

The background is a satellite image of a landscape with a river and agricultural fields. A circular inset in the center-right shows a laboratory with people working at computers and equipment. White contour lines are overlaid on the satellite image, with numerical values such as 1020, 1030, 1040, 1050, 1060, 1070, 1080, 1090, 1100, 1110, 1120, 1130, 1140, 1150, 1160, 1170, 1180, 1190, 1200, 1210, 1220, 1230, 1240, 1250, 1260, 1270, 1280, 1290, 1300, 1310, 1320, 1330, 1340, 1350, 1360, 1370, 1380, 1390, 1400, 1410, 1420, 1430, 1440, 1450, 1460, 1470, 1480, 1490, 1500, 1510, 1520, 1530, 1540, 1550, 1560, 1570, 1580, 1590, 1600, 1610, 1620, 1630, 1640, 1650, 1660, 1670, 1680, 1690, 1700, 1710, 1720, 1730, 1740, 1750, 1760, 1770, 1780, 1790, 1800, 1810, 1820, 1830, 1840, 1850, 1860, 1870, 1880, 1890, 1900, 1910, 1920, 1930, 1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990, 2000, 2010, 2020, 2030, 2040, 2050, 2060, 2070, 2080, 2090, 2100, 2110, 2120, 2130, 2140, 2150, 2160, 2170, 2180, 2190, 2200, 2210, 2220, 2230, 2240, 2250, 2260, 2270, 2280, 2290, 2300, 2310, 2320, 2330, 2340, 2350, 2360, 2370, 2380, 2390, 2400, 2410, 2420, 2430, 2440, 2450, 2460, 2470, 2480, 2490, 2500, 2510, 2520, 2530, 2540, 2550, 2560, 2570, 2580, 2590, 2600, 2610, 2620, 2630, 2640, 2650, 2660, 2670, 2680, 2690, 2700, 2710, 2720, 2730, 2740, 2750, 2760, 2770, 2780, 2790, 2800, 2810, 2820, 2830, 2840, 2850, 2860, 2870, 2880, 2890, 2900, 2910, 2920, 2930, 2940, 2950, 2960, 2970, 2980, 2990, 3000, 3010, 3020, 3030, 3040, 3050, 3060, 3070, 3080, 3090, 3100, 3110, 3120, 3130, 3140, 3150, 3160, 3170, 3180, 3190, 3200, 3210, 3220, 3230, 3240, 3250, 3260, 3270, 3280, 3290, 3300, 3310, 3320, 3330, 3340, 3350, 3360, 3370, 3380, 3390, 3400, 3410, 3420, 3430, 3440, 3450, 3460, 3470, 3480, 3490, 3500, 3510, 3520, 3530, 3540, 3550, 3560, 3570, 3580, 3590, 3600, 3610, 3620, 3630, 3640, 3650, 3660, 3670, 3680, 3690, 3700, 3710, 3720, 3730, 3740, 3750, 3760, 3770, 3780, 3790, 3800, 3810, 3820, 3830, 3840, 3850, 3860, 3870, 3880, 3890, 3900, 3910, 3920, 3930, 3940, 3950, 3960, 3970, 3980, 3990, 4000, 4010, 4020, 4030, 4040, 4050, 4060, 4070, 4080, 4090, 4100, 4110, 4120, 4130, 4140, 4150, 4160, 4170, 4180, 4190, 4200, 4210, 4220, 4230, 4240, 4250, 4260, 4270, 4280, 4290, 4300, 4310, 4320, 4330, 4340, 4350, 4360, 4370, 4380, 4390, 4400, 4410, 4420, 4430, 4440, 4450, 4460, 4470, 4480, 4490, 4500, 4510, 4520, 4530, 4540, 4550, 4560, 4570, 4580, 4590, 4600, 4610, 4620, 4630, 4640, 4650, 4660, 4670, 4680, 4690, 4700, 4710, 4720, 4730, 4740, 4750, 4760, 4770, 4780, 4790, 4800, 4810, 4820, 4830, 4840, 4850, 4860, 4870, 4880, 4890, 4900, 4910, 4920, 4930, 4940, 4950, 4960, 4970, 4980, 4990, 5000, 5010, 5020, 5030, 5040, 5050, 5060, 5070, 5080, 5090, 5100, 5110, 5120, 5130, 5140, 5150, 5160, 5170, 5180, 5190, 5200, 5210, 5220, 5230, 5240, 5250, 5260, 5270, 5280, 5290, 5300, 5310, 5320, 5330, 5340, 5350, 5360, 5370, 5380, 5390, 5400, 5410, 5420, 5430, 5440, 5450, 5460, 5470, 5480, 5490, 5500, 5510, 5520, 5530, 5540, 5550, 5560, 5570, 5580, 5590, 5600, 5610, 5620, 5630, 5640, 5650, 5660, 5670, 5680, 5690, 5700, 5710, 5720, 5730, 5740, 5750, 5760, 5770, 5780, 5790, 5800, 5810, 5820, 5830, 5840, 5850, 5860, 5870, 5880, 5890, 5900, 5910, 5920, 5930, 5940, 5950, 5960, 5970, 5980, 5990, 6000, 6010, 6020, 6030, 6040, 6050, 6060, 6070, 6080, 6090, 6100, 6110, 6120, 6130, 6140, 6150, 6160, 6170, 6180, 6190, 6200, 6210, 6220, 6230, 6240, 6250, 6260, 6270, 6280, 6290, 6300, 6310, 6320, 6330, 6340, 6350, 6360, 6370, 6380, 6390, 6400, 6410, 6420, 6430, 6440, 6450, 6460, 6470, 6480, 6490, 6500, 6510, 6520, 6530, 6540, 6550, 6560, 6570, 6580, 6590, 6600, 6610, 6620, 6630, 6640, 6650, 6660, 6670, 6680, 6690, 6700, 6710, 6720, 6730, 6740, 6750, 6760, 6770, 6780, 6790, 6800, 6810, 6820, 6830, 6840, 6850, 6860, 6870, 6880, 6890, 6900, 6910, 6920, 6930, 6940, 6950, 6960, 6970, 6980, 6990, 7000, 7010, 7020, 7030, 7040, 7050, 7060, 7070, 7080, 7090, 7100, 7110, 7120, 7130, 7140, 7150, 7160, 7170, 7180, 7190, 7200, 7210, 7220, 7230, 7240, 7250, 7260, 7270, 7280, 7290, 7300, 7310, 7320, 7330, 7340, 7350, 7360, 7370, 7380, 7390, 7400, 7410, 7420, 7430, 7440, 7450, 7460, 7470, 7480, 7490, 7500, 7510, 7520, 7530, 7540, 7550, 7560, 7570, 7580, 7590, 7600, 7610, 7620, 7630, 7640, 7650, 7660, 7670, 7680, 7690, 7700, 7710, 7720, 7730, 7740, 7750, 7760, 7770, 7780, 7790, 7800, 7810, 7820, 7830, 7840, 7850, 7860, 7870, 7880, 7890, 7900, 7910, 7920, 7930, 7940, 7950, 7960, 7970, 7980, 7990, 8000, 8010, 8020, 8030, 8040, 8050, 8060, 8070, 8080, 8090, 8100, 8110, 8120, 8130, 8140, 8150, 8160, 8170, 8180, 8190, 8200, 8210, 8220, 8230, 8240, 8250, 8260, 8270, 8280, 8290, 8300, 8310, 8320, 8330, 8340, 8350, 8360, 8370, 8380, 8390, 8400, 8410, 8420, 8430, 8440, 8450, 8460, 8470, 8480, 8490, 8500, 8510, 8520, 8530, 8540, 8550, 8560, 8570, 8580, 8590, 8600, 8610, 8620, 8630, 8640, 8650, 8660, 8670, 8680, 8690, 8700, 8710, 8720, 8730, 8740, 8750, 8760, 8770, 8780, 8790, 8800, 8810, 8820, 8830, 8840, 8850, 8860, 8870, 8880, 8890, 8900, 8910, 8920, 8930, 8940, 8950, 8960, 8970, 8980, 8990, 9000, 9010, 9020, 9030, 9040, 9050, 9060, 9070, 9080, 9090, 9100, 9110, 9120, 9130, 9140, 9150, 9160, 9170, 9180, 9190, 9200, 9210, 9220, 9230, 9240, 9250, 9260, 9270, 9280, 9290, 9300, 9310, 9320, 9330, 9340, 9350, 9360, 9370, 9380, 9390, 9400, 9410, 9420, 9430, 9440, 9450, 9460, 9470, 9480, 9490, 9500, 9510, 9520, 9530, 9540, 9550, 9560, 9570, 9580, 9590, 9600, 9610, 9620, 9630, 9640, 9650, 9660, 9670, 9680, 9690, 9700, 9710, 9720, 9730, 9740, 9750, 9760, 9770, 9780, 9790, 9800, 9810, 9820, 9830, 9840, 9850, 9860, 9870, 9880, 9890, 9900, 9910, 9920, 9930, 9940, 9950, 9960, 9970, 9980, 9990, 10000.

Rapport
Recherche
& Développement
2008



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

Rapport Recherche & Développement 2008

Sommaire

Modèles pour la prévision du temps ● page 6

- Prévision numérique synoptique
- Assimilation et prévision d'ensemble
- Prévision numérique à méso-échelle
- Prévision immédiate
- Prévision cyclonique

Travaux menés dans le cadre du programme AMMA ● page 22

- La valorisation des données collectées dans le cadre d'AMMA
- Études conduites dans le cadre d'Amma

Étude des phénomènes météorologiques ● page 28

- Cyclogénèse et prévisibilité
- Phénomènes de méso-échelle

Étude du climat et du changement climatique ● page 34

Actions conduites dans le cadre de l'Année Polaire Internationale ● page 38

Études environnementales liées à l'atmosphère ● page 42

- Hydrométéorologie
- Océanographie (modélisation et instrumentation)
- Environnement atmosphérique
- Chimie atmosphérique et qualité de l'air
- Étude du manteau neigeux et des avalanches

Instrumentation pour la recherche ● page 56

- Instrumentation aéroportée
- Instrumentation *in-situ* et télédétection

Coordination, communication et valorisation ● page 62

Annexes ● page 64



Production de scénarios climatiques régionalisés, étude de l'impact du changement climatique sur les débits extrêmes des rivières en Méditerranée, développement du nouveau modèle à résolution kilométrique AROME pour améliorer la prévision des pluies intenses, développement d'un système d'assimilation d'ensemble : à travers les articles sur ces quatre sujets, le lecteur aura une illustration de la stratégie suivie par la recherche à Météo-France. Celle-ci consiste à s'attaquer aux défis scientifiques qu'il faut relever pour répondre aux attentes de la société dans le domaine de la prévision du temps et de l'évolution du climat. Les principaux objectifs correspondants sont les suivants :

- rendre la prévision météorologique plus fiable et plus fine, en particulier pour ce qui concerne l'anticipation des phénomènes dangereux, l'enrichir d'une évaluation de son incertitude et d'une évaluation de ses conséquences sur les systèmes sensibles aux conditions atmosphériques ;
- améliorer le réalisme des modèles du système Terre pour réduire les incerti-

tudes sur l'évolution du climat aux échelles globale et régionale et produire ainsi des connaissances indispensables à la lutte contre le changement climatique, à l'évaluation de ses impacts et à la définition de stratégies d'adaptation à l'échelle des territoires.

Atteindre ces objectifs nécessite de mener des recherches reposant à la fois sur l'observation, la compréhension et la modélisation des processus dans l'atmosphère et à ses interfaces. Chaque nouveau progrès est un véritable défi reposant sur des projets scientifiques au plus haut niveau et menés dans la plupart des cas en coopération. Dans ce contexte, l'association formelle de Météo-France et du CNRS pour former l'Unité de Recherche GAME, prend tout son sens, d'autant que celle-ci s'est vue reconnaître en 2008 l'excellence scientifique par l'agence d'évaluation AERES.

Éric Brun

Directeur de la recherche



Modélisation

2008 a été l'année du passage en opérationnel du modèle Arome. Mais ce n'est pas le seul événement marquant des 12 mois écoulés en termes d'amélioration du système de prévision. Ainsi, la mise en œuvre d'une assimilation d'ensemble, l'utilisation opérationnelle de données IASI, les multiples actions conduites dans le cadre de Flysafe constituent-elles des exemples d'avancées très notables pour notre Etablissement.

Prévision numérique synoptique

Assimilation opérationnelle de données IASI

Le satellite défilant européen *MetOp*, lancé en octobre 2006, compte notamment à son bord l'instrument innovant IASI. Cet interféromètre de Michelson, développé par le CNES en collaboration avec Eumetsat, sonde un large spectre de l'infrarouge, apportant une très grande quantité d'informations : 8461 informations (canaux) par point de mesure. Comme toute mesure de radiance satellitaire, les données IASI doivent être corrigées des biais éventuels (tels que ceux induits par la géométrie de visée) avant leur assimilation. La correction de biais variationnelle est une méthode qui s'ajuste au jour le jour aux possibles variations du biais à corriger ; devenue opérationnelle en février 2008, elle a permis de prétraiter les données IASI de façon satisfaisante. Comme IASI sonde dans l'infrarouge, sa mesure est affectée par la présence de nuages dans le profil observé. Une autre

étape importante du prétraitement est donc la détection des nuages pour rejeter les informations affectées par les nuages et ne conserver que les informations « claires » dans chaque profil observé.

Depuis le 1^{er} juillet 2008, 50 canaux IASI sont assimilés en opérationnel, sur mer libre, dans Arpege et Aladin, renseignant sur la température atmosphérique. L'impact est largement positif sur les prévisions jusqu'à 4 jours d'échéance dans les régions extra-tropicales, en particulier de l'hémisphère Sud. Les prochaines étapes dans l'exploitation de l'immense quantité d'informations apportée par IASI couvriront plusieurs domaines : utiliser plus de canaux de température et d'humidité, utiliser les données sur terre et glace de mer, mieux caractériser les nuages et l'émissivité de la surface. 1

Assimilation des données Seviri

Déjà utilisées à haute résolution dans l'assimilation du modèle Aladin, les radiances observées issues de Meteosat Second Generation (MSG) sont désormais assimilées dans le modèle global opérationnel Arpege sous forme de Clear Sky Radiances (CSR produites par Eumetsat), avec une résolution horizontale de 250 km conforme à celle des autres données satellitaires. L'impact de ces données est relativement faible mais toujours positif, en particulier sur l'Europe, et elles contribuent à densifier le réseau d'observations sur nos zones d'intérêt.

Au-delà de leur utilisation classique, les données de l'imageur Seviri embarqué sur MSG peuvent servir à repérer les décalages, en termes de position géographique ou d'intensité, des structures cohérentes des écoulements atmosphériques par rapport à celles simulées par le modèle. De nombreuses cyclogénèses semblent en effet très sensibles à la position et à l'intensité de ces ano-

malies en tourbillon potentiel. Les intrusions sèches, signatures de ces phénomènes, peuvent être détectées et suivies sur les images vapeur d'eau des satellites géostationnaires (voir figure).

Les systèmes d'assimilation classiques n'étant pas en mesure d'intégrer directement ce type d'informations, on a recours à l'assimilation de pseudo-observations visant à déplacer horizontalement les anomalies ou à corriger leur intensité. Dans ce dernier cas, des relations statistiques entre vapeur d'eau, températures de brillance et profils de tourbillon potentiel ont été étudiées. Les outils développés ont été appliqués à des cas de prévisions cycloniques.

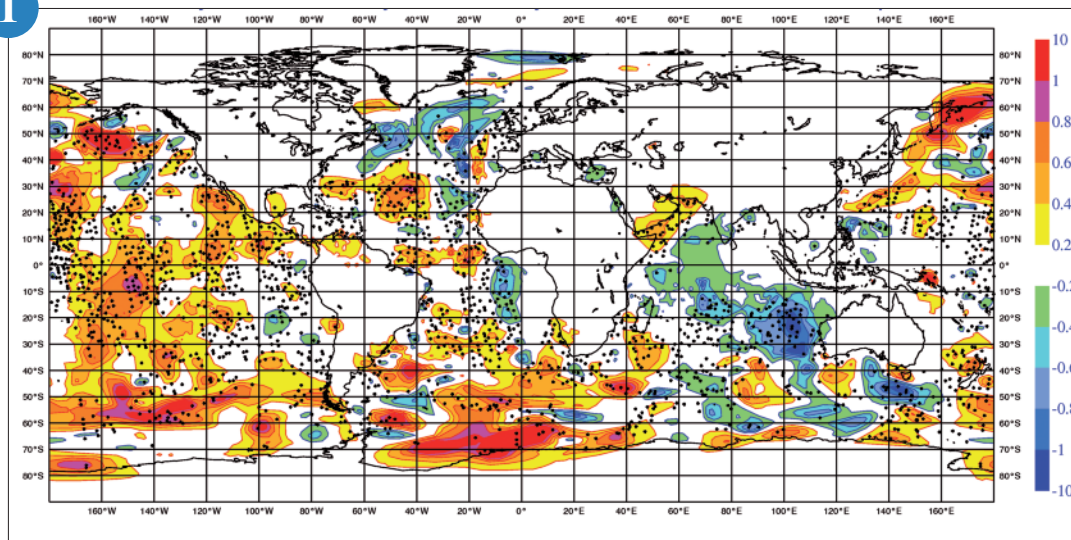
Une réflexion sur l'utilisation directe des structures a également été amorcée, au travers notamment de l'assimilation de la position verticale de la tropopause. 2

Nouvelle paramétrisation de l'émissivité des surfaces continentales aux fréquences micro-ondes

Avec les avancées technologiques des 30 dernières années, la constellation des satellites d'observation de la Terre n'a cessé de s'enrichir. Ces satellites permettent l'acquisition de données sur l'ensemble du globe avec des fréquences de mesures adaptées aux besoins des modèles de prévision du temps. Les instruments micro-ondes font partie des instruments de mesures embarqués à bord des satellites polaires. Les observations micro-ondes du type AMSU-A et AMSU-B/MHS ont une faible sensibilité aux nuages précipitants et permettent de sonder la température et l'humidité de l'air sur plusieurs niveaux de l'atmosphère. Malgré leur contenu en information, les observations micro-ondes ne sont pas entièrement exploitées. Leur utilisation est encore restreinte aux canaux non sensibles à la surface. Cette restriction, plus importante au-dessus des continents, s'explique par la difficulté de séparer les contributions de la surface et de l'atmosphère au signal mesuré par l'instrument satellitaire.

Depuis juillet 2008, une paramétrisation offrant une meilleure description de l'émissivité des surfaces continentales a été introduite dans les modèles opérationnels Arpege et Aladin. L'impact de cette paramétrisation a été apprécié en notant en particulier l'augmentation significative du nombre d'observations assimilées au sein du modèle Arpege. Cette paramétrisation permet d'estimer de façon dynamique, à chaque pixel et pour chaque situation atmosphérique, une émissivité adaptée pour les canaux de sondage de température et d'humidité. L'émissivité est ainsi dynamiquement calculée au sein du système d'assimilation en tenant compte de la physique de la mesure. Ces développements constituent une étape préliminaire pour mieux assimiler les observations satellitaires sur terre dans nos modèles, en particulier celles qui renseignent sur l'humidité des basses couches atmosphériques. Des travaux récents ont montré que les observations d'humidité d'AMSU-B, jusqu'à ce jour non assimilées, permettent de corriger un biais dans l'analyse de l'humidité d'ARPEGE en accord avec des données GPS indépendantes très réalistes. Ces évolutions ont été longuement testées pendant le dernier trimestre de 2007 et sont devenues opérationnelles début 2008. 3

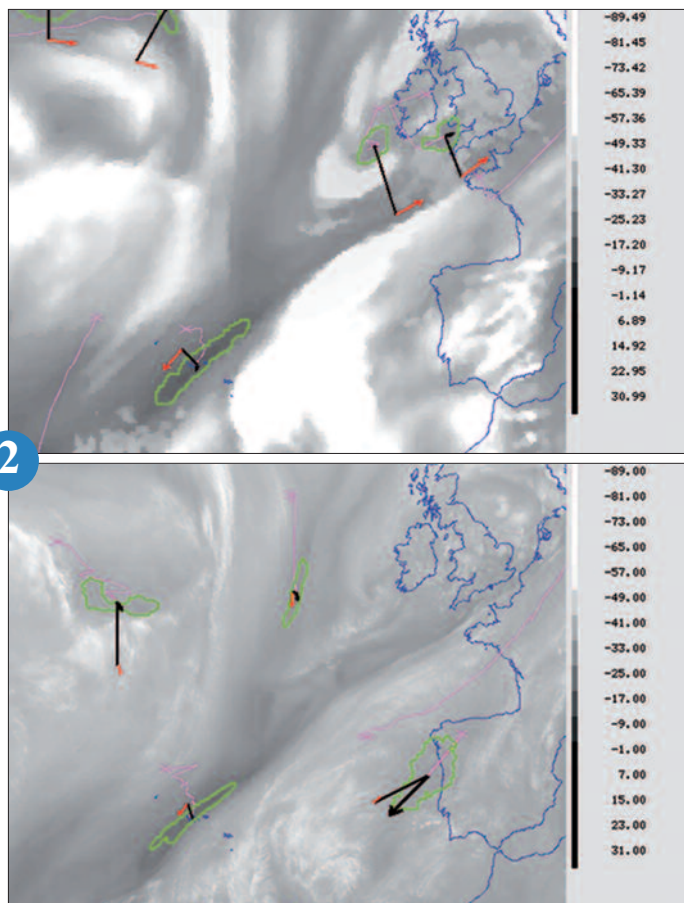
1



Impact sur l'analyse de température à 500 hPa de l'assimilation de 50 canaux IASI sur mer libre (incrément en plages de couleurs, en Kelvin). Les croix indiquent les observations IASI utilisées dans l'analyse.

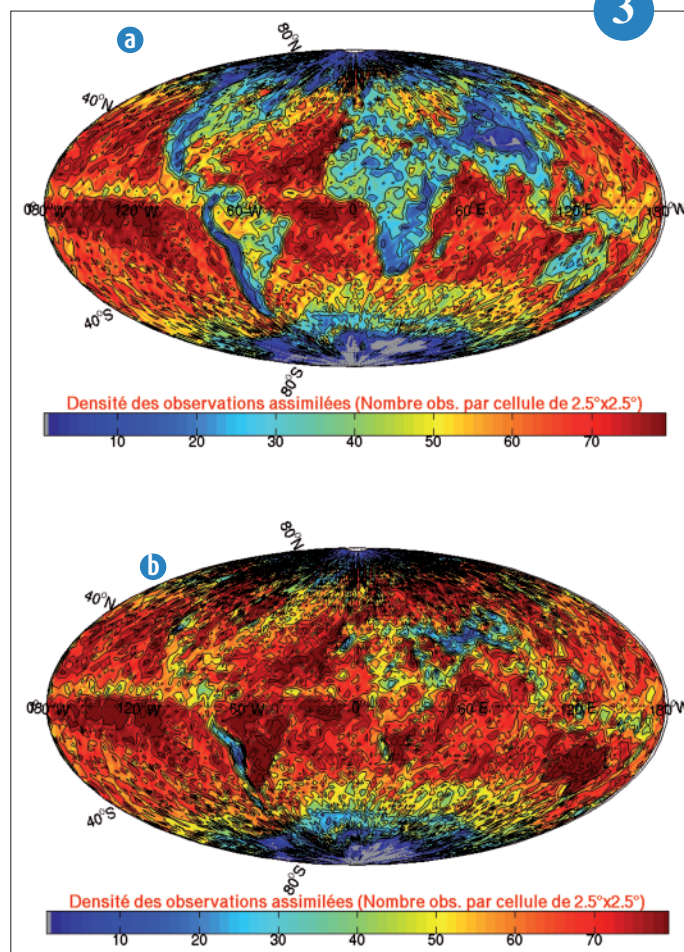
Exemple de traitement de l'image vapeur d'eau. Suivi comparé des cellules de maxima locaux en température de brillance (vert), avec vitesses de déplacements estimées (flèches noires).

2



Cartes de densité des observations assimilées du canal 7 de l'instrument AMSU-A (ce canal mesure la température à 8-10 km d'altitude). Les valeurs de densité correspondent au nombre d'observations assimilées qui sont comptabilisées sur des cellules de 2,5°x2,5° et pendant le mois d'août 2006. Les résultats sont pour (a) l'ancien système opérationnel et (b) le nouveau système opérationnel.

3



Etude de la convergence du 4D-Var Arpege pour une optimisation de la configuration opérationnelle

Le modèle global de prévision Arpege repose sur un système d'assimilation 4D-Var consistant à minimiser la distance (notée J) entre des observations et une prévision à courte échéance du modèle au cours d'une fenêtre temporelle. Pour des raisons de coût de calcul, ce problème d'optimisation est résolu de façon itérative à l'aide de deux minimisations réalisées à des résolutions différentes et plus basses que celle du modèle de prévision. Les augmentations récentes et à venir des résolutions horizontale et verticale dans la partie prévision comme dans la partie assimilation du modèle, nécessitent une évaluation constante et un réglage des paramètres de l'assimilation pour une configuration optimale.

L'étude de la convergence de l'algorithme du 4D-Var Arpege a montré qu'il n'est pas utile de faire trop d'itérations au cours de chacune des minimisations et qu'il est préférable de faire davantage de minimisations (voir figure). Elle a également montré la pertinence de la prise en compte de différents paramètres (contrôle de qualité variationnel, préconditionnement ...). En tenant compte de ces éléments et en cherchant à limiter le temps de calcul nécessaire à l'assimilation, une nouvelle configuration est envisagée. Elle comprend une minimisation supplémentaire ainsi qu'un réglage du nombre d'itérations de chacune des minimisations. Cette configuration fournit des résultats encourageants et devrait être mise en œuvre dans une prochaine version opérationnelle.

4

Evolution des paramétrisations physiques dans les modèles Arpege et Aladin

Une évolution majeure des paramétrisations physiques utilisées dans les modèles Arpege et Aladin a été testée en chaîne pré-opérationnelle au cours du second semestre 2008 et est devenue opérationnelle en février 2009. Celle-ci rapproche beaucoup les paramétrisations des modèles hydrostatiques de celles d'Arome.

Ces modifications regroupent un passage à 6 bandes spectrales dans le schéma de rayonnement solaire, l'utilisation d'une nouvelle climatologie pour l'ozone stratosphérique, l'utilisation du schéma Ecume pour le calcul des flux océaniques et une nouvelle approche du traitement des échanges verticaux sous-maille paramétrés. Pour ce dernier point, le principe est d'associer un schéma de turbulence en énergie cinétique turbulente pronostique, une paramétrisation de l'entraînement en sommet de couche limite ainsi qu'un schéma de convection peu profonde en flux de masse.

Ce nouvel ensemble de paramétrisations permet d'obtenir des profils de température et d'humidité beaucoup plus réalistes dans la couche limite, en cohérence avec ceux simulés par Arome. La prévision des nuages bas est améliorée, ce qu'on peut voir sur les figures (a) et (b). Sur la figure (c), on observe également une amélioration des scores de pluie d'Aladin sur la France.

Les prochaines étapes majeures pour la Prévision Numérique du Temps à Météo-France seront une augmentation importante des résolutions horizontale et verticale, des tests avec le schéma de convection peu profonde en flux de masse EDKF utilisé dans Arome depuis septembre 2008 et une évolution importante de la paramétrisation de la convection profonde, dans le cadre du schéma 3MT développé en collaboration avec les partenaires Aladin.

5

La collaboration dans le cadre des consortia Aladin et Hirlam – activités récentes en matière de coopération en prévision numérique du temps

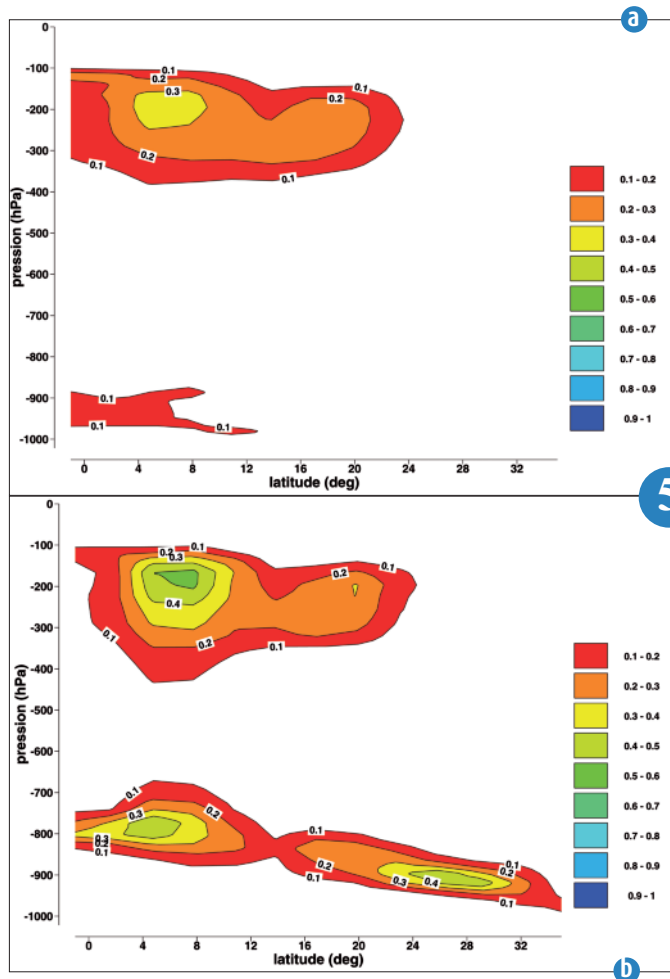
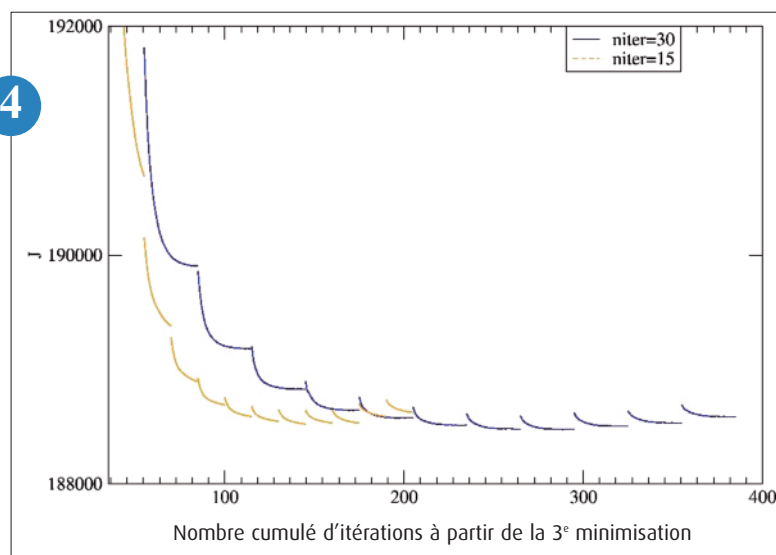
Depuis la fin 2005, le projet international Aladin a été restructuré en profondeur, dans le but de renforcer son management tout en maintenant son haut niveau d'activité scientifique. En parallèle, Météo-France et ses partenaires Aladin se rapprochent du consortium Hirlam, afin de renforcer encore davantage la coopération en prévision numérique du temps dans la zone Europe-Méditerranée. L'objectif est de poursuivre la recherche et le développement sur la base d'un logiciel commun, et selon une stratégie commune (prévisions à l'échelle kilométrique, amélioration des prévisions haute résolution pour les précipitations, le brouillard, les rafales de vent ..., efficacité numérique, techniques d'assimilation et assimilation d'observations denses). Le groupe Aladin/Hirlam comporte actuellement 25 pays. Un lien fort avec la recherche et le logiciel du CEP est aussi maintenu, pour lequel Météo-France joue un rôle central à travers la collaboration Arpège/IFS.

Un des résultats des trois dernières années est le développement puis l'installation du système Arome dans Aladin/Hirlam. En guise d'illustration, la figure jointe montre un cas de convection d'été en Suède. L'image de gauche montre le cumul de précipitations sur 1 heure, prévu par la version Arome de l'Institut Météorologique Suédois (SMHI). L'image de droite montre les valeurs obtenues par les observations radar. Dans ce cas particulier, le modèle voit bien les zones précipitantes sur terre, en Norvège et dans l'Est de la Suède. Cependant, il produit également des pluies sur l'Ouest de la Suède, qui n'étaient pas observées à cet instant.

6

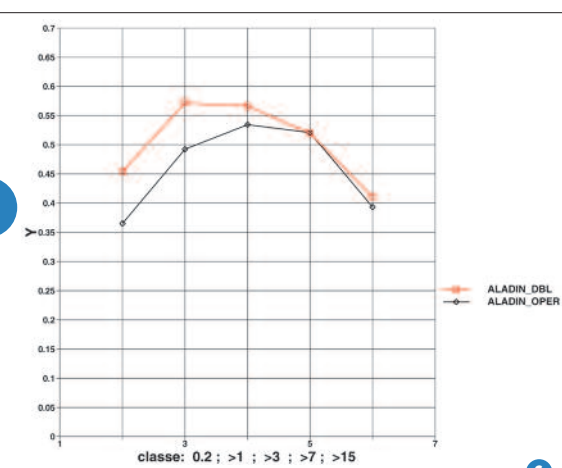
4

Evolution de la distance J au cours de l'assimilation à partir de la 3^e minimisation lorsque 15 ou 30 itérations sont réalisées dans chacune des minimisations.



5

a : Couverture nuageuse du modèle ARPEGE opérationnel pour le mois de juin 2007 le long de la coupe GEWEX sur le Pacifique qui part de l'équateur à 190° Est pour finir par 35° Nord et 235° Est près des côtes californiennes. En ordonnée, la verticale graduée en pression. Les stratocumulus à l'Est du Pacifique sont absents.



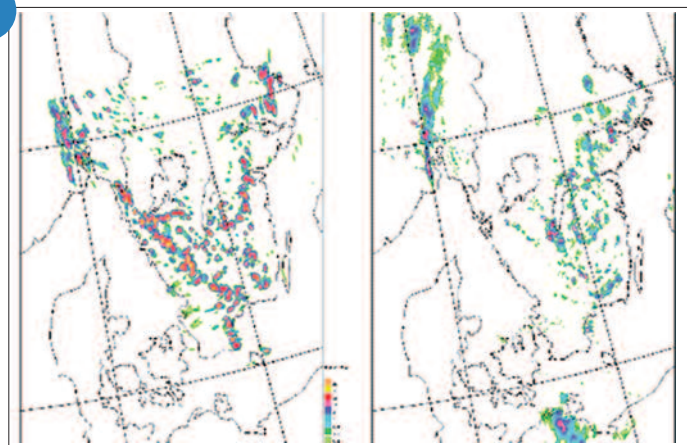
c

c : Score HSS (Heidke Skill Score) des précipitations d'ALADIN sur la France pour les mois de septembre et octobre 2008 (en rouge : avec les nouvelles paramétrisations ; en noir : sans celles-ci). Le score parfait vaut 1. En abscisse, les différentes classes de précipitation étudiées (0.2, > 1, >3, >7, >15 mm/j).

b : Idem figure (a) mais avec les nouvelles paramétrisations physiques. Les stratocumulus à l'Est du Pacifique sont maintenant prévus.

6

Cumul de précipitations (mm/h) d'une prévision Arome à gauche pour le 12 août 2008. Les valeurs déduites des observations radar sont à droite. Lisa Bengtsson (SMHI, Suède).



Assimilation et prévision d'ensemble

Mise en œuvre opérationnelle d'une assimilation d'ensemble

L'assimilation de données dans les systèmes tels qu'Arpege, Aladin et Arome, s'appuie sur une caractérisation statistique des erreurs de prévision. Il convient en particulier de spécifier les amplitudes attendues de ces erreurs (décrites par des variances). Cela constitue un défi scientifique important, sachant notamment que ces erreurs dépendent de la situation météorologique.

Dans ce contexte, une assimilation variationnelle d'ensemble est mise en œuvre de façon opérationnelle depuis le 1^{er} juillet 2008. Il s'agit d'une première mondiale, qui repose sur la mise en œuvre de six assimilations variationnelles perturbées. La dispersion d'un tel ensemble permet d'estimer la dynamique spatio-temporelle des variances d'erreur de prévision.

Cela est illustré par la figure jointe, qui correspond à un cas de tempête sur la France, le 8

décembre 2006. Les variances d'erreur de prévision y présentent un maximum local, en accord avec la forte incertitude associée à ce type de système météorologique intense. Ceci permet de donner plus de poids aux observations dans ces régions critiques.

Il est prévu d'étendre l'utilisation de ce système, notamment à deux aspects. L'assimilation d'ensemble fournira, d'une part, des conditions initiales perturbées à la prévision d'ensemble. D'autre part, les structures spatiales des erreurs de prévision (décrites par des corrélations) pourront également être estimées via l'ensemble. Cela permettra de prendre en compte l'influence de la situation météorologique également dans la façon de propager spatialement l'information observée.

7

L'observation adaptative ; de la recherche vers l'opérationnel

Le concept du guidage d'une partie du système d'observations sur l'Europe en fonction de la situation météorologique est entré dans une phase nouvelle. Dans le cadre du projet Preview, Eucos a déployé, à titre expérimental en 2008, un système de pilotage de la fréquence temporelle de collection des données d'avions commerciaux, et de prise de mesures sur une partie du réseau de radio-sondages européens ainsi que de quelques navires marchands équipés de station de radio-sondage.

Ce système, appelé Data Targeting System, s'apparente à une fusée à plusieurs étages : dans un premier temps, au jour J, les services de prévisions météorologiques nationaux intéressés dont Météo-France au premier chef, proposent de travailler sur tel ou tel système prévu à échéance de 3 ou 4 jours en accord avec le pilote du système situé au Met Office à Exeter. Des calculs de sensibilité (voir figure) sont alors utilisés pour décider où renforcer efficacement le système d'observation à J+1 pour une prévision à J+4. Les différentes étapes qui conduisent à la prise de décision prennent une demi-journée environ.

Météo-France a très régulièrement proposé des cas d'étude et a aussi joué le rôle de pilote du système pendant de courtes périodes.

9

Vers une modernisation de la prévision d'ensemble Arpege (PEARP)

La PEARP, ou Prévision d'Ensemble Arpege, est le système de prévision d'ensemble de Météo-France. Développé à l'origine au sein de la Direction de la Prévision, il s'agit d'un ensemble optimisé en vue de réaliser des prévisions probabilistes à courte échéance.

Au cours de l'année 2008, la PEARP a connu les évolutions suivantes : bascule opérationnelle de la version dite « 1.5 » comprenant un nouveau mode d'initialisation réellement global, appuyé sur les perturbations de la veille ; évolution de la résolution verticale, alignée sur celle d'Arpege sans mésosphère ; extension de l'échéance finale à 108h pour coïncider avec les 4 jours de la prévision déterministe de OOTU ; enfin, depuis novembre 2008, l'évolution d'une dizaine de membres supplémentaires est calculée chaque jour en marge de l'environnement opérationnel. La figure illustre un intérêt de cet outil de prévision d'ensemble : l'aide à l'alerte précoce en l'occurrence, alerte au-delà des échéances couvertes par Arome sur le risque de forts cumuls de pluies.

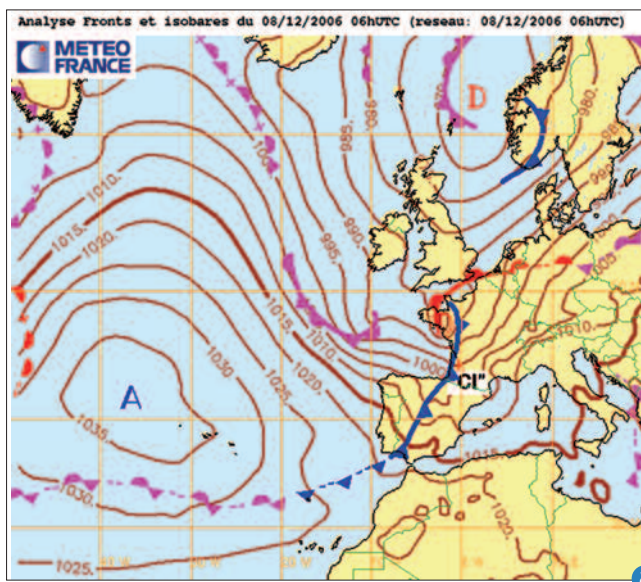
Toujours en 2008, d'autres expériences ont été réalisées. L'impact de différents jeux de paramétrisations physiques a été examiné et comparé à une perturbation aléatoire simple des sorties du jeu standard : les scores probabilistes progressent davantage avec les paramétrisations diversifiées. On commence aussi à mesurer l'impact d'un couplage avec l'ensemble d'assimilation dont la mise en place est évoquée par ailleurs : cette technique présente aussi un effet bénéfique sur les scores. Toutes ces modifications seront regroupées pour contribuer à une évolution importante de la PEARP en 2009, tandis que la Direction de la Prévision met en place un projet pour en améliorer l'utilisation.

8

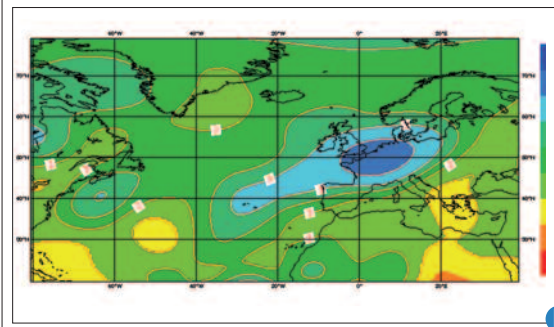
Dépendance des erreurs de prévision à la situation météorologique, estimée à l'aide d'une assimilation d'ensemble.

(a) : champ de pression réduite au niveau de la mer, le 8 décembre 2006 (unité : hPa) ;

(b) : écarts types des erreurs de prévision du tourbillon vers 500 hPa, pour cette même date (unité : 10^{-5} s^{-1}). Jusqu'à présent, les prévisions fournies quotidiennement par le modèle Arome en test étaient initialisées par les analyses du modèle opérationnel Aladin-France. Depuis le 25 septembre 2007, Arome dispose de son propre système d'assimilation et utilise donc sa propre analyse comme état initial de ses prévisions.

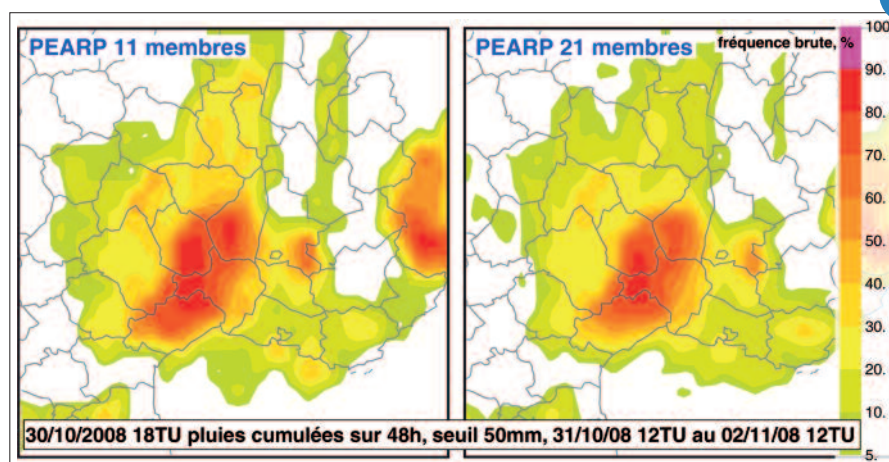


7



b

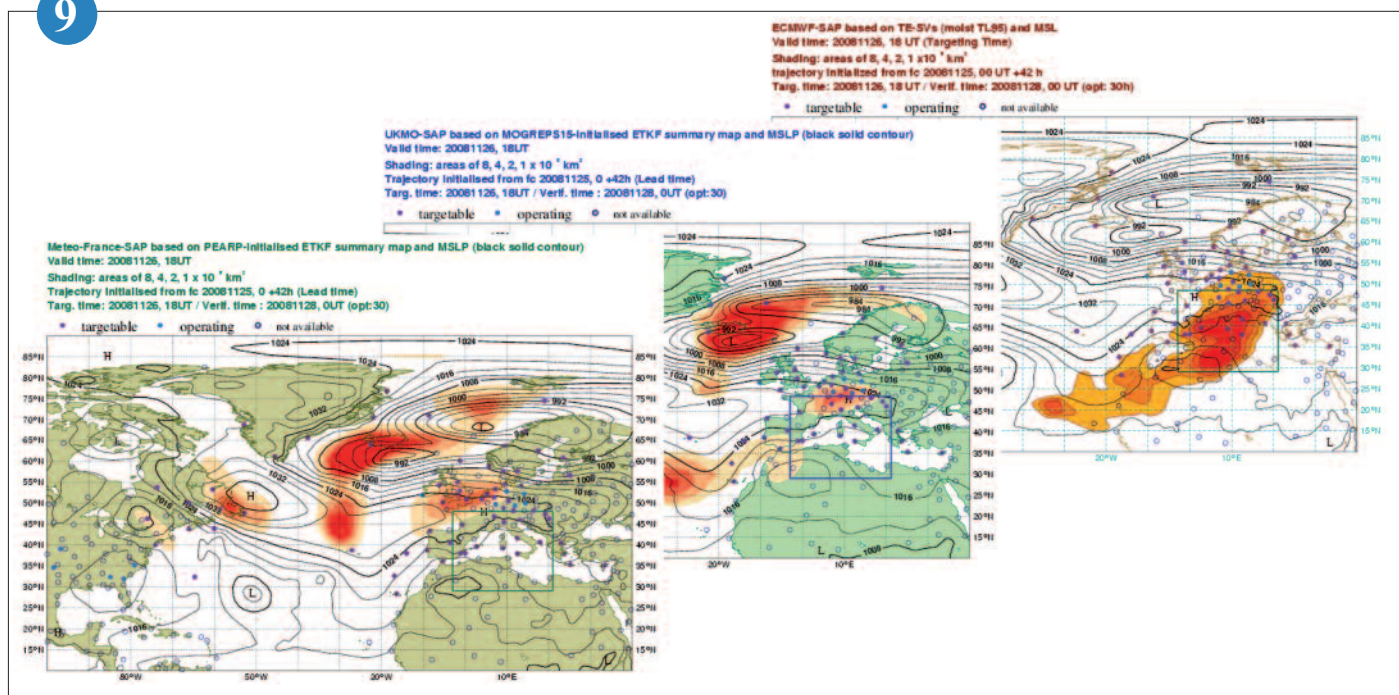
8



Sur le cas de l'épisode de fortes pluies des 1 et 2 novembre 2008, on s'intéresse au risque de forts cumuls entre les échéances 18h et 66h (cumul sur 48h), c'est-à-dire intégrant la durée de l'épisode. Les forts cumuls sont ici considérés dans le référentiel du modèle, sans correction (appelé calibration), d'où la valeur modeste de 50 mm utilisée. Bénéficiant des améliorations décrites dans le texte, les deux tailles d'ensemble apparaissent informatives : à gauche, 11 membres, à droite 21 membres. Les zones de risque élevé (fréquence brute plus grande que 50 ou 60%) sont délimitées plus finement par l'ensemble à 21 membres.

Cartes de sensibilité disponibles en temps réel le 25 novembre 2008 en milieu de journée, utilisées pour déterminer la localisation des observations supplémentaires à déployer à 18UTC le lendemain dans le but de réduire l'erreur de prévision dans la région délimitée par le carré bleu 30 heures après les mesures. En général les zones sensibles mises en évidence par les trois centres participants sont différentes. Plusieurs stratégies de déploiement sont alors possibles : on pourrait par exemple considérer la superposition des 3 zones sensibles. Ici, on a plutôt choisi de privilégier la zone sensible prévue par le CEPMMT dans la mesure où celle-ci correspond à un nombre important de stations en mesure d'être activées à la demande . ▼

9



Prévision numérique à méso-échelle

Arome devient un outil opérationnel

Depuis le 18 décembre 2008, le modèle AROME est utilisé par les prévisionnistes de Météo-France en métropole pour l'élaboration de la production opérationnelle de l'Etablissement.

D'un point de vue scientifique, les derniers développements incorporés au modèle au début de l'automne 2008 concernent principalement l'utilisation du schéma de convection peu profonde EDKF, développé et testé au CNRM ces dernières années, ainsi que l'activation de la diffusion numérique dite SLHD (Semi Lagrangian Horizontal Diffusion) sur les variables hydrométéores, développée dans le cadre Aladin et utilisée dans certaines versions opérationnelles par nos partenaires. Ces dernières modifications ont été mises en place de façon à corriger certains défauts plus particulièrement répertoriés par les prévisionnistes lors de leur évaluation du prototype Arome, évaluation débutée au début de l'année 2007, à savoir des circulations de vent de couche limite irréalistes et des précipitations intenses surestimées. En ce qui concerne les aspects techniques, la chaîne configurée par les services opérationnels reprend les caractéristiques de la chaîne prototype qui était jusque là pilotée par le CNRM : en particulier un domaine couvrant la métropole avec une maille de 2,5 km, un cycle d'assimilation tri-horaire utilisant les mêmes observations que son coupleur Aladin, avec en plus une utilisation de vents des radars doppler.

Le programme de formation de l'ensemble des prévisionnistes de métropole commencé à l'automne 2008, se poursuit lors du premier trimestre 2009, afin que la prise en main de ce nouvel outil soit généralisée à tous les personnels de Météo-France.

10

Arome : déjà en route vers la version 2

Le système de prévision numérique Arome est entré en production opérationnelle fin 2008. Il améliore l'anticipation de la plupart des phénomènes météorologiques, grâce à de multiples apports conceptuels (non-hydrostatisme, résolution horizontale de 2,5km sur la métropole, physique renouvelée...) et son assimilation de données spécifique (utilisant des vents observés par radar, des radiances du satellite Météosat et des observations des stations automatiques Radome de Météo-France).

Une nouvelle version d'Arome est d'ores et déjà en cours de mise au point, son utilisation en opérationnel est prévue courant 2009. Elle inclura une forte augmentation de la résolution verticale, qui sera doublée dans les basses couches du modèle afin de mieux prévoir les brouillards et nuages bas. La modélisation de la microphysique pluvio-nuageuse sera améliorée. Les données de réflectivités mesurées par les radars permettront d'améliorer l'initialisation de l'humidité et des précipitations, grâce à une technique statistique innovante, l'inversion bayésienne. D'autres développements du système d'assimilation de données permettront à terme d'utiliser les observations à haute fréquence, et d'améliorer la représentation des surfaces. L'objectif est de fournir des prévisions de plus en plus précises à courte échéance, c'est-à-dire pour la journée en cours. En parallèle, un prototype à très haute résolution d'Arome (à maille de 1km voire moins) a été déployé avec des résultats encourageants sur les Alpes à l'occasion de compétitions de ski.

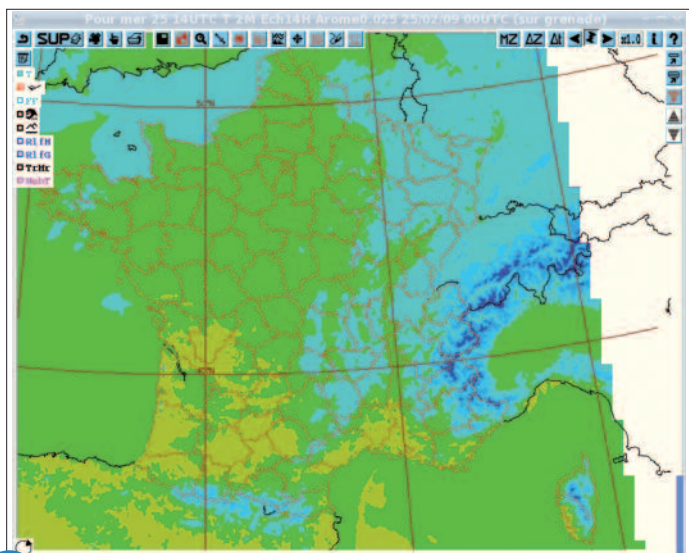
11

Assimilation des données radar dans Arome

Après avoir montré un impact positif pour la prévision des systèmes précipitants à courte échéance, les vents radiaux de 15 des radars Doppler du réseau national Aramis ont été intégrés dans l'assimilation tri-dimensionnelle 3Dvar du modèle Arome, et ce dès le lancement du modèle opérationnel Arome. L'évaluation sur quatre mois de l'impact de ces données dans le système, avec suivi quotidien de la qualité des observations, a en effet fourni des résultats satisfaisants, notamment dans le cas d'un bon échantillonnage de la dynamique de basse couche liée à des systèmes orageux. Une importante évolution concerne l'assimilation des réflectivités radar qui est évaluée de façon systématique depuis fin 2008. L'algorithme consiste à traduire au préalable les observations volumiques de réflectivités en profils d'humidité relative, les différents types d'hydrométéores n'étant pas directement assimilables par le modèle. Dans ce but, les profils simulés voisins de l'observation sont utilisés afin d'obtenir l'information nécessaire en condensats précipitants pour contraindre la solution. Le profil d'humidité est ensuite directement assimilé dans le 3Dvar (voir figure). Une évaluation de deux mois d'assimilations cyclées confirme un gain conséquent en terme de scores de prévisions des précipitations.

A court terme, plusieurs radars supplémentaires (notamment côtiers) pourront être utilisés dans l'assimilation opérationnelle des vents Doppler, suite à des travaux menés conjointement avec DSO/CMR visant à mieux caractériser les échos non météorologiques, tels des échos de mer. Ces travaux ont aussi permis une meilleure caractérisation du signal de « non-pluie » qui se révèle fort utile à l'algorithme d'assimilation des réflectivités radar pour assécher et contribuer ainsi à replacer des structures précipitantes mal positionnées.

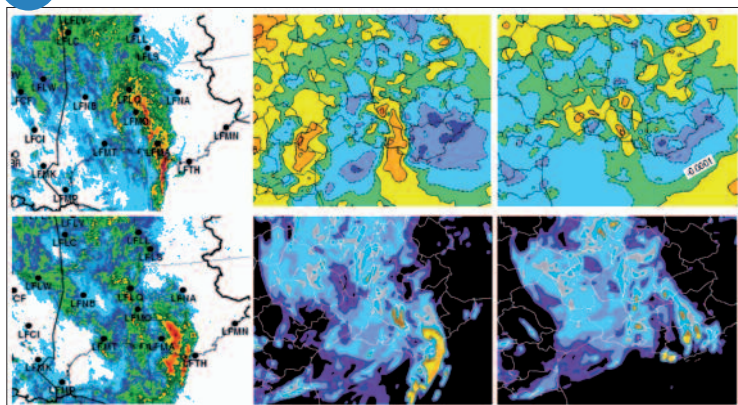
12



10

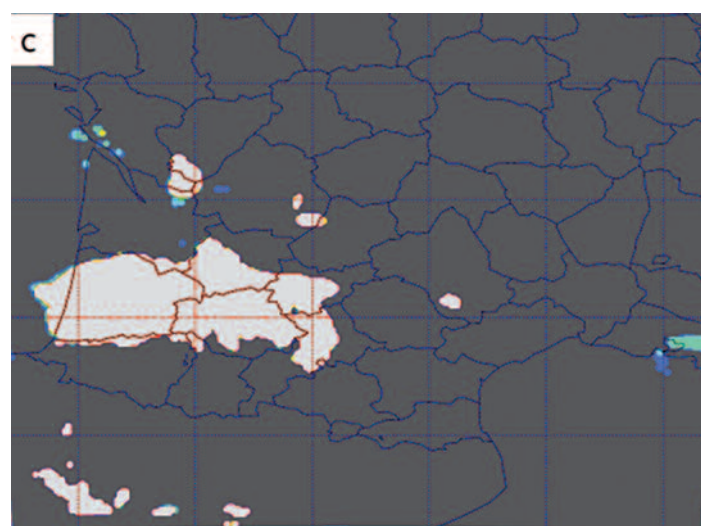
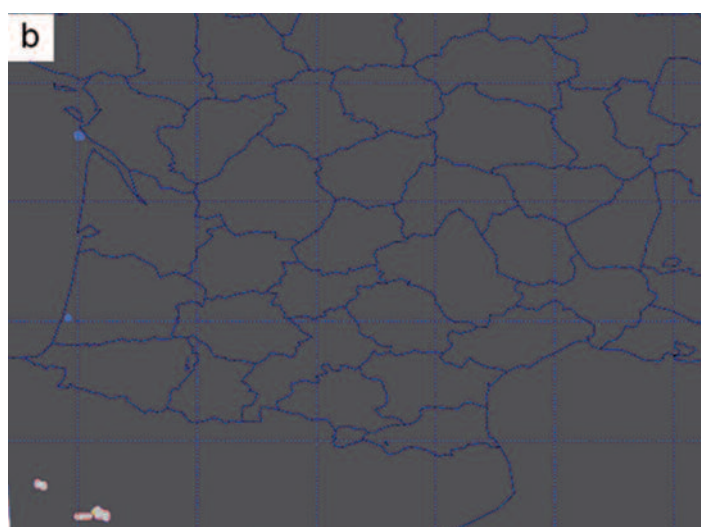
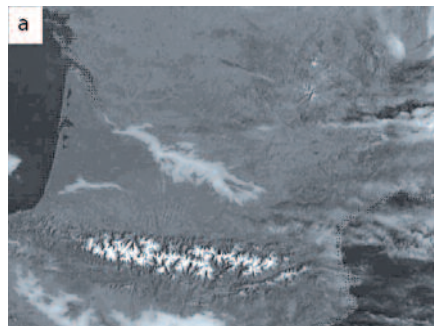
▲ Température à 2m prévue par Arome pour le 25 février 2009 à 14 heures UTC à par partir du réseau du 25 février 00 UTC (visualisation sur le poste de travail du prévisionniste)

12



▲ Cas de la ligne convective sur le sud-est de la France du 8 octobre 2008 au matin. Haut : 06h UTC, mosaïque radar (gauche), incréments d'analyse d'humidité spécifique à 850 hpa obtenues avec le cycle d'assimilation Arome avec (milieu) et sans (droite) réflectivités radar (les contours jaunes-orange signalent des incréments positifs d'humidité, contours tous les 0,1 g/kg) ; Bas : à 09h UTC, mosaïque radar (gauche), prévisions 3h Arome de réflectivités à 900 hpa issues d'analyses avec (milieu) et sans (droite) réflectivités.

11



▲ Nuages bas et brouillards (en gris clair) observés par le satellite Meteosat (canal visible, image a), modélisés par AROME à la résolution verticale opérationnelle fin 2008 (41 niveaux, image b), et à la résolution prévue fin 2009 (60 niveaux, image c). Le cas présenté porte sur les vallées de la Garonne et de l'Adour le 27 janvier 2008.

Simulations d'ensemble Arome d'épisodes de pluie intense en Méditerranée

Le sud-est de la France est régulièrement soumis à des épisodes de pluie intense durant l'automne. Une étude a été menée pour caractériser la prévisibilité à l'échelle convective, c'est-à-dire mesurer l'impact des différentes sources d'incertitudes sur la prévision à haute résolution de cas de fortes pluies avec le modèle atmosphérique à échelle fine Arome. Un cas typique de système convectif de méso-échelle quasi-stationnaire avec des cumuls de pluies importants (> 450 mm en 24 heures sur les Cévennes) est présenté ici. En raison d'une dynamique fortement non-linéaire et à seuil des phénomènes à petite échelle (processus microphysiques, convection...), une approche dédiée en simulations d'ensemble est développée puis utilisée pour évaluer la prévisibilité à l'échelle convective. L'incertitude sur les conditions initiales d'échelle synoptique et aux limites est fournie par une sélection appropriée (basée sur une analyse en composantes principales) des membres de la prévision d'en-

semble grande échelle PEARP de Météo-France. Une assimilation de données à méso-échelle est également réalisée dans Arome pour être au plus près des observations.

Les évolutions temporelles des pluies simulées, cumulées et moyennées dans le domaine, montrent l'impact des conditions d'échelle synoptique issues des membres PEARP sur la prévision des précipitations à fine-échelle. La dispersion des prévisions traduit l'incertitude sur la prévision des précipitations et cette approche permet de bien estimer l'intensité du système de forte pluie observé.

L'incertitude sur les conditions initiales de méso-échelle et les erreurs du modèle seront également considérées par la suite. Ces travaux seront poursuivis dans le cadre du projet national Medup, financé par l'ANR dans le cadre de l'Appel d'Offres « Vulnérabilité Climat et Milieux ».

13

Impact de l'assimilation de données GPS dans Arome : cas d'étude durant COPS

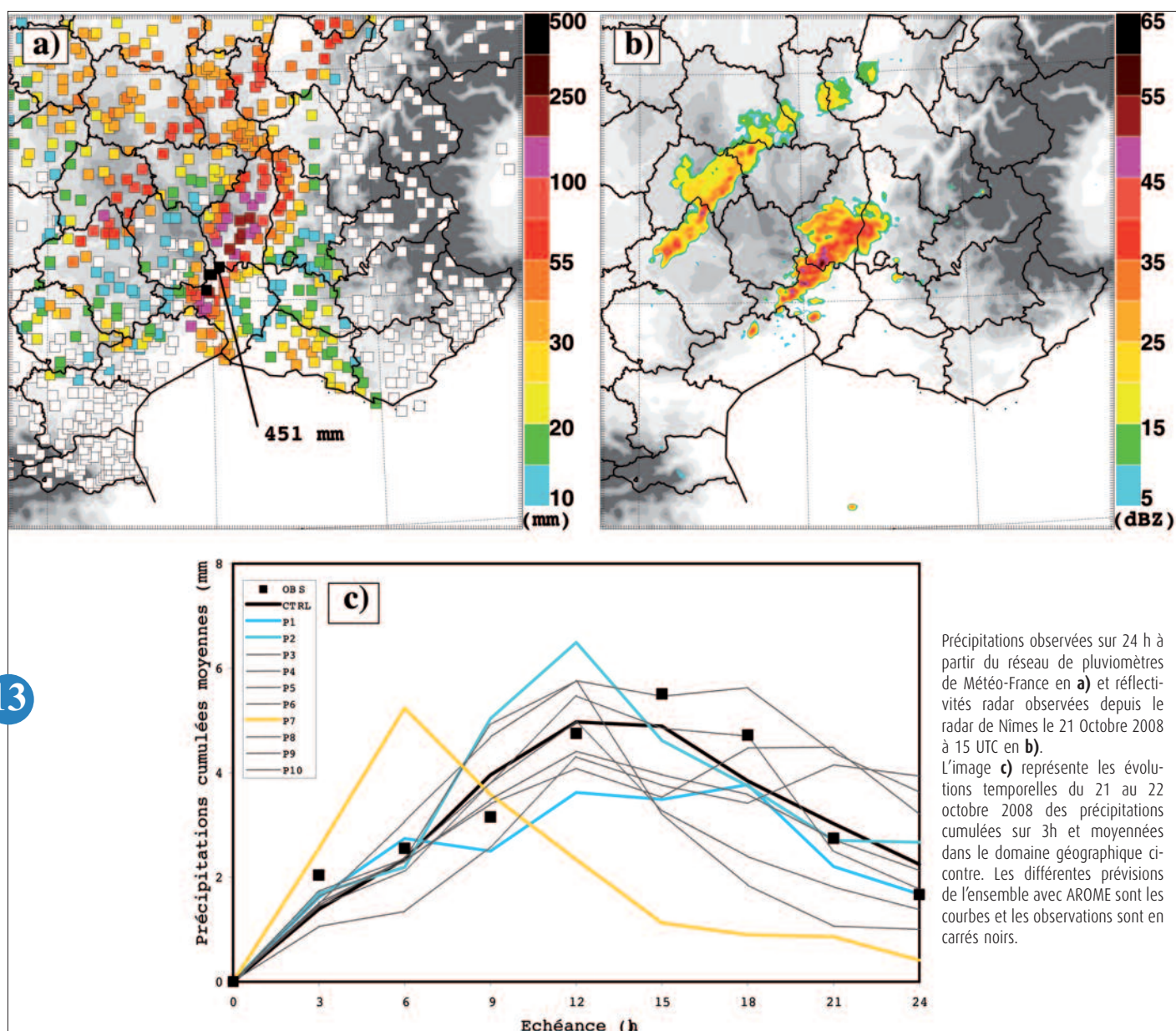
Utilisés à l'origine pour des applications de navigation et de positionnement, les signaux reçus par les capteurs GPS au sol se révèlent aussi être aptes à fournir une information météorologique. En effet, les retards enregistrés lors de la propagation du signal GPS entre le satellite et la station réceptrice au sol sont liés à la réfraction due à l'atmosphère et en particulier à la vapeur d'eau. Depuis plusieurs années, Météo-France a engagé le développement de l'assimilation des retards GPS dans ses systèmes de prévision numérique du temps. D'abord développée pour le système global ARPEGE, puis le modèle à aire limitée ALADIN-France, l'assimilation des délais GPS a été implémentée et évaluée dans le nouveau système opérationnel de prévision numérique à haute résolution AROME.

L'impact de l'assimilation des délais GPS a été plus particulièrement examiné sur une période d'observations intensive (18-20 juillet 2007) de la campagne COPS, qui s'est déroulée dans la région de la Forêt Noire et des Vosges. Un impact positif sur la prévision des précipitations par AROME est clairement mis en évidence lorsque les données GPS sont assimilées. L'impact est particulièrement significatif pour la journée du 19 juillet illustrée par la figure.

Pour la campagne COPS, un important réseau de stations GPS était déployé dans la région des Vosges et de la Forêt Noire, offrant l'opportunité de tester l'apport de l'assimilation des données d'un réseau dense en complément des stations du réseau européen E-GVAP. Les résultats de ces expériences d'assimilation montrent que la majorité du gain obtenu grâce à l'assimilation de données GPS est attribuable à l'assimilation des données du réseau opérationnel E-GVAP. Ce résultat est particulièrement important dans un contexte opérationnel. Même si la densité du réseau E-GVAP peut apparaître faible au regard de celle du système AROME, les données E-GVAP apportent déjà une information à méso-échelle que le nouveau système d'assimilation AROME est capable d'exploiter pour améliorer l'analyse d'humidité dans la basse et moyenne troposphère.

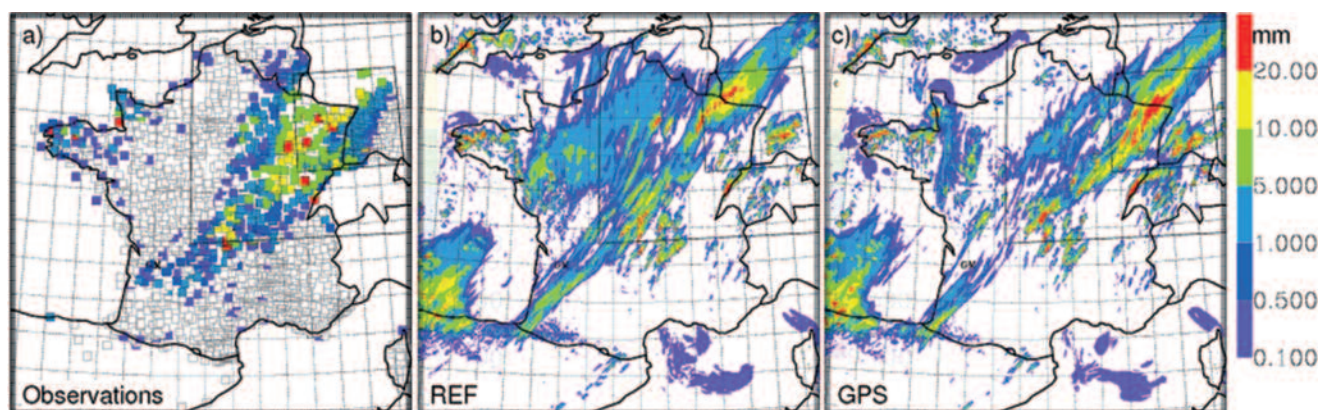
14

13



Précipitations observées sur 24 h à partir du réseau de pluviomètres de Météo-France en **a)** et réflectivités radar observées depuis le radar de Nîmes le 21 Octobre 2008 à 15 UTC en **b)**. L'image **c)** représente les évolutions temporelles du 21 au 22 octobre 2008 des précipitations cumulées sur 3h et moyennées dans le domaine géographique ci-contre. Les différentes prévisions de l'ensemble avec AROME sont les courbes et les observations sont en carrés noirs.

14



▲ Précipitations cumulées entre 03 UTC et 15 UTC le 19 juillet 2007 (PO19b de COPS) : observées **(a)** et prévues par le modèle AROME à partir de l'analyse AROME à 00UTC **(b,c)**. Le cycle d'assimilation duquel est issu l'analyse AROME a utilisé les délais GPS **(c)** ou non **(b)**.

Prévision immédiate

Amélioration de la détection d'orage par satellite

Météo-France développe, dans le cadre du SAF Nowcasting, un outil de détection et de suivi d'orage à partir de l'imagerie satellite. Cet outil, connu sous le nom de RDT, est particulièrement utile pour les zones dépourvues de réseau sol de détection d'orage. Météo-France le met en œuvre sur l'Afrique de l'Ouest pour répondre à des besoins multiples :

- recherche sur la mousson africaine ;
- soutien météorologique des services météorologiques africains via l'ACMAD ;
- soutien météorologique des forces armées françaises.

L'effort de développement mené au cours de l'année 2008 a principalement porté sur l'amélioration de la discrimination des systèmes orageux. La refonte complète de l'algorithme de discrimination a permis de réduire sensiblement le nombre des fausses alarmes tout en augmentant le nombre des bonnes détections. La stabilité temporelle de la détection a également été considérablement améliorée. En conséquence, la version RDT 2009 développée cette année représente un saut qualitatif dans la capacité de Météo-France à diagnostiquer les systèmes orageux à partir de l'imagerie satellite. Ces améliorations devraient permettre au RDT 2009 d'acquiescer le statut opérationnel d'EUMETSAT.

Cette nouvelle version est d'ores et déjà mise en œuvre par Météo-France et sera disponible pour les clients du SAF Nowcasting à partir de mars 2009.

Le diagnostic des périodes orageuses est maintenant satisfaisant, il reste à améliorer la précocité de détection des phénomènes orageux avant la première occurrence de foudre. Les travaux de recherche 2009 sont orientés dans ce sens.

15

Nouveaux systèmes de prévision immédiate pour l'aviation : évaluation à l'aide de mesures aéroportées

Aujourd'hui, les pilotes d'aéronefs prennent le départ avec des prévisions météorologiques sur l'ensemble de leur parcours mais les possibilités de transmission d'informations actualisées restent limitées.

Depuis 2005, dans le cadre du projet européen Flysafe, plusieurs services météorologiques nationaux européens, dont Météo-France, développent de nouveaux systèmes d'informations météorologiques appelés Weather Information Management Systems, permettant de transmettre aux avions en vol des prévisions météorologiques adaptées aux phases de croisière et d'approche.

Ces nouveaux systèmes d'informations présentent les zones de danger sous forme de polygones, avec le niveau du risque associé à la prévision, et concernent trois phénomènes : les orages, le givrage en vol et la turbulence. Ces informations sont issues de plusieurs réseaux d'observations.

En 2008, des équipes de recherche de Météo-France et du National Aerospace Laboratory aux Pays-Bas ont mené deux campagnes d'essais en vol depuis plusieurs aéroports européens : Toulouse, Amsterdam, Paris. Leur objectif principal a été de tester les prototypes de systèmes d'informations sur les orages et le givrage.

A bord des avions instrumentés ATR 42 et Metro II, les ingénieurs et chercheurs ont réalisé des mesures *in-situ* qui permettront de vérifier les prévisions transmises par les systèmes dédiés aux orages et au givrage.

Après le recueil des données, la prochaine étape sera consacrée à leur analyse et à la validation des différents prototypes étudiés. Ils seront ensuite testés dans un simulateur de vol. Le programme Flysafe s'achèvera en juin 2009.

16

Complémentarité des prévisions d'orages et des radars de bord des avions

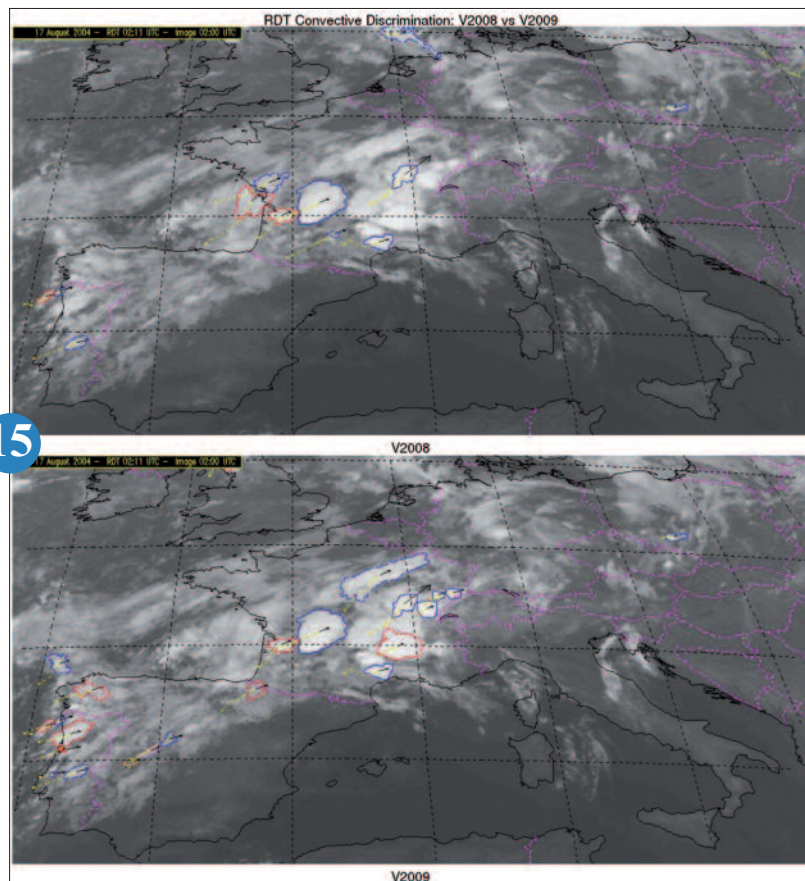
Le projet européen Flysafe vise à développer le « Système de Sécurité Intégré de Nouvelle Génération » pour l'aviation commerciale à l'horizon 2015, lequel comprend la gestion des orages. Un système ad hoc, dit Wims-CB, a été développé, pour fournir en temps réel une détection, une caractérisation, et une prévision des orages pour l'heure à venir, et ce, toutes les 5 minutes. Il fait usage de toute la palette des données d'observations disponibles à l'aide des réseaux sol : données radar avancées (tri-dimensionnelles, diversité de polarisation), mosaïque européenne de données radar, produits satellite avancés (hauteur des sommets de nuage, mode Rapid Scan ...), et détection de la foudre.

Ce système a été testé lors d'une campagne d'essais en vol en août et septembre, avec deux avions. L'un, du NLR néerlandais, était équipé d'une réception à bord des prévisions d'orage, et d'un radar de bord avancé de la société RCF ; l'autre avion, l'ATR42 opéré par l'unité SAFIRE (unité mixte Météo-France, CNRS et CNES), se consacrait à des mesures *in-situ* et à un enregistrement des données de son radar de bord conventionnel.

La plus-value des produits du Wims-Cb, par rapport aux données du radar de bord des avions, tient dans la description multifacettes des orages, sur toute la hauteur de la troposphère, dans la couverture spatiale étendue des réseaux sol, et dans la prévision du déplacement des orages. Une 1^{re} étude comparative des données de bord et des données du Wims-Cb met d'ores et déjà bien en évidence la meilleure anticipation permise par la couverture étendue de ces dernières. Des analyses approfondies des données collectées seront entreprises en 2009.

17

Situation du 17 août 2004
 Comparaison des apports respectifs de la RDT
 2008 et de la future RDT 2009.



15

Accrétion de glace sur la sonde de givrage de l'ATR 42
 lors d'un vol de test du 12 août 2008.



16



17

Orages et sécurité des avions : les données du radar de bord
 de l'ATR-42 (plages de couleur verte, jaune et rouge)
 montrent la réflectivité qu'il mesure devant l'avion, dans les orages ;
 les lignes orange, quant à elles, montrent le diagnostic d'orage fourni
 par le Wims-CB à partir des données sol ; elles décrivent,
 à grande portée, des orages que le radar de bord ne peut détecter
 en raison de ses limitations de mesure. Données du 19 août 2008
 à 14h05 en région lyonnaise.

La contribution du Centre de Météorologie Radar au projet européen FLYSAFE

Dans le cadre du projet européen FLYSAFE, un effort particulier a été réalisé pour mettre au point de nouveaux produits radar pertinents pour les applications aéronautiques reposant sur les nouvelles technologies telles que l'exploration volumique, le Doppler et la polarimétrie.

Des champs 3D de vent, de réflectivité et de types d'hydrométéores ont ainsi été produits en temps-réel sur la région parisienne et introduits dans le système expert de prévision du risque givrage. De la même manière, un produit spécifique multi-couches (réflectivité maximale sur la verticale, altitude de la réflectivité maximale sur la colonne, contenu intégré en eau liquide, altitude du sommet des cellules convectives, probabilité de grêle) a été élaboré et injecté dans le système expert de prévision du risque orage. Une démonstration temps réel des systèmes experts a eu lieu à l'occasion de deux campagnes avec vols avion, l'une en hiver (février 2008) et l'autre en été (août 2008).

La contribution de Météo France en général et du Centre de Météorologie Radar en particulier au projet FLYSAFE va permettre d'aborder dans de très bonnes conditions les projets de recherche et développement envisagés dans le cadre du programme SESAR (Single European Sky ATM Research Programme).

18

Amélioration de la prévision des orages pour les deux prochaines heures

Prévoir les orages est un défi. La prévision numérique n'apporte pas, pour les échéances de prévision d'une à deux heures, une réponse suffisamment détaillée ; l'extrapolation du mouvement des orages observés (par radar, par la détection foudre) est adaptée, mais seulement pour des échéances d'environ 1/2 heure, voire une heure ; au-delà, il faut aussi prévoir l'évolution de l'intensité des orages, et d'une manière qui reste largement automatique.

Une étude a été menée en 2007 et 2008 pour mettre en relation l'évolution de cette intensité (après compensation des mouvements des orages) avec un certain nombre de paramètres décrivant plusieurs facettes de l'état de l'atmosphère qui influent sur la dynamique des orages. Il s'agit de l'instabilité qui pilote les mouvements verticaux, du soulèvement nécessaire pour déclencher cette instabilité, de la source de mouvement vertical que représente la convergence des vents de basse couche, ainsi que de divers autres ingrédients qui modulent ces facteurs.

La nouveauté de l'approche a consisté à utiliser, pour décrire ainsi l'atmosphère, le système d'analyse variationnelle VarPack à haute cadence temporelle (toutes les 15 minutes), ce qui permet de bien tirer parti du réseau d'observation de surface. Pour des raisons d'efficacité, c'est un modèle statistique que l'on convient alors d'utiliser pour prévoir l'évolution des orages.

Avec ce cadre de travail, et après un premier réglage, le succès de la prévision à 2 heures de l'intensité des orages en terrain plat est variable d'un jour sur l'autre, meilleur en situation anticyclonique, et d'un niveau qui varie de « moyen » à « bon ». Il reste à améliorer des réglages et à confronter la méthode à des nouveaux cas avant d'envisager sa mise en œuvre opérationnelle.

19

Service de suivi du risque d'orage

La Base de Données d'Expertise en Prévision Immédiate (BDEPI) vise à conjuguer l'expertise des prévisionnistes 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. En aval, elle alimente une production automatisée d'avertissements en prévision immédiate. Aujourd'hui, la BDEPI gère les orages.

Le développement de la BDEPI s'organise selon deux axes :

- la mise en opération d'une BDEPI « tout automatique » allant jusqu'à la production d'avertissement sur le risque d'orage pour démontrer la faisabilité d'un service d'avertissements utile aux clients de Météo-France aux échéances de la PI. En l'état des automatismes, le préavis est limité à 1h.

- la prise en compte de l'expertise des prévisionnistes selon les modalités les plus pragmatiques et les plus efficaces afin d'enrichir la description de l'évolution des orages au bénéfice d'une amélioration de l'anticipation, de la qualification et de la localisation des avertissements.

L'actualité 2008 de la BDEPI a été dominée par la commercialisation du service d'avertissement sous le nom de « service de suivi du risque d'orage » et l'expérimentation en temps réel dans trois DIR de l'expertise des orages et de son apport dans la production d'avertissements.

Au-delà de 2008, les objectifs sont de rendre opérationnelle l'expertise sur les orages via la BDEPI, d'améliorer la description des orages en tirant profit des progrès de notre réseau radar (3D, doppler, polarisation) et de la modélisation numérique à maille fine (Arome, VarPack), d'introduire une formulation probabiliste dans la localisation et l'intensité des avertissements et enfin d'étendre la BDEPI aux vents forts.

20

Extension du produit RDT à l'Outre-Mer

Le RDT (Rapid Developing Thunderstorm) est un produit développé par Météo-France pour être appliqué aux données des satellites géostationnaires comme MSG. Il suit et décrit l'évolution des systèmes nuageux, et identifie ceux qui sont convectifs. Ce produit trouve toute sa justification tant au début du développement des orages, que sur des régions dépourvues de couverture radar ou de réseau de détection foudre de qualité.

Le RDT a été appliqué en région tropicale pour la première fois en 2006 en Afrique, à l'occasion de la campagne AMMA. Il s'est révélé utile tant pour la planification des vols

d'expérimentation que pour l'analyse des situations météorologiques. Cette production a été pérennisée depuis.

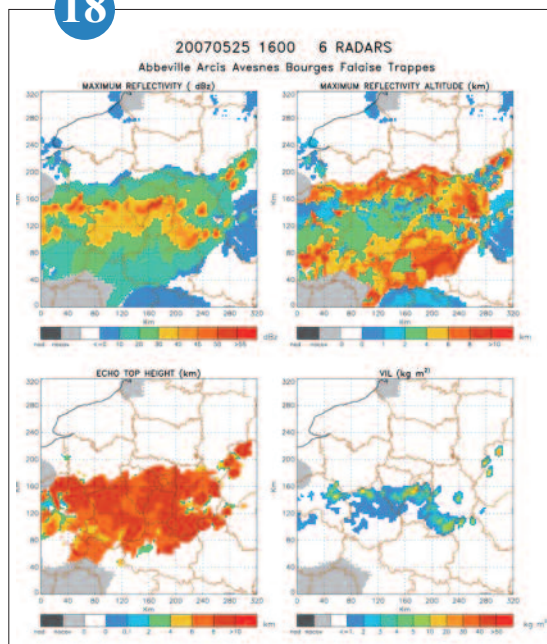
Fin 2008, une production supplémentaire a été mise en œuvre à partir du satellite américain GOES couvrant la région Antilles-Guyane. Malgré une fréquence de rafraîchissement moindre sur la zone (30' au lieu de 15'), le suivi des nuages d'orage reste performant, et apporte là aussi un élément supplémentaire pour l'analyse des situations orageuses. Ce produit sera très prochainement mis à disposition des prévisionnistes de la DIRAG sur leur poste de travail.

Parallèlement, le produit lui-même a évolué, et applique un nouveau schéma de reconnaissance des orages, plus performant.

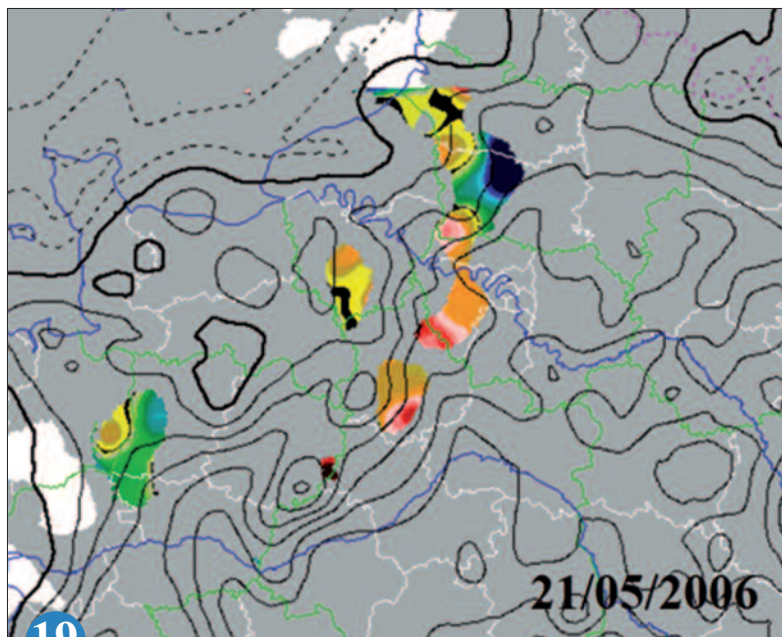
En conclusion, l'exportation du produit RDT nouvelle génération a démarré dans les départements d'outre-mer en commençant par les départements (et donc les satellites) les plus proches. Cela devrait se poursuivre dans les mois et années à venir, selon les caractéristiques des satellites disponibles, avec la couverture de l'océan Indien, puis à terme la région Pacifique.

21

18



▲ Produits dits « 2D issus de 3D » pertinents pour la navigation aérienne. De haut en bas et de gauche à droite : réflectivité maximale sur la verticale, altitude de la réflectivité maximale, altitude du sommet des échos de réflectivité, contenu intégré en eau liquide (VIL). Ces paramètres ont été produits dans FLY-SAFE à la résolution spatio-temporelle de 5 minutes et 1 km².



19

▲ Evolution de l'intensité des orages en ¼ d'heure (plages de couleurs), et une mesure de l'instabilité de l'atmosphère (isolignes noires) pour l'après-midi du 21 mai 2006 dans le nord de la France. Les couleurs chaudes représentent une intensification, les froides un affaiblissement. Les isolignes pointillées montrent une instabilité en deçà d'un certain seuil, et celles en trait plein une instabilité plus forte.

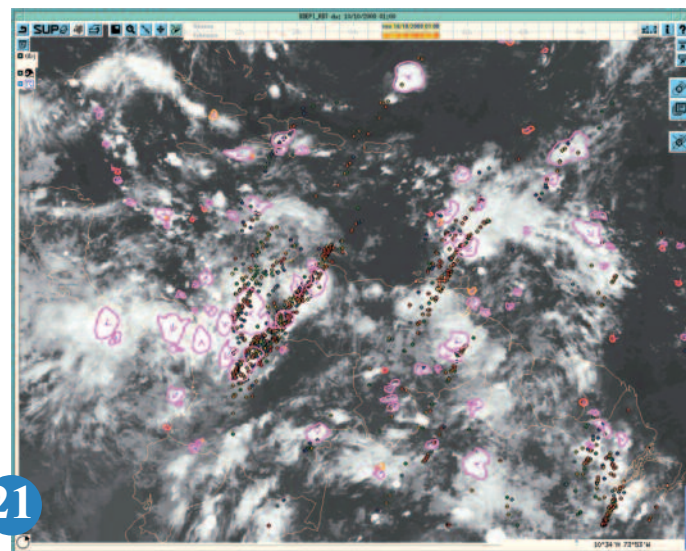


20

◀

Le service de suivi du risque d'orage combine prévisions à 24h, information vigilance, bulletins d'avertissements aux formats email et SMS, ainsi que suivi graphique pour internet et téléphones mobiles. Illustration du suivi graphique version internet sur la situation orageuse du 17 septembre 2007 qui a intéressé Toulouse en fin d'après-midi. Le produit propose des fonctions d'animation, zoom, affichage des caractéristiques de l'alerte.

► Visualisation du RDT Antilles - Guyane sur le poste de travail du prévisionniste. Superposition sur image IR GOES des contours d'orage et des impacts électriques longue distance du MetOffice anglais.



21

Prévision cyclonique

Des observations pour la prévision cyclonique : radiances nuageuses/pluvieuses et vents diffusiomètre

La description des cyclones tropicaux reste un défi majeur dans l'initialisation des modèles de prévision. Divers axes de progrès ont été envisagés : traitement des observations en zones nuageuses / pluvieuses et introduction de nouvelles observations.

L'assimilation des données de radiances est pour l'instant réalisée uniquement en conditions de ciel clair ou peu nuageux. En effet, en milieu nuageux et pluvieux, il est nécessaire d'introduire des processus physiques complexes pour exploiter la mesure. Ceci est désormais réalisé au CEPMMT et un test du potentiel de cette approche a été réalisé, à moindre coût. Pour ce faire, un contenu intégré en vapeur d'eau est estimé par une régression multilinéaire des radiances nuageuses / pluvieuses SSM/I, à partir des analyses du CEPMMT. L'assimilation 3D-Var dans ALADIN-Réunion des pseudo-observations ainsi obtenues donne des analyses de l'humidité atmosphérique plus appropriées et mieux localisées. La prévision cyclonique est améliorée tant en termes d'intensité que de structure. Les biais d'humidité sont réduits, même en ciel clair et le modèle s'accorde mieux aux mesures de vent. Ce travail constitue une étape préliminaire au développement d'un pré-traitement utilisant une physique humide dans ARPEGE/ALADIN/AROME.

Le vent de surface océanique mesuré par diffusiométrie garde une ambiguïté sur la direction, levée avec l'ébauche du modèle. La considération des 4 directions les plus probables du diffusiomètre SeaWinds (au lieu de 2) améliore la qualité de mesure (gain dans les zones météorologiquement actives), qui est similaire à celle des nouvelles données du diffusiomètre ASCAT, pour lequel deux directions seulement sont à considérer.

La combinaison de ces deux instruments avec le diffusiomètre AML (similaire à ASCAT), est le meilleur système d'observation des vents de surface océanique (1.2 m.s^{-1} en terme d'écart-type vectoriel), avec une couverture quasi-globale par 6 heures et donc avec un suivi des cyclones renforcé.

22

Vers une meilleure prise en compte de l'océan pour la prévision des cyclones

L'un des processus clés pour le développement et le cycle de vie d'un cyclone tropical est son interaction avec l'océan, qui constitue son principal réservoir d'énergie. Un élément crucial pour bien prendre en compte ces échanges de chaleur est la modélisation des flux entre l'océan et l'atmosphère. Ces flux dépendent de la température de surface de la mer (TSM), et des variables atmosphériques de basses couches.

Dans un premier temps, une nouvelle analyse de TSM à haute résolution spatiale a été testée : il s'agit du produit ODYSSEA développé dans le cadre du projet MERSEA, qui intègre des données satellitaires nombreuses et variées. Dans un second temps, une nouvelle paramétrisation des flux, nommée ECUME, a été évaluée dans le modèle Aladin-Réunion. Issue de nombreuses campagnes de mesure, cette paramétrisation est plus réaliste que la paramétrisation utilisée antérieurement. De plus, ECUME modifie de façon importante la représentation des flux pour les vents les plus forts, ce qui a un impact significatif sur la modélisation des cyclones. Vu le peu d'observations des flux en conditions cycloniques, il est difficile d'évaluer quelle paramétrisation est la meilleure. Cependant, conjointement à un réglage adéquat des paramétrisations physiques du modèle atmosphérique, ECUME améliore les prévisions des cyclones tropicaux sur le bassin Sud-Ouest de l'Océan Indien. L'étape suivante pour améliorer la représentation des interactions entre l'océan et l'atmosphère sera de coupler les modèles d'océan et d'atmosphère.

23

Sensibilité de la réponse océanique à la vitesse de déplacement du cyclone

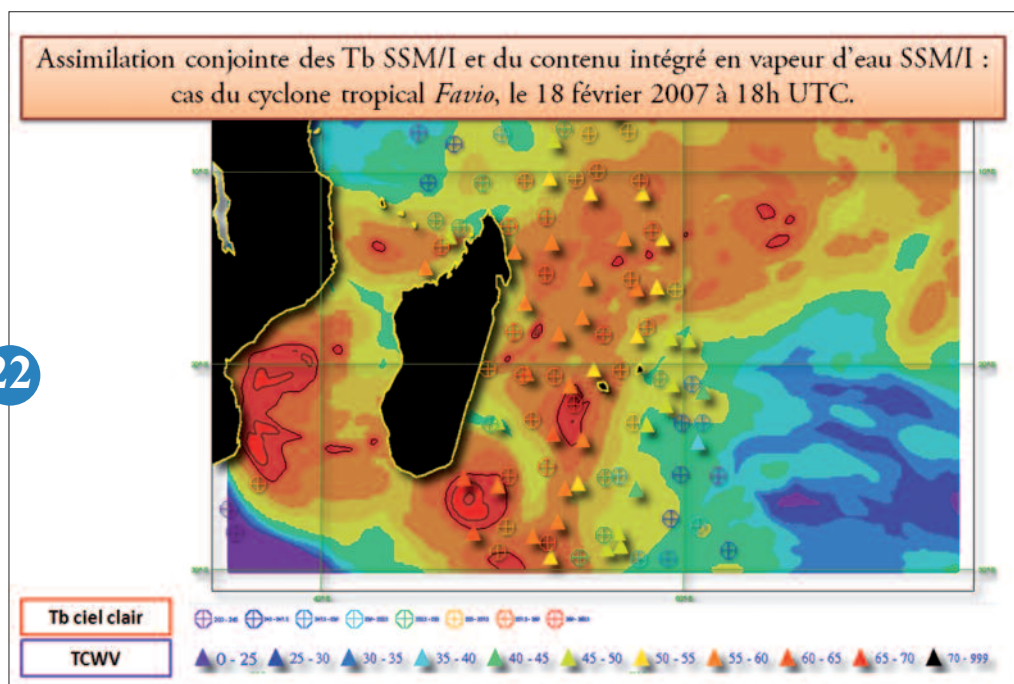
A l'heure actuelle, la plupart des modèles numériques de prévision météorologique sont purement atmosphériques et ne voient de l'océan que sa température de surface comme condition à la limite, fixée au cours du temps. Or, l'océan superficiel évolue fortement au voisinage d'un cyclone, et cela modifie, par rétroaction, la structure et l'intensité du cyclone.

La vitesse de déplacement du cyclone joue un rôle majeur sur l'océan, car d'une part, elle définit le degré d'interaction entre le cyclone et l'océan (un cyclone lent aura plus de temps pour interagir avec l'océan qu'un cyclone rapide) et d'autre part, elle engendre des processus physiques différents dans l'océan suivant sa valeur. A l'aide d'un modèle d'océan superficiel simplifié, l'effet sur l'océan de la vitesse de translation d'un cyclone tropical a été étudié. On observe que la réponse de l'océan au passage d'un cyclone est très sensible à la vitesse de déplacement de ce dernier. Suivant les trois vitesses considérées (2 m/s, 6 m/s et 10 m/s), la structure et l'intensité des courants générés par le cyclone sont très différentes. Le cyclone qui transmet le plus d'énergie à l'océan est celui dont le champ de vent évolue suivant la même échelle de temps que celle des courants océaniques ($U_h=6 \text{ m/s}$). On parle alors de phénomène de résonance entre les vents cycloniques et les courants océaniques. Cette configuration particulière aboutit à une réponse océanique plus intense, et par conséquent, à un abaissement plus accentué de la température de surface de la mer.

Les travaux à venir concernent la mise en place du couplage océan-atmosphère avec des modèles plus réalistes, afin d'évaluer son impact sur des cyclones observés.

24

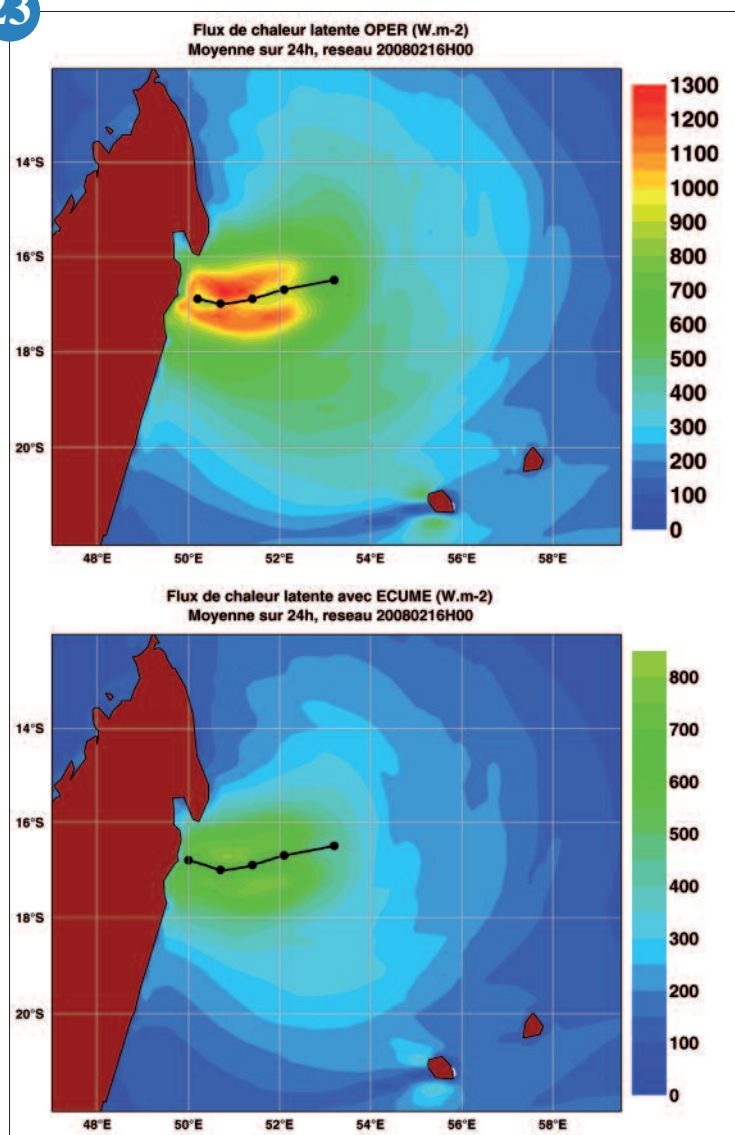
22



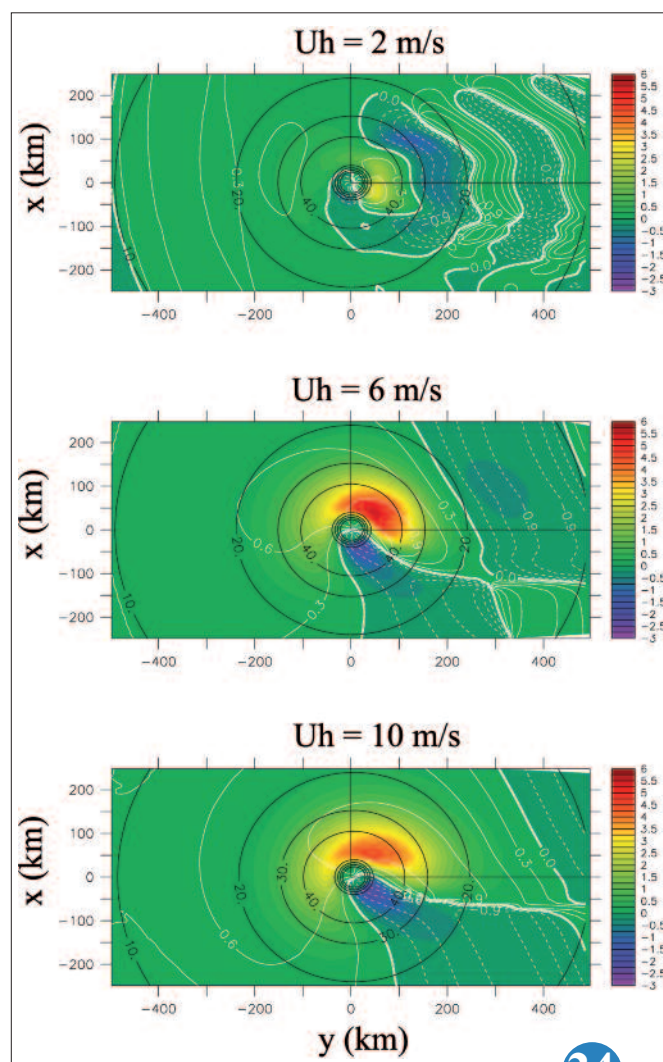
◀ Carte des observations assimilées de l'instrument SSM/I sur le domaine ALADIN-Réunion : on y présente les températures de brillance en ciel clair (rond avec une croix) et le contenu intégré en vapeur d'eau en zones nuageuses /pluvieuses (triangle) en kg/m². Le cas présenté est le réseau d'assimilation du 18 février 2007 à 18h UTC : on voit l'ajout des nouvelles données au système d'assimilation.

Flux de chaleur latente moyennés sur 24 heures, simulés par Aladin-Réunion sur le cas du cyclone Ivan (trajectoire en noir) dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien le 16 février 2008. En haut apparaissent les flux de la paramétrisation actuelle, et en bas ceux de la paramétrisation ECUME. On note de grandes différences entre les deux champs, surtout au voisinage de l'œil du cyclone.

23



Impact sur l'océan d'un cyclone se déplaçant de façon rectiligne de droite à gauche à différentes vitesses (de haut en bas : 2 m/s, 6 m/s et 10 m/s) : flux d'énergie cinétique transmis à l'océan (plages de couleur : légende à droite). Un courant océanique de 6 m/s est imposé. Le champ de vent du cyclone (contours noirs, isoligne 10 m/s) atteint 50 m/s dans le mur de l'œil. Les isolignes blanches indiquent l'alignement entre les vents du cyclone et le courant océanique (positif en trait plein, négatif en pointillé).



24

Le dépouillement et l'analyse des données collectées pendant la campagne AMMA se poursuivent. Notre compréhension de la mousson africaine progresse de manière significative, quelques exemples des résultats majeurs obtenus en 2008 sont présentés dans les articles ci-dessous.

La valorisation des données collectées dans le cadre d'AMMA

Expériences d'assimilation pendant AMMA, utilisant les observations de radiosondages et données télédétectées

Les radiosondages constituent les mesures de référence pour les modèles de prévision du temps. Cependant, ces mesures sont biaisées et doivent être corrigées. Les données supplémentaires de sondages obtenues lors de la campagne AMMA en 2006 ont été assimilées dans le système de prévision numérique ARPEGE, avec et sans une correction des données d'humidité. D'autres expériences utilisent les sondages opérationnels de l'époque ou du réseau tel qu'il était en 2005. L'impact des différents scénarios sur l'analyse et la prévision a été évalué. Les meilleurs résultats ont été ceux de l'expérience utilisant toutes les données corrigées du biais : l'analyse de l'humidité est améliorée et les erreurs de prévision des précipitations moyennes sont réduites. L'impact de l'ajout des observations de radiosondages se propage avec un impact positif sur les prévisions pour l'Europe à échéance de 2 à 3 jours (voir figure).

Bien que les données de radiosondages soient fort utiles, un complément important d'informations peut être fourni par les sondeurs satel-

litaires micro-ondes. Ces données sont plus aisément utilisées sur mer que sur terre et des développements réalisés au CNRM ont été nécessaires pour permettre leur assimilation sur continents. Des expériences d'assimilation, utilisant pour la première fois des observations d'humidité AMSU-B sur terre, ont permis de corriger un biais d'humidité sur l'Afrique de l'Ouest, de manière cohérente avec les expériences utilisant le réseau de radiosondages AMMA ainsi qu'avec les mesures d'humidité indépendantes (GPS). La mousson africaine est alors mieux organisée dans les analyses avec une zone de convergence inter-tropicale plus intense.

Ces jeux d'expériences d'assimilation ont prouvé que des données supplémentaires sur le continent Africain, qu'elles soient conventionnelles ou satellitaires, si elles sont bien traitées, peuvent aider à mieux décrire et prévoir la mousson. L'impact positif peut également se propager lors de la prévision et atteindre l'Europe après quelques jours.

1

Etude de la situation des 25-26 juillet 2006

Pendant la campagne de mesure AMMA, la première poussée du flux de mousson de la saison atteint la région du Sahel les 25 et 26 juillet 2006. Une simulation de ce cas réel a été réalisée avec le modèle Meso-NH afin d'étudier le type de convection et ses interactions à différentes échelles spatiales. Une intense activité des ondes d'Est a également caractérisé cette période. Les observations des radar Doppler du MIT et UHF basés à Niamey ont permis d'identifier les rétroactions entre la convection et l'onde d'Est.

Les pluies et le vent méridien à 700hPa sont considérés comme les marqueurs respectifs de la convection et de l'onde d'Est (voir figure).

Les deux systèmes convectifs propagatifs se sont développés à l'avant et dans le thalweg de l'onde. Une convection locale autour de Niamey et une phase de suppression dans la dorsale de l'onde ont succédé au passage des

systèmes propagatifs. La simulation Meso-NH reproduit correctement spatialement et temporellement ces différentes phases de convection. Seul le premier système, absent de l'instant initial, n'est pas représenté.

La forte rétroaction onde-convection est simulée mais surestimée dans le modèle à 5km de résolution horizontale où la convection est explicitement résolue. Cette surestimation est renforcée dans le modèle à 10km de résolution horizontale où la convection profonde est paramétrisée. Ceci induit de trop fortes précipitations (à l'Est du 16° E et à l'Ouest du 2°W).

Pour améliorer les simulations de cas d'étude dans cette région d'Afrique, deux axes de progrès sont à envisager : d'une part une meilleure représentation des systèmes convectifs à l'instant initial issu de l'assimilation, d'autre part une amélioration des schémas de convection autorisant ainsi les descentes d'échelles.

2

Le programme ECOCLIMAP-II : une nouvelle classification

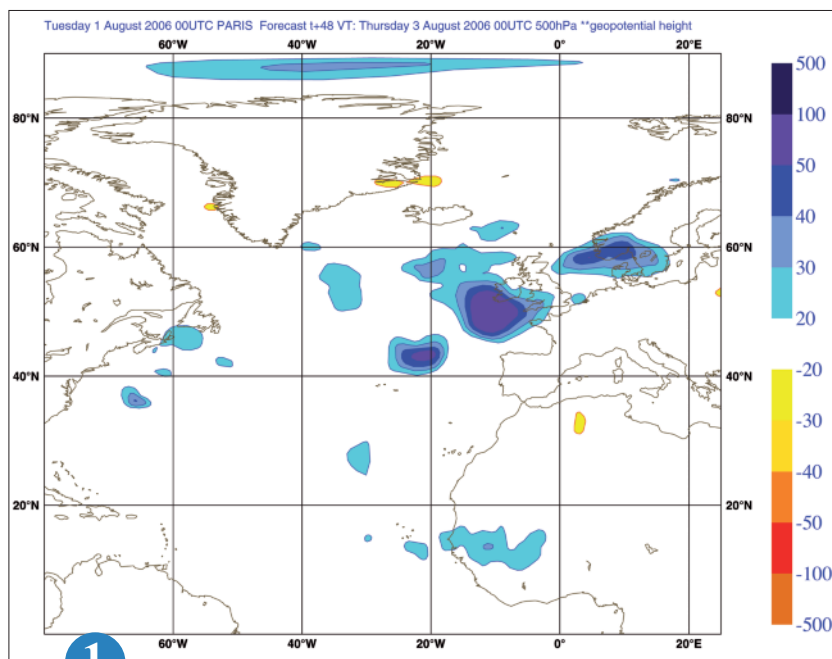
des surfaces à 1 km sur l'Afrique de l'Ouest dans le cadre du projet AMMA

Le programme ECOCLIMAP est constitué à la fois d'une carte d'occupation des sols et d'une base de données de paramètres de surface dérivée de la classification à partir de tables de correspondance.

Une nouvelle classification de la végétation en écosystèmes fonctionnellement homogènes a été réalisée pour l'Afrique de l'Ouest pour le projet AMMA. Les classifications initiales à 1 km de GLC2000 (Global Land Cover 2000) et ECOCLIMAP-I ont été éclatées selon une méthode de classification supervisée portant sur 8 ans (2000 à 2007) d'analyse de données MODIS et SPOT/VEGETATION. On tient aussi compte de critères de décision tels les facteurs climatiques, la topographie et les pratiques agricoles. La qualité du produit à 37 classes a été vérifiée à partir de classifications à 20 m de SPOT. Les classes ECOCLIMAP-II sont ensuite désagrégées en fractions de types de végétation d'ISBA. Ce processus de désagrégation s'appuie sur l'identification des pixels purs de végétation correspondant au type d'ISBA à la résolution de 1km. La variable d'agrégation étudiée est l'indice foliaire car celui-ci est moins contaminé par l'effet de sol que l'indice de végétation. L'indice foliaire, l'albédo et la fraction de végétation sont les variables biophysiques de surface les plus pertinentes d'ECOCLIMAP. Dans cette nouvelle version, elles sont déduites de la combinaison des produits à 1 km de MODIS et SPOT/VEGETATION. On note peu de variabilité inter-annuelle de l'indice foliaire pour les classes d'intérêt (savane arborée, couverts herbeux) et un peu plus pour les forêts tropicales.

Ce travail va se poursuivre avec la réalisation de cas tests dans SURFEX afin d'évaluer l'impact de la nouvelle base de données ECOCLIMAP.

3

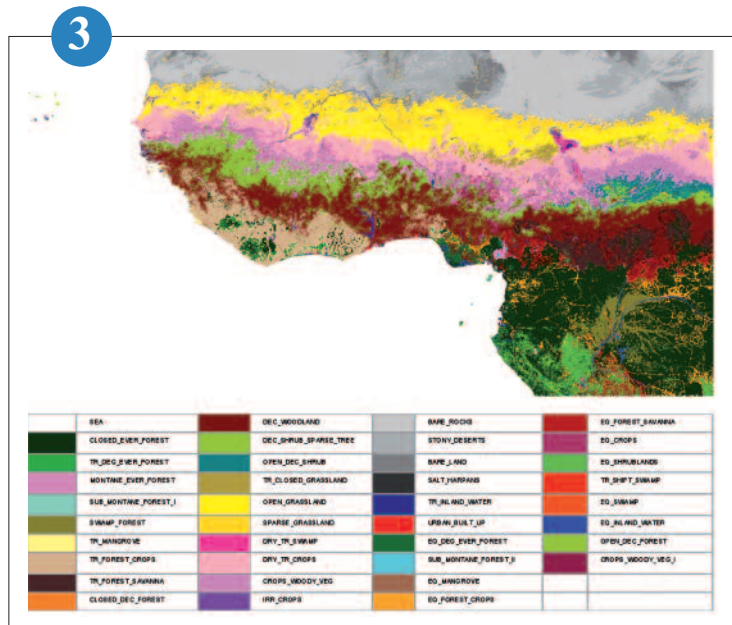
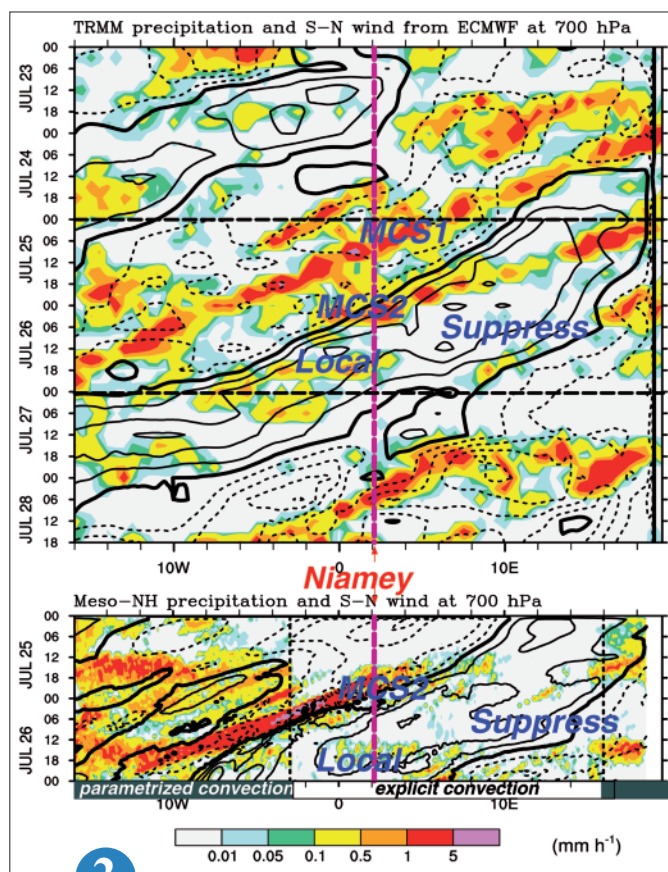


Différences entre les écarts-quadratiques moyens d'erreurs de prévision à deux jours pour l'expérience utilisant les données AMMA corrigées du biais d'humidité et celle utilisant les données du réseau tel qu'il existait en 2005. Les erreurs sont calculées sur la période 1^{er} août-14 septembre 2006, pour le géopotentiel à 500hPa, à échéance de deux jours de prévision. Les couleurs bleues indiquent une amélioration de la prévision apportée par les données AMMA.

(haut) Diagramme Hövmuller des précipitations (3h) estimées par TRMM(3B42) et du vent méridien à 700hPa issu des analyses ECMWF (6h) du 23 au 28 juillet ;

(bas) diagramme Hövmuller des précipitations instantanées et du vent méridien à 700hPa simulés par Meso-NH pour les 25 et 26 juillet. Pour les deux figures, les plages colorées représentent les précipitations et les isocontours (tous les 2m/s, traits pleins pour les vents venant de Nord et traits pointillés pour les vents venant de Sud).

Les données ont été moyennées sur les latitudes 10N à 15N. Le trait vertical rose représente la longitude de Niamey. Les traits noirs pointillés représentent la période simulée (haut), les limites latérales du domaine 2 de Meso-NH (bas).



◀ Carte d'occupation ECOCLIMAP-II sur l'Afrique de l'Ouest avec 37 classes.

Études conduites dans le cadre d'AMMA

Une méthode d'évaluation des schémas de paramétrisation sur l'Afrique de l'Ouest

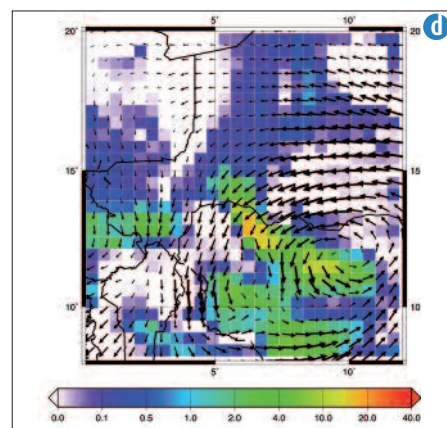
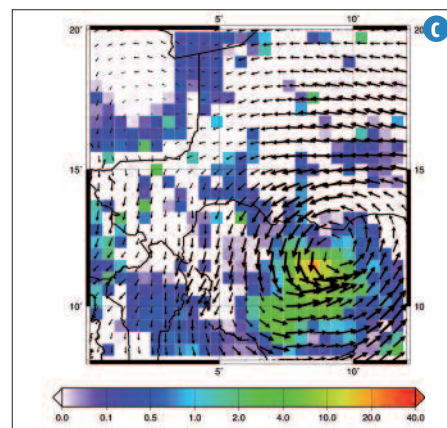
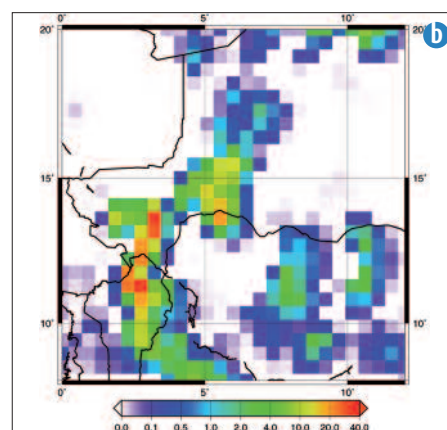
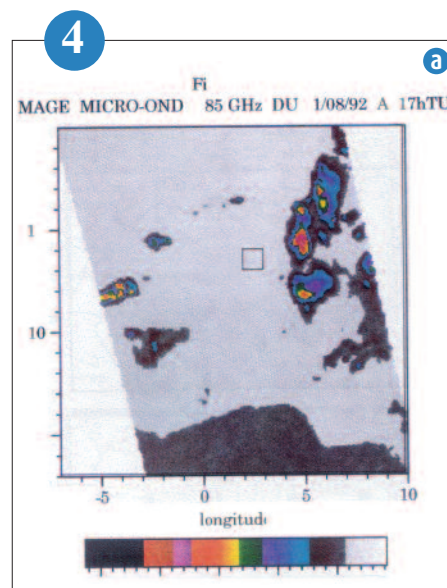
L'objectif des schémas de paramétrisation de la convection et de la turbulence utilisés dans les modèles de circulation générale est de représenter l'effet moyen de ces processus physiques sur une maille du modèle. Le comportement des schémas actuellement disponibles dans ARPEGE-CLIMAT V5 est évalué en comparant deux types de simulations sur l'Afrique de l'Ouest : des simulations réalisées avec le modèle MésO-NH 5km dans lesquelles la convection est représentée de manière explicite (simulation de référence), et des simulations réalisées avec le modèle à aire limitée ALADIN-CLIMAT dans lesquelles la convection est paramétrisée. Les deux types de simulation utilisent le même domaine, les mêmes conditions initiales et latérales.

Le cas simulé est celui d'une ligne de grains observée sur le Niger, le 21-08-1992, au cours de la campagne HAPEx-SAHÉL. Différents tests de sensibilité ont été réalisés : paramétrisations physiques utilisées, résolutions verticale (31 niveaux et 46 niveaux) et horizontale (300, 125, 50 et 10 km). Pour comparer de façon objective ces paramétrisations, les précipitations issues de MésO-NH

ont été moyennées sur la maille du modèle de plus grande échelle. La maille de 300 km n'est pas suffisante pour simuler le système convectif et son interaction avec l'onde d'est, quelle que soit la physique employée. Les résultats obtenus avec une résolution horizontale plus forte mettent en évidence l'intérêt du schéma de convection utilisant la CAPE (l'autre schéma utilise la convergence d'humidité) dans sa condition de fermeture (expression du contrôle de l'intensité de la convection par la grande échelle) : le champ de précipitations simulé à 17 h, avec une résolution horizontale de 50 km, est en meilleur accord avec les observations et avec le champ de référence simulé par MésO-NH en termes de structure spatiale et de positionnement par rapport à la circulation cyclonique de moyenne troposphère (vents à 700 hPa) ; la dynamique de grande échelle étant elle-même mieux simulée en retour. Ces résultats sont confirmés aux résolutions de 125 et 10 km.

Cette méthodologie sera appliquée à des cas issus de l'expérience AMMA de l'été 2006 sur l'Afrique de l'Ouest.

4



Effets des poussières désertiques sur les conditions météorologiques régionales en Afrique de l'Ouest avec le modèle de fine échelle AROME

Les aérosols sont des agents cruciaux de changement climatique, même si, par contraste avec le forçage radiatif attribué aux gaz à effet de serre, les incertitudes concernant leur impact sur le bilan radiatif terrestre restent très grandes.

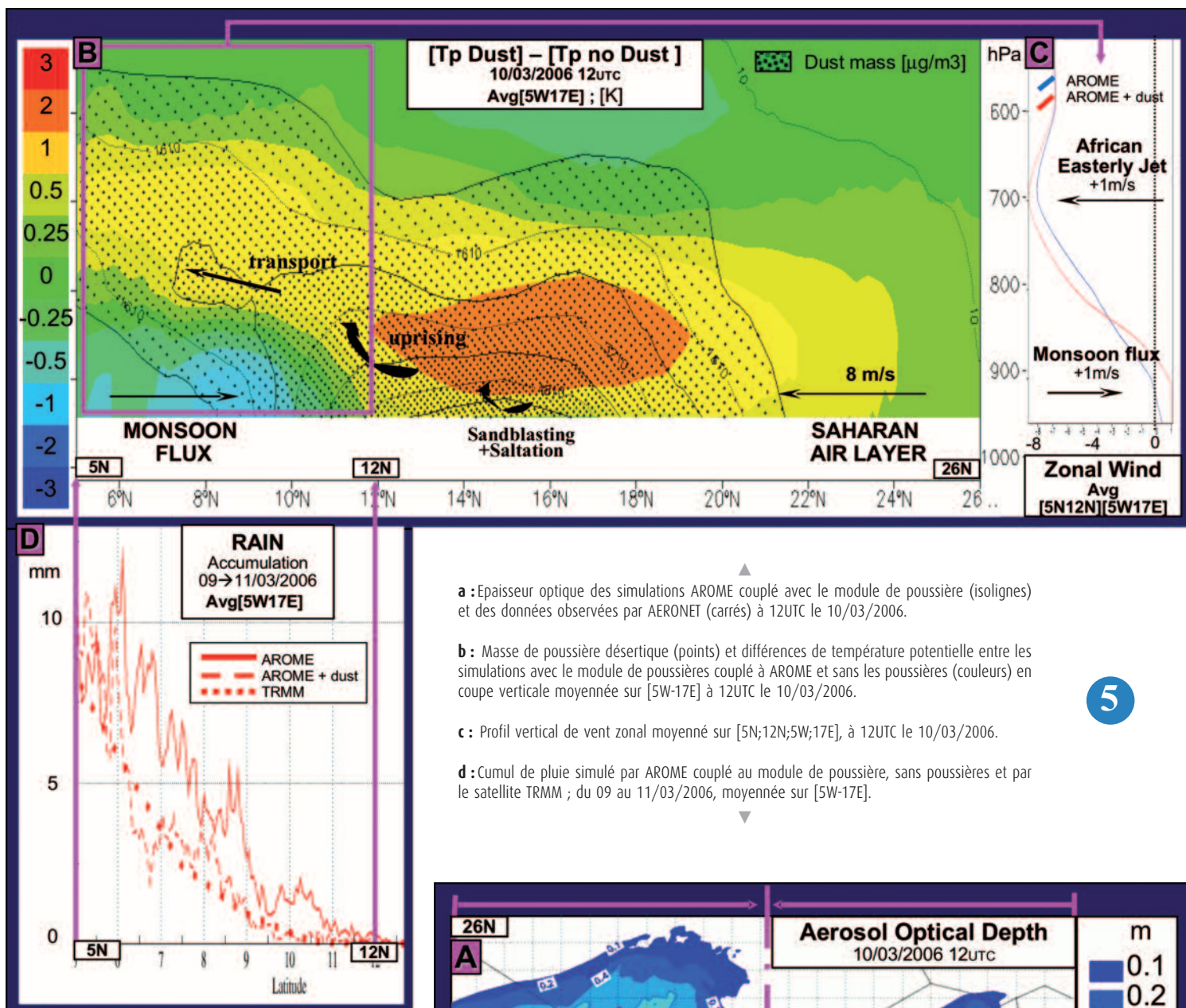
L'Afrique est la plus grande source de poussières au monde. La variabilité de la mousson africaine, rendant sa prévisibilité difficile et affectant les ressources en eau, est principalement reliée à la convection qui entretient des interactions significatives avec la surface et les aérosols. Il est avéré que les paramétrisations des modèles de prévision numérique globaux ne sont pas suffisantes pour prévoir ce phénomène clé. Une meilleure compréhension de ces rétroactions est l'un des buts de la campagne AMMA.

Grâce à sa haute résolution et son efficacité numérique, le modèle de méso-échelle AROME couplé avec le module de poussières récemment développé, initialement dans le modèle de recherche MésO-NH, permet la résolution explicite de la convection mais

aussi la simulation des flux de surface, du soulèvement, du transport atmosphérique, du lessivage et de la sédimentation des poussières.

En effet, le cycle de vie et la distribution horizontale et verticale des poussières désertiques est bien représenté (voir figure a de la distribution horizontale de l'épaisseur optique des aérosols et b de la distribution verticale de la masse de poussière). A travers l'absorption et la dispersion des longueurs d'ondes courtes et longues du rayonnement, les aérosols minéraux impactent la structure verticale de l'atmosphère et par conséquent, modifient les bilans d'énergie locaux et le développement de la convection (voir figure b de différence de température potentielle, c du vent zonal et d de la quantité de pluie). Des études sur d'autres situations pendant la mousson africaine vont maintenant pouvoir être entreprises, elles permettront de mieux comprendre comment les poussières interagissent avec la convection et affectent sa prédictibilité.

5



a : Epaisseur optique des simulations AROME couplé avec le module de poussière (isolignes) et des données observées par AERONET (carrés) à 12UTC le 10/03/2006.

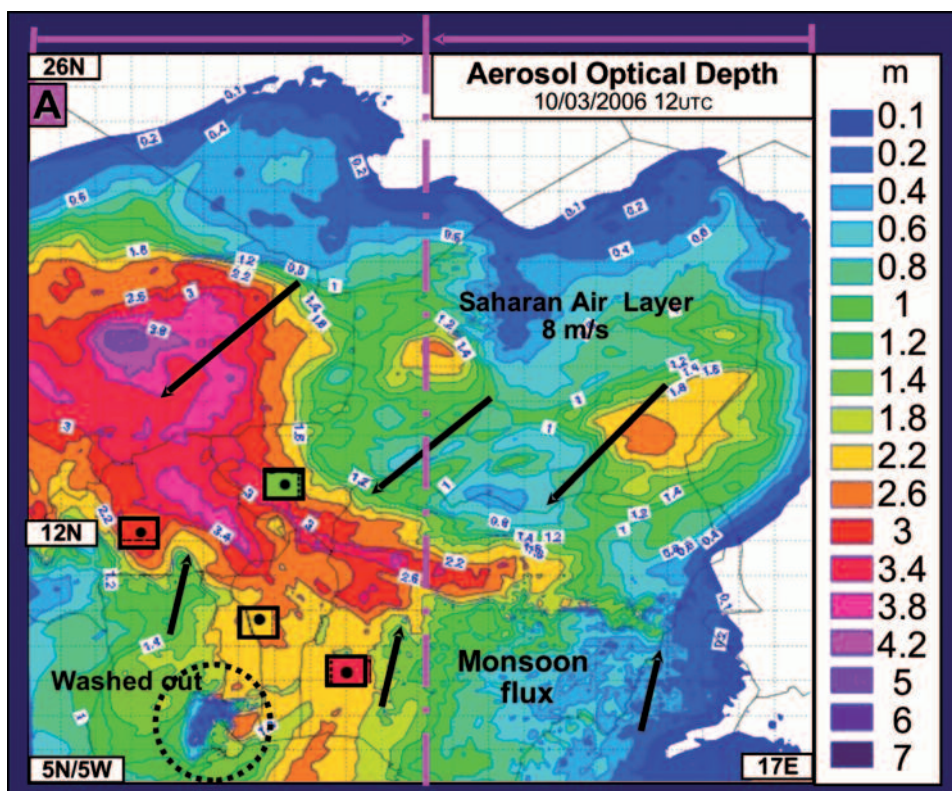
b : Masse de poussière désertique (points) et différences de température potentielle entre les simulations avec le module de poussières couplé à AROME et sans les poussières (couleurs) en coupe verticale moyennée sur [5W-17E] à 12UTC le 10/03/2006.

c : Profil vertical de vent zonal moyenné sur [5N;12N;5W;17E], à 12UTC le 10/03/2006.

d : Cumul de pluie simulé par AROME couplé au module de poussière, sans poussières et par le satellite TRMM ; du 09 au 11/03/2006, moyennée sur [5W-17E].

5

Température de brillance micro-onde à 17h, comme proxy de la précipitation observée (a), précipitations et vents à 700 hPa, à 17h, issus de la simulation MésO-NH (b), des simulations ALADIN-CLIMAT avec le schéma de convection en convergence d'humidité (c) et en CAPE (d).



Cycle saisonnier du bilan énergétique de la surface au Sahel

Les flux énergétiques en surface exercent un contrôle majeur sur les basses couches atmosphériques et jouent un rôle crucial au sein de la mousson africaine. La campagne AMMA a fourni des mesures de ces flux mal connus. La figure (a) montre que le flux radiatif net, R_{net} , qui pilote la somme des flux de chaleur et d'humidité, présente une dynamique saisonnière remarquable au Sahel. Ce flux, minimal en hiver, voit son intensité multipliée par quatre au cœur de la mousson, en août. De telles fluctuations comptent parmi les plus importantes observées sur les zones continentales. Elles ne s'expliquent pas simplement par les variations saisonnières de l'ensoleillement ou de l'albédo. Les quatre composantes du flux radiatif participent à cette dynamique (figure b), et chacune possède un cycle saisonnier distinct. Ainsi, le flux solaire incident décroît fortement avant l'arrivée des pluies de mousson lorsque l'atmosphère est très chargée en aérosols et augmente ensuite bien que l'enneuagement atteigne alors son maximum annuel. De même le flux infra-rouge incident est maximum avant les pluies, alors que l'atmosphère est plus sèche et plus chaude qu'en août. Ces fluctuations, non intuitives, se compensent en partie pendant la mousson et ne contribuent donc pas à l'augmentation de R_{net} . C'est la diminution des flux émis et réfléchis à la surface qui permet d'en rendre compte (figure c), via la chute de l'albédo due à la croissance de la végétation, mais aussi via un très fort refroidissement du sol en réponse aux pluies.

Ces observations révèlent un bilan énergétique complexe, où le cycle de l'eau joue un grand rôle. Cette spécificité climatique des zones continentales semi-arides représente pour les modèles un défi à relever dans les années futures.

6

Variabilité intrasaisonnière de la dépression thermique saharienne : un lien entre les moyennes latitudes et la mousson africaine

Dans le cadre du projet AMMA, un intérêt particulier s'est porté sur la dépression thermique saharienne (Heat Low), afin de mieux comprendre le rôle et la variabilité de cet acteur majeur de la mousson africaine qui pilote en partie l'apport d'humidité sur les régions soudanaises et sahéliennes pendant la saison d'été.

A l'aide d'une analyse en composantes principales complexes appliquée sur la température des réanalyses NCEP et CEPMMT, un mode robuste de variabilité de la dépression thermique a été identifié et étudié. D'échelle temporelle entre 12 et 30 jours, ce mode met en évidence un dipôle Est-Ouest, opposant une phase où la dépression s'étend à l'Est du continent et une autre où elle est plus localisée à l'Ouest.

Une approche composite a permis de retracer son évolution et de déterminer son origine et son impact sur la mousson. Des ondes de type Rossby (figure a) modifient la dynamique des latitudes moyennes sur toute la hauteur de la troposphère, perturbant les advections de température et d'humidité sur les frontières de la dépression, et donc sa dynamique. En aval, un renforcement de la convection apparaît sur le Sahel à l'Est du lac Tchad, se propage vers l'Ouest à une vitesse proche de celle des ondes d'est africaines, jusqu'au milieu de l'Atlantique, y suggérant un impact possible sur l'activité cyclonique (voir figure b).

Ce lien entre le Heat Low et les latitudes moyennes peut permettre d'améliorer la prévisibilité de la mousson africaine. Pour cela, il est encore nécessaire d'explorer les mécanismes à l'œuvre dans ce mode de variabilité, et d'en évaluer la représentation dans les modèles globaux.

7

Exercice AMMA d'évaluation des modèles de chimie-transport globaux

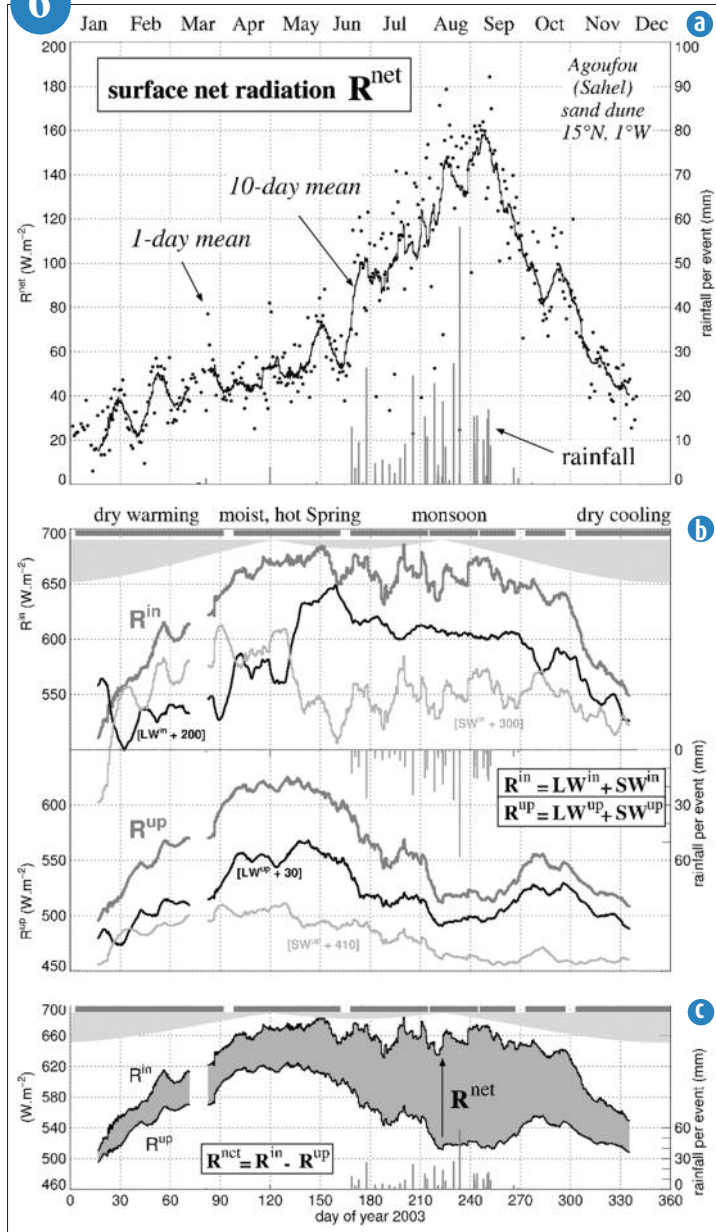
Dans le cadre d'AMMA, plusieurs groupes internationaux ont organisé un exercice d'intercomparaison de modèles de chimie-transport. Des simulations annuelles ont été menées, en se basant sur des inventaires d'émissions communs. Les résultats des modèles ont été d'une part confrontés les uns aux autres et d'autre part comparés aux données des Périodes d'Observations Spéciales de 2006.

Le modèle MOCAGE a participé à cet exercice, en utilisant une configuration incluant un zoom à 0.5° de résolution horizontale (résolution encore aujourd'hui hors de portée pour des modèles chimiques globaux) sur le continent africain, et une chimie complète strato-troposphérique. Plusieurs composés chimiques ont été considérés dans cette étude, en particulier l'ozone (polluant secondaire) et le monoxyde de carbone (polluant primaire), tous deux d'intérêt pour estimer l'impact planétaire des feux de biomasse. A grande échelle, MOCAGE présente une bonne stabilité et les cycles annuels sont reproduits de façon satisfaisante ; le cycle annuel de l'ozone en une station de mesure au sol (Nangatchori, Bénin) instrumentée pendant AMMA est ainsi remarquablement bien simulé. A échelle plus fine, les résultats du modèle ont été comparés à des observations in situ effectuées par radiosondage et par les avions instrumentés. Ces observations ont mis en évidence une forte variabilité spatio-temporelle de la composition chimique, et la capacité de MOCAGE à la reproduire est illustrée sur la figure.

Cette étude sera prolongée par l'analyse fine des échanges chimiques entre la zone Afrique et le reste du globe, notamment par le calcul de bilans détaillés incluant les termes de production (émissions, chimie), de destruction (chimie, dépôts) et de transport (advection et convection-turbulence).

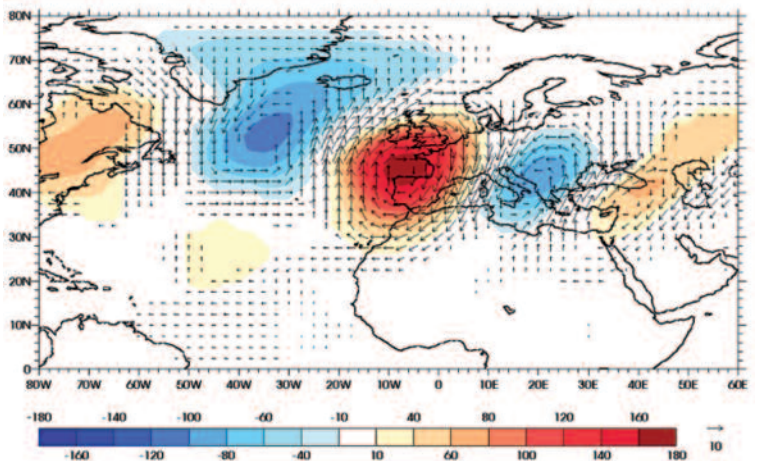
8

6

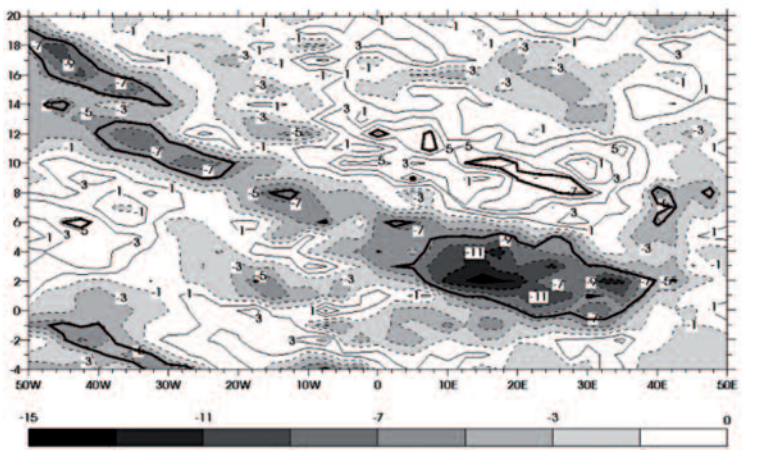


▲ Série temporelle sur une année à Agoufou au Sahel des flux radiatifs mesurés à la surface : (a) net, (b) composantes infra-rouge et solaire et (c) somme des flux montants et descendants.

a HGT, WIND at 200hPa - HLW minus HLE at lag -2 days



b OLR [12.5N-17.5N] - HLW minus HLE

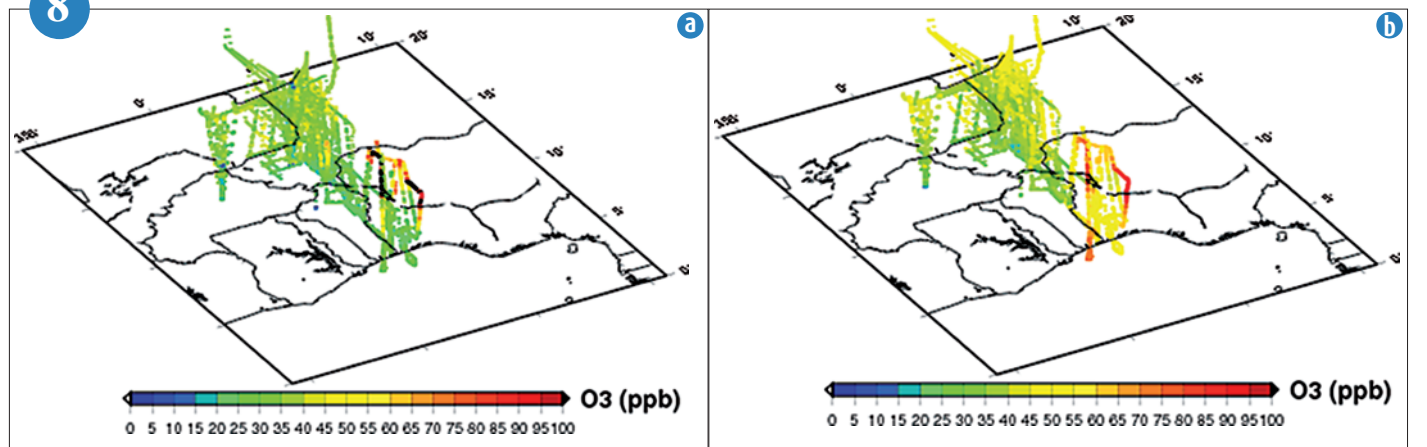


7

▲ Analyse composite pour la période 1979-2007 obtenue avec la réanalyse NCEP. On a représenté le champ moyen correspondant aux phases Ouest du mode par rapport aux phases Est. a) Composite du géopotentiel en m (couleurs) et du vent (flèches) à 200 hPa, 2 jours avant la phase Ouest. b) Composite de l'OLR en W/m². L'axe vertical est en jour et le zéro correspond à la date où le mode est dans sa phase Ouest. Seules les parties entourées d'un liseré noir sont significatives à 95% (test de Student).

- a : Rapports de mélange d'ozone (ppb) mesurés par les avions instrumentés au cours de la Période d'Observation Spéciale AMMA d'août 2006 (adapté de Janicot et al, 2008)
b : Aux points d'observation des avions, valeurs modélisées avec MOCAGE.

8



Phénomènes météorologiques

L'étude des processus atmosphériques est indispensable à l'amélioration de la compréhension des phénomènes météorologiques et climatiques. L'année 2008 a été marquée par de nouvelles avancées sur la cyclogénèse, et par des résultats originaux sur le déferlement des ondes de relief.

Cyclogénèse et prévisibilité

Modélisation des fonctions de structures ensemblistes à l'aide d'un opérateur de diffusion hétérogène

Les fonctions de structures correspondent aux fonctions de covariance d'erreur de prévision. Leur rôle est fondamental dans les algorithmes d'assimilation de données tels que ceux utilisés dans les grands centres de prévision numérique car, en particulier, ce sont ces fonctions qui propagent l'information issue des observations. Ces fonctions ont une variabilité spatio-temporelle complexe avec une forte dépendance à la situation météorologique.

L'estimation des fonctions de structures peut être effectuée à l'aide d'une méthode d'ensemble, par exemple un ensemble de prévisions perturbées issues d'un ensemble d'assimilations. Cependant la taille de la matrice nécessaire à une représentation explicite des fonctions de structure est bien trop grande pour être stockée directement en mémoire d'un super-calculateur. Une manière de résoudre ce problème est de modéliser ces fonctions de structures. Entre autre, il est possible d'utiliser un opérateur de diffusion. En effet, il est connu que la solution d'une équation de diffu-

sion avec un état initial concentré en un point, sur la droite réelle, est une Gaussienne. Or ce type de fonction est un premier modèle pour approcher les fonctions de structures. La difficulté est alors de déterminer le coefficient de diffusion ; plus généralement on cherche à estimer le tenseur de diffusion local. Cette difficulté a été résolue récemment en estimant le tenseur de diffusion local directement à partir d'un ensemble.

Cette technique a été testée avec succès pour la modélisation de la composante horizontale des fonctions de corrélation d'erreur de prévision dans le modèle de chimie atmosphérique global MOCAGE-PALM (voir figure). Ce travail a été mené en collaboration avec des chercheurs du CERFACS. Cette technique a également été mise en œuvre pour modéliser l'incertitude liée au transport dans le problème d'estimation des flux de CO₂ à mésoéchelle. L'estimation des tenseurs de diffusion locaux a été réalisée à partir de l'ensemble fourni par la PEARP.

1

Adjonction de la dimension temporelle pour une extraction de structures cohérentes dans des champs météorologiques de grande échelle

Aux échelles synoptiques, la dynamique des dépressions peut être décrite par un unique champ « le tourbillon potentiel » à partir duquel on peut retrouver le vent, le géopotentiel et la pression de surface notamment.

Il est généralement admis que deux niveaux sont particulièrement pertinents pour analyser une situation météorologique : un niveau proche du sommet de la couche limite atmosphérique et la tropopause. La méthode mise en place consiste à détecter et extraire de ces deux champs des structures cohérentes ou anomalies à partir d'une description très réduite dans une base d'ondelettes, base dont la position et l'orientation dépendent de la localisation et de la forme de l'objet détecté. Toutes choses égales par ailleurs, notamment le nombre et le choix des ondelettes de base entrant dans la définition de la structure extraite, l'adaptation de la base est très bénéfique. Ainsi, l'anisotropie et l'orientation de la structure sont nettement plus réalistes.

Un algorithme de suivi temporel est ensuite mis en œuvre pour connaître l'histoire de ces structures : quand sont-elles apparues ? d'où viennent-elles ? quel a été leur environnement ? Bien que ce suivi n'utilise que l'information liée à la localisation et à l'amplitude des structures extraites ainsi que le vent, on obtient ainsi un jeu satisfaisant de trajectoires, dont certaines parcourent plus de dix mille kilomètres en ce qui concerne les anomalies de tropopause.

2

Influence du déferlement des ondes de Rossby sur l'Oscillation Nord Atlantique

Les courants-jet de la haute troposphère sont généralement maximum à l'ouest des bassins océaniques, là où les contrastes thermiques terre-océan sont forts. Plus à l'est, les dépressions gagnent en énergie et rétroagissent sur le courant-jet qui leur a donné naissance. Cette rétroaction se fait par l'intermédiaire du déferlement des ondes de Rossby dans la haute troposphère et joue un rôle déterminant dans la variabilité basse fréquence de l'atmosphère comme l'Oscillation Nord Atlantique (NAO). Deux types de déferlement existent ; le déferlement cyclonique qui pousse le jet vers le sud et qui est associé à la phase négative de la NAO tandis que le déferlement anticyclonique le déplace vers le nord et favorise l'apparition de la phase positive.

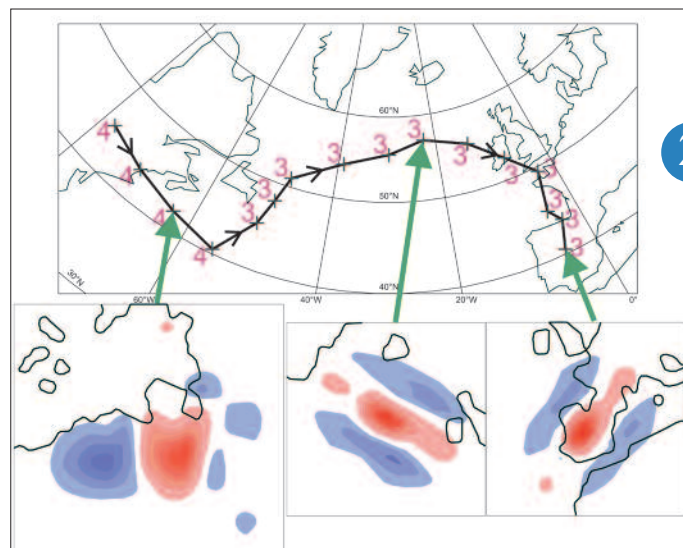
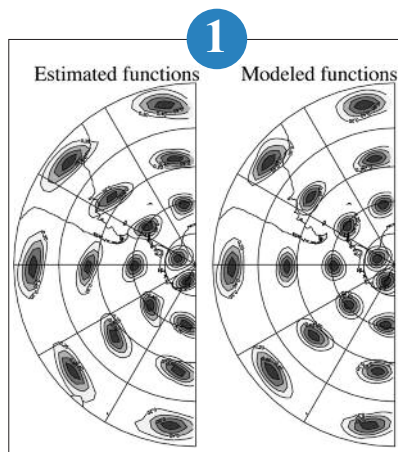
Les résultats de deux simulations utilisant un modèle sans topographie et sans humidité

sont montrés sur la figure, une reproduisant le processus de la phase négative de la NAO (colonne de gauche) et l'autre celui de la phase positive (colonne de droite). Dans le premier cas, le gradient de température est maximum à 30°N et aboutit à un déferlement en aval presque systématiquement cyclonique, le jet est orienté zonalement et est maintenu au sud par le déferlement. Dans le second cas, le gradient de température a été placé à 45°N, le déferlement y est anticyclonique, le jet principal a une orientation sud-ouest nord-est et est fortement poussé au nord là où les dépressions atteignent leur maximum d'amplitude et rétroagissent le plus fortement.

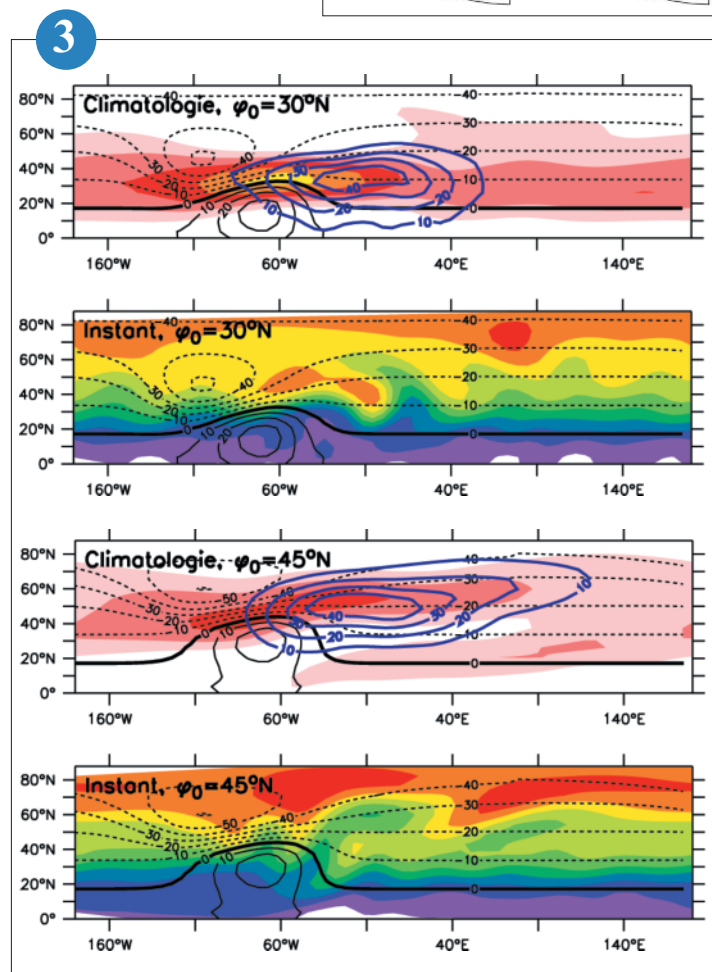
A l'avenir, ce type de résultat pourrait permettre de mieux comprendre le rôle des anomalies de température à la surface de l'océan dans la circulation atmosphérique.

3

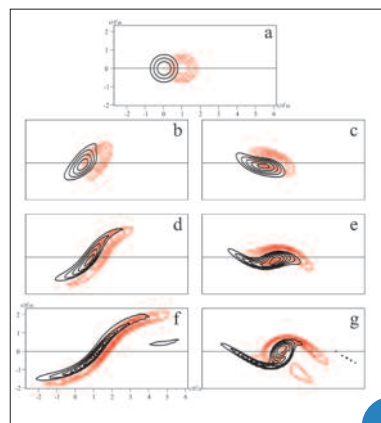
À gauche les fonctions de corrélation horizontale d'erreur de prévision d'ozone, estimées à partir d'un ensemble sur une période d'un mois (durant l'hiver Austral). À droite les fonctions de corrélation modélisées en utilisant un opérateur de diffusion dont les tenseurs locaux ont été estimés directement à l'aide du même ensemble que précédemment.



La figure du haut représente la trajectoire d'une structure suivie entre le 03 janvier 1989 à 06UTC et le 07 à 00UTC sur le champ de tourbillon potentiel à 315K issu de la réanalyse ERA-Interim. Le nombre apparaissant à côté des positions successives correspond à l'échelle d'ondelette à laquelle la structure a été extraite (plus ce nombre est élevé et plus la structure est de grande taille). Les figurines du bas illustrent l'extraction de structure à divers instants (intervalle : 0,5PVU, valeurs positives en plages rouges, négatives en bleu)



Comparaison entre deux simulations d'un modèle aux équations primitives sur la sphère en version sèche et aquaplanète dont on relaxe le champ de température vers un champ donné analytiquement. Celui-ci est constitué d'une anomalie froide (traits tiretés en noir, intervalle 10°C) au nord-ouest d'une anomalie chaude (traits pleins en noir) pour reproduire le contraste thermique terre-océan en hiver. Les deux simulations diffèrent uniquement par la latitude du gradient de température, 30°N (colonne de gauche) et 45°N (colonne de droite). En haut, les contours bleus et les plages colorées en rouge représentent respectivement les moyennes temporelles de l'énergie cinétique haute fréquence (intervalle : 10 m²/s²) et du vent zonal (intervalle : 10 m/s) à 200hPa. En bas, les plages colorées montrent la vorticité absolue à 200 hPa à un instant donné; à gauche, on reconnaît le déferlement cyclonique, et à droite, le déferlement anticyclonique.



Évolution dans un modèle baroclinique simple à deux couches (à t=0h, 12h, 24h, 36h de haut en bas) des anomalies de vorticité dans la couche du haut (traits noirs continus) et dans la couche du bas (tiretés rouges) (intervalle : $2 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) dans un cisaillement vertical ($2,4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) et horizontal (de valeur absolue égale à $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ dans la couche du haut et $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ dans celle du bas). Figurines de gauche (resp. de droite) : cisaillement anticyclonique (resp. cyclonique).

Vers une meilleure compréhension de la croissance rapide de la cyclogénèse lors de la traversée du jet

La dynamique de certains scénarios de croissance soudaine de dépressions à la croisée du courant-jet reste une question centrale ouverte de la météorologie dynamique. Des simulations à l'aide de modèles hautement idéalisés ont permis de préciser certains aspects jusqu'à présent peu étudiés ou mal connus. L'accent a ici porté sur l'interaction entre une anomalie d'altitude et une dépression de surface dans différents jets rectilignes zonaux possédant à la fois un cisaillement de vent vertical et horizontal. On a pu mettre en avant le fait

que dans un cisaillement anticyclonique, que l'on observe dans la partie sud des courants-jets, là où se situent de manière privilégiée les futures tempêtes, les anomalies de surface et d'altitude s'étiraient fortement mais restaient bien phasées, emmagasinant ainsi de l'énergie par interaction barocline. Au contraire, dans un cisaillement cyclonique, la rotation de l'environnement s'additionne à la rotation des structures de sorte que les deux anomalies restent relativement isotropes et ont tendance à s'enrouler l'une autour de l'autre, et donc à ne pas

conserver un déphasage vertical favorable à une forte croissance énergétique. Par ailleurs, il a été montré que le gradient méridien de tourbillon potentiel lié au courant-jet jouait un rôle majeur dans le déplacement vers le nord des perturbations, à l'instar de ce qui peut se produire dans des cadres différents comme les cyclones tropicaux ou les tourbillons océaniques. Ces mécanismes sont deux éléments constituant d'une explication de la croissance des dépressions à la traversée du courant-jet.

Phénomènes de méso-échelle

Tests de modélisation de systèmes grêligènes

Le schéma de microphysique mixte de Meso-NH et AROME intègre une représentation des particules de grésil, avec une extension possible vers la grêle qui n'est pas utilisée pour le moment en version opérationnelle d'AROME.

Le grésil est un collecteur très efficace de l'eau condensée car il balaie un volume d'air important durant sa chute. Lorsqu'il collecte d'autres particules, il y a libération de chaleur latente et sa température de surface augmente. Si celle-ci atteint 0 °C, on peut choisir de représenter explicitement la formation de la grêle, correspondant à l'apparition d'une fine pellicule d'eau à la surface du grésil et à la croissance humide du grésil. Les quelques cas d'études simulés, prenant en compte explicitement l'espèce grêle, montrent une représentation assez pertinente des espèces microphysiques dans les cellules fortement convectives, mais tendent à surestimer les quantités de pluie consécutives à la fonte de la grêle.

Une amélioration est donc nécessaire au schéma microphysique, consistant en une reconversion de la grêle en grésil dans le cas où le milieu n'est pas suffisamment riche en eau surfondue. Elle nécessite une validation étendue avant d'être envisagée dans une version pré-opérationnelle d'AROME.

5

Simulation des flux de carbone avec le modèle Meso-NH dans le cadre du projet européen CarboEurope

CarboEurope est un projet européen qui a débuté en 2004 et s'est achevé fin 2008. Ce projet s'intéresse au dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂), le principal gaz à effet de serre. L'objectif principal de CarboEurope est de mieux connaître le devenir du CO₂ dans l'atmosphère ainsi que les puits et les sources qui lui sont associés.

Dans ce contexte, plusieurs campagnes de mesures (CERES) ont été menées en mai-juin 2005 puis en avril et septembre 2007 dans le Sud-Ouest de la France, entre la forêt des Landes et Toulouse. Le dispositif expérimental comprenait des mesures de surface de flux d'énergie et de CO₂, des radiosondages, des ballons plafonnants, des instruments de télédétection (radar, Rass-Sodar), des mesures des concentrations de CO₂ sur sites et par des avions instrumentés.

Une des journées de mesures d'avril 2007 s'est révélée particulièrement intéressante, lors de vols près de Toulouse. Une interprétation avec le modèle météorologique Meso-NH a été effectuée à 8 km de résolution. Alors que le modèle n'arrivait pas à reproduire les

observations aéroportées de concentrations en CO₂ (Figure a), il a été possible de mettre en évidence des erreurs dans la cartographie de l'indice foliaire (LAI), pour cette année 2007, à l'ouest de Toulouse. Un LAI élevé en relation avec une zone de cultures d'hiver, entraînait une assimilation en CO₂ par la végétation importante et peu réaliste, les concentrations atmosphériques étaient alors sous-estimées.

La carte de LAI issue du capteur de télédétection MODIS (Figure c) ne présente pas ce maximum de LAI et a permis une calibration du LAI plus appropriée. Les nouvelles comparaisons entre Meso-NH et les observations aéroportées (Figure b) révèlent une meilleure adéquation du modèle ainsi calibré.

Cette étude montre l'importance des caractéristiques de la surface tels que le LAI pour la modélisation des processus à l'échelle régionale.

6

Filtrage stochastique des mesures de vents turbulents à haute fréquence

La recherche en turbulence impose de mesurer l'atmosphère à de très fines échelles spatiales et temporelles. Les mesures in-situ à haute fréquence sont souvent perturbées par la dynamique de la plate-forme de mesure ou les parasites du système d'acquisition de la donnée.

Le filtrage stochastique basé sur les techniques de Monte-Carlo permet une estimation des signaux en proposant un certain nombre de solutions (appelées particules) aux états observés. Ces particules évoluent à

l'aide d'un modèle numérique spécifique au signal suivi. Le filtre sélectionne alors les particules les plus pertinentes et redistribue celles qui sont le moins adaptées.

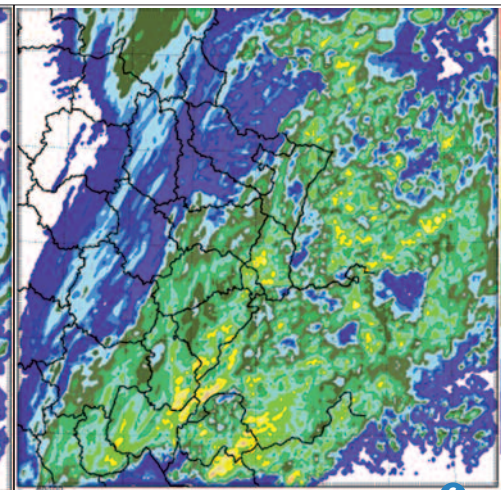
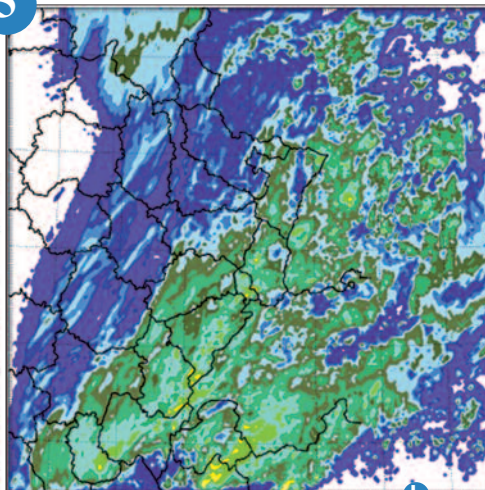
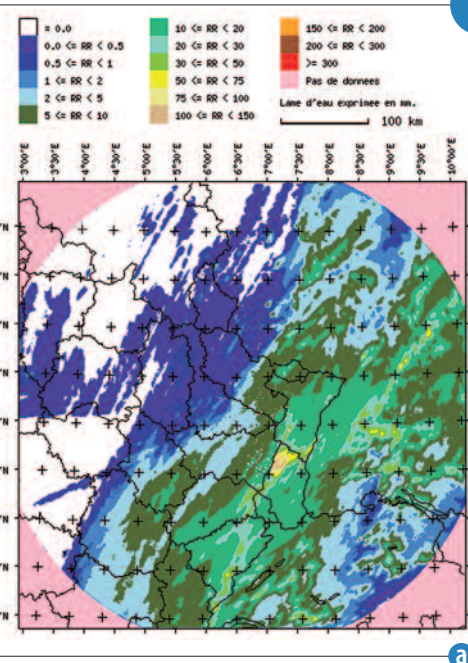
Des outils théoriques novateurs ont été développés tant pour la modélisation probabiliste de la mesure mobile que pour le filtrage non-linéaire de grandeurs intervenant dans la turbulence. Les modèles Lagrangiens proposés par les physiciens de la turbulence ont été profondément remaniés pour permettre un apprentissage des paramètres de grandes

échelles directement sur les observations.

Des expériences de filtrage ont été effectuées sur des mesures réelles fixes pour des cadences supérieures à 10 Hz et l'on peut voir sur la figure (a) les mesures perturbées en cyan, en rouge le signal filtré par notre méthode à comparer avec le signal de référence marquant la réalité à retrouver en noir. Sur la figure (b) le même code couleur présente les signatures spectrales de puissance des 3 signaux. La correction du spectre est alors spectaculaire.

7

5



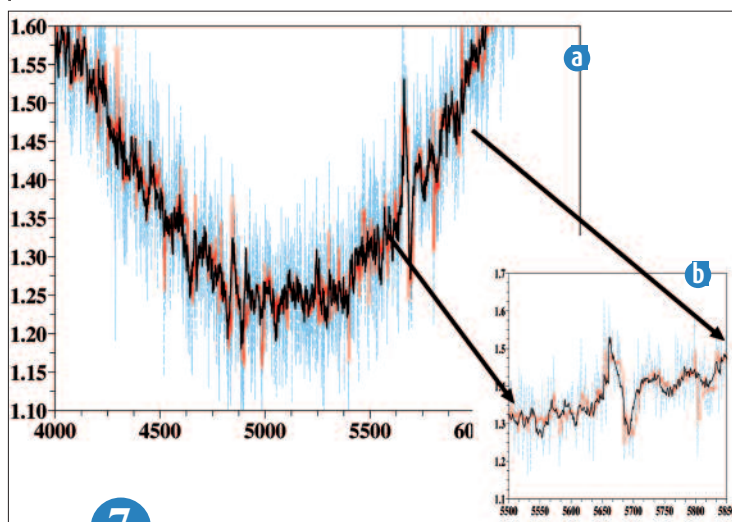
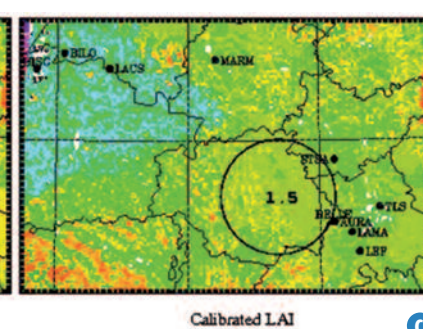
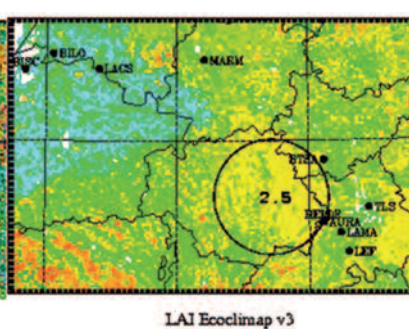
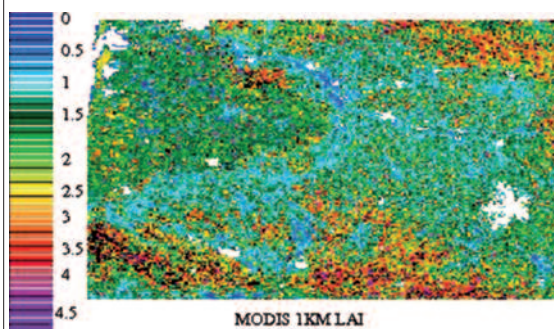
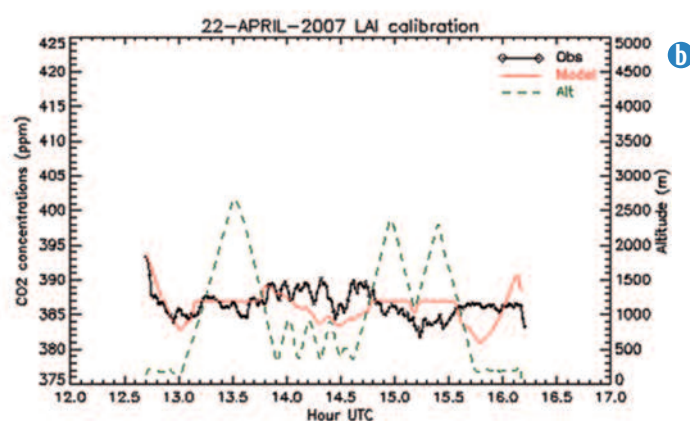
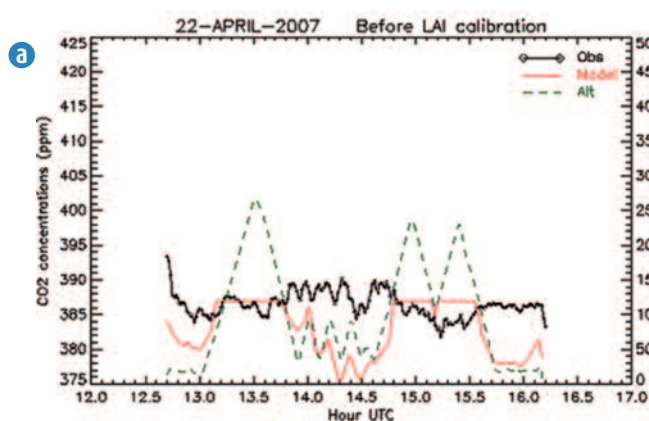
Cas de la cellule grêligène du 20 juin 2007 sur le Haut-Rhin :

(a) lame d'eau radar cumulée sur 24h en mm.

(b) Cumul de précipitation simulé sur 24h avec Meso-NH sans représentation explicite de la grêle (schéma microphysique actuel d'AROME).

(c) Cumul de précipitation simulé sur 24h avec représentation explicite de la grêle, mais sans reconversion de la grêle en grésil.

6



a et b : Séries temporelles des comparaisons des concentrations en CO2 observées (noir) et simulées (rouge) par le modèle Meso-NH le long de la trajectoire de l'avion, le 22 Avril 2007. L'altitude du vol est donnée par les pointillés verts. Les données du modèle sont issues de la simulation à la localisation exacte de l'avion. En (a) la comparaison est faite avant la calibration du LAI du modèle, en (b), après la calibration.

c : Cartographies du LAI : de MODIS (gauche), de la base de données originale ECOCLIMAP (milieu) et suite à la calibration (droite). Le cercle noir représente la principale zone affectée par la calibration du LAI qui passe d'environ 2.5 à 1.5 m².m⁻², en accord avec la cartographie de MODIS.

a : Séries temporelles de vents réels mesurés à 10 Hz avec en cyan le vent perturbé par un bruit synthétique, en noir le vent de référence à retrouver et en rouge le vent filtré par nos méthodes. Le zoom montre le bon suivi d'une période d'intermittence.

b : Densité spectrale de puissance de 3 signaux, bruité (cyan), de référence (noir) et filtré (rouge). On remarque que le filtre a permis de reconstituer parfaitement la structure énergétique de la mesure turbulente.

HyMeX: vers un programme expérimental sur le cycle de l'eau en Méditerranée à l'horizon 2010-2020

HyMeX, composante du chantier Méditerranée coordonné par l'INSU, vise à améliorer la compréhension et la modélisation du cycle de l'eau en Méditerranée, avec un accent mis tout particulièrement sur la prévisibilité et l'évolution des événements intenses associés au cycle de l'eau. Pour progresser dans sur ces questions, la stratégie proposée pour HyMeX est d'observer et modéliser le système couplé (océan-atmosphère-surfaces continentales), sa variabilité (de l'échelle de l'événement à l'échelle aux échelles saisonnière et inter-annuelle) et ses caractéristiques sur une décennie (2010-2020) inscrite dans un contexte de changement climatique global. Les premières périodes d'observations intensives avec déploiement de plates-formes instrumentées de recherche sont envisagées dans le golfe du Lion en 2011-2013.

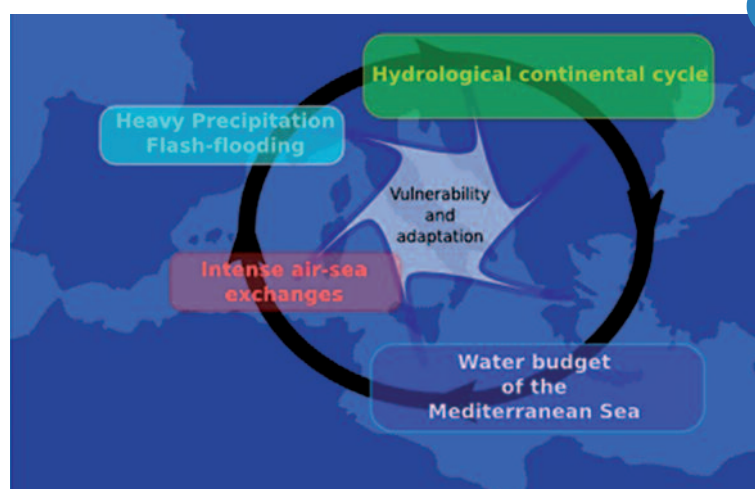
La première phase de préparation du programme (2006-2007) avait pour principal objectif la rédaction d'un livre blanc organisant les questions scientifiques d'HyMeX autour de cinq thématiques principales (voir

figure). Les deux premières concernent l'étude de la variabilité et de la tendance de la composante « lente » du cycle de l'eau, les deux suivantes portent sur les événements intenses et la cinquième thématique concerne la vulnérabilité et la capacité d'adaptation des territoires et peuples méditerranéens.

La seconde phase de préparation (2008-2009) a pour objet d'établir le plan scientifique et le plan d'implémentation du programme HyMeX. Avec cette phase, HyMeX a également clairement pris une ampleur internationale avec par exemple plus de 250 participants aux groupes de travail HyMeX composés pour 60% d'étrangers, originaires d'une quinzaine de pays.

Le CNRM prend une part active dans la préparation de ce programme nécessaire pour progresser en particulier sur la prévision des événements précipitants intenses en région Méditerranéenne méditerranéenne et sur l'évaluation des impacts potentiels du changement climatique sur le cycle de l'eau dans ces régions.

9



9

Les thématiques principales du programme HyMeX

Etude expérimentale du déferlement des ondes de relief

Japon 1966 : un Boeing 707 s'écrase dans le sillage du mont Fuji. Alaska 1993 : un Boeing 747 est contraint à un atterrissage d'urgence, il a perdu un moteur dans des turbulences. Colorado 1997 : une forêt est dévastée par une tempête sur le versant aval des Rocheuses, les rafales atteignent 50 m/s. Trois catastrophes et une cause commune, le déferlement des ondes de reliefs. Ces ondes ont fait l'objet de nombreuses études mais pendant longtemps la nature intrinsèquement 3D de la zone de déferlement est restée négligée faute de moyen. Une situation que l'avènement du calcul numérique n'a que partiellement résolue.

L'étude expérimentale menée à la grande veine hydraulique de Météo France a permis de lever un coin du voile grâce à une toute nouvelle technique de vélocimétrie permettant de mesurer les trois composantes du champ de vitesse en volume dans un écoulement turbulent et stratifié en densité. Le développement de cette technique unique a constitué une étude à part entière s'étendant sur plus de trois ans, dans le cadre d'une collaboration internationale avec les universités de Washington et de Californie du Sud.

Les résultats de la première campagne de mesure révèlent pour la première fois les détails de la dynamique de la zone de déferlement avec en particulier une activité tourbillonnaire extrêmement riche. Son étude a déjà permis d'éclairer le chemin qui mène à la turbulence à travers l'apparition puis la déstabilisation de grosses structures tourbillonnaires.

De nouvelles campagnes de mesures devraient permettre de caractériser la turbulence en 3D. Ces résultats permettront une meilleure paramétrisation des modèles numériques pour une meilleure prévision.

Au-delà des progrès enregistrés dans l'étude des ondes de relief, il s'agit d'une étape décisive en météorologie qui accède ainsi à la 3D sur une installation de grande envergure, ce qui constitue une première mondiale.

8

a

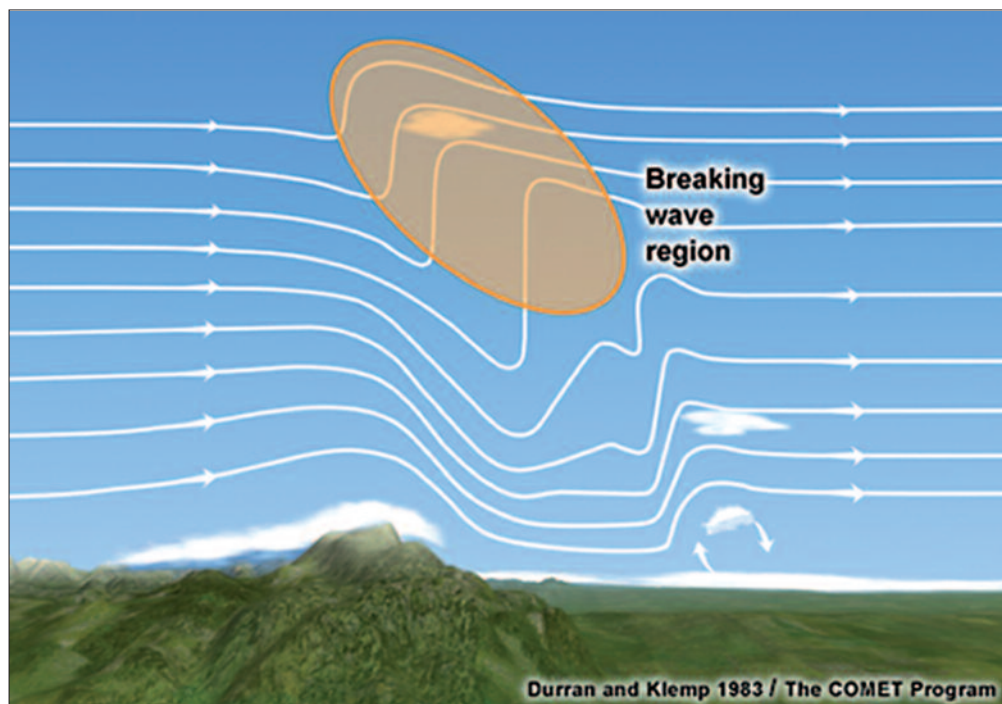
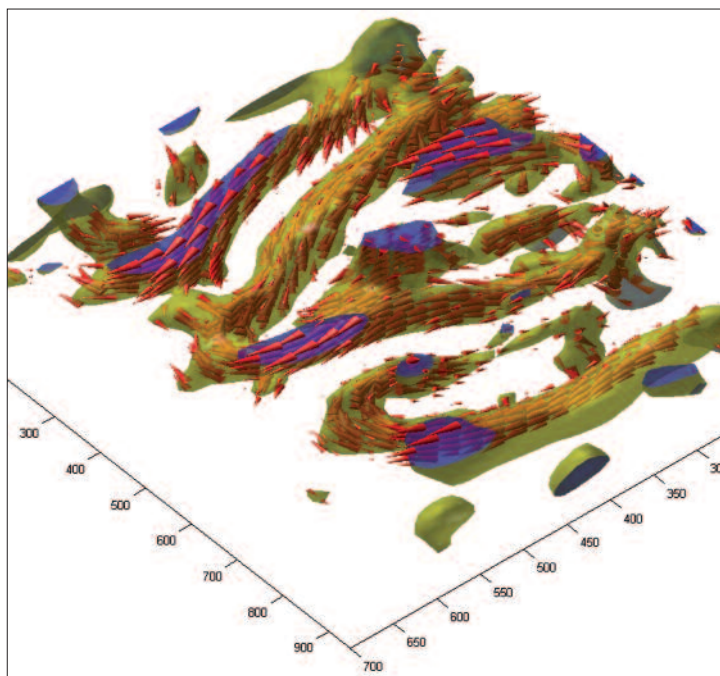


Image a :
Déferlement d'une onde de relief

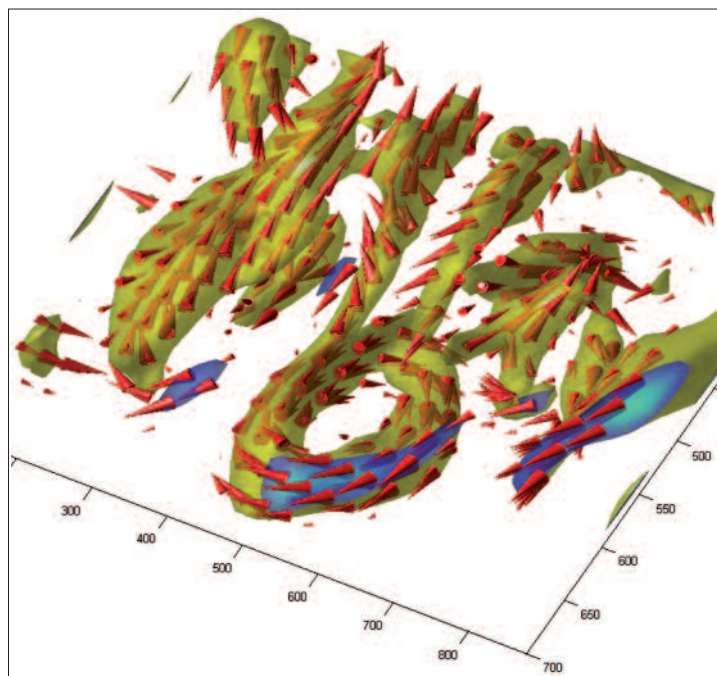
Image b :
Structures tourbillonnaires au sein
de la zone de déferlement.
Surface et vecteurs vorticité

Image c : Quelques instants plus
tard, apparition de tourbillons
toroïdaux.

b



c



Étude du climat et du changement climatique

En 2008, le CNRM s'est mis en ordre de marche pour participer aux simulations qui contribueront à l'élaboration du 5^e rapport du GIEC, dont la parution est prévue en 2013. Par ailleurs, les actions dévolues aux études d'impact ont pris une importance accrue, et ont fait l'objet d'une attention particulière de la part des équipes de recherche.

Un nouvel ensemble de simulations climatiques longues avec le modèle climatique couplé du CNRM

Dans le cadre du projet européen du 6^e PCRD ENSEMBLES, le CNRM a réalisé de nouveaux scénarios climatiques couplés globaux. Ces simulations pourront être utilisées dans une large gamme d'applications (notamment, en régionalisation et impacts du changement climatique).

Elles ont été réalisées avec la dernière version du système couplé global CNRM-CM3.3, amélioration du système utilisé pour les dernières simulations du GIEC. Une expérience de contrôle de 1000 ans, avec les conditions préindustrielles correspondant à l'année 1860, a été effectuée pour établir l'équilibre naturel du système climatique. A partir d'un état initial extrait de cette expérience, une simulation historique a été réalisée sur la période 1860-2000 en utilisant l'évolution observée de la concentration des gaz à effet de serre et des aérosols. Cette simulation a permis de valider l'évolution climatique simulée par rapport aux observations. L'état obtenu en l'an 2000 a servi de point de départ pour réaliser trois scénarios climatiques (A1B, A1B IMG et A1B 450) sur le 21^e siècle. Les nouveaux scénarios A1B IMG et A1B 450 ont été établis dans le cadre d'ENSEMBLES. En particulier, A1B IMG est une actualisation du scénario SRES-A1B utilisé notamment dans le dernier rapport du GIEC de 2007. A1B 450 correspond à l'objectif de l'Union Européenne de stabiliser la concentration du CO₂ vers 2050.

Notre simulation indique que si cet objectif est atteint, le réchauffement planétaire pourrait se limiter à 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle.

1

La simulation du dernier maximum glaciaire avec le modèle climatique couplé CNRM-CM3.3

Jusqu'en 2005, la qualité du modèle climatique du CNRM n'était évaluée qu'en fonction de sa capacité à simuler le climat préindustriel et les évolutions climatiques au cours du 20^e siècle. Sur cette période d'observation, le climat reste relativement proche de celui que nous connaissons actuellement, ce qui ne garantit pas nécessairement que le même modèle soit capable de simuler un climat radicalement différent.

En collaboration avec l'IPSL, il a donc été entrepris de tester la pertinence de CNRM-CM dans le cadre du dernier maximum glaciaire (DMG, il y a 21 000 ans), et de participer à PMIP (Projet d'Intercomparaison de Modèles Paléoclimatiques). Des données indirectes (pollens, sédiments marins...) permettent d'estimer qu'à cette époque la température de l'air à 2m en moyenne sur l'ensemble des continents était plus froide qu'actuellement

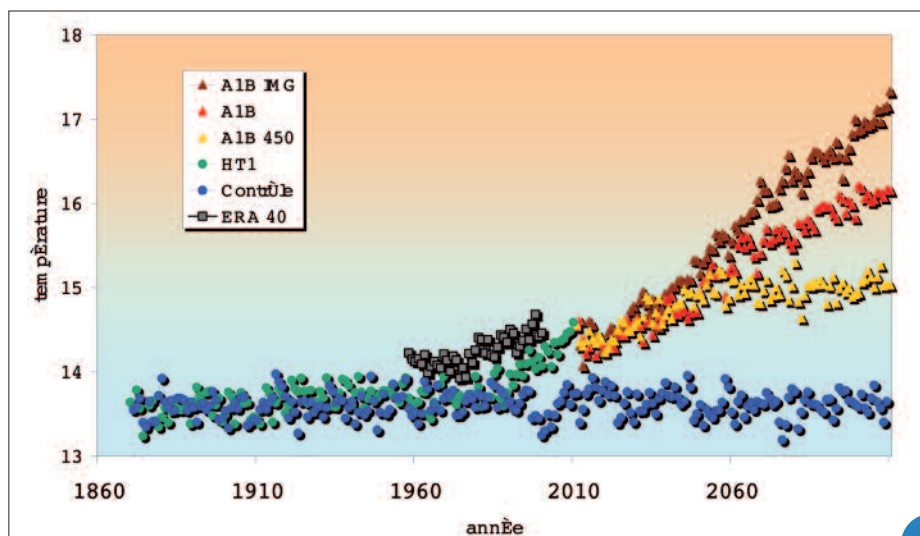
de 2 à 7°, et que les océans étaient plus froids de 1 à 4°. Une expérience de 500 ans avec CNRM-CM permet de fournir une estimation de respectivement 2,8 et 2,5° pour les mêmes grandeurs, ce qui est proche des estimations des autres modèles de PMIP.

On peut remarquer que le changement de température depuis le DMG est quasi-général, mais nettement plus marqué dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord, notamment en raison de la présence de calottes glaciaires (Laurentides, sur le Canada, et Fennoscandienne, sur le nord de l'Europe) actuellement disparues.

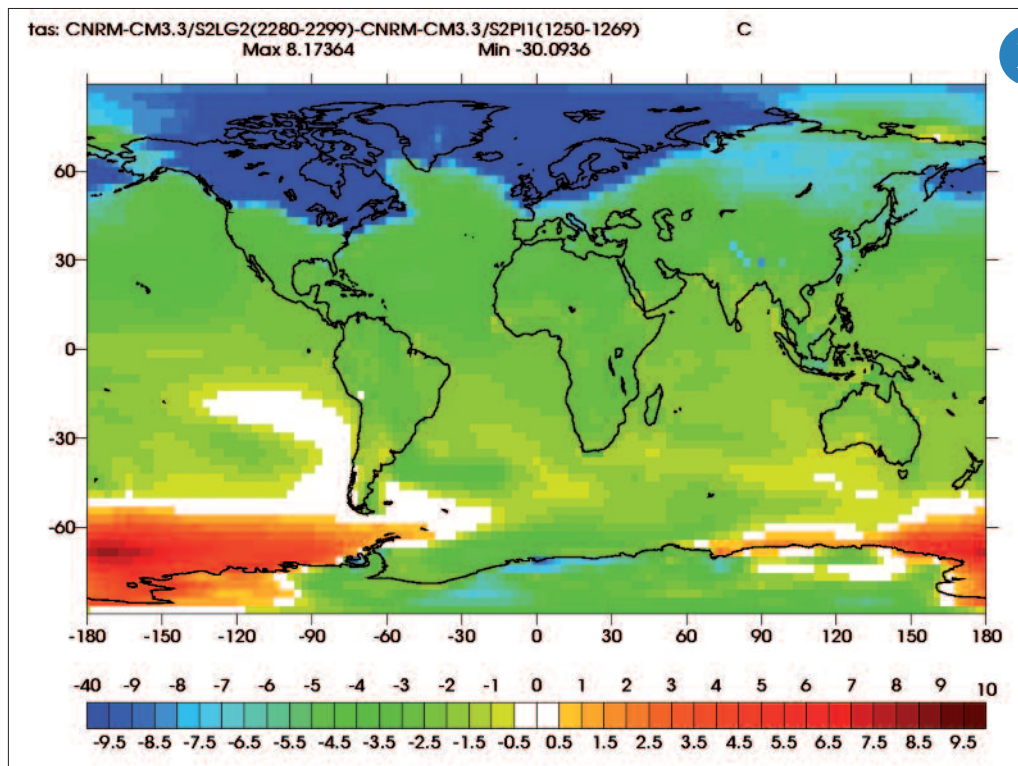
Cette amplification polaire est confirmée par les données de températures reconstruites selon diverses méthodes en fonction de la région étudiée.

2

Comparaison de l'évolution de la température globale à 2m dans les diverses simulations réalisées pour le projet européen du 6^e PCRD ENSEMBLES avec le modèle CNRM-CM3.3 : la simulation de contrôle en conditions préindustrielles, la simulation sur le 20^e siècle (HT1) et les scénarios futurs A1B IMG, A1B et A1B 450. En gris : les données ERA40 du CEPMMT, qui incorporent des observations sur la période 1958-2001.

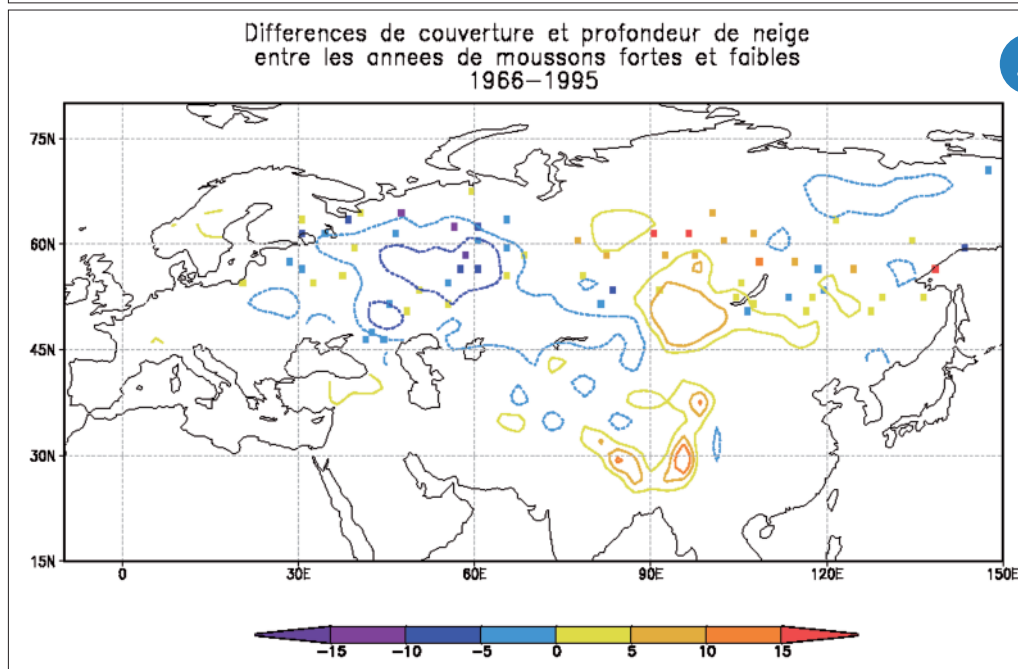


1



2

◀ Température moyenne annuelle de l'air à 2m (T2m) au cours du dernier maximum glaciaire moins T2m préindustrielle (°C) simulée par CNRM-CM3.3.



3

◀ Différences d'épaisseur de neige (pixels de couleur, en cm) et de couverture neigeuse (contours, en %) au printemps entre les années de forte et de faible mousson indienne sur la période 1967-1995.

Couverture neigeuse et mousson indienne : un nouvel épisode d'une relation controversée

Depuis les premiers travaux de Blanford à la fin du 19^e siècle, suggérant que les précipitations de mousson en Inde pouvaient être modulées par l'enneigement préalable du continent eurasiatique, de nombreuses études ont été consacrées à une meilleure évaluation et compréhension de cette possible téléconnexion. Ce problème a fait récemment l'objet d'un nouvel examen au CNRM en utilisant une analyse en maximum de covariance.

Cet outil statistique a été appliqué à la fois à des observations (précipitations d'été sur l'Inde d'une part, données satellitaires de couverture neigeuse ou mesures *in-situ* d'épaisseur de neige d'autre part) et à un jeu de simulations globales couplées océan-atmosphère issu de la base de données CMIP3. En accord avec les études précédentes, les observations montrent un lien privilégié entre un dipôle Est-Ouest de neige sur l'Eurasie et les précipitations de mousson sur l'Inde. Néanmoins, nos résultats indiquent que cette relation n'est ni significative du point de vue statistique, ni stationnaire au cours des 40 dernières années. De plus, le signal le plus marqué apparaît sur l'Est de

l'Eurasie et n'est pas cohérent avec l'hypothèse de Blanford selon laquelle un excédent de neige devrait se traduire par un affaiblissement de la mousson. Les simulations CMIP3 du 20^e siècle fournissent des séries temporelles plus longues et permettent ainsi de rechercher des liens neige-mousson plus robustes. Certains modèles montrent une relation apparente entre l'enneigement du continent eurasiatique et les précipitations de mousson sur l'Inde, mais les structures associées de couverture neigeuse varient selon le modèle considéré et ne ressemblent pas aux structures observées. De plus, la relation neige-mousson ainsi mise en évidence dénote en général une trop forte influence de l'ENOA (El Niño Oscillation Australe) à la fois sur l'enneigement d'hiver et les précipitations de mousson en été, plutôt qu'un effet direct de la couverture neigeuse eurasiatique sur la mousson indienne.

De nouvelles études de sensibilité avec le modèle Arpège-Climat sont envisagées pour évaluer l'impact éventuel des anomalies de neige sur la mousson indépendamment de la variabilité océanique.

3

Simulations des effets à long terme de l'interaction entre la chimie atmosphérique et le climat

La communauté internationale de recherche sur les interactions entre la chimie atmosphérique et le climat prépare tous les quatre ans, sous l'égide du PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) et de l'OMM, un rapport sur l'évolution à long terme de l'ozone stratosphérique. Cette publication repose sur les résultats d'exercices de modélisation couplée chimie-climat de l'ensemble de la communauté scientifique internationale ; ces exercices sont coordonnés dans le cadre du programme SPARC (Stratospheric Processes And their Role in Climate) du WCRP (World Climate Research Programme).

Le CNRM participe à l'exercice actuel avec son modèle de Chimie Climat (CNRM-ACM) issu du couplage, via l'ozone, entre le Modèle de Chimie Transport MOCAGE, en configuration chimie stratosphérique, et le Modèle de Circulation Générale ARPEGE-Climat.

Les résultats de plusieurs simulations couplées seront intercomparés et analysés en 2009. Parmi ces simulations, trois serviront de références : 20 ans de simulations avec les conditions de forçage de l'année 2000 pour étudier la variabilité propre interne aux modèles ; 40 ans de simulations de la période récente passée (1960-2000), en prenant en compte l'évolution du rayonnement solaire et les éruptions volcaniques, où les sorties des modèles seront évaluées grâce aux observations in-situ et satellitaires ; et 140 années de simulations (1960-2100), avec un scénario intermédiaire d'évolution des gaz à effet de serre et des gaz responsables de la destruction de la couche d'ozone (scénario A1B), pour prévoir l'évolution sur le 21^e siècle, en particulier le retour à la normale de l'ozone stratosphérique. 4

Climat : de la modélisation à l'action

Météo-France et ses partenaires de la communauté française du climat se sont engagés dans une démarche de mise à disposition des données climatiques simulées à échelle régionale.

L'idée est d'offrir un service climatique complet, en ajoutant aux mesures instrumentales les données simulées établies à partir de plusieurs hypothèses d'émission de gaz à effet de serre par plusieurs modèles climatiques régionaux et plusieurs méthodes de descente d'échelle (désagrégation statistique ou dynamique). Cette panoplie de produits permet l'évaluation de différentes sources d'incertitude et pourra être utilisée pour des études d'impact. Ces actions, initiées en 2008, facilitent l'accès aux simulations et le bon emploi des scénarios à des acteurs étrangers à la modélisation climatique. Elles permettent aussi de soulager les équipes de recherche des tâches de livraison de données et d'une partie de l'accompagnement.

Dans le cadre de la préparation du prochain exercice du GIEC, Météo-France participe à de nombreux projets de recherche sur les changements climatiques. Très logiquement, l'Etablissement est maintenant régulièrement sollicité pour des demandes très ciblées d'adaptation au changement climatique et pour l'élaboration des plans climat de différentes collectivités territoriales. Plusieurs études de ce type ont été réalisées en 2008. Par exemple, dans le cadre d'une étude pour la région Poitou-Charente, les simulations régionalisées ont alimenté un travail d'analyse pour l'élaboration de fiches thématiques (impacts, pistes d'adaptation, acteurs concernés, etc.). La figure associée illustre ainsi l'augmentation du risque canicule (impact sur l'agriculture, la santé) pour cette région.

Les efforts entrepris en 2008 en matière d'aide aux décideurs, afin de les aider à mieux cerner les impacts du changement climatique, seront poursuivis et renforcés durant les années à venir. 5

Des scénarios climatiques régionalisés sur mesure

A la suite de la contribution de Météo-France aux scénarios globaux qui ont servi de base au dernier rapport du Giec, des scénarios climatiques régionaux à haute résolution (50 km) sur la France ont été produits pour la période 1950-2100. Le modèle utilisé est Arpege-climat à maille variable sur le globe. Les séries quotidiennes de paramètres météorologiques ont été mis à disposition d'un certain nombre d'études d'impact.

Deux projets phares sont mentionnés ici. Dans les deux cas, les sorties du modèle ont dû subir un traitement statistique de calibration original pour coller au plus près des séries observées 1971-2000. Le premier projet est ANR-Climator. Il concerne l'impact sur l'agronomie pour 12 stations de l'Inra réparties sur la métropole : Avignon (voir figure), Colmar, Mirecourt, St Etienne, Bordeaux, Dijon, Mons, Toulouse, Clermont, Lusignan, Rennes et Versailles. Le second est GICC-Rexhyss. Il concerne l'hydrologie des bassins Seine et Somme. Les données du modèle ont été adaptées à un réseau de 1660 points d'observations (analyses Safran) sur cette région.

Les résultats de ces deux projets seront connus fin 2009. Durant les années à venir, le CNRM cherchera à généraliser à un grand nombre d'études d'impact la distribution de séries quotidiennes corrigées pour la température minimale et maximale, les précipitations, et le vent maximal sur 240 sites de la métropole. Un nombre croissant de simulations sur la période 1950-2100 sera également proposé, pour permettre une bonne prise en compte des incertitudes. 6

Impact des changements climatiques sur les débits extrêmes en région méditerranéenne

L'évolution des précipitations intenses dans la zone méditerranéenne française au cours du XXI^e siècle est une question particulièrement importante, eu égard aux dégâts engendrés par les crues automnales dans cette région. Ce point constituait un des objectifs du projet CYPRIM (cyclogénèse et précipitations intenses en Méditerranée).

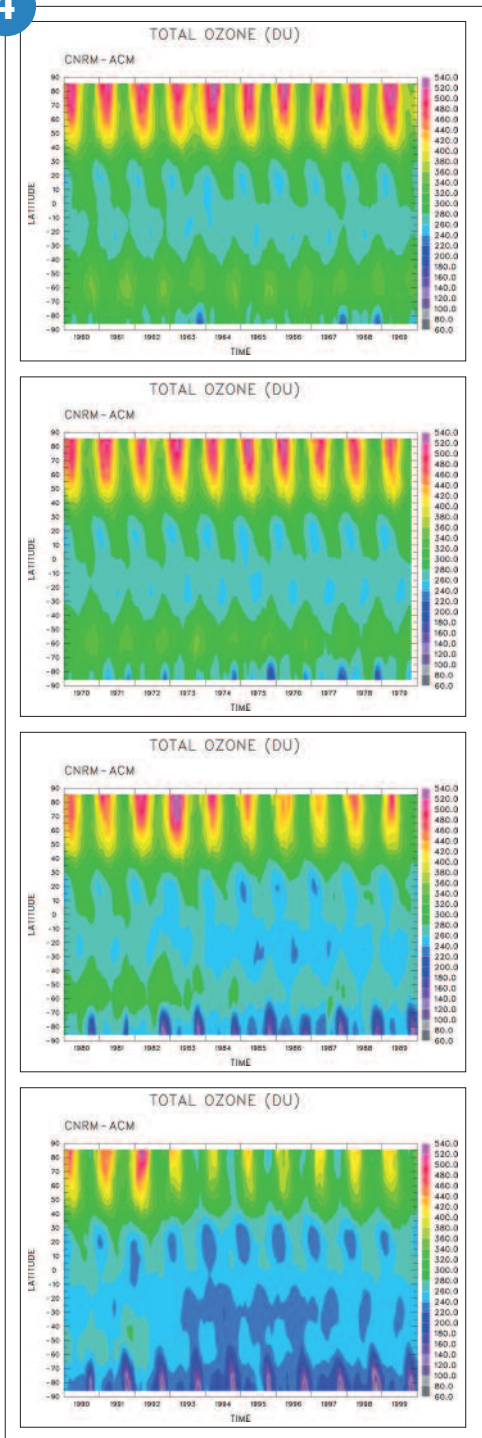
A partir d'un scénario climatique à haute résolution, plusieurs méthodes de descente en échelle ont été appliquées pour obtenir des évolutions des pluies à échelle fine. Ces données météorologiques ont été utilisées

en entrée du modèle hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou pour calculer l'évolution des flux d'eau à la surface, dans le sol et des débits associés. Le réchauffement attendu, associé à une baisse des pluies moyennes entraînerait un fort assèchement du sol et une forte baisse des débits moyens au cours du XXI^e siècle. Concernant les pluies et les débits extrêmes, il apparaît que dans certains bassins, les plus hauts débits pourraient être du même ordre, voire supérieurs à ceux constatés aujourd'hui. Ceci est cohérent avec l'analyse d'autres scénarios climatiques

conduisant à une augmentation de la variabilité des précipitations. Par contre, la comparaison des résultats obtenus avec les deux méthodes de descente en échelle donnent des résultats divergents sur la localisation précise des zones à fortes précipitations dans le futur (voir figure).

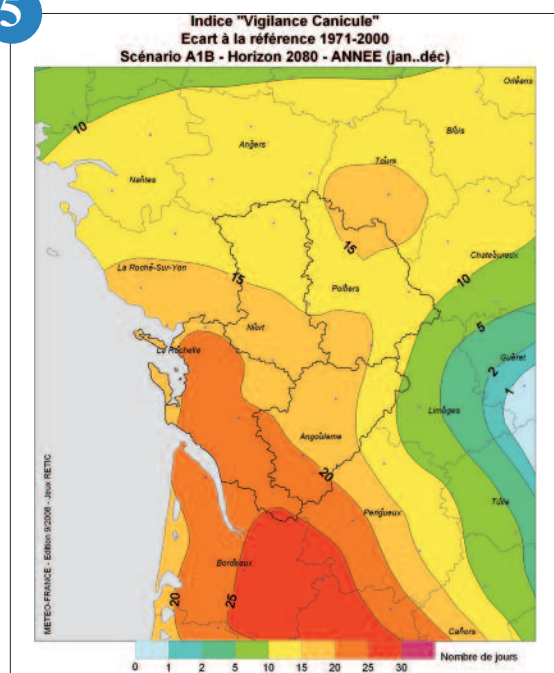
Cette étude sera prolongée par l'étude de nouveaux scénarios et un travail sur l'amélioration des méthodes de descente d'échelle en vue de compléter ces premières estimations. 7

4



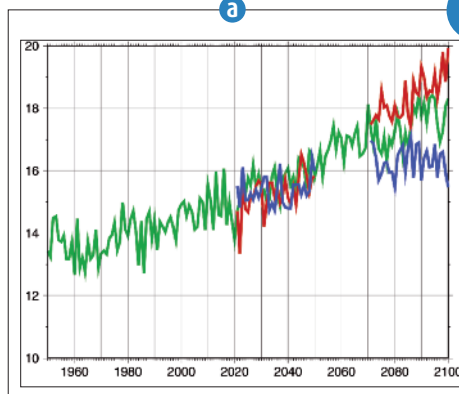
Evolution de la moyenne zonale de la colonne d'ozone (unités Dobson) entre 1960 et 2000 simulée par CNRM-ACM. Remarquer l'apparition du trou d'ozone dans les années 1980-1990.

5

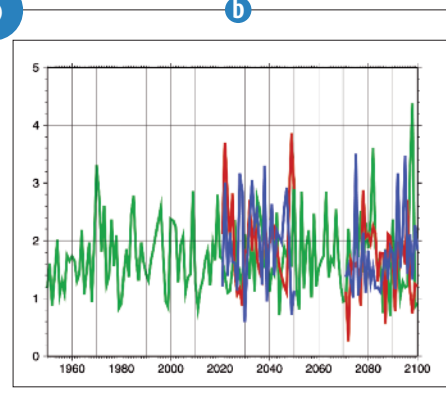


Evolution du risque canicule sur et autour de Poitou Charente, risque défini à partir des critères de la vigilance canicule, scénario d'émission A2, modèle régional ARPEGE, différence entre le climat de la fin du XXI^e siècle et celui de la fin du XX^e siècle.

a

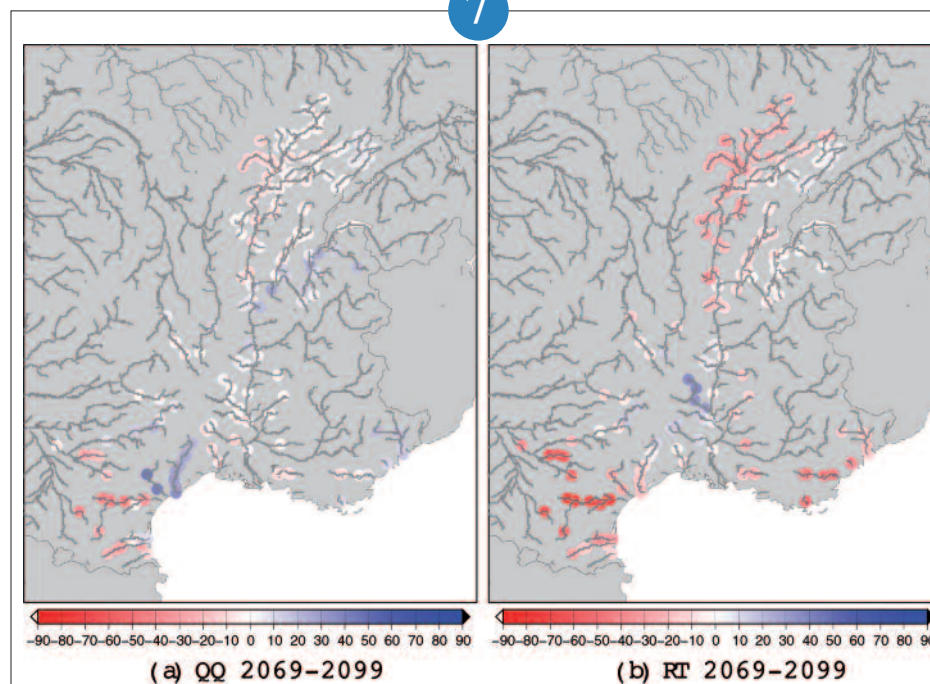


b



▲ Séries de températures (a, °C) et de précipitations (b, mm/jour) annuelles pour la station Inra d'Avignon selon les scénarios Giec-A1B (vert), A2 (rouge) et B1 (bleu) d'après les simulations du modèle régional Arpege-climat.

7



Variation (en %) des débits extrêmes (quantile 99% du débit, soit valeur du débit dépassé 1 fois sur 100) sur la période septembre-décembre pour la région méditerranéenne française (variation entre les périodes 1969-1999 et 2069-2099). A gauche : méthode de descente en échelle par correction des variables du modèle de circulation générale (QQ), à droite : méthode de descente en échelle basée sur les régimes de temps.

Actions conduites dans le cadre de l'année polaire internationale

La 4^e année polaire internationale couvrait l'ensemble de l'année 2008. Météo-France y a contribué au travers de diverses actions, comme la participation à des campagnes de mesure, la contributions à la mise en œuvre de projets originaux comme Concordiasi, ...

Mesures météorologiques à bord de navires dans l'Arctique

A l'occasion de l'Année Polaire Internationale, le voilier TARA avait été équipé d'une station météorologique MINOS comprenant un baromètre, une sonde de température de l'air, un récepteur GPS et un émetteur Argos pour transmettre les mesures. Après une dérive de plus de 500 jours dans les glaces de l'Océan Arctique (septembre 2006 – janvier 2008), le navire est rentré au port en février 2008. La balise MINOS a été démontée, contrôlée et re-conditionnée. Etant en excellent état malgré des mois passés dans des conditions difficiles, elle a été expédiée courant mars vers le Spitzberg pour être remontée à bord du VAGABOND en été 2008. Le VAGABOND est un autre voilier polaire plus petit que le TARA, qui va lui aussi contribuer aux études de la banquise avant de revenir sur Brest en 2010. **1**

Polarcat: participation de l'ATR42 à l'étude de la pollution atmosphérique autour du pôle Nord

La campagne de mesures aéroportées POLARCAT s'inscrit dans le cadre de l'année polaire internationale. L'ATR42 de Météo-France, mis en œuvre par l'unité mixte SAFIRE du CNRS / Météo-France / CNES, y a contribué dans le cadre de 2 campagnes de mesure : la 1^{re} se déroulant au nord de la Suède (Kiruna, avril 2008), la seconde ayant lieu au Groenland (Kangerlussuaq, juillet 2008).

Au printemps 2008, au nord du cercle polaire, l'ATR42 avait pour priorité l'étude de la brume arctique. Ainsi, l'avion était équipé de mesures in situ d'aérosols et d'espèces traces ainsi que d'un lidar et d'un radar de mesure d'humidité. Des événements importants de pollution ont pu être documentés, notamment une pollution d'origine asiatique qui avait traversé le pôle Nord.

Durant l'été 2008, une seconde campagne a été entreprise. Elle s'est cette fois déroulée au Groenland et avait pour principal objectif l'étude du transport et du dépôt des résidus des feux de forêts boréaux en été. A cette occasion, l'avion était équipé d'un autre lidar de mesure de l'ozone.

La mise en œuvre de l'avion avec cette configuration instrumentale chargée et dans ces régions isolées, dans des conditions climatiques sévères, a nécessité un an de préparation. Au final, l'ensemble du programme s'est parfaitement déroulé et les scientifiques disposent de nombreuses données. Au total, l'ATR42 a réalisé 120 heures de vol dans le cadre de POLARCAT. **2**

Préparation de la campagne Concordiasi

Le projet Concordiasi s'inscrit dans le cadre de l'année polaire internationale. L'un de ses principaux objectifs est la validation et l'amélioration de l'assimilation des observations satellitaires sur l'Antarctique à l'aide de campagnes de mesure. En préparation à ces campagnes, divers développements ont été menés.

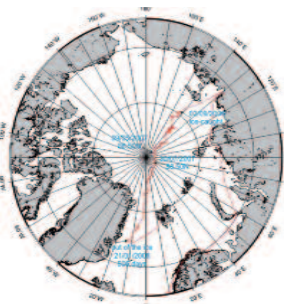
L'assimilation des observations pour les hautes latitudes pose en effet des difficultés particulières liées à l'estimation de l'émissivité de surface pour les surfaces froides et à la détection nuageuse, particulièrement importante pour les mesures infrarouges.

Une méthode développée au CNRM pour l'estimation de l'émissivité micro-onde à partir des observations satellitaires a été appliquée pour les surfaces continentales gelées et la glace de mer et a fortement amélioré l'assimilation des données AMSU sur l'Antarctique. Les hypothèses physiques sous-jacentes sont actuellement remises en question sur les surfaces enneigées et permettront d'aller plus loin dans l'amélioration du calcul de l'émissivité dans le modèle.

Des expériences d'assimilation, visant à augmenter le nombre d'observations satellites micro-ondes (AMSU) et infrarouges (AIRS et IASI), sur l'Antarctique et la glace de mer environnante, ont été menées. L'augmentation du nombre d'observations sur ces surfaces (voir figure) a eu un impact positif sur les analyses et les prévisions, dans une version du modèle ARPEGE centré sur l'Antarctique mise en place pour décrire plus finement les phénomènes dans cette région.

Ces améliorations seront notamment utiles pour les prévisions météorologiques lors de la deuxième phase de la campagne en 2010, où des ballons plafonnants ayant la possibilité de lâcher des sondes documenteront intensivement le printemps austral. **3**

1

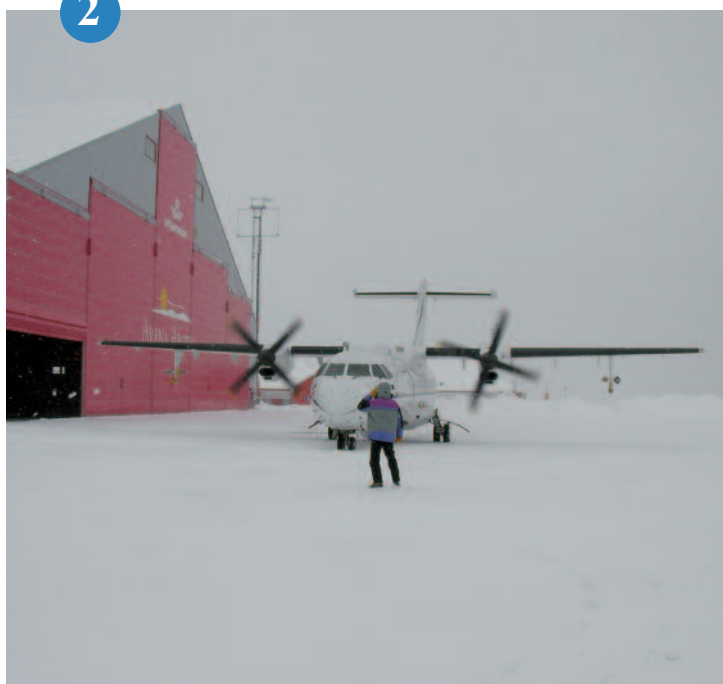


▲ Photo du Vagabond, qui hiverne pendant 5 ans (2004-2009) au Spitzberg, pour étudier la banquise, dans le cadre du projet européen Damocles (Copyright Eric Brossier - Vagabond)

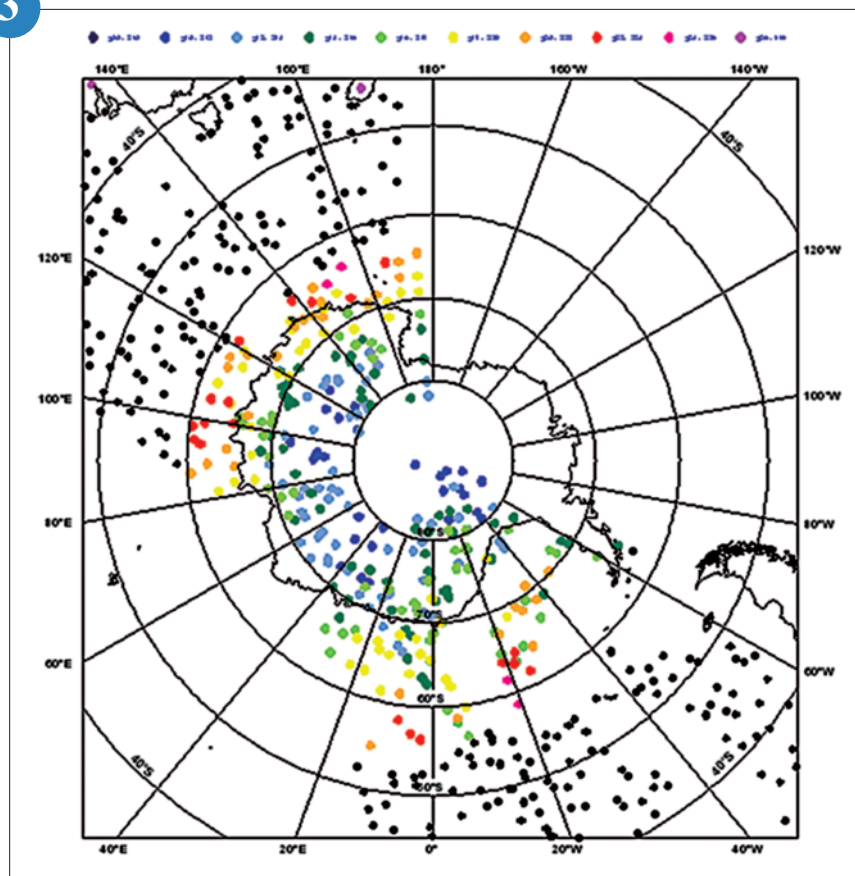
◀ Trajectoire de TARA sur la banquise

L'ATR42 prêt au départ à Kiruna (Suède) lors des vols en avril 2008. A gauche, le hangar chauffé dédié aux avions scientifiques: Arena Arctica.

2



3



◀ Couverture des données IASI, pour le canal 246, au-dessus de l'Antarctique. Les points noirs montrent les observations assimilées dans le modèle opérationnel et les points de couleur les observations additionnelles assimilées (sur glace de mer et sur terre enneigée) dans une version optimisée du modèle.

Première phase de la campagne Concordiasi

Une campagne de mesure, appelée Concordiasi :

(<http://www.cnrm.meteo.fr/concordiasi>) a été mise en place en Antarctique afin d'aider à la validation de l'assimilation des observations satellitaires pour les hautes latitudes, plus particulièrement celles du sondeur hyperspectral IASI embarqué à bord de MetOp. La campagne se déroule en deux parties, durant les printemps australs 2008 et 2010.

La première phase de la campagne Concordiasi s'est déroulée de septembre à décembre 2008. Durant la campagne, le nombre de radiosondages a doublé aux stations Dumont d'Urville (DDU) sur la côte et Concordia à DomeC (deux lâchers par jour). Les lâchers supplémentaires, mesurant les profils atmosphériques au-delà de 20km, ont été synchronisés avec les passages du satellite MetOp au-dessus des stations. Par ailleurs, quelques sondes ont été lancées dans le cas de la colocalisation des capteurs infrarouges IASI, AIRS et de l'Aqua-Train au-dessus des stations. Ceci permettra de comparer les données issues des radiosondages (voir figure), les données simulées par différentes versions du modèle de prévision numérique et les données observées pour les deux sondeurs, tout en ayant une connaissance précise des nuages grâce à l'Aqua-train.

D'après les observations visuelles, les conditions nuageuses sont effectivement variées, principalement nuageuses à DDU et claires à DomeC. Or, le rayonnement infrarouge mesuré par AIRS et IASI est grandement affecté par les nuages.

Les données obtenues permettront donc une étude fine de l'assimilation de données satellitaires pour ce continent, dans des conditions de nébulosité variées. 4

Les ballons plafonnants : de nouvelles plates-formes d'observation adaptées à la prévision du temps ?

L'observation adaptative consiste en l'ajout d'observations dans des zones sensibles calculées pour améliorer (localement) une prévision. Des techniques numériques permettent de prévoir le bénéfice escompté sur la prévision pour un déploiement potentiel donné.

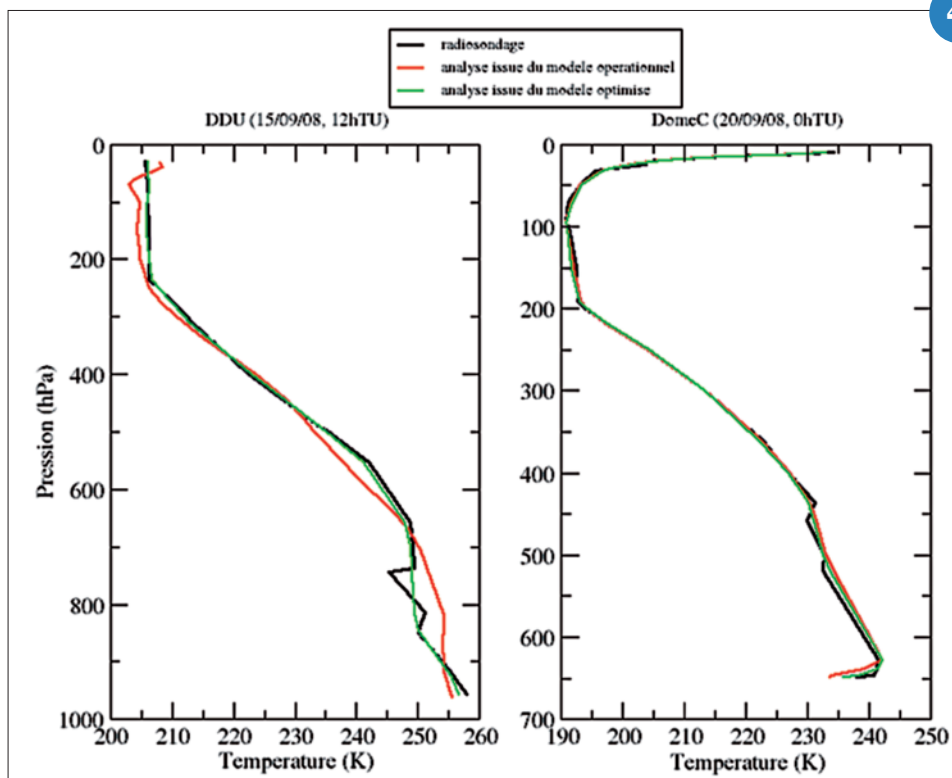
Jusqu'à une époque récente, l'observation adaptative se faisait avec des plates-formes additionnelles dont on pouvait contrôler soit l'heure de collecte (station fixe), soit l'horaire de collecte et la localisation (avions). Avec les projets CONCORDIASI (en cours) et BAMED (Balloons in the Mediterranean, 2008-2010), on considère un nouveau type de plate-forme adaptative : des ballons plafonnants.

Dans CONCORDIASI, au printemps austral 2010, les ballons stratosphériques seront piégés quelques semaines dans le vortex polaire austral, formant une petite constellation. Ces ballons largueront des dropsondes en fonction de l'information sur la prévisibilité de l'atmosphère fournie par nos techniques numériques pour le ciblage. Seule

une prévision de la position des ballons, à courte échéance, sera nécessaire en plus des outils classiques. La figure montre un cas de test simulant la stratégie envisagée.

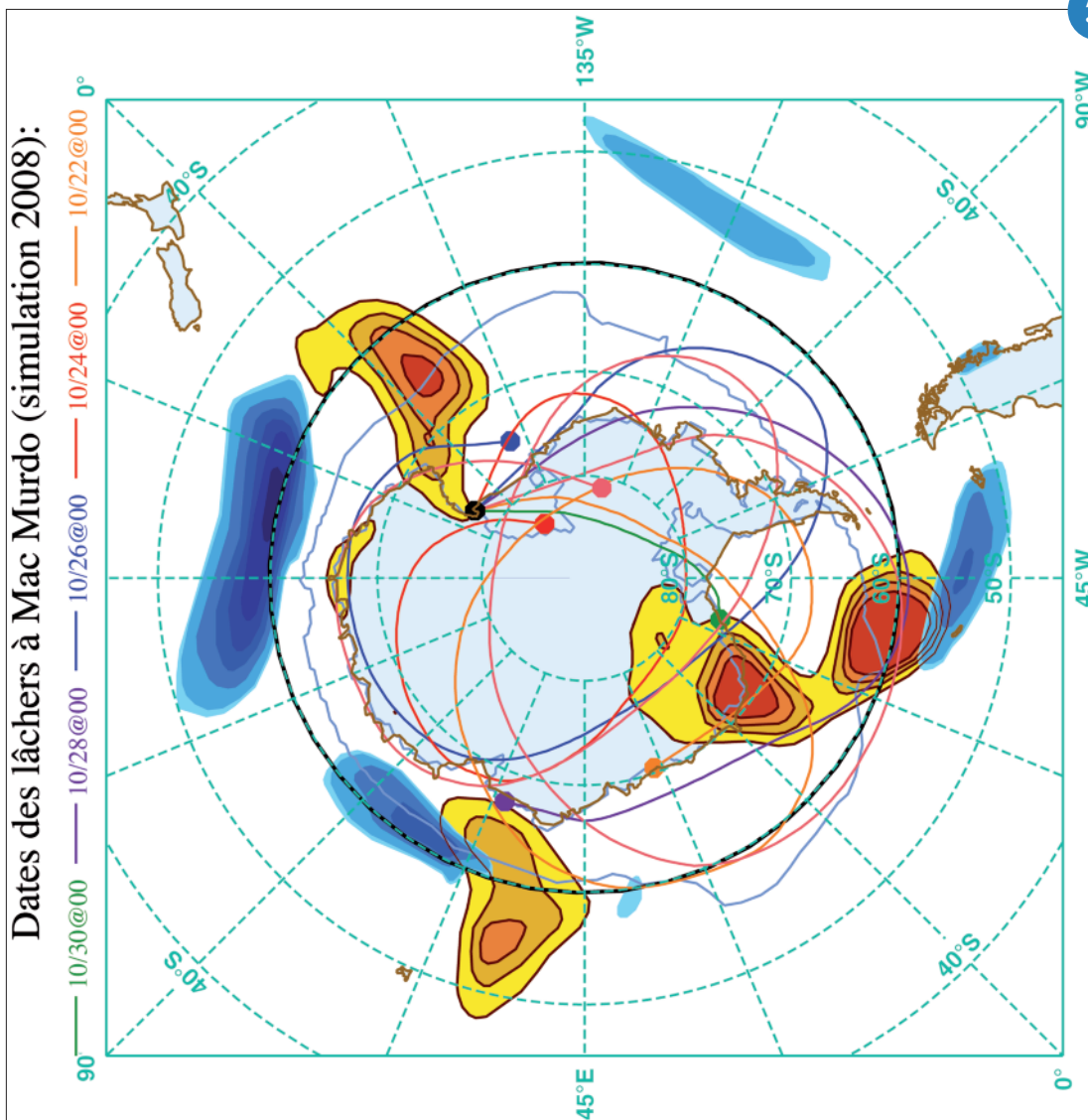
Dans BAMED, la problématique est plus novatrice. Il s'agit d'observer les basses couches au-dessus de la Mer Méditerranée, en amont d'épisodes pluvieux forts (type cévenol). La circulation atmosphérique du bassin ne piège pas les ballons, au contraire ! Il faudra alors déterminer les heures et lieux de lâchers de ces ballons afin qu'ils optimisent leur apport aux systèmes d'assimilation-prévision du temps à méso-échelle. Cette nouvelle génération d'outil associée à des ballons du CNES devrait être utilisée durant la campagne HyMeX. 5

Profil de température, obtenu lors de la campagne, à DomeC, le 20/09/08 à 0hTU et à Dumont d'Urville le 15/09/08 à 12hTU. La courbe en trait noir est le radiosondage, celle en rouge l'analyse avec le modèle opérationnel et celle en vert, l'analyse issue d'un modèle plus adapté pour DomeC.



Simulation de cas CONCORDIASI.

Les zones sensibles (en orange) sont valides le 2008/10/31 à 18 TU et issues de vecteurs singuliers (optimisés sur 24 h). Les trajectoires des ballons stratosphériques sont tracées depuis leur lâcher à Mac Murdo (point noir). Elles sont issues des analyses de vent ARPEGE à 50 hPa. La date de vérification est le 01/11/2008 à 18 TU et le domaine de vérification est le cercle noir (60°S). Le contour bleu clair montre la limite externe de la glace de mer, zone d'intérêt pour CONCORDIASI. En dégradé de bleu, on fait apparaître l'indice de Eady entre 1000 et 300 hPa et calculé sur la période. La position excentrée de ce champ « attracteur » explique le fait que les zones sensibles dynamiques se trouvent ainsi en périphérie du vortex. Dans le cas simulé ici, deux ballons sont positionnés favorablement par rapport aux zones sensibles : en déployant une sonde, on s'attend à ce que ces deux plates-formes influencent particulièrement la prévision à 24 h.



Études environnementales liées à l'atmosphère

En 2008, de multiples travaux de recherche ont été conduits en hydrométéorologie, en océanographie, en nivologie, ainsi que dans les domaines de l'étude des faibles visibilités ou de la modélisation en chimie atmosphérique. On soulignera particulièrement des avancées notables comme la prévision d'ensemble des débits, les actions liées à GEMS et à la vérification des modèles de prévision de la qualité de l'air, les progrès sur notre compréhension du brouillard ...

Hydrométéorologie

Suivi de l'état hydrique des sols : validation des produits satellitaires ASCAT (EUMETSAT) à l'aide de mesures *in-situ*

Le contenu en eau du sol peut être estimé à partir de données satellitaires micro-ondes et mesurées *in-situ* en continu en utilisant des sondes automatiques.

Dans le Sud-Ouest de la France, 12 stations de mesures météorologiques du réseau RADOME de Météo France ont été équipées afin de réaliser des mesures continues de l'eau du sol à différentes profondeurs. Ces stations ont été choisies de manière à former un gradient climatique entre la mer Méditerranée et l'océan Atlantique (projet SMOSMANIA). Les mesures *in-situ*, réalisées depuis fin 2006 avec une fréquence de 12 minutes, sont disponibles en temps réel. Les premières données d'humidité du sol provenant de l'instrument ASCAT sur le satellite METOP (fournies par EUMETSAT) ont été comparées aux mesures d'humidité de surface du réseau SMOSMANIA, d'avril à septembre 2007. Pour la majorité des stations (10 sur 12), des niveaux de corrélations significatifs ont été obtenus entre les produits issus des observations satellitaires et les mesures *in-situ*. Les anomalies de ces différentes séries temporelles ont été calculées afin de s'affranchir des effets saisonniers (voir figure).

En 2008, le réseau SMOSMANIA a été étendu vers l'Est, avec 9 nouvelles stations situées en zone méditerranéenne. L'ensemble des 21 stations permettra de valider les produits du satellite SMOS (de l'Agence Spatiale Européenne), dont le lancement est programmé en 2009.

1

Démonstration du système couplé AROME/ISBA-TOPMODEL sur les crues cévenoles 2008

Au cours de l'automne, les bassins versants cévenols sont souvent concernés par des phénomènes pluvieux intenses qui peuvent engendrer des crues-éclair. La prévision de ces phénomènes n'est pas toujours aisée car sensible à la fois à la prévision des cellules précipitantes et à la réponse des cours d'eau. Pour prévoir les crues rapides, le modèle hydrologique TOPMODEL a été couplé avec ISBA, schéma de surface des modèles météorologiques Meso-NH et AROME. ISBA gère l'interface sol-atmosphère et en particulier les bilans en eau sur des colonnes de sol, alors que TOPMODEL réalise les transferts latéraux de l'eau dans le sol sur les bassins versants. Le ruissellement de sub-surface et le drainage profond prévus sont alors routés vers un exutoire pour en déduire le débit.

Depuis septembre 2008, ce système couplé ISBA-TOPMODEL tourne tous les jours en utilisant en entrée la prévision de 00UTC du modèle AROME pré-opérationnel. L'automne 2008 a été marqué par deux épisodes de pluie intense sur les Cévennes : les 21 et 22 octobre puis les 1 et 2 novembre. Dans les deux cas, la chaîne hydrométéorologique AROME/ISBA-TOPMODEL a permis de simuler de manière satisfaisante les débits des trois principaux cours d'eau Cévenols (Gardon à Ners, Cèze à Bagnols et Ardèche à Vallon Pont D'arc) avec une chronologie de la crue bien simulée et des pics de crue prévus du même ordre de grandeur que ceux observés.

Si ces résultats préliminaires sont encourageants, la prévision de débits reste très fortement liée à celle de la pluie : une erreur sur la localisation d'une cellule pluvieuse peut se révéler très préjudiciable. L'étape suivante sera donc de quantifier cette incertitude en développant une prévision hydrométéorologique d'ensemble.

2

Une assimilation des débits des rivières à l'échelle de la France pour la prévision d'ensemble des débits de la chaîne SIM

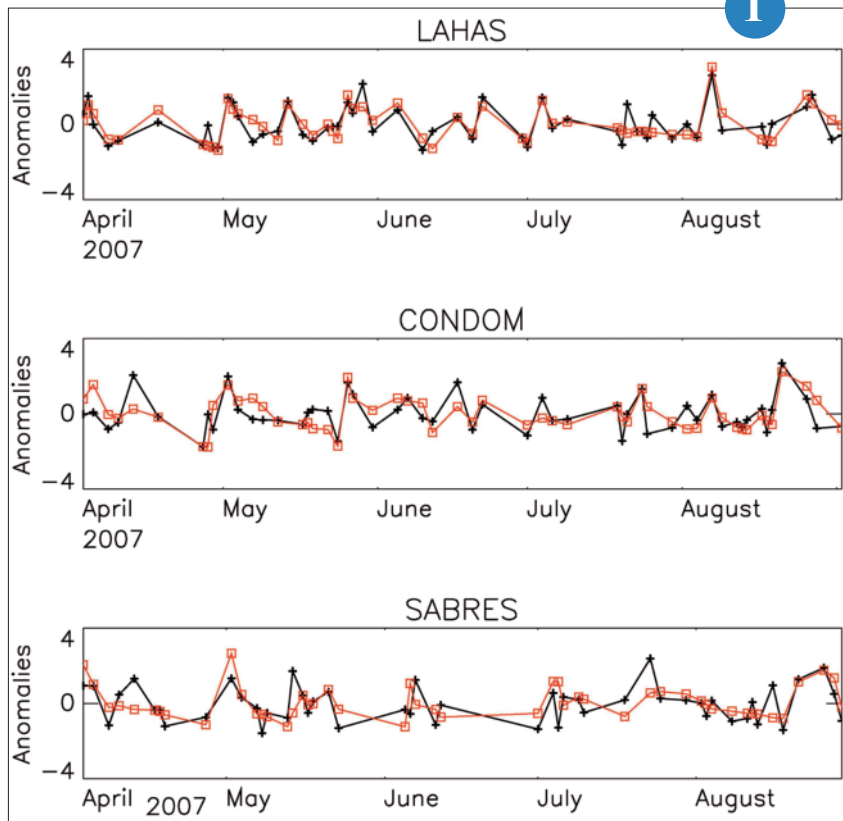
La chaîne hydro-météorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM) permet de simuler les bilans hydrologiques de surface et les débits associés de manière distribuée sur la France. Grâce à cette chaîne, près de 900 débits sont simulés sur des rivières françaises.

Deux chaînes de prévisions d'ensemble hydrologiques basées sur SIM ont été construites, la première utilisant les prévisions d'ensemble météorologiques à 10 jours du CEPMMT, et la seconde les prévisions de la PEARP à 60 heures d'échéance. Chaque membre des prévisions d'ensemble hydrologiques est issu d'une simulation de SIM forcée par un membre des prévisions météorologiques d'ensemble. Ces 2 chaînes ont montré des performances statistiques satisfaisantes, malgré une faible dispersion, le système basé sur la PEARP ayant des meilleurs scores pour les petits bassins et les forts débits.

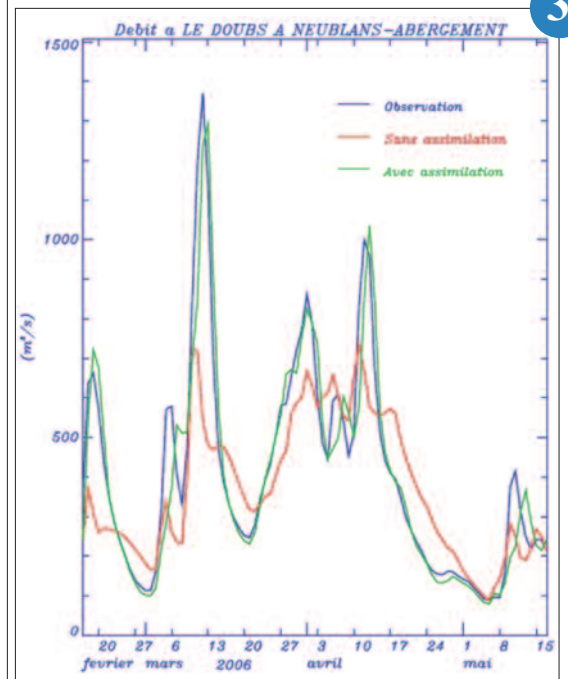
Cependant, dans sa configuration actuelle, SIM n'est à aucun moment recalé par rapport à des débits observés. C'est pourquoi une assimilation quotidienne des débits observés a été implémentée dans SIM. Cette assimilation utilise l'opérateur d'analyse BLUE (Best Linear Unbiased Estimation) et le coupleur PALM du CERFACS, afin d'ajuster l'humidité du sol, paramètre utilisé pour corriger les défauts du modèle ou du forçage atmosphérique.

L'assimilation des débits observés apporte des améliorations significatives sur de nombreuses stations, sauf pour les stations où une nappe souterraine est simulée dans SIM (dans ce cas, le débit est surtout lié à la hauteur piézométrique de la nappe et non à l'humidité du sol). Une nouvelle validation des 2 chaînes de prévisions d'ensemble hydrologiques sera effectuée en utilisant les états initiaux issus de la chaîne avec assimilation, afin d'en quantifier l'impact.

3

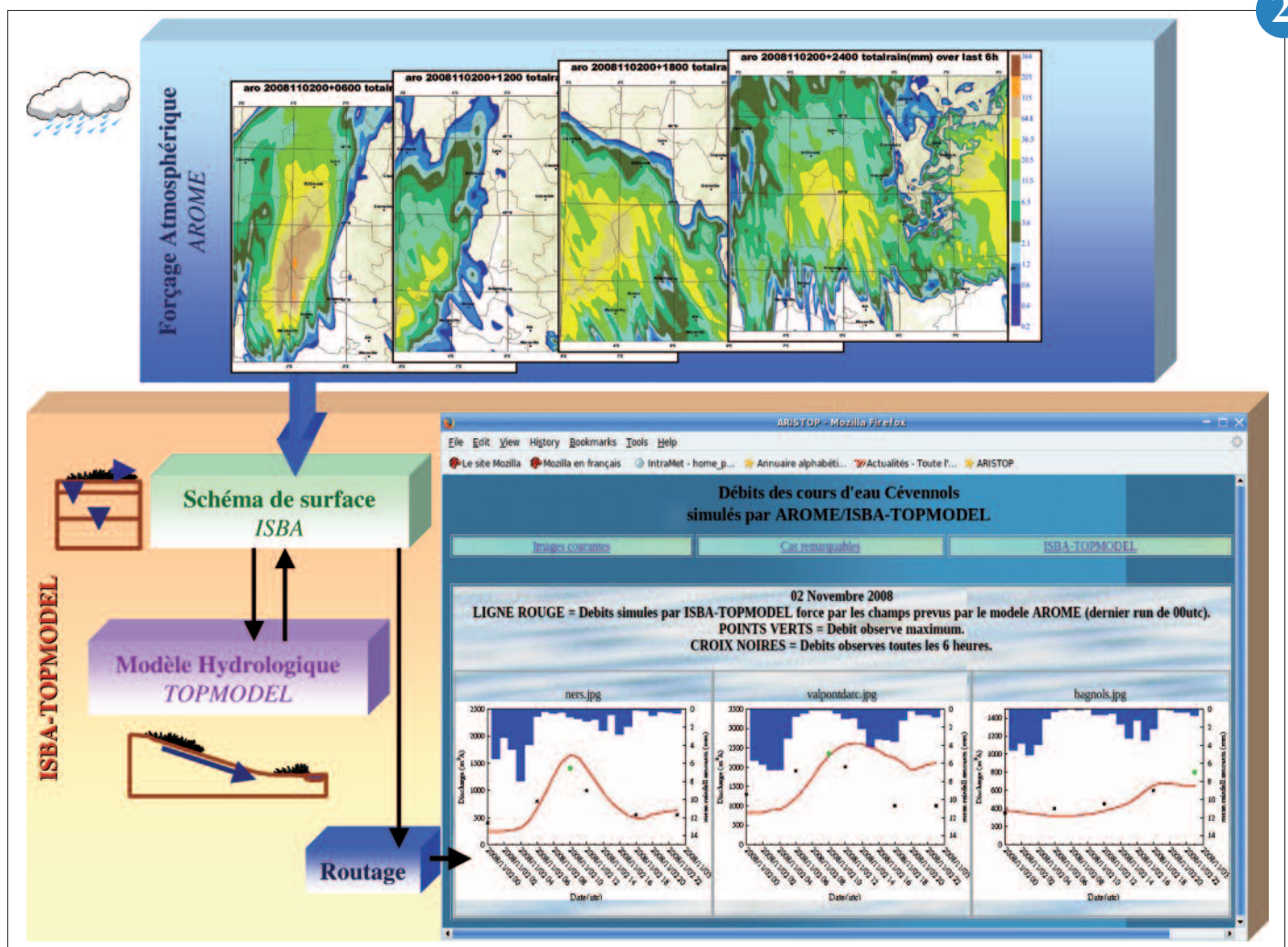


▲ Evolution temporelle des anomalies d'humidité superficielle du sol pour trois stations du réseau SMOSMA-NIA : observations ASCAT (en noir) et in-situ à 5 cm (en rouge) pour les orbites du matin du satellite METOP, du 1^{er} avril au 30 septembre 2007.



▲ Prévion de débits de la chaîne SIM : débits observés (bleu), chaîne SIM de référence (rouge), chaîne SIM initialisée avec des états initiaux issus de l'assimilation de débits (vert)

Principe de la chaîne hydrométéorologique AROME/ISBA-TOPMODEL et résultats pour la journée du 02/11/2008.



La prévision saisonnière hydrologique en France : faisabilité et potentialités

L'eau et sa gestion deviennent un enjeu majeur pour notre société, des courtes échéances jusqu'aux échelles du changement climatique, y compris celle des échéances étendues.

Pour pallier le manque d'information aux échéances saisonnières, une étude sur la faisabilité et les potentialités des prévisions saisonnières hydrologiques en France a été conduite à la Direction de la Climatologie, en collaboration avec le CNRM.

Un chaîne de prévision, utilisant les modules SIM (Safran-Isba-Modcou) et les prévisions du projet Demeter pour mars-avril-mai (période 1971-2001), a été développée démontrant la faisabilité de ces prévisions. Puis la qualité des forçages atmosphériques descendus de l'échelle des prévisions saisonnières (2°5) à celle d'Isba (8km), ainsi que celle des prévisions d'indice d'humidité des sols et du débit des rivières pour 4 bassins versant (Seine, Garonne, Ariège, Durance) a été évaluée.

La prévisibilité des forçages atmosphériques n'est pas dégradée par l'opération de descente d'échelle. Les précipitations totales sont correctement estimées (y compris sur les 4 bassins versants) mais il apparaît une surestimation de la pluie, compensée par une sous-estimation de la neige. L'indice d'humidité des sols prévu laisse apparaître un biais sec important mais une prévisibilité intéressante (ROC supérieurs à 0.7). Les résultats sur les débits sont très contrastés avec des corrélations débits observés/prévus correctes et stables (de 0.6 à 0.7) mais avec un biais sec particulièrement marqué sur la Seine et la Garonne contrairement à l'Ariège et à la Durance (biais raisonnables).

En conclusion, ces prévisions montrent une prévisibilité intéressante et supérieure à celle des forçages atmosphériques. Les développements nécessaires seront donc poursuivis pour aboutir à une production opérationnelle pertinente.

4

Potentialités du système SIM pour la caractérisation des sécheresses géotechniques

Depuis 2000, Météo-France utilise, dans le cadre du dispositif « catastrophes naturelles », les données de bilan hydrique d'un modèle à deux réservoirs pour caractériser les sécheresses géotechniques sur l'ensemble de la France métropolitaine. Le faible nombre de stations (une centaine sur le territoire) disposant de ces données et des normales associées impose l'utilisation d'un zonage large qui, et compte tenu des progrès de spatialisation, ne répond plus en 2008 aux exigences de spatialisation d'une caractérisation à l'échelle de la commune.

La production opérationnelle du système SIM et sa réanalyse sur la période 1958-2008, permettent d'envisager l'utilisation de données spatialisées à résolution 8 km et de leurs normales associées en sortie du schéma de surface ISBA.

Pour mieux prendre en compte l'aléa climatique et se rapprocher des hypothèses du modèle à deux réservoirs, Météo-France a développé une version uniforme d'ISBA. Cette version utilise pour l'ensemble du territoire une paramétrisation unique du couvert végétal et de la profondeur du sol. Les résultats de comparaison des sécheresses identifiées par le modèle à deux réservoirs et par les données issues de la version uniforme de SIM sur une quarantaine de mailles sont très encourageants. De même, la comparaison de la variation temporelle des données issues de SIM uniforme avec des données in situ de 2005 à 2007 sur deux sites expérimentaux instrumentés dans le cadre du projet ANR ARGIC confirme la pertinence de la modélisation.

Météo-France finalisera la mise en place en 2009, du calcul spatialisé des critères de sécheresses géotechniques à partir du Soil Wetness Index (indice d'humidité des sols) issu du modèle SIM uniforme, en liaison avec la DDSC.

5

Vers l'amélioration de l'analyse des risques hydro-météorologiques en région PACA

L'année 2008 aura marqué le démarrage du contrat de plan Etat – Région (CPER) avec la région PACA (Provence-Alpes-Côte d'Azur) portant sur la mise en place d'une plateforme de services sur les risques hydrométéorologiques.

Un des volets très importants du projet est la mise en place d'un réseau de radars en bande X (3 cm de longueur d'onde) visant à compléter la couverture actuelle sur le Sud-Est de la France. Au-delà de l'installation des systèmes radar, le projet a un volet Recherche et Développement très ambitieux avec la mise au point et le test d'une chaîne de traitement polarimétrique multi-radar en bande X permettant de générer à haute résolution spatio-temporelle des produits 2D et 3D de taux de pluie, vent, types d'hydrométéores (grêle notamment) et humidité. Un des objectifs majeurs du projet est de tirer au maximum parti de la redondance d'informations entre radars, notamment pour traiter au mieux les situations de très fortes atténuations par les précipitations.

Une étude de simulation de mesures en bande X a ainsi été réalisée en 2008 en se plaçant dans le cas extrême de l'épisode du Gard et en utilisant les données en bande S du radar de Nîmes, supposé non atténué. L'étude a montré que le phénomène d'extinction complet du signal pouvait survenir dès 30 km (voir figure), ce qui souligne l'importance de penser l'observation en termes de systèmes.

6

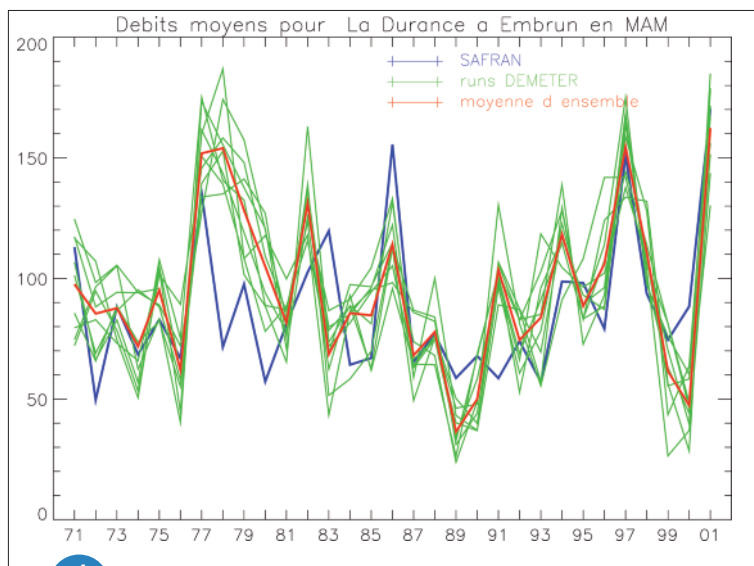
Contribution de Météo-France au projet Saf Hydro : évaluation des produits de précipitations par satellite

Le SAF Hydro, 8^e SAF lancé par Eumetsat en 2005 (consortium de 11 pays), a pour objectif d'élaborer des produits satellitaires permettant d'améliorer la prévision des crues et le suivi de la ressource en eau sur l'Europe. Ces produits satellitaires (précipitations, couverture neigeuse et humidité des sols), qui sont en cours de développement, ont actuellement un statut pré-opérationnel. Ils ont vocation à être utilisés à terme par différents modèles hydrométéorologiques.

Météo-France contribue avec 7 autres services météorologiques nationaux (Pologne, Belgique, Italie, Turquie, Slovaquie, Allemagne et Finlande) à l'évaluation hydrologique des produits de précipitation. Une première étude de sensibilité, utilisant des produits préliminaires de précipitation fournis par le projet, a été menée en 2008 à Météo-France, grâce à l'application hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou (SIM), sur le bassin Adour-Garonne.

Cette validation hydrologique se poursuivra en 2009, permettant ainsi de juger de l'apport éventuel de ce nouveau type de produit de précipitations pour les applications hydrométéorologiques opérationnelles de Météo-France.

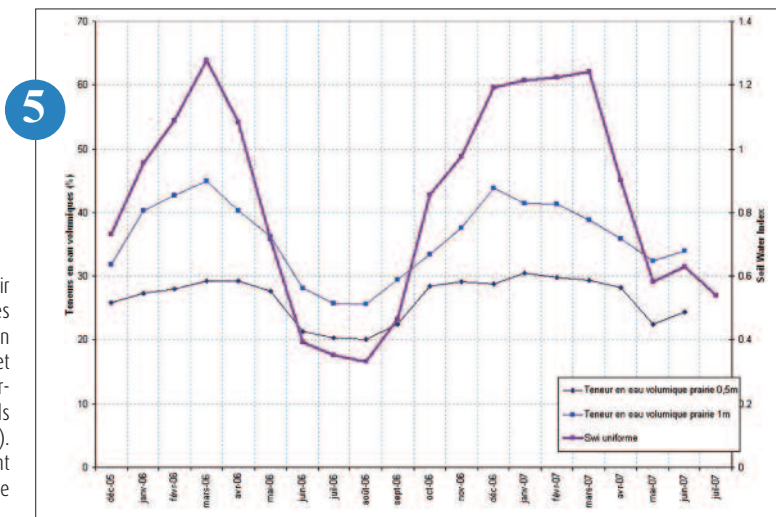
7



4

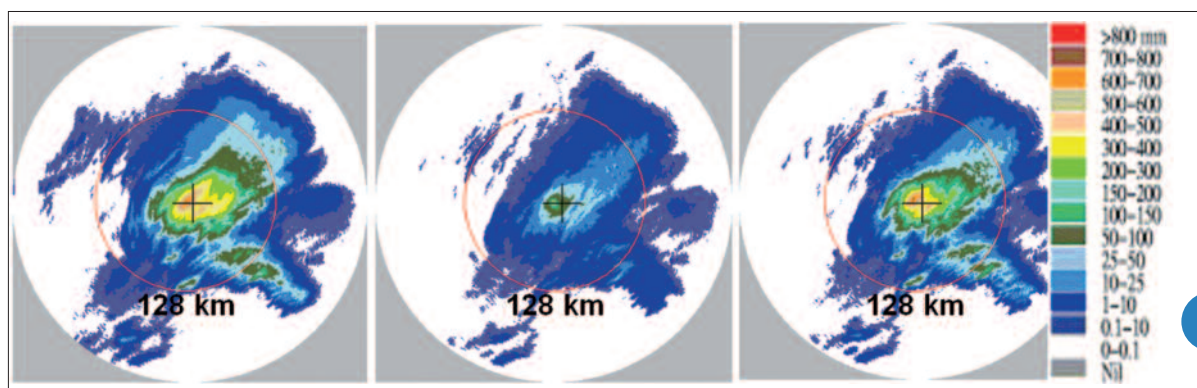
Comparaison des débits (en m^3/s) observés (en bleu) et prévus par la moyenne d'ensemble (en rouge) sur le bassin de la Durance à Embrun pour le trimestre Mars-Avril-Mai sur la période 1971-2001. Outre la représentation correcte de la variabilité interannuelle (corrélation stable ~ 0.6), on peut aussi voir que la dispersion des membres individuels de l'ensemble (courbes vertes) couvre bien la gamme de valeurs de la référence.

Comparaison de la variation des données issues de SIM uniforme avec celle de la teneur en eau du sol mesurée à 0,5m et à 1m au site instrumenté du Deffend (proche de Poitiers) entre décembre 2005 et juillet 2007.

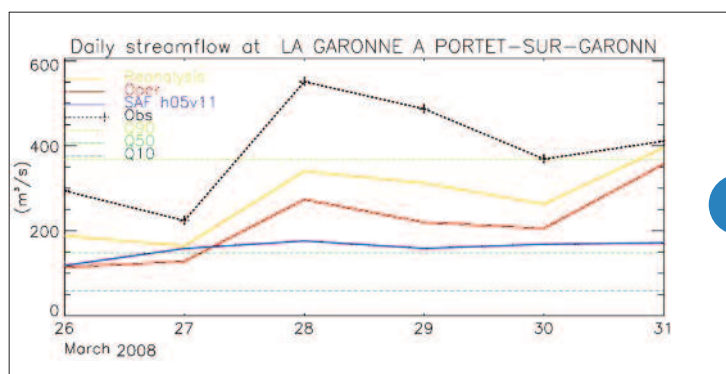


5

De gauche à droite : cumul précipitation de référence, obtenu à partir des données en bande S du radar de Nîmes, sur l'épisode du Gard des 8 et 9 septembre 2002, cumul des données brutes (i.e. atténuées) d'un radar bande X situé fictivement dans la zone de cumul maximum et cumul des données du même radar bande X supposées corrigées parfaitement de l'atténuation par les précipitations sauf pour les pixels éteints (i.e. dont le niveau de signal est descendu au niveau du bruit). On voit très nettement que la correction d'atténuation est absolument indispensable en bande X et que le phénomène d'extinction complète du signal peut avoir un effet non négligeable dès 30 km du radar.



6



Comparaison entre débits quotidiens observés et simulés pour la Garonne à Portet-sur-Garonne, en sortie de la réanalyse SIM, de la chaîne SIM opérationnelle et d'une chaîne SIM utilisant des produits préliminaires du Saf Hydro, sur la période du 26 au 31/03/08.

7

Océanographie (modélisation et instrumentation)

Le programme européen d'observation marine de surface E-Surfmar

Depuis 2003, l'observation météorologique marine de surface est organisée en Europe dans le cadre d'Eucos, programme d'observation composite d'Eumetnet. E-Surfmar, programme dont Météo-France assure la responsabilité, a à sa charge les navires sélectionnés par les services météorologiques européens ainsi que les bouées dérivantes et ancrées.

L'automatisation de l'observation, l'abaissement de ses coûts de production, l'amélioration de sa qualité et la réduction des délais de transmission sont les préoccupations majeures de E-Surfmar. Le système Iridium ayant montré ses potentialités pour la transmission des données, il a été décidé de l'étendre progressivement aux bouées dérivantes et à certaines stations automatiques de navires.

Le nombre d'observations réalisées par des stations automatiques embarquées à bord de navires européens est en augmentation. Près de 1000 observations par jour en moyenne sont ainsi réalisées dans l'Atlantique Nord et la Méditerranée. L'installation de stations «simples» BAROS, mesurant la pression atmosphérique et transmettant leurs données par le système Iridium, a été initiée sur les navires européens qui effectuent des radiosondages automatiques.

Fin 2008, plus de 90 bouées dérivantes, financées par le programme, dont la moitié équipée d'un émetteur Iridium, transmettaient environ 2500 observations de pression atmosphérique et de température de la mer chaque jour. 8

Salinité de surface de la mer

Le CMM est partie prenante dans la validation et l'étalonnage des données du satellite SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity) qui sera lancé au printemps 2009, via le projet GLOSCAL (Global Ocean Salinity Calibration and Validation). Celui-ci, mené en collaboration avec la communauté scientifique nationale et internationale, a pour but l'étude des données de salinité de surface de la mer (données SMOS, données AQUARIUS, et données in situ), paramètre important pour la connaissance du climat.

La récupération en mer à la fin du mois de juin 2008 d'une bouée déployée à l'automne 2007 a permis de vérifier la stabilité du capteur et la pertinence des informations transmises.

Dans ce contexte, des bouées dérivantes équipées de capteurs de conductivité ont été à nouveau déployées au large de l'Amazonie dans le cadre des campagnes AMANDES, dans l'Atlantique Nord lors de la campagne OVIDE et dans le Golfe de Gascogne dans le cadre de la campagne CAROLS.

D'autres bouées de ce type ont été équipées d'une transmission Iridium. A terme, le but est de disposer d'une trentaine de bouées déployées après le lancement du satellite SMOS. 9

Température de Surface de la Mer globale avec METOP

METOP est le premier satellite polaire opérationnel de l'organisation européenne EUMETSAT. Il porte en particulier un radiomètre imageur multispectral classique : l'AVHRR, qui permet des observations de la surface de la terre dans des canaux visible et infrarouge à 1 km de résolution.

Le CMS de Météo-France s'est engagé, dans le cadre du SAF Océan et Glace de Mer d'EUMETSAT, à produire des champs de Température de Surface de la Mer (TSM) à pleine résolution sur l'ensemble du globe dans un délai maximal de 3 heures. Le traitement des données METOP a donc posé d'abord un problème de gestion en temps réel d'un flux important de données. Du point de vue algorithmique, la restitution de la TSM aux basses et moyennes latitudes est assez bien connue au CMS, puisque le Centre traite déjà les données des satellites géostationnaires sur l'ensemble de l'Atlantique. Le traitement des zones polaires a posé par contre un problème nouveau, qui a été abordé en collaboration avec le service météorologique norvégien.

METOP a été déclaré opérationnel en mai 2007 et la production de routine des champs de TSM en mode test a démarré en juillet 2007. Après une phase de validation intensive, indiquant une précision de 0.5 K, le produit TSM a été déclaré opérationnel en septembre 2008. Les données de TSM de METOP sont déjà une contribution importante de l'analyse globale de TSM à échelle fine du Met Office utilisée opérationnellement par le modèle de prévision du CEPMMT. L'analyse des structures thermiques de l'Océan Arctique se poursuivra en 2009. Il faut aussi noter que le CMS constitue en temps légèrement différé une base de données mondiale de validation de la TSM issue de la radiométrie infrarouge, support de développements algorithmiques fondamentaux. 10

Mesure de la température de la mer

Des bouées dérivantes équipées d'une chaîne de thermistances sont utilisées depuis plusieurs années pour l'étude des interactions entre l'océan et l'atmosphère. Les bouées Marisonde mesurent le vent en force et direction, la pression atmosphérique et des températures de la mer en profondeur.

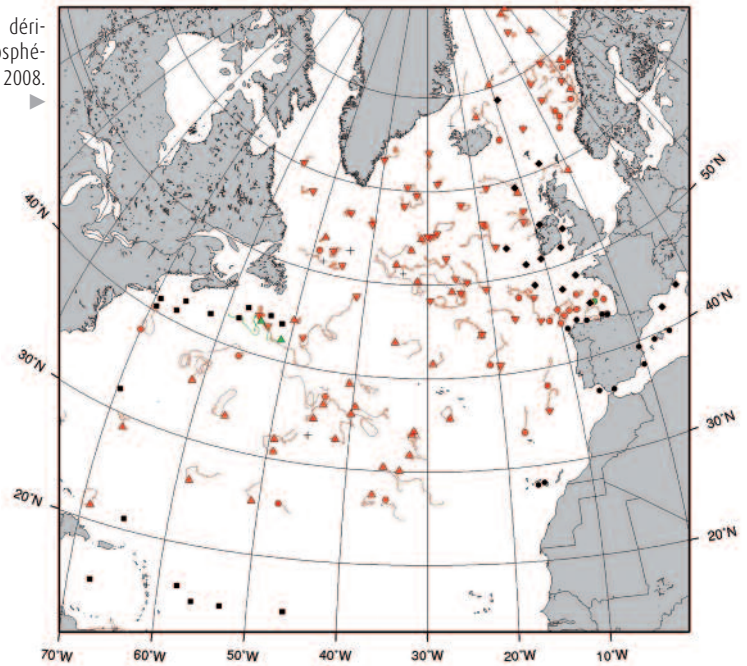
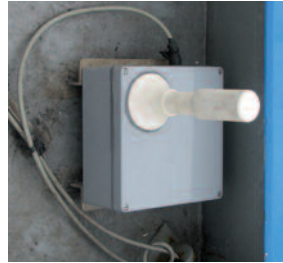
Elles utilisent le système Argos pour la transmission des données et leur localisation. De nouvelles Marisonde sont en cours de réalisation. La chaîne bathythermique de 300 mètres de long comprend 16 sondes de températures et 4 capteurs de pression hydrostatique sur deux «bus». 11

Des travaux sont aussi menés pour adapter une chaîne bathythermique sur les flotteurs SVP. Deux bouées SVP-BTC ont été mises en mer en 2008. L'une est équipée d'une chaîne de 80 mètres de long avec 16 capteurs de température. 11

8

Carte des trajectoires de bouées dérivantes mesurant la pression atmosphérique au cours du mois de novembre 2008.

Station BAROS à bord du Jericho. ▼

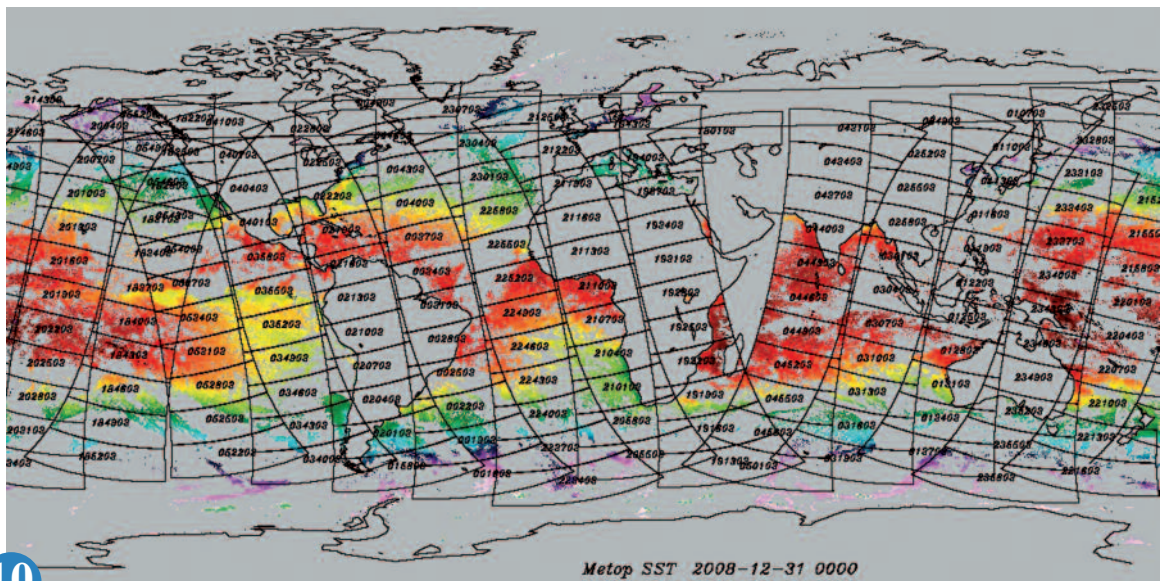


9



▲ Déploiement d'une bouée dérivante.

Champ de température de surface de la mer observé par METOP entre 18h00 le 30 et 6h00 le 31 décembre 2008, la grille superposée au champ de température montre (sauf aux hautes latitudes) les granules de 3 minutes ayant contribué à ce champ. ►

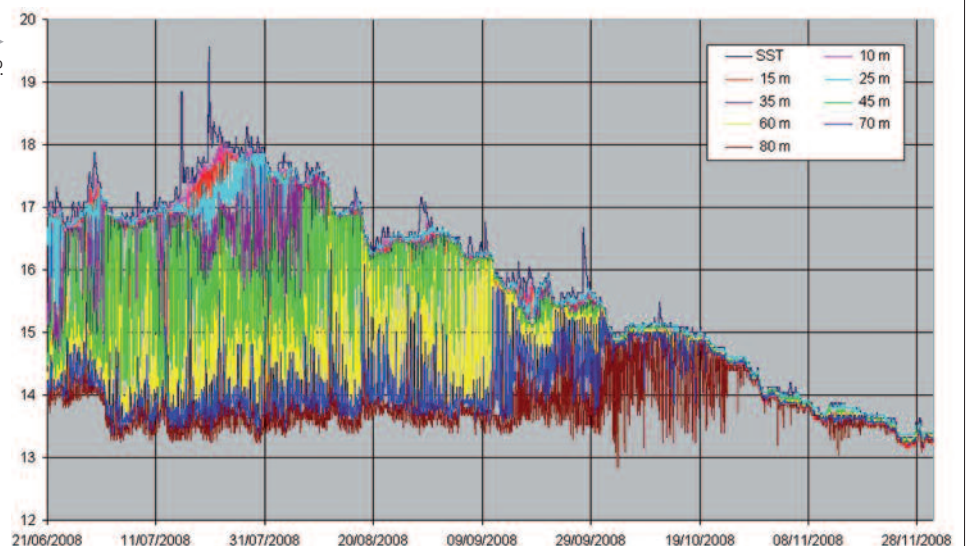


10

11

Mesures de température de la mer ► en profondeur sur flotteur SVP.

Bouée Marisonde. ▼



Les bouées ancrées

Les bouées ancrées constituent des sentinelles avancées en pleine mer, et bien qu'elles demandent des moyens importants tant humains que financiers pour leur conception, leur installation et leur maintenance, elles n'en demeurent pas moins des éléments importants du système d'observation.

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 5500 mètres et deux en Méditerranée sur des fonds de 2700 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 horaires en temps réel par METEOSAT.

Les deux bouées (Brittany, Gascogne) du proche Atlantique ont été remplacées et une nouvelle ligne d'ancrage a été mise en place pour Gascogne. La bouée Golfe du Lion a fait l'objet de deux visites de maintenance. Au large des Antilles, la bouée Martinique a été remplacée et les capteurs aériens de la bouée Guadeloupe ont été changés.

La bouée phare d'Ouessant, plus proche des côtes a, quant à elle, été totalement équipée de panneaux solaires et remise à poste à l'autome.

Les bouées ancrées atlantiques ont subi des conditions très sévères avec des vagues de plus de 15 mètres le 8 décembre 2007 et le 10 mars 2008. Une bouée anglaise similaire a enregistré des vagues significatives de plus de 18 mètres lors de la tempête de décembre 2007, ce qui est un record mondial. 12

Le réseau PIRATA

La phase "pilote" du réseau "Prediction and Research Moored Array" (PIRATA) dans l'Atlantique Tropical est terminée. L'extension du réseau s'est poursuivie en 2008 avec 17 mouillages de surface et un mouillage sub-surface d'ADCP. La préparation des ancrages, le traitement et le contrôle des données sont faits par les États-Unis. Le temps « bateau » et le personnel pour la maintenance des mouillages sont fournis par le Brésil, la France et les États-Unis. La contribution française est faite par l'IRD en collaboration avec Météo France, le CNRS et l'IFREMER dans le cadre de CORIOLIS.

Le taux de retour des données « temps réel » en 2008 pour PIRATA est de l'ordre de 80 %. Ce taux a été affecté par les actes de vandalisme qui se produisent dans le Golfe de Guinée et l'annulation de la maintenance du mois d'avril 2008 qui devait être faite par le navire américain Ron Brown sur les bouées de l'extension du réseau vers le Nord Est. Ces mouillages ont donc passé plus d'un an sans intervention.

Une mission de maintenance a eu lieu entre les mois de mars et mai 2008 avec le navire Antares du Brésil. Une seconde mission s'est déroulée au mois de septembre avec le bateau français Antea. Une troisième mission a été faite par l'Antea affrétée par la NOAA en octobre en remplacement des jours de mer du Ron Brown.

Les données PIRATA contribuent aux efforts de recherche pour l'étude du rôle des processus océanique et atmosphérique qui affectent la variabilité climatique dans l'Atlantique tropical à l'échelle saisonnière, annuelle et à plus long terme. 13

Marée interne : du laboratoire à l'océan

Les ondes internes, anomalies de densité se propageant dans un milieu stratifié, interviennent dans de nombreux processus aussi bien dans l'atmosphère que dans l'océan. Elles font intervenir des échelles spatiales et temporelles telles que leur mesure *in-situ* est difficile et que leur représentation explicite dans les modèles numériques n'est possible que pour des domaines très limités. La simulation physique constitue de ce fait un outil important pour améliorer notre compréhension des phénomènes complexes associés à ces ondes, au bénéfice direct de la modélisation numérique.

Dans l'océan, le mélange turbulent permettant d'entretenir la circulation générale océanique résulterait en grande partie du déferlement de ces ondes. En collaboration avec le Laboratoire d'Aérodynamique, des expériences de laboratoire sont menées sur ce thème dans l'équipe de simulation physique du CNRM. L'objectif est de quantifier précisément le bilan d'énergie de la marée interne générée sur une dorsale océanique. L'originalité de l'approche réside dans la synergie entre simulation physique, modélisation numérique et mesure *in-situ*. La simulation physique donne accès à un jeu très original de données impossible à collecter dans l'océan. Le modèle numérique Symphonie, développé au Laboratoire d'Aérodynamique, permet en retour de faire le lien entre cette simulation physique et l'échelle océanique.

A terme, ces travaux permettront d'améliorer notre compréhension du fonctionnement de la circulation thermohaline. Ces résultats auront donc une portée importante pour la recherche sur le climat, mais également de façon générale pour la modélisation des ondes internes dans l'océan et dans l'atmosphère. 14

Un nouveau modèle de vagues de 3^e génération à Météo France

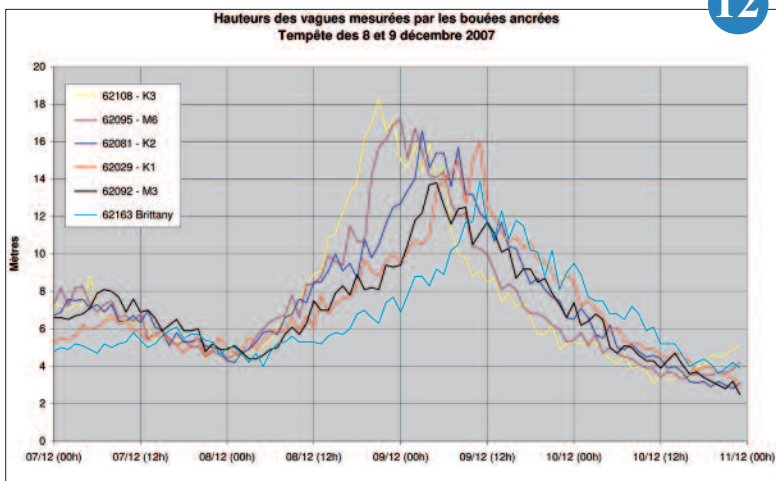
Grâce aux progrès de la modélisation numérique et des techniques d'assimilation associés à l'utilisation de données issues de nombreux capteurs spatiaux, la précision des analyses et des prévisions de vents de surface à l'échelle globale et régionale s'est considérablement améliorée durant ces dernières années. Dans le même temps, des progrès ont été réalisés dans le domaine de la modélisation des vagues et dans l'utilisation de données issues de capteurs spatiaux. Jusqu'à présent, tous ces efforts ont permis de répondre de façon satisfaisante à de nombreux besoins civils et militaires, même si les

scores n'étaient pas totalement homogènes avec des biais significatifs dans les zones tropicales par exemple, ou pour les fortes valeurs de hauteur significative des vagues. Des travaux importants ont été réalisés ces dernières années par la communauté scientifique internationale pour mieux comprendre et paramétrer les mécanismes de dissipation des vagues avec des avancées récentes grâce notamment aux efforts du SHOM et de l'IFREMER.

Dans le cadre du projet intitulé « Amélioration de la modélisation de la houle » cofinancé par le SHOM, ces travaux doivent déboucher sur la mise en place début 2009

d'un nouveau modèle de vagues de 3^e génération à Météo-France (MFWAM). Ce nouveau modèle intégrera les nouvelles données Jason2, complétant ainsi les données fournies en temps réel par les altimètres radar des satellites Jason 1 et ENVISAT.

D'ici la fin 2009, les données issues du Radar à Ouverture Synthétique apporteront également des informations sur la direction et la période de la houle et seront assimilées dans le modèle MFWAM grâce aux travaux réalisés à Météo-France, avec le soutien du CNES et du SHOM. 15

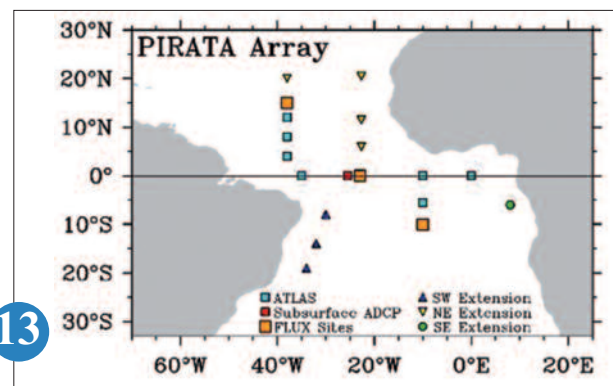


▲ Hauteurs des vagues mesurées par des bouées ancrées en décembre 2007.

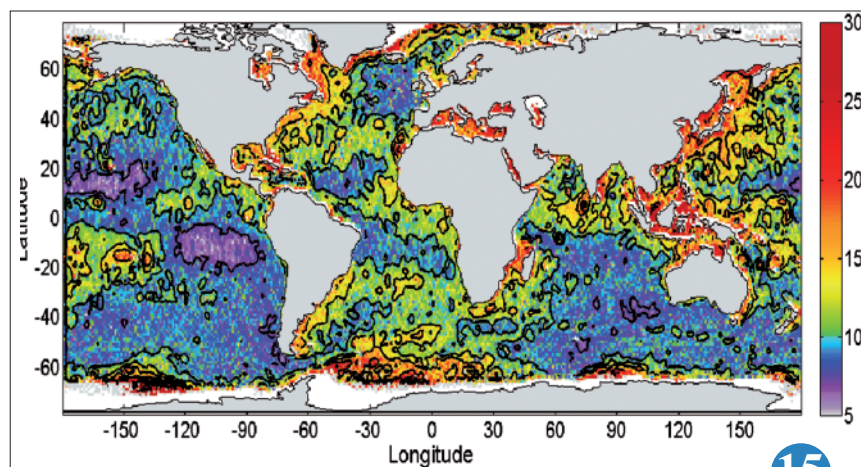


◀ Préparation du remplacement d'une bouée aux Antilles.

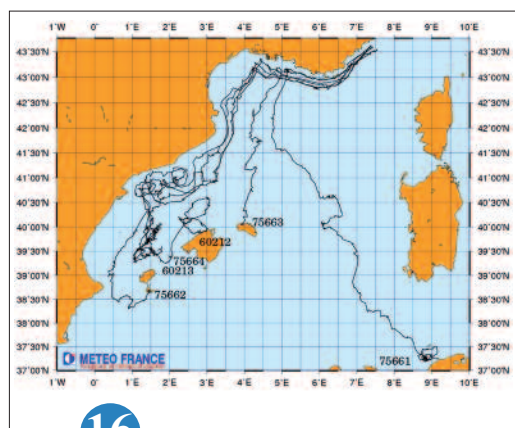
Réseau PIRATA.



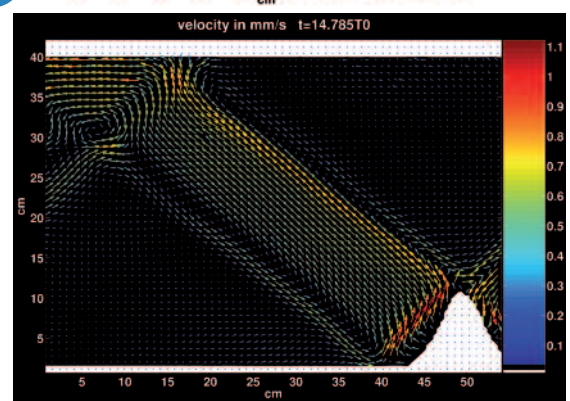
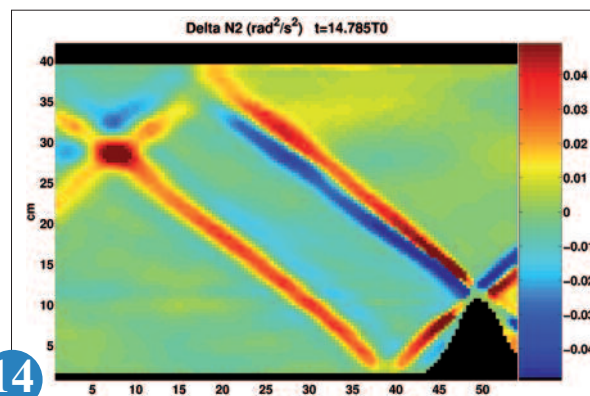
◀ Carte représentant l'erreur quadratique moyenne normalisée de la hauteur significative des vagues du futur modèle MFWAM, sur une période d'un an, par comparaison aux données des altimètres Jason, ENVISAT et GFO.



Expérimentation en Méditerranée: trajectoires des flotteurs du 10 octobre 2007 au 6 décembre 2007



Modification de la stratification en densité (image de gauche) et vitesse (image de droite) dans un champ d'ondes internes générées sur un mont océanique dans des expériences menées au laboratoire de mécanique des fluides du CNRM.



Intégration des courants issus de l'océanographie opérationnelle dans le modèle de dérive de Météo-France

Dans le cadre de ses responsabilités nationales et internationales, Météo-France met en œuvre le modèle Mothy de prévision de dérive. Il associe un modèle d'océan simplifié (calcul du courant en réponse au vent) et un modèle de comportement du polluant (ou d'objet) dans l'environnement marin. Or, dans les zones mal mélangées, turbulentes ou encore soumises à de forts courants permanents, comme c'est le cas par exemple en

Méditerranée, la simplicité de Mothy ne lui permet pas de rester performant. En collaboration avec Mercator-Océan et le Legos-CNRS, Météo-France cherche donc à apporter un « forçage océanique » supplémentaire issu des systèmes d'océanographie opérationnelle. Une première étude vient de montrer que la bonne description de la circulation océanique tri-dimensionnelle, en particulier le positionnement des courants et des

structures méso-échelles dans les systèmes Mercator, joue un rôle déterminant sur les résultats et qu'il est possible d'utiliser un tel forçage dans les zones de forts courants, en régime stable, avec un assez bon niveau de confiance.

Une thèse a d'ores et déjà démarré pour prolonger cette étude et caractériser le potentiel de l'océanographie opérationnelle à servir des applications de dérive.

Environnement atmosphérique

Impact des aérosols sur le cycle de vie du brouillard

Les brouillards sont typiquement des phénomènes météorologiques de petite échelle. Ils sont constitués de fines gouttelettes se formant dans les basses couches de l'atmosphère où les concentrations d'aérosols sont les plus élevées. Il est maintenant bien admis que les aérosols servent de noyaux de condensation (CCN) sur lesquels l'eau peut ou non se condenser en fonction de la taille et de la nature chimique de l'aérosol.

Cette étude s'appuie sur la Période d'Observation Intensive 13 (18-19 février 2007) de la campagne ParisFOG (hiver 2006-2007) durant laquelle un brouillard dense a été observé. Cet épisode de brouillard a la particularité de s'être développé dans un environnement fortement pollué. Les observations recueillies permettent de mieux comprendre les interactions entre les aérosols et les gouttelettes de brouillard et sont utilisées afin d'améliorer les paramétrisations physiques des modèles numériques de prévision.

Cela a permis d'évaluer la sensibilité de l'activation de l'aérosol au taux de refroidissement, à la concentration, à la taille et à la composition chimique des particules. Il a été ainsi possible de montrer l'existence d'une concentration critique en aérosol (dépendante du taux de refroidissement, de la taille et de la composition chimique de l'aérosol) à partir de laquelle la présence d'aérosol en trop grande quantité inhibe la formation du brouillard dense (visibilité inférieure à 200m), mais favorise les conditions de brume (visibilité entre 1km et 5km). 17

Exercice d'évaluation pour le modèle TEB

En 2008, le modèle TEB (Town Energy Balance), dédié au calcul des échanges d'énergie entre les surfaces urbaines et l'atmosphère, a été évalué sur la campagne de mesures CAPITOL menée sur Toulouse entre 2004 et 2005.

Alors que les mesures de bilan d'énergie ont permis de mettre en évidence l'importance du dégagement de chaleur par les activités humaines (chauffage domestique principalement) en zone urbaine pendant la période hivernale, elles ont aussi permis d'évaluer la capacité du modèle TEB à reproduire ce flux pour l'automne et l'hiver. En effet, le terme de chauffage, fortement dépendant des conditions météorologiques, est paramétré dans le modèle et n'avait jamais pu être évalué. Le résultat est très satisfaisant pour une première évaluation puisque le modèle est capable de reproduire ce terme à 5% près pendant la période automnale et 25% pendant la période hivernale.

Une intercomparaison de modèles a ensuite été menée sur la restitution des flux infrarouges. Cinq modèles issus des laboratoires de l'ONERA, de l'ECN, du CESBIO, du CERMA et du CNRM ont été comparés d'abord sur deux cas idéalisés de canyon urbain construit à partir des données de CAPITOL puis sur le quartier du site de mesure. TEB s'est montré à la fois très performant dans la restitution des flux infrarouge pour les cas idéalisés notamment face au modèle de l'ONERA, le plus complet dans ce domaine, avec lequel il s'écarte de moins de 5%, mais également à l'échelle du quartier.

Le CNRM va continuer à travailler sur l'amélioration du calcul du dégagement de chaleur associé au chauffage mais inclura aussi un calcul du terme associé à l'usage des climatiseurs dont les conséquences sont sensibles en période de canicule. 18

Poursuite des développements sur la prévision du brouillard pour les aéroports

La prévision des nappes de brouillard ou nuages bas a une grande importance pour les plates-formes aéroportuaires, car les conditions de faible visibilité déterminent la fréquence des atterrissages et décollages. Le système COBEL-ISBA (développé conjointement avec le Laboratoire d'Aérodynamique) est un modèle numérique unidimensionnel de couche limite. Il fournit des prévisions à 8 heures d'échéance et est utilisé de façon opérationnelle à Paris-Charles de Gaulle depuis 2005 et à Lyon-St Exupéry depuis octobre 2008. Le modèle est également en cours de validation à Paris-Orly.

La prise en compte des conditions initiales est un élément essentiel dans la prévision du brouillard. C'est pourquoi COBEL-ISBA prend en compte des données issues d'un système d'observation local spécifique dans son système d'assimilation de données. L'optimisation de ce système constitue un axe de recherche essentiel pour améliorer les performances de COBEL-ISBA. Un nouvel algorithme d'assimilation (filtre de Kalman d'Ensemble) a été mis en œuvre. Il améliore significativement la qualité des prévisions de brouillard, tant pour la formation (voir figure) que pour la dissipation.

Une autre problématique est que le coût du système d'observation local dédié installé sur les trois principaux aéroports français ne permet pas d'envisager l'utilisation du système dans sa configuration actuelle sur des aéroports de taille moyenne. Des tests préliminaires ont montré un comportement satisfaisant du Filtre de Kalman avec des jeux d'observations locales réduits. Ces résultats encourageants ouvrent la voie à de nouvelles applications, les travaux afférents à ce sujet seront donc poursuivis en 2009. 19

Couplage de Mothy et de Perle pour l'étude de la diffusion des effluents

En cas d'accident maritime d'un chimiquier ou d'un gazier, les gaz éventuellement émis à partir du navire ou de nappes flottantes de produit déversé en mer peuvent présenter des risques pour les intervenants et les populations côtières. Dans le cadre du projet ANR GALERNE qui s'intéresse à ce problème, Météo-France a étudié la dispersion des effluents en champ « lointain », à partir de quelques et jusqu'à une centaine de kilomètres du sinistre.

Les modèles de dérive de nappes en mer MOTHY et de dispersion atmosphérique PERLE ont été couplés pour examiner la dispersion de gaz s'évaporant de nappes flottantes dérivantes. Le système obtenu a

permis d'évaluer l'impact d'un accident fictif provoquant le déversement de 2500T de xylène en Manche. Deux rejets ont été envisagés, un rapide sur 15mn et un long sur 24h, dans des conditions météorologiques et océanographiques variées. Les simulations indiquent que le polluant en mer ne devrait pas dériver sur plus de 10km avant sa disparition du milieu marin par évaporation et que les niveaux de concentration induits dans l'atmosphère devraient rester inférieurs au seuil d'effet réversible indiqué par l'INERIS.

Des simulations PERLE ont aussi été effectuées pour estimer les conséquences d'un rejet direct depuis le navire dans l'atmosphère de 3600T d'ammoniac. Des effets

possiblement graves ont été mis en évidence en termes d'impact sanitaire. Ainsi, sur une situation météorologique propice à la stagnation du polluant, le seuil ERPG de niveau 3 est dépassé durant 3h jusqu'à 30km du navire ; le seuil ERPG-3 est la concentration maximale en-deçà de laquelle on estime que presque tout individu peut être exposé jusqu'à 1h sans ressentir ou développer des effets sanitaires pouvant être mortels.

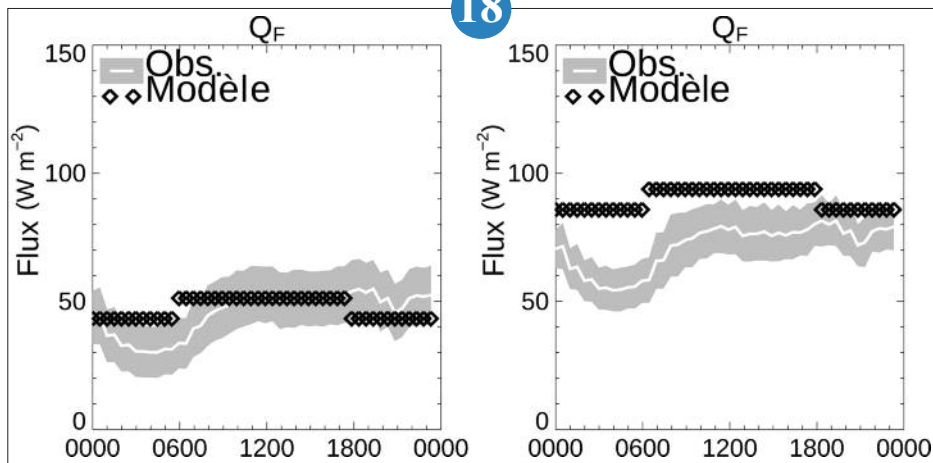
Les travaux menés dans GALERNE ont permis de renforcer les connaissances sur le comportement d'effluents chimiques et l'expertise sur les outils de modélisation de la dispersion, mises en œuvre par Météo-France en cas d'accident. 20

17



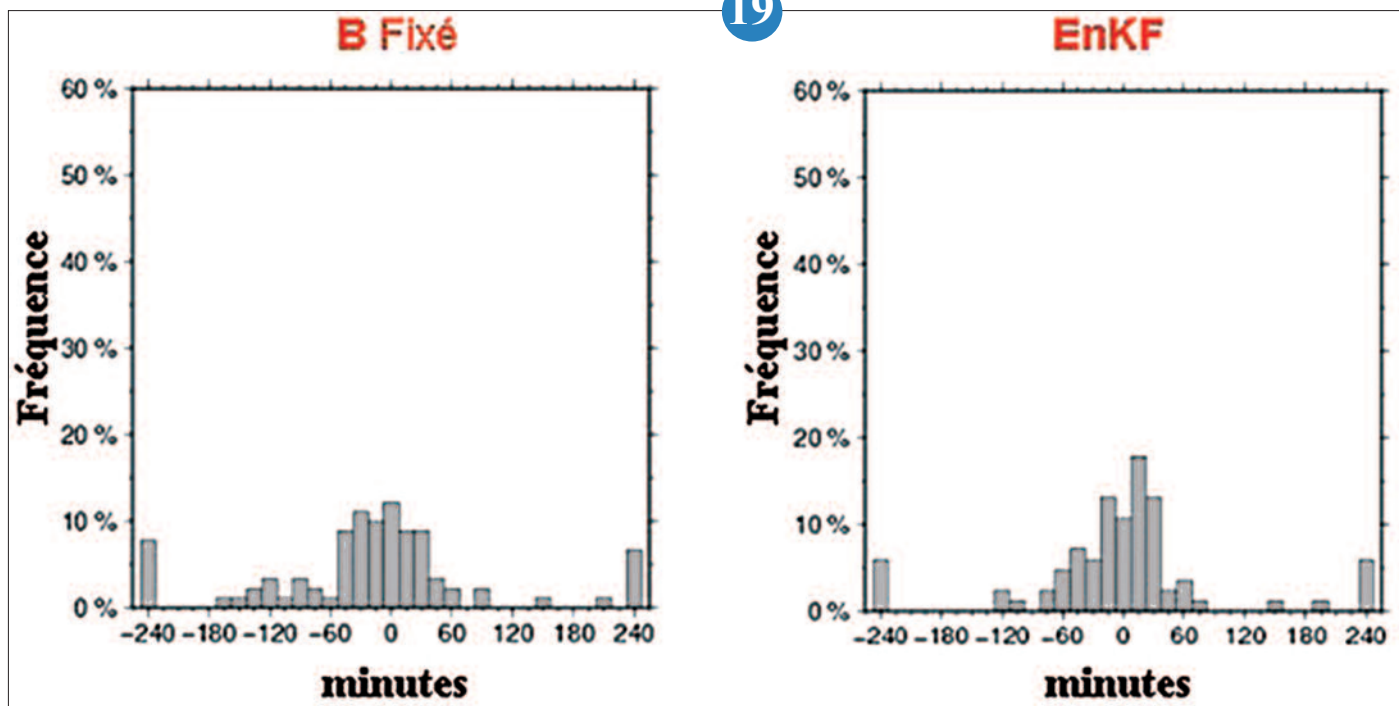
▲ Dispositif expérimental de prélèvement des aérosols et des gouttelettes de brouillard.

18



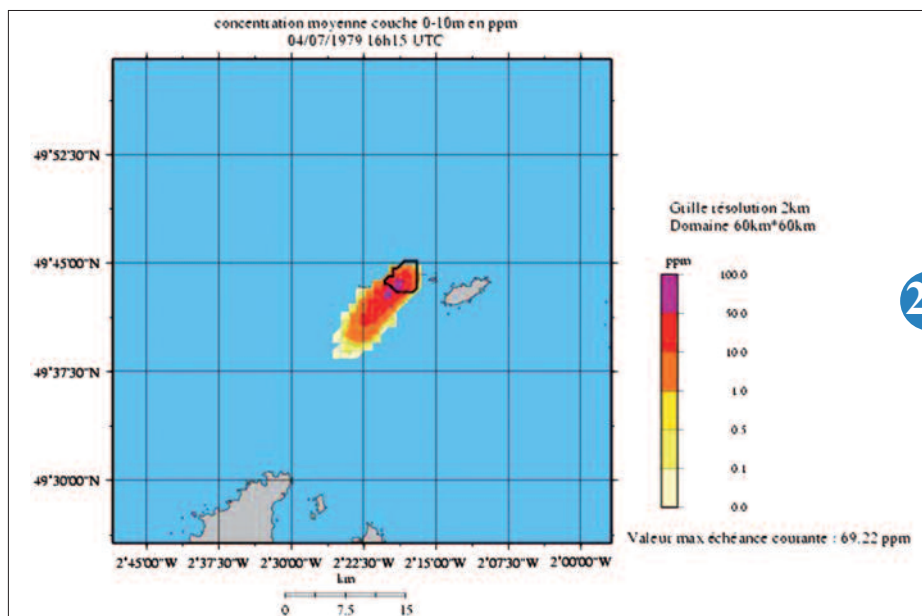
▲ Cycle journalier moyen des dégagements de chaleur par l'activité humaine (Q_F) observé sur le site de mesure de la campagne CAPITOUL (courbe blanche et écart type en grisé) et reproduit par le modèle TEB (losanges noirs) en automne (à gauche) et en hiver (à droite).

19



▲ Erreur (en minutes) sur la prévision de l'heure de formation du brouillard, sur les 15 jours de la situation FOG, système d'assimilation opérationnel à gauche, modifié à droite. Une erreur négative indique une formation du brouillard prévue trop tôt.

20



◀ Simulation couplée MOTHY-PERLE sur un déversement fictif de 2500t de xylène en 15mn. Le trait noir délimite les bords de la nappe de polluant à la surface de la mer 1h15 après le début du rejet ; les couleurs indiquent les niveaux de concentration dans l'atmosphère.

Chimie atmosphérique et qualité de l'air

Le couplage entre MOCAGE et IFS dans le cadre du projet GEMS

Un des principaux objectifs du projet GEMS est de créer un système opérationnel européen de suivi et prévision de la chimie atmosphérique à l'échelle globale incluant les gaz à effet de serre, les gaz réactifs et les aérosols et qui tire parti de l'assimilation des observations chimiques par télédétection.

IFS, le modèle de prévision numérique du temps du CEPMMT, peut prendre en compte le transport de traceurs chimiques et assimiler les observations par satellite des espèces clés (CO, O₃, NO₂...). Mais il ne contient pas de modélisation des autres processus gouvernant la composition de l'atmosphère (réactions, émission, dépôt). Une première approche pour étendre les possibilités d'IFS, a été de le coupler à des modèles spécialisés ou CTMs. Dans le système couplé, IFS envoie les données météorologiques au CTM qui fournit à IFS les termes source et puits des traceurs. La synchronisation des deux modèles tournant en parallèle et les échanges de données sont assurés par le logiciel OASIS4 du CERFACS.

Le CTM MOCAGE a été couplé à IFS et le système résultant utilisé sur plusieurs périodes test. Son utilisation opérationnelle n'est cependant pas immédiate en raison du coût informatique et du manque d'efficacité de MOCAGE sur la machine du CEPMMT. Néanmoins, avec un CTM plus léger, la faisabilité de l'approche a été démontrée et le bénéfice apporté par l'assimilation de données chimiques satellitaires mis en valeur. Le projet MACC qui démarre en juin 2009 prendra la suite de GEMS avec l'objectif de déboucher sur des services opérationnels « GEMS atmosphère » (2012 et au-delà). Des évolutions du système seront testées, notamment l'implantation dans IFS des modules chimiques des CTMs (dont MOCAGE), dans le but d'obtenir une cohérence parfaite entre les traceurs et la dynamique, ainsi qu'une meilleure efficacité d'exécution.

21

Assimilation de colonnes de CO déduites de IASI dans MOCAGE-PALM

Le monoxyde de carbone (CO), avec sa durée de vie de quelques semaines à quelques mois, est un excellent traceur de la pollution à grande échelle. Les feux de biomasse, dont la combustion est incomplète, ainsi que les activités anthropiques (industrie, transport,...) sont les principales sources de CO. En outre, à travers sa réaction avec le radical OH, le CO produit de l'ozone, un des principaux polluants troposphériques avec un impact sanitaire avéré.

Depuis 2000, l'instrument MOPITT à bord du satellite Terra mesure le profil de CO, avec plusieurs informations sur la verticale dans la troposphère. En 2008, de nouvelles données de CO, issues de l'instrument IASI installé à bord de MetOp, sont devenues disponibles. Ces données IASI, sous forme de colonnes verticales, couvrent la terre deux fois par jour. L'impact de ces colonnes sur les distributions 3D du CO est étudié par assimilation dans le système 3d-FGAT MOCAGE-PALM. Les profils verticaux obtenus sont évalués par comparaison avec les mesures de l'instrument MOPITT, dont la qualité a été caractérisée par rapport à des observations in situ indépendantes.

Une conclusion de cette étude est que l'assimilation de données de colonnes de CO issues de IASI montre sa capacité à contraindre le modèle à l'échelle planétaire, en particulier pour les différentes structures associées aux transports intercontinentaux de pollution. Combinant les informations du modèle et des observations, l'assimilation permet de reconstituer la structure verticale du CO. L'intérêt est majeur car IASI est à bord d'un satellite opérationnel, ce qui garantit la disponibilité des données en temps réel et la continuité des mesures sur la prochaine décennie. Nos travaux visent maintenant à quantifier l'apport en information pour les basses couches troposphériques.

22

GEMS : vérification systématique des prévisions de qualité de l'air sur l'Europe

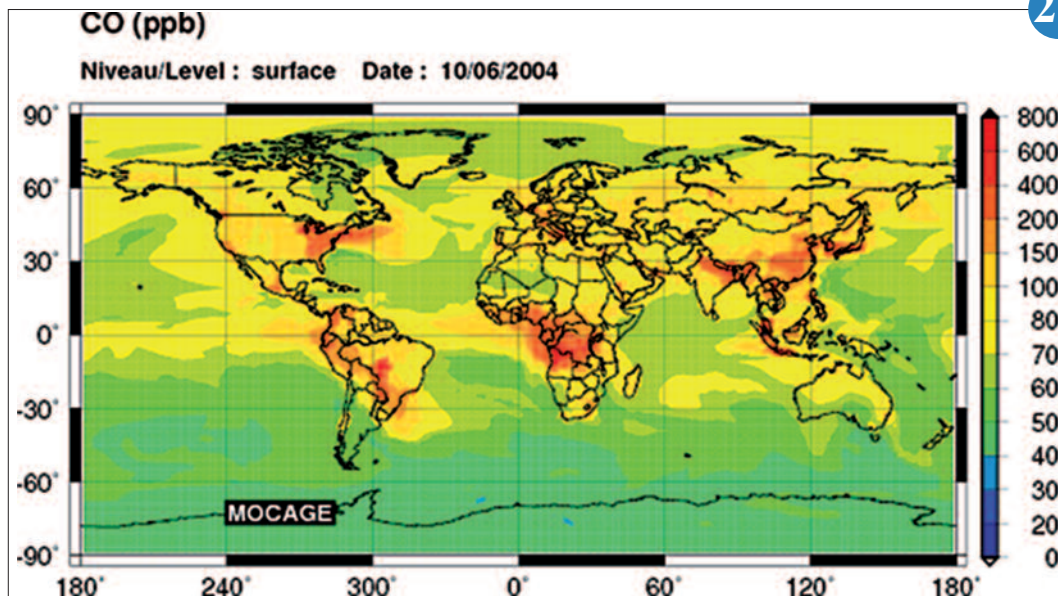
En 2008, le projet GEMS est passé dans un mode pré-opérationnel pour la prévision de qualité de l'air sur l'Europe. Quotidiennement, les prévisions à 72h de 10 instituts sont centralisées et mises à disposition des utilisateurs sur internet (<http://gems.ecmwf.int>) ; elles servent également de base à l'élaboration de produits de prévision d'ensemble, ce qui constitue une première mondiale dans le domaine.

Des conventions ont été passées dans une quinzaine de pays européens afin de disposer en temps quasi-réel d'observations à pas horaire des principaux polluants : ozone, PM₁₀, oxydes d'azote, dioxyde de soufre et monoxyde de carbone. Ce sont des mesures sur plus de 1000 sites qui sont ainsi concentrées quotidiennement ; c'est une base de données sans équivalent pour réaliser des analyses et évaluer les prévisions de qualité de l'air à l'échelle de l'Europe, comme cela se fait depuis plusieurs années sur la France dans le cadre de Prév'Air.

Les diagnostics de vérification des prévisions sont calculés systématiquement par le CEPMMT, offrant aux utilisateurs la capacité d'évaluer au jour le jour la qualité des prévisions individuelles et des produits d'ensemble, en fonction du temps, des différents polluants, ou des échéances. L'erreur quadratique moyenne de prévision de l'ozone pour l'automne 2008 est ici présentée ; le modèle MOCAGE du CNRM obtient parmi les meilleurs scores. Contrairement à la prévision météorologique, la qualité des prévisions dépend peu de l'échéance et beaucoup plus de l'heure de la journée, reflétant l'origine des principales incertitudes (turbulence, émissions,...).

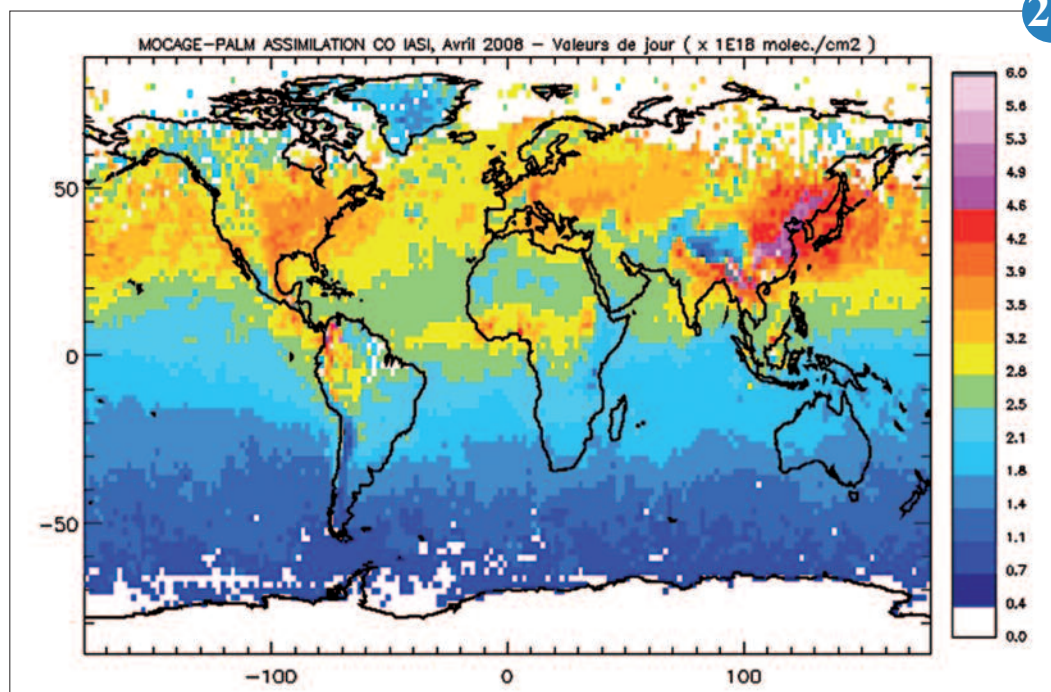
Ces prévisions et leur évaluation systématique seront poursuivies jusqu'à la fin de 2011 dans le cadre du projet MACC, qui succèdera à GEMS au début juin 2009.

23



21

◀ Moyenne journalière le 10 juin 2004 de la concentration surfacique de CO obtenue avec le système couplé IFS-MOCAGE.



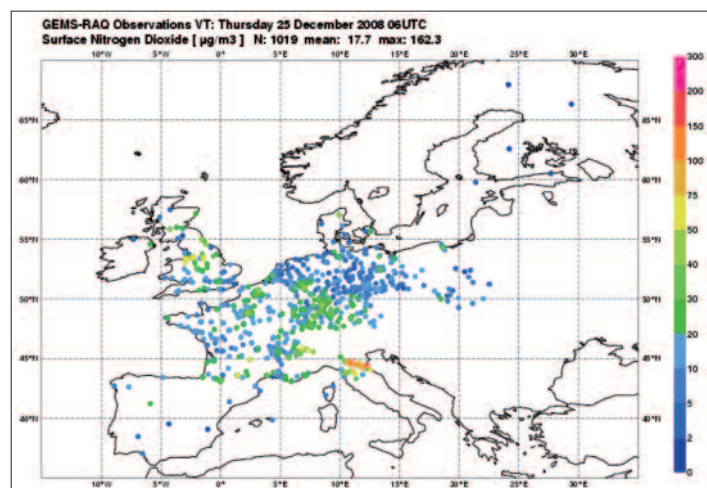
22

◀ Moyenne mensuelle (avril 2008) des analyses des colonnes verticales de CO issue de IASI dans MOCAGE-PALM.

Figure a : Concentrations de dioxyde d'azote à la surface observées le 25/12/2008 à 6h TU.

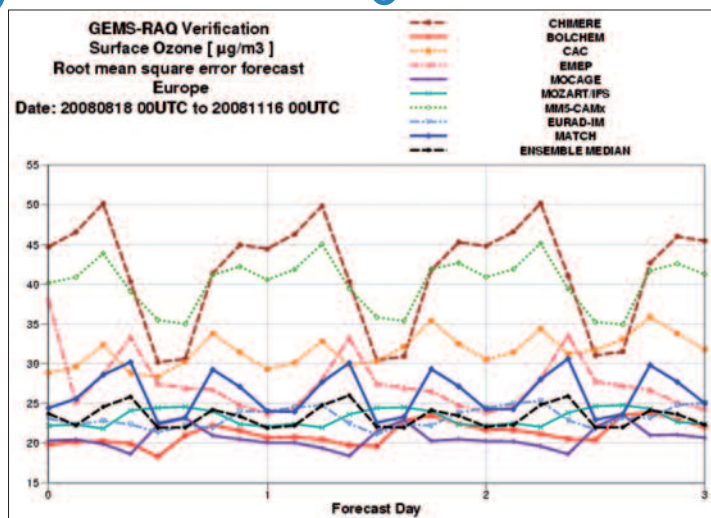
Figure b : Erreur quadratique moyenne de prévision de l'ozone sur l'Europe en fonction des échéances de prévision, pour l'automne 2008 et l'ensemble des modèles impliqués dans GEMS. Le modèle de Météo-France, MOCAGE, apparaît en violet.

a



23

b



Étude du manteau neigeux et des avalanches

Segmentation en grains avec la courbure discrète et application à des images tomographiques de neige

La neige déposée au sol est constituée de grains de glace soudés entre eux par des sollicitations thermodynamiques et mécaniques. Pour analyser la microstructure de la neige et en comprendre sa formation et son évolution, il est souvent nécessaire de séparer numériquement ces grains de glace de leurs voisins. Les méthodes d'imagerie tridimensionnelles communément utilisées ne fournissent aucune information directe sur les frontières entre les grains. Afin d'obtenir une segmentation pertinente, une méthode géométrique basée sur la détection de concavités sur la surface de glace a été mise au point au CEN.

Sur l'image tridimensionnelle de neige, il est possible de calculer, en chaque point de la surface, les courbures gaussienne et moyenne. Combinées, ces courbures fournissent le signe de la courbure principale la plus petite (figure a). Il est alors possible de séparer la surface en deux zones : l'une positive, l'autre négative. En utilisant un diagramme de Voronoï, ces zones sont étendues à l'objet entier. Les voxels de la zone négative sont retirés de l'image, fournissant ainsi une segmentation en objets déconnectés. Ces objets sont alors utilisés comme germes pour un second diagramme de Voronoï, permettant d'obtenir la segmentation désirée.

Notre algorithme a été testé sur des images de neige obtenues par tomographie. Pour valider les résultats, nous utilisons la tomographie par contraste de diffraction, une technique récemment développée pour isoler les grains dans des échantillons de matériaux : comme chaque grain a une orientation cristalline particulière, cette méthode basée sur la diffraction de rayons X peut les localiser précisément. Les résultats obtenus pour ces deux méthodes sont présentés sur les figures [b] et [c].

24

Développements et nouvelles analyses pour la Détection Sismique des Avalanches naturelles

Trois stations de Détection Sismique des Avalanches (DSA), développées par le Centre d'Études de la Neige (CEN), sont installées expérimentalement depuis plusieurs hivers en Isère. Chaque station enregistre les signaux sismiques et identifie ceux qui ont été générés par les avalanches, fournissant ainsi rapidement une information objective sur l'activité avalancheuse d'un secteur montagneux.

En 2008, de nouveaux développements ont été apportés à ce système de DSA, avec notamment l'installation et le test d'une transmission WiFi-ADSL sur le site d'Ornon et la réalisation d'un module complémentaire d'analyse et d'identification des signaux.

La transmission WiFi-ADSL implique une liaison WiFi entre la station de DSA isolée en altitude et un point de connexion du réseau en vallée et permet de rapatrier au CEN en temps quasi-réel l'intégralité des signaux, pour leur analyse. Ce mode de transmission ouvre la voie à des analyses plus complexes et à des présentations plus ergonomiques des données, mais peut aussi faciliter certaines opérations de gestion-maintenance à distance.

Pour mieux identifier les signaux d'origine avalancheuse ou éliminer ceux qui ont d'autres origines, de nouvelles analyses ont été développées, elles sont basées sur des reconnaissances de formes dans la représentation temps-fréquences. Ces analyses portent sur la détection automatique de bandes étroites d'énergie dans des images filtrées, basées sur la distance de chanfrein et déduites des analyses temps-fréquences. Ces bandes étroites d'énergie peuvent avoir des fréquences et des formes très variables, mais elles sont caractéristiques de certains signaux non-avalancheux. L'application de ce nouveau module permet de réduire certaines fausses alertes, générées par exemple par des hélicoptères ou des travaux.

25

Simulation du manteau neigeux québécois avec les modèles de neige CROCUS, SNOWPACK et SNTHERM

Le changement climatique aux hautes latitudes est très marqué du fait notamment de la rétroaction positive liée aux modifications de la surface du manteau neigeux dans ces régions du globe. Dans ce cadre, l'Université de Sherbrooke (Canada), le Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (France) et le Centre d'Études de la Neige collaborent pour parvenir à un meilleur suivi de la cryosphère depuis l'espace.

La télédétection dans le domaine des micro-ondes est très prometteuse pour le suivi du manteau neigeux car l'émission micro-onde est très influencée par les caractéristiques de la neige au sol. L'idée est de coupler un modèle d'évolution thermodynamique du manteau neigeux avec un modèle d'émission micro-onde pour pouvoir ensuite inverser le signal observé. Ce travail a commencé par une comparaison de la qualité de 3 modèles de neige sophistiqués (Snterm, Snowpack et Crocus) sur le site de mesure de l'Université de Sherbrooke. La comparaison présentée sur la figure montre que les 3 modèles, alimentés par les observations météorologiques réalisées sur le site, ont des résultats de qualité comparable. Pour Crocus, on a pu montrer que le flux thermique paramétré à l'interface sol-neige n'était pas bien adapté aux manteaux neigeux parfois très froids de Sherbrooke. L'utilisation du modèle couplé Isba-Crocus a permis d'améliorer les résultats en simulant explicitement les échanges de chaleur sol/neige. L'enneigement du site a également été simulé, en alimentant Crocus avec les données des réanalyses NARR (North American Regional Reanalysis).

Le résultat très encourageant montre que la simulation de l'enneigement pourra être étendue à l'ensemble du nord canadien. Dans un deuxième temps, les équipes impliquées se pencheront sur le couplage entre les modèles de neige et d'émission micro-ondes.

26

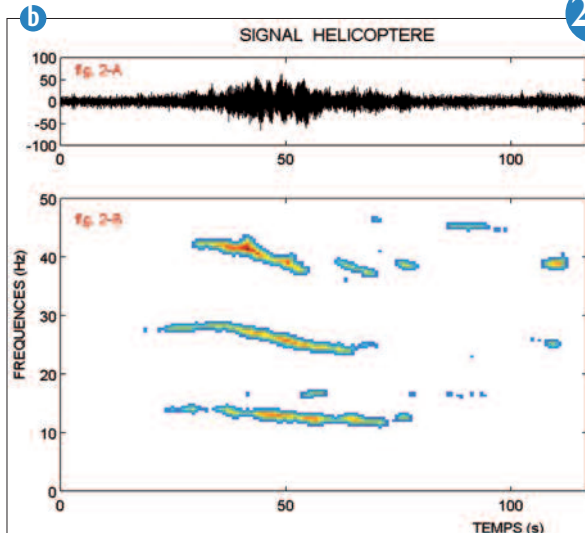
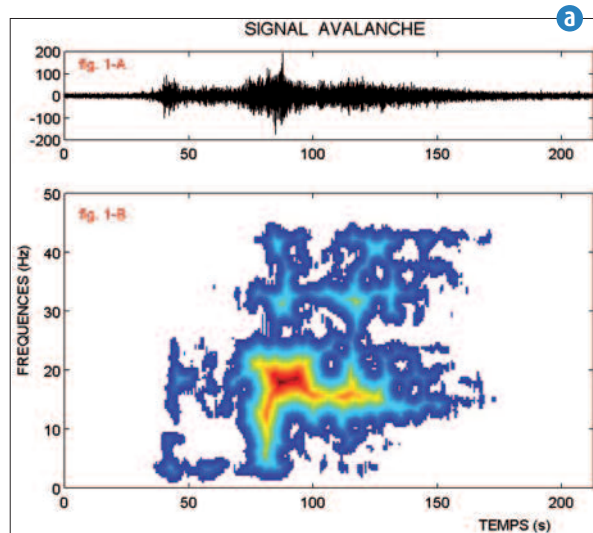


24

[a] Carte représentant la courbure principale minimale pour un échantillon de neige obtenu par tomographie X par absorption : le vert correspond aux zones de courbure minimale négatives (présence de concavités selon certaines directions) tandis que le rouge correspond aux zones positives (absence de concavités).

[b] Segmentation d'un échantillon de neige obtenu par tomographie X par absorption, après application de notre algorithme (à chaque couleur correspond un grain unique).

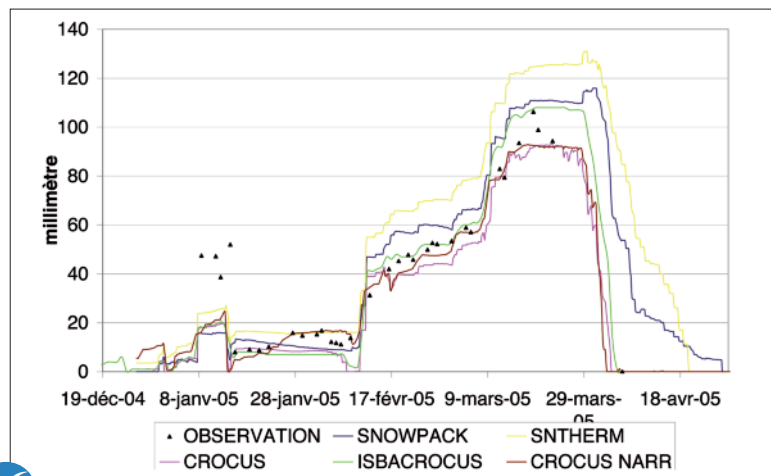
[c] Segmentation du même échantillon, obtenue par tomographie par contraste de diffraction.



25

◀ Signal et image de chanfrein pour 2 signaux sismiques générés respectivement par une avalanche (fig. a) et par un hélicoptère (fig. b).

Equivalent en eau de la neige observé (triangles) et simulé (courbes) par différents modèles d'évolution du manteau neigeux durant l'hiver 2004/2005 sur le site de mesure de l'université de Sherbrooke (Québec). « ISBACROCUS » désigne le modèle couplé ISBA-CROCUS, « CROCUS NARR » désigne le modèle Crocus alimenté par les données NARR. ▼



26

27



Figure a : En collaboration avec les partenaires équatoriens, une campagne sur le terrain a été menée en mars et avril 2008 afin de collecter de nouvelles données pour affiner notre connaissance du milieu.

Figure b : Le glacier étudié se situe sur le versant Nord-Ouest de l'Antisana. La première station météorologique est installée sur la moraine à 4850 m d'altitude, la seconde est installée dans la zone d'ablation du glacier à 4900 m.

Étude de l'évolution des couvertures neigeuses en zone tropicale de haute altitude (Antisana, Equateur), sur surface englacée et non englacée

Dans les Andes tropicales, les glaciers jouent un rôle important dans l'approvisionnement en eau de grandes métropoles comme Quito ou La Paz.

L'IRD a récemment renforcé l'observation de ce milieu. Les données acquises grâce à l'installation de stations météorologiques sur le volcan Antisana en Equateur ont été valorisées, en y appliquant les outils de simulation numérique du manteau neigeux de Météo-France (CROCUS, ISBA-CROCUS). Ils se sont révélés adaptés pour mieux comprendre les

processus qui dirigent l'évolution de la neige en zone tropicale (faible saisonnalité).

Sur le glacier, l'albédo est le paramètre clé. La fonte est plus rapide lorsque la glace est apparente. Une bonne représentation de l'évolution de l'albédo de la neige récente et une calibration adaptée de l'albédo de la glace sont des critères essentiels pour effectuer de bonnes simulations.

Sur la moraine, les couvertures neigeuses sont minces et fugaces. Avec le fort rayonnement solaire de ces latitudes, et le faible

albédo de ces surfaces, le sol emmagasine de grandes quantités de chaleur. Elles sont restituées à la base du manteau neigeux, puis par transferts horizontaux des surfaces déneigées vers les surfaces enneigées. La fonte qui en résulte est alors très rapide.

Cette étude complète des travaux en cours sur le Zongo en Bolivie, où la modélisation est spatialisée sur l'ensemble du bassin versant, afin de représenter la réaction hydrologique de la fusion glaciaire.

27

Instrumentation pour la recherche

L'année 2008 aura été très dense pour les équipes de SAFIRE : outre Polarcat évoqué dans le cadre de l'API, Flysafe et Carols ont constitué des actions de grande ampleur. En terme de mesure in situ, on soulignera les premiers retours prometteurs de la campagne menée à Roissy, conduite dans le cadre de l'Action Nationale Brouillard.

Instrumentation aéroportée

Participation de l'ATR 42 aux campagnes Flysafe

Météo-France, membre du programme FLYSAFE d'étude des risques météorologiques pour l'aviation, a été sélectionné pour réaliser une partie des vols de mesure. Ainsi, l'ATR42 a réalisé 80 heures de vol en février et août 2008. L'ATR, propriété de Météo-France, est opéré par l'unité mixte CNRS/Météo-France/CNES, appelée SAFIRE.

La campagne de février 2008 visait à l'étude des risques de givrage. L'avion était équipé de détecteurs de givre ainsi que d'un ensemble d'instruments d'analyse de la structure microphysique des nuages (gouttelettes et cristaux). Malgré l'un des plus beaux mois de février depuis des décennies, 40 heures de vol ont permis de documenter des situations de givrage autour de Paris et dans l'ouest de l'Europe.

Durant l'été, la campagne d'août 2008 était consacrée à l'analyse des conditions orageuses. En plus de l'instrumentation habituelle de l'avion, le radar météo de bord (utilisé par les pilotes) était enregistré afin de pouvoir confronter ensuite l'information de bord, la réalité mesurée lorsque l'avion traversait la zone orageuse (par sécurité, l'avion ne faisait que « frôler » les orages) avec les données disponibles au sol (radars météorologiques ou images satellites).

L'ensemble des données récoltées est actuellement analysé par les participants au programme Flysafe et permettra de valider des nouveaux outils (nouveaux radars et interfaces d'information pilotes) pour améliorer la sécurité aérienne.

1

Campagne CAROLS : mesure aéroportée de l'humidité des sols et de la salinité océanique

Les vols CAROLS ont pour objectif de valider l'instrument du même nom, un radiomètre passif, et les algorithmes associés, qui mesurent la teneur en humidité des sols ainsi que la salinité de surface des océans. Un radiomètre équivalent (avec antenne à ouverture synthétique) équipera le satellite SMOS, qui sera lancé en 2009. Les tests actuels ont donc pour but de préparer la future validation des mesures du satellite.

Après les premiers tests effectués fin 2007 sur l'ATR42 de Météo-France, opéré par SAFIRE, une campagne de 15 jours a eu lieu en octobre 2008 sur ce même avion.

La moitié des vols CAROLS a été réalisée avec une combinaison d'instruments : radiomètre CAROLS et radar RASTA. Les mesures complémentaires du radar permettent de connaître l'état de la mer lors des survols maritimes : vent de surface et hauteur des vagues.

Deux vols ont ensuite été réalisés pour tester une nouvelle conception du radiomètre, dénommée CAROLS-2. CAROLS-2 se distingue par une récupération du signal au plus près du radiomètre, évitant ainsi la transmission du signal via un guide d'onde thermostaté, source de bruit parasite. Le PDG de Météo-France, Pierre-Etienne Bisch, a participé à l'un de ces vols en novembre 2008, et a ainsi pu suivre en temps réel les travaux scientifiques en vol.

La campagne d'essais a été très positive pour le développement et l'amélioration des instruments. Les équipes de SAFIRE et du CETP (responsable de l'instrument CAROLS) sont maintenant prêtes pour la prochaine phase en mai 2009, qui permettra les premières comparaisons avec les mesures satellite.

2

EUFAR ouvre le ciel aux chercheurs européens

EUFAR est le réseau européen des avions instrumentés pour la recherche en sciences de la Terre. EUFAR, recevra de la Commission Européenne une allocation de 8 M€ sur les 4 prochaines années (2009-2012) pour offrir aux chercheurs l'accès aux infrastructures aéroportées de recherche les mieux adaptées à leur projet, quel que soit leur opérateur en Europe. Fort de ses 8 années d'expérience et grâce à son portail web unique vers les moyens aéroportés européens, EUFAR facilite l'accès à une large gamme d'avions instrumentés, développe une culture de coopération entre opérateurs et experts pour consolider les connaissances, collecte des informations sur les activités des avions, leur impact scientifique et les besoins des utilisateurs pour une approche intégrée du développement de la flotte, et enfin encourage la formation des chercheurs dans le cadre d'écoles d'été.

Avec 33 partenaires, EUFAR offre un accès transnational à 25 avions et instruments.

La fragmentation des opérateurs d'infrastructures a sérieusement limité l'utilisation et le développement des infrastructures aéroportées en Europe. En les ouvrant à l'accès transnational et en organisant des sessions de formation, EUFAR constitue progressivement une plus large communauté d'utilisateurs.

Le challenge pour EUFAR au cours des 4 prochaines années sera la construction d'un avion européen à grande charge utile et long rayon d'action pour la recherche dans la troposphère (COPAL), projet qui a été récemment retenu dans la feuille de route ESFRI pour une étude de Phase Préparatoire. Depuis 2000, EUFAR est coordonné par Météo-France (CNRM/GMEI).

3

1



◀ L'ATR42 avec ses pylônes sous les ailes, équipés d'instruments d'analyse microphysique des nuages.

2



◀ Les équipes de SAFIRE installent l'antenne arrière du radiomètre CAROLS dans l'ouverture sous le fuselage de l'ATR42. (On voit ici Michel Cluzeau, technicien de l'équipe instrumentation)

3



Logos EUFAR ▶
et COPAL,

◀ L'ATR
opéré par SAFIRE
en vol au-dessus
des Pyrénées



Instrumentation *in situ* - télédétection

Introduction et exploitation du Doppler dans le réseau ARAMIS

Le réseau ARAMIS est à la fin 2008 pratiquement entièrement Doppler. Les trois derniers radars non –Doppler (Plabennec, Bordeaux et Grèzes) devraient évoluer au tout début de l'année 2009. Le schéma Doppler mis en place (technique de mesure dite du triple-PRT) a fait l'objet de deux publications et d'un brevet. Il permet d'obtenir des mesures de vent Doppler, sans repliements, jusqu'à 250 km sans modifier en aucune façon les autres produits radar.

Dans le cadre du projet européen FLYSAFE, une maquette temps-réel a été mise en place pour combiner les mesures de vitesses radiales des différents radars couvrant la région parisienne (Trappes, Arcis, Falaise, Abbeville, Bourges) et restituer à la fréquence de 15 minutes et à la résolution horizontale de 2.5 km des champs 3D de vent et de réflectivité. Cette innovation a reçu le prix Vilho Vaisala 2008 de l'OMM. Sa généralisation à la métropole est en cours et pourrait déboucher opérationnellement en 2010. Ces champs de vent et de réflectivité sont très utiles dans les contextes de la prévision immédiate (notamment aéronautique) et de la vérification de modèles à fine échelle (AROME). L'information Doppler des radars météorologiques peut aussi être exploitée directement pour détecter des cisaillements de vent de fine échelle à condition que le phénomène ne se produise pas trop loin du radar. Ainsi, la tornade d'Hautmont est-elle passée à proximité du radar d'Avesnes et sa signature est apparue très clairement sur les images de vitesse radiale (voir figure).

Les efforts vont se poursuivre à l'avenir pour progresser sur la qualité des mesures Doppler à haute résolution (250 m) et mettre au point des techniques robustes d'identification en temps réel des cisaillements.

4

Evolution vers la diversité de polarisation du radar ARAMIS

En 2008, le réseau ARAMIS aura de nouveau considérablement évolué sur le plan technologique avec le remplacement du radar de Nîmes (bande S) par un nouveau radar, toujours en bande S, à diversité de polarisation, ainsi qu'avec la mise en place de la diversité de polarisation sur les radars (en bande C) de Momuy et de Montclar.

La modernisation du réseau actuel va se poursuivre en 2009 – 2010 avec le remplacement du radar bande C d'Abbeville et l'introduction de la polarimétrie sur les radars bande C de Cherves, Blaisy et Avesnes. En parallèle, une chaîne de traitement polarimétrique a été développée et testée, notamment sur le radar de Trappes dans le cadre du projet européen FLYSAFE. Cette chaîne polarimétrique, qui devrait devenir opérationnelle en 2009, assure un suivi de la qualité des variables polarimétriques, une correction de l'atténuation par les précipitations et une élimination des échos non météorologiques. L'année 2008 a aussi été consacrée à la poursuite des études sur l'identification des types d'hydrométéores (grêle notamment) et le test d'algorithmes polarimétriques d'estimation du taux de pluie (algorithmes ZZDR de l'Université de Reading et ZPHI de la société NOVIMET).

Sur les 12 épisodes majeurs de l'année 2005 observés par le radar de Trappes, les deux algorithmes polarimétriques, reposant uniquement sur les données radar, donnent de meilleurs résultats, par comparaison au pas de temps horaire avec les pluviomètres, que l'estimateur conventionnel utilisant un module de recalage horaire par rapport aux pluviomètres (voir figure).

5

Les radars UHF et VHF dans les futurs systèmes de mesure automatique des profils de vent, température et humidité à partir du sol

Depuis ces dernières années, de multiples études ont été menées pour automatiser entièrement les mesures des paramètres fondamentaux en altitude (vent, température, humidité, nuages). Parmi les techniques les plus prometteuses, sont apparus les instruments de télédétection à partir du sol, comme les profileurs de vent UHF et VHF, les lidars, les radars hyperfréquence, les radiomètres et les balises GPS.

Concernant la mesure des nuages (contenu en eau, hauteur de la base et du sommet), une combinaison efficace a été obtenue entre les lidars, les radars millimétriques et les satellites. Le projet international CLOUDNET en constitue un exemple prometteur.

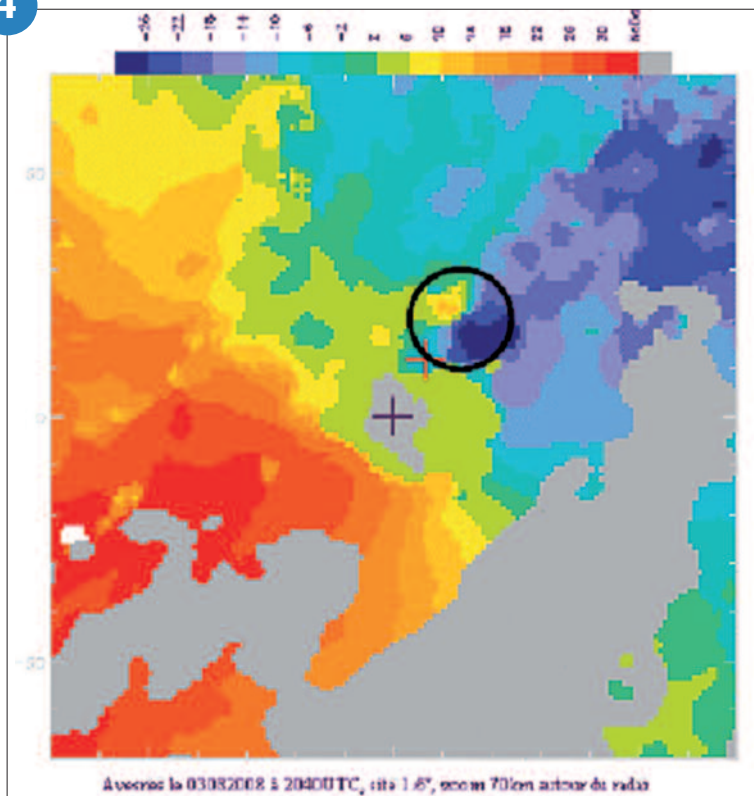
Les profileurs UHF et VHF sont capables de détecter les zones d'écho maximal en air clair, fréquemment associées à des gradients d'humidité importants. Ces éléments, directement assimilables par les modèles de prévision, permettent de détecter la hauteur d'inversion dans la basse troposphère et d'affiner les mesures des profils d'humidité réalisées avec les radiomètres. Par ailleurs, l'information d'humidité contenue dans les échos radar en air clair permet d'en déduire le profil si l'on dispose d'un point de référence en vapeur d'eau en altitude et du profil de température.

Les profileurs peuvent également déterminer le profil de température, non seulement avec la technique RASS (Radio Acoustic Sounding System pour la température virtuelle), mais aussi à partir de l'écho radar aux altitudes où l'humidité devient négligeable ou plus directement à partir des variations du vent vertical. Dans ces deux derniers cas, il faut au moins un point de température de référence en altitude.

L'Action européenne COST ES0702 va aider à coordonner le développement de ces techniques en vue d'applications opérationnelles.

6

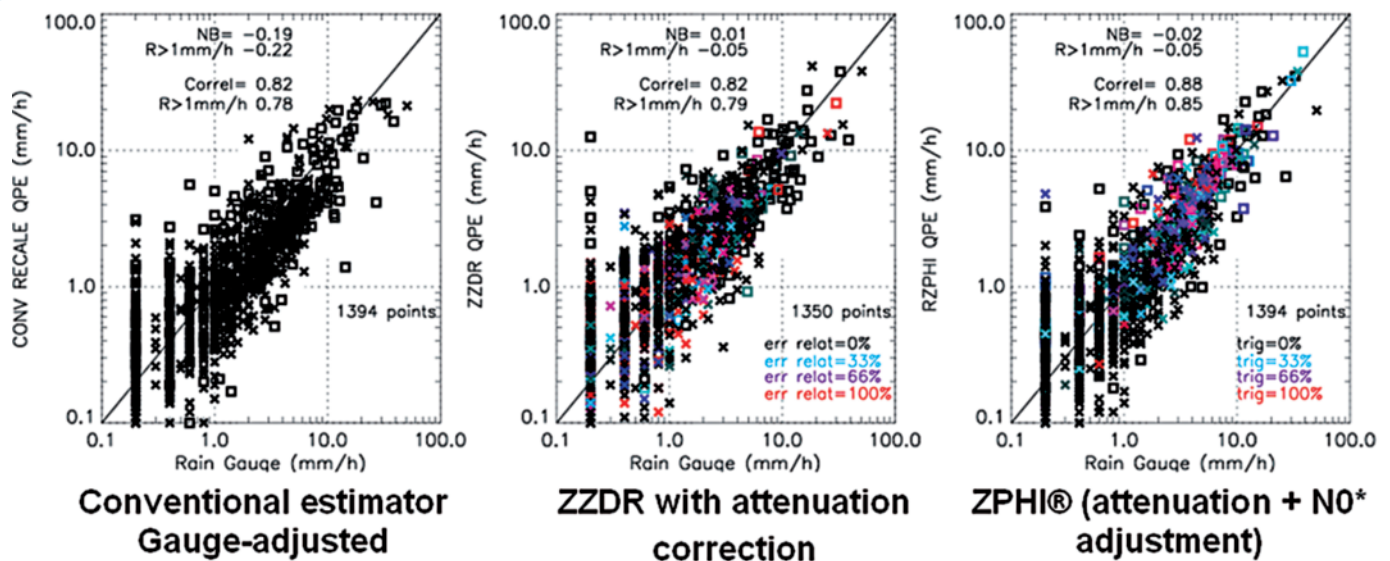
4



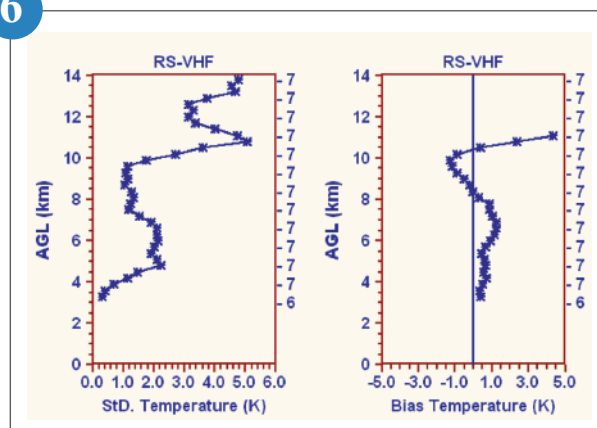
◀ Image de vitesse radiale centrée sur le radar d'Avesnes à 20.40 TU UTC le 3/08/2008 à l'angle de site 1.6°. L'image fait 140x140 km² et a une résolution de 1 km². Les vitesses radiales ont été filtrées médian (5x5 km²). Le radar est pointé par une croix noire et la commune d'Hautmont par une croix rouge. L'échelle de vitesse radiale va de -30 (bleu foncé, cibles qui s'éloignent du radar) à +30 (rouge vif, cibles qui s'approchent du radar) m/s. On voit très nettement à cet instant le dipôle positif / négatif (bleu / rouge) correspond à la rotation cyclonique dans la tornade.

Comparaison au pas de temps horaire entre les estimateurs conventionnels et polarimétriques et les pluviomètres. Les 12 épisodes majeurs de l'année 2005 observés par le radar de Trappes ont été pris en compte. Les axes échelles sont logarithmiques. Les estimateurs radar sont, de gauche à droite : l'estimateur conventionnel incluant un module de recalage par les pluviomètres, l'estimateur ZZDR (Université de Reading, basé uniquement sur les données radar) et l'algorithme ZPHI® (société NOVIMET, basé lui aussi uniquement sur les données radar). On a aussi porté sur la figure la valeur des coefficients de corrélation et des biais normalisés (-0.19 se comprenant comme une sous-estimation de 19%) pour tous les taux de pluie et aussi uniquement pour les taux de pluie supérieurs à 1 mm/h. ▼

5



6



◀ Déviation standard (gauche) et biais (droite) entre les valeurs de températures fournies respectivement par le radiosonde (RS) et le radar VHF (VHF) à partir des variations du vent vertical. Les colonnes à droite indiquent le nombre de comparaisons dans les calculs statistiques.

Caractérisation de l'hétérogénéité du vent sur l'étang de Thau

Le laboratoire IFREMER de Sète et le CNRM ont mis en place une campagne de mesure du vent sur l'étang de Thau pour mieux caractériser les situations de vent propices aux développements d'algues toxiques nuisant aux activités conchylicoles et se produisant par situations de vent faible.

Jusqu'à présent, seules les données de vent mesurées au sémaphore de Sète étaient utilisées. Le dispositif instrumental est composé de trois stations automatiques mesurant vent, température et humidité. Parmi ces stations, deux sont installées directement sur la surface de l'eau sur des structures spécialement mises en place et permettent ainsi la mesure de la température de l'eau. Ces stations fonctionnent en continu depuis avril et le jeu de données recueilli a déjà permis de caractériser les différences entre deux zones de l'étang de Thau, la crique de l'angle, zone confinée siège des principaux départ de développement d'algues toxiques et la zone plus ouverte et plus centrale de l'étang.

La campagne de mesure se poursuivra en 2009 et le dispositif constituera une base pour l'évaluation de la technique de mesure de flux de chaleur sensible par scintillométrie sur des surfaces liquides.

7

Campagne d'observation du brouillard à Roissy

Dans le cadre de l'Action Nationale Brouillard de Météo-France, le CNRM s'intéresse à l'amélioration de l'observation des brouillards sur aéroport. Une brève analyse préliminaire des possibilités offertes par la télédétection a conduit à retenir le sodar (télédétection acoustique) pour sa capacité à détecter en temps réel le sommet de la couche de brouillard.

Le programme de recherche a démarré par l'acquisition d'un instrument, étape qui fut franchie en février 2008 avec la passation d'une commande à la société allemande METEK (financé par le programme AERO). L'instrument a été livré à Roissy-Charles de Gaulle en juin 2008. Sa capacité à fonctionner dans l'environnement bruyant de l'aéroport a été confirmée en juillet. Depuis lors, le sodar opère en continu sur l'aéroport, sa maintenance est assurée par le CNRM avec le soutien actif du CDM et de la MIR 95.

Un sodar émet des ondes sonores et en capte l'écho atmosphérique grâce à des microphones. L'onde émise est « réfléchi » par les hétérogénéités de température de l'air. Le décalage de fréquence entre les sons émis et réfléchis permet de mesurer le vent. L'intensité des signaux enregistrés porte une information sur le niveau de la turbulence de température. C'est à partir de cette dernière que l'on espère détecter le sommet de la couche de brouillard.

L'apport du sodar à l'observation du brouillard fait l'objet d'une expérimentation de 4 mois démarrée en novembre 2008. Au cours de celle-ci, des sondages de température et d'humidité sous ballon captif sont réalisés toutes les heures pendant les épisodes de brouillard.

Les premiers résultats semblent confirmer la capacité du sodar à détecter le sommet du brouillard, mais le nombre de cas est encore trop faible pour pouvoir tirer des conclusions définitives.

8

Profils verticaux de dioxyde de carbone par ballon captif dans le cadre de ICOS

Dans le cadre de l'infrastructure européenne ICOS destinée à surveiller les concentrations de gaz à effet de serre, le CNRM a participé en octobre 2008 à une campagne de mesure pour l'évaluation d'instruments permettant d'estimer la hauteur de la couche limite atmosphérique.

Cette campagne a eu lieu sur le site de Trainou (Loiret) où une tour est équipée depuis plusieurs années par le LSCE de mesure de profil de CO₂ sur 5 niveaux entre le sol et 200 mètres. Celle-ci a permis l'évaluation *in-situ* d'un capteur de dioxyde de carbone Vaisala pour la réalisation de profils verticaux sous ballon captif. Après une caractérisation des performances du capteur au LSCE et le développement d'une nacelle équipée d'une transmission de données par liaison radio, celui-ci a été mis en œuvre en continu sous un ballon captif du 10 au 14 octobre. Pendant cette période, plus de 200 profils verticaux de CO₂, température, humidité, force et direction du vent entre le sol et 200 m ont été réalisés, permettant d'une part de montrer l'apport d'un tel outil sur l'observation de l'accumulation de CO₂ dans la couche limite, et d'autre part d'en estimer les performances *in situ* en comparaison avec les concentrations mesurées sur les 5 niveaux de la tour.

Les premiers résultats montrent un bon accord entre le ballon et la tour, ainsi que la capacité de l'instrument à décrire l'évolution du CO₂ dans les basses couches, permettant de fait la réalisation de ce type de mesures de manière aisée sur tous sites et avec une résolution verticale importante.

9

Expérience MOBILEX sur l'aérodrome de Muret-Lherm

Jusqu'à présent, le filtrage stochastique des mesures de vents turbulents à haute fréquence n'a été confronté qu'à des mesures fixes. Notre objectif est d'étendre ces techniques aux mesures mobiles et il nous faut donc prendre en compte la dynamique de la plate-forme d'expérimentation.

Pour les mesures mobiles, l'algorithme de filtrage repose sur les méthodes éprouvées pour les mesures fixes, mais il est nécessaire d'ajouter une étape permettant de suivre le capteur au cours de son évolution dans le fluide. Si les

résultats théoriques sont prêts, les applications sont en cours de développement.

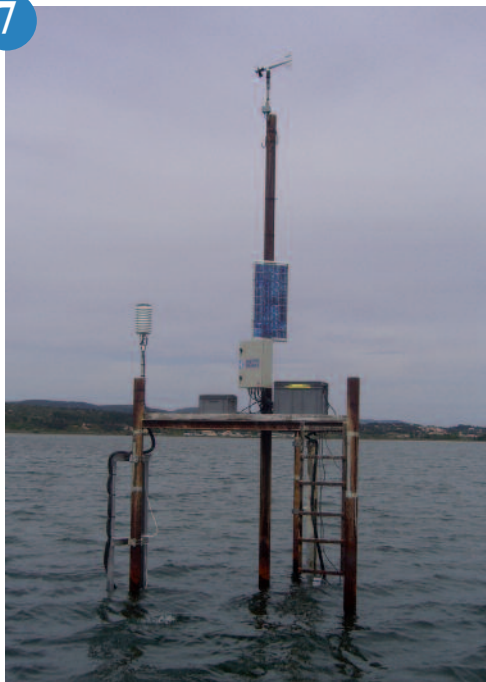
Afin de valider l'ensemble de ces travaux, des mesures des paramètres turbulents à partir d'une voiture spécialement équipée ont été réalisées sur l'aérodrome de Muret-Lherm. Pour la campagne expérimentale MOBILEX, une perche a été conçue et instrumentée par l'équipe de Moyens Mobiles de Mesures Météorologiques du CNRM. Ce mât horizontal de mesure a été installé sur le toit d'une voiture qui a effectué des courses tra-

jets sur la piste de l'aérodrome en s'insérant dans le trafic aérien afin de ne pas perturber les usagers aéronautiques.

Cette expérience a permis d'obtenir des mesures de grande qualité qui vont pouvoir servir de jeu de référence. Le traitement complet de la mesure mobile en turbulence devrait être fait au cours de l'année 2009.

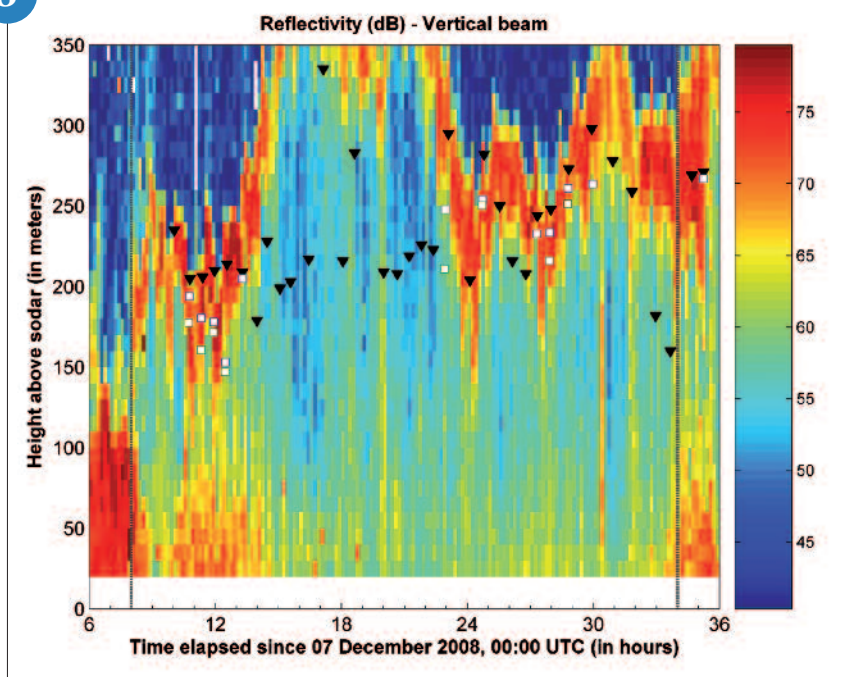
10

7



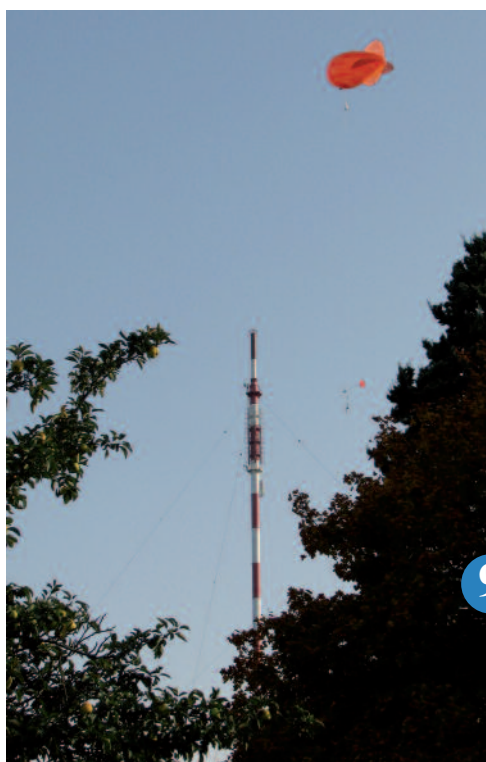
◀ Station de mesure du vent installée sur l'étang de Thau.

8



▲ Intensité du signal sonore capté par le sodar (en dB) en fonction du temps (abscisse) et de la hauteur (en mètres) au cours de l'épisode de brouillard du 7-8 décembre 2008. Les heures de début et fin de l'épisode sont indiquées par les tirets gris verticaux. Une fine couche de forte intensité (supérieure à 70dB) est visible en altitude. Située autour de 200 mètres, elle s'élève dans un premier temps au-dessus de 300 mètres, puis se stabilise ensuite autour de 250 mètres. Les triangles noirs indiquent les altitudes maximales atteintes par les sondages sous ballon captif (un triangle par sondage). Les carrés blancs situent les éventuelles inversions thermiques révélées par les sondages. On constate une très bonne corrélation entre l'altitude des inversions et la couche de forte intensité sonore. Les sondages sans inversion ont tous des altitudes maximales situées sous cette dernière. Ceci tend à confirmer la capacité du sodar à détecter le sommet de la couche brouillard.

9



◀ Ballon captif et tour instrumentée pendant la campagne ICOS.

figure a

La voiture MOBILEX au point d'attente sur la piste de l'aérodrome de Muret-Lherm avant de pénétrer sur celle-ci afin de réaliser des mesures mobiles de la turbulence atmosphérique.

figure b

La perche instrumentée spécialement conçue pour les mesures turbulentes.

10

a



b



Coordination, communication et valorisation

2008 aura été l'année de l'intégration des activités de recherche au sein du Système de Management de la Qualité de Météo-France. En terme de communication, l'événement majeur fut la participation de l'Etablissement à la Ville Européenne des Sciences, au Grand Palais à Paris.

Les activités de recherche incluses dans le Système de Management de la Qualité de Météo-France.

Le processus « Conduire et Assurer les Activités de Recherche à Météo-France » a été mis en œuvre en avril 2008, après plusieurs mois de préparation conjointe entre la Direction du CNRM et la Direction de la Qualité. Il a été créé avec la volonté d'une approche macroscopique, centrée sur la planification et le suivi de la réalisation des actions de recherche.

La mise en place de ce processus Recherche s'est traduite principalement par les éléments suivants :

- une préparation et un suivi plus rigoureux du programme annuel de recherche. Sa construction continue à reposer sur les fiches-programmes, mais leur méthodologie d'élaboration a été précisée, tant pour les

travaux menés au CNRM qu'en dehors de celui-ci ;

- afin de limiter le risque de perte de savoir-faire lors du départ d'un personnel non permanent, une procédure visant à déterminer dès l'arrivée de l'agent les attendus à l'issue de son séjour, et à vérifier à la fin de celui-ci que les engagements pris ont bien été tenus, a été mise en place ;

- le suivi des publications scientifiques a été renforcé, avec mise en œuvre d'une différenciation qualitative entre les revues scientifiques majeures et les autres revues à comité de lecture.

Un tableau de bord spécifique au processus Recherche a été élaboré, permettant à tout instant un suivi des indicateurs.

Les audits interne puis externe du processus Recherche qui se sont déroulés en octobre puis décembre 2008 ont souligné sa maturité, en se félicitant de sa maîtrise par l'équipe de Direction du CNRM. Sa mise en œuvre a déjà amené des bénéfices non négligeables : l'élaboration du plan annuel de recherche 2009 a été plus rigoureuse, son calendrier mieux respecté. L'intérêt de mieux tracer les attendus et les réalisations des personnels non permanents a été bien compris.

Le processus Recherche continuera à progresser en 2009, sur la base des voies d'amélioration proposées par les audits de fin 2008. ¹

La communication dans le cadre du programme AMMA

La communication mise en place pour le programme AMMA a permis de diversifier et d'augmenter le nombre d'actions et les supports de la communication tant externe qu'interne.

Les relations presse se sont développées avec des retombées médias de plus de 50 sorties entre novembre 2007 et novembre 2008. Les journalistes ont bien identifié le programme AMMA comme la référence en matière de mousson africaine. Et depuis un an, les demandes de la presse s'élargissent de plus en plus vers le changement climatique et ses impacts en Afrique.

En matière de communication interne, deux actions sont majeures. L'ensemble de la

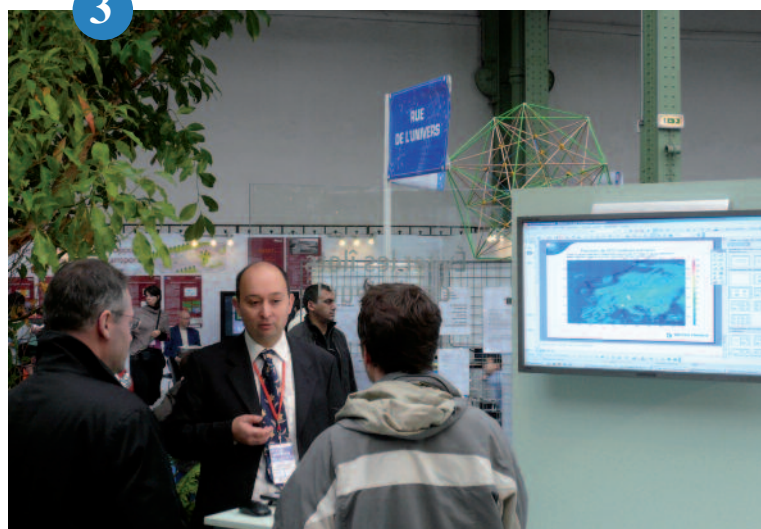
communauté AMMA recensée reçoit des mails d'informations réguliers ainsi qu'une nouvelle formule de la newsletter. Les sites Internet ont été mis à jour notamment pour une information tout public plus accessible ainsi qu'une mise en ligne systématique de toute information relative à AMMA.

Pour toucher un public plus vaste, la culture scientifique a été introduite dans la communication d'AMMA, en particulier avec la création d'une exposition sur la mousson présentée une 1^{re} fois durant la semaine sur le changement climatique à Dakar au Sénégal. Plus de 2000 élèves ont pu découvrir l'exposition présentée par des étudiants de l'UCAD. L'exposition est ensuite partie

vers les grandes villes sénégalaises (Saint Louis, Ziguinchor, M'Bour...) ainsi que dans 85 lycées de Dakar et des environs (Projet qualité du ministère de l'éducation). Un deuxième jeu de l'exposition était exposé Place du Capitole à Toulouse durant la fête de la science 2008.

L'année 2009 aura deux priorités en matière de communication autour du programme : la communication scientifique à l'occasion de la parution d'articles scientifiques, et l'augmentation, notamment auprès du grand public, de la visibilité d'AMMA en Afrique de l'Ouest. ²

M-P Devic présente l'exposition AMMA, lors de la Fête de la Science 2008 à Toulouse, Place du Capitole.



Le certificat ISO 9001 reçu par Météo-France en février 2009, mentionnant explicitement la prise en compte des activités de recherche dans le périmètre du système de management de la qualité.

Vincent-Henri Peuch (CNRM/GMGE) répond aux questions des visiteurs sur l'espace « qualité de l'air » du stand Météo-France, le 15 novembre 2008 au Grand Palais.

La Ville Européenne des Sciences : un dialogue direct et vivant entre science et société

Pour faire connaître ses activités de recherche à un large public et sensibiliser les jeunes aux études scientifiques, Météo-France a participé à l'Exposition « la Ville Européenne des Sciences », organisée du 14 au 16 novembre 2008, au Grand-Palais, à Paris, par le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (Mesr), à l'occasion de la présidence française de l'Union Européenne.

Avec comme thématique : « Quel climat demain pour les grandes villes européennes ? », cinq domaines ont été abordés :

– l'évolution du climat dans les villes européennes depuis 150 ans,

– les scénarii d'évolution du climat futur,
– les phénomènes météorologiques propres à la ville,
– la prévision à l'échelle urbaine,
– la prévision de la qualité de l'air.

A travers des rencontres, des animations, des objets innovants et des programmes ludiques pour les plus jeunes, les méthodes et les résultats des recherches ont été présentés en insistant sur leur cohérence avec la démarche prospective Agora 2020 du « Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire » (Meeddat) et du Grenelle de l'environnement, ainsi qu'avec

les programmes du Mesr dont ceux de l'« Agence nationale de la recherche » (ANR). 42 600 personnes ont visité l'exposition qui a été largement commentée par les principaux médias nationaux. Cette manifestation a été une excellente occasion de valoriser les travaux entrepris au sein de l'établissement et souligner son rôle d'acteur incontournable dans le domaine des projections climatiques, de la régionalisation, des événements météorologiques extrêmes et de la modélisation de la ville durable.

Annexes

Liste des publications scientifiques 2008

Publications scientifiques dans des revues de rang « a » (facteur d'impact > 1)

- Albergel, C., C. Rüdiger, T. Pellarin, J.-C. Calvet, N. Fritz, F. Froissard, D. Suquia, A. Petitpa, B. Piguet, and E. Martin, "From near-surface to root-zone soil moisture using an exponential filter: an assessment of the method based on in-situ observations and model simulations", *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, Vol. 5, pp. 1603-1640, 2008.
- Arbogast Ph., K. Maynard and F. Crépin, 2008, ERTel Potential inversion using a digital-filter-initialization method. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.* 134 1287-1296.
- Artinyan E., Habets F., Noilhan J., Ledoux E., Dimitrov D., Martin E., and Le Moigne P. (2008) : Modelling the water budget and the riverflows of the Maritsa basin in Bulgaria, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 21-37.
- Ballester J., H. Douville, F. Chauvin, 2008 : Present-day climatology and projected changes of warm and cold days in the CNRM-CM3 global climate model. *Climate Dyn.*, 32, 35-54, doi:10.1007/s00382-008-0371-0.
- Ballu, V., J. Ammann, O. Pot, O. de Viron, G. Sasagawa, G. Reverdin, M.N. Bouin, M. Cannat, C. Deplus, S. Deroussi, M. Maia and M. Diamant, 2008, A seafloor experiment to monitor vertical deformation at the Lucky Strike volcano, Mid-Atlantic Ridge, *Journal of Geodesy*, doi: 10.1007/s00190-008-0248-3.
- Barret B., P. Ricaud, C. Mari, J.-L. Attié, N. Boussez, B. Josse, E. Le Flochmoën, N.-J. Livesey, S. Massart, V.-H. Peuch, A. Piacentini, B. Sauvage, V. Thouret, and J.-P. Cammas, 2008 : Transport pathways of CO in the African upper troposphere during the monsoon season: a study based upon the assimilation of spaceborne observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 3231-3246, 2008.
- Biancamaria, S., Mognard, N., Boone, A., Grippa, M., Josberger, E., 2008, a satellite snow depth multi-year average derived from SSM/I for the high latitude regions, *Remote Sensing of Environment*, 112 (5): 2557-2568.
- Bock, O., M.N. Bouin, E. Doerflinger, P. Collard, F. Masson, R. Meynadier, S. Nahmani, M. Koité, K. Gaptia Lawan Balawan, F. Didé, D. Ouedraogo, G. Wilson, F. Guichard, S. Janicot, J.P. Lafore, M. Nuret, 2008, The West African Monsoon observed by ground-based GPS receivers during the AMMA project, *Journal of Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JD010327.
- Bou Karam, D., C. Flamant, P. Knippertz, O. Reitebuch, J. Pelon, M. Chong, et A. Dabas, 2008 : Dust emissions over the Sahel associated with West-African Monsoon inter-tropical discontinuity region : a representative case study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 134, 621 - 634.
- Bouniol, D., Protat, A., Plana-Fattori, A., Giraud, M., Vinson, J-P, Grand, N., 2008, Comparison of Airborne and Spaceborne 95-GHz Radar Reflectivities and Evaluation of Multiple Scattering Effects in Spaceborne Measurements, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume: 25, Issue: 11, Pages: 1983-1995.
- Bourles, B., Lumpkin, R., McPhaden, M. J., Hernandez, F., Nobre, P., Campos, E., Yu, L., Planton, S., Busalacchi, A., Moura, A. D., Servain, J., Trotte, J., 2008, The PIRATA program : History, accomplishments, and future directions, *BAMS*, Volume: 89 Issue: 8 Pages: 1111-+.
- Bousquet, O., T. Montmerle, and P. Tabary (2008), Using operationally synthesized multiple-Doppler winds for high resolution horizontal wind forecast verification, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L10803, doi:10.1029/2008GL033975. Inferred from Long-Range Radial Velocity Measurements. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 2929-2945.
- Calvet, J.-C. , A.-L. Gibelin, J.-L. Roujean, E. Martin, P. Le Moigne, H. Douville, and J. Noilhan, 2008, Past and future scenarios of the effect of carbon dioxide on plant growth and transpiration for three vegetation types of southwestern France, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 397-406.
- Cariolle, D., Evans, M. J., Chipperfield, M. P., Butkovskaya, N., Kukui, A., and Le Bras, G. (2008), Impact of the new HNO₃-forming channel of the HO₂+NO reaction on tropospheric HNO₃, NO_x, HO_x and ozone, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 4061-4068.
- Caumont, C. and V. Ducrocq, 2008 : What Should Be Considered When Simulating Doppler Velocities Measured By Ground-based Weather Radars?, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(8), 2256-2262, doi:10.1175/2008JAMC1894.1.
- Conil S., H. Douville, S. Tyteca, 2008 : Contribution of realistic soil moisture initial conditions to boreal summer predictability. *Climate Dyn.*, 32, 75-93, doi:10.1007/s00382-008-0375-9.
- Cros, S., A. Chanzy, M. Weiss, T. Pellarin, J.-C. Calvet, J.-P. Wigneron, 2008 : Synergy of SMOS microwave radiometer and optical sensors to retrieve soil moisture at global scale, *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, Vol. 46, No. 3, pp. 835-845.
- Crumeville S., L. Gomes, P. Tulet, A. Matsuki, A. Schwarzenboeck, and K. Crahan, 2008, «Increase of the aerosol hygroscopicity by aqueous mixing in a mesoscale convective system (MCS) : a case study from the AMMA campaign», *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 6907-6924.
- Dabas, A., Denneulin ML, Flamant P, Loth C, Garnier A, Dolfi-Bouteyre A, 2008, Correcting winds measured with a Rayleigh Doppler lidar from pressure and temperature effects, *Tellus Series A - Dynamic Meteorology and Oceanography*, Volume: 60 Issue: 2 Pages: 206-215, Mar 2008.
- Decharme B., H. Douville, C. Prigent, F. Papa, F. Aires, 2008 : A new global river flooding scheme: Off-line evaluation over South America. *Journal Of Geophysical Research-Atmospheres*, VOL. 113, D11110, doi:10.1029/2007JD009376, 2008
- Delire C., Ngomanda A., Jolly D., 2008 : Possible impacts of 21st century climate on vegetation in Central - West Africa. *Global and Planetary Change*, 64 (1-2), 3-15, doi:10.1016/j.gloplacha.2008.01.008.
- Delon, C., Reeves, C. E., Stewart, D. J., Serca, D., Dupont, R., Mari, C., Chaboureaud JP and Tulet P. (2008), Biogenic nitrogen oxide emissions from soils - impact on NO_x and ozone over West Africa during AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Experiment): modelling study, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume: 8 Issue: 9 Pages: 2351-2363.
- Driouech F., M. Déqué, A. Mokssit, 2008, Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco, *Clim Dyn*, DOI 10.1007/s00382-008-0430-6.
- Duthoit, S., Demarez V., Gastellu-Etchegorry J.-P., Martin E., Roujean J.-L., (2008), Assessing the effects of the clumping phenomenon on BRDF of a maize crop based on 3D numerical scenes using DART model, *Agricultural and forest meteorology*, Volume: 148 Issue: 8-9 Pages: 1341-1352.
- El Amraoui, L., N. Semane, V.-H. Peuch and M.-L. Santee, 2008 : Investigation of dynamical processes in the polar stratospheric vortex during the unusually cold winter 2004/2005, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L03803, doi:10.1029/2007GL031251.
- El Amraoui, L., V.-H. Peuch, P. Ricaud, S. Massart, N. Semane, H. Teyssède, D. Cariolle and F. Karcher, 2008 : Ozone loss in the 2002-2003 Arctic vortex deduced from the assimilation of ODIN/SMR O₃ and N₂O measurements : N₂O as a dynamical tracer, *Q. J. Meteorol. Soc.*, 134, 217-228, doi :10.1002/qj.191.
- Elias, T. and J.-L. Roujean, 2008, Estimation of the aerosol radiative forcing at ground level, over land, and in cloudless atmosphere, from METEOSAT-7 observation: method and case study, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8 (3): 625-636.
- Errico, R., Bauer P., Mahfouf JF., (2008), Comments on «Issues Regarding the Assimilation of Cloud and Precipitation Data» - Reply, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Volume: 65 Issue: 10 Pages: 3348-3350.

- Etien, N., Daux V., Masson-Delmotte V., Stievenard M., Bernard V., Durost S., Guillemain M.-T., Mestre O., Pierre M., 2008 : a bi-proxy reconstruction of Fontainebleau (France) growing season temperature from AD 1596 to 2000, *Climate of the past*, Volume : 4, Issue: 2, Pages : 91-106.
- Etien, N., V. Daux, V. Masson-Delmotte, O. Mestre, M. Stievenard, M.-T. Guillemain, T. Boettger, N. Breda, M. Haupt, P. P. Perraud. Summer maximum temperature in northern France over the past century: instrumental data versus multiple proxies (tree-ring isotopes, grape harvest dates and forest fires) *Climatic Change*, DOI 10.1007/s10584-008-9516-8.
- Fox-Rabinovitz, M., Cote J., Dugas B., Deque M., McGregor J.-L. and Belochitski A., 2008, Stretched-grid Model Intercomparison Project: decadal regional climate simulations with enhanced variable and uniform-resolution GCMs, *Meteorology and Atmospheric Physics*, Volume: 100 Issue: 1-4 Pages: 159-177 Published: AUG 2008.
- Flamant, P., Cuesta J., Denneulin M.-L., Dabas A., Huber D., 2008, ADM-Aeolus retrieval algorithms for aerosol and cloud products, *Tellus Series A - Dynamic Meteorology and Oceanography*, Volume: 60 Issue: 2 Pages: 273-286, Mar 2008.
- Fouillet, A., G. Rey, V. Wagner, K. Laaidi, P. Empereur-Bissonnet, A. Le Tertre, P. Frayssinet, P. Bessemoulin, F. Laurent, P. De Crouy-Channel, E. Jouglu, D. Hémon, 2008: Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003? A study of the 2006 heat wave. *International Journal of Epidemiology*. Published online on January 13, 2008, doi:10.1093/ije/dym253.
- Geiger, B., D. Carrer, L. Franchistéguy, J.-L. Roujean, C. Meurey, (2008), Land Surface Albedo Derived on a Daily Basis From Meteosat Second Generation Observations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.46, no.11, pp.3841-3856.
- Geoffroy, O., Brenguier J.-L. and Sandu I., (2008), Relationship between drizzle rate, liquid water path and droplet concentration at the scale of a stratocumulus cloud System, *Atmospheric Chemistry and Physics*, volume : 8 Issue : 16 Pages : 4641-4654.
- Geleyn J.-F., B. Catry, Y. Bouteloup and R. Brozkova, 2008: A statistical approach for sedimentation inside a micro-physical precipitation scheme. *Tellus 60A*, 649-662.
- Gibelin A.-L., Calvet J.-C., Viovy N., (2008): Modelling energy and CO₂ fluxes with an interactive vegetation land surface model - Evaluation at high and middle latitudes, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol 148, pp. 1611-1628, 10.1016/j.agrformet.2008.05.013.
- Gimeno-Presa L., V. Masson and J. Arnfield, 2008, «Editorial: Special issue on CAPITOUL (Canopy and Aerosol Particle Interactions in Toulouse Urban Layer) experiment», *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102, 3-4, 131-133.
- Gruhier, C., P. de Rosnay, Y. Kerr, E. Mougin, E. Ceschia, J.-C. Calvet, and P. Richaume, 2008, "Evaluation of AMSR-E soil moisture product based on ground measurements over temperate and semi-arid regions", *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 35, L10405, doi: 10.1029/2008GL033330.
- Guemas V., D. Salas-Mélia (2008): Simulation of the Atlantic meridional overturning circulation in an atmosphere-ocean global coupled model. Part I: a mechanism governing the variability of ocean convection in a preindustrial experiment, *Climate Dynamics*. Volume: 31, Issue: 1, Pages: 29-48.
- Guemas V., D. Salas-Mélia, M. Kageyama, H. Giordani, A. Voldoire, E. Sanchez-Gomez (2008) Summer interactions between weather regimes and surface ocean in the North-Atlantic region. *Climate Dynamics*, DOI: 10.1007/s00382-008-0491-6.
- Guidard V. and C. Fischer ; 2008: Introducing the coupling information in a limited area variational assimilation. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 134 723-735.
- Habets F., A. Boone, J.-L. Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E. Leblos, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana Segui, F. Rousset-Regimbeau, P. Viennot, 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *Journal of Geophysical Research*, 113, D06113, doi: 10.1029/2007JD008548.
- Hallegatte, S., P. Dumas, 2008: Can natural disasters have positive consequences? Investigating the role of embodied technical change, *Ecological Economics*, 68(3), pp.777-786.
- Hallegatte, S., M. Ghil, 2008: Natural disasters impacting a Macroeconomic Model with Endogenous Dynamics, *Ecological Economics*, 68(1-2), pp. 582-592.
- Hallegatte, S., 2008: An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina, *Risk Analysis* 28(3), DOI: 10.1111/j.1539-6924.2008.01046.
- Hamdi R. and V. Masson, 2008, «Inclusion of a drag approach in the Town Energy Balance (TEB) scheme: offline 1-D validation in a street canyon», *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 2627-2644.
- Hasegawa, T., Y. Tourre, K. Hanawa, W. B. White, 2008, Absence of propagating upper-ocean heat content anomalies in the eastern tropical South Pacific after ENSO events. *Geophys. Res. Lett.*, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L09607, doi:10.1029/2007GL033065.
- Herrmann, M., S. Somot, F. Sevault, C. Estoumel, and M. Déqué, (2008), Modeling the deep convection in the northwestern Mediterranean Sea using an eddy-permitting and an eddy-resolving model: Case study of winter 1986-1987, *J. Geophys. Res.*, 113, C04011.
- Herrmann, M. J., and S. Somot, 2008: Relevance of ERA40 dynamical downscaling for modeling deep convection in the Mediterranean Sea, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L04607, doi:10.1029/2007GL032442.
- Herrmann, M., Estoumel, C., Déqué, M., Marsaleix, P., Sevault, S., Somot, S. (2008) Dense water formation in the Gulf of Lion shelf: impact of atmospheric interannual variability and climate change. *Continental Shelf Research* 28 (15): 2092-2112, doi:10.1016/j.csr.2008.03.003.
- Hidalgo J., V. Masson and G. Pigeon, 2008, «Urban-Breeze Circulation during the CAPITOUL experiment: Numerical Approach», *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102, 3-4, 243-262.
- Hollingsworth, A., R.J. Engelen, C. Textor, A. Benedetti, O. Boucher, F. Chevallier, A. Dethof, H. Elbern, H. Eskes, J. Flemming, C. Granier, J. J. Morcrette, P. Rayner, V.-H. Peuch, L. Rouil, M. Schultz and A. Simmons, 2008: The Global Earth-system Monitoring using Satellite and in-situ data (GEMS) Project: Towards a monitoring and forecasting system for atmospheric composition, *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 89(8), 1147-1164, doi:10.1175/2008BAMS2355.1.
- Honoré, C., L. Rouil, R. Vautard, M. Beekmann, B. Bessagnet, A. Dufour, C. Elichegaray, J. Flaud, L. Malherbe, F. Meleux, L. Menut, D. Martin, A. Peuch, V. Peuch, and N. Poisson, 2008: Predictability of European air quality: Assessment of 3 years of operational forecasts and analyses by the PREV'AIR system, *J. Geophys. Res.*, 113, D0430.
- Janicot, S., Thorncroft CD, Ali A., Asencio N, Berry G., Bock O., Bourles B., Caniaux G., Chauvin F., Deme A., Kergoat L., Lafore J.-P., Lavaysse C., Lebel T., Marticorena B., Mounier F., Nedelec P., Redelsperger JL, Ravegnani F., Reeves CE, Roca R, de Rosnay P., Schlager H., Sultan B., Tomasini M and Ulanovsky A., (2008), Large-scale overview of the summer monsoon over West Africa during the AMMA field experiment in 2006, *Annales Geophysicae*, Volume: 26 Issue: 9 Pages: 2569-2595.
- Jarlan, L., G. Balsamo, S. Lafont, A. Bejaars, J.-C. Calvet, E. Mougin, 2008, Analysis of leaf area index in the ECMWF land surface model and impact on latent and carbon fluxes. Application to west Africa, *J. Geophys. Res.*, 113, D24117, doi:10.1029/2007JD009370.
- Klaus, V., 2008: Temperature Retrieval with VHF Radar Using Combined Techniques. *Ann. Geophys.*, 26, 3805-3817.
- Kucharski F., A. A. Scaife, J. H. Yoo, C. K. Folland, J. Kinter, J. Knight, D. Fereday, A. M. Fischer, E. K. Jin, J. Kröger, N.-C. Lau, T. Nakaegawa, M. J. Nath, P. Pigeon, E. Rozanov, S. Schubert, P. V. Sporyshev, J. Syktus, A. Voldoire, J. H. Yoon, N. Zeng and D. Zhou, 2008: The CLIVAR C20C project : skill of simulating Indian monsoon rainfall on interannual to decadal timescales. Does GHG forcing play a role? *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-008-0462-y
- Lac C., F. Bonnardot, C. Camail, O. Connan, D. Maro, D. Hebert, M. Rozet and J. Pergaud, 2008, «Atmospheric dispersion experiment during CAPITOUL to evaluate an operational dispersion modelling system», *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102, 3-4, 263-287
- Laîné A., M. Kageyama, D. Salas-Mélia, A. Voldoire, G. Rivière, G. Ramstein, S. Planton, S. Tyteca and J. Y. Peterschmitt, 2008 : Northern hemisphere storm tracks during the last glacial maximum in the PMIP2 ocean-atmosphere coupled models: energetic study, seasonal cycle, precipitation. *Climate Dynamics*, DOI: 10.1007/s00382-008-0391-9.
- Lebeaupin Brossier, C., V. Ducrocq, and H. Giordani (2008), Sensitivity of three Mediterranean heavy rain events to two different sea surface fluxes parameterizations in high-resolution numerical modeling, *J. Geophys. Res.*, 113, D21109, doi:10.1029/2007JD009613.
- Lemonsu, A., Belair, S., Mailhot, J., Benjamin, M., Chagnon, F., Momeau, G., Harvey, B., Voogt, J., Jean, M., 2008, Overview and first results of the Montreal urban snow experiment 2005, *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY*, 47 (1): 59-75.
- Lovejoy, S., A.-F. Tuck, S. Hovde, and D. Schertzer D.(2008), Do stable atmospheric layers exist?, *Geophysical Research Letters*, Volume: 35, Issue: 1 Article Number: L01802.
- Lovejoy S., Schertzer D., Allaire V.-C. 2008, The remarkable wide range spatial scaling of TRMM precipitation: *Atmospheric Research* Vol. 90, Issue: 1 Pages: 10-32.

- Lovejoy S., Tarquis A.M., Gaonac'h H., Schertzer D., 2008, Single and multiscale remote sensing techniques multifacets, and MODIS derived vegetation and soil moisture. *Vadose Zone Journal*. Volume: 7 Issue: 2 Pages: 533-546.
- Lovejoy S., Schertzer D., Lilley M., Strawbridge K.B., Radkevich A., 2008, Scaling turbulent atmospheric stratification. I: Turbulence and waves Lovejoy S.: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. Volume: 134 Issue: 631 Pages: 277-300.
- Mallet, M., Pont, V., Liousse, C., Gomes, L., Pelon, J., Osborne, S., Haywood, J., Roger, J.-C., Dubuisson, P., Mariscal, A., Thouret, V., Goloub, P., 2008, Aerosol direct radiative forcing over Djougou (northern Benin) during the African Monsoon Multidisciplinary Analysis dry season experiment (Special Observation Period-0), *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES*, 113: Art. No. D00C01.
- Masson V., L. Gomes, G. Pigeon, K. Liousse, J.-P. Lagouarde, J. Voogt, J. Salmond, T. Oke, D. Legain, O. Garrouste and P. Tulet, 2008: «The Canopy and Aerosol Particles Interactions in Toulouse Urban Layer (CAPITOU) experiment», *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102, 3-4, 135-157.
- Merchant, C., P. Le Borgne, A. Marsouin, H. Roquet, 2008: Optimal estimation of sea surface temperature from split-window observations, *Remote Sensing of Environment*, 112 (2008) 2469-2484.
- Merchant C.-J., Filipiak M.-J., Le Borgne P., Roquet H., Autret E., Piolle J.-F., Lavender S., 2008: Diurnal warm-layer events in the western Mediterranean and European shelf seas, *Geophysical Research Letters*, Volume: 35 Issue: 4 Article Number: L04601.
- Montroty, R., F. Rabier, S. Westrelin, G. Faure and N. Viltard, 2008: Impact of wind bogus and cloud and rain affected SSM/I data on tropical cyclones analyses and forecasts, *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.* 134.1673-1699.
- Nuret, M., J.P. Lafore, O. Bock, F. Guichard, A. Agusti-Panareda, J.-B. N'Gamini and J.-L. Redelsperger, 2008 : Correction of humidity bias for Vaisala RS80 sondes during AMMA 2006 Observing Period, *J. Atmos. Ocean.Tech.*, 2008 early online release, posted January 2008, doi: 10.1175/2008JTECHA1103.1.
- Pannekoucke O. and S. Massart, 2008, Estimation of the local diffusion tensor and normalization for heterogeneous correlation modelling using a diffusion equation. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.* 134.
- Pannekoucke O., L. Berre and G. Desroziers, 2008: Background error correlation length-scale estimates and their sampling statistics. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.* 134 : 497-508.
- Pigeon G., M. A. Moscicki, J. A. Voogt and V. Masson, 2008: «Simulation of Fall and Winter Energy Balance over a dense urban area using the TEB scheme», *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102, 3-4, 159-171.
- Plu, M., P. Arbogast, and A. Joly, 2008: A wavelet representation of synoptic-scale coherent structures. *J. Atmos. Sci.*, 65(10), 3116-3138.
- Quintana-Seguí, P., P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, and S. Morel, 2008: Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 92-107.
- Rabier F., P. Gauthier, C. Cardinali, R. Langland, M. Tsyrlunikov, A. Lorenc, P. Steinle, R. Gelaro, and K. Koizumi, 2008: An update on THORPEX-related research in data assimilation and observing strategies. *Nonlin. Processes Geophys.*, 15, 81-94.
- Radu, R., Deque M., Somot S., (2008), Spectral nudging in a spectral regional climate model, *Tellus series A - Dynamic Meteorology and Oceanography*, Volume: 60 Issue: 5 Pages: 898-910.
- Radkevich A., Lovejoy S., Strawbridge K.B., Schertzer D., Lilley M., 2008, Scaling turbulent atmospheric stratification. III: Space-time stratification of passive scalars from lidar data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*. Volume: 134 Issue: 631 Pages: 317-335.
- Raynaud L., L. Berre et G. Desroziers, 2008: Spatial averaging of ensemble-based background error variances. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 134, 1003-1014.
- Renard, B., Lang M., Bois P., Dupeyrat A., Mestre O., Niel H., Sauquet E., Prudhomme C., Parey S., Paquet E., Neppel L., Gailhard J., 2008: Regional methods for trend detection: Assessing field significance and regional consistency, *Water Resources Research*, Volume: 44, Issue: 8, Article Number: W08419.
- Rivière G., (2008), Barotropic regeneration of upper-level synoptic disturbances in different configurations of the zonal weather regime, *J. Atmos. Sci.*, 65, 3159-3178.
- Rust, H.W., O. Mestre, and V.K.C. Venema Fewer jumps, less memory: Homogenized temperature records and long memory *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, D19110, doi:10.1029/2008JD009919, 2008.
- Sabater, J.M., Rüdiger, C., Calvet, J.-C., Fritz, N., Jarlan, L., Kerr, Y., 2008, "Joint assimilation of surface soil moisture and LAI observations into a land surface model", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 148 (8-9), pp. 1362-1373, doi:10.1016/j.agrformet.2008.04.003.
- Samain, O., Kergoat, L., Hiernaux, P., Guichard, F., Mougin, E., Timouk, F., Lavenue, F., 2008, Analysis of the in situ and MODIS albedo variability at multiple timescales in the Sahel, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES*, 113 (D14): Art. No. D14119.
- Samain O., J.-L. Roujean and B. Geiger, 2008: Use of a Kalman filter for the retrieval of surface BRDF coefficients with a time evolving model based on the Ecoclimap land cover classification. *Remote Sensing of Environment*, 112 (4): 1337-1346 APR 15 2008.
- Sandu, I., Brenguier J.-L., Geoffroy O., Thouvenot O. and Masson V., (2008), Aerosol Impacts on the Diurnal Cycle of Marine Stratocumulus, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol 65, Issue: 8 Pages: 2705-2718.
- Saunois, M., C. Mari, V. Thouret, J.-P. Cammas, P. Peyrillé, J.-P. Lafore, B. Sauvage, A. Volz-Thomas, P. Nédélec, and J.-P. Pinty (2008), An idealized two-dimensional approach to study the impact of the West African monsoon on the meridional gradient of tropospheric ozone, *J. Geophys. Res.*, 113, D07306, doi:10.1029/2007JD008707.
- Sohne, N., Chaboureaud, J.-P., Guichard, F., 2008, Verification of Cloud Cover Forecast with Satellite Observation over West Africa, *MONTHLY WEATHER REVIEW*, 136 (11): 4421-4434.
- Somot S., Sevault F., Déqué M., Crépon M. (2008) 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled Atmosphere-Ocean Regional Climate Model. *Global and Planetary Change*, 63, pp. 112-126, doi:10.1016/j.gloplacha.2007.10.003.
- Tan, David G. H., Anderson E., De Kloe J., Marseille G.J., Stoffelen A., Poli P., Denneulin M.L., Dabas A., Huber D., Reitebuch O., Flamant P., Le Rille O., Nett H., 2008, The ADM-Aeolus wind retrieval algorithms, *Tellus Series A - Dynamic Meteorology and Oceanography*, Volume: 60 Issue: 2 Pages: 191-205, Mar 2008.
- Termonia P. and F. Voitus: Externalizing the lateral-boundary conditions from the numerical scheme of the dynamical core. *Tellus* (2008), 60A, 632-648.
- Thirel, G., F. Rousset-Regimbeau, E. Martin, and F. Habets, 2008: On the Impact of Short-Range Meteorological Forecasts for Ensemble Streamflow Predictions. *J. Hydrometeorol.*, 9, 1301-1317.
- Todd M.C., D. Bou Karam, C. Cavazos, C. Bouet, B. Heinold, G. Cautenet, P. Tulet, C. Perez, I. Tegen, and R. Washington, 2008. Quantifying uncertainty in estimates of mineral dust flux: an inter-comparison of model performance over the Bodélé Depression, Northern Chad. *J. Geophys. Res.*, 113, D24107, doi:10.1029/2008JD010476.
- Tourre, Y., L. Jarlan, J.-P. Lacaux, C.H. Rotela, M. Lafaye, 2008, Spatio-temporal variability of NDVI-precipitation over southernmost South America: possible linkages between climate signals and epidemics. *Environ. Res. Lett.* 3 044008. doi: 10.1088/1748-9326/3/4/044008
- Tulet, P., M. Mallet, V. Pont, J. Pelon, and A. Boone (2008), The 7-13 March 2006 dust storm over West Africa: Generation, transport, and vertical stratification, *J. Geophys. Res.*, 113, D00C08, doi:10.1029/2008JD009871.
- Tsimplis M., Marcos M., Somot S., 2008: 21st century Mediterranean sea level rise. *Regional model predictions. Global and Planetary Change*, 63(2-3): 105-111, doi:10.1016/j.gloplacha.2007.09.006
- Vana F., P. Bénard, J.-F. Geleyn, A. Simon and Y. Seity : 2008, Semi-Lagrangian advection scheme with controlled damping : An alternative to nonlinear horizontal diffusion in a numerical weather prediction model. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 134 523-537.
- Vergnolle, M., M.-N. Bouin, L. Morel, F. Masson, S. Durand, J. Nicolas, S. Melachroinos, 2008, GPS estimates of ocean tide loading in NW-France: Determination of ocean tide loading constituents and comparison with a recent ocean tide model, *Geophys. J.Int.*, doi: 10.1111/j.1365246X.2008.03734.x.
- Vulpiani, G., Tabary P., Du Chatelet J.P. And Marzano FS (2008) Comparison of advanced radar polarimetric techniques for operational attenuation correction at C band *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume : 25 Issue : 7 Pages : 1118-1
- Wigneron, J.-P., A. Chanzy, P. de Rosnay, C. Rüdiger, and J.-C. Calvet, 2008 : Estimating the Effective Soil Temperature at L-band as a Function of Soil Properties, *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, Vol. 46, No. 3, pp. 797-807.
- Zahiri, E.P., M. Gosset, J.P. Lafore, and V. Gouget, 2008: Use of a Radar Simulator on the Output Fields from a Numerical Mesoscale Model to Analyze X-Band Rain Estimators. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 25, 341-367.

Autres publications scientifiques dans des revues à comité de lecture

- André J.C., J.F. Royer et F. Chauvin, 2008 : Les cyclones tropicaux et le changement climatique. *C. R. Geosciences*, 340, 575-583. doi : 10.1016/j.crte.2008.07.003
- Bergot T., D., Challet J., Chazette P., Drobrinski P., Dupont E., Dupont J.C., Elias T., Fesquet C., Garrouste O., Gomes L., Guérin a., Lapouge F., Lefranc Y., Legain D., Pitras C., Plana- frattori A., Rangonio J., Romand B., Zhang X., 2008, Paris chercheurs dans le brouillard. *La Météorologie*. Aout 2008 N° 62.
- Bernardara P., Schertzer D., Sauquet E., Tchiguirinskaia I., Lang M., 2008, The flood probability distribution tail: how heavy is it? *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. Volume: 22 Pages: 107-122.
- Besse, P., H. Milhem, O. Mestre, A. Dufour, V.-H. Peuch, 2008 : Comparaison de techniques de « Data Mining » pour l'adaptation statistique des prévisions d'ozone du modèle de chimie-transport Mocage, *Pollution Atmosphérique*, n°195, 285-292.
- Blanchard M., L. Franchistéguy, F. Habets, E. Martin, J.Noilhan, 2008. Typologie des sécheresses sur la France et outils de suivi de la ressource en eau utilisés à Météo-France, *Revue Française de Géotechnique*, N°120-121, 11-21, ISSN-0181-0529.
- Brzoska, J.-B., F. Flin et J. Barckicke, 2008 : Explicit iterative computation of diffusive vapour field in the 3-D snow matrix: preliminary results for low flux metamorphism, *Annals of Glaciology* 48, pp 13-18.
- Cammas, J.-P., G. Athier, D. Boulanger, F. Chéroux, J.-M. Cousin, F. Girod, F. Karcher, K. Law, P. Nédélec, V.-H. Peuch, H. Smit, M. Stoll, V. Thouret, A. Volz-Thomas and R. Zbinden, 2008 : Les programmes aéroportés MOZAIC et IAGOS (1994-2007), *La Météorologie*, n° 62, août 2008.
- Catry., B., Geleyn J.-F., Bouyssel F., Cedilnik J., Brozkova R., Derkova M., Mladek R., 2008, a new sub- grid scale lift formulation in a mountain drag parameterisation scheme, *Meteorologische Zeitschrift*, Volume 17, Issue 2, Pages 193-208.
- Chauvin F., J.-F. Royer, 2008 : Des cyclones et des hommes. *La Météorologie*, 8-e série - n°61 - mai 2008, 52-66.
- Crassous, R., S. Hallegatte, 2008, Le changement climatique, à quel coût ?, *La Recherche*, Janvier 2008, pp 60-63.
- Delécluse P., 2008, La machine océan peut-elle se gripper ?, *Les dossiers de la Recherche*, N°31, mai 2008, pp 38-42.
- Delécluse P., 2008 : The origin of climate changes, *Revue Scientifique et technique - office international des épizooties*, Volume : 27 Issue : 2 Pages : 309-317.
- Déqué M., 2008, De plus en plus de canicules, *Les dossiers de la Recherche*, N°31, mai 2008, pp 16-21.
- Déqué, M., Somot, S., 2008 : Extreme precipitation and high resolution with Aladin. *Időjárás Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 112(3-4):179-190
- Douville H., 2008 : Vers une sécheresse globale ? *La Recherche*, n°421, Juillet-Août 2008, 40-43.
- Dufresne J.-L. et J.-F. Royer, 2008 : Simulation de l'évolution du climat aux échelles globales et régionales. *La Houille Blanche*, N°2-2008, 33-37. doi:10.1051/lhb:2008014.
- Faure G., Westrelin S. et Roy D., Fév 2008 : Un nouveau modèle opérationnel à Météo-France : Aladin-Réunion, *La Météorologie*, 8ème série, n°60. Fév 2008.
- Flin, F. and J.-B. Brzoska, 2008 : The temperature gradient metamorphism of snow: vapour diffusion model and application to tomographic images, *Ann. Glaciol.*, 49, 17-21.
- Geiger B., C. Meurey, D. Lajas, L. Franchistéguy, D. Carrer and J.-L. Roujean, 2008 : Near real-time provision of downwelling shortwave radiation estimates derived from satellite observations, *Meteorol. Appl.* Volume : 15 Issue : 3 Pages : 411 - 420.
- Hallegatte, S., M. Ghilc, P. Dumasa and J.-C. Hourcade, 2008, Business cycles, bifurcations and chaos in a neo-classical model with investment dynamics, *Journal of Economic Behavior & Organization*, Volume 67, Issue 1, July 2008, Pages 57-77.
- Kopf, S., M. Ha Duong, and S. Hallegatte, 2008. Using maps of city analogues to display and interpret climate change scenarios and their uncertainty, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 905-918.
- Llubes, M., N. Florsch, J.P. Boy, M. Amalvict, P. Bonnefond, M.-N. Bouin, S. Durand, M.-F. Esnault, P. Exertier, J. Hinderer, M.-F. Lalancette, F. Masson, L. Morel, J. Nicolas and G. Wöppelmann, 2008, A multitechnique monitoring of ocean loading in North of France, *CR Géosciences*, doi:10.1016/j.crte.2008.03.05.
- Lovejoy S., Schertzer D., 2008, Turbulence raindrops and the $l(1/2)$ number density law *Journal of Physics*. Vol. 10 Article Number: 075017.
- Lovejoy S., Gaonac'h H., Schertzer D., 2008 : Anisotropic scaling models of rock density and the Earth's surface gravity field. *Mathematical Geosciences* Volume : 40 Issue : 5 Pages: 533-573.
- Paz, S., Y. Tourre, J. Brolley, 2008 : Multi-temporal climate variability over the Atlantic Ocean and Eurasia : Linkages with Mediterranean and West African Climate. *Atmos. Sci. Lett.*, Royal Met. Soc.
- Pigeon G., A. Lemonsu, V. Masson and J. Hidalgo, 2008 : «From urban climate observation to integrated modelling of the city», *La Météorologie* », 62, I-IX.
- Planton S., M. Déqué, F. Chauvin, and L. Terray, 2008 : Expected impacts of climate change on extreme climate events. *C. R. Geoscience*, 340, 564-574.
- Poli P., J. Pailieux, V. Ducrocq, P. Moll, F. Rabier, M. Mauprivez, S. Dufour, M. Grondin, F. Lechat-Carvalho, J.-L. Issler, A. De Latour, L. Ries, 2008 : Meteorological Applications of GNSS from space and on the ground, *Inside GNSS*, Vol 3, number 8, p 30-39.
- Rivière O., G. Lapeyre and O. Talagrand, 2008 : Nonlinear Generalization of Singular Vectors : Behaviour in a Baroclinic Unstable Flow. *JAS*, 65, 1896-1911.
- Royer J.-F., Biau A., Chauvin F., Schertzer D., Lovejoy S. 2008 : Multifractal analysis of the evolution of simulated precipitation over France in a climate scenario. *Comptes Rendue Geoscience*. Vol. 340 Issue: 7 Pages: 431-440.
- Soubeyrou J.-M., Martin E., Franchistéguy L., Habets F., Noilhan J., Baillon M., Regimbeau F., Vidal J.-Ph., Le Moigne P., Morel S. 2008 : L'application Safran - Isba - Modcou (SIM), un outil pour la production opérationnelle et les études hydrométéorologiques, *La Météorologie*, 8, 63, Novembre 2008, 40-45.
- Tourre, Y., J.-P. Lacaux, C. Vignolles, J.-A. Ndione, M. Lafaye, 2008 : Mapping of Zones Potentially Occupied by Mosquitoes (ZPOMs) *Aedes vexans* and *Culex poicilipes*, the Main Vectors of Rift Valley Fever in Senegal. *Geospatial Health*, 3, 69-79.
- Xue, H., Y. Tourre, W. Fengying, D. Wenjie, 2008 : Spatio-temporal variability of Northern Hemispheric sea-level pressure (SLP) and precipitation over the mid-to-low reaches of Yangtze River. *Advances Atmos. Sci.*, 25, 458-466.
- Yan X., Ducrocq V., Poli P., Jaubert G., Walpersdorf A., 2008 : Mesoscale GPS Zenith Delay assimilation during a Mediterranean heavy precipitation event, *Advances in Geosciences*, 17, 71-77.

Contributions à des ouvrages ou à des rapports

Brun E., Z-L. Yang, R. Essery and J. Cohen, 2008: Snow-cover parametrization and modeling, *Snow and Climate*, Cambridge University Press, ISBN-13: 9780521854542, pp 125-180

Gershunov, A., H. Douville, 2008: Extensive summer hot and cold spells under current and possible future climatic conditions: Europe and North America, Chapter 3, In: H. Diaz and R. Munné (Eds.), *Climate Extremes and Society*. Cambridge University Press, 74-98.

Jordan R., M. Albert and E. Brun, 2008: physical processes within the snow cover and their parametrization, *Snow and Climate*, pp 12-69.

Hallegatte, S., 2008: Adaptation to climate change: do not count on climate scientists to do you work, Reg-Markets Center, Related Publication, 08-01.

Hallegatte S., S. Somot, and H. Nassopoulos, 2008 : Anticiper le Changement Climatique autour de la Méditerranée, Institut de Prospective Economique du Monde Méditerranéen, 76pp.

Hourcade, J.C., S. Hallegatte, 2008 : Le rapport Stern sur l'économie du changement Institut Véolia.

Jordan R., M. Albert and E. Brun, 2008: Physical processes within the snow cover and their parametrization, *Snow and Climate*, Cambridge University Press, ISBN-13: 9780521854542, pp 12-69.

Lacaux J-P., Y. Tourre, A. Güell, P. Sabatier, E. Coëffier, L. Braak, 2008: The RedGems Information System. *Climate, Environment and Public Health. Health and Climate Series: Advances in Global Change Research*. Thomson, Garcia-Herrera, Beniston (Edts). Chapter 7, 137-141. Springer ISBN: 978-1-4020-6876-8.

Lahellec, A., S. Hallegatte, J.-Y. Grandpeix, P. Dumas, and S. Blanco, 2008: Feedback characteristics of non-linear dynamics systems, *Europhysics Letters* 81 (2008), 60001.

Karbou, F., 2008: Treatment of surface emissivity for satellite microwave data assimilation, *ECMWF Seminar Proceedings on Recent developments in the use of satellite observations in numerical weather prediction*.

King J., J. Pomeroy, D. Gray, C. Fierz, P. Föhn, R. Harding, R. Jordan, E. Martin and C. Plüss, 2008: Snow-atmosphere energy and mass balance, *Snow and Climate*, Cambridge University Press, ISBN-13: 9780521854542, pp 70-124.

Tourre Y. J.-P. Lacaux, 2008 : Science au Présent : Etapes : Surveillance par satellite des risques épidémiques. *Encyclopædia Universalis*, ISBN : 2-85229-515-5, 155-158.

Tourre Y., S. Luch-Cota, W. B. White, 2008 : Variabilité multidécennale du climat: Exemple des petits pélagiques. *Science au Présent*, *Encyclopædia Universalis*.

Thèses soutenues en 2008

Baehr C., 2008 : Modélisation probabiliste des écoulements atmosphériques turbulents afin d'en filtrer la mesure par approche particulière Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 23 septembre 2008.

Bousserez N., 2008 : Modélisation du transport intercontinental de la pollution atmosphérique entre les Etats-Unis et l'Europe. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 29 avril 2008.

Crumeville S., 2008 : Impact des systèmes convectifs sur les propriétés hygroscopiques des aérosols : analyse de deux cas d'étude durant la campagne AMMA. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 23 juin 2008.

Etchevers I., 2008 : Etude de l'aérosol atmosphérique en Europe : observations et modélisation en sites d'altitude Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 15 décembre 2008.

Hidalgo J., 2008 : Une approche expérimentale, numérique et théorique de la circulation de brise urbaine diurne pour les villes continentales. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 7 avril 2008.

Jolivet S., 2008 : Modélisation mésoéchelle des cyclones tropicaux dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien avec Méso-Mh. Cas d'étude DINA Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 26 juillet 2008.

Joly M., 2008 : Rôle de l'océan dans la variabilité climatique de la mousson africaine Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 27 novembre 2008.

Martet M., 2008 : Introduction des différentes composantes de l'aérosol atmosphérique dans le modèle MOCAGE Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 26 juin 2008.

Michel Y., 2008 : Assimilation de données d'images télé-détectées en météorologie Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 17 décembre 2008.

Montroty R., 2008 : Impact d'une assimilation à mésoéchelle sur la prévision cyclonique. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 19 décembre 2008.

Pannekoucke O., 2008 : Modélisation des structures locales de covariance des erreurs de prévisions à l'aide des ondelettes. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 20 mars 2008.

Pergaud J., 2008 : Etude et paramétrisation de la turbulence et des nuages de couche limite Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 4 décembre 2008.

Plu M., 2008 : Représentation numérique et mathématique des structures météorologiques cohérentes d'échelle synoptique. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 24 janvier 2008.

Quintana P., 2008 : Simulation hydrologique en région méditerranéenne avec SAFRAN-ISBA-MOD-COU. Amélioration de la physique et évaluation des risques dans le cadre du changement climatique Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 10 décembre 2008.

Semane N., 2008 : Etude par simulation et assimilation de la composition chimique et des échanges dans la haute troposphère – basse stratosphère Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 18 décembre 2008.

Voitus F., 2008 : Etude de la faisabilité des conditions aux limites latérales bien-posées et transparentes dans la dynamique de modèles ALADIN et AROME Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, discipline Océan, Atmosphère et Environnement, soutenance le 3 décembre 2008.

Habilitations à diriger des recherches soutenues en 2008

Douville H., 2008 : Influence des surfaces continentales sur la variabilité du cycle hydrologique des échelles inter-annuelle à multi-décennale : une brève histoire de la « dérive des continents » dans les modèles de climat. Ecole Polytechnique, discipline Physique de l'atmosphère soutenue le 8 février 2008.

Roujean J.-L., 2008 : Télédétection optique multi-angulaire des surfaces continentales pour la Météorologie, Université Paul Sabatier Toulouse, discipline Physique de l'atmosphère, soutenue le 14 avril 2008.

Glossaire

Organismes

AASQA	Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air
ACMAD	Centre Africain pour les Applications de la Météorologie au Développement
AERES	Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur
CEPMET	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CESBIO	Centre d' Etudes Spatiales de la Biosphère
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
DDSC	Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles
ESA	European Space Agency (Agence Spatiale Européenne)
EUMETNET	EUropean METeorological NETwork
EUMETSAT	EUropean organisation for the exploitation of METeorological SATellites
HADLEY CENTER	Centre Britannique de Recherche sur le Changement Climatique
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER
IMFT	Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
MEEDDAT	Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire.
MERCATOR Océan	GIP visant à la mise en œuvre d'un système opérationnel de prévision océanographique global
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
UCAD	Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal
UKMO	(MetOffice) United Kingdom Meteorological Office

Laboratoires ou unités de recherche/développement

CDM	Centre Départemental de la Météorologie
CEN	Centre d'Etudes de la Neige
CETP	Centre d'Étude des environnements Terrestre et Planétaire
CMM	Centre de Météorologie Marine
CMR	Centre de Météorologie Radar (DSO)
CMS	Centre Météorologie Spatiale
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
DIRAG	Direction Inter-Régionale Antilles-Guyane
GAME	Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique
GMEI	Groupe de Météorologie Expérimentale & Instrumentale
INERIS	Institut National de l'Environnement industriel et des Risques
IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
LA	Laboratoire d'Aérodynamique
LaMP	Laboratoire de Météorologie Physique
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LEGOS	Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale
LGGE	Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement
LOCEAN	Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
MIR	Maintenance Inter-Régionale
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SAFIRE	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute

Programmes et projets nationaux et européens

Programmes et projets nationaux

ANR	Agence Nationale de la Recherche
CYPRIM	CYClogénèse et PRécipitations Intenses en région Méditerranéenne

Programmes et projets internationaux

CERES	CarboEurope Regional Experiment Strategy
CLOUDNET	Programme Européen visant à l'étude climatologique des nuages et à l'amélioration de leur paramétrisation dans les modèles
CONCORDIASI	Validation de l'assimilation de IASI adaptée à l'Antarctique à l'aide de mesures in situ.
COPAL	Community heavy-PAYload Long endurance instrumented aircraft for tropospheric research and geo-sciences
ENSEMBLES	Ensemble-based predictions of climate changes and their impacts (FP6)
EUCOS	EUMetnet Composit Observing System
EUFLAR	EUropean Fleet for Airborne Research (FP6)
FLYSAFE	Système de vol intégré pour l'amélioration de la sécurité, la protection contre les imprévus, et les opérations tout temps
GALERNE	GAZ et Liquides Evaporants et Risques des Nuisances Environnementales et humaines
GEMS	Global and regional Earth-system Monitoring using Satellite and in-situ data (initiative du CEPMMT)
GICC	Gestion et Impacts du Changement Climatique (programme du ministère de l'écologie)
GIEC	Groupe Inter-gouvernemental d'Experts sur le changement Climatique (IPCC)
GMES	Global Monitoring for Environment and Security (Système Global d'Observation de l'Environnement pour la Sécurité, programme de l'Union Européenne)
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model (modélisation)
HyMeX	Hydrological cycle in the Mediterranean EXperiment
PREVIEW	Projet Européen visant à améliorer la gestion des risques atmosphériques, géophysiques et anthropiques
PIRATA	Prediction and Research Moored Array.
SAF	Satellite Application Facility
THORPEX	The Observing Research and Predictability EXperiment (programme mondial du GARP sous l'égide de l'OMM)
TIGGE	THORPEX International Grand Global Ensemble

Campagnes expérimentales

AMMA	Approche Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
COPS	Convective and Orographically-induced Precipitation Study
POLARCAT	Polar Study using Aircraft, Remote Sensing, Surface Measurements and Models, of Climate, Chemistry, Aerosols, and Transport.
SMOSMANIA	Soil Moisture Observing System : Meteorological Automatic Network Integrated Application

Autres sigles, abréviations ou acronymes

ADCP	Profilleur de courant acoustique Doppler (Acoustic Doppler Current Profiler)
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder
ALADIN	Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement InterNational
AMDAR	Aircraft Meteorological Data Acquisition and Relay
AMSR	Advanced Microwave Scanning Radiometer
AMSR-E	AMSR for Earth observing system
AMSU-A	Advanced Microwave Sounding Unit – A
AMSU-B	Advanced Microwave Sounding Unit – B
API	Année Polaire Internationale
AQUA	Satellite du Earth observing system de la NASA, doté du sondeur AIRS
Aqua-Train	constellation de six satellites franco-américains qui volent en formation à quelques minutes d'intervalle sur une orbite héliosynchrone, comprenant entre autres le satellite Aqua.
ARAMIS	Application RADAR à la Météorologie Infra-Synoptique

ARGIC	Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions	NOWCASTING	prévision immédiate
AROME	Application de la Recherche à l'Opérationnel à Mésio-Echelle	OASIS	Ocean Atmosphere Sea Ice Sol (coupleur ocean/atmosphere développé au Cerfacs)
ARPEGE	Applications de la Recherche Petite Echelle Grande Echelle (modèle global de prévision numérique opérationnel de Météo-France)	OLR	Outgoing Longwave Radiation – (Rayonnement sortant de l'atmosphère)
ARPEGE-Climat	Modèle de simulation climatique global du CNRM	PACA	Provence - Alpes - Cote d'Azur
ASCAT	Advanced SCATterometer	PALM	Projet d'Assimilation par Logiciel Multi-méthodes
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer	PCRD	Programme Cadre de Recherche et Développement
BAMED	Balloons in the Mediterranean, 2008-2010	PEARP	Prévision d'Ensemble ARPège
BDPI	Base de Données d'Expertise en Prévision Immédiate.	PERLE	Programme d'Evaluation des Rejets Locaux d'Effluents
CAPE	Convective Available Potential Energy	PI	Prévision Immédiate.
CAROLS	Cooperative Airbone Radiometer for Ocean and Land Studies	PMIP	Projet d'Intercomparaison de Modèles Paléoclimatiques
CCN	Cloud Condensation Nucléi (noyaux de condensation)	PM10	particules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres.
CERMA	Centre de Recherche Méthodologique d'Architecture	PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
CMIP	Climate Model Intercomparaison Project	POI	Période d'Observation Intensive
CNRM-CM	CNRM-Climate Model	RASS	Radio Acoustic Sounding System
COBEL	Code de Brouillard à l'Echelle Locale	RDT	Rapid development Thunderstorm
CPER	Contrat de Plan Etat Région	ROC	Relative Operating Characteristics. Diagramme avec en abscisse le taux de fausses alertes et en ordonnée le taux de bonnes prévisions.
CROCUS	Modèle d'évolution du manteau neigeux	SAFRAN	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige
CTM	Chemistry and Transport Model	SAF-NWC	Satellite Application Facility - NoWcasting
DDU	Dumont d'Urville (-66,6S;140E), station Météo sur le continent Antarctique	SESAR	Single European Sky ATM Research Programme
DMG	Demier Maximum Glaciaire	SEVIRI	Imageur SEVIRI
DomeC	(-75,1S;123,4E), station de mesure sur le continent Antarctique	SIM	Safran-Isba-Modcou
DSO	Direction des Systèmes d'Observation	SLHD	Semi-Lagrangian Horizontal Diffusion
DSA	Détection Sismique des Avalanches.	SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity
DTS	Data Targeting System	SPARC	Stratospheric Processes And their Role in Climate)
E-GVAP	The EUMETNET GPS Water Vapour Programme http://eqvap.dmi.dk/)	SRES	Special Report on Emissions Scenarios
ECN	Ecole Centrale de Nantes	SURFEX	SURFace EXternalisée
ECOCLIMAP	Base de données de paramètres de surface	SVP-B	Surface Velocity Program (océanographie)
ECUME	Exchange Coefficients from Unified Multi-campaigns Estimates	TEB	Town Energy Balance
EDKF	Eddy-Diffusivity-Kain-Fritsch	TOPMODEL	TOPography based hydrological MODEL
ENVISAT	ENVironmental SATellite	TSM	Température de Surface de la Mer
EPI	Evénements Précipitants Intenses	UHF	Ultra High Frequency
ERA40	Réanalyse (sur 40 ans) du CEPMMT	UTC	Universal Time Coordonnated (TU)
ERPG	Emergency Response Planning Guidelines	VHF	Very High Frequency
ESFRI	European Strategy Forum on Research Infrastructures	WIMS-Cb	Weather InforMation Systems on Cumulonimbus
GEWEX	Global Energy and Water cycle Experiment	WCRP	World Climate Research Programme
GFO	Geosat Follow On	3D-Var	Assimilation variationnelle tridimensionnelle
GLOSCAL	Global Ocean Salinity Calibration and Validation	3d-FGAT	Méthode d'assimilation variationnelle "3D First Guess at Appropriate Time".
GPS	Global Positioning System	4D-Var	Assimilation variationnelle quadridimensionnelle
Heat Low	Dépression Thermique Saharienne		
HIRS	High resolution Infrared Radiation Sounder		
IAGOS	Integration of routine Aircraft measurements into a Global Observing System		
IASI	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge		
ICOS	Integrated Carbon Observation System		
IFS	Integrated Forecasting System		
IPY	International Polar Year		
IRIDIUM	Satellite en orbite polaire		
ISBA	Interaction between Soil, Biosphere and Atmosphere		
LAI	Leaf Area Index / Cartographie de l'indice foliaire.		
LIDAR	Light Induced Detection And Ranging		
MACC	Monitoring Atmospheric Composition and Climate		
MERCATOR	Projet d'océanographie opérationnelle de prévision des caractéristiques physiques de l'océan		
MESR	Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche		
MESO-NH	Modèle numérique à MESO-échelle Non-Hydrostatique		
METOP	METeorological Operationnal Polar satellites		
MFWAM	Météo-France WAve Model		
MHS	Microwave Humidity Sounder		
MOCAGE	Modèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle		
MODCOU	Modèle hydrologique COUplé surface-souterrain		
MOPITT	Measurements Of Pollution Into The Troposphere.		
MOTHY	Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures		
MSG	Meteosat Seconde Génération		
NAO	North Atlantic Oscillation		
NARR	North American Regional Reanalysis		

Organigramme du Centre national de recherches météorologiques

A la date du : 31.12.2008

Directeur : **Éric Brun**

Directeur adjoint - Toulouse : **Joël Poitevin**

Directeur adjoint scientifique - Toulouse : **Jean Pailleux**

Directeur adjoint - Paris : **Pascale Delécluse**

SAFIRE : Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement

CENTRE D'AVIATION MÉTÉOROLOGIQUE

CAM - Toulouse

Chef de division : **Marc Pontaud**

CENTRE D'ÉTUDES DE LA NEIGE

CEN - Grenoble

Chef de division : **Pierre Etchevers**

CENTRE DE MÉTÉOROLOGIE MARINE

CMM - Brest

Chef de division : **Jean Rolland**

GROUPE DE MODÉLISATION POUR L'ASSIMILATION ET LA PRÉVISION

GMAP - Toulouse

Chef de division : **François Bouttier**

GROUPE DE MÉTÉOROLOGIE EXPERIMENTALE ET INSTRUMENTALE

GMEI - Toulouse

Chef de division : **Jean-Louis Brenguier**

GROUPE DE MÉTÉOROLOGIE DE GRANDE ÉCHELLE ET CLIMAT

GMGEC - Toulouse

Chef de division : **Serge Planton**

GROUPE DE MÉTÉOROLOGIE DE MOYENNE ÉCHELLE

GMME - Toulouse

Chef de division : **Joël Noilhan**

RÉSEAU D'ÉTUDES ET DE TRANSFERT INTERNE DES CONNAISSANCES

RETIC - Toulouse

Chef de division : **Christine Dreveton**

SERVICES COMMUNS

Paris & Toulouse

Responsable : **Joël Poitevin**

Nota :

Le GAME est l'unité de Recherche Associée entre Météo-France et le CNRS. Les unités sur fond bleu foncé sont entièrement incluses dans le GAME, celles sur fond bleu clair sont partiellement incluses dans le GAME.

SAFIRE est une unité mixte de service entre Météo-France, le CNRS et le CNES

Activités de recherche : événements marquants en 2008

15-17 janvier

Évaluation du Centre de Recherches Météorologiques par l'AERES.

27 janvier

Passage en opérationnel de la version 1.5 de la Prévision d'Ensemble Arpege (augmentation du nombre de niveaux verticaux, ajout d'informations d'incertitude sur le globe).

4 février – 1^{er} mars

Campagne Flysafe « givrage » en Région Parisienne.

6 février

Passage en opérationnel de la version T538/L60 d'Arpege/Aladin (augmentation de résolution horizontale et verticale).

28 mars – 13 avril

Campagne Polarcat « pollution » en Suède (Kiruna).

1^{er} avril

Intégration des activités de recherche dans le SMQ de Météo-France.

30 avril – 28 mai

Campagne EUCARII aux Pays-Bas.

2-6 juin

Assemblée plénière du GCSS (Gewex Cloud System Study) au CIC/Toulouse.

10 juin

Journée Prévision Numérique du Temps au CIC.

29 juin – 17 juillet

Campagne Polarcat : l'ATR est au Groënland.

1^{er} juillet

Bascule en opérationnel des modèles Arpege/Aladin « obs » (assimilation de données IASI, assimilation d'ensemble, émissivités micro-ondes).

4 août – 4 septembre

Campagne Flysafe « orages » en région parisienne.

5 août

L'AERES classe en A+ le laboratoire GAME.

6-27 août

Campagne MOBILEX sur l'aérodrome de Muret-Lherm.

8 septembre

Solarisation de la bouée phare d'Ouessant.

15 septembre

Début de la 1^{ère} phase de la campagne Concordiasi.

22-24 septembre

Réunion du groupe mondial de recherche sur les modèles couplés à Paris (préparation des simulations pour le 5^e rapport du GIEC).

24-25 septembre

Atelier « Convergence » sur la Physique dans les modèles de PNT à Toulouse.

1^{er} novembre

Début de la campagne « Brouillard Roissy » (validation sodar).

14-16 novembre

Exposition « Ville Européenne des Sciences » au Grand Palais à Paris.

19 novembre

Colloque « Le changement climatique régional : de la connaissance à l'action » au CIC à Toulouse.

5 décembre

Adhésion de Météo-France au Réseau Thématique de Recherche Avancée/Sciences et Technologies de l'Aéronautique et de l'Espace.

18 décembre

Le modèle AROME est déclaré « bon pour le service ».

Météo-France

1, quai Branly
75340 Paris Cedex 7

Tél. : 01 45 56 71 71

Fax : 01 45 56 71 11

www.meteofrance.com

Météo-France est certifié ISO 9001-2000
par Bureau Veritas Certification

Rapport Recherche & Développement 2008

Photos : © PlanetObserver / Altitude • Patrick Pichard / Météo-France



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance