution lorsque les masses d'air ont survolé le continent.

La campagne Cloudy-Column a ainsi permis de collecter la base de données la plus complète actuellement disponible sur l'effet indirect des aérosols. L'analyse des données a apporté la preuve expérimentale de cet effet et elle a permis de développer des paramétrisations plus physiques de l'interaction aérosol/nuage/rayonnement.

Ces résultats sont maintenant utilisés pour améliorer les modèles de climat dans le cadre du programme Pace, soutenu par l'Union Européenne et coordonné par le Cnrm. Ce projet regroupe quatre laboratoires du projet Cloudy-Column, le Cnrm et les Universités de Berlin, Varsovie et Wyoming (USA), et cinq groupes de modélisation, le Max-Planck (G), le Hadley (UK), l'Université de Dalhousie (CA), le Goddard et le PNNL (USA). La première année a permis de confronter le point de vue des modélistes, avec leur vision à grande échelle (100 km), à celle des expérimentateurs qui ont analysé les données à l'échelle des processus (quelques km). De nouvelles approches ont été conçues pour caractériser les systèmes nuageux à grande échelle et construire deux cas d'étude qui sont actuellement utilisés pour tester les modèles.

Amélioration de l'algorithme d'ozone total pour Météosat Seconde Génération

Les études sur l'ozone total déduit du radiomètre Toms menées dans le cadre de la participation de Météo-France au Centre d'Applications Satellitaire sur l'ozone ont conduit à calculer la sensibilité de la détermination de la colonne d'ozone par rapport à sa répartition verticale ainsi que par rapport à celle de la température.



Amélioration de la sensibilité du nouvel algorithme mis au point par Météo-France pour déterminer la concentration d'ozone total.

Comme cela est souhaitable, les écarts de température imposés à diverses altitudes affectent très peu les colonnes restituées, mais la sensibilité en ozone qui devrait être uniforme en fonction de l'altitude montre une très nette décroissance au-dessus de 22 km (ou 40 hPa) confirmant ainsi que le sondeur Toms " voit " très mal l'ozone de la haute stratosphère.

On a donc mis au point une version de l'algorithme qui détermine la colonne d'ozone uniquement dans le domaine 400-40 hPa. Malgré une plus forte variabilité de l'ozone dans ce domaine, l'erreur de détermination de cette colonne est réduite de moitié (10 dobsons pour une valeur moyenne de 120 dobsons).

Par ailleurs, la perturbation provoquée dans les images d'ozone total par la présence de nuages élevés a été étudiée au moyen de la modélisation du transfert radiatif pour divers types et altitudes de nuages. Les nuages dont le sommet dépasse 400 hPa produisent localement une incertitude élevée (jusqu'à 30 dobsons) que l'on peut déterminer, mais que l'on envisage aussi de réduire en utilisant l'information sur le sommet des nuages que l'on peut déduire à l'aide d'autres canaux du sondeur.

Evolution du bilan énergétique lié à l'augmentation de la concentration de CO₂

L'introduction de CO₂ dans l'atmosphère a pour conséquence d'augmenter l'effet de serre naturel, et donc de redistribuer les flux de chaleur en son sein pour conserver un bilan net au sommet qui soit équilibré.

Dans le cadre d'une expérience basée sur un scénario d'augmentation du CO₂ (scénario B2 du Giec) qui a été réalisée au Cnrm, on a calculé le bilan énergétique de l'atmosphère correspondant au climat actuel (période 1950-1979). On constate que le modèle Arpège-Climat reproduit de manière relativement réaliste les différents termes de ce bilan, même si on peut lui reprocher quelques biais importants.

L'expérience a été poursuivie en calculant le bilan énergétique jusqu'en 2070-2099, période pour laquelle le scénario prévoit une concentration quasiment doublée par rapport à celle de l'an 2000. Comme on peut s'y attendre, l'impact majeur se produit sur le rayonnement infra-rouge réémis par l'atmosphère, compensé en partie par une réémission accrue de la surface et une augmentation de la chaleur latente. La fonte de la banquise constitue une rétroaction positive en contribuant à la réduction du rayonnement solaire réfléchi par la surface. Enfin, l'augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère entraîne une absorption accrue du rayonnement solaire.

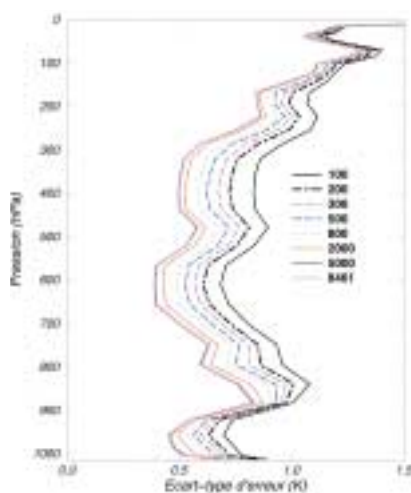
L'évolution temporelle des différents termes du bilan d'énergie combine, pour certains, plusieurs effets dont le principal lié à la concentration de CO₂ conduit à une évolution linéaire de ces termes. La concentration des aérosols, dont la courbe d'évolution présente un maximum lors de la décennie 1980, influe sur le rayonnement solaire réfléchi par l'atmosphère. Enfin, la fonte de la banquise s'accélère aux environs de la décennie 2060, ce qui contribue à diminuer la part du rayonnement solaire réfléchi par la surface.

Développements instrumentaux

Le lancement en 2000 de l'important projet de remplacement de l'avion instrumenté de Météo-France, et au-delà des avions français de recherche atmosphérique, ne doit pas faire oublier la poursuite de travaux instrumentaux prometteurs pour la mesure par télédétection ou in situ, ou encore l'apport souvent judicieux de la simulation hydraulique.

Prospective sur l'utilisation des futurs sondeurs spatiaux

Profils verticaux d'erreurs d'analyse pour la température en fonction du nombre de canaux retenus pour l'inversion. Les statistiques sont obtenues à partir de 24 profils atmosphériques distincts observés pour une station caractéristique des moyennes latitudes en toutes saisons.



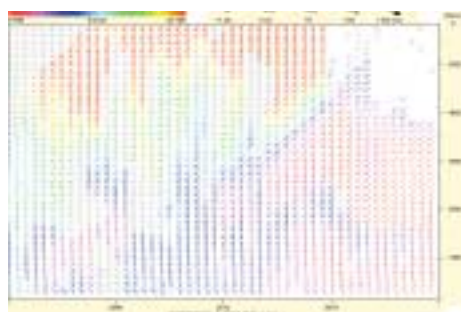
Parmi les futurs sondeurs spatiaux, de nouveaux instruments vont offrir une résolution spectrale exceptionnelle dans le domaine infrarouge. Il s'agit de l'instrument *Airs* de la Nasa et de l'instrument *Iasi* développé conjointement par le Cnes et Eumetsat.

Météo-France collabore au développement de l'instrument *Iasi* qui volera sur les premiers satellites défilants opérationnels européens de la série *Metop* à partir de 2005. Sa bande spectrale s'étend de 645 cm^{-1} à 2760 cm^{-1} avec un échantillonnage de $0,25\text{ cm}^{-1}$, ce qui conduit à un spectre de 8461 canaux observés. Le capteur *Iasi* fournira ainsi des informations sur la température, l'humidité et l'ozone. Les données *Iasi* seront utiles pour détecter les structures d'échelle fine sur la verticale, cruciales pour la prévision numérique. Mais, pour faciliter le traitement de l'énorme volume d'information que représentent ces données, il est indispensable de choisir de façon optimale un sous-ensemble de canaux à traiter. Ce problème a été abordé en comparant différentes méthodes de choix des canaux les plus informatifs sur des données *Iasi* simulées.

Les résultats obtenus à partir de l'analyse de plus de 500 profils atmosphériques suggèrent que l'information utile en prévision numérique peut être extraite des données *Iasi* en sélectionnant environ 300 canaux parmi 3000, et en éliminant dès le début du processus de choix plus de 5000 canaux.

Mais des conclusions plus précises ne pourront être apportées que lorsque le choix de canaux se révélera robuste pour tous les profils considérés. Les résultats obtenus sur les données simulées *Iasi* devront donc être validés sur le premier jeu d'observations réelles de nature similaire. Il s'agit des données *Airs* qui devraient être disponibles dès la fin de l'année 2001, avec un peu plus de 2000 canaux seulement.

Un nouveau radar profileur de vent



Le radar profileur de vent, Degreewind PCL 1300, a été livré au Cnrm à la fin de l'été 1999. Cet instrument est dédié à l'étude de la couche limite atmosphérique, et sa portée verticale est limitée à quelques kilomètres. Installé dans une remorque, il est facilement transportable, et peut être déployé en quelques heures sur un nouveau site.

Mesures de vent effectuées par le nouveau radar profileur pendant la campagne MAP

Sa vocation étant de participer à des campagnes de mesures, il a subi dès son arrivée le baptême du feu en Italie au cours de l'expérience Map. Il a ensuite

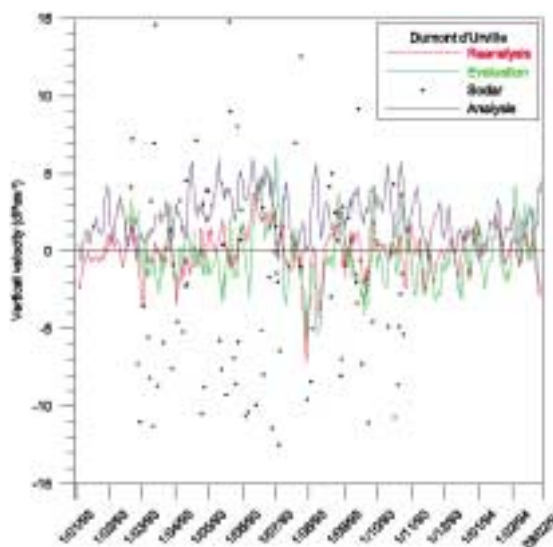
(en juin) été installé au bord de l'étang de Berre pour la campagne préparatoire à Escompte, puis, au mois d'août, sur le site de l'aéroport du Lherm (au sud de Toulouse) pour couvrir le championnat du monde de voltige aérienne. La journée du 18 août 2000, relative à cette manifestation, correspond à une situation de vent d'Autan. Sur toute cette journée, les mesures sont cohérentes à partir d'une hauteur de 150 m environ. Au cours de cette journée, le radar permet de voir l'homogénéisation du profil sous l'effet de la turbulence à partir de 10 h UTC, et la réapparition du jet en soirée vers 400 m.

Etude de la vitesse verticale dans la région de Dumont d'Urville, Antarctique de l'Est

Dumont d'Urville, sur la côte Antarctique de l'Est, est bien connue pour être une région où les vents catabatiques soufflent avec une force et une fréquence remarquables. Beaucoup d'auteurs ont souligné le rôle principal joué par les vents catabatiques dans la circulation générale et le climat de l'Antarctique, particulièrement près de la côte où ils ont un effet très fort sur la glace de mer. Pendant une étude récente de la couche limite catabatique, un sodar triaxial a fonctionné sans interruption pendant deux années consécutives (1993 et 1994) à Dumont d'Urville.

Météo-France a tiré profit de cette expérience pour étudier la capacité du sodar, utilisé dans des conditions extrêmes, à fournir la vitesse verticale locale et la subsidence à grande échelle associées aux vents catabatiques. Cette étude vise à évaluer avec précision la capacité du sodar à mesurer la vitesse verticale, par comparaison avec les analyses opérationnelles et les ré-analyses du Ccpmm, et avec une évaluation utilisant les sondages locaux.

On constate que les résultats des analyses opérationnelles sont biaisés de manière significative. Dans cette région côtière la vitesse verticale à grande échelle est de l'ordre de 1 cm s^{-1} , et peut atteindre des valeurs de l'ordre de 5 cm s^{-1} . Dans les ré-analyses, la différence entre la vitesse verticale en surface et à 650 hPa est faible. En surface à l'intérieur du continent, dans le secteur de Dôme C, la vitesse verticale est faible, inférieure à 1 cm s^{-1} . On constate de plus que la vitesse verticale à l'échelle synoptique présente un cycle saisonnier.



Comparaison de la vitesse verticale sur la base de Dumont d'Urville pour 1993 :

- a) mesurée par le sodar (points);
- b) obtenue à partir des analyses opérationnelles de ECMWF (bleu);
- c) obtenue à partir de la re-analyse ERA-15 (rouge);
- d) évaluées en utilisant des radiosondages.

Les lignes continues correspondent à une moyenne glissante sur 5 points.

Projet d'un avion troposphérique Météo-France - Insu - Cnes

Depuis plus de cinquante ans, Météo-France utilise des avions pour la recherche atmosphérique. Actuellement, le CNRM dispose en propre de deux avions, le *Piper Aztec 23* et le *Merlin IV*, et d'un *Fokker 27* en copropriété avec l'Insu et le Cnes.

Lors d'expériences comme Pyrex, Hapex Sahel, Eucres, Ace2 ou MAP, les mesures aéroporées jouent un rôle primordial. Or, le *Merlin*, après tant de bons et loyaux services, arrive en fin de potentiel et sera arrêté en 2003. Dès 1994, les scientifiques utilisant les avions de recherche atmosphérique ont donc préparé son remplacement. Fin 1999, les autorités de tutelle ont donné leur accord pour que la communauté scientifique dispose d'un avion troposphérique de deux à trois tonnes de charge utile, destiné à remplacer le *Merlin IV* et le *Fokker 27*. Météo-France, qui finance ce projet, a été chargé de sa réalisation en concertation avec ses partenaires, l'Insu et le Cnes. Le groupe de projet, chargé de l'analyse technique du dossier, vient de terminer la première phase de son travail avec la rédaction de l'appel d'offres pour l'achat d'un avion d'occasion et la conduite d'un chantier de modifications. Le cahier des charges de l'avion, qui devra pouvoir être utilisé pendant 15 ans, prévoit les caractéristiques suivantes : moins de dix ans d'âge, moins de 10 000 heures de vol, une charge utile scientifique de 2,5 tonnes, non compris les neuf opérateurs, une autonomie de 6 heures, le plafond étant fixé à 7500 mètres. L'appel d'offres sera lancé début 2001. La durée du chantier étant estimée à 18 mois, l'avion sera donc disponible au début de 2003.



Avion Merlin de Météo-France

La simulation hydraulique pour optimiser la mesure sur un navire océanographique

L'analyse des données de la campagne Equalant de 1999 a fait apparaître un biais systématique sur la mesure du vent enregistrée sur le navire océanographique *Thalassa* de l'Ifremer. Le capteur, un anémomètre sonique rapide, avait été placé au sommet d'un mât de 10 mètres fixé sur le pont avant en tenant compte de l'influence aérodynamique du navire. Malgré cela et après correction des mouvements du navire par l'intermédiaire d'une centrale à inertie, il subsistait une composante verticale du vent trop importante qui perturbait le calcul des flux.

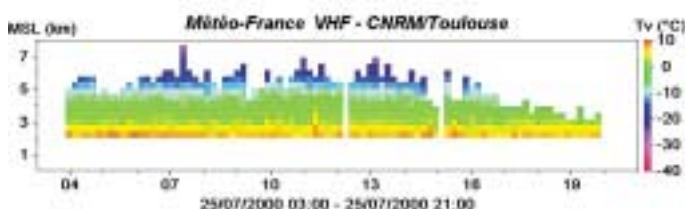
Visualisation
du vent à la proue
du navire en veine
hydraulique.



Pour caractériser finement le vent au niveau du capteur, une simulation hydraulique a été effectuée sur une maquette du *Thalassa* dans la grande veine du CNRM. La maquette à l'échelle 1/60^e représente le navire avec ses superstructures au-dessus de la ligne de flottaison. Les caractéristiques moyennes et turbulentes des composantes horizontales et verticales de la vitesse de l'écoulement ont été relevées par vélocimétrie laser sur un profil vertical à l'aplomb du capteur. Les résultats montrent clairement l'influence du mât sur le vent mesuré par le capteur. La simulation a mis en évidence un écoulement présentant un angle d'incidence de + 7° qui s'accompagne d'un déficit de vitesse de 10 %. Cette perturbation, localisée au niveau de la tête de mât, s'explique par la présence de boîtiers électroniques qui provoquent un blocage de l'écoulement. Les expérimentations ont exploré différentes directions du vent et différents angles de tangage du navire. Elles mettent toutes en évidence un phénomène identique. Grâce à cette étude, il sera ainsi possible de corriger les données des précédentes campagnes et d'optimiser la position du capteur pour les campagnes futures.

Mesure de la température virtuelle avec le radar VHF à l'aide du sondage radio acoustique

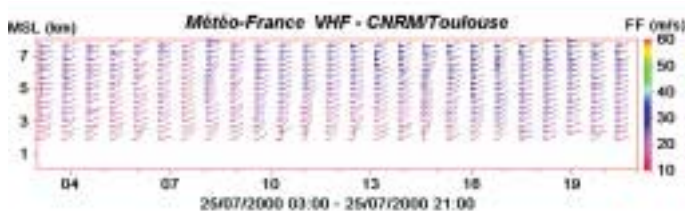
Mesures simultanées de la
température virtuelle (Tv)
et du vent avec le radar
Vhf + Rass de Météo-
France à Toulouse le
25/07/2000.



Durant la période du 12 juillet au 11 août 2000, avec le radar Vhf du Cnrm, on a obtenu pour la première fois des profils simultanés de vent et de température virtuelle par télédétection active à partir du sol. A cet effet, on a exploité la réflexion en altitude des ondes radio électriques sur les fronts d'onde

acoustiques générés par 4 sources acoustiques au voisinage du radar. Cette technologie, appelée Rass (Radio Acoustique Sounding System), a permis de suivre de manière continue l'évolution ces deux paramètres à une cadence de 10 minutes avec une portée comprise entre 1,7 et 4 à 8 km d'altitude pour la température virtuelle.

Ces résultats très encourageants ont été confirmés par les comparaisons statistiques avec les sorties d'analyse du Cepmmt qui ont donné un écart-type de 0,7 à 0,8 degrés et un biais négligeable. Des études de simulation ont montré par ailleurs que la portée en altitude peut être sensiblement améliorée au moyen d'un nombre plus élevé de sources acoustiques disposées autour des antennes radar. L'application du Rass est un exemple des larges possibilités offertes par le radar ST dans les mesures par télédétection à partir du sol.



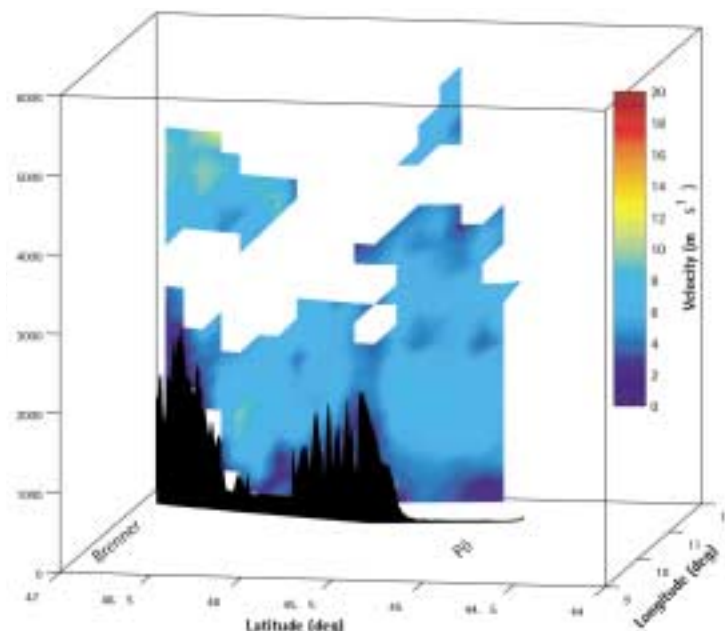
Les lidars Doppler pendant la campagne Map

Les lidars Doppler français – le lidar sol LVT et le lidar aéroporté franco-allemand Wind – ont tous deux participé à la campagne " Mesoscale Alpine Experiment " qui s'est déroulée dans les Alpes entre le 15 septembre et le 15 novembre 1999.

Le lidar sol LVT était installé dans la haute vallée du Rhin, en Suisse, près de la ville de Bad-Ragaz. Situé stratégiquement à la jonction de la vallée du Rhin et de la vallée secondaire du Seez, le lidar LVT avait pour objectif l'observation des écoulements dans les vallées en période de foehn. Le lidar LVT a mis en évidence des phénomènes de séparation d'écoulement entre les vallées du Rhin et du Seez et fourni de précieuses observations sur la structure verticale du vent lors de l'arrivée et du retrait du foehn.

Le lidar aéroporté Wind a effectué ses premières heures de vol opérationnelles pendant la campagne. Parti de Munich en Allemagne, le lidar Wind a survolé à plusieurs reprises la vallée du Brenner entre Innsbruck en Autriche et la vallée du Pô en Italie. Les données acquises révèlent la structure hétérogène du champ de vent à moyenne échelle. Elles seront comparées aux simulations des modèles numériques et permettront de mieux cerner la capacité de ces derniers à restituer des écoulements de moyenne échelle en zone montagneuse.

Force du vent horizontal mesuré par le lidar aéroporté Wind lors du survol de la vallée du Brenner, depuis le col du Brenner au nord jusqu'à la plaine du Pô.



Nouveaux instruments pour la mesure des gouttelettes et des aérosols humides.

Il n'existe pas encore de moyens aéroportés pour mesurer in situ la distribution dimensionnelle des aérosols humides de dimension sub-micronique. Toute tentative de prélèvement de ces aérosols conduit à leur évaporation instantanée. Le Cnrm développe actuellement deux instruments, un compteur de particules et un diffusiomètre qui permettront de mesurer in situ les particules de diamètres compris entre 0.1 et 50 μm . C'est dans ce domaine qu'on pourra observer la transition entre aérosols humides et gouttelettes qui résultent de l'activation d'une sous population des aérosols. Ce processus est essentiel pour comprendre l'effet des aérosols sur les nuages et plus largement sur le climat.

Le compteur de particules s'inspire de solutions techniques qui ont été développées dans le cadre du projet Fast-Fssp, en particulier pour le traitement des coïncidences de particules dans le faisceau de détection de l'instrument. Le diffusiomètre, de conception plus classique, complètera le dispositif avec une mesure fine de la variabilité spatiale des distributions de particules.

Le principe optique a été conçu en collaboration avec l'Onera/Dota, les diodes de détection en collaboration avec le Laas et le module électronique a été réalisé par la société Cril-Technology. Le prototype, en cours de réalisation, sera testé en 2001 au sol et à bord de ballons captifs.

Activités de développement

Modélisation hydrométéorologique du haut bassin versant de la Durance

Dans la continuité du programme Gewex-Rhône, le CNRM porte une attention particulière à la simulation des bassins versants alpins. Le haut bassin versant de la Durance (2 170 km² dans le département des Hautes-Alpes) est le plus grand bassin versant de montagne français qui ne soit pas perturbé par un grand ouvrage hydroélectrique. À ce titre, il constitue un site privilégié pour l'étude et la simulation numérique de l'enneigement et des crues de fonte nivale.

A partir des paramètres météorologiques analysés au pas horaire, le modèle numérique détermine les échanges hydriques et énergétiques à l'interface sol - manteau neigeux - végétation, la quantité d'eau stockée par le sol et celle qui s'écoule dans la rivière. La bonne restitution des crues de fonte nivale nécessite de bien prendre en compte la variabilité spatiale du manteau neigeux, expliquée en grande partie par le relief et par la présence de forêts à feuillage persistant. Ces deux effets sont pris en compte grâce à des paramétrisations spécifiques.

Les débits calculés par le modèle de 1981 à 1994 sont en bon accord avec les observations de trois stations de mesure de débit situées dans le bassin versant. Le modèle permet en particulier d'expliquer la forte variabilité d'une année à l'autre des crues de fonte nivale (amplitude, date d'occurrence). Cette variabilité est liée à la fois à l'évolution du manteau neigeux (quantité de neige stockée dans le bassin au cours de l'hiver, intensité de la fonte printanière) et à l'état hydrique du sol. Les crues n'apparaissent que lorsqu'une fraction significative du bassin est saturée, le sol sec de la fin de l'hiver commençant par stocker les apports d'eau (fonte ou pluie) en surface.

Résultats de la modélisation numérique du bassin versant de la Durance du 1^{er} août 1984 au 31 juillet 1985.

- a, équivalent en eau du manteau neigeux,
- b, indice d'humidité du sol,
- c, comparaison du débit de la Durance simulé à l'exutoire du bassin et des observations de la station de la Clapière.

Les grandeurs présentées sur les deux premiers graphes sont des moyennes sur l'ensemble du bassin versant.

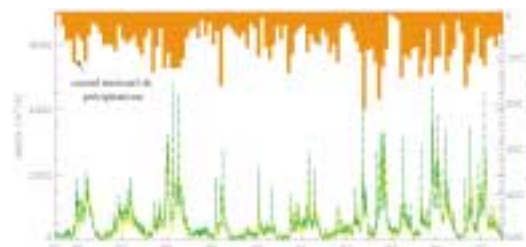
Modélisation hydrologique régionale avec le modèle Isba-Modcou. Comparaison des débits simulés (en jaune) et observés (en vert) à l'exutoire de la Garonne sur la période 1985-1995.

Modélisation hydrologique du bassin Adour-Garonne

Après avoir testé la robustesse du schéma de surface Isba (schéma de calcul des échanges d'eau et d'énergie entre le sol et l'atmosphère) en présence de régimes climatiques très variés sur les bassins versants de l'Adour et du Rhône, la simulation a été élargie au grand bassin Adour-Garonne (bassins de l'Adour, de la Garonne, de la Dordogne et de l'Eyre) ; les Pyrénées font désormais partie du domaine modélisé.

Il a fallu mettre en place une base de données climatiques, physiographiques (répartition de la végétation) et hydrographiques. Le modèle Safran du CEN a été choisi pour alimenter la base en données climatiques, en raison de sa grande adaptation aux zones de relief. Les paramètres liés à la végétation et leur évolution saisonnière sont déduits d'une carte de végétation à 250 mètres de résolution et d'une base de données d'indices de végétation à résolution kilométrique. Enfin, comme dans les précédentes études de modélisation hydrologique régionale, le schéma Isba est couplé au modèle hydrologique Modcou afin de simuler les débits des rivières du domaine.

Sans aucun nouvel étalonnage, la simulation effectuée sur dix ans (1985-1995) laisse entrevoir des résultats statistiques globalement satisfaisants, avec des débits de la Garonne réalistes, tant pour les débits journaliers que pour la lame d'eau annuelle. Cependant, pour des bassins plus petits comme celui du Tarn et de l'Ariège, une étude plus approfondie est nécessaire pour améliorer la simulation des débits.



Modification de l'impact climatique de la déviation de Bergerac

La DDE de Dordogne a demandé au CNRM d'étudier l'impact climatique du nouveau tracé de la déviation de la ville de Bergerac sur les vignobles du Pécharmant. Cette déviation mettra en communication deux vallées par une tranchée routière au niveau de la ligne de crête. Une vallée étant plus froide que l'autre, il s'ensuivra un écoulement d'air froid par la tranchée routière qui occasionnera un refroidissement sur le flanc de la deuxième vallée occupé par les vignobles. Une étude initiale en 1996 avait déterminé l'intensité et l'étendue du refroidissement provoqué par l'ancien tracé.

Les conditions d'écoulement d'air froid occasionnées par les situations météorologiques à inversion de température sont simulées sur une maquette à l'échelle 1/1000. L'utilisation de fluides stratifiés permet de simuler les gradients verticaux de température qui engendrent des différences de température de 0.4 à 1°C au niveau de la tranchée routière. L'analyse des expériences montre que le débit d'air froid passant par la tranchée est réduit d'un facteur 2.5 par la présence d'un pont et de talus boisés dans la tranchée mais que l'étendue des zones refroidies est peu modifiée.

Il en résulte que l'impact climatique de la tranchée routière reste limité spatialement et est peu marqué en température dès que l'on s'éloigne de l'origine de l'écoulement. De plus, la simulation hydraulique a permis de proposer un aménagement des abords de la déviation par un déboisement local et l'implantation d'un talus pour protéger efficacement les vignobles situés à l'Ouest de la déviation.



Etendue du refroidissement occasionné par un écart initial de température de 1.0°C

Impact d'une déforestation locale sur la simulation du manteau neigeux

Le modèle Crocus, développé par Météo-France, permet de simuler l'évolution des manteaux neigeux saisonniers. L'état interne du manteau neigeux, décrit par le modèle de manière très fine, évolue sous l'effet des conditions météorologiques qui déterminent le bilan de surface. Ce modèle, utilisé opérationnellement pour la prévision du risque d'avalanches, a initialement été étalonné à l'aide des jeux de données nivo-météorologiques du laboratoire du Col de Porte. En particulier, la paramétrisation des flux turbulents de surface avait été réalisée sur ce site, abrité du vent par une épaisse rangée de résineux située au nord du laboratoire.

Suite à la coupe de ces arbres durant l'été 1998, la force du vent y a été multipliée par un facteur 2,35. Ceci a fortement dégradé la simulation de l'enneigement du site par Crocus.

Afin de simuler correctement l'accroissement de l'enneigement de la saison 1998-1999, manifestement sous-évalué (courbe bleue de la figure), les mesures des précipitations ont été corrigées en fonction de la vitesse du vent et la température de l'air en utilisant un algorithme développé par des météorologues scandinaves (courbe rouge).

La fonte du manteau neigeux s'est également avérée trop rapide à cause de la surestimation des flux turbulents. Leur paramétrisation a donc été améliorée en utilisant un schéma plus proche de la physique. Ce schéma utilise la longueur de rugosité de la surface, paramètre fortement dépendant de la topographie du site. Les simulations optimales ont été réalisées avec une longueur de rugosité de 0,1cm pour la saison 1998-1999 (courbe verte) et de 0,5cm pour les saisons antérieures (avant déforestation). Ces deux améliorations pourraient à l'avenir être utilisées dans le modèle opérationnel de Météo-France.

L'extension du réseau Nivôse

Au cours de l'automne 2000, le réseau de stations automatiques Nivôse de Météo-France a été complété par deux installations. Ainsi, le réseau pyrénéen qui comptait quatre stations a été enrichi d'une cinquième station Nivôse dans le massif du Luchonnais, à 2500 m d'altitude, au lieu-dit du Maupas. En Corse, la nouvelle station de Maniccia, implantée à 2350 m d'altitude dans le massif du Rotondo, complète les mesures effectuées par la station de La Sponda située à 2000 m d'altitude.

Rappelons que les stations automatiques de haute montagne Nivôse mesurent la hauteur de neige au sol, la température de l'air et l'humidité sous abri, ainsi que la vitesse du vent. Leur transmission est assurée par une balise Météosat et leur énergie par des panneaux solaires et une éolienne. Le réseau comprend maintenant 20 stations, rejoignant en cela les objectifs du schéma directeur de l'observation de Météo-France.

Maintenance d'une station Nivôse dans les Alpes.





Bouées dérivantes en mer.

Les bouées dérivantes

Météo-France déploie régulièrement des bouées dérivantes dans le cadre du groupe européen pour les stations océaniques Egos et du programme international de bouées dans l'océan Indien, qui sont deux groupes d'action du Data Buoy Cooperation Panel, organisme relevant de l'OMM et de la COI. Ces bouées mesurent la pression atmosphérique, la température de surface de la mer et, pour certaines, le vent et la température de la mer en profondeur. Le système Argos est utilisé pour leur localisation et la transmission de leurs données.

En 2000, 12 nouvelles bouées ont été mises à l'eau dans l'Atlantique nord pour Egos. À la fin de l'année, ce réseau comprend plus de 80 bouées, dont 16 françaises. D'autre part, 17 nouvelles bouées ont été déployées dans l'océan Indien, en collaboration avec des océanographes américains. À la fin de l'année 2000, on comptait 24 bouées de Météo-France en opération dans ce réseau.

Une sentinelle au large d'Ouessant

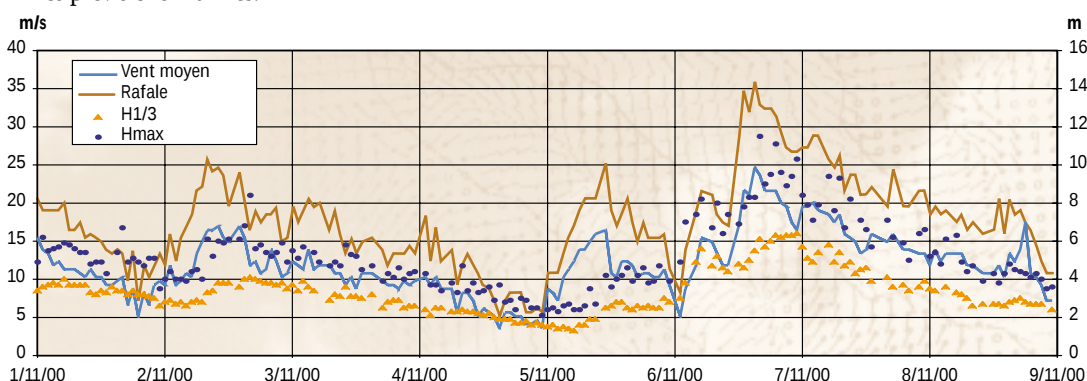
Un nouveau point de mesures météorologiques a été installé à la fin du mois de juin 2000 sur une bouée-phare appartenant au Service des phares et balises, mouillée par 48,5° N et 5,6° W en mer d'Iroise au beau milieu du "rail d'Ouessant", passage obligé des navires de commerce.

L'instrumentation comporte des capteurs pour la mesure de la direction et de la vitesse du vent, de la pression atmosphérique, de la température de l'air, de l'humidité, de la température de la mer et de la houle. Ces mesures horaires, caractéristiques des conditions météorologiques au large immédiat de la Bretagne, seront importantes pour compléter les mesures des sémaphores et des satellites et pour élaborer les prévisions marines.

Mesures du vent et de la hauteur des vagues par la bouée d'Ouessant du 1^{er} au 9 novembre 2000.



La bouée-phare d'Ouessant.



Sondage radiatif par satellite et prévision de tempêtes : quels sont les canaux importants ?

Pour connaître l'impact des données du sondeur Tows sur les prévisions des dépressions, on a utilisé un outil de caractérisation de la sensibilité aux observations, dans le cadre de la technique d'assimilation 3D-Var. En effet, cet outil linéaire permet de connaître le comportement d'un type d'observation en présence des autres observations, et de mieux comprendre son influence sur les prévisions. Ce diagnostic a été utilisé pour étudier la capacité d'une observation à modifier la prévision issue de l'ébauche tout en s'affranchissant en partie des erreurs de modélisation.

Une étude sur dix cas d'assimilation-prévision tirés de la campagne Fastex a été menée, et la figure ci-contre montre la norme des impacts des canaux du Tows sur la modification de la prévision. Ceux-ci ont été répartis en trois classes : les canaux infrarouges sondant la stratosphère, les canaux infrarouges visant dans la troposphère, et les canaux micro-ondes sondant principalement la troposphère.

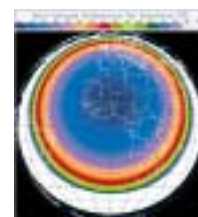
On constate que les canaux sondant la stratosphère n'ont pas d'impact, alors que les canaux micro-ondes ont le plus d'effet devant les canaux infrarouges de la troposphère. Ce résultat est dû à l'information apportée par ces canaux quelle que soit la nébulosité de l'observation (contrairement aux canaux infrarouges troposphériques contaminés par les nuages). Cette caractéristique des canaux micro-ondes se révèle particulièrement utile dans les zones sensibles de la prévision liées au guide d'onde barocline et souvent recouvertes de nuages.

Le Saf pour l'Analyse des Terres Émergées

L'année 2000 a vu le démarrage des activités du projet Saf, Centre d'applications satellite, pour l'analyse des terres émergées initié par Eumetsat. L'organisme hôte est l'Institut Météorologique du Portugal. Cette première phase annuelle a été consacrée au ciblage des besoins des utilisateurs, en termes de définition, spécification, et réalisation des produits. Des premières versions des documents relatifs aux besoins des utilisateurs, aux plans et projets scientifiques, et aux systèmes architecturaux et logiciels, ont été rédigées.

La revue de projet a statué pour une application prioritaire de ce Saf dans les modèles de prévision numérique du temps. Les principaux produits distribués seront l'albédo des surfaces continentales, leur température et leur couverture neigeuse. La responsabilité de leur production incombe, respectivement à Météo France, à l'IMP (Portugal) et au SMHI (Suède). Par ailleurs, Météo France assure le développement des paramètres "rayonnement de surface ondes-courtes" et "signature angulaire", et coordonne la fourniture d'un produit "aérosol".

L'algorithme prototype inclura un logiciel de simulation de prise de vue des systèmes Météosat Seconde Génération et EPS intégré à un code de transfert radiatif dans la végétation. Les données synthétiques servent à l'analyse des effets directionnels et mettent en avant l'intérêt d'une fusion des données entre les deux systèmes d'observation. Cette étude est complétée par des scénarii statistiques d'occurrence des nuages visant à simuler l'absence de données. On évalue ainsi la faisabilité d'une approche physique intégrée par laquelle les paramètres atmosphériques et de surface sont restitués simultanément par l'inversion de modèles multi-spectraux.



Simulations du canal proche infra-rouge du capteur Sevir avec le modèle de Météo-France. En supposant la présence de prairies naturelles sur tout le disque terrestre que verra le satellite Météosat Seconde Génération une fois lancé, on quantifie ainsi la part des effets directionnels de surface qui conduisent à une erreur relative de l'ordre de 20 % sur les flux mesurés.

La coopération bilatérale et multilatérale en 2000

Les actions de coopération sont particulièrement nombreuses. Sans prétendre à l'exhaustivité, on peut retenir les exemples significatifs suivants qui ont marqué l'année 2000.

Le projet Aladin de prévision numérique du temps qui comprend maintenant 14 pays, auxquels s'ajoutera prochainement la Tunisie, fêtera son dixième anniversaire en 2001. L'effort humain total correspond à environ 235 hommes x années pour un coût de 85 MF. Aujourd'hui, des applications du modèle Aladin fonctionnent dans 12 services météorologiques. Dans le sillage du modèle Aladin, des actions de coopération en météorologie marine, prévision de la pollution atmosphérique, nivologie, adaptation statistique et météorologie satellitaire ont été menées avec les pays partenaires.

L'année 2000 a vu l'achèvement du projet de coopération intitulé "Amélioration des capacités nationales et contribution à l'établissement de stratégies de prévention et de gestion des situations de sécheresse dans les pays africains touchés par la désertification". Ce projet financé par le Royaume-Uni, l'OMM et la France a permis d'équiper six pays francophones et six pays anglophones d'Afrique en matériel et en logiciel de traitement de données Clicom et de dispenser la formation nécessaire au personnel africain.

La signature de la nouvelle convention de coopération scientifique et technique avec la Bulgarie établit comme prioritaire le développement des modèles de prévision numérique en matière de prévision marine et de transfert de pollution, ainsi que les études climatiques.

La coopération en météorologie satellitaire avec la Hongrie et la Chine a permis la mise en place dans ces deux pays du logiciel ICI de restitution des profils de température. Les résultats ont été présentés à Budapest en septembre 2000.

Le projet Concorde vise à mettre en place une étroite collaboration entre le UK Met. Office et Météo-France pour les années à venir tant sur le plan humain que matériel afin de promouvoir des actions communes sur divers sujets.

Au cours de la conférence de Strasbourg sur les infrastructures pour la recherche (19-20 décembre 2000), la Commission européenne (DG XII) a affirmé sa volonté de développer le partenariat entre les opérateurs d'infrastructures en Europe afin de renforcer celles-ci et d'en faciliter l'accès à l'ensemble des scientifiques de l'Union. C'est dans ce cadre que le CNRM coordonne le nouveau réseau Eufar des avions instrumentés pour la recherche dans les domaines de l'environnement, de l'atmosphère et de l'observation de la Terre.

Afin de mettre au point de nouvelles modélisations aptes à simuler les effets du vent sur un couvert neigeux, le Service météorologique islandais et le Centre d'études de la neige de Météo-France ont uni leurs efforts au sein du projet Nevos.

Une trentaine de prévisionnistes étrangers représentant l'Europe, les pays du Moyen-Orient et le Canada ont participé aux stages organisés à Toulouse en septembre et en décembre où ont été présentées les nouvelles méthodes de travail utilisées à la DP.

Discussion au PC de la campagne Pre-Escompte en juin 2000.



Organigramme du CNRM

