



Recherche & Développement 2003

Sommaire

Avant-propos	2
Modélisation	4
Processus atmosphériques	12
Campagnes expérimentales	19
Étude du climat et de l'environnement de la planète	23
Développements instrumentaux	29
Activités de développement	34
Organigramme du CNRM	40



Avant-propos

L'activité de recherche à Météo-France a été marquée en 2003 par des avancées significatives dans les domaines particulièrement importants pour la société et stratégiques pour l'établissement.

Dans le domaine du climat, le CNRM a développé avec le Cerfacs un nouveau système de prévision saisonnière basé sur un modèle climatique couplant Arpège-Climat au modèle Orca du Lodyc. Quarante-quatre années de réanalyses du CEPMMT ont été utilisées pour évaluer ce nouveau système dans le cadre du projet européen Demeter. Le système a montré de bonnes performances comparativement aux systèmes analogues. Utilisant les analyses du système Mercator, il possède désormais une qualité suffisante pour exploiter la prévision saisonnière aux latitudes tropicales. Il reste cependant de gros progrès à faire pour disposer d'un système de prévision saisonnière performant sur l'Europe de l'Ouest et permettant de prévoir, plusieurs mois à l'avance et avec une fiabilité suffisante, des étés exceptionnellement chauds et secs comme celui qui a frappé dramatiquement la France en 2003. Conséquence ou non du changement climatique, cet événement a tristement rappelé la pertinence des recherches en cours au CNRM pour mieux appréhender les conséquences du changement climatique et pour intégrer la prévision de la qualité de l'air dans la prévision du temps, notamment en milieu urbain. L'exploitation des données de l'expérience Escompte a également été poursuivie et les nombreux cas de pollution échantillonnés constituent une base de données essentielles pour la validation du modèle de chimie atmosphérique Mocage de Météo-France. Cette base sera enrichie par les données de la campagne Capitoul en cours.

Réunion du Comité
scientifique de Météo-France
à Toulouse.



© Météo-France – XX

Pour la prévision opérationnelle du temps, les premiers développements du système de prévision Arome ont largement commencé pour atteindre dès 2008 les objectifs ambitieux que Météo-France s'est fixés, à savoir appuyer la prévision quotidienne sur un système de prévision à échelle kilométrique (2 à 3 km), capable de simuler explicitement la convection et pour cela assimiler des observations pertinentes à méso-échelle, notamment les réflectivités radar. Des progrès considérables en sont attendus pour la prévision des épisodes de précipitations exceptionnelles comme celles affectant

régulièrement les régions méditerranéennes. Les développements actuels s'appuient sur les recherches menées avec la communauté scientifique nationale travaillant sur le modèle de recherche Méso-NH et avec la communauté internationale Aladin.

Le modèle Arome utilisera aussi les avancées faites récemment au CNRM sur l'hydrologie des surfaces continentales et sur les échanges océan-atmosphère. En améliorant la prévision à échelle fine des conditions météorologiques dont ces phénomènes dépendent étroitement, ce système jouera d'ici quelques années un rôle-clé dans la prévision des crues exceptionnelles, mais aussi dans celle d'autres risques naturels sur lesquels intervient Météo-France tels que les avalanches et les feux de forêt.

Parallèlement à ces études purement atmosphériques, le CNRM poursuit ses travaux sur l'interface sol-atmosphère. Le module Sim (Safran-Isba-Modcou) a démontré tout son potentiel pour la quantification de l'état hydrique des sols et la reconstitution des débits du Rhône, de la Seine... Son extension sur la France entière permettra de disposer d'un outil unique pour la prévision opérationnelle en hydrologie.

Tous ces progrès de la modélisation dépendent étroitement de l'amélioration des connaissances sur les processus impliqués, ce qui nécessite de mener des activités expérimentales particulièrement pointues. L'année 2003 a été marquée dans ce domaine par l'acquisition par Météo-France du nouvel avion instrumenté ATR42. Cet avion accroît considérablement les possibilités de mesures atmosphériques aéroportées et s'harmonise avec les efforts équivalents du CNRS. Regroupés au sein d'une Unité Mixte de Service, Safire, localisée sur l'aérodrome Toulouse-Franczal, Météo-France, le CNRS et le Cnes mettront ainsi à la disposition de la communauté scientifique française de tous nouveaux moyens d'expérimentation qui seront mis en œuvre dans les expériences internationales en préparation telles qu'Amma sur la mousson africaine. Ces moyens seront également gérés au niveau européen dans le cadre du projet du 6e Programme Commun de Recherche et Développement, Eufar, dont le CNRM est le coordinateur européen.

Enfin, dans le domaine spatial, l'implication du CNRM reste forte dans des projets comme Aeolus, Iasi, Airs et Smos. Sur ce dernier projet, le CNRM a contribué à la mise en place d'un site instrumental au Fauga en partenariat avec le Cnes et l'Onera. Mentionnons également le développement d'un nouveau granulomètre Xprobe et la poursuite de l'effort sur la caractérisation de l'humidité et des hydrométéores grâce à l'utilisation du GPS en météorologie.

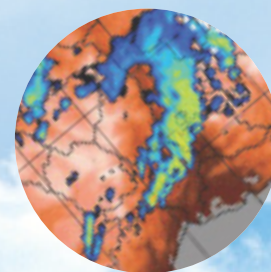


Discours de Éric Brun (à droite), nouveau Directeur de la recherche, à l'occasion du départ de son prédécesseur, Daniel Cariolle (à gauche).

Le Directeur de la Recherche

E. BRUN

Modélisation

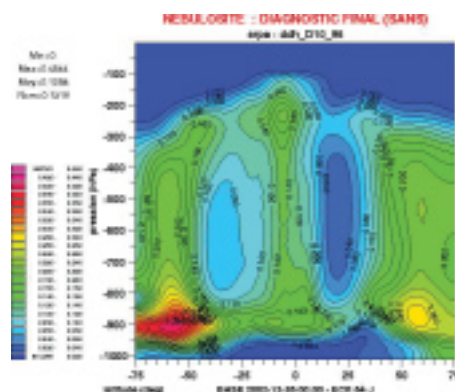


L'année 2003 a connu de nombreuses avancées en modélisation avec la poursuite du développement du modèle Arome, et un effort spécifique en hydrologie et sur la prévision des cyclones.

De nouvelles avancées pour les modèles opérationnels

Les paramétrisations des processus physiques atmosphériques utilisées dans les modèles opérationnels de prévision numérique du temps (Arpège et Aladin) ont été sensiblement améliorées au cours de l'année 2003.

Visualisation en moyenne zonale de la modification du schéma diagnostic de nébulosité.



Le schéma de rayonnement a été modifié pour représenter plus précisément les échanges thermiques entre le sol et l'atmosphère. Cet impact positif, d'abord limité à la température dans les basses couches, se généralise à toute la dynamique de l'atmosphère en quelques jours.

Un nouveau schéma diagnostic de nébulosité a été installé. La nébulosité a ainsi été profondément modifiée avec notamment une amélioration importante de la représentation des nuages bas (cf. figure).

Variation des erreurs d'analyse pour le 28 février 2002.

Les deux modifications précédentes ont rendu possible une diminution de la turbulence résiduelle dans les cas stables, que l'on savait trop forte, mais qui était nécessaire pour une prévision correcte des tempêtes de décembre 1998 et 1999.

Le comportement temporel du schéma représentant les effets de la convection non précipitante a été stabilisé avec pour conséquence une diminution bénéfique des échanges verticaux d'humidité entre la couche limite et l'atmosphère libre au-dessus des océans.

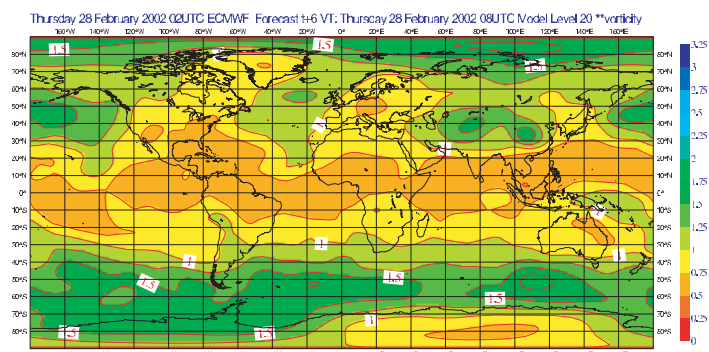
Enfin, une modification du calcul de l'albédo des surfaces enneigées tenant compte de l'âge de la neige et de la présence de végétation haute a amélioré les scores des hautes latitudes de l'hémisphère nord.

Ces modifications ont permis une amélioration de qualité des prévisions en termes de scores objectifs et une diminution des fausses alertes tout en conservant une bonne prévision des tempêtes de décembre 1998 et 1999.

Optimisation de l'apport des observations en assimilation de données

L'utilisation optimale des observations en assimilation de données nécessite la connaissance des variances et des covariances spatiales des erreurs d'ébauche et d'observation pour filtrer et propager l'information observée. Deux nouvelles techniques visant à l'évaluation de ces quantités sont développées par les chercheurs de Météo-France.

Une méthode basée sur un ensemble d'analyses permet de simuler les erreurs de l'ébauche : le modèle fait évoluer les perturbations de l'analyse en perturbations de prévision, et l'analyse est appliquée aux ébauches et observations perturbées.



La figure illustre que les variations d'erreur résultent bien à la fois de la densité variable des observations et des effets atmosphériques (instabilités, advection). Cette méthode conduit en outre à renforcer les corrections de petite échelle apportées par l'analyse.

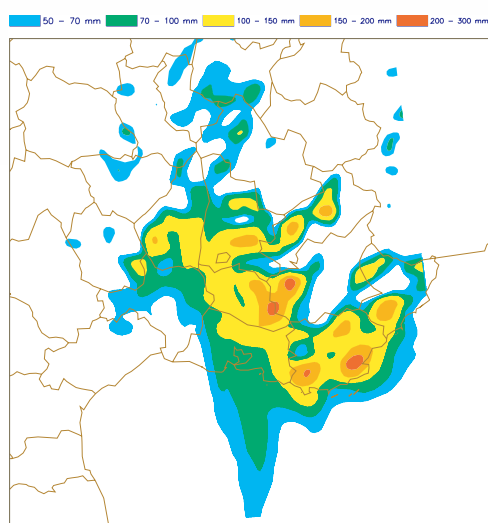
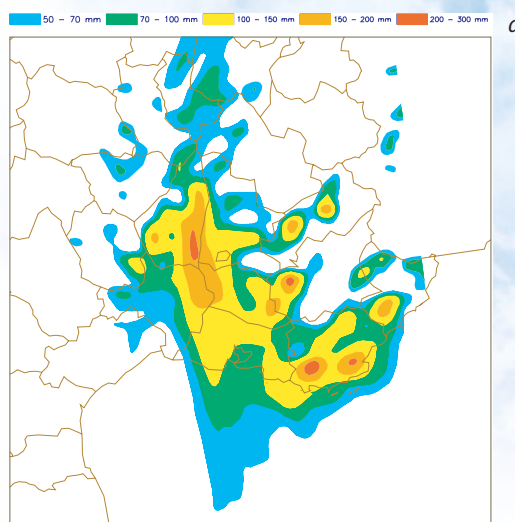
Dans le schéma d'assimilation opérationnel, l'analyse est produite comme l'état de l'atmosphère qui minimise une fonction coût. L'autre méthode utilise une série de propriétés statistiques que doit vérifier cette fonction si les variances-covariances utilisées sont optimales. Par exemple, la valeur de son minimum doit être proche de la moitié du nombre d'observations.

La méthode consiste à amender les variances spécifiées jusque-là de manière que ces propriétés soient vérifiées. L'application de cette méthode à des données simulées, puis à des observations réelles bien documentées, ont confirmé sa capacité à produire des variances réalistes d'erreurs d'observations.

Les deux méthodes sont complémentaires : dans l'approche ensembliste, les erreurs de modélisation ont été paramétrées à l'aide d'un facteur multiplicatif choisi à l'aide d'études d'impact, facteur qui a pu être confirmé par l'autre approche.

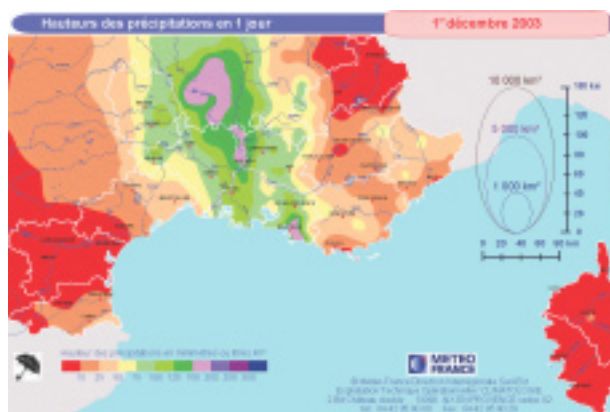
Assimilation des données satellitaires

Depuis le 8 décembre 2003, le modèle opérationnel Arpège assimile les données de radiances infra-rouges HIRS des satellites Atovs et les données de vents à haute résolution temporelle provenant de Météosat. Les résultats en termes de scores sont légèrement positifs pour le vent et très nettement positifs pour l'humidité. On note une analyse plus sèche au niveau des Tropiques, ce qui est cohérent avec les données de radiosondages. L'évaluation subjective est également positive sur nos régions, notamment pour les événements dramatiques sur Arles début décembre. La figure compare les prévisions de l'analyse utilisant les nouvelles données (figure a) et de l'analyse opérationnelle (figure b) aux précipitations observées (figure c), pour la période du 1^{er} décembre à 6 h au 2 décembre à 6 h, au début de l'événement. Bien que d'une manière générale le modèle ait tendance à faire trop pleuvoir sur l'extrême

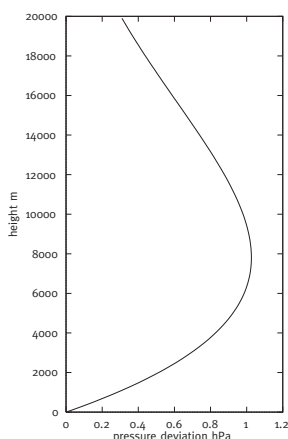


Précipitations pour la période du 1^{er} décembre à 6 h au 2 décembre 2003 à 6 h :

- a) prévisions issues du modèle Aladin à partir du réseau du 1^{er} décembre à 0 h, avec utilisation des nouvelles données ;
- b) prévisions issues du modèle Aladin à partir du réseau du 1^{er} décembre à 0 h, sans les nouvelles données ;
- c) observations pour la même période.



sud-est dans les deux cas, l'assimilation des nouvelles observations a permis de bien mieux positionner les précipitations importantes le long de la vallée du Rhône. Cet impact bénéfique de l'assimilation de nouvelles observations (principalement d'humidité) sur les structures atmosphériques à grande échelle, mais aussi sur des systèmes précipitants intenses à échelle plus fine, est encourageant. En préparation, l'assimilation des instruments Amsu-B d'Atovs et Airs d'Aqua permettront une amélioration du contrôle de l'humidité de la moyenne et haute troposphère.



Différence de pression statique sur une épaisseur de 20 km, en faisant ou non l'hypothèse de la couche mince.

Abandon de l'hypothèse de la couche mince dans le modèle Méso-Nh

Une hypothèse classique faite dans les modèles météorologiques est de considérer que la hauteur de l'atmosphère terrestre est petite devant le rayon de la terre (couche mince) pour simplifier les équations du mouvement. Pour rester cohérent, il faut aussi supprimer une partie des termes de la force de Coriolis. Lors de la définition du modèle Méso-Nh, il a été décidé de permettre ou non d'activer cette hypothèse, le système d'équation comportant tous les termes nécessaires sans simplification.

Le problème qui est apparu concerne la définition de l'équilibre hydrostatique qui suppose en plus l'équilibre de la force de pression et de la gravité sur la verticale. Cette hypothèse n'est pas utilisée dans le modèle Méso-Nh (modèle non-hydrostatique), mais sert à construire l'état de référence ou les conditions initiales du modèle. Si on considère une géométrie sphérique, la pression d'équilibre en un point n'est plus le poids de la colonne d'air situé au-dessus (hypothèse couche mince) mais le poids du cône, le rayon de l'atmosphère augmentant avec l'altitude.

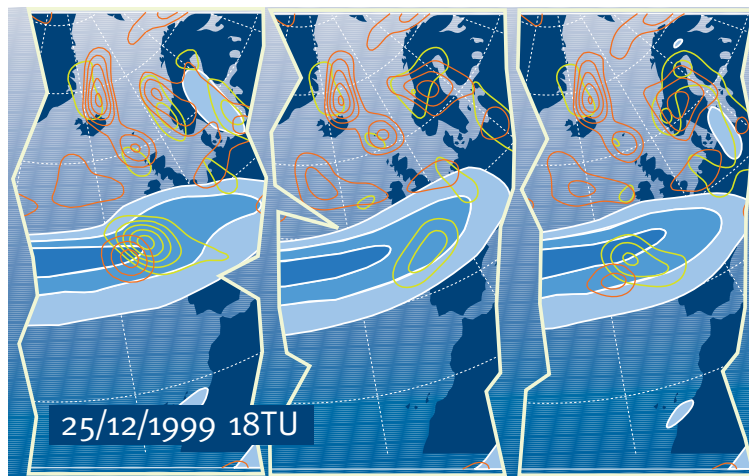
Le bon équilibre hydrostatique a donc été recodé. La différence maximale entre les deux formulations atteint environ 1hPa comme indiqué sur la figure. La modification a été validée en regardant la pression calculée par le modèle au cours d'une simulation à grande maille horizontale. À cette échelle l'hypothèse hydrostatique est vérifiée et le profil de pression trouvé est cohérent avec le nouveau codage de l'équilibre hydrostatique. Cette modification permet donc d'avoir des conditions initiales plus cohérentes pour les simulations.

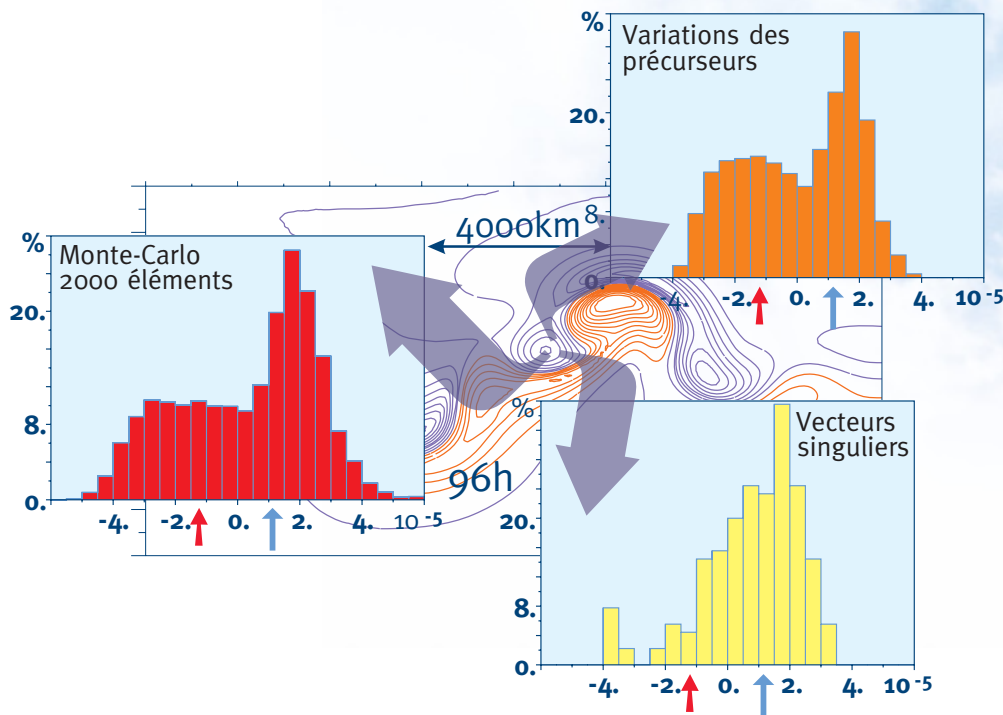
La théorie de l'instabilité barocline est-elle valide ?

Aujourd'hui, l'explication standard de l'origine des dépressions et des tempêtes attribue l'apparition de ces dernières à un processus d'instabilité au sein du courant-jet. L'évolution de l'environnement non perturbé détermine à lui seul la phase initiale d'une cyclogenèse. En réalité, les descriptions théoriques ont rarement fait l'objet de vérifications ou de validations précises, c'est-à-dire d'une confrontation entre structure et évolution prévue dans le cadre théorique et dans une situation réelle : la théorie de l'instabilité barocline restitue des ordres de grandeur d'échelles, elle explicite un mécanisme, mais permet-elle d'expliquer un cas réel ?

Très élégante en théorie, la séparation entre un environnement et un système ne va pas toute seule dans un cas réel. Pour appliquer une démarche de validation aussi rigoureuse que possible au début de la formation de la tempête du 26 décembre 1999, les chercheurs du CNRM ont d'abord construit une solution sans la tempête. Pour cela, on a associé filtrage temporel et inversion du champ de tourbillon potentiel. Au passage, ceci nous donne un élément précieux, la structure spatiale d'une perturbation réelle. Munis de cette trajectoire conforme à la vision théorique, les calculs ont été poursuivis et donnent un résultat mitigé. D'une part, il se confirme que les structures des perturbations initiales observées et calculées sont très différentes. Mais d'autre part, la théorie (basée sur le calcul de vecteurs singuliers) aboutit bien à un scénario de développement proche de la réalité en terme de trajectoire et d'intensité. Ainsi, bien que ne donnant pas une bonne idée de la structure d'un vrai précurseur de cyclogenèse, la théorie de l'instabilité barocline permet de les déclencher.

Trois simulations de la tempête du 26 décembre 1999 montrées ici au début de la phase non-linéaire de croissance explosive. À gauche, la simulation de référence proche des observations, au centre la simulation sans les éléments précurseurs, donc de l'environnement du calcul de stabilité, à droite ces précurseurs réels sont remplacés par une combinaison de modes instables déduit de l'environnement. Bien qu'en retard et de moindre amplitude, elle entraîne aussi une forte tempête. Les surfaces bleues bordées d'isolignes blanches indiquent la force du vent à 300 hPa tous les 20 m/s à partir de 40 m/s : on note la proximité de la sortie du jet. En jaune, les ascendances à 600 hPa tous les 0,2 Pa s⁻¹ (environ 3 cm/s), en rouge orangé le tourbillon relatif à 850 hPa, qui désigne les systèmes dépressionnaires, tous les 3.10⁻⁵ s⁻¹.





Le fond de l'image résume la situation météorologique sous la forme du champ de tourbillon relatif à 850 mbar (intervalle $5 \cdot 10^{-5}$ s-1, région cyclonique en orangé, anticyclonique en mauve), centré sur la partie du front froid où une deuxième dépression se forme selon de petits changements dans les conditions initiales. Les histogrammes traduisent les probabilités de ces scénarios : à gauche, par une méthode de Monte-Carlo avec un échantillon de 2 000 simulations, en bas à droite, à la manière des prévisions d'ensemble opérationnelles avec 20 éléments, en haut à droite en perturbant les paramètres descriptifs des anomalies organisées des conditions initiales (ici avec plus de 200 éléments, mais qui signalent mieux le second scénario que la méthode opérationnelle dès 10 éléments).

Vers une autre représentation des perturbations en prévisibilité

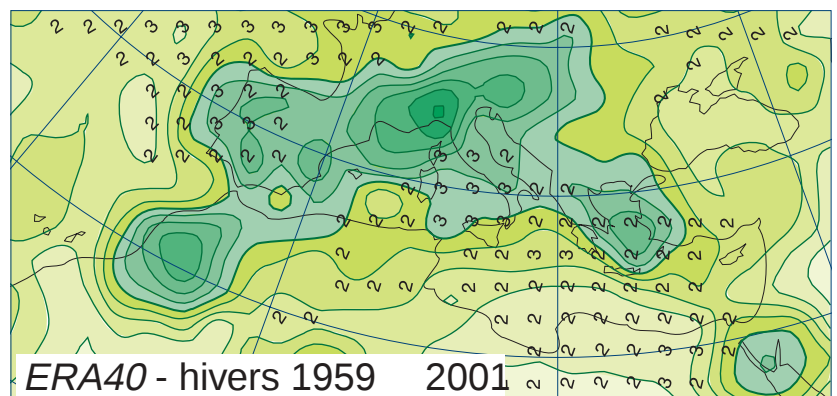
Dans une situation de cyclogénèse idéalisée, on a choisi un cas où deux évolutions apparaissent possibles : formation d'une "ondulation" sur le front froid (figure), ou non. Ce type de situation est délicat à prévoir. La prévision d'ensemble a l'ambition de produire des distributions statistiques en vue de quantifier la probabilité de chacune de ces situations. Une distribution à partir d'une méthode de Monte-Carlo a été réalisée pour la zone soumise au risque d'ondulation, mais cette méthode est coûteuse en temps calcul. Une méthode basée sur les prévisions d'ensemble permet d'obtenir une bonne approximation de cette distribution au moyen d'un échantillon dix à vingt fois plus petit. Grâce à cette étude, on met en évidence que l'approche fondée sur l'échantillonnage d'erreurs sur les précurseurs (dépression de basse couches et dépression d'altitude) se révèle bien plus capable de retrouver les probabilités des deux scénarios évoqués ci-dessus. Cette étude exploratoire nous encourage à développer l'identification de précurseurs et ses applications comme un axe important de la prospective du CNRM. En effet, à un moment quelconque, l'atmosphère présente toutes sortes d'organisations, non seulement de grande échelle, mais aussi d'échelle synoptique. Celles-ci ne sont pas nécessairement très actives, dans le sens où elles ne produisent pas de temps sensible significatif, mais elles influencent néanmoins l'évolution du temps. Elles sont le produit de l'histoire antérieure de l'atmo-

sphère. Il s'agit de structures cohérentes d'amplitudes finies, avec, à un moment donné, quelques caractéristiques simples (intensité, position) entachées d'erreurs que l'on échantillonne ou que l'on modifie selon l'usage.

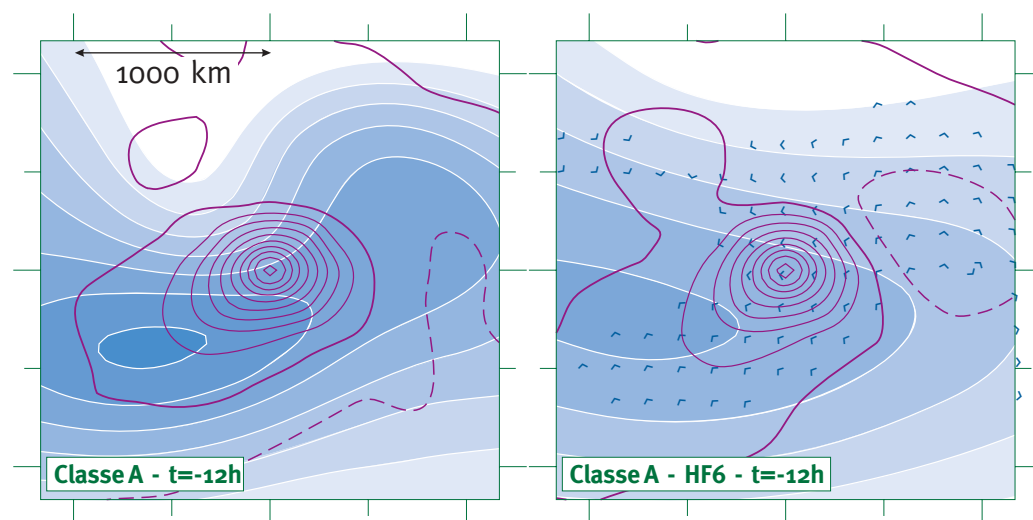
Documentation de la cyclogénèse avec Era 40 : un début

L'exploration de la variabilité observée de l'atmosphère aux échelles synoptiques et supérieures entreprise en marge du projet Fastex au moyen de la ré-analyse Era 15 ne peut couvrir, du fait de sa durée, toute la gamme des scénarios d'évolution. Avec la ré-analyse Era 40 terminée courant 2003 à Reading, l'échantillon de champs homogènes atteint la durée qui semblait raisonnable dans les études pionnières qui ont lancé la « climatologie dynamique » fondée sur les archives du service météorologique américain.

Densité de création de nouvelles trajectoires de dépressions dans le bassin méditerranéen déterminée à partir de l'ensemble de la ré-analyse Era 40. L'isoligne de référence est de trois formations par mois, l'intervalle de 0,5 cas par mois. Les chiffres représentent les vitesses moyennes de déplacement ($2 = 10$ kts, $3 = 15$ kts) des systèmes au moment de leur formation. Le comptage sur une grille de 1,5 repose sur une échelle spatiale fixe et ne tient pas compte de l'orographie. On peut ainsi noter que la plupart des systèmes qui se forment sur l'Atlas ou dans le Golfe de Gènes restent en général sur place, ceux de la mer Égée se dirigent lentement plein est.



En mauve, tourbillon relatif à 850 mbar tous les $2 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, avec une référence à 10^{-5} s^{-1} . En surfaces bleues, la force du vent à 300 mbar tous les 5 m/s à partir de 20 m/s. La structure de la dépression et son contexte sont montrés au milieu de la phase de croissance la plus rapide, douze heures avant d'atteindre leur amplitude maximale, dans le cas du composite de " bombes " (creusement de plus de 24 hPa en 24 heures) qui représente 12 % de toutes les cyclogénèses d'hiver sur l'Atlantique nord. À gauche, les champs complets : noter la forme du jet, avec deux maximums. À droite, les champs sont décomposés en perturbation (anomalies de tourbillon de signes opposés, flèches de vent) et en environnement à évolution lente. Le courant-jet associé ne présente plus qu'un seul maximum, et le système se situe dans sa partie diffuente. Les autres composites à croissance marquée présentent la même caractéristique.



Les premières applications envisagées au sein du CNRM portent sur une contribution à l'étude de l'évolution du risque de tempête liée au changement climatique d'une part, et une étude de la cyclogénèse en Méditerranée dans le cadre du projet Medex d'autre part. Ces deux applications réclament des trajectoires de systèmes dépressionnaires comme information de base permettant d'identifier et de décrire chaque événement. On a adapté pour cela l'algorithme de suivi automatique, développé au CNRM, à cette nouvelle ré-analyse. Un premier résultat cartographie les zones de formation de nouvelles dépressions dans la zone Méditerranéenne au cours des 40 dernières années. À côté de la région bien connue du Golfe de Gênes, on trouve des zones aussi actives vers l'Atlas marocain (sous l'influence du jet subtropical) ou en mer Egée.

De nouveaux résultats sur les cyclogénèses types

L'étude de longues ré-analyses permet de renouveler en profondeur la description des propriétés et des caractéristiques de différents phénomènes, en particulier les cyclogénèses synoptiques et sous-synoptiques. On peut ainsi rechercher l'existence des modèles conceptuels les plus connus et en déterminer l'importance statistique réelle.

Cette approche entièrement nouvelle a été définie par les chercheurs du CNRM qui ont déterminé un certain nombre de situations types pour chacune des phases essentielles de la vie des

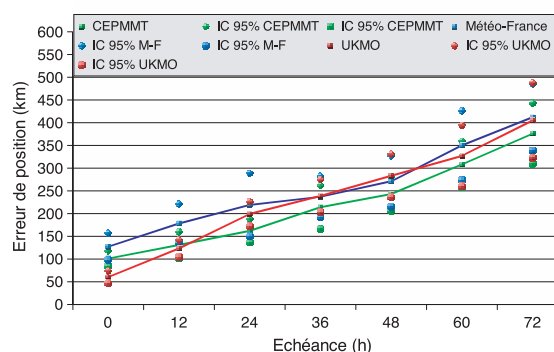
dépressions : leur apparition et le moment où elles deviennent des tempêtes. Ces situations types ne se résument pas à des schémas, mais sont des champs intégrant au moins une centaine de cas et constituent un jeu très riche de données climatologiques élaborées. Les études montrent que la présence d'un courant-jet fort n'est qu'une condition nécessaire, mais non suffisante à une cyclogénèse explosive, contrairement au résultat théorique standard.

En approfondissant la séparation entre environnement et perturbation par filtrage temporel, on a pu mettre en évidence le rôle de l'accélération du vent en altitude associé à la sortie d'air des ascendances. On pensait jusqu'alors que la présence d'une zone de diffuence (ou sortie de jet) était parfois un facteur utile à l'intensification d'une dépression. Les études menées montrent qu'une telle zone de diffuence est en fait aussi une condition nécessaire d'une cyclogénèse explosive.

Les performances du modèle Arpège-Tropiques en prévision de trajectoire cyclonique

Le bilan de la dernière saison cyclonique écoulée comparant les performances du modèle Arpège-Tropiques de Météo-France, ainsi que celles des autres modèles numériques globaux utilisés opérationnellement au Centre Météorologique Régional Spécialisé de La Réunion, montre que le modèle Arpège-Tropiques fait désormais partie des modèles à considérer en matière de prévision cyclonique.

La figure représente l'évolution de l'erreur moyenne de prévision et l'intervalle de confiance de Gauss associé à 95 % (IC 95 %) selon l'échéance. Les échantillons considérés



Evolution de l'erreur moyenne de prévision de la position des cyclones par les modèles en fonction de l'échéance sur l'Océan Indien sud ouest. Saison 2002-2003.

n'étant pas homogènes, ce graphique ne permet pas de faire une comparaison rigoureuse entre les modèles, mais donne cependant une bonne idée de leur comportement. Les plus grandes différences s'observent dans les 24 premières heures de prévision et semblent relativement fiables puisque les intervalles de confiance sont dans l'ensemble resserrés. Il est à noter que le forçage de profils verticaux de vent reconstitués à proximité du centre du cyclone dans l'assimilation du modèle du UKMO (méthode du « bogussing ») est efficace puisque ce modèle propose l'analyse (échecance 0 h) la plus précise. Le modèle Arpège-Tropiques utilise également la technique du « bogussing », mais de manière plus légère puisque seule une pseudo-observation de la pression mer au centre du cyclone est forcée. Le modèle du CEPMMT n'utilise pas de « bogussing ». Au-delà de 36 heures d'échéance, l'écart entre les modèles devient plus ténue avec une confiance plus faible. La capacité à localiser un cyclone semble rester plus précise avec le modèle du CEPMMT au fil des échecances.

Vers une modélisation couplée hydrométéorologique des crues rapides

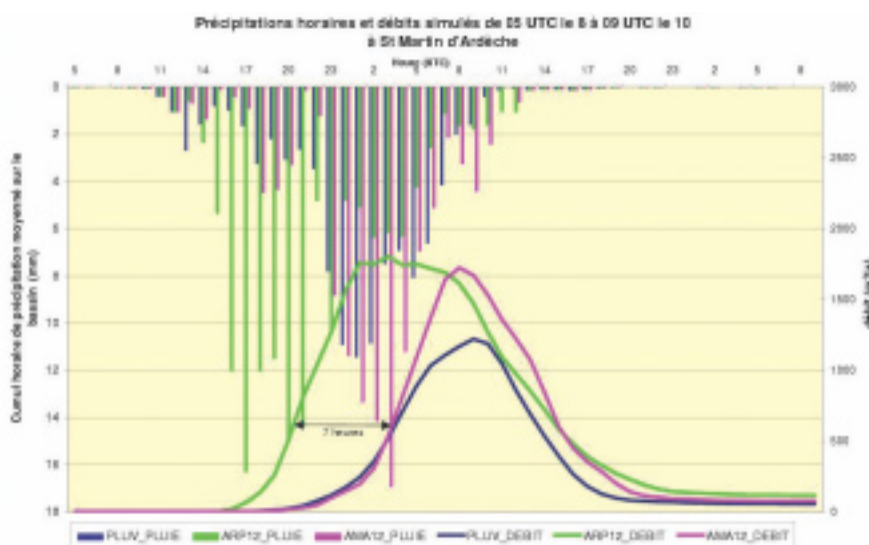
Un des objectifs de l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivaraies (OHM-CV) est de développer une modélisation couplée des crues éclair pour les bassins versants de la région Cévennes-Vivaraies, fréquemment

soumis à ce risque. Pour préparer ce développement, plusieurs expériences de forçage du modèle hydrologique Topmodel par les pluies simulées par le modèle Mésos-Nh à haute résolution (2,5 km) ont été conduites dans le cadre d'une collaboration entre le LTHE et le CNRM. Ces expériences permettent de proposer une autre approche de la validation des champs de précipitation simulés à haute résolution, i.e. une validation intégrée et orientée vers l'hydrologie. Ceci est illustré pour le cas des inondations du Gard du 8-9 septembre, où les expériences de forçage avec Topmodel mettent clairement en évidence la sensibilité aux conditions initiales des simulations Mésos-Nh et leur impact en termes de prévision du pic de crue.

Les chercheurs du CNRM s'attachent actuellement à développer avec le LTHE une version totalement couplée du modèle Mésos-Nh, du schéma de surface Isba et du modèle hydrologique distribué Topodyn. Ce couplage considère la gestion des géométries des différents modèles (grille régulière pour le modèle Mésos-Nh versus bassin versant pour le modèle hydrologique) et introduit la redistribution latérale de l'eau du sol effectuée par le module hydrologique dans le schéma de surface tout en rationalisant la représentation des processus de surface commune au modèle hydrologique et au schéma de surface. Ce développement ouvre la possibilité de considérer et d'étudier la rétro-action des phénomènes hydrologiques sur les processus atmosphériques et la modélisation des systèmes fortement précipitants.

Évolution de l'erreur moyenne de prévision de la position des cyclones pendant la saison cyclonique 2003 sur l'Océan indien par les différents modèles de prévision Arpège-Tropiques, CEPMMT, UKMO, etc.

Lames d'eau horaire (histogrammes) et débits simulés (courbes) pour le bassin de l'Ardèche à St-Martin d'Ardèche entre le 8 septembre à 5 UTC et le 10 septembre à 8 UTC. Les précipitations horaires ont été moyennées sur le bassin pour les pluviomètres (en bleu) et pour deux simulations Mésos-Nh à 2,4 km de résolution avant d'être fournies en entrée au modèle hydrologique Topmodel. Les simulations Mésos-Nh diffèrent par leurs conditions initiales qui sont soit l'analyse de grande échelle Arpège (en vert), soit une analyse de méso-échelle (en rose). L'utilisation d'une analyse de méso-échelle comme conditions initiales permet de mieux simuler la crue et sa récession.



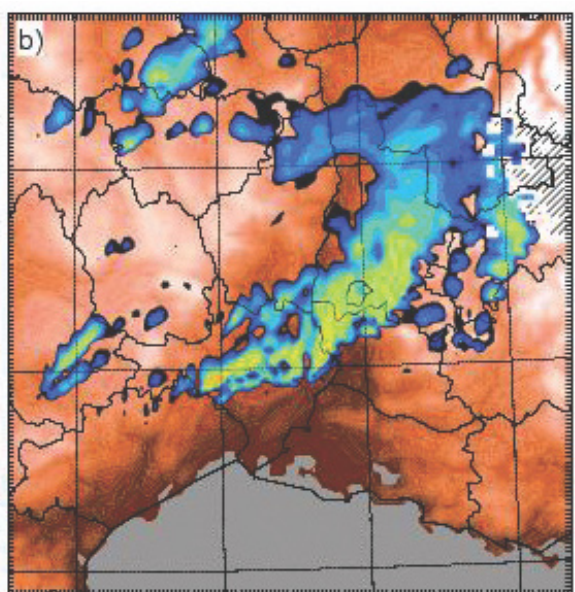
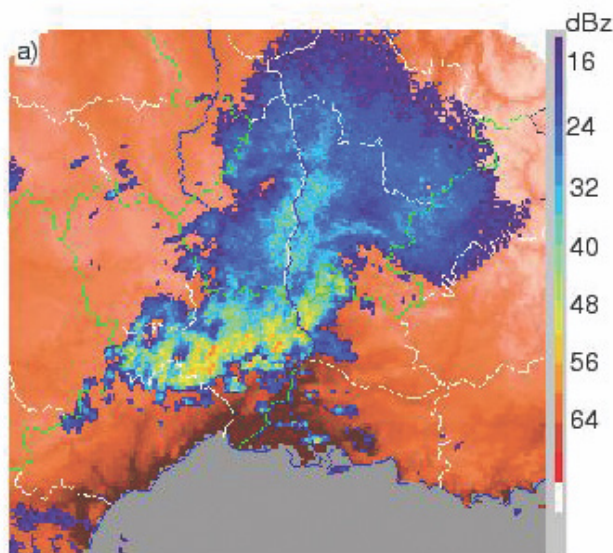
Réflexivités à 21 UTC
le 8 sept. 2002
(en dBz) :

a) observées par le
radar de Nîmes ;

b) simulées par le
modèle Més0-Nh à
2,4 km de résolution.

On constate une
bonne concordance
de ces deux champs
de réflectivité.

Étude de la situation des inondations du Gard des 8 et 9 septembre 2002



Le Sud-Est de la France est soumis à un risque important de pluies intenses. Ce fut en particulier le cas les 8 et 9 septembre 2002, où un épisode de pluies intenses s'est abattu sur la région du Gard faisant plus de 20 victimes et de nombreux dégâts. Les cumuls de précipitation ont atteint localement 600-700 mm en 24 heures. Cette situation fait actuellement l'objet d'une étude avec le modèle Més0-Nh à haute résolution (2,4 km).

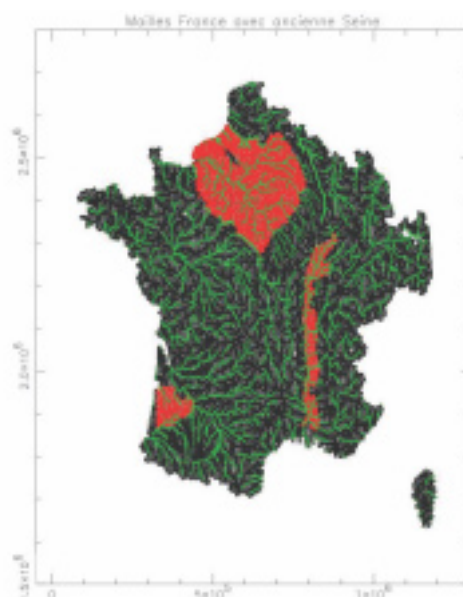
Cette étude montre que la modélisation à haute résolution peut améliorer significativement la prévision de cet événement. Différentes

conditions initiales ont été testées et la pertinence d'une assimilation de données à méso-échelle est clairement montrée pour améliorer la prévision à très courte échéance. L'assimilation des données de surface permet notamment de localiser correctement le point d'ancrage du système convectif de méso-échelle quasi-stationnaire responsable d'une part importante des précipitations. En complément des observations de surface, l'utilisation de données radar et satellitaires pour initialiser le modèle permet d'améliorer également les quantités de précipitations prévues.

Les simulations de cette situation ont permis de mettre clairement en évidence le rôle d'un courant de densité sous-orage pour expliquer la stationnarité de la convection sur la région du Gard en amont des reliefs du Massif Central. Ce refroidissement sous-orage engendré par l'évaporation et la fusion des précipitations associées à la convection force le flux humide et instable de basses couches en provenance de la Méditerranée à se soulever et à générer ainsi continuellement de nouvelles cellules convectives sur le bord d'attaque de ce courant de densité.

Modélisation hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou (SIM) sur la France

L'année 2003 aura été pour l'application SIM à la fois l'année du passage en opérationnel, et l'année de l'extension de la modélisation hydrologique à l'ensemble de la France.



Domaine d'application du
système Safran-Isba-Modcou
(SIM) : maillage hydrologique
de surface (en noir), domaine
souterrain (en rouge),
et réseau hydrographique
de surface (en vert).

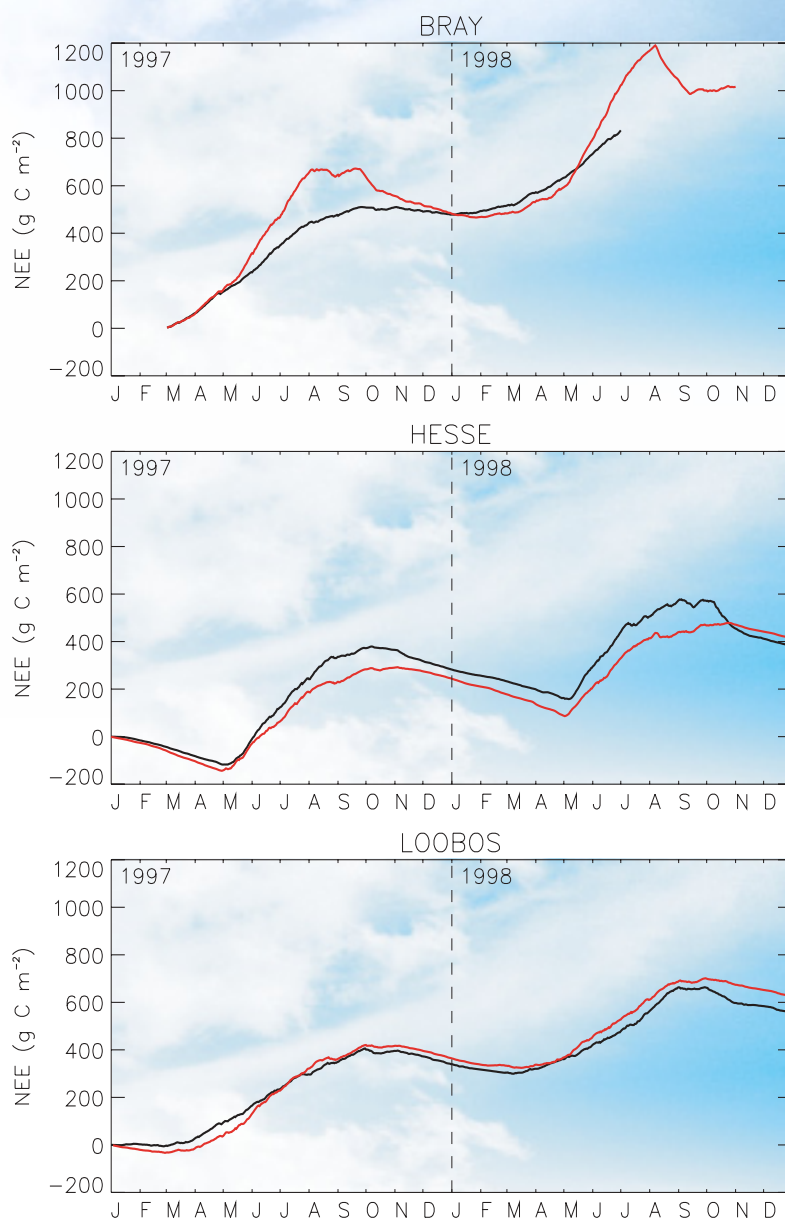
En effet, le passage en mode opérationnel s'est fait fin 2002 pour les analyses atmosphériques Safran temps réel et fin 2003 pour les simulations du schéma de surface Isba et du modèle hydrologique Modcou. Ceci va permettre d'estimer en temps réel le bilan hydrique, c'est-à-dire le contenu en eau du sol, le manteau neigeux, le ruissellement, le débit des grandes rivières et le niveau des nappes phréatiques.

Un effort particulier a été fait en 2003 pour estimer la capacité de SIM à reproduire les débits de la Loire et de la Seine en complément des études précédentes sur le Rhône et la Garonne. Le bassin versant de la Seine est très complexe, car il est marqué à la fois par une forte urbanisation et par la présence d'un système de nappes emboîtées, recouvrant près des 3/4 du bassin. La modélisation de ce bassin à l'aide des modèles de surface Teb, dédié à la ville, et Isba, dédié aux espaces naturels, couplé au modèle Modcou représentant les trois nappes principales, a permis de bien reproduire les débits journaliers observés, et en particulier en période de crue et d'étiage.

Par ailleurs, on s'est intéressé au potentiel des simulations SIM pour initialiser les contenus en eau du modèle Meso-Nh, lors de situations diverses (beau temps, orage cévenol). On a pu constater que l'utilisation d'un contenu en eau plus réaliste que celui dérivé de l'analyse opérationnelle avait un impact positif sur la simulation des températures et humidités à 2 m et des précipitations.

Le modèle Isba-A-gs

Le modèle de surface Isba utilisé à Météo-France pour modéliser les surfaces continentales intervient dans diverses applications (hydrologie, prévision opérationnelle, et climat). La même stratégie (un seul modèle pour des applications différentes) est employée pour la modélisation du cycle du carbone grâce à une version récente du modèle Isba permettant de simuler la photosynthèse, l'indice foliaire, la biomasse aérienne de la végétation et les flux de CO₂ : Isba-A-gs. Les paramétrisations employées dans Isba-A-gs permettent de décrire les processus biologiques importants tout en utilisant un nombre restreint de paramètres. Ce modèle permet de détailler la réponse de la végétation au stress hydrique et



au changement climatique. De plus, un effort de méta-analyse bibliographique a permis de déterminer la valeur des paramètres du modèle pour un grand nombre de plantes.

Le schéma a été appliqué à divers jeux de données de façon à éprouver sa capacité à simuler les flux et l'indice foliaire. En particulier, une meilleure prise en compte de l'effet du stress hydrique sur la photosynthèse et la transpiration foliaire des plantes ligneuses a été introduite dans le modèle, ce qui a permis de comparer les simulations du modèle avec les observations réalisées dans le cadre du réseau de mesure Fluxnet sur 3 sites forestiers en Europe.

Cumul annuel du bilan net de carbone (NEE), observé et simulé par le modèle Isba-A-gs (traits noirs et rouges, respectivement), sur trois sites forestiers en 1997 et 1998 : Le-Bray (pin maritime de la forêt des Landes), Hesse (hêtraie du nord-est de la France), Loobos (pin sylvestre aux Pays-Bas). Pour les deux années étudiées, les trois sites absorbent davantage de carbone qu'ils n'en émettent.

Processus atmosphériques



L'étude des processus atmosphériques constitue la pierre angulaire de l'amélioration de la compréhension et de la prévision des phénomènes météorologiques et climatiques. L'année 2003 a vu les retombées de nombreuses campagnes de mesures comme Fastex ou Map.

Pourquoi un jet aussi intense fin décembre 1999 ?

Pour comprendre et continuer à apprendre des tempêtes de décembre 1999, les chercheurs du CNRM ont poursuivi la recherche de l'origine de l'intensité anormale du courant-jet sur l'Atlantique entre le 21 et le 27 décembre sur une base plus quantitative. Le travail mené se fonde sur l'hypothèse formulée par un chercheur du CEPMMT selon laquelle il existe un lien entre les précipitations exceptionnelles observées dans le sud et l'ouest du Golfe du Mexique (région tropicale) et le renforcement du courant-jet dans les jours qui ont suivi. Ces précipitations ont entraîné des glissements de terrains catastrophiques au Venezuela et ont touché sévèrement l'isthme entre les deux Amériques.

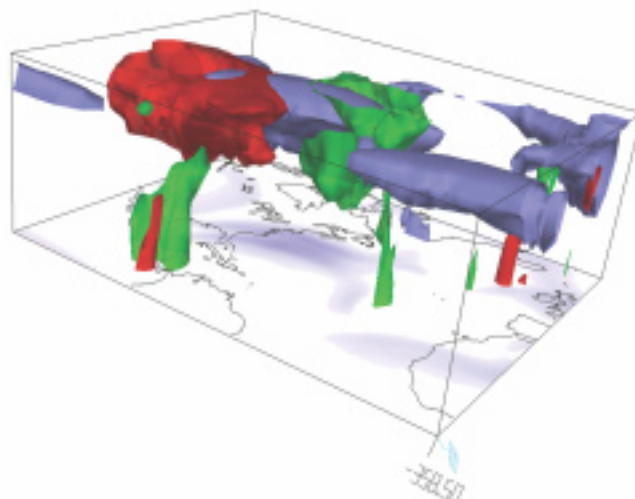
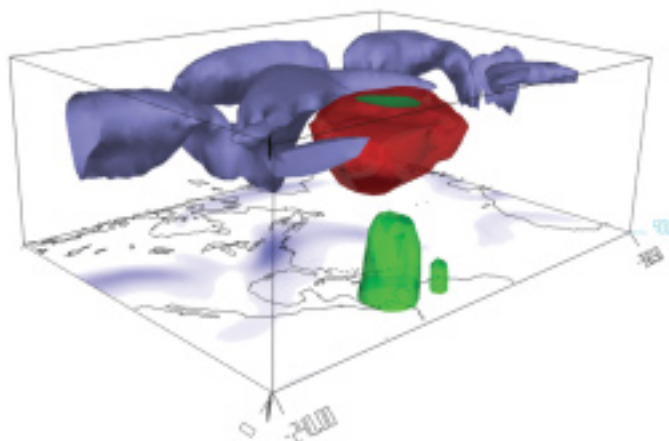
Le mécanisme envisagé considère la source de chaleur produite par la formation de ces pluies comme capable d'engendrer un train d'ondes de Rossby, qui s'installe de manière quasi-stationnaire après une rapide propagation vers le nord-est. Pour mettre ce système d'ondes en évidence, on utilise l'inversion du tourbillon

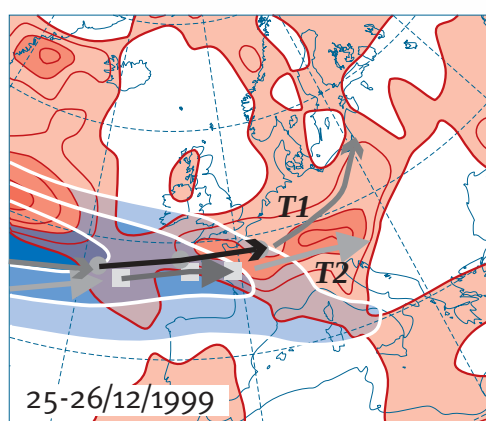
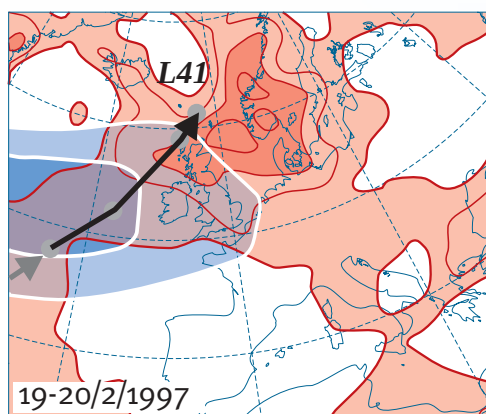
potentiel. En effet, la première empreinte d'un fort dégagement de chaleur latente sur la dynamique prend la forme d'une anomalie de tourbillon potentiel de structure verticale caractéristique, marquée par une anomalie négative en altitude. En utilisant diverses sources de données, en particulier télédétections, on a tenté de déterminer l'amplitude de cette anomalie. Les premiers résultats d'inversion et de propagation du signal indiquent que la perturbation ainsi introduite gagne la latitude du jet. Ce dernier joue ensuite un rôle de guide d'onde, de sorte qu'ensuite la perturbation se propage vers l'est. La composante zonale du courant-jet s'en trouve ainsi renforcée. La suite des travaux s'attache à tenir compte maintenant de la longue durée de ces précipitations.

Mécanismes de croissance rapide en sortie de jet

Les études menées placent au même niveau d'importance la présence d'une forte baroclinie (fort gradient horizontal de température et vitesse maximale du jet) et celle d'une zone de diffluence comme causes nécessaires des cyclogenèses rapides. Du coup, il fait ressortir la part d'ombre dans notre compréhension des processus en jeu : en effet, si l'interaction barocline est bien connue et reste d'ailleurs le véritable pourvoyeur de l'énergie des vents forts créés dans les tempêtes, les conditions par lesquelles une zone de diffluence en déclenche ou en renforce l'action restent largement à préciser.

Expérience d'incorporation d'une perturbation produite par l'inversion d'une anomalie de tourbillon potentiel liée à la formation de pluie dans le Golfe du Mexique (en rouge, anomalie anticyclonique, négative de géopotentiel, en vert, anomalie cyclonique positive, seuil de 40 mgp). À gauche, le 16 décembre à 12 hTU (10 jours avant la tempête), on observe au premier plan l'anomalie représentant l'effet des précipitations, et le courant-jet à ce moment là (en bleu, seuil représenté de 40 m/s et ombre portée au sol). À droite, localisation de la perturbation et du jet au bout de 48 heures, vue sous un angle orienté sud-est/nord-ouest permettant de voir que la perturbation introduite a atteint le jet et interagit de manière complexe avec lui.





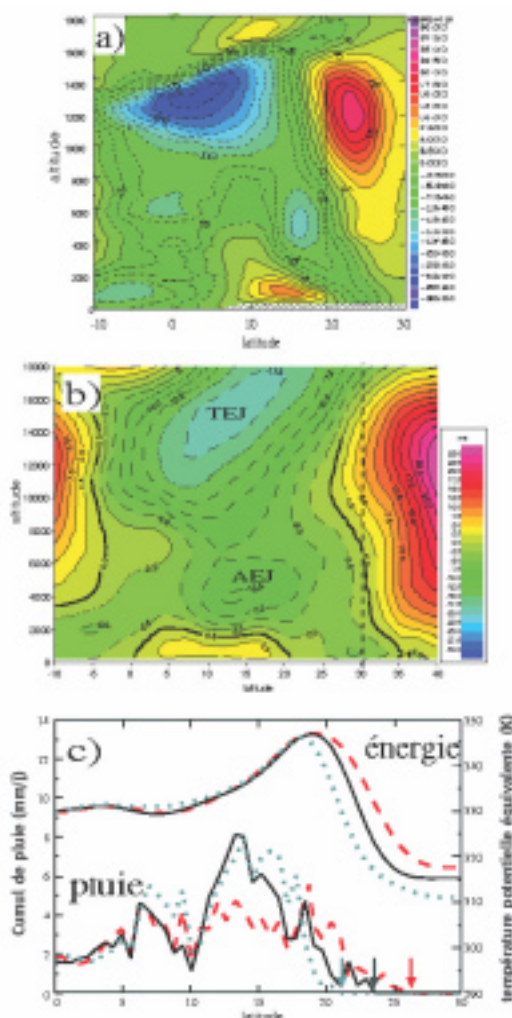
Une avancée significative résulte de la transposition par les chercheurs du CNRM de réflexions surtout théoriques menées au LPO et au LMD. On peut résumer ce progrès par deux éléments. Tout d'abord, un diagnostic apparemment simple mais assez fin des propriétés de la composante lente de l'écoulement (événement de grande échelle : blocage, jet moyen) et de l'environnement des dépressions permet de situer des points de passages obligés pour les perturbations circulant dans cet environnement. Ce sont des régions où les différents cisaillements horizontaux du champ de vent imposent des orientations persistantes bien définies aux perturbations. Ce premier diagnostic révèle que des organisations de grande échelle assez voisines au premier abord imposent des trajectoires très différentes découlant de leurs inhomogénéités horizontales. Au moins deux types de mécanismes d'optimisation de l'interaction barocline due à la présence d'une région diffluyente ont ainsi été proposés. Dans un cas de février 1997, l'inclinaison verticale de la perturbation est accrue. Dans le cas des tempêtes de décembre 1999, perturbations de surface et d'altitude se voient contraintes de s'aligner dans l'axe du vent thermique maximal (figure).

Apport d'une étude simplifiée de la mousson africaine

La mousson africaine peut être vue comme le passage de la zone de précipitation associée à la Zone de Convergence Inter Tropicale de 5°N pendant le régime de pré-mousson (mai-juin) à une latitude moyenne de 10°N en régime de pleine mousson (juillet-août). La date de ce saut de mousson et la position de la zone de pluie, problème clé pour les populations locales, sont encore mal prévues et mal simulées par les modèles de circulation générale existants.

Une alternative intéressante est de revenir à un modèle plus simple, avec un nombre limité de degrés de liberté (donc de complexité) capable de représenter les ingrédients fondamentaux de la mousson africaine. D'après les observations, celle-ci se caractérise par une forte symétrie zonale. On peut utiliser le modèle Méso-Nh pour simuler dans un plan méridien-vertical une mousson africaine simplifiée.

Propriétés de la partie de basse fréquence (à évolution lente) et trajectoires des dépressions en surface (résumant le comportement de la partie à évolution rapide) dans deux types de situations. En haut, la dépression 41 de Fastex, en février 1997, en bas les tempêtes T1 et T2 des 26 et 27 décembre 1999. En surfaces bleues, la force du vent à 350 hPa marquant l'extrémité est du courant-jet, tous les 10 m/s à partir de 30 m/s. En rouge, le nouveau diagnostic développé au CNRM montre bien que la France et l'Allemagne sont le lieu de passage des tempêtes de décembre 1999 (trajectoire T2), plutôt que vers l'Angleterre (trajectoire T1).



Le modèle idéalisé plan vertical méridien de mousson africaine (a) permet de retrouver les structures dynamiques essentielles analysées (b) par le CEPMMT durant le mois de juillet 2000. Un renforcement de la dynamique saharienne (donc de l'évacuation de chaleur) génère plus d'harmattan, diminue l'énergie disponible pour la mousson africaine au nord du continent pour finalement repousser la zone de pluie vers le sud (c). Ainsi une forte ventilation (courbe bleue) réduit cette pénétration par rapport à la suppression de la ventilation (courbe rouge).

a) Coupe méridienne-verticale du vent zonal simulé par le modèle (Meso-Nh), vents d'ouest positifs.

b) Comme a) pour la moyenne mensuelle du vent zonal analysé par le CEPMMT.

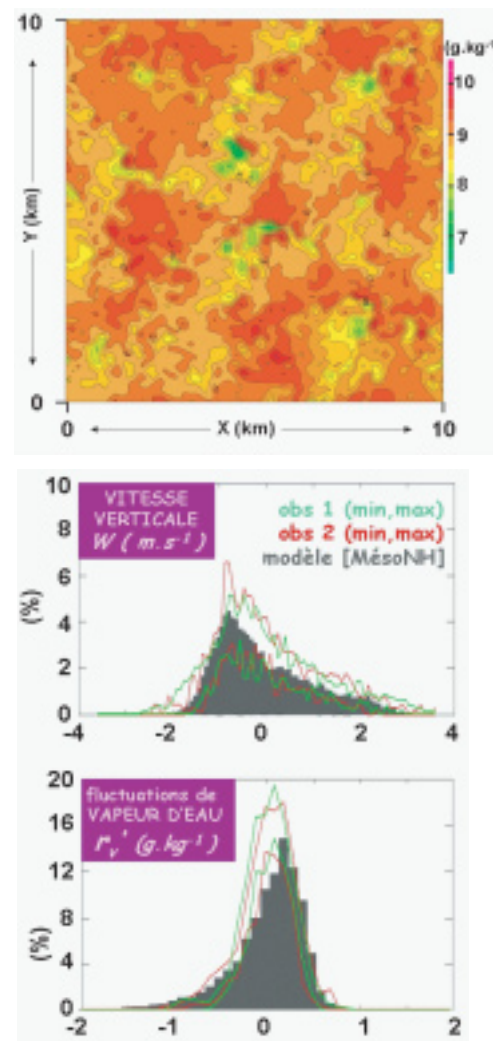
c) Impact d'une augmentation de l'évacuation de chaleur associée à la dynamique saharienne (DS) sur l'énergie en basses couches et le cumul de pluie sur 10 jours. En rouge 0 x DS, en noir 1 x DS et en bleu 2 x DS.

Ce schéma permet de reproduire les grands traits de la mousson africaine comme les structures de vents zonal (figure a et b) : des vents d'ouest en basses couches (flux de mousson) entre 10° et 20°N, un harmattan (vent de nord-est provenant du Sahara), ainsi que les structures de jets troposphériques caractéristiques de la mousson : Jet d'est africain (AEJ) et tropical (TEJ).

De manière plus générale, le travail effectué a permis de mieux cerner les mécanismes qui régissent l'équilibre de la mousson africaine – en particulier le rôle du Sahara, zone peu documentée et peu étudiée – et ainsi de mieux définir la stratégie d'observation pour la future expérience AMMA¹.

Variabilité de la vapeur d'eau observée par IHOP et simulée numériquement

Coupe horizontale du rapport de mélange de vapeur d'eau (r_v) au sein de la couche limite convective simulée, et distributions associées des champs de vitesse verticale et d'écart à la moyenne de r_v simulés et observés (mesures in situ, vol avion). On remarque la structure asymétrique de la distribution de vapeur d'eau, inversée par rapport à celle de la vitesse verticale. En particulier, on observe des minima très marqués, avec des écarts inférieurs à -1 g.kg^{-1} .



¹ AMMA = Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

La connaissance des variations de l'humidité à fine échelle s'avère indispensable si l'on veut déterminer correctement où et quand la convection nuageuse est initiée (ou non). Or, la mesure de la vapeur d'eau reste délicate. De plus, ses variations impliquent une très vaste gamme d'échelles (de quelques centaines de km aux plus petites échelles spatio-temporelles).

La simulation à fine échelle permet d'explorer ces modes de variabilité, et d'identifier les mécanismes qui en sont à l'origine. Ainsi, le modèle Mésos-Nh a permis de reproduire et d'analyser un cas observé de développement diurne de couche limite convective, soit une situation qui génère de fortes variations du champ d'humidité (figure).

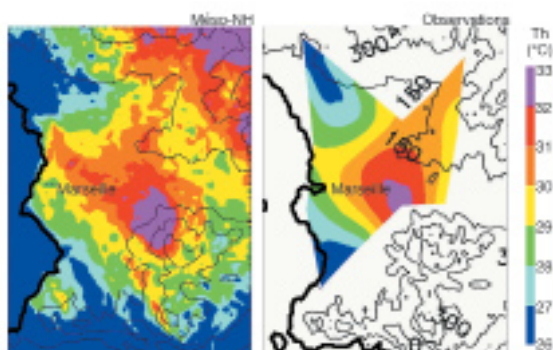
Ce cas d'étude est issu de l'expérience IHOP qui s'est déroulée au printemps 2002 au-dessus des grandes plaines américaines. IHOP est précisément dédiée à la mesure de l'humidité à fine échelle et à ses liens avec l'initiation de la convection. Elle a ainsi fourni un jeu de données riche et unique (plus de 2500 sondages sur 42 jours, données de plusieurs lidars, sol et avion, radars, mesures in situ...). La confrontation entre sorties de modèle et données observées montre que l'activité convective de couche limite permet d'expliquer la majeure partie de la variabilité observée de l'humidité. La simulation révèle que cette structure résulte de l'entraînement d'air plus sec, qui plonge sous forme de filaments jusqu'au cœur de la couche limite. Plus largement, la validation des champs d'humidité simulés a constitué une étape importante, car elle permet maintenant de s'attaquer via la simulation numérique à la détermination des paramètres clef pilotant la variabilité de la vapeur d'eau.

Étude de l'impact de la ville sur l'atmosphère

Comme l'a tristement montré la surmortalité dans les villes lors de l'épisode de canicule de l'été dernier, les villes impactent non seulement sur la pollution mais aussi sur la température, avec des îlots de chaleur nocturnes (la ville restant plus chaude que la campagne), sur l'humidité et le vent. Le CNRM s'est donc doté d'un programme de recherche sur l'impact des villes sur l'atmosphère.

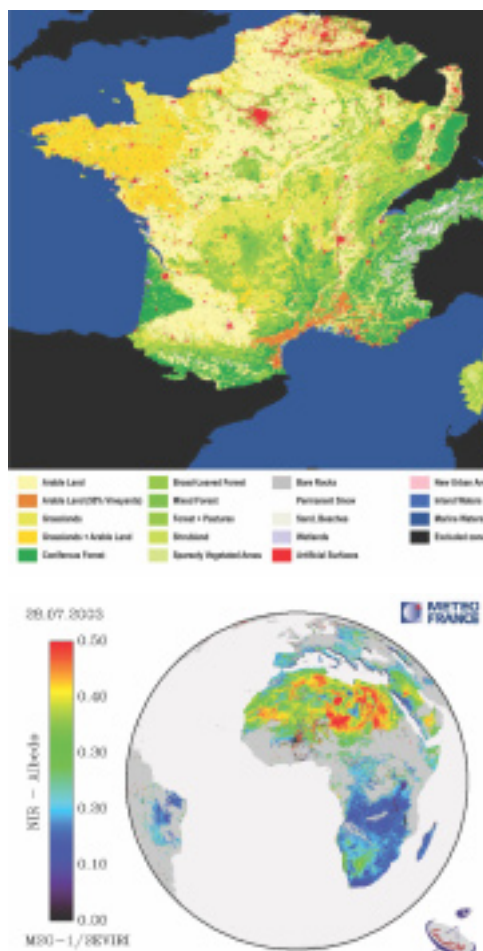
Une modélisation à très fine échelle (maille de 250 m) a été menée sur Marseille, suite à la campagne Escompte-CLU (Couche Limite Urbaine) en 2001. Grâce au modèle de recherche Méso-Nh couplé au schéma de ville Teb, la structure thermodynamique à la surface de l'agglomération (comme l'influence de la baie sur la ville lors d'épisodes de brises) est bien reproduite (cf. figure). Par exemple une masse d'air maritime (plus froide) venant de l'est, contourne les massifs par le sud et revient par l'ouest au dessus de la baie sur les quartiers nord de Marseille. En condition de brise de mer, l'agglomération renforce la turbulence dans l'atmosphère en journée, et un îlot de chaleur de quelques degrés se forme la nuit.

On peut enfin noter qu'une validation des échanges d'eau dans le modèle Teb (et Isba, le modèle de végétation) a été menée grâce à une collaboration avec le LCPC (Nantes), qui a instrumenté un bassin versant périurbain nantais. Des simulations sur six ans ont montré que le modèle Teb se comporte très bien, même vis à vis des modèles hydrologiques calibrés sur ce bassin.



Cartographie des paramètres de la surface et fusion des données en télédétection spatiale des surfaces continentales

Une nouvelle carte d'occupation des sols à la résolution kilométrique a été préparée à partir des données du capteur Spot-4/Végétation pour l'année 2000 avec une nomenclature adaptée au zonage climatique. La mixité des pixels est mieux décrite pour une meilleure documentation à venir de la variabilité sous-maille des modèles météorologiques. Cette étape préfigure d'une réactualisation de la base globale Ecoclimap de paramètres de surface.



Cartographie de l'occupation des sols obtenue sur la France à partir du jeu de données Spot-4/Végétation pour l'année 2000.

Première carte d'un albédo de surface observé par le radiomètre Seviri (du satellite MSG) dans le spectre proche infra-rouge obtenue à partir de 6 scènes acquises pour la date du 28 Juillet 2003.

Par ailleurs, la fusion des données est un thème en plein essor qui se justifie à la fois par la part croissante de la physique de la mesure dans les chaînes de traitement mono-capteurs (Végétation, Polder, MSG, Meris, Modis, MISR) et aussi le souhait de minimiser la dépendance vis-à-vis d'un système d'observation défaillant. La fusion s'opère à différents niveaux (luminance, réflectance, paramètre) et découle d'un bilan radiatif amélioré. Les cadres d'application sont le programme Saf pour l'Analyse des Terres Émergées d'Eumetsat et le projet Cyclopes de l'Union Européenne qui vient de démarrer.

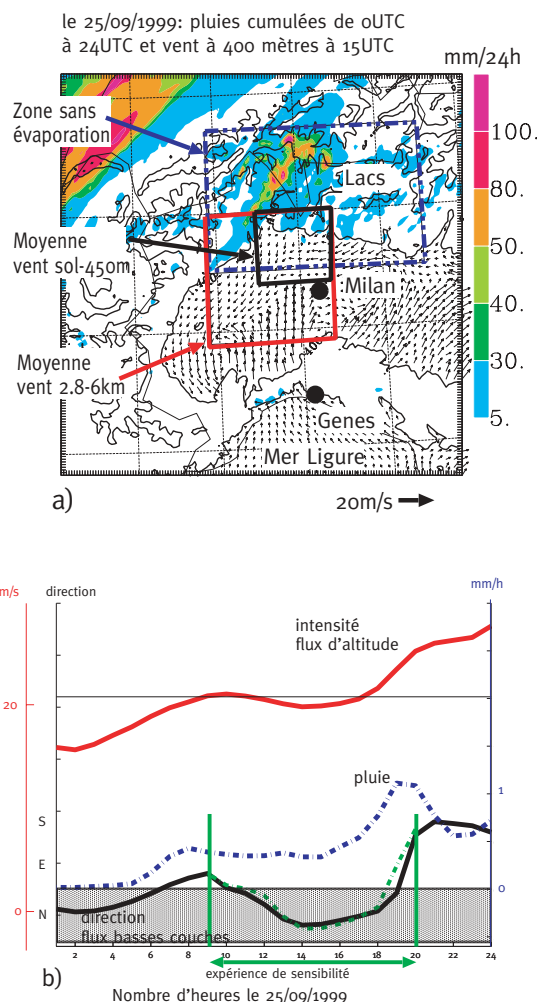
Température (potentielle) de l'air près de la surface simulée et observée le 26 juin 2001 à 17 h à Marseille. La simulation a été effectuée avec le modèle Méso-Nh à 250 m de résolution. Les observations proviennent de 20 capteurs répartis dans l'agglomération marseillaise pendant l'expérience Escompte-CLU.

Le projet Saf a abordé en 2003 une étape critique avec le franchissement de la Revue de Moyen-Terme qui précède le passage en opérationnel. Une première vague de produits Seviri (albédo, température de surface, produits neige) seront proposés à des bêta-utilisateurs en 2004. L'année 2003 a permis la consolidation de l'algorithme pour l'albédo avec une application aux premières scènes observées par le radiomètre Seviri. La version de ce prototype algorithmique est maintenant implantée dans la chaîne de traitement opérationnelle basée à l'Institut Météorologique du Portugal, hôte de ce Saf.

Origine d'un flux à contre-courant au pied des Alpes

a) Pluies cumulées sur 24 heures le 25/09/1999, vecteurs du vent à 450 mètres ASL (15UTC le 25/09/1999). Les rectangles délimitent les zones géographiques de moyenne des paramètres de la Figure 1b: bleu pour les précipitations, rouge pour le vent en altitude, noir pour le vent en basses couches.

b) Évolution temporelle au cours du 25/09/1999 de la direction du vent en basses couches (courbe noire pour l'expérience de référence, courbe verte pour l'expérience de sensibilité). On note que les précipitations sur la zone des lacs ne sont pas corrélées à la présence/absence de flux de Nord (courbe noire), et que l'intensité du flux incident entre 2,8 km et 6 km en amont des Alpes (courbe rouge) est fortement corrélée par contre au flux à contre-courant. Enfin, une expérience de sensibilité pour laquelle l'évaporation des pluies sur la zone des lacs a été supprimée pendant la phase des pluies convectives pré-frontales (courbe verte) montre la faible contribution du diabatisme dans ce flux à contre-courant.



Pendant la campagne Map, la période d'observation intensive n° 3 du 24 au 26 septembre 1999 s'est caractérisée par une zone de blocage au pied des pentes sud des Alpes générant un flux de Nord dans les basses-couches de la partie occidentale de la plaine du Pô en opposition au flux synoptique de Sud-Ouest. Ce phénomène est assez fréquent et a pu être observé lors de plusieurs autres POI de l'expérience Map.

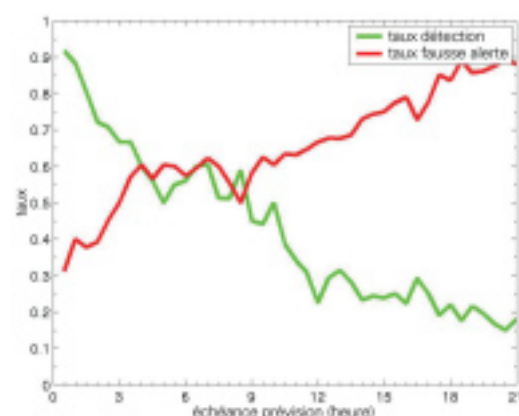
Une simulation à fine échelle du modèle Méso-Nh a été validée à partir des nombreuses observations radars et stations sol. Elle montre (figure a) un flux de nord de faible épaisseur dès les premières heures du 24 septembre, se renforçant durant la journée avant de disparaître en fin d'après-midi. Plusieurs mécanismes peuvent contribuer à la création et au maintien de ce flux

de Nord: la canalisation d'un flux de retour par les vallées alpines orientées nord-sud qui débouchent sur cette plaine ou le blocage du flux incident qui ne franchit pas les hauts massifs qui entourent cette région.

La comparaison des évolutions temporelles (figure b) a permis de quantifier les contributions respectives des différents mécanismes au cours de cette première journée de la POI 3. Les études menées démontrent qu'à l'échelle de la plaine du Pô, l'origine de ce flux de Nord est essentiellement adiabatique et que les pluies convectives se produisant autour de cette zone n'ont qu'une influence marginale. Ce flux à contre-courant est alimenté par le retournement des masses d'air bloquées par l'orographie et canalisées par les vallées alpines. La valeur seuil de 21m/s du flux incident de sud-ouest dans la couche 2,8 km-6 km pilote le blocage/déblocage des masses d'air sous-jacentes pour cette journée.

La prévision numérique du brouillard à l'échelle locale

Les brouillards et les nuages bas sont des événements météorologiques très difficiles à prévoir. Cependant, il existe un très fort besoin de la part des usagers, particulièrement au niveau aéronautique, de disposer d'une prévision fiable de ces phénomènes, même à très courte échéance (quelques heures).



Ces constatations ont amené le CNRM à se doter d'un programme de recherches sur la prévision du brouillard s'appuyant sur une approche intégrée utilisant des observations spécifiques

La prévision locale du brouillard sur l'aéroport Roissy-Charles-de-Gaulle pour l'hiver 2002-2003. Évolution des taux de détection (en vert) et de fausse alerte (en rouge) toutes les 30 minutes en fonction de l'échéance de prévision.

et des modèles numériques. La méthodologie consiste à utiliser un modèle unidimensionnel capable de représenter finement l'évolution des premiers mètres de l'atmosphère, le modèle Cobel¹, couplé au schéma d'interaction sol-végétation-atmosphère Isba. Un système d'assimilation à très petite échelle et à haute fréquence temporelle a été mis au point de manière à utiliser de manière optimale les observations disponibles.

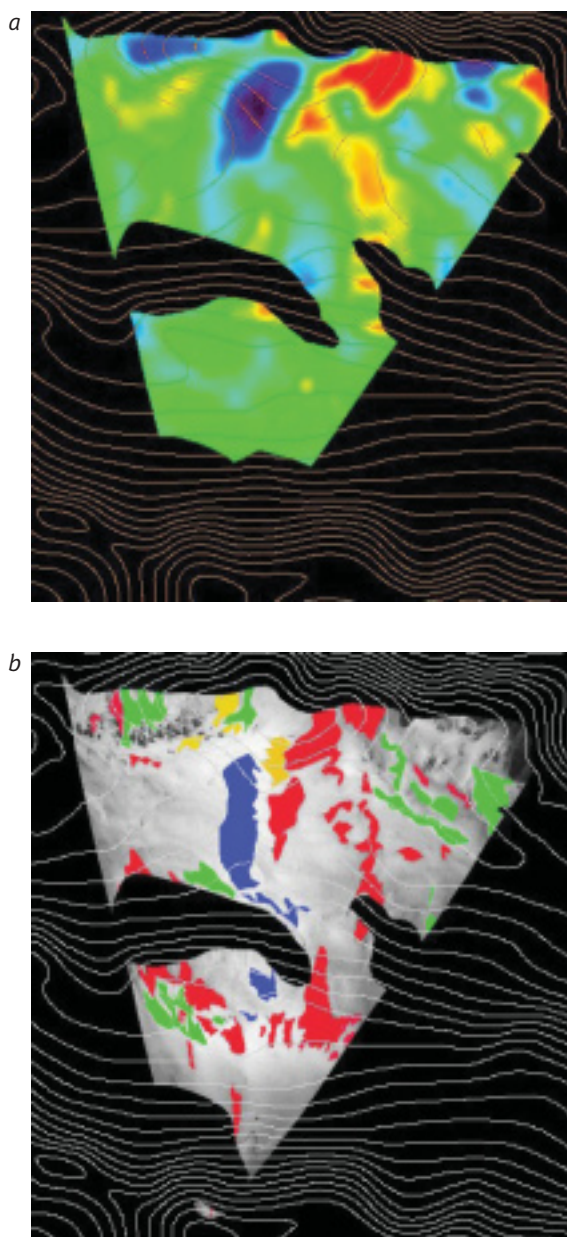
L'aéroport de Roissy-Charles-de-Gaulle a été choisi comme site pilote pour tester l'apport de cette méthode de prévision locale du brouillard. Les premiers tests effectués pour l'hiver 2002-2003 (figure) montrent que cette approche intégrée observations/modélisation fournit de bons résultats jusqu'à 4 heures d'échéance, avec un taux de détection supérieur au taux de fausse alerte. Entre 4 heures et 9 heures, le taux de détection est du même ordre de grandeur que le taux de fausse alerte, et on atteint les limites d'utilisation de la méthode.

Observation des effets du transport de neige par le vent au moyen de photographies numériques

L'amélioration de la modélisation du manteau neigeux et de l'estimation des risques d'avalanche nécessite de mieux prendre en compte les effets de transport par le vent. Les chercheurs de Météo-France s'y attachent et ont développé depuis quelques années le modèle Sytron2 qui vise à intégrer l'action du vent tant dans les volumes de neige déplacés que dans les transformations des grains de neige. Actuellement, une version de ce modèle est en expérimentation sur un site instrumenté de haute montagne (Col du Lac Blanc, 2 700 m, Grandes Rousses).

En plus des nombreuses observations locales, une nouvelle technique d'estimation des effets du vent à l'aide de photographies digitales a été mise au point. Cette méthode présente un bon compromis entre efficacité et facilité de mise en œuvre et permet une validation spatiale du modèle. Des images numériques obliques sont prises à intervalle régulier, ainsi que pendant des événements de transport éolien.

¹ Cobel : COde numérique de Brouillard à l'Échelle locale



Traitement d'une photo digitale (18/02/03) prise depuis le Pic Blanc en direction de l'ouest vers le Col du Lac Blanc (situé au centre de l'image), le nord étant à droite. La forme triangulaire de l'image correspond à la projection plane du champ du cône de visée de l'appareil photographique. L'image a) représente la synthèse du traitement multispectral qui permet d'identifier des zones d'accumulation (bleu et vert) et d'érosion (rouge et orange) qui peuvent être comparées à celles reproduites par le modèle Sytron2 avec le même code couleur sur l'image b).

Ces images sont ensuite superposées à une grille géographique fine connue. Après différentes corrections radiométriques et filtrages spectraux, le premier champ calculé est une estimation de l'albédo en chaque point de l'image via une modélisation complémentaire du rayonnement incident fortement influencé par la topographie locale et les conditions météorologiques ambiantes. Ce champ d'albédo restitué est directement comparé (non présenté ici) aux sorties du modèle. Les photos permettent également d'identifier des structures spatiales à la surface du manteau neigeux représentatives des effets du transport éolien (figures a et b).

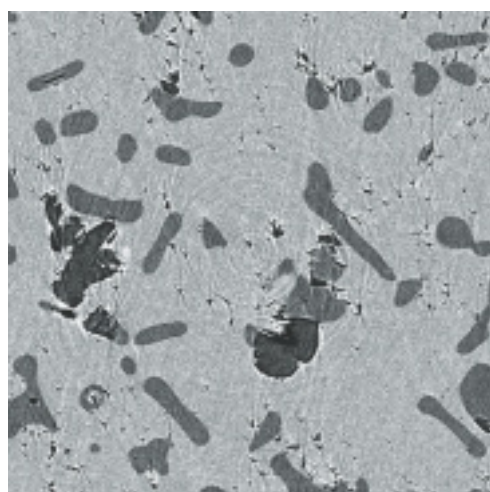
Images tridimensionnelles de neige : application à une expérience de métamorphose d'isothermie

a) Image brute d'un plan, montrant la présence de bulles d'air.

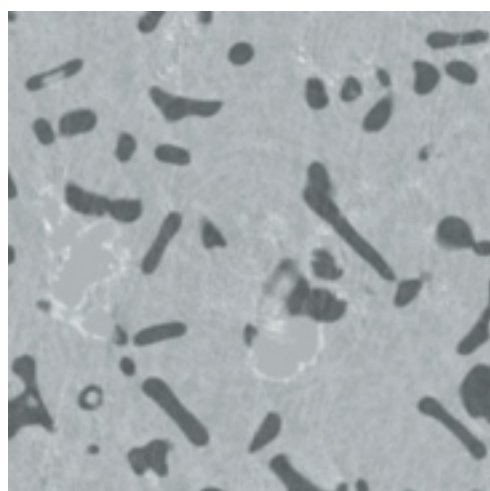
b) Après un premier traitement, le niveau de gris du 1-chloronaphtalène est affecté aux zones d'air.

c) Les contours de l'image binaire résultat sont superposés à l'image brute.

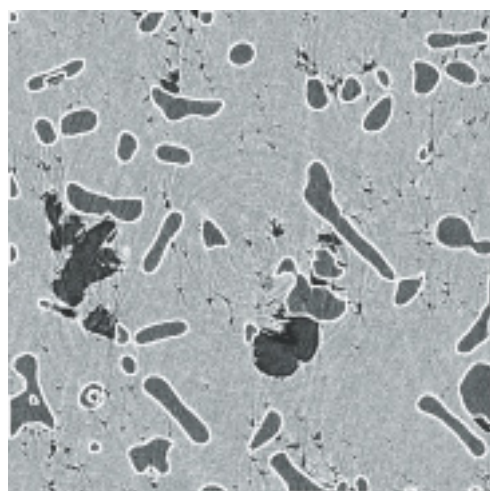
d) Une des 10 images 3D (600° soit $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$).



a



b



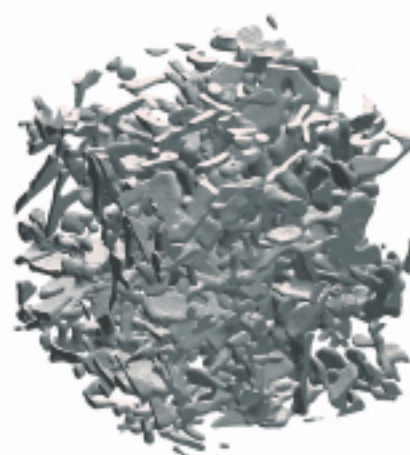
c

L'analyse de la microstructure de matériaux s'est récemment développée grâce à l'accès à des images 3D générées par des techniques telles que la tomographie. L'étroite relation entre les propriétés de la neige et sa microstructure fait de la production d'images 3D un important domaine d'étude.

L'imagerie par tomographie d'absorption X consiste à réaliser sous tous les angles un grand nombre de radiographies de l'objet à analyser, puis à reconstituer numériquement l'image 3D de ce dernier à partir des cartes en niveaux de gris des absorptions X (variable selon le matériau, quasi-nulle dans l'air).

La préparation nécessite une consolidation des échantillons de neige. Après de nombreux essais, nous avons choisi le 1-chloronaphtalène pour les imprégner. Malgré un séjour sous vide, un grand nombre de bulles d'air restaient piégées, nécessitant un traitement spécifique des images, un simple seuillage n'étant pas opérant, pour des plages de niveaux de gris comportant une large zone commune, surtout pour la glace et l'air.

Avant le seuillage proprement dit, les zones d'air sont détectées sur chaque plan et le niveau de gris moyen des pores (chloronaphtalène) leur est affecté. Cette méthode a été appliquée dans une expérience de métamorphose en isothermie pendant 2000 heures. Les résultats d'une simulation ont été confrontés aux images ainsi obtenues.



d

Campagnes expérimentales



L'année 2003 fut une année de transition avec la poursuite du dépouillement et de l'exploitation scientifique des campagnes passées et la préparation de la campagne Capitoul.

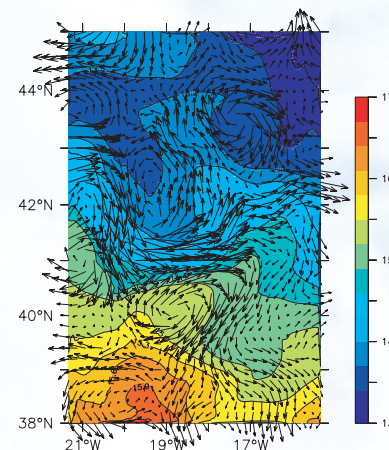
La Campagne Pomme

La campagne Pomme avait pour objectif de comprendre les mécanismes qui contrôlent la formation des eaux à 11-13°C de l'Atlantique nord-est. Ce programme incluait de nombreuses mesures multi-échelles, pendant un an (septembre 2000 - octobre 2001) entre les Açores et le Portugal.

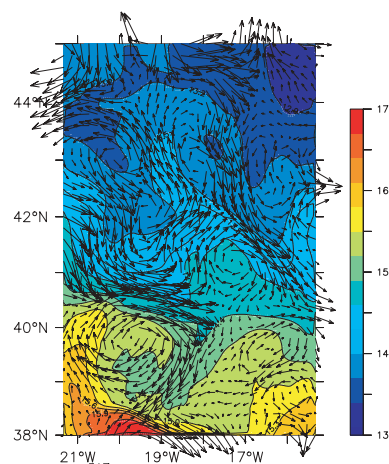
Le volet des interactions entre l'océan et l'atmosphère y jouait un rôle essentiel pour estimer de manière précise l'influence de la mésoéchelle océanique sur l'entraînement à la base de la couche mélangée.

Parmi les objectifs visés, figuraient la détermination des champs d'épaisseur de couches mélangées, leur lien avec les flux à l'interface air-mer, ainsi qu'avec les structures océaniques. La modélisation 1D du bilan de chaleur annuel, obtenu en reconstituant les termes de forçage tridimensionnels, montre qu'il est possible d'ajuster ce bilan pour qu'il soit en accord avec l'évolution des champs observés de sel et des températures de surface de la mer. L'un des résultats marquants montre que le bilan net annuel des flux de flottabilité se situe en dessous du seuil de flux nul, et que les eaux modales observées dans la zone proviennent essentiellement d'une dérive d'eaux formées plus au nord.

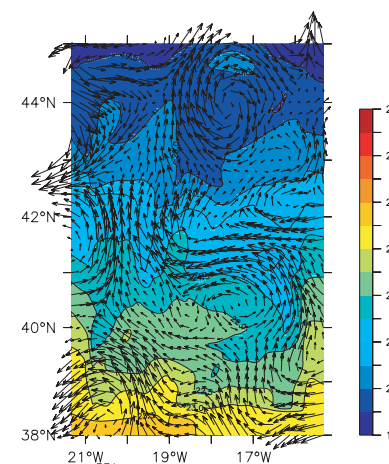
Les expériences numériques en cours visent à préciser les processus de surface en œuvre et leur lien avec les flux de surface. Un modèle de couche mélangée a permis des intégrations de longue durée sans dérive notable des principales structures dynamiques. Ce modèle fournit des taux de subduction et renseigne sur l'influence des structures de mésoéchelles sur ce processus.



SIMULATED SST (C) - SURFACE CURRENT (m/s). POMME1.



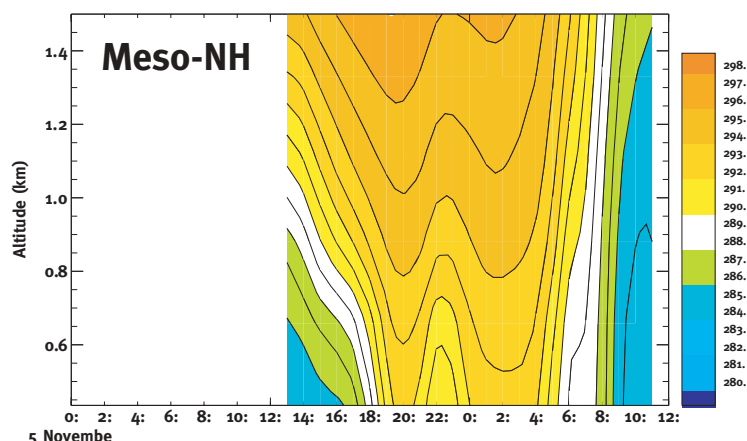
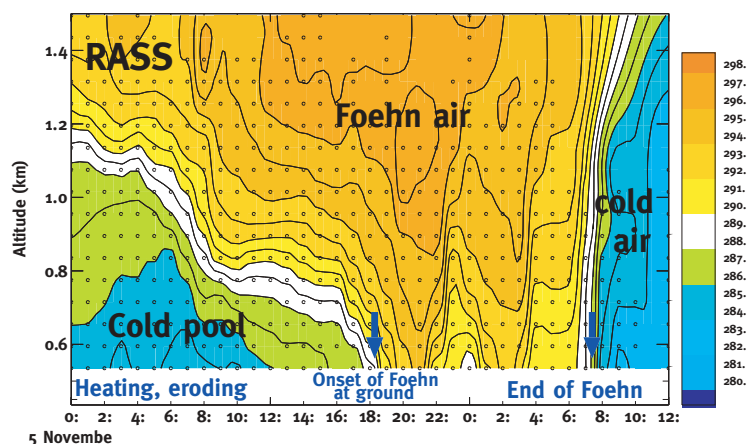
SIMULATED SST (C) - SURFACE CURRENT (m/s). POMME2.



SIMULATED SST (C) - SURFACE CURRENT (m/s). POMME3.

Cartes de courants et de températures de surface de la mer obtenues à l'aide d'un modèle de couche mélangée pendant 8 mois de simulation lors de la campagne Pomme.

Mieux connaître l'effet de Foehn grâce à la campagne Map



Évolution temporelle du profil vertical de température potentielle dans la vallée du Rhin lors d'un épisode de Foehn mesuré par le profil RASS de l'institut de Météorologie de Karlsruhe (haut) et simulé par le modèle Meso-Nh (bas). Une analyse par interpolation optimale à la résolution des modèles (10 et 2,5 km) initialise cette simulation à deux modèles imbriqués. L'air stagnant en fond de vallée, refroidit par le rayonnement nocturne, est réchauffé par le réchauffement diurne et érodé à son sommet et sur son flanc sud par le vent de Foehn entre 6 h et 18 h. Le Foehn touche alors le sol. L'épisode de Foehn se termine avec l'arrivée d'air froid par le nord-ouest, lié à l'arrivée d'une perturbation et au basculement du flux synoptique vers l'ouest.

L'un des buts de l'expérience Map est l'étude des interactions entre l'air subsident, chaud et turbulent du Foehn avec la couche limite préexistante, stable et plus froide.

L'étude détaillée de trois cas de Foehn d'intensités très différentes a montré la capacité du modèle Meso-Nh à simuler les événements de Foehn sous plusieurs configurations (configuration à 2 modèles emboîtés de maille 10 et 2,5 km, ou 3 modèles en y ajoutant un modèle à 625 m). Ces études ont permis de mettre en évidence les caractéristiques indispensables d'une simulation numérique pour prévoir le Foehn dans une large vallée, à savoir :

- La résolution du modèle : une maille inférieure à 3 km est nécessaire pour représenter les vallées. Cette résolution permet la simulation d'une onde de relief réaliste, ainsi qu'une adaptation dynamique de l'écoulement suffisante.

- Le forçage par un écoulement de plus grande échelle réaliste. L'intensité du jet de Foehn dans la vallée et sa localisation sont intimement liées à l'intensité et à la direction du flux incident, et au régime de vent (flux autour ou par-dessus la montagne).

- L'initialisation à haute résolution, en particulier de l'épaisseur de la couche d'air froid de basses couches présente au fond des vallées et sur le piémont en début d'événement. Le Foehn ne touche le sol que lorsque cette couche d'air froid a disparu par érosion dynamique et réchauffement diurne. L'étude menée sur la POI 15 a montré l'impact d'une analyse à la résolution du modèle sur la qualité de la simulation (figure). Cette analyse par interpolation optimale a été réalisée à l'aide du logiciel Diagpack, avec des portées réduites pour la mésoéchelle et les données des réseaux sol et des radiosondages. Elle préluce les possibilités attendues du système d'assimilation d'Arome.

Le programme Smos

La mission spatiale Smos (Cnes/Esa), dont le lancement est prévu en 2007, est un radiomètre microondes en bande L (fréquence de 1,4 GHz), pouvant fournir depuis l'espace une estimation de l'humidité du sol en surface avec une bonne fréquence temporelle (2-3 jours), et une résolution de 20 à 60 km. Dans le cadre de SMOS, le CNRM a mené des études concernant l'utilisation de l'émission micro-ondes des continents :

- a) Smosrex : campagne de mesure de longue durée, en cours sur la région toulousaine, réalisée en collaboration avec le Cesbio, l'Inra, l'IPSL et l'Onera. Un dispositif expérimental permet d'évaluer les méthodes d'assimilation de données multi-spectrales de télédétection dans les modèles de surface. Un radiomètre en bande L, Lewis, a été développé par l'Onera et est utilisé dans cette campagne de mesures depuis janvier 2003. Ces mesures permettront de tester in situ l'utilisation de la radiométrie microondes sur deux types de surface (jachère et sol nu). Des radiomètres infrarouges et des luminancemètres ont également été installés.

- b) Le suivi de l'eau du sol par le radiomètre Smos constitue une étude de faisabilité à l'échelle du globe. Un modèle d'émission

microondes, L-Meb, a été développé en collaboration avec l'Inra et le Cesbio, et couplé au schéma de surface Isba. Une simulation à l'échelle globale de variables géophysiques et des températures de brillance en bande L associées a été réalisée à partir du système L-Meb/Isba pour 1987-1988 à partir du forçage atmosphérique ISLSCP-I. Des algorithmes d'inversion présentant des degrés de complexité divers ont été développés et comparés entre eux, à plusieurs échelles spatiales.



Suivi de l'activité avalancheuse par détection sismique

Deux systèmes expérimentaux de Détection Sismique des Avalanches (DSA) ont été installés par Météo-France durant tout l'hiver 2002-2003 en Isère : à St-Christophe-en-Oisans (dans le massif de l'Oisans, à 1 700 m) et au Gleyzin (dans le massif de Belledonne à 1 600 m).

Chaque système détecte et enregistre les signaux sismiques, puis les analyse et identifie ceux qui ont été générés par des avalanches. Des informations sur les dates exactes et

l'importance des avalanches détectées ont ainsi été transmises au pas horaire et mises à la disposition du CDM de l'Isère.

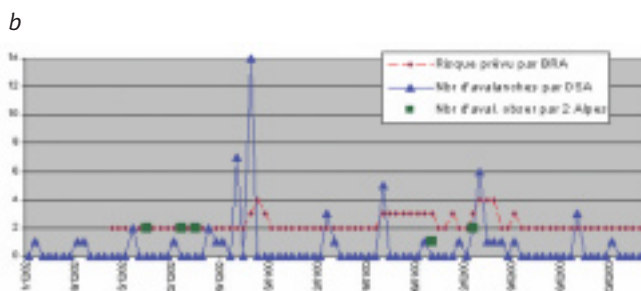
Les prévisionnistes avalanche de l'Isère ont ainsi pu avoir, tout au long de l'hiver, des informations objectives et rapides sur les avalanches qui ont pu se produire, de nuit comme par mauvais temps, dans ces deux secteurs représentatifs de l'Oisans et de Belledonne.



Opération de montage du radiomètre en bande L bipolarisation Lewis sur son portique de mesure situé sur le site Smosrex du centre Fauga-Mauzac de l'Onera (au sud-ouest de Toulouse), le 23 janvier 2003 (photo Y. Kerr). Un système de motorisation et de commande à distance permet de réaliser des mesures multi-angulaires avec Lewis de manière automatique. L'acquisition des données est automatisée. Dimensions : le portique a une hauteur de 15 m, le radiomètre a une longueur de 3 m et pèse 200 kg.

a) Vue du système de Détection Sismique des Avalanches (DSA) du Gleyzin (massif de Belledonne).

b) Résultats de la DSA de St-Christophe-en-Oisans pour la période décembre 2002-février 2003. Pour chaque journée, sont représentés le nombre d'avalanches détectées par DSA, le nombre d'avalanches indiquées par l'observateur de la station des Deux-Alpes et le risque d'avalanches naturelles prévues par le CDM 38 (échelle à 5 niveaux).



Même si les conditions nivo-météorologiques de l'hiver 2002-2003 dans les Alpes-du-Nord n'ont pas favorisé une activité avalancheuse naturelle très importante, environ 80 avalanches naturelles ont été détectées sur chaque site.

L'apport de ces systèmes de DSA est apparu particulièrement intéressant sur plusieurs points :

- même en tenant compte des quelques fausses alertes, le nombre d'avalanches détectées par DSA a été nettement supérieur (15 fois environ) à celui qui émane des observations faites dans le cadre du réseau nivo-météorologique pour ces massifs ;
- l'apport de ces informations objectives est apparu d'une grande utilité pour valider des outils d'aide à la Prévision du Risque Avalanche ou pour vérifier la qualité des bulletins ;
- en fournissant rapidement des données précises sur l'activité avalancheuse, la DSA a montré qu'elle pouvait être une aide précieuse pour le prévisionniste (ou un gestionnaire local) en période de crise.

Validations locales du système expert Mepra

Dernier maillon de la chaîne Safran-Crocus-Mepra (SCM) de modélisation du manteau neigeux, le système expert Mepra est un outil

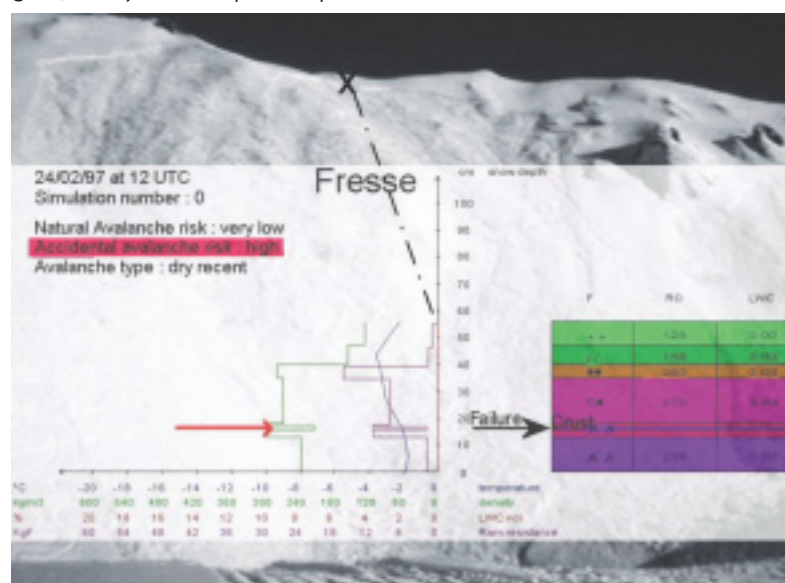
d'aide au diagnostic à l'échelle d'un massif montagneux. Il réalise une analyse unidimensionnelle de la stabilité d'un manteau neigeux en utilisant une approche experte et mécanique par la recherche de niveaux d'instabilité naturelle ou accidentelle.

Le risque d'avalanche n'est pas une grandeur directement mesurable, ce qui rend difficile la validation d'un estimateur tel que Mepra. L'évaluation des résultats a déjà été faite dans un contexte de Prévision du Risque Avalanche à l'échelle du massif par comparaison d'un indice Mepra de synthèse journalière issu de la chaîne SCM à un indice d'activité avalancheuse basé sur les observations du réseau nivo-météorologique. Cette approche s'avère efficace pour évaluer les risques de départ spontané d'avalanche, beaucoup moins pour les déclenchements provoqués (passage de skieur(s) par exemple).

À partir de profils du manteau neigeux observés sur le terrain, des validations ponctuelles de l'analyse du risque accidentel Mepra ont été réalisées à l'aide du logiciel Crocus-Mepra (version PC). Pour une vingtaine de mesures réalisées sur les pentes de la Botte près de la station de ski de Chamrousse en Isère, les couches fragiles mises en évidence par des tests de stabilité (bloc glissant, tests de pelle) ont été comparées à celles détectées par Mepra. Des mesures faites sur le terrain après une avalanche ont aussi été étudiées afin de comparer la couche fragile ainsi que le niveau d'instabilité estimé (modéré ou fort) aux conditions de déclenchement (skieur isolé ou plusieurs skieurs).

Cette vérification qualitative a permis d'envisager l'utilisation de Mepra en prévision locale du risque d'avalanches.

Sortie graphique de la chaîne Safran-Crocus-Mepra.

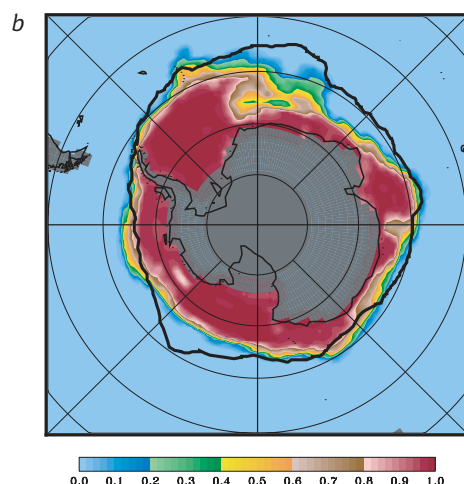
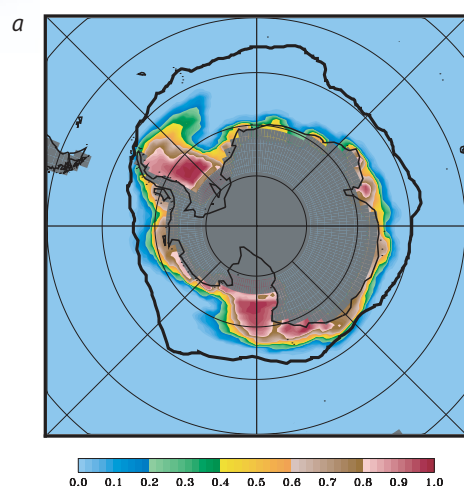


Étude du climat et de l'environnement de la planète

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

Développement du modèle climatique couplé global

Le modèle couplé global du CNRM se compose d'Arpège-Climat, couplé par le logiciel Oasis du Cerfacs au modèle océanique global Opa du Lodyc, à Gelato (modèle de banquise du CNRM) et au module de routage de fleuves Trip (Université de Tokyo).



Cet ensemble, où l'on ne pratique aucun rappel, a déjà permis de réaliser quatre expériences de scénarios climatiques, dont trois simulations B2 et une simulation A2 dans la classification du GIEC¹, pour la période 1950-2100.

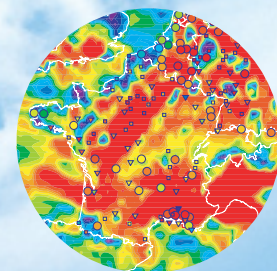
Deux expériences de contrôle, où tous les forçages atmosphériques sont fixés aux valeurs observées en 1950, ont été également réalisées ; elles dérivent relativement peu dans les tropiques et l'hémisphère nord et y simulent le climat et la circulation océanique de façon tout à fait satisfaisante, sauf dans les régions australes, où le système dans son ensemble est trop chaud.

Ce biais autour de l'Antarctique est régional et influence de manière très limitée le climat du reste de la planète dans le cas de simulations de moins de 100 ans, mais il n'en va pas de même dans le cadre d'expériences plus longues. En effet, une surface marine trop chaude dans les mers antarctiques inhibe la convection océanique, moteur essentiel de la circulation thermohaline (courant marin), dont le rôle est capital dans le système climatique terrestre. Le travail mené au cours de cette année, comprenant notamment des améliorations au niveau du modèle Arpège-Climat, a permis de réduire les biais du modèle couplé, ce qui est particulièrement visible sur la simulation de la banquise australe. Cette nouvelle version du modèle devrait permettre au CNRM de produire des simulations climatiques plus stables et d'affiner son évaluation du changement climatique.

Des cycles énergétiques affectés par le doublement du CO₂

Les données issues de simulations de changement climatique faites au CNRM ont été utilisées pour évaluer l'impact d'un doublement du CO₂ sur les transferts d'énergies (générations, conversions, dissipations) dans l'atmosphère. Ces quantités forment ce qu'on appelle les « cycles énergétiques ». Les données atmosphériques ont été obtenues à partir du modèle Arpège, les cycles étant évalués à partir du concept d'enthalpie utilisable.

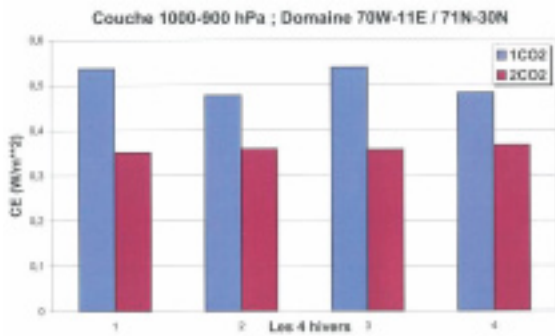
¹ GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat



Concentration d'équilibre de la banquise antarctique en septembre après dix ans de simulation couplée non-rappelée.

a) Avec la première version du modèle couplé global.

b) Avec les améliorations apportées au modèle. La limite de la glace fournie par la climatologie est représentée en trait fort.



Variation de l'énergie disponible pour une perturbation dans le cas d'un doublement de la concentration de CO₂ sur 4 hivers sur l'Europe.

Les résultats en simulation globale et sur des domaines limités indiquent clairement une atténuation de presque tous les processus énergétiques sous l'influence du doublement du CO₂, à l'exception notable de l'énergie correspondant aux variances verticales de température qui se retrouve stockée, sans pouvoir être convertie en énergie cinétique des perturbations (via les conversions baroclines). La figure illustre la forte diminution de l'énergie disponible (CE) pour la couche près du sol, pour un domaine ouest-Europe/proche-Atlantique, ceci pour les quatre hivers considérés dans l'étude.

Mais comment se traduit cette atténuation des cycles énergétiques en terme de modification des tempêtes touchant l'ouest de l'Europe ? Même si, en moyenne, les conversions baroclines et les énergies cinétiques des perturbations sont plus faibles, il faut prendre en compte le renforcement moyen du vent zonal qui peut renforcer les phénomènes extrêmes de rafales. La diminution des valeurs moyennes des cycles énergétiques n'est donc pas un critère suffisant pour en déduire que les perturbations seront moins violentes en Europe.

Le projet Demeter de prévision saisonnière

L'année 2003 a vu la fin d'un projet numérique de dimension colossale. Il s'agissait d'utiliser la réanalyse de quarante quatre ans (1958-2002) du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT) pour effectuer tous les trois mois de cette période des prévisions à six mois d'échéance en utilisant sept modèles européens couplés océan-atmosphère dont le modèle Arpège-Climat de Météo-France. En outre, chaque prévision était constituée de neuf intégrations de chaque modèle.

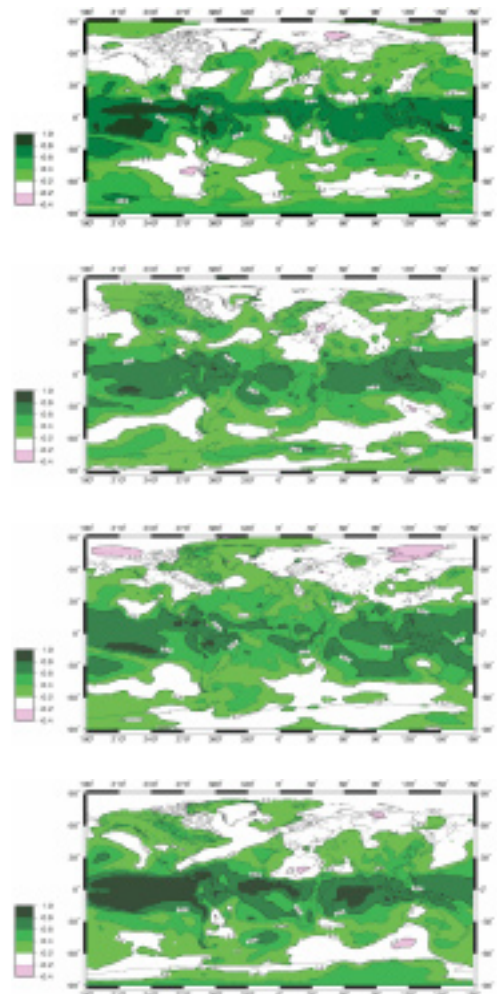
Le projet Demeter, cofinancé par la Commission Européenne à travers le 5e Programme Cadre de Recherche et Développement et coordonné par le CEPMMT s'est étendu sur trois ans. Trois modèles sur les sept ont couvert toute la période, ce qui représente 800 ans de

simulation numérique par modèle, les autres se sont concentrés sur la deuxième moitié de la période, plus riche en observations.

Les buts de ce projet étaient de :

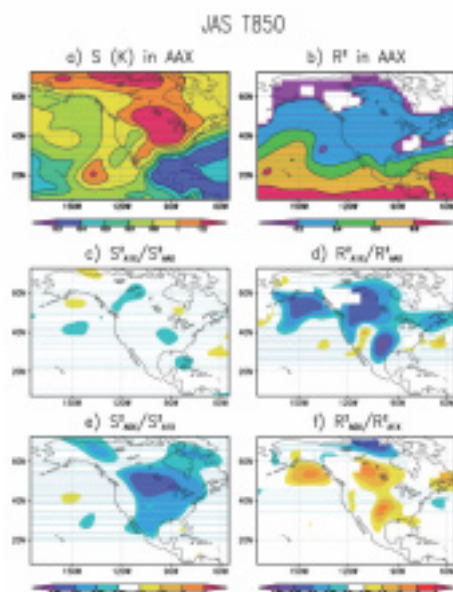
- 1) constituer une base de données de prévision riche et homogène, disponible pour la communauté scientifique pour les évaluations de qualité des prévisions ;
- 2) démontrer la faisabilité et l'efficacité d'une prévision fondée sur plusieurs modèles ;
- 3) étudier deux domaines d'application : les maladies tropicales en Afrique et l'agriculture en Europe.

Les objectifs sont atteints et il a été convenu que l'exercice se poursuivrait en temps réel avec les modèles du CEPMMT, du Met Office et de Météo-France. La figure montre le coefficient de corrélation des prévisions saisonnières de température pour les quatre saisons en utilisant la moyenne des trois modèles disponibles sur les quarante-quatre ans.



Coefficients de corrélation pour la prévision des mois 2 à 4 de la température avec les modèles du CEPMMT, du Met Office et de Météo-France pour les 4 saisons de la période 1958-2002.

Influence de l'humidité du sol sur la variabilité et la prévisibilité atmosphérique à l'échelle saisonnière



Des ensembles de simulations d'été boréal, couvrant une période de 15 ans (1979-1993) ont été réalisés avec le modèle Arpège-Climat afin d'étudier l'influence de l'humidité du sol sur la variabilité climatique et sa prévisibilité potentielle. Toutes les expériences ont été forcées par des températures de surface océanique (TSO) observées.

Après une expérience de contrôle (AAX) avec eau du sol interactive, deux expériences de sensibilité ont été effectuées. La première (AoX) a consisté à supprimer la variabilité interannuelle du contenu en eau profond durant toute la saison estivale, à l'aide d'un rappel vers la climatologie mensuelle du modèle. Dans la seconde (A1X), seule la variabilité interannuelle des conditions initiales d'humidité du sol est supprimée.

Les résultats indiquent que le contenu en eau profonde contribue largement à la variabilité atmosphérique simulée dans l'expérience de contrôle. Une analyse de variance montre en revanche que cette variable a en général peu d'influence sur la prévisibilité climatique potentielle à l'échelle saisonnière. La principale exception est le continent Nord-Américain (figure), où la prévisibilité est clairement réduite par la suppression des anomalies d'humidité du sol dans les conditions initiales.

L'utilisation d'humidités climatologiques comme conditions aux limites n'a pas pas d'impact systématique sur la prévisibilité, ce qui suggère que les signaux atmosphériques interannuels pilotés par les températures de surface océanique ne sont pas nécessairement amplifiés par une rétroaction précipitation-évaporation. En résumé, l'importance de l'humidité du sol pour la prévision saisonnière semble être avant tout un problème d'initialisation.

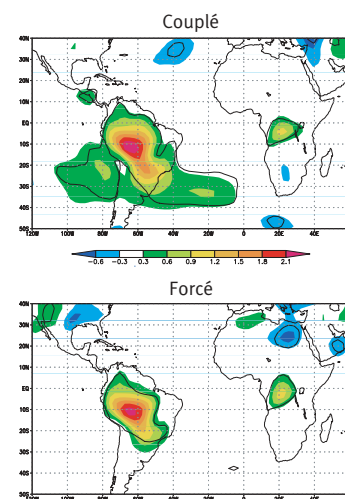
Impact d'une déforestation tropicale massive

Jusqu'à présent, les expériences de modélisation de déforestation à l'échelle globale étaient réalisées avec des modèles atmosphériques seuls ou couplés à un modèle de couche de mélange océanique. Il a ainsi été montré qu'une déforestation massive pouvait modifier les températures de surface de la mer localement. Afin d'évaluer la possibilité que ces changements de température de la mer puissent modifier la circulation océanique, une expérience de déforestation tropicale a été réalisée avec le modèle couplé océan-atmosphère Arpège/OPA/Gelato. Les trois grandes forêts équatoriales (Amazonie, Afrique et Indonésie) sont remplacées par de la prairie. Cette expérience a été répétée avec le modèle atmosphérique seul afin de pouvoir déterminer l'importance de l'utilisation du modèle d'océan (simulation dite « forcée »).

Sur les régions déforestées, on obtient des anomalies de flux similaires en mode forcé et couplé. Après déforestation et dans les deux cas, le flux de chaleur sensible perdu par le sol augmente de 15 % et le flux de chaleur latente diminue de 10 %. Pour les flux radiatifs, l'impact est plus faible mais toujours du même ordre de grandeur pour les deux expériences. De ces anomalies de flux résulte une augmentation de température sur les régions déforestées à peu près identique dans les deux cas.

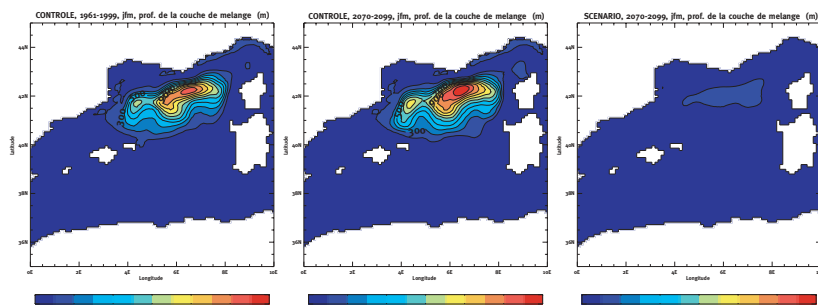
En revanche, dans l'expérience couplée le réchauffement atmosphérique s'étend en dehors des régions déforestées ce qui n'est pas le cas avec un océan forcé. On montre ainsi qu'une déforestation massive peut engendrer des perturbations climatiques non locales aux régions concernées et que les perturbations peuvent être assez importantes pour modifier la circulation océanique de surface.

Résultats de divers expériences de contrôle (AAX) et de sensibilité (AOX et A1X) pour la température moyenne (juillet à septembre) à 850 hPa simulée sur l'Amérique du Nord : a) écart-type total, S, obtenu dans AAX, b) fraction de variance expliquée, R², obtenue dans AAX, c) rapport des S² obtenus dans AAX et A1X, d) rapport des R² obtenus dans AAX et A1X, e) rapport des S² obtenus dans A1X et AoX, f) rapport des R² obtenus dans A1X et AoX. Pas de colori dans les images b, d et f lorsque le signal interannuel n'est pas significatif au niveau 5 % dans l'expérience de contrôle.



Anomalie de température à 925 hPa entre la simulation déforestée et la simulation de contrôle pour l'expérience en mode couplé océan-atmosphère (en haut) et pour l'expérience avec l'atmosphère seule (en bas). On constate qu'une déforestation massive dans le cas couplé peut engendrer des perturbations climatiques non locales aux régions déforestées assez importantes pour modifier la circulation océanique de surface.

Vers une disparition de la circulation thermohaline en Méditerranée ?



Profondeur de la couche de mélange en hiver (moyenne Janvier-Février-Mars, exprimée en mètres) pour la zone de convection du bassin ouest au sud des côtes françaises : pour le début de la simulation de contrôle, 1961-1999 (à gauche), pour la fin de la simulation de contrôle, 2070-2099 (au milieu) et pour la fin de la simulation de scénario, 2070-2099 (à droite). On constate un ralentissement critique de la circulation thermohaline (courant marin) de la mer Méditerranée sous l'influence du changement climatique.

Un scénario de changement climatique de la mer Méditerranée a été réalisé avec une version Méditerranée du modèle océanique OPA au 1/8° (Opamed8, résolution horizontale 10 km). Il simule l'évolution de la Méditerranée sur 140 ans (1960-2099) d'après le scénario A2 de l'IPCC pour la partie 2000-2099. Dans cette simulation, le modèle Opamed8 est forcé par des flux atmosphériques issus du modèle Arpège-Climat (version « Médias ») zoomé sur le bassin méditerranéen (résolution 50 km).

Ce scénario comprend les éléments nécessaires à la compréhension de l'évolution future de la mer Méditerranée au cours du XXI^e siècle. En comparant le scénario avec une simulation de contrôle de même durée et représentant le climat actuel, on observe l'augmentation de la température de surface (+2,5 °C en moyenne sur la Méditerranée) et de la salinité de surface (+0,33 psu). L'augmentation de la salinité de surface est très variable d'un bassin à l'autre et dépend fortement de l'impact du réchauffement climatique sur le débit des fleuves.

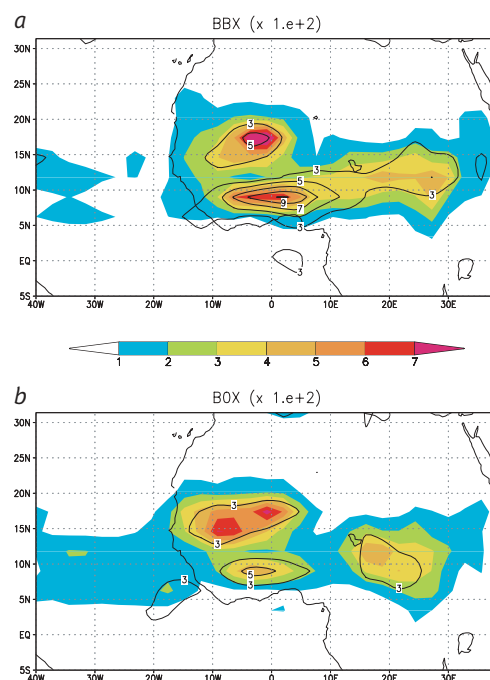
La compétition entre l'augmentation de la température (qui allège les eaux de surface) et l'augmentation de la salinité (qui les alourdit) se solde par une diminution de l'intensité de la convection profonde hivernale. Cette diminution est particulièrement prononcée dans les zones de convection où la salinité de surface augmente peu. C'est le cas pour deux sites majeurs dans la formation hivernale des masses d'eau : dans le bassin Ouest au large du Golfe du Lion (figure) et dans le bassin Est près du Gyre de Rhodes. Cette diminution de la convection hivernale entraîne un ralentissement critique de la circulation thermohaline (courant marin) de la mer Méditerranée.

Étude de la prévisibilité des ondes d'Est africaines dans des expériences de prévision saisonnière

Dans le cadre du projet européen Promise, les chercheurs de Météo-France ont regroupé les outils disponibles pour étudier la variabilité des phénomènes propagatifs. Une conversion au langage Fortran des programmes initiaux a permis de rendre ces méthodes accessibles à la communauté scientifique. Ces outils sont basés sur une analyse en composantes principales complexes et des méthodes spectrales mises au point par Hayashi (1977).

Des expériences de prévision saisonnière ont été menées et couvrent la période 1979-93, chaque année étant représentée par un ensemble de dix simulations indépendantes. Le même jeu d'expériences a été également réalisé en relaxant le contenu en eau du sol à la moyenne climatologique du jeu précédent.

ACPC : vo85 – Somme des carrés du Mode 1 + rapport F sign.



Afin de tester la prévisibilité de l'activité saisonnière des ondes d'Est africaines, les méthodes précitées ont été appliquées aux champs de tourbillon relatif à 850 hPa pour chacune des simulations réalisées. Après avoir vérifié que le modèle représentait les ondes d'Est africaines et leur variabilité de manière réaliste, une large zone de prévisibilité a été mise en évidence le long de la côte guinéenne (figure a) qui est largement réduite par

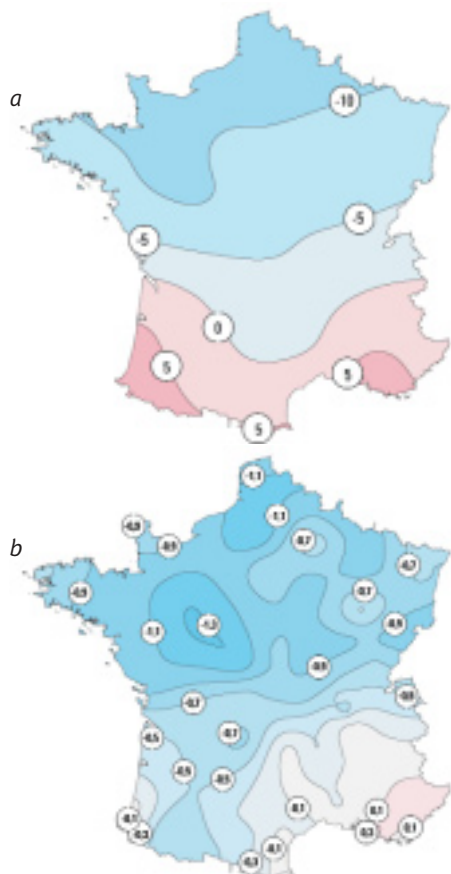
Variabilité interannuelle du premier mode de l'analyse en composantes principales complexes (ombrages) et mesure du facteur de prévisibilité dans les expériences de contrôle (a) et relaxée (b). Le seuil de signification à 99 % vaut 2,24.

la relaxation du contenu en eau du sol (figure b). La baisse est associée à une diminution de la corrélation entre l'activité des ondes d'Est africaines et les températures de surface de la mer dans le golfe de Guinée. L'explication de cette baisse implique des phénomènes d'évaporation, cruciaux dans le mécanisme des ondes d'Est africaines.

Les enseignements tirés des longues séries de référence

La signature régionale des changements climatiques en France au cours du XX^e siècle est établie à l'aide des longues séries de référence.

L'homogénéisation permet de constituer des séries mensuelles corrigées des ruptures artificielles dues aux changements de capteurs, déplacements du poste de mesure, etc. Aux premiers paramètres, températures et précipitations, sont venus s'ajouter des paramètres nouveaux : pression réduite au niveau de la mer et insolation. Les longues séries d'insolation permettent de conforter certains résultats sur les températures et ouvrent de nouvelles pistes concernant les mécanismes en jeu. Les figures ci-dessous illustrent la cohérence des résultats sur l'amplitude diurne de température et d'insolation, les tendances des deux paramètres présentant un gradient nord-sud comparable.



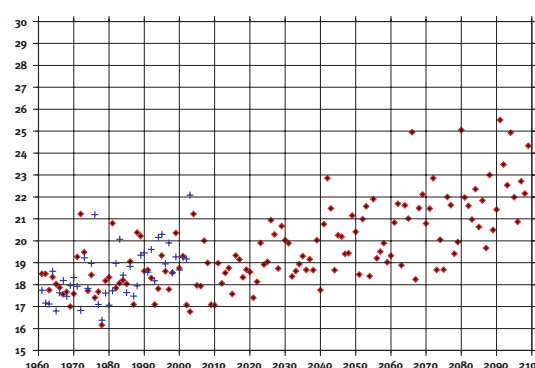
Dans le cadre du projet pluridisciplinaire Imfref du programme GICC soutenu par le ministère de l'Écologie et du Développement durable, une méthode de constitution de séries quotidiennes de référence a été proposée : la période de référence des données quotidiennes se situe après la dernière rupture forte détectée dans les séries mensuelles. Les séries quotidiennes seront utilisées pour étudier l'évolution des extrêmes sur différentes périodes du XX^e siècle.

Les origines de la vague de chaleur de l'été 2003

La vague de chaleur de l'été est-elle due à l'accroissement de l'effet de serre d'origine anthropique ? C'est une question à laquelle on peut répondre oui, puisqu'elle est postérieure à 1850, date conventionnelle du début de l'enrichissement de l'atmosphère par l'homme en carbone d'origine fossile. On peut aussi répondre non, car nos archives météorologiques sont trop brèves pour pouvoir affirmer qu'un tel phénomène ne s'est jamais encore produit depuis la dernière glaciation.

La bonne question est : ce phénomène, très rare au cours du XX^e siècle, risque-t-il de devenir plus fréquent au cours du XXI^e siècle ? Pour répondre à cette question, les chercheurs de Météo-France ont utilisé le modèle Arpège-Climat pour calculer un climat artificiel de 1960 à 2100 subissant les forçages radiatifs (gaz à effet de serre et aérosols sulfatés) observés pendant le XX^e siècle, puis hypothétiques (scénario A2 du Giec) au cours du XXI^e siècle. La réponse est positive : la probabilité qu'une température maximale quotidienne dépasse 35 °C en été est de l'ordre de 1 % à 2 % en France pour le climat de 1960-1990. Elle dépasse 20 % dans le sud pour le climat hypothétique de 2070-2100. La transition de 1960 à 2100 est illustrée par la figure qui présente les températures moyennes d'été en région parisienne observées (bleu) et simulées (rouge) année par année. Les points rouges sont à considérer comme des étés virtuels non comme des prévisions de l'été correspondant. Le point bleu de 2003 atteint le niveau moyen des points rouges de la fin du XXI^e siècle.

Température moyenne estivale (°C) observée à Orly (points bleus jusqu'en 2003) et simulée par le modèle Arpège-Climat (points rouges jusqu'en 2100) au point de grille le plus proche de Paris. Les points rouges sont à considérer comme des étés virtuels non comme des prévisions pour l'été de chaque année.



a) Évolution de l'insolation, tendances 1931-2000 en %/siècle (18 séries)

b) Évolution de l'amplitude diurne de température, tendances 1931-2000 en °C/siècle (70 séries).

Mocage et la pollution à l'ozone de l'été

Coefficient de Transfert Atmosphérique (rapport de la concentration intégrée sur 2 heures à la masse de polluant rejetée) en s/m^3 , pour un rejet fictif le 19/01/04 à 8 h dans l'agglomération lyonnaise. (Modèle Perle)

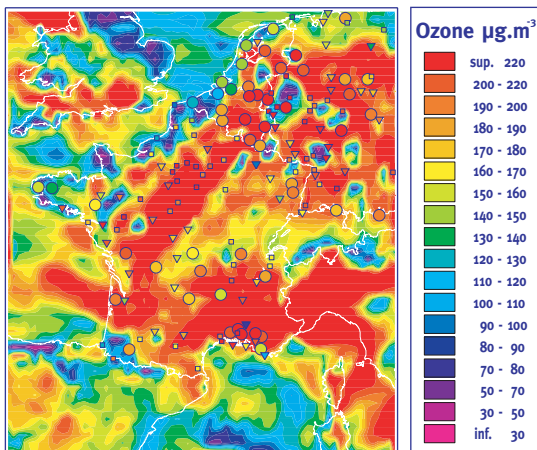
Le concept de prévision du « temps chimique » est la transposition directe de la prévision météorologique à la composition chimique de l'atmosphère. Les autorités civiles ont besoin d'outils d'anticipation et d'aide à la décision pour la mise en place des mesures de prévention de la pollution nécessaires à la protection de la population. Couvrant à la fois la basse et la haute atmosphère, imbriquant un domaine à haute résolution sur la France avec une couverture globale de la planète, le modèle chimique Mocage de Météo-France est un système qui connaît peu d'équivalents dans le monde.

Comme en 2001 et 2002, ce modèle a été mis en œuvre quotidiennement pour délivrer des prévisions jusqu'à trois jours d'échéance, prévisions finalisées par une étape d'adaptation statistique. La vague de chaleur de l'été a engendré une fréquence exceptionnelle des épisodes pollués et des dépassements du seuil d'information de la population relatif à l'ozone¹.

La confrontation des prévisions avec les mesures du réseau d'observation confirme la qualité du système Mocage, qui sera utilisé de façon opérationnelle à partir de 2004 sur la plateforme nationale de prévision de la pollution Prév'Air du ministère de l'Écologie et du Développement durable. Ces travaux s'inscrivent au plan

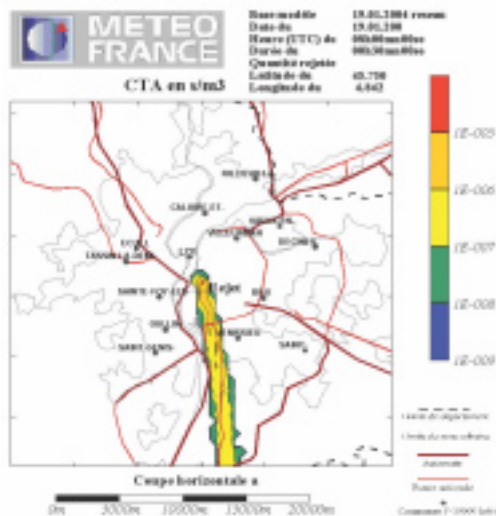
européen dans le programme GMES (Global Monitoring for Environment and Security) dans la perspective d'une assimilation par les modèles, tels que Mocage, de mesures chimiques par satellite.

(1) Entre le 2 et le 15 août 2003, plus de 2 700 dépassements du seuil d'information de $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été observés sur 367 sites de mesure, soit 86 % du parc des stations (source Adème). Au cours de l'été, l'Adème a estimé qu'au moins 30 millions de personnes avaient été soumises aux dépassements du seuil précédent.



Modèle Mocage : prévision à 24 heures d'échéance du pic d'ozone en surface pour le 8 août 2003. La position des stations de mesure utilisées pour contrôler les prévisions est superposée à la carte (rond, triangle et carré pour station respectivement rurale, péri-urbaine et urbaine).

Les nouveaux modèles de dispersion de polluants en situation de crise



Le programme Perle a été développé pour modéliser, en situation de crise, la dispersion d'un nuage de polluant émis accidentellement, à l'échelle locale et régionale. Il est basé sur l'utilisation combinée de deux modèles : Méso-NH modélise la structure fine de la couche limite et Spray, un modèle lagrangien particulière, représente la dispersion du polluant au voisinage immédiat de la source. L'intérêt d'un tel système est de fournir des informations sur la dispersion d'effluents depuis l'échelle locale (modèle particulier sur un domaine 30 km par 30 km) jusqu'à l'échelle régionale (traceur passif de Méso-NH sur un domaine 240 km par 240 km) et d'effectuer le lien avec les modèles à échelle continentale, comme Mocage-accident. L'année 2003 a vu l'évaluation et la validation du modèle Perle sur un grand nombre de cas et l'achèvement d'un prototype dont les résultats sont désormais disponibles 25 minutes après le lancement de la simulation.

Mocage-Accident est une adaptation spécifique du modèle de chimie et de transport Mocage, destinée à la modélisation en temps réel de la dispersion de polluant à moyenne et longue distance, pour un rejet ponctuel. Il est en cours d'évaluation et remplacera à terme Média lors d'un accident nucléaire et chimique, afin de répondre aux missions institutionnelles vis-à-vis de l'OMM et de l'Agence internationale de l'énergie atomique. Il participe au projet européen Ensemble, d'intercomparaison de modèles. L'évaluation des modèles se fait d'une part sur la base de lâchers fictifs, d'autre part sur une campagne Etex (lâcher effectif d'un traceur inerte et mesures réelles).

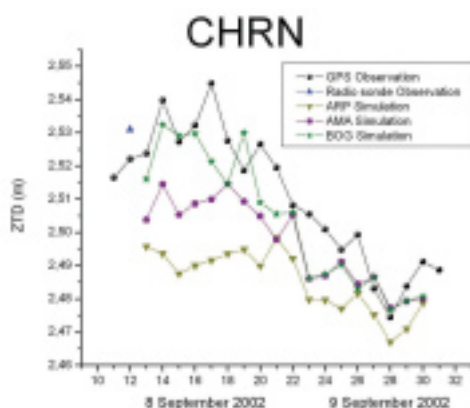
Développements instrumentaux



L'année a été marquée par les nombreux travaux réalisés autour de l'avion de recherche et le déménagement du centre d'Aviation Météorologique à Toulouse, et à la préparation de la création de l'UMS Safire.

Potentiel de la mesure GPS-sol pour la prévision des pluies intenses

Le GPS-sol fournit une mesure indirecte du contenu intégré en vapeur d'eau dans la troposphère au travers du délai induit sur la propagation des signaux microonde par la présence de vapeur d'eau. Dans le cadre de l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais (OHM-CV), des campagnes de mesures GPS ont été réalisées à l'automne en densifiant le réseau GPS permanent couvrant la région. Le potentiel de ces données GPS pour la prévision à haute résolution des systèmes fortement précipitants affectant la région est actuellement étudié à la fois pour la validation des modèles numériques et l'assimilation de données.



La première étape de cette étude a consisté à développer dans le modèle Meso-Nh le calcul des observables GPS (délais zénithaux humide et total) ; le contenu intégré en vapeur d'eau se déduisant du délai zénithal humide.

Les observables GPS ont été estimés pour différentes simulations Meso-Nh de la situation des inondations du Gard de septembre 2002. La figure présente le délai zénithal total à la station de Châteaurenard (près d'Avignon) déduit d'une part des observations GPS et d'autre part estimé

pour les simulations utilisant différentes conditions initiales. La comparaison entre données GPS simulées et observées montre une forte sous-estimation du contenu en vapeur d'eau dans cette région pour la simulation ayant pour conditions initiales l'analyse Arpège. Les travaux menés montrent que l'utilisation d'une analyse de mésoéchelle prenant en compte à la fois les observations de surface et les réflectivités radar conduit à une meilleure simulation de la vapeur d'eau troposphérique, qui se traduit également par une meilleure prévision des précipitations.

Déferlement d'ondes de relief en milieu stratifié

Une étude est effectuée pour améliorer la compréhension du déferlement d'ondes de relief dans un écoulement linéairement stratifié en densité. Cette stratification est réalisée en remplissant le canal de fines couches successives de saumure de concentration (masse volumique) ajustée. L'expérience consiste à tracer dans un canal de petites dimensions, puis dans le grand canal, la maquette d'une montagne de section dite gaussienne ; au moyen de prises de vues cadencées des particules contenues dans le fluide et illuminées dans un plan laser se déplaçant avec la maquette, un programme de traitement d'images dit de PIV (Particle Image Velocimetry) permet de mettre en évidence les structures de ces déferlements. On a ainsi évalué l'impact de la présence de la plaque-support de la maquette (nécessaire pour représenter la continuité entre le sol et la montagne), et celle du confinement (influence de la proximité des parois du canal dans la simulation, par rapport aux conditions réelles en atmosphère libre réelle).

Un effort particulier a porté sur la mise au point d'une technique de réalisation de particules de densités régulièrement réparties sur toute la gamme du gradient, afin d'obtenir un ensemencement régulier dans les plans illuminés pour les prises de vues.

La comparaison des mesures effectuées en veine avec les résultats de la modélisation du même phénomène par le modèle Meso-Nh permet de valider celui-ci et d'en améliorer les performances.

Délai zénithal total (en m) pour la station de Châteaurenard près d'Avignon. Les simulations Meso-Nh ont respectivement pour conditions initiales : une analyse Arpège (ARP), une assimilation de mésoéchelle des observations de surface (AMA) et une assimilation de mésoéchelle combinant à la fois des observations de surface, des réflectivités radar et des données satellitaires Infra-rouge (BOG). Le délai zénithal total calculé à partir du radiosondage de Nîmes est aussi présenté à titre indicatif (triangle bleu).

Vent traversier sur le TGV



Écoulement turbulent autour d'une rame de TGV lors de son passage sur un remblai surélevé.

Avant même de débiter la construction de la future ligne TGV Nord-Est, la SNCF s'est préoccupée de déterminer les conditions de vent que pouvaient rencontrer des convois circulant à 320 km/h. La vitesse du vent, mais aussi l'accélération locale et son caractère turbulent suite aux interactions de l'air avec le train et les ouvrages d'art ont fait l'objet d'une expertise de Météo-France pour laquelle le CNRM a mis en œuvre ses moyens de simulation en veine hydraulique.

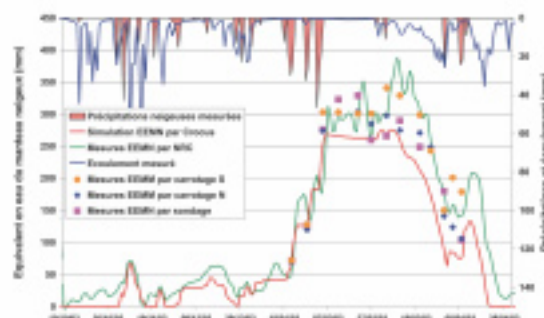
Des mesures par vélocimétrie laser Doppler et des visualisations de trajectoires par tomographie laser ont été effectuées sur une maquette au 1/50^{ème} de remblais de 6m et 12,50 m de haut surmontée ou non d'un TGV, pour des angles de dérapage de 90°, 60° et 30°. Elles permettront aux ingénieurs de la SNCF d'alimenter leurs modèles de comportement d'un train à grande vitesse et ainsi de calculer les seuils à partir desquels il existe un risque de renversement des rames. Au final, cette étude devrait avoir un impact direct sur les consignes d'exploitation des trains en fonction des mesures de vent réalisées tout au long de la voie.

Mesures de l'équivalent en eau du manteau neigeux à l'aide d'un capteur de rayonnement cosmique (NRC)

Dans le cadre d'une collaboration avec la Direction Technique Générale d'Électricité de France (EDF/DTG), un capteur NRC a été installé au Col de Porte au mois d'octobre 2001. Ce capteur, placé à la surface du sol, enregistre les

neutrons issus du rayonnement cosmique. Ceux-ci sont absorbés par l'eau atmosphérique et surtout par la neige située au dessus du capteur. Un calage de l'appareil en laboratoire a permis d'établir la loi déterminant l'atténuation du nombre de neutrons incidents en fonction de l'épaisseur d'eau équivalente traversée par ces neutrons et de la pression atmosphérique. Une correction est apportée en utilisant le signal mesuré par un deuxième appareil non-couvert par la neige. Il est donc possible de mesurer directement l'équivalent en eau du manteau neigeux situé dans le voisinage du capteur NRC.

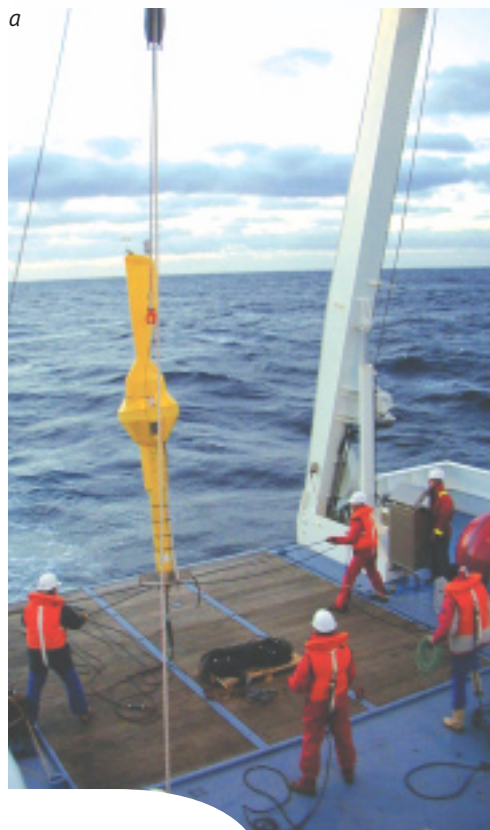
Les résultats ont été comparés à d'autres données mesurées sur le site (précipitations, écoulement à la base du manteau neigeux, mesures manuelles du manteau neigeux) et à la simulation de l'équivalent en eau du manteau neigeux réalisée par le modèle Crocus. L'analyse de ces résultats montre que la mesure par le NRC reproduit bien l'évolution saisonnière du manteau neigeux. Les mesures durant les périodes d'accumulation sont cohérentes avec les autres observations. Cependant, la mesure NRC est perturbée en période de fonte, lors de variations importantes du contenu en eau de la surface du sol. Lorsque le sol se gorge d'eau, l'équivalent en eau du manteau neigeux mesuré par le capteur est surestimé d'environ 50 mm. À la lumière de ces résultats, des modifications de l'environnement du capteur devraient permettre d'améliorer la fiabilité des mesures.



Comparaison pour la saison 2002/2003 de l'équivalent en eau du manteau neigeux mesuré par le capteur NRC, simulé par le modèle Crocus et mesuré manuellement (sondage et carottages N et S). Sont également représentées les mesures des précipitations neigeuses et d'écoulement vertical d'eau à la surface du sol (à l'interface sol/atmosphère ou sol/neige).

Tests du prototype de la nouvelle bouée Marisonde « NG »

Les bouées Marisonde permettent la transmission des données et leur localisation grâce au système Argos. Elles mesurent le vent en force et direction, la pression atmosphérique et des températures de la mer en profondeur.



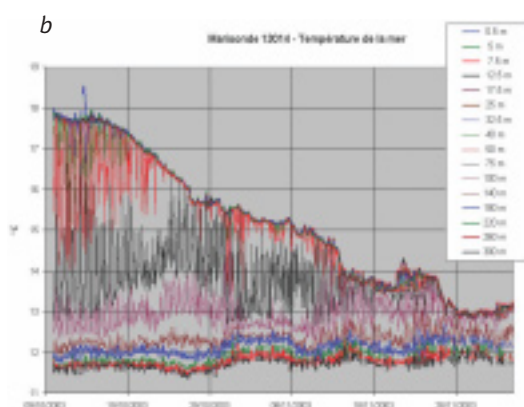
© Marine Nationale

Minos - Mini-station automatique pour navire d'opportunité

La mini-station automatique Minos est destinée à être installée à bord de différents navires pour développer l'observation météorologique en mer. Elle est simple à mettre en œuvre, transmet ses données (pression atmosphérique et température de l'air, au moins) via le système Argos et nécessite seulement d'être alimentée par le courant du navire. La station Minos-vent mesure en plus la direction et la vitesse du vent apparent, à l'aide d'un anémomètre sonique placé dans la mâture du navire. Un système GPS intégré à la station calcule ensuite le vent réel. Un prototype de station Minos-vent a été embarqué au début du mois d'avril 2003 à bord du *Beautemps-Beaupré*, le nouveau bâtiment océanographique de la Marine nationale. La campagne de quatre mois d'évaluation de ce navire, qui l'a mené tout autour de l'Afrique, a permis de récolter de nombreuses données de vent. La comparaison avec d'autres mesures faites à bord et avec les analyses des modèles numériques a donné des résultats très satisfaisants.

a) Mise à l'eau d'une bouée Marisonde « NG » par le navire océanographique *Beautemps-Beaupré*.

b) Visualisation des températures de la mer en profondeur mesurées par la Marisonde n° 13014 sur le Proche Atlantique.



Divers essais du prototype de la nouvelle bouée dérivante Marisonde NG ont été réalisés. Sa chaîne bathythermique de 300 mètres de long comprend seize sondes de températures et quatre capteurs de pression hydrostatique sur deux « bus ».

Elle a été mise en mer au début du mois d'avril par le navire océanographique *Beautemps-Beaupré*. La bouée a pu être récupérée par l'*Atalante* à la mi-juin sur le Proche Atlantique lors d'un transit Cayenne-Brest. Après expertise par le constructeur, l'électronique a été modifiée. Après un nouvel étalonnage de la chaîne bathythermique, la bouée a été déployée au début du mois d'octobre par l'*Ailette* à plus de 300 kilomètres au large de la Bretagne.



© Météo-France Pierre Blouch

Station Minos à bord du *Beautemps-Beaupré*.

Les avions de recherche scientifique ATR42 et Falcon 20



a) Nouvel avion ATR42 de Météo-France avant transformation.

b) L'ATR 42 en cours de transformation dans les ateliers de la Sogerma à Bordeaux.

L'avion Merlin IV en vol.

Dans le cadre de leurs activités de recherche, Météo-France, le CNRS-Insu et le Cnes coordonnent leurs efforts afin de conduire conjointement le renouvellement de leurs avions scientifiques et de disposer en 2004 d'une flotte moderne et cohérente gérée sous la forme d'une Unité Mixte de Service, Safire.

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

Le chantier de modification de l'ATR42 réalisé par la Sogerma à Bordeaux sera achevé en 2004. Il aura fallu de nombreuses réunions entre les ingénieurs de Sogerma et les agents du CNRM et de l'INSU pour que, tout au long de l'année 2003, les modifications soient scrupuleusement définies, validées et finalement peu à peu intégrées dans l'avion. L'année 2004 verra la conduite des phases de validations et de certifications : vibrations et essais en vol. Il restera alors à finaliser l'équipement intérieur et à étalonner l'avion en fonctionnement scientifique. L'ATR42 devrait être pleinement opérationnel pour 2005. Parallèlement, le chantier de modification du Falcon20 est quant à lui assuré par Dassault-Falcon-Service au Bourget. L'avion modifié devrait être recetté au premier semestre 2004. Après l'intégration de son aménagement intérieur et sa validation scientifique, le Falcon 20 sera disponible pour sa première campagne durant l'été 2004.

La communauté scientifique française disposera alors, avec le bimoteur Piper Aztec de Météo-France, d'un ensemble cohérent de trois avions instrumentés permettant d'explorer l'atmosphère de la couche limite de surface aux premières couches de la stratosphère.

Merlin IV – La fin d'un bel oiseau

Afin de répondre aux missions scientifiques des mesures atmosphériques aéroportées, le Centre d'Aviation Météorologique s'était doté en 1986 d'un Merlin IV, avion de transport public construit par Fairchild. En partenariat avec France Aviation, il a subi en 1987 d'importantes modifications (radôme de nez, couronne porte-capteurs, pods) afin d'embarquer des équipements scientifiques permettant de décrire finement l'atmosphère et le comportement de l'avion par rapport à l'air (incidence, dérapage, vitesse).

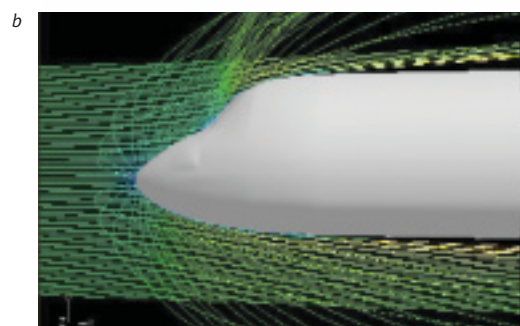
Immatriculé F-GMTO, ce bi-turbopropulseur pressurisé (2 turbines de 1000 CV) permettait d'évoluer entre 150 et 260 kt jusqu'à une altitude de 30.000 ft avec une charge utile d'une tonne pendant près de cinq heures. Doté d'un radar Doppler et d'une centrale inertielle performante, il pouvait effectuer ses missions de jour comme de nuit en conditions givrantes ou non. Avec un équipage standard de deux pilotes et d'un expérimentateur, il emmenait à son bord trois scientifiques. Doté d'un grand espace cargo, il pouvait embarquer tous les ordinateurs nécessaires aux enregistrements et à la visualisation des données en temps réel garantissant ainsi l'optimisation de la conduite du vol.

Pendant seize années d'activité et quelque 2 000 heures de vol, le Merlin s'est illustré dans de nombreuses campagnes de mesure nationales et internationales telles que Hapex- Niger, Pyrex, Ace2, Map, Escompte... Il a été utilisé par la communauté scientifique française et européenne pour effectuer des missions expérimentales sur de nombreuses thématiques : bilan radiatif, microphysique des nuages, dynamique et thermodynamique de l'atmosphère. Sa brillante carrière s'est achevée en 2003 avec la campagne BBC2 en Hollande.



Simulations numériques des écoulements autour de l'ATR 42

Développée depuis un quinzaine d'années au CNRM, la simulation numérique des écoulements aérodynamiques internes et externes



devient indispensable avec la mise en œuvre des nouveaux avions de recherche. En fait, cette activité comporte quatre parties successives distinctes : le dessin en 3D à l'échelle un de la maquette virtuelle et du tunnel de soufflerie numérique, suivi par le maillage surfacique 2D (par triangles ou quadrangles) de la maquette, puis celui en 3D du volume total de la soufflerie (par tétraèdres...), puis le calcul aérodynamique lui-même avec la définition des conditions aux limites, des paramètres de calcul, les équations de turbulence, le calcul des grandeurs physiques et enfin l'exploitation et la présentation des résultats pour répondre au problème aérodynamique posé. Pour l'ATR-42, le travail commencé à la fin de 2002 a atteint sa pleine utilité mi-2003.

Pour être en phase avec le chantier de modification de l'avion, les calculs ont été faits dans un premier temps sur la partie avant du fuselage. Ceci a permis, entre autres, de positionner les capteurs météo en avant du cockpit et de s'assurer qu'ils n'avaient aucune influence sur les prises des instruments de navigation d'origine. On a pu également tracer les trajectoires de particules (gouttes d'eau) en fonction de leurs diamètres et estimer ainsi l'efficacité de captation des capteurs plus en arrière sur le fuselage et de modifier leur inclinaison.

En parallèle, le dessin de l'ATR-42 complet a été réalisé et le maillage est en cours de développement.

Tous les capteurs et leurs supports (sur fuselage ou sous les ailes) ont été dessinés, maillés, soufflés pour fournir les forces et moments aérodynamiques de portance et de traînée en vue des vols de certification.

La délocalisation du CAM

Le Centre d'Aviation Météorologique était installé sur la plate-forme du Centre des Essais en Vol (CEV) de Brétigny depuis 1947. Mais dans le cadre d'une politique de décentralisation, le CEV a été amené à abandonner ses installations de Brétigny. La fermeture de la piste fut programmée pour début 2004. Le maintien d'une activité de mesures aéroportées sur l'aéroport de Brétigny devenait incompatible avec ses activités aériennes. Un repositionnement du service s'est imposé.

Après analyse de différentes possibilités, la Base Aérienne 101 de Toulouse-Francazal a été retenue pour accueillir ce service de Météo-France. Un hangar de 2 200 m² et une parcelle de terrain attenante ont été mis à disposition de Météo-France par l'Armée de l'Air. Des travaux ont été menés de mai à août 2003 pour rénover le bâtiment existant de 300 m². L'espace disponible a été partagé entre bureaux pour le département Opérations Aériennes, et laboratoires thématiques (thermodynamique, microphysique, chimie...). Un bâtiment modulaire de 400 m² a été créé en complément pour accueillir le reste des équipes. Malgré un planning très tendu, les personnels ont pu emménager dans leurs nouveaux locaux le 1er septembre 2003. Ce nouvel aménagement a permis d'améliorer significativement l'organisation fonctionnelle du service.

Ainsi, Météo-France et ses partenaires, CNRS-Insu et Cnes, pourvus de leurs nouvelles installations toulousaines et d'un « pied-à-terre » parisien (installations Insu/DT à Meudon et IGN à Creil), seront en mesure de proposer à l'ensemble de la communauté scientifique française et européenne, une nouvelle flotte d'avions instrumentés avec un support coordonné et adapté aux nombreux besoins des scientifiques, sous forme d'une Unité Mixte de Service, Safire.

Écoulements simulés autour du futur avion ATR42 de Météo-France :

a) globalement autour de la structure ;

b) autour du cockpit pour l'installation des capteurs.



L'équipe au complet et les nouveaux locaux du Centre d'Aviation Météorologique à Toulouse Francazal.

Activités de développement



L'année 2003 a été riche en actions de développement montrant ainsi la vitalité des opérations de transfert de connaissances entre recherche et opérationnel au bénéfice des usagers et clients de Météo-France.

Quelques illustrations phares de l'année 2003...

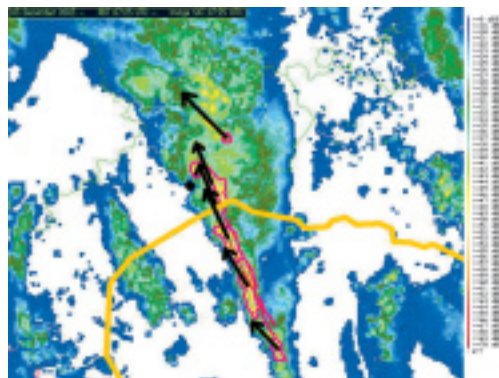
Diagnostics orientés Objet pour la Prévision Immédiate de la Convection

L'année 2003 a vu franchir plusieurs étapes dans la mise au point d'un outil d'analyse automatique et orientée objet de la convection : les Opic, Objets pour la Prévision Immédiate de la Convection.

D'une part, les forces et limites d'une définition d'Opic à partir d'objets issus du produit RDT (*Rapid Developing Thunderstorms*) du SAF-Nowcasting ont clairement été démontrées. En dehors de la phase de développement vertical initial de la convection isolée, la définition de ces objets est peu pertinente car trop éloignée de la réalité de la convection. La nature uniquement satellitaire des objets RDT est la source inévitable et prévisible de cette limitation.

A contrario, les études menées démontrent que de tels Opic peuvent d'ores et déjà fournir une information intéressante pour les prévisionnistes, quand leur production est restreinte aux premiers instants du cycle de vie d'orages isolés. L'année 2004 verra donc la première mise en exploitation de tels Opic.

Exemple de définition d'Opic (Objets pour la Prévision Immédiate de la Convection) à partir des images radar : superposition des contours (en rose), des trajectoires (en rouge) et des déplacements estimés dans la prochaine demi-heure (flèche noire) des Opic détectés dans l'image radar du 03/12/03 à 0725 UTC. Sur ce cas de vigilance rouge sur le département de l'Hérault, les Opic montrent la concentration des trajectoires des cellules convectives sur les environs de Montpellier.



Pour traiter les autres cas de convection, les principes de détection et de suivi de structures du logiciel RDT ont été transposés aux images radar. Le travail de réglage et de validation a débuté, avec pour objectif un premier test d'« Opic-radar » pour l'été 2004. Enfin, la vérification préliminaire du bon fonctionnement du logiciel RDT avec les données du nouveau satellite MSG a été menée à bien.

Harmoniser automatismes et expertise en Prévision Immédiate

Les données d'observation sont en constante amélioration, tant en taux de rafraîchissement qu'en degré de détail, en particulier grâce à la télé-détection radar et satellite. Ces progrès appellent en retour des prévisions affinées pour les plus courtes échéances, à la fois en termes de spécificité spatiale et en degré d'actualité.

La Base de Données d'Expertise en Prévision Immédiate (BDEPI) vise en conséquence à mettre en synergie l'expertise des prévisionnistes de Météo-France et le potentiel de traitements automatiques avancés des observations ; ceci dans un système orienté objet de surveillance et de prévision à quelques heures des phénomènes atmosphériques significatifs. Il s'agit des orages, des tempêtes, de la neige, du brouillard et des pluies fortes.

L'année 2003 a été consacrée aux premiers développements de l'interface homme-machine du système, aux choix techniques généraux, et à la réalisation de plusieurs prototypes. Une étude d'ergonomie a été entreprise, avec le concours de l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, à partir d'une première maquette d'interface homme-machine. Les traitements automatiques d'observations ont été en partie développés. Enfin, en matière de production, on a entamé le développement d'un prototype de génération d'avertissements personnalisés et de bulletins infra-départementaux.

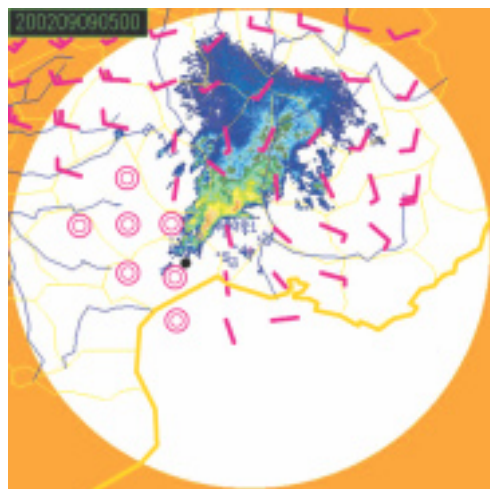
L'année 2004 verra la réalisation d'une expérimentation du système en conditions réelles, en ce qui concerne les orages. Elle constituera un jalon significatif de l'étude de faisabilité, et permettra d'estimer l'impact d'une telle ambition sur l'organisation des services de prévision.

Prévision de précipitation pour les deux prochaines heures

Des développements autour de la méthode 2PiR (Prévision immédiate de précipitation par imagerie radar) ont permis cette année de la mettre à disposition des prévisionnistes de Météo-France. La méthode 2PiR est basée sur la simple extrapolation des mouvements des zones de précipitations, analysés par une technique de traitement des images de radar. Elle ne permet donc une prévision de qualité qu'aux échéances d'une ou deux heures, mais offre l'avantage de bien décrire la variabilité spatiale de la pluie.

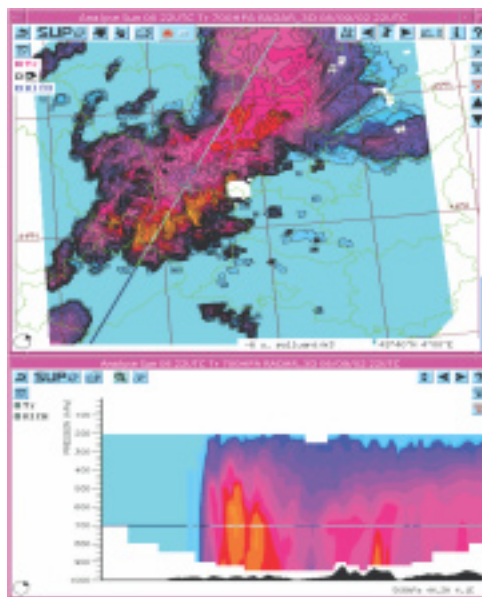
Par ailleurs, afin de progresser vers la réalisation de produits basés sur une telle méthode, en particulier en termes de cumuls de précipitations sur des zones données, on s'est attaché à documenter la qualité des extrapolations pour des cas extrêmes, tels que les systèmes orageux qui affectent la façade méditerranéenne de la France.

La difficulté consiste à analyser l'évolution des zones de pluies aux bonnes échelles spatiale et temporelle. En effet, le déplacement des cellules convectives intenses peut être très rapide dans les cas extrêmes, et n'avoir que peu de lien avec le mouvement des phénomènes qui permettent la génération successive des nombreuses cellules, alors que c'est justement la répétition de



ces cellules qui crée le cumul de précipitations. Différents réglages de la méthode d'analyse des déplacements ont été évalués ; ils permettent, au cas par cas seulement pour l'instant, de porter à plus d'une heure la limite (en échéance) à laquelle l'extrapolation de la trajectoire des zones de précipitations est informative.

Le projet Panthère



Exemple de représentation radar volumique sur la console Synergie. Le prévisionniste peut faire apparaître une coupe verticale dans la direction choisie. Situation du 8 septembre 2002 (radar de Bollène) avec des cellules dotées d'une très grande extension verticale.

Le projet Panthère vise à installer en métropole six nouveaux radars pour compléter le réseau Aramis, à remplacer deux des plus anciens radars de ce réseau et à mettre en place sur l'ensemble des radars du projet de nouvelles techniques de mesure : le Doppler pour la mesure du vent, l'exploration volumique pour l'analyse verticale des systèmes précipitants et la double polarisation pour les mesures microphysiques et l'hydrologie quantitative. Ce projet doit durer jusqu'en 2006. Son avancement en 2003 a respecté le planning prévu :

- Le marché d'achat des huit radars a été signé et le premier d'entre eux sera livré à Trappes début 2004, muni de la double polarisation. Les autres seront ensuite livrés à la cadence d'un tous les quatre mois.
- Les sites des six nouveaux radars ont été choisis et les appels d'offres des travaux d'infrastructure ont été lancés pour les deux premiers (radars du Nord et de l'Aveyron).
- Le plan global de financement est finalisé et, grâce au travail d'information des DIR, les participations des collectivités locales et de l'Europe ont été obtenues.

Les nuées défilent, la pluie perdure : analyse du déplacement du système orageux qui a causé les inondations du Gard en septembre 2002. Sur l'image radar, les barbulles rouges représentent la direction et la vitesse du déplacement du système. Les déplacements très faibles sont représentés par deux cercles concentriques. Le système 2PiR a pu analyser à la bonne échelle spatiale la stationnarité du phénomène.



a) Intervention sur une station Nivôse.

b) Station Nivôse de la Meije.



- Une technique de mesure Doppler a été mise au point sur le radar de Trappes. Cette technique est originale en ce que la mesure Doppler ne nécessite pas le passage du radar dans un mode particulier. La qualité de cette mesure doit encore être validée et, si la validation donne satisfaction, le Doppler pourrait devenir un produit disponible sur les radars Aramis sans aucun changement de leur mode d'exploitation.
- À la suite des premiers essais de Bollène en 2002, les radars de Bollène et de Nîmes ont fonctionné en mode d'exploration volumique pendant l'automne 2003. Un nouveau produit « lame d'eau » et des visualisations volumiques ont été délivrés en temps réel aux prévisionnistes pendant cette expérience. Ces deux produits, encore en cours de validation, pourraient devenir opérationnels à la fin 2004.

Ces stations mesurent la hauteur de neige au sol, le vent, la température et l'humidité de l'air, informations essentielles pour la prévision du risque d'avalanches. En 2003, il a fallu remplacer la station du port d'Aula, dont l'infrastructure avait été détruite suite à un très important dépôt de givre en février. En outre, les fondations de la station de la Meije ont été renforcées.

La DSO et le Centre d'études de la neige ont également mené à bien une étude prospective sur l'adéquation du réseau Nivôse aux besoins des utilisateurs et sur la hiérarchisation de ces besoins. Les résultats serviront pour la programmation de Météo-France en matière d'observation. Sur le plan technique, un prototype de la prochaine génération de stations Nivôse a été installé sur le site du col de Porte, à 1 300 mètres d'altitude. Après validation au cours de l'hiver 2003-2004, ce prototype sera testé en conditions réelles sur un site isolé à plus haute altitude, avant un remplacement progressif de l'ensemble des stations Nivôse à partir de 2005.

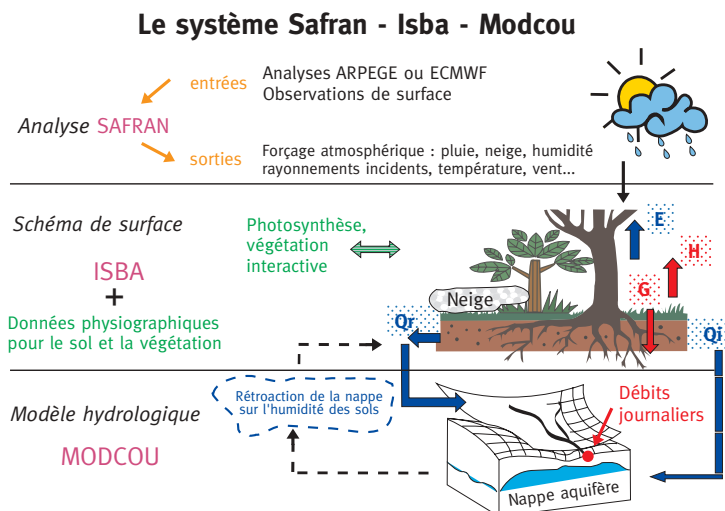
La chaîne Safran-Isba-Modcou

Le modèle couplé Safran-Isba-Modcou permet de simuler simultanément les interactions surface-atmosphère et surface-hydrologie. Safran, premier module de la chaîne, permet de reconstituer les observations atmosphériques sur une grille régulière de huit km de côté à partir de l'ensemble des observations collectées par Météo-France. Ce forçage est appliqué au schéma de surface Isba pour simuler le cycle diurne du bilan hydrique et du bilan d'énergie.

L'évolution du réseau Nivôse

Schéma fonctionnel
du système
Safran-Isba-Modcou

Le réseau Nivôse est composé de vingt stations automatiques autonomes installées en zone de montagne, à des altitudes allant de 1 500 à 3 100 mètres.

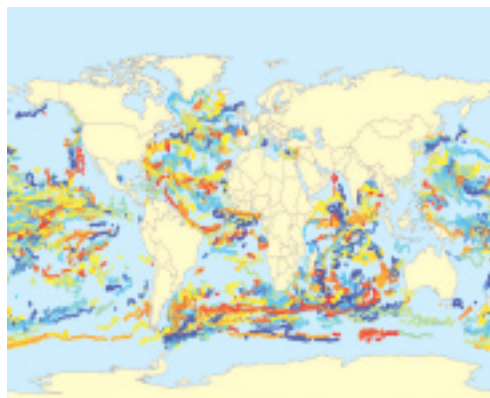


Les flux de ruissellement et de drainage sont transmis au modèle hydrologique distribué Modcou, qui reconstitue le débit de chaque sous-bassin à partir de l'écoulement dans le réseau hydrographique de surface avec une résolution d'un km. Des cartes de sol (Inra) et de végétation (base Corine Land Cover), à la même résolution, sont utilisées pour décrire les propriétés de la surface. Il convient de noter ici que l'interface Isba est utilisée à Météo-France pour d'autres applications comme la prévision numérique du temps, la prévision de température de chaussée et la prévision climatique.

Les études approfondies réalisées sur les bassins de la Garonne et du Rhône ont montré que le modèle hydrométéorologique couplé était capable de simuler de façon très réaliste les débits décennaux des bassins de taille supérieure à 1 000 km² ainsi que l'évolution du manteau neigeux, grâce à une bonne prise en compte des précipitations neigeuses et au réalisme physique du schéma de neige, en particulier pour la simulation de la fonte nivale.

Le modèle permet d'obtenir une description cohérente des différents aspects du cycle continental de l'eau, en particulier, de relier les échanges surface-atmosphère (précipitation, évapotranspiration) à l'hydrologie (neige, contenu en eau du sol, écoulement et débits). C'est un outil précieux d'hydrologie opérationnelle pour explorer le vaste thème de l'hydrologie et du changement climatique.

Océanographie opérationnelle



Météo-France participe au programme inter-organismes Coriolis. Une contribution originale, dans le cadre de la mise à disposition des données océanographiques, fournit des mesures de courant de surface de la mer à partir des dérives des bouées lagrangiennes.

La chaîne de traitement est alimentée par les données de position récoltées sur le Système Mondial de Transmission de l'OMM. Le courant de surface est issu de la dérive de tous les flotteurs lagrangiens (bouées munies d'une ancre flottante) identifiés au niveau de l'océan mondial. Une fois par semaine, les données obtenues sont transmises au centre Coriolis de Brest de manière automatique.

Les bouées de mesure



a

a) Récupération de la bouée Martinique.

b) Équipage du Kahouanne et personnel de Météo-France.



b

Carte des mesures de courant traitées en 2003. Leur nombre s'élève à 870 000 mesures de courant en provenance de 880 bouées réparties sur les divers océans.

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

Les bouées dérivantes mesurent la pression atmosphérique, la température de surface de la mer, et pour certaines le vent. Le système Argos est utilisé pour leur localisation et la transmission de leurs données. En 2003, 15 bouées ont été mises à l'eau dans l'Atlantique Nord et 26 bouées ont été déployées dans l'Océan Indien, dont 25 en collaboration avec des océanographes américains.

a) Carte de densité d'observations de pression atmosphérique pour le mois d'octobre 2003.

b) Carte d'observations de surface pour le mois de juin 2003.

En plus des deux stations océaniques tenues sur le Proche Atlantique en coopération avec le Met Office du Royaume-Uni, deux bouées sont ancrées au large des Antilles sur des fonds de 5 500 mètres et deux en Méditerranée sur des fonds de 2 700 mètres. Il s'agit de structures flottantes d'un poids de 3,7 tonnes, 2,8 mètres de diamètre et 6 mètres de haut. Ces bouées transmettent leurs données via le satellite Météosat.

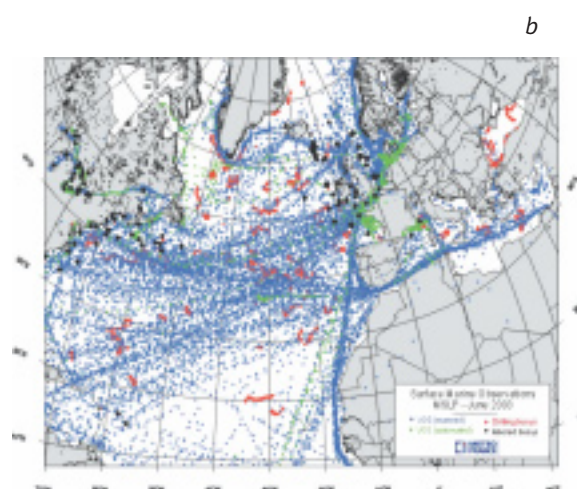
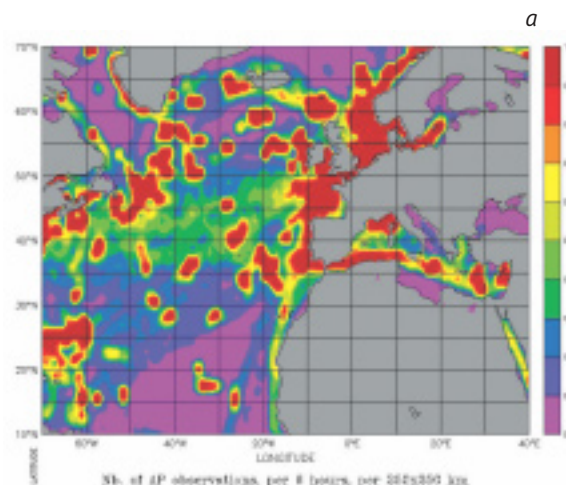
Les deux bouées (Brittany, Gascogne) du Proche Atlantique et les deux bouées (Côte d'Azur, Golfe du Lion) ont été remplacées en cours d'année. La bouée Martinique qui avait rompu son ancrage à la fin du mois de juin a été récupérée, remise en état, puis remise à poste avec un nouvel ancrage par le baliseur Kahouanne, navire des Phares et Balises de Guadeloupe.

Programme d'Observation Marine de Surface d'Eucos

Le Conseil d'Eumetnet a confié à Météo-France la direction du programme d'observation marine de surface d'Eucos à partir du mois d'avril 2003. Ce programme E-Surfmar a pour but de coordonner, d'optimiser, d'intégrer progressivement les activités d'observation météorologique de surface en mer et d'arriver à un partage équitable des coûts entre les membres d'Eumetnet. Ceci concerne les bouées (dérivantes et ancrées) et les navires sélectionnés. La durée prévue de quatre ans se divise en deux parties de deux années chacune : la première étant plutôt la phase de définition, la seconde la phase d'installation. Le premier travail a été de dresser l'inventaire des systèmes existants et leurs performances.

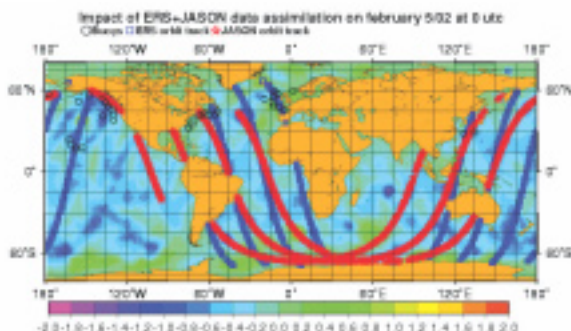
C'est ainsi que des cartes de densité - nombre d'observations de pression atmosphérique effectuées toutes les 6 heures, sur une

superficie de 250 km x 250 km - ont été établies pour chaque composante du dispositif E-Surfmar (navires, bouées). L'étude sur la qualité des données de pression atmosphérique a montré qu'un gros effort est à faire du côté des navires sélectionnés. Les écarts quadratiques moyens entre observations et sorties d'analyse, sont nettement plus élevés pour ceux-ci que pour les bouées.



Concernant les bouées, un protocole d'accord pour le transfert des responsabilités d'Egos (Groupe européen en charge de ce système) vers E-Surfmar a été rédigé. Par ailleurs, une première réunion a été organisée à Paris (locaux de Météo-France) à propos des navires. Les représentants de neuf services météorologiques européens (sur les 15 participants au programme) y ont assisté. Elle a permis de mettre en place les premiers éléments de la coordination.

Les données Jason-1 sont opérationnelles



Les satellites sont les supports les mieux adaptés à des mesures faites à l'échelle du globe. Météo-France est très impliqué dans l'altimétrie spatiale, dont il est également un des principaux clients opérationnels. Des prévisions de l'état de la mer sont réalisées chaque jour à l'aide de modèles numériques qui assimilent les données altimétriques disponibles en temps réel. Elles sont immédiatement transmises aux marins, dans le cadre de la mission de sécurité des personnes et des biens ou pour des assistances spécifiques.

Le satellite Jason-1, lancé fin 2001, est le fruit d'une collaboration entre le Cnes et la Nasa. Jason-1, successeur de Topex/Poséidon, fournit des mesures de hauteur de vagues et de vitesse du vent. En vue de leur utilisation opérationnelle, Météo-France a contribué à la calibration et à la validation de ces données grâce à l'utilisation conjointe des mesures faites par les bouées météorologiques ancrées d'une part, des résultats des modèles atmosphériques d'autre part. Par ailleurs, Météo-France, à la demande du Cnes, injecte ces mêmes données sur le Système Mondial de Télécommunications de données météorologiques, SMT, depuis juillet 2003.

Le projet Mercator dans ses murs

L'année 2003 a vu également le GIP Mercator-Océan s'installer dans ses nouveaux locaux toulousains avec, à bord, quatre ingénieurs de Météo-France dont la présence témoigne de l'importance de l'océanographie opérationnelle pour l'établissement.

Des bouées « chasseuses » de cyclones

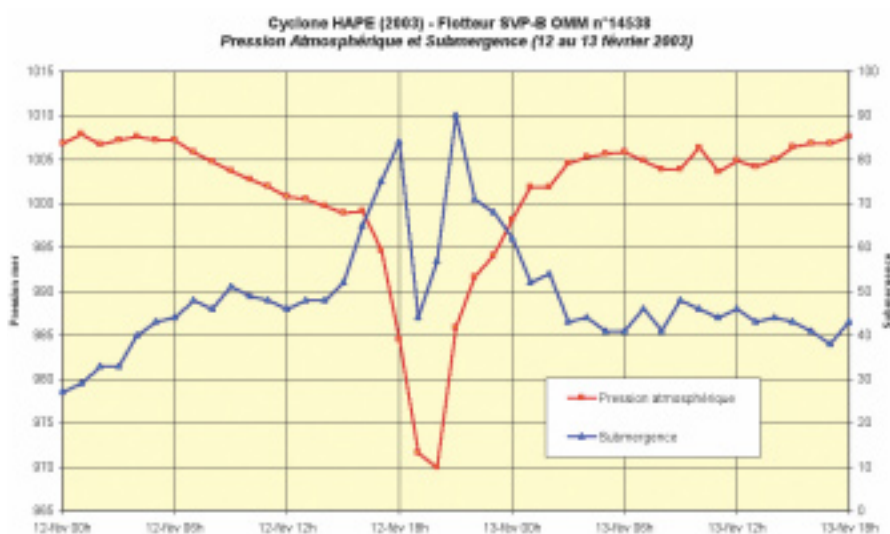
Depuis 1996, date du lancement du Programme international de bouées pour l'océan Indien, Météo-France s'investit activement dans ce programme. L'établissement est intervenu plus particulièrement dans l'équipement de bouées dérivantes en capteurs de pression et a participé au largage d'une vingtaine de bouées.

Outre le fait d'augmenter les mesures sur l'océan Indien, très pauvre en observations, ces bouées sont utilisées par le Centre des cyclones tropicaux de la Réunion pour la veille cyclonique sur le bassin. En l'absence de reconnaissances aériennes, les bouées constituent le seul mode de mesure *in situ* au cœur des cyclones. Traquant de manière passive les perturbations tropicales et continuant de fonctionner même dans les conditions de mer les plus extrêmes, elles sont devenues des « chasseuses » de cyclones.

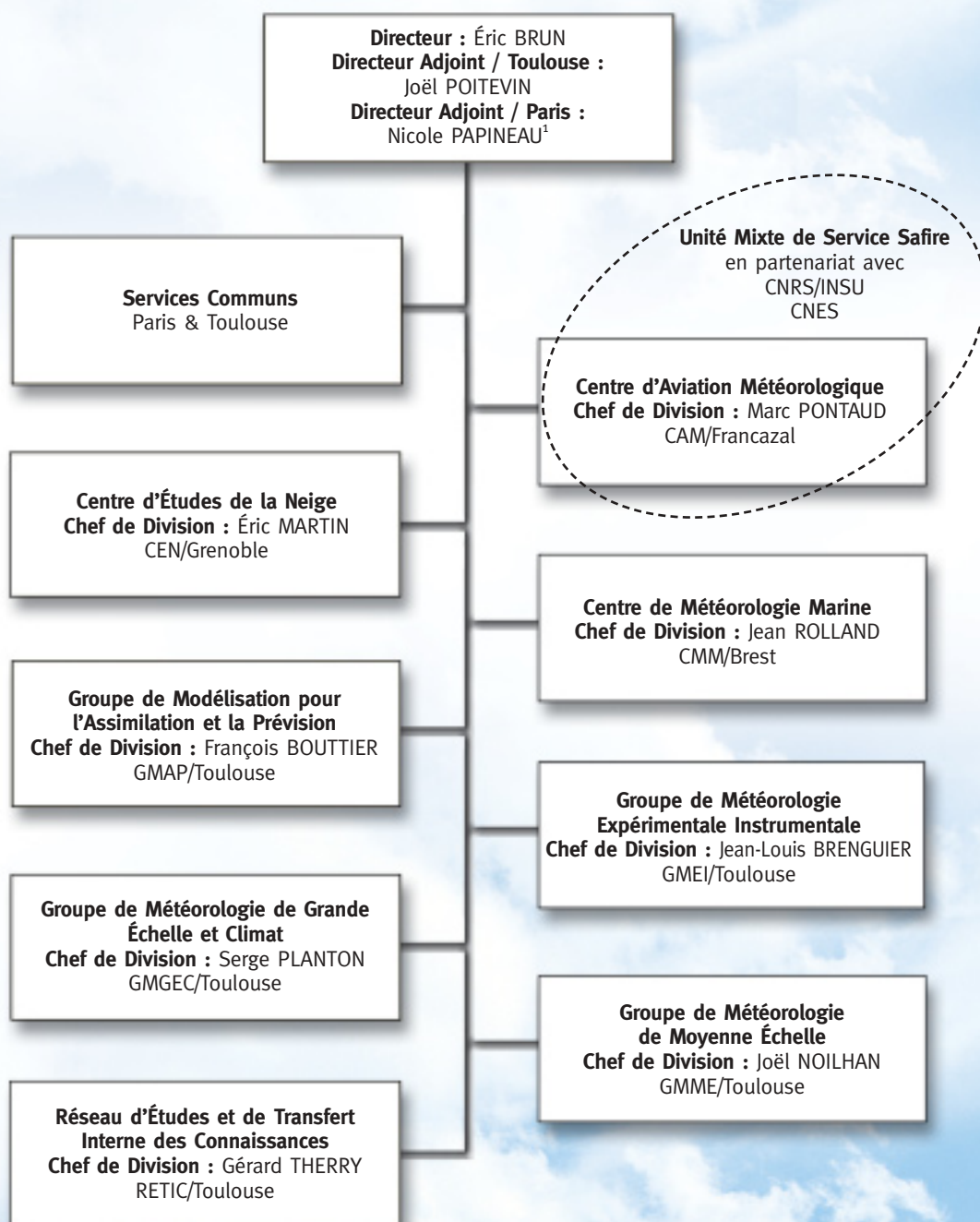
Outre les températures de la mer et de l'air, la pression et, plus rarement, le vent, ces bouées fournissent des mesures de courant ainsi qu'un paramètre très spécifique, dénommé « submergence » qui représente le pourcentage de temps passé par la bouée sous l'eau. Ce paramètre, qui dépend de l'état d'agitation de la mer, a trouvé une application originale par sa capacité à détecter l'œil d'un cyclone ou, en l'absence d'œil, la zone de calme relatif près du centre.

Corrections apportées au modèle de vagues global lors de l'assimilation des données ERS-2 et Jason

Pression et submergence mesurées par la bouée 14538 lors du passage du cyclone Hape. Si aucun œil n'était alors visible sur l'imagerie satellitaire classique, les données de submergence, elles, l'ont clairement révélé.



Organigramme du CNRM



¹ N. PAPINEAU a été remplacée le 1/1/2004 par Philippe Boiret et un Directeur Adjoint Scientifique, Jean Paillex, a été nommé au 1/01/2004.



Centre National de Recherches Météorologiques

42, avenue G. Coriolis
31057 Toulouse Cedex 1
France
Tél. : (33) 5.61.07.93.70
Fax : (33) 5.61.07.96.00
<http://www.cnrm.meteo.fr>
Mél : contact@cnrm.meteo.fr

Édition : Météo-France
Direction commerciale et de la communication

Réalisation : Chromatiques editing
www.chromatiques.fr

Design et maquette : Alexandre Atzert, Carole Vénuat

Achevé d'imprimer sur les presses de l'imprimerie
La SIB, Boulogne-sur-Mer

© Météo-France, 2004 – Dépôt légal : juin 2004
ISSN 1166-732 X

