



ENCADRÉS SCIENTIFIQUES

du laboratoire

CNRM/GAME, URA 1357

SOMMAIRE

	<i>Page</i>
GMAP – Encadrés scientifiques	4
GMAP-1 L'assimilation des sondeurs hyperspectraux en conditions nuageuses	5
GMAP-2 Caractérisation de l'émissivité de surface et assimilation des données micro-ondes au dessus des surfaces continentales	6
GMAP-3 Assimilation des données de radar dans Arome	7
GMAP-4 L'assimilation des structures météorologiques	8
GMAP-5 Assimilation d'ensemble Arpege	9
GMAP-6 Modélisation hétérogènes des corrélations d'erreurs de prévision	10
GMAP-7 Cycle de vie des cyclogénèses et tempêtes hivernales	11
GMAP-8 Rétroaction des ondes synoptiques sur la circulation générale atmosphérique et les régimes de temps	12
GMAP-9 Sensibilité des épisodes de précipitations intenses du bassin méditerranéen aux anomalies de tourbillon potentiel d'altitude	13
GMAP-10 Améliorations de la résolution et de la représentation des processus physiques dans Arpege	14
GMAP-11 Les noyaux dynamiques et le couplage	15
GMAP-12 Le modèle Arome et son système d'assimilation	16
GMAP-13 Prévision d'ensemble avec Arpege	17
GMAP-14 Concordiasi : une campagne de mesure internationale en Antarctique	18
GMEI – Encadrés scientifiques	19
GMEI-1 Estimation non-linéaire stochastique pour le filtrage de mesures turbulentes et l'assimilation de données géophysiques	20
GMEI-2 Prévision du brouillard	21
GMEI-3 Mise au point d'une mosaïque radar nationale de vents 3D et assimilation des vecteurs vents restitués dans le modèle AROME	22
GMEI-4 Observations et simulations à haute résolution de super-cellules tornadiques	23

		Page
GMEI-5	Interactions aérosols/nuages/rayonnement	24
GMEI-6	Développement instrumental pour la microphysique des nuages et des aérosols	25
GMEI-7	Contribution des moyens mobiles de mesures météorologiques aux campagnes de mesures	26
GMEI-8	Sonder la couche limite atmosphérique dans une veine hydraulique	27
GMEI-9	Marée interne : du laboratoire à l'océan	28
GMGEC – Encadrés scientifiques		29
GMGEC-1	« Stream-2 » du projet FP7-ENSEMBLES : Evaluation d'un nouveau scénario de simulation des gaz à effet de serre	30
GMGEC-2	Développement et évaluation du modèle CNRM-CM5	31
GMGEC-3	Régionalisation du climat sur le domaine méditerranéen	32
GMGEC-4	Incertitudes sur le changement climatique régional	33
GMGEC-5	Prévisibilité saisonnière multimodèles sur l'Afrique	34
GMGEC-6	Le projet ANR-IRCAAM : Influence réciproque des Climats d'Afrique de l'Ouest, du sud de l'Asie et du bassin Méditerranéen	35
GMGEC-7	Le projet RTRA-CYMENT : Modélisation hydrologique globale et analyse des tendances récentes sur les débits des grands bassins	36
GMGEC-8	Détection statistique des changements climatiques	37
GMGEC-9	Campagne AMMA-EGEE : Langue d'eau froide et Mousson Africaine	38
GMGEC-10	Le projet GMES-MACC : Monitoring Atmospheric Composition and Climate	39
GMGEC-11	Participation aux exercices internationaux de simulation des interactions chimie-climat	40
GMGEC-12	Projet d'un sondeur géostationnaire pour la surveillance de la qualité de l'air en Europe	41
GMME – Encadrés scientifiques		42
GMME-1	Variabilité intrasaisonnière de la mousson africaine	43
GMME-2	Systèmes nuageux et convection en Afrique (AMMA)	44
GMME-3	Systèmes précipitants méditerranéens : préparation de l'expérience HyMeX	45
GMME-4	Couches Limites Atmosphériques	46

		Page
GMME-5	Processus de surface et cycle de l'énergie en Afrique de l'ouest	47
GMME-6	Téledétection des surfaces continentales	48
GMME-7	Hydrologie à l'échelle des grands bassins versants français	49
GMME-8	Prévisibilité à l'échelle convective des systèmes précipitants et crues rapides en région méditerranéenne	50
GMME-9	Assimilation de nouveaux types d'observations	51
GMME-10	Modélisation intégrée de la ville (TEB) et changement climatique	52
GMME-11	Modélisation de la surface – SURFEX	53
GMME-12	Modélisation atmosphérique à mésoéchelle pour la recherche	54
CEN – Encadrés scientifiques		55
CEN-1	Modélisation distribuée de la production en eau du haut bassin versant nivo-glaciaire d'un glacier tropical	56
CEN-2	Etude de la conductivité thermique de la neige alpine	57
CEN-3	Projet ANR SNOWWHITE	58
CEN-4	Approches micro et macro de la surface spécifique de la neige alpine	59
CEN-5	Instrumentation en chambre froide et sites d'altitude	60
CEN-6	Incertitudes associées à la modélisation de l'impact du changement climatique sur le régime hydrologique du bassin de la Haute Durance	61
CEN-7	Détermination de l'albédo des surfaces enneigées par téledétection et assimilation dans un modèle numérique de neige	62
CEN-8	45 années de simulation de l'enneigement et des principales conditions météorologiques dans les massifs alpins et les Pyrénées	63
CEN-9	Étude sur les paramètres nivo-météorologiques représentatifs des événements de transport de neige par le vent à échelle locale	64
CEN-10	Etude climatologique de l'activité avalancheuse naturelle au cours des 50 dernières années sur les Alpes françaises	65
CEN-11	Participation du Centre d'Etudes de la Neige au projet ANR OPTIMISM	66

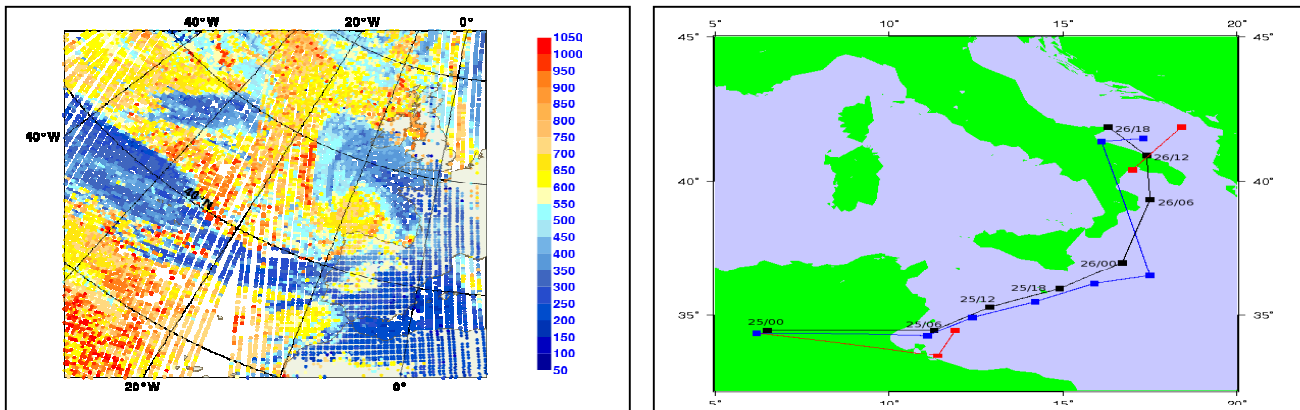
ENCADRÉS SCIENTIFIQUES

de l'unité de recherche

GMAP

Avec le lancement en 2002 du sondeur infrarouge AIRS à bord du satellite américain Aqua et en 2006 de celui de IASI à bord du satellite européen MetOp, l'observation par satellite de la Terre et de l'atmosphère a connu des progrès considérables. En effet ces sondeurs hyperspectraux fournissent de l'information sur l'atmosphère et la surface terrestre dans plusieurs milliers de canaux par point d'observations. Cependant, la mesure infrarouge est fortement modifiée par la présence de nuages. Une bonne détection et caractérisation des nuages est donc nécessaire pour pouvoir bien simuler ces observations et tirer pleinement bénéfice de l'information apportée par ces sondeurs dans les modèles de dynamique atmosphérique. L'assimilation des radiances nuageuses AIRS et IASI a été étudiée dans le cadre du projet CYPRIM (ACI Aléas et changements globaux) portant sur les cyclogénèses et précipitations intenses en Méditerranée (Pangaud, 2009).

La première approche qui a été suivie a été de déterminer, à l'aide des observations et d'une simulation du transfert radiatif en ciel clair à partir de l'ébauche du modèle, la pression de sommet des nuages et la fraction effective de nuages. La figure de gauche montre la pression de sommet des nuages en hPa déduites de IASI lors de l'approche de la tempête Klaus des côtes françaises le 24 janvier 2009 vers minuit.



L'enroulement de nuages élevés (couleurs bleues) associée à la dépression est visible, ainsi que des bandes de fronts secondaires. Ces paramètres nuageux sont ensuite pris en compte dans la simulation des radiances nuageuses lors du processus d'assimilation de données. L'apport de l'assimilation des radiances en présence de nuages est légèrement bénéfique sur les scores de prévision numérique. Leur apport peut être particulièrement important dans certains cas comme l'illustre la figure de droite. Elle montre les trajectoires prévues d'une tempête en mer Méditerranée de petite échelle qui a touché le sud de l'Italie à partir d'une analyse du 23 septembre 2006 à 00 UTC. En bleu correspond la trajectoire avec l'assimilation des radiances AIRS nuageuses, en rouge celle de l'expérience de référence n'utilisant que les radiances en ciel clair. La trajectoire noire correspond à la trajectoire de la dépression déduite d'une analyse vérificatrice. L'assimilation des radiances nuageuses permet de mieux simuler la trajectoire, l'évolution de la pression de la mer de la dépression ainsi que les précipitations associées (Pangaud et al, 2009).

Pour aller plus loin, on vise maintenant à rétroagir sur les variables nuageuses du modèle atmosphérique en utilisant un modèle de transfert radiatif plus élaboré en conditions nuageuses.

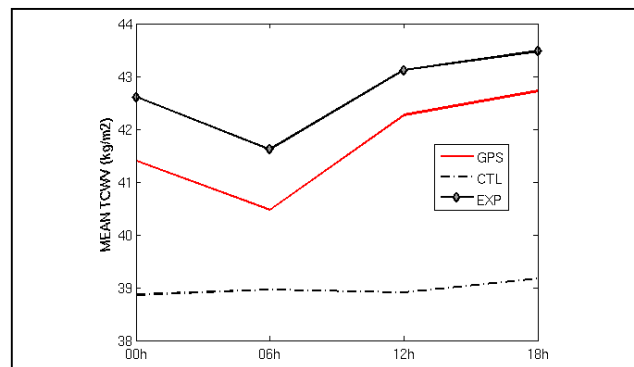
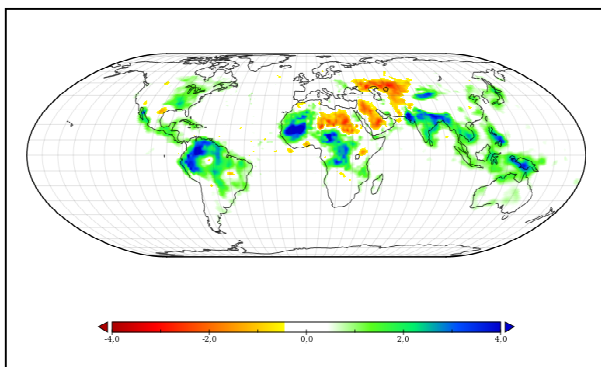
Références

Pangaud T. (2009) : Assimilation des radiances des sondeurs infrarouges hyperspectraux en condition nuageuse : application à des cyclogenèses extratropicales. thèse de l'université Paul Sabatier Toulouse 3, France, soutenue le 20 novembre 2009, 239 pages.

Pangaud T., Fourrié N., Guidard V., Dahoui M. and Rabier F. (2009) : Assimilation of AIRS radiances affected by mid to low-level clouds, Monthly Weather review, 4276-4292 (17).

GMAP-2 Caractérisation de l'émissivité de surface et assimilation des données micro-ondes au-dessus des surfaces continentales

L'assimilation de données permet de décrire les champs atmosphériques à l'aide d'observations diverses dont celles de télédétection spatiale. La physique de la mesure par télédétection est complexe et sa modélisation constitue une voie de recherche pour mieux exploiter les données. En particulier, les observations micro-ondes ont longtemps connu une disparité d'utilisation entre les surfaces émergées et maritimes. Cette disparité est attribuée, entre autres, à la mauvaise représentation de l'émissivité des surfaces continentales et son ampleur était telle qu'il était urgent d'obtenir des réponses scientifiques appropriées. Nous avons cherché à cerner les facteurs de variabilité de l'émissivité pour mieux la modéliser, à réviser notre jugement sur la pertinence des hypothèses d'estimation, à tester différentes approches de modélisation (Karbou et al. 2010a) et à en qualifier l'efficacité dans le cadre d'études d'impact (Karbou et al. 2010b, Gérard et al. 2011). Les résultats de notre investissement sur plusieurs années ont été à la hauteur de nos attentes : nous avons mis en œuvre une nouvelle modélisation de l'émissivité dans les modèles opérationnels dont l'un des effets a été de pouvoir dorénavant utiliser les données sur terres émergées et de gommer ainsi les disparités d'exploitation des données selon le type de surface. Nous avons étudié l'usage de ces observations dans le cadre du programme AMMA. L'assimilation des observations micro-ondes sur terre a impacté, positivement, des paramètres clés du cycle de l'eau sur le continent africain.



La figure de gauche montre les différences moyennes d'analyses de contenu intégré en vapeur d'eau (expérience moins contrôle, l'expérience assimilant les observations micro-ondes sur continents) pendant le mois d'août 2006. Les valeurs négatives (positives) indiquent que le contrôle est plus humide (sec) que l'expérience. La figure de droite montre que l'humidification de l'analyse de l'expérience (en noir) par rapport au contrôle (en ligne tiretée) est en très bon accord avec les valeurs GPS mesurées près de TOMBOUCTOU (en rouge). Ces valeurs sont présentées toutes les 6 heures, en moyenne sur la période. Le cycle diurne de l'humidité est désormais présent dans les analyses. Les modèles opérationnels de Météo-France profitent aujourd'hui de ces développements, et le modèle d'émissivité de surface a également été porté en opérationnel au CEPMMT. Ces approches ne sont pas, fort heureusement, exclusivement réservées aux micro-ondes : elles ont par exemple récemment servi à mieux assimiler les données infra-rouges à haute résolution SEVIRI au-dessus de l'Europe (thèse de S. Guedj).

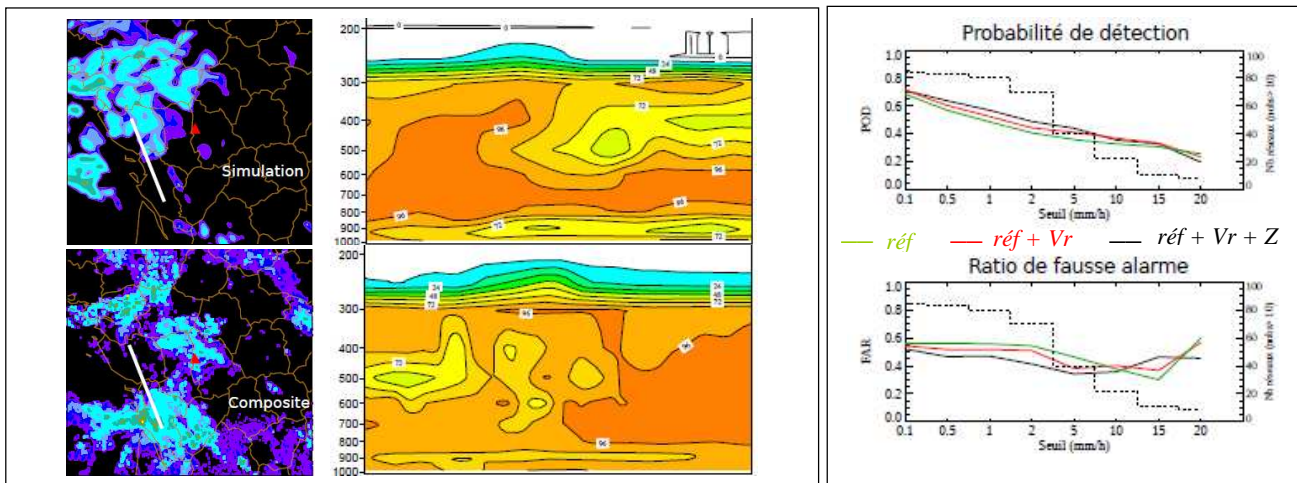
Références

Karbou, F., E. Gérard, F. Rabier, 2010a, Global 4D-Var assimilation and forecast experiments using AMSU observations over land. Part-I : Impact of various land surface emissivity parameterizations, *Weather and Forecasting*, 25, 5–19, doi : 10.1175/2009WAF2222243.1

Karbou, Fet al. , 2010b, Global 4D-Var assimilation and forecast experiments using AMSU observations over land. Part II : Impact of assimilating surface sensitive channels on the African Monsoon during AMMA, *Weather and Forecasting*, 25, 20–36, doi : [10.1175/2009WAF2222244.1](https://doi.org/10.1175/2009WAF2222244.1)

Gérard É., F. Karbou, F. Rabier, 2011 Land sensitivity studies towards a potential use of surface sensitive microwave observations over land. Sous presse à *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*

Conjointement au développement du système d'assimilation du modèle non-hydrostatique AROME, l'assimilation des données radar a fait l'objet d'intenses recherches ces dernières années. Un travail conjoint entre les producteurs de données et le GAME a tout d'abord permis de spécifier un produit radar volumique dédié à la prévision numérique qui associe notamment un ensemble de métadonnées utilisées dans le contrôle de qualité. Des opérateurs d'observation permettant de simuler les mesures de vitesses radiales et de réflectivité à partir des champs du modèle ont été développés en parallèle, ce qui a donné lieu à une coopération avec différents laboratoires (LTHE, LATMOS, LA). Une méthode bayésienne, permettant de restituer des pseudo-observations d'humidité relative à partir des profils de réflectivité simulées au voisinage d'un profil de réflectivité observé, a ensuite été implémentée dans le 3Dvar AROME (Caumont et al., 2010). Ces deux observables permettent notamment de recalibrer des structures précipitantes mal prévues via l'analyse conjointe de la dynamique de basses couches (Montmerle et Faccani, 2009) et de l'intensité des précipitations, ce qui se traduit par des meilleures prévisions des cumuls de précipitations jusqu'à 12 heures d'échéance. Actuellement, la chaîne d'assimilation opérationnelle prend en compte les vents de 22 radars ainsi que le signal réflectivité des 24 radars du réseau national ARAMIS.

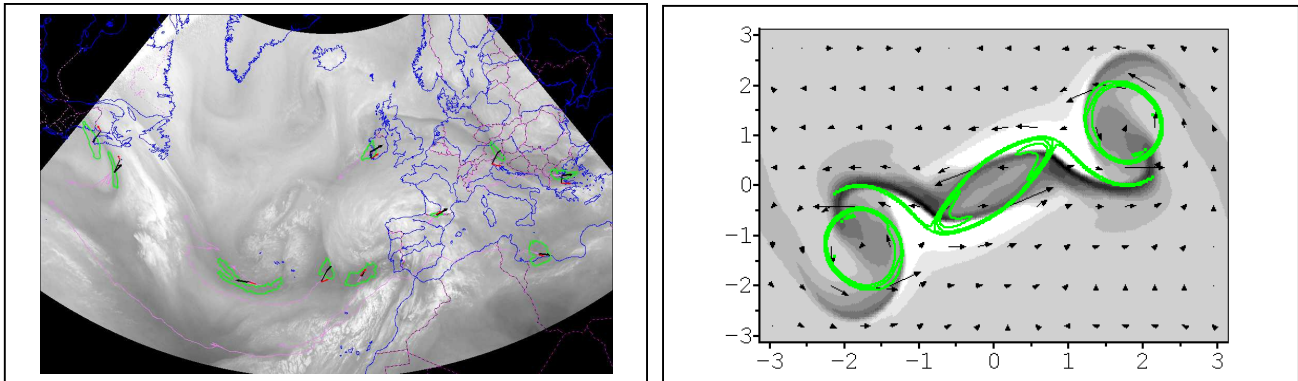


A partir d'une prévision initiale de réflectivité radar éloignée de la composite radar observée, la figure de gauche montre deux analyses d'humidité relative, suivant une coupe verticale matérialisée par le trait blanc, l'une avec assimilation des réflectivités radar (en bas à droite) et l'autre sans (en haut à droite). L'assimilation des pseudo-observations d'humidité relative a permis d'assécher la partie nord où aucune précipitation n'est observée et d'humidifier la partie sud qui correspond à une zone pluvieuse. L'impact de l'assimilation des données radar sur la prévision des cumuls de précipitations sur les trois premières heures de prévision pendant une période de 12 jours consécutifs de précipitations d'hiver est montré sur la figure de droite. L'amélioration des détections est quasi-systématique pour les différents seuils considérés, sans dégrader le ratio de fausses alarmes. Le déploiement de radars polarimétriques, l'augmentation de fréquence du cycle d'assimilation et de la résolution du modèle ces prochaines années devraient encore augmenter l'impact de telles données. Des recherches relatives à la prise en compte du type d'hydrométéore à partir de paramètres issus des radars polarimétriques, directement dans le système d'assimilation sont notamment en cours.

Références

E. Wattrelot et O. Caumont, 2010: Contribution au rapport final de l'action **COST 731**, Chapitre 7, Radar data assimilation in NWP, 7.1.3: Operational reflectivity assimilation in Arome 2.5 km at Météo-France.
 Caumont, O., V.Ducrocq, E. Wattrelot, G. Jaubert, and S.Pradier-Vabre, 2010: 1D+3DVar assimilation of radar reflectivity data: A proof of concept. **Tellus**, **62A**, 173-187.
 Montmerle and Faccani, 2009: Mesoscale asimilation of radial velocities from Doppler radars in a preoperational framework. **Mon. Wea. Rev.**, **137**, 1939-1953.

Les principaux algorithmes d'assimilation traitent les observations comme un vecteur aléatoire, sans davantage d'information que celle qui est spécifiée par les covariances d'erreur d'observation. Une partie limitée de l'information contenue dans les images est donc effectivement retenue par le processus d'assimilation. Or, on peut détecter dans des séquences d'images des structures météorologiques Lagrangiennes (cyclones tropicaux, intrusions de tropopause, nuages convectifs...). Cette détection peut être menée de manière entièrement automatisée à l'aide d'outils de traitement d'image (Michel et Bouttier 2006 ; et figure à gauche ci-dessous illustrant le suivi d'intrusions sèches dans un canal vapeur d'eau du satellite MSG, pour la tempête Xynthia, le 27 Février 2010). La stratégie qui consiste à assimiler des pseudo-observations à partir de caractéristiques des objets issues d'un traitement d'image a obtenu un certain succès pour améliorer la prévision de cyclones tropicaux. Des modèles statistiques ou physiques simples ont ainsi été développés pour définir des pseudo-observations à partir de comparaisons entre objets observés et simulés, dans le but de corriger les erreurs d'amplitude et de positionnement des objets simulés. Ces méthodes, définies au cours du projet ANR ADDISA, ont été appliquées i) aux cyclogénèses d'altitude dans le 4DVar du modèle global ARPEGE, via l'analyse d'images Meteosat vapeur d'eau et ii) aux systèmes convectifs dans le 3DVar du modèle non-hydrostatique AROME, via l'analyse d'images de réflectivités radar.



Dans le premier cas, une correction efficace de l'amplitude du précurseur d'altitude de la tempête des Landes a été obtenue (Michel 2009). Par contre, la forte variation spatiale des fonctions de structures rendent la correction d'erreurs de déplacement inadaptée (Michel 2011). Les décalages spatiaux entre image vapeur d'eau et champs de tourbillon potentiel, bien reproduits par des modèles idéalisés de l'atmosphère (Figure ci-dessus à droite : image vapeur d'eau et hauteur de la tropopause pour l'évolution d'un filament de tourbillon potentiel dans un modèle quasi-géostrophique), rendent encore plus délicat l'interprétation des déphasages entre ces deux champs, et donc l'utilisation de l'image pour corriger le modèle. L'assimilation des cellules convectives par traitement d'image et pseudo-observations d'humidité relative rencontre des difficultés similaires, auxquelles s'ajoutent les incertitudes liées aux fortes non-linéarités des processus physiques impliqués.

L'avenir de ce genre d'approches pourrait passer par l'emploi de méthodes denses (de type flot optique et déformations), plutôt que par l'utilisation d'objets, ou par l'utilisation de données plus proches des variables du modèle, comme les concentrations en ozone qui sont mieux reliées, au niveau de la tropopause, au tourbillon potentiel.

Références

- Y. Michel, 2011 : Displacing Potential Vorticity Structures by the Assimilation of Pseudo-observations. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 2, pp. 549-565.
- Y. Michel, 2009 : Assimilating the Tropopause height from the observation of a dry intrusion. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1, pp. 101-120.
- Y. Michel, 2008 : « Assimilation de données d'images télédéteectées en météorologie ». Thèse de doctorat de l'Université Paris Est.
- Y. Michel, and F. Bouttier, 2006 : Automated tracking of dry intrusions on satellite water vapour imagery and model output. *Quart. Jour. of the R. Met. Soc.*, **132**, 620, pp. 2257-2276

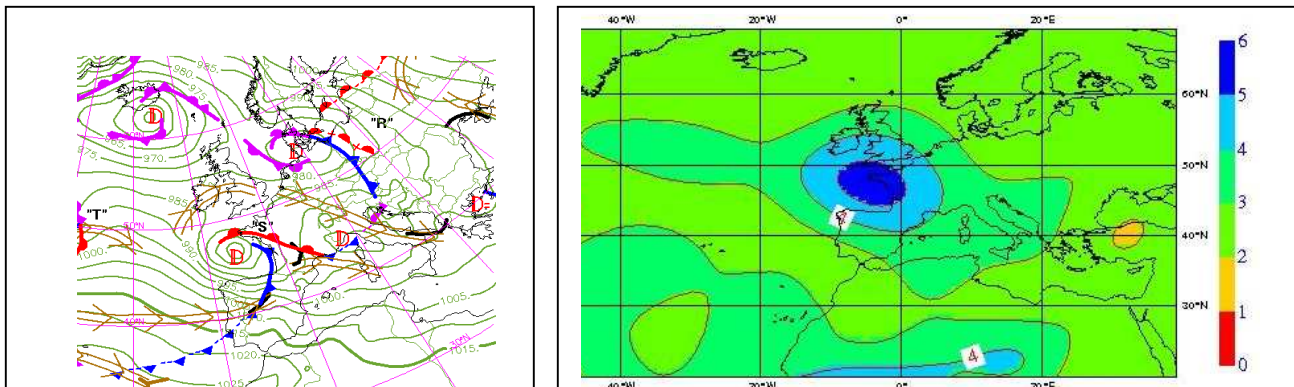
L'assimilation de données repose sur une caractérisation statistique des erreurs d'observation et de prévision. Il s'agit en particulier de spécifier les amplitudes attendues des erreurs de prévisions (décrites par des variances) qui dépendent de la situation météorologique et de la densité des observations prises en compte .

Dans ce contexte, une assimilation d'ensemble associée au modèle global ARPEGE (AEARP) a été mise en œuvre pour simuler ces erreurs de prévision. Météo-France a été ainsi le premier centre de prévision numérique du temps à mettre en place une assimilation d'ensemble variationnelle en 2008 (Berre et Desroziers, 2010).

La version actuelle de l'AEARP est basée sur un ensemble de six assimilations perturbées. Un filtrage optimal des variances d'erreurs brutes obtenues avec un ensemble de petite taille a été développé, permettant une représentation pertinente de la dynamique spatio-temporelle des variances d'erreur de prévision (Raynaud et al, 2008 ; Raynaud et al 2009 ; Raynaud 2010).

L'AEARP est par ailleurs aujourd'hui un maillon essentiel du système PEARP de prévision d'ensemble associé au modèle ARPEGE, pour la représentation de l'incertitude sur les conditions initiales.

Une assimilation d'ensemble est aussi une manière de produire des diagnostics de l'optimalité du système d'assimilation, et de mesurer l'impact des différents types d'observation dans ce système (Desroziers et al, 2009).



La figure de droite représente la carte des écarts types des erreurs de prévision pour le vent zonal (unité : ms^{-1}) vers 500 hPa, le 24 janvier 2009, date correspondant au passage de la tempête Klaus sur la France (Figure de gauche). On remarque le noyau de fortes valeurs sur la Bretagne associées à la tempête, en accord avec la forte incertitude associée à ce type de phénomène météorologique intense. Cette carte est obtenue avec une version de l'AEARP en mode 4D-Var, qui représente mieux les erreurs du système d'assimilation 4D-Var, que la version précédente en mode 3D-Var.

Les travaux sur l'AEARP se portent maintenant sur une utilisation des écarts entre observations et prévisions pour estimer et représenter la contribution des erreurs de modèle (à distinguer des erreurs sur les conditions initiales) dans l'erreur de prévision. Cette prise en compte de l'erreur de modèle permet en particulier de renforcer les variations des écarts types d'erreur de prévision dues aux variations de la densité des observations.

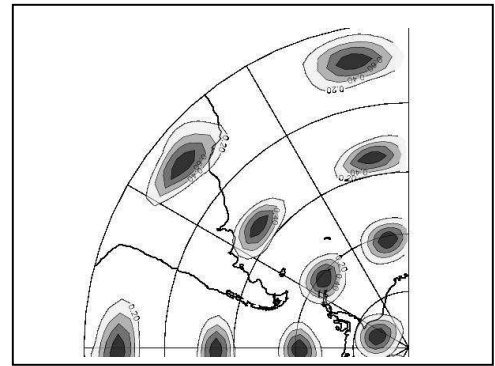
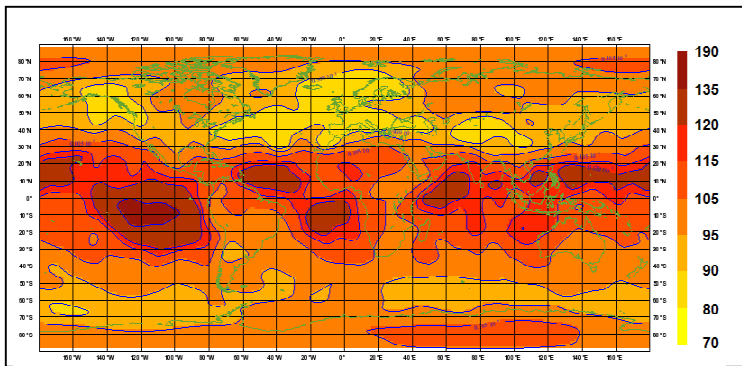
Références

- Berre, L. et G. Desroziers: Filtering of background error variances and correlations by local spatial averaging. *Mon. Wea. Rev.*, 2010.
- Desroziers, G., L. Berre, V. Chabot et B. Chapnik: A posteriori diagnostics in an ensemble of perturbed analyses. *Mon. Wea. Rev.*, 2009.
- Raynaud, L., L. Berre, et G. Desroziers: Spatial averaging of ensemble-based background-error variances. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 2008.
- Raynaud, L., L. Berre, et G. Desroziers: Objective filtering of ensemble-based background-error variances. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 2009.
- Raynaud, L: Application, validation et réglage d'une assimilation d'ensemble. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 2010.

L'assimilation de données conduit à propager spatialement l'information qui est observée de façon locale, en tenant compte notamment des structures spatiales (décrites par les corrélations spatiales) des erreurs de prévision. Ces corrélations spatiales ont une variabilité spatio-temporelle complexe, avec une forte dépendance à la situation météorologique. Leur estimation peut être effectuée à l'aide d'un ensemble de prévisions perturbées.

Cependant, la taille de l'ensemble est relativement petite (de l'ordre de 5 à 10 membres), ce qui conduit à des erreurs d'échantillonnage assez importantes. D'autre part, la taille de la matrice de ces corrélations est bien trop grande pour être stockée directement en mémoire d'un supercalculateur. Une approche possible est alors de modéliser ces corrélations et de s'appuyer sur des techniques de filtrage du bruit d'échantillonnage (Berre et Desroziers, 2010).

Plusieurs techniques ont été expérimentées dans ce contexte. Une première méthode consiste à s'appuyer sur des ondelettes, qui permettent de filtrer spatialement les fonctions de corrélation du modèle global ARPEGE (Pannekoucke et al, 2007 ; Pannekoucke 2008 ; Pannekoucke et al, 2008). Une approche basée sur un tenseur local de diffusion a également été expérimentée dans le modèle de chimie atmosphérique global MOCAGE-PALM en collaboration avec le CERFACS (Pannekoucke et Massart, 2008). Enfin, une technique basée sur des masques géographiques (Montmerle et Berre 2010) a permis d'expérimenter dans le modèle AROME des corrélations différentes en fonction des zones de pluie et de non pluie.



La figure de gauche représente la carte des longueurs caractéristiques des erreurs de prévision pour le vent zonal (unité : ms^{-1}) vers 500 hPa, obtenues avec une modélisation ondelette pour ARPEGE. On remarque que ces longueurs sont nettement plus petites sur l'Europe et l'Atlantique Nord que sur les océans tropicaux. La figure de droite correspond à des exemples de fonctions de corrélation, issues d'une modélisation à l'aide d'un tenseur local de diffusion pour MOCAGE-PALM. La comparaison avec des estimations tirées directement d'un ensemble indique que ces résultats reflètent bien les hétérogénéités horizontales en jeu.

Il devient ainsi possible de représenter les variations géographiques des fonctions de corrélation. Il est maintenant prévu d'expérimenter ces approches pour représenter la dépendance des corrélations spatiales en fonction de la situation météorologique.

Références

Berre, L. et G. Desroziers : Filtering of background error variances and correlations by local spatial averaging. *Mon. Wea. Rev.*, 2010.

Montmerle T et L. Berre : Diagnosis and formulation of heterogeneous background error covariances at mesoscale. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 2010.

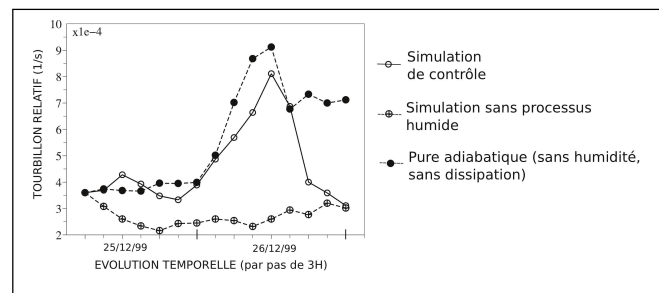
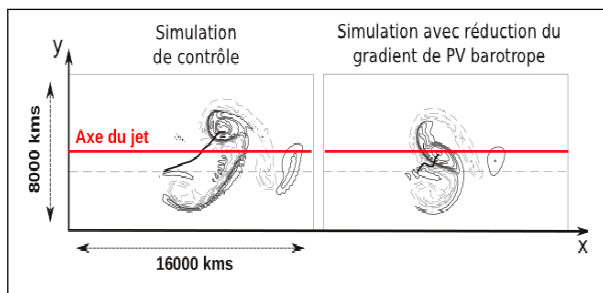
Pannekoucke, O., L. Berre et G. Desroziers : Filtering properties of wavelets for local background error correlations. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 2007.

Pannekoucke, O. : Modélisation des structures locales de covariance des erreurs de prévision à l'aide des ondelettes. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 2008.

Pannekoucke, O., L. Berre et G. Desroziers : Background-error correlation length-scale estimates and their sampling statistics. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 2008.

Pannekoucke, O. et S. Massart : Estimation of the local diffusion tensor and normalization for heterogeneous correlation modelling using a diffusion. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 2008. Page 10

Les théories d'instabilité de la cyclogénèse développées dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle ont permis dans un premier temps d'expliquer un certain nombre de caractéristiques des dépressions des moyennes latitudes, comme par exemple les ordres de grandeur de leur échelle spatiale. Cependant, les résultats numériques-théoriques de ces 15 dernières années étayés par les résultats des campagnes d'observation comme FASTEX ont mis en évidence la complexité et la richesse des mécanismes mis en jeu dans l'évolution des dépressions des latitudes tempérées. On aboutit donc à l'heure actuelle à une impasse théorique lorsqu'il s'agit d'expliquer leurs cycles d'évolution complets. Même si l'interaction barocline est le mécanisme principal de croissance et d'amplification des dépressions, elle n'intervient pas de manière homogène et n'explique pas toutes les étapes que traverse la dépression. D'autres facteurs peuvent moduler cette croissance. La prise en compte des non linéarités et des inhomogénéités horizontales des courants-jets permet de mieux comprendre certaines phases des dépressions. La figure de gauche représente l'évolution non linéaire au bout de 60 heures dans le modèle quasi-géostrophique à deux couches du tourbillon relatif dans la couche du bas. Initialement, la dépression est isotrope et localisée au sud du courant-jet. A gauche, la simulation de contrôle et à droite, la simulation pour laquelle le courant-jet barotrope a été réduit. Le rôle joué par les processus humides fait aussi débat et ceux-ci sont étudiés au sein de la première tempête de Noël 1999 à l'aide du modèle ARPEGE. La figure de droite montre l'évolution temporelle du maximum de tourbillon relatif à 850 hPa pour la première tempête de Noël 1999 pour trois simulations du modèle ARPEGE, une avec toute la physique, une seconde sans processus humides et la troisième sans aucun effet diabatique.



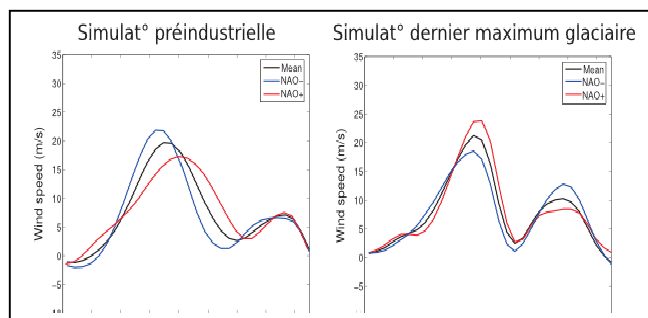
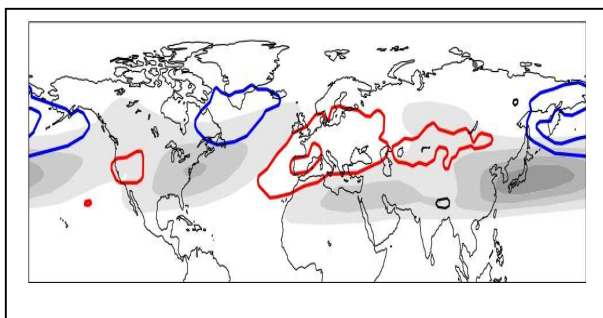
Un certain nombre de dépressions matures ont tendance à se régénérer lorsqu'elles traversent l'axe du courant-jet d'altitude du sud au nord. L'illustration de gauche montre que ce mécanisme de régénération est d'autant plus facile à se produire que le courant-jet possède une structure barotrope importante et plus particulièrement un fort gradient de tourbillon potentiel barotrope. La vignette la plus à gauche montre bien une traversée du courant-jet par la dépression alors que sur celle de droite pour laquelle le gradient a été diminué, la traversée n'a pas lieu.

Sur l'illustration de droite, la simulation de contrôle d'ARPEGE reproduit bien la phase de croissance explosive de la tempête de 1999 dans la matinée du 26 décembre. La simulation sans le dégagement de chaleur latente ne produit aucune tempête mais celle pour laquelle tous les processus diabatiques ont été éliminés la reproduit bien. Il s'avère donc que les processus humides compensent les effets de la dissipation mais ne sont pas à l'origine d'un nouveau mécanisme. Ce résultat est important d'un point de vue pédagogique car il signifie que la phase de croissance explosive peut s'expliquer de manière purement adiabatique.

Références

- Gilet J.-B., M. Plu et G. Rivière, 2009 : Nonlinear baroclinic dynamics of surface cyclones crossing a zonal jet. *J. Atmos. Sci*, 66, 3021-3041.
- Gilet J.-B., 2009 : Interactions non-linéaires de structures cohérentes tourbillonnaires d'échelle synoptique. Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier, Toulouse, p. 237.
- Rivière G., P. Arbogast, K. Maynard, A. Joly, 2010 : The essential ingredients leading to the explosive growth stage of the European wind storm Lothar of Christmas 1999. *Q. J. R. M. S.*, 136, 638-652. [Page 11](#)

Une composante importante de la dynamique du climat des latitudes tempérées est l'interaction entre le passage des transitoires synoptiques (dit rail des dépressions) et la variabilité lente de l'atmosphère représentée par les régimes de temps comme le blocage ou les téléconnexions comme l'Oscillation Nord Atlantique. La rétroaction du rail des dépressions sur la variabilité basse fréquence de l'atmosphère est depuis les années 1970 l'objet d'un intense débat et continue de l'être, notamment dans le cadre du réchauffement climatique. Récemment, l'étude des déferlements des ondes baroclines a permis de porter un nouveau regard sur cette rétroaction. Il s'avère que les différentes phases des téléconnexions et les différents régimes de temps sont étroitement liés à des fluctuations dans la nature du déferlement. L'objectif est dès lors de mieux comprendre les facteurs qui influencent les déferlements cyclonique et anticyclonique, de documenter leur occurrence pour mieux comprendre les différences de climatologies entre climats passés, présent et futur ainsi que la variabilité basse fréquence de ces climats. La figure de gauche montre la moyenne climatologique du 16 octobre au 15 avril des fréquences d'occurrence des déferlements d'onde. Les déferlements sont représentés en bleu pour les déferlements cycloniques et en rouge pour les déferlements anticycloniques. Les plages grisées représentent le vent zonal moyenné.



Les déferlements cycloniques se produisent le plus souvent à l'entrée des rails de dépressions du côté nord des courants-jets tandis que les déferlements anticycloniques plutôt à la fin des rails du côté sud des courants-jets. L'Atlantique et le Pacifique diffèrent fortement puisque le premier est dominé par l'occurrence du déferlement anticyclonique tandis que le second par celui du déferlement cyclonique.

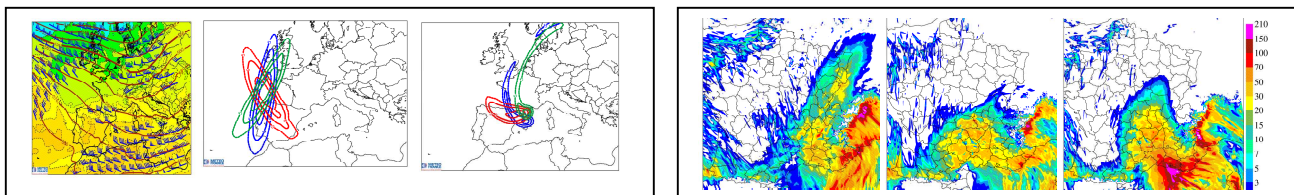
Sur l'illustration de droite, on s'intéresse à la différence de comportement du courant-jet Atlantique entre le climat présent et le climat du dernier maximum glaciaire. Le vent zonal à 500 hPa moyenné entre 80°W- 10°E est représenté pour le mode de variabilité principale hivernal de l'Atlantique (1^{er} EOF du géopotential à 850 hPa) pour les simulations préindustrielle et du dernier maximum glaciaire du modèle ARPEGE-climat.; en noir, la valeur climatologique ; en rouge et bleu pour les phases positive et négative. Alors que dans le climat présent, le jet connaît des déplacements latitudinaux importants (cf. simulation préindustrielle), les simulations du dernier maximum glaciaire montrent essentiellement une accélération/décélération du jet sans déplacements latitudinaux. Il s'avère que cette différence provient presque exclusivement de l'orographie de la calotte glaciaire sur l'Amérique du nord.

Références

- Lainé A., G. Lapeyre, G. Rivière, 2011 : A quasi-geostrophic model for moist storm-tracks. J. Atmos. Sci., sous presse.
- Rivière, G., 2010 : The role of Rossby wave breaking in the West Pacific teleconnection. Geo. Res. Lett., 37, L11802.
- Rivière, G., A. Lainé, G. Lapeyre, D. Salas-Mélia et M. Kageyama, 2010 : Links between Rossby wave breaking and the North Atlantic Oscillation - Arctic Oscillation in present-day and last glacial maximum climate simulations. J. of Climate, 23, 2987–3008.

GMAP-9 Sensibilité des épisodes de précipitations intenses du bassin méditerranéen aux anomalies de tourbillon potentiel d'altitude

Au cours des années 1990, le rôle supposé moteur des anomalies de tourbillon potentiel de haute troposphère (Plu et al., 2008) dans le déclenchement du processus de cyclogénèse des moyennes latitudes a été vérifié expérimentalement notamment lors de la campagne FASTEX. Au cours de la décennie suivante, l'importance de ces structures d'altitude dans le processus de formation des systèmes précipitants de mésoéchelle pouvant conduire à des crues « éclair » sur le bassin méditerranéen a été mise en évidence. Dans le cadre du projet CYPRIM (ACI Aléas et changements globaux), un groupe de chercheurs de la communauté française (IPSL, LA, GAME) s'est doté d'un outil d'inversion du tourbillon potentiel (Arbogast et al, 2008) permettant d'étudier la sensibilité d'une simulation multi-échelle à la distribution du tourbillon potentiel des conditions initiales. L'utilisation de la maille variable sur le plan horizontal et d'une condition d'équilibre compatible avec les équations primitives permettent de procéder à des inversions globales aux résolutions horizontales de l'ordre de 10-20 km sur l'Europe occidentale donnant ainsi accès aux détails de la distribution du champ de tourbillon potentiel. La figure de gauche montre l'évolution non linéaire dans le modèle ARPEGE d'anomalies de tourbillon potentiel de forme ellipsoïdale pour différentes orientations de l'axe principal. L'environnement basse fréquence est représenté à gauche (géopotentiel et vent à 500 hPa, Tpw à 925 hPa). Au milieu et à droite sont représentés le tourbillon potentiel à 300hPa des états initiaux et à 30 h d'échéance.

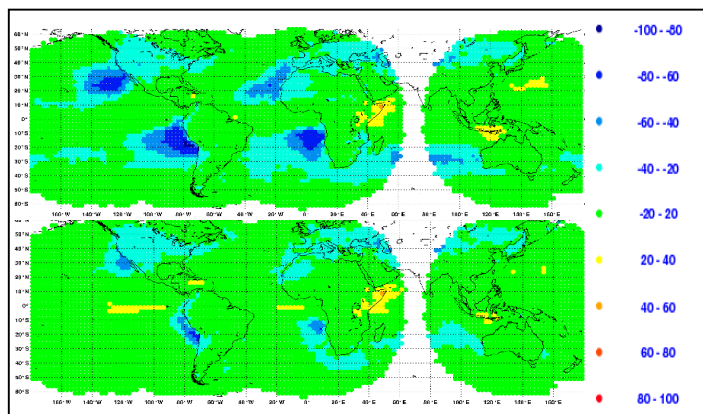
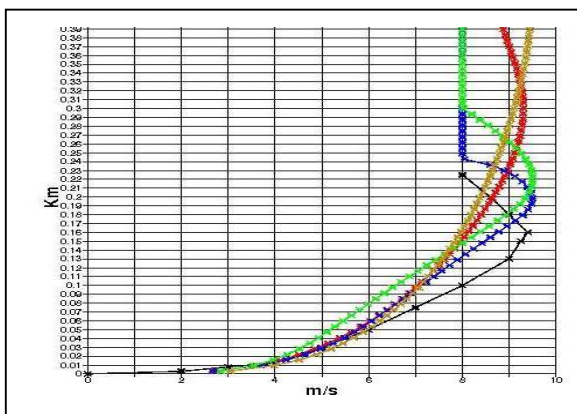


La figure de droite montre les prévisions AROME couplées aux 3 prévisions ARPEGE de la figure de gauche pour le cumul des précipitations sur 24 h. Au tourbillon potentiel tracé en vert, resp. rouge et bleu, correspond la figure de gauche, resp. du milieu et de droite. Il a ainsi pu être montré que la prévision des événements précipitants sur la Méditerranée occidentale de ces dernières années était fortement sensible à la forme, la position et l'amplitude des anomalies initiales de tourbillon potentiel. Des études ont également montré qu'un état initial idéalisé construit à partir de quelques modes planétaires et n'engendrant au départ pas de convection sur le bassin méditerranéen pouvait conduire à un événement précipitant en présence d'une anomalie de tourbillon potentiel de forme simple et que la localisation et l'intensité de cet événement était fortement sensible à l'orientation de l'anomalie de tourbillon potentiel. Confortés par la forte sensibilité des simulations à mésoéchelle de systèmes précipitants au tourbillon potentiel initial, nous avons tenté avec succès d'améliorer la prévision à 2 jours d'échéances du système précipitant à l'origine de la catastrophe d'Alger de Novembre 2001 par action sur le tourbillon potentiel des conditions initiales (Argence et al, 2009) après examen de la vapeur d'eau observée par le satellite Meteosat 8. Dans le cadre d'une collaboration avec l'Université des Baléares, un prototype de perturbation du tourbillon potentiel initial dans le contexte de l'initialisation d'une prévision d'ensemble à mésoéchelle a été mis en place. Cette activité se poursuit dans le cadre d'une thèse co-encadrée par le GAME et le LA.

Références

- Argence S., D. Lambert, E. Richard, J-P. Chaboureau, Ph. Arbogast, K. Maynard, 2009: Improving the numerical prediction of a cyclone in the Mediterranean by local potential vorticity modifications. Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc., 135, 865-879.
- 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
- Plu M., P. Arbogast and A. Joly, 2008: A wavelet representation of synoptic-scale coherent structures J. Atmos. Sci., 65, 3116–3138

Depuis 2007, le modèle global ARPEGE utilisé pour la prévision opérationnelle du temps a évolué en termes de résolution spatiale et de paramétrisations physiques. La résolution horizontale est ainsi passée de 23 à 10 km sur France et de 134 à 60 km aux Antipodes. L'atmosphère est découpée en 70 couches verticales au lieu de 46 antérieurement avec un raffinement porté dans la couche limite et vers 10-12 km d'altitude afin de mieux décrire les courants-jets. La précision des calculs sur la verticale est améliorée par l'activation d'un schéma numérique mis au point au CEPMMT. Ces changements de résolution ont notamment permis un couplage direct avec le modèle de méso-échelle AROME. Le renouvellement des paramétrisations physiques s'est poursuivi dans le cadre du développement d'une physique commune pour les besoins de la prévision du temps et de la recherche sur le climat adaptée aux échelles hydrostatiques. Cette stratégie repose sur des travaux de recherches effectués au CNRM-GAME et dans le cadre de nos collaborations (ALADIN, CEPMMT, HIRLAM, IPSL, LA), sur une convergence de certaines paramétrisations physiques (couche limite, rayonnement) avec le modèle AROME et sur une validation multi-échelles : simulations 1D (cas GCSS, EUROCS, EUCLIPSE, etc.) et 3D dans des configurations « prévision du temps », « prévision saisonnière » et « simulation climatique ». La représentation de la couche limite a été profondément révisée avec l'implémentation d'un schéma de diffusion en énergie cinétique turbulente pronostique, d'un schéma en flux de masse représentant la convection peu profonde humide et d'une nouvelle paramétrisation des flux de surface océaniques « ECUME » établie à partir des observations de plusieurs campagnes de mesures. Le vent, la température et l'humidité dans la couche limite, ainsi que la nébulosité basse, ont été améliorés. L'utilisation d'un schéma de convection peu profonde spécifique a permis une révision des conditions de déclenchement du schéma de convection profonde à l'origine d'une diminution réaliste de la fréquence d'occurrence des faibles précipitations (entre 1 et 5 mm par jour).



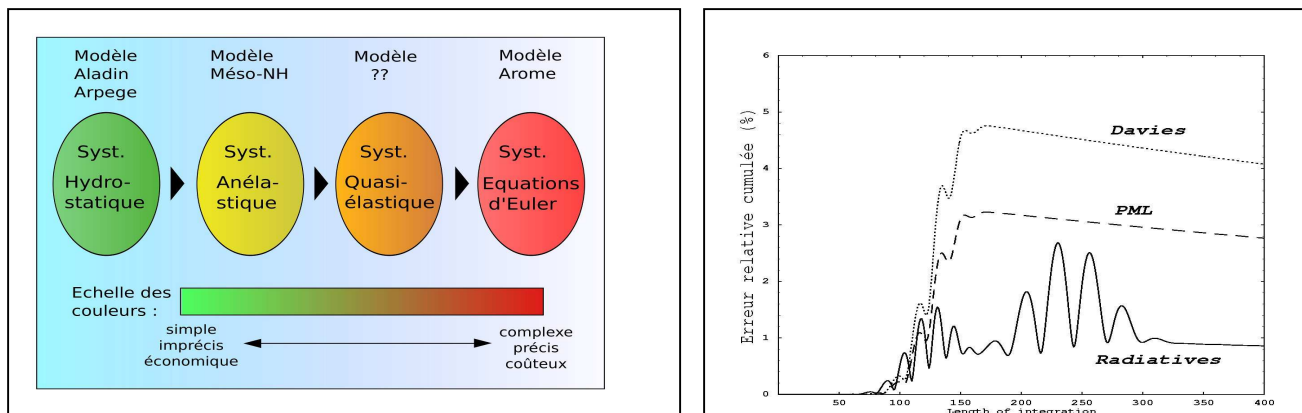
Le graphique de gauche représente le module de vent dans les 400 premiers mètres au dessus du sol pour le cas 1D de couche limite stable GABLS-1 avec l'ancien (en rouge) et le nouveau schéma de turbulence (en vert). La courbe noire représente la moyenne des modèles LES. Les graphiques de droite représentent la différence de nébulosité totale (en %) simulée par le modèle ARPEGE (ancienne version en haut et nouvelle version en bas) avec la nébulosité satellitaire ISCCP sur les périodes cumulées DJF et JJA (en T224C1).

Références

- Piriou, J. M et al. 2007: An approach for convective parameterization with memory: separating microphysics and transport in grid-scale equations. *J. Atmos. Sci.*, 64, 4127–4139.
- Bouniol, D., Protat, A., Delanoe, J., Pelon, J., Piriou, J.-M., Bouyssel, et al. 2010 : Using continuous ground-based radar and lidar measurements for evaluating the representation of clouds in four operational models. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, Vol 49, 9, 1971-1991.
- Bouteloup, Y., Seity, Y. and Bazile, E., 2011 : Description of the sedimentation scheme used operationally in all Météo-France NWP models. *Tellus A*, 63: 300–311.

Des recherches sont menées sur deux aspects fondamentaux de la prévision numérique : la définition du système d'équations le mieux adapté au problème, et le couplage entre modèles d'échelles différentes.

L'opportunité d'utiliser le système Quasi-Elastique, récemment proposé, pour résoudre les équations d'évolution météorologiques à échelle fine est examinée en collaboration avec le CEPMMT (Reading). Ce système filtre les ondes acoustiques, mais à l'inverse des systèmes anélastiques, il entraîne très peu d'approximation par rapport au système natif des Equations d'Euler (cf. fig. de gauche). Son intérêt potentiel est d'être peut-être moins contraignant du point de vue de la solution numérique, la représentation des processus rapides se trouvant simplifiée par rapport au système des Equations d'Euler. L'avantage peut alors se traduire par un coût moindre, ou par une plus grande souplesse des algorithmes utilisables. Néanmoins, la présence d'une équation diagnostique complexe pour la pression exige un nouveau savoir-faire par rapport aux modèles traditionnellement utilisés en prévision numérique. L'applicabilité pratique (opérationnelle) du système Quasi-Elastique reste encore à démontrer, notamment la possibilité de résoudre à faible coût l'équation de pression. Parallèlement à cela, les propriétés numériques du système discrétisé en temps et en espace, notamment sa stabilité, seront examinées.



La méthode de relaxation de Davies (1976), actuellement employée afin d'assurer le couplage latéral non-interactif entre les modèles de grande échelle et ceux d'échelle plus fine, est certes robuste et efficace, mais ne s'appuie sur aucune justification théorique. Deux nouvelles stratégies de couplage mieux posées mathématiquement ont donc été proposées, puis testées dans le cadre académique d'un modèle spectral en eaux peu profondes unidimensionnel : les méthodes dites radiatives (sans zone tampon) et les méthodes dites à zone tampon parfaitement adaptée (ou PML pour Perfectly Matched Layer). Les tests illustrés par la figure de droite montrent la supériorité de ces deux méthodes en termes de précision par rapport à la méthode de relaxation, et notamment de la méthode radiative. Toutefois, la transposition de cette méthode dans le contexte spectral et « semi-implicite » est possible mais soulève des difficultés algorithmiques importantes (Termonia et Voitus 2008, Voitus et al. 2009). La méthode PML en revanche, se prête mieux au cadre spectral du fait de sa similitude avec la technique de relaxation. Ce travail constitue un premier pas vers l'élaboration d'une stratégie de couplage plus raffinée que celle de Davies (1976). Les futurs travaux envisagés consisteront à étendre l'étude au cas des équations d'Euler élastiques (NH).

Références

Voitus F., Termonia P., and P. Bénard, 2009 : Well-posed boundary Conditions for Spectral Semi-implicit Semi-Lagrangian Schemes : Tests in a One-Dimensional Model.

Mon. Wea. Rev, 137, pp 315-330.

Termonia, P., and F. Voitus, 2008 : Externalizing the lateral-boundary conditions from the dynamical core in the semi-implicit semi-Lagrangian models. Tellus, 62A, 632-648.

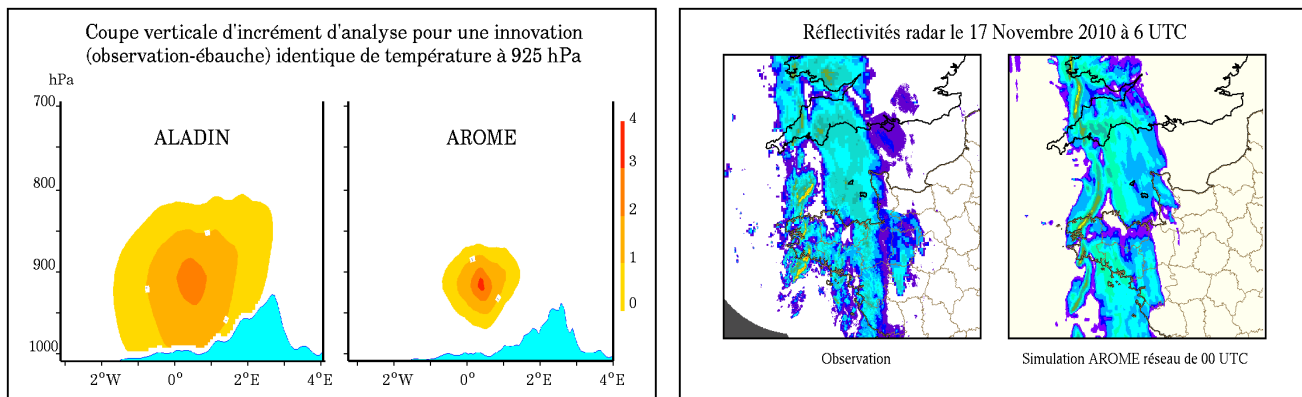
Bénard, 2010 : NH modelling with AROME and some properties of Quasi-Elastic systems.

Workshop on NH modelling, Reading, 8-10 Nov. 2010

Le modèle à aire limitée AROME, avec sa maille de 2.5 km sur la France, est le dernier né des modèles de prévision numérique du temps exploités en opérationnel à Météo-France. Ce modèle de méso-échelle a été développé grâce à d'étroites collaborations nationales et internationales, tant au niveau du choix et des réglages de ses paramétrisations physiques et de son noyau dynamique non-hydrostatique que de son système d'assimilation.

Des développements ont notamment porté sur la convection peu profonde, la couche limite de surface, l'augmentation de la fréquence du cycle d'assimilation, le calcul des statistiques d'erreur d'ébauche, l'assimilation d'observations plus représentatives de la méso-échelle (mesures du réseau radar ARAMIS par exemple).

La participation à diverses expériences internationales, parmi lesquelles on peut citer AMMA en 2006 ou MAP-DPHASE et COPS en 2007, ont permis de comparer le modèle à l'état de l'art en modélisation méso-échelle, et d'orienter des travaux afin de corriger certains défauts de jeunesse du modèle (comme la surestimation des pluies convectives par exemple).



AROME permet de mieux prévoir les phénomènes de méso-échelle. La figure de gauche illustre la capacité du système d'assimilation à produire des conditions initiales de plus fine échelle par rapport à celles d'ALADIN (le modèle à aire limitée hydrostatique utilisé au préalable à une résolution de 10km). Le détail de ces analyses, associé aux qualités de la physique et de la dynamique du modèle permettent de simuler des structures convectives précipitantes très réalistes, comme le montre la figure de droite sur la situation du 17 Novembre 2010.

Des recherches sont en cours pour, entre autres, évaluer les adaptations de la physique du modèle nécessaires pour traiter des résolutions plus fines. Des expérimentations ont par exemple été réalisées à 1km de résolution autour de Val d'Isère pendant les championnats du monde de ski en Février 2009. Les travaux concernant l'assimilation portent sur une utilisation plus fréquente des observations et la spécification de covariances d'erreur d'ébauche dépendantes de la situation météorologique.

Références

Brousseau P., L. Berre, F. Bouttier, G. Desroziers 2011. Background-error covariances for a convective-scale data-assimilation system: AROME-France 3D-Var. Q. J. R. Meteorol. Soc. 137: 000-000.

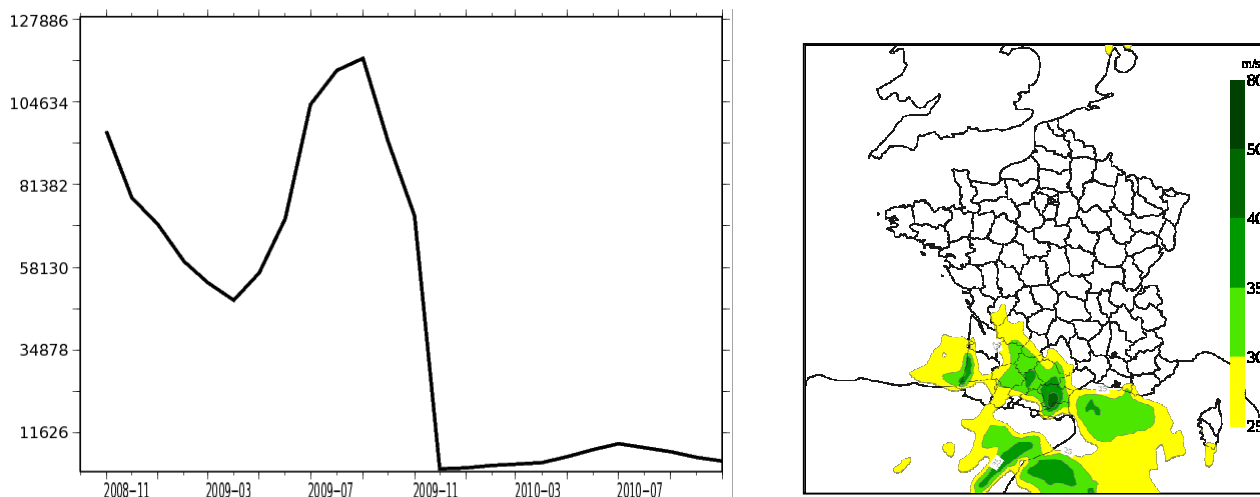
DOI:10.1002/qj.750

Pergaud J., V. Masson, S. Malardel and F. Couvreur, 2009, A parameterization of dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction, Bound.-Layer Meteor., 132, 83-106

Seity Y., P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac and V. Masson, 2011, The AROME-France convective scale operational model, Mon. Wea. Rev., doi: 10.1175/2010MWR3425.1

La PEARP, ou Prévision d'Ensemble ARPEGE, est le système de prévision d'ensemble opérationnel de Météo-France. Cet outil vise à estimer l'incertitude inhérente à toute prévision et à aider à l'anticipation des phénomènes intenses. Il nécessite d'une part la prise en compte de l'incertitude sur l'état initial et d'autre part la prise en compte de l'imperfection du modèle de prévision (erreur modèle). En ce qui concerne le premier point, des travaux menés en collaboration avec le Laboratoire de Météorologie Dynamique (projet ANR PREVASSEMBLE) et dans le cadre du projet CYPRIM (ACI Aléas et changements globaux) ont montré l'intérêt des méthodes dites d'assimilation d'ensemble qui prennent en compte les sources d'incertitudes du processus d'assimilation de données (Descamps 2007, Descamps et Talagrand 2007). Pour le second point, l'impact de différents jeux de paramétrisations physiques a été évalué et comparé à une perturbation aléatoire simple des tendances de la physique (Descamps et al. 2009).

Les deux illustrations montrent l'impact de la mise en place de ces résultats au sein de PEARP. La figure de gauche montre, pour le paramètre température à 850hPa, l'évolution de la fiabilité de PEARP au cours des deux dernières années (score delta, plus le score est petit meilleur est le résultat). La figure de droite est une prévision à 42h pour le cas de la tempête KLAUS (24/01/09). On représente le seuil de vent prévu au moins atteint par un quart des prévisions.



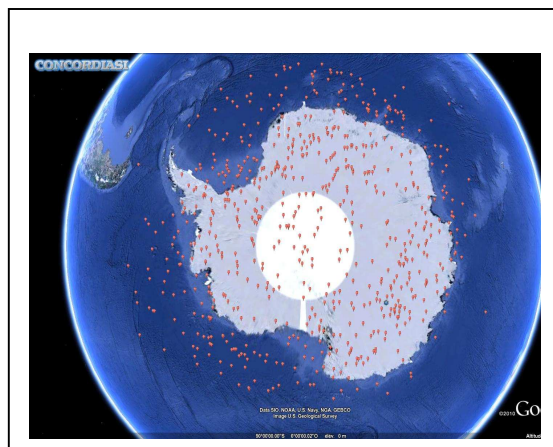
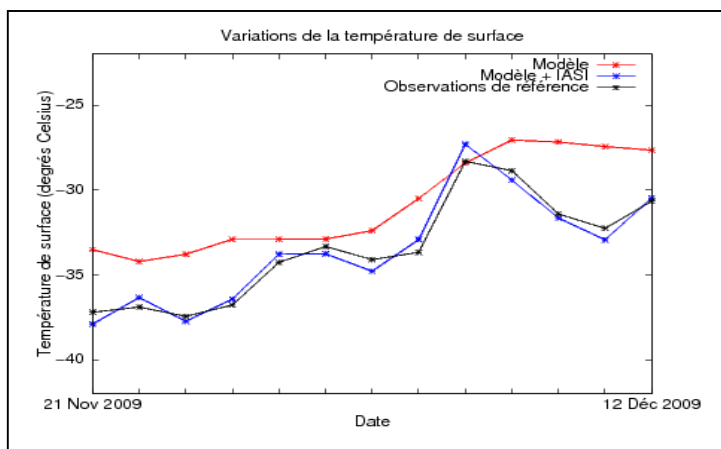
L'évolution du score mesurant la fiabilité de l'ensemble montre une nette amélioration à partir de fin 2009, ce qui correspond à l'introduction de l'assimilation d'ensemble et à la prise en compte de l'erreur de modélisation. On observe donc un impact très positif de ces deux évolutions apportées au système. L'illustration de la tempête KLAUS montre que PEARP représente bien la trace du système dépressionnaire avec des valeurs de vent prévues proches des valeurs réellement observées. Cet événement météorologique intense est ici correctement anticipé près de deux jours à l'avance. Les résultats des différents travaux de recherche menés ces dernières années ont donc permis, par leur transfert au sein du système opérationnel, d'apporter une nette amélioration à la qualité de la prévision d'ensemble ARPEGE. Parmi les évolutions envisagées, un travail de recherche sur une meilleure évaluation de l'erreur de modélisation est en cours dans le cadre de PREVASSEMBLE. Un autre axe de travail envisagé est celui de la mise en place d'une « climatologie du modèle ». Situer les prévisions au sein de cette climatologie permettrait de mieux anticiper le caractère exceptionnel d'un phénomène tel que KLAUS.

Références

L. Descamps et O.Talagrand : "On some aspects of the definition of initials conditions for ensemble predictions ", Mon.Wea.Rev.,2007
 L.Descamps : "Définitions des conditions initiales d'une prévision d'ensemble. Liens avec l'assimilation de données." Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2007
 L.Descamps, C.Labadie, A.Joly, E.Bazile et J.Nicolau : "PEARP, the Météo-France Ensemble Prediction System", WWRP/TTSS, Monterey, 2009

GMAP-14 Concordiasi : une campagne de mesures internationale en Antarctique

Coordonné par le GAME, soutenu par Météo-France mais aussi par le CNES et la NSF, Concordiasi est un programme international d'observations atmosphériques innovantes qui associe des équipes françaises, américaines, italiennes et britanniques et des organisations internationales comme le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen-Terme, et bénéficie du soutien des agences polaires. Il vise à calibrer et valider les programmes d'intégration des données du sondeur IASI dans les modèles météorologiques en Antarctique, et à étudier la dynamique et la physicochimie de la couche d'ozone. Des campagnes de mesure au sol ont été menées depuis 2008 à partir de la base franco-italienne Concordia et de la base française Dumont d'Urville. De septembre à octobre 2010, 19 ballons stratosphériques équipés de capteurs ont été lancés depuis la base de Mc Murdo. Emportés par le vortex polaire, ils ont tourné pendant plusieurs mois à une altitude de 20 km au-dessus de l'Antarctique. À bord des nacelles, ont été embarqués plusieurs capteurs développés par le Laboratoire de Météorologie Dynamique, l'Université du Wyoming et l'Université du Colorado, pour l'analyse en continu de la teneur en ozone ou des processus de formation des nuages stratosphériques polaires. Les nacelles ont embarqué également une cinquantaine de dropsondes chacune qui ont été larguées sur demande.



Au cours de la première phase de la campagne Concordiasi (printemps austraux 2008 et 2009), des mesures de radiosondages réalisées à la station Concordia ont été comparées à des profils de l'atmosphère issus du modèle de prévision de Météo-France. Il a été constaté que le modèle de prévision manquait de précision pour simuler correctement la température de surface à Concordia. Par contre, l'utilisation combinée de IASI et du modèle s'est révélée positive car elle permet de se rapprocher nettement des mesures in situ (figure de gauche). Ceci permet de valider l'utilisation des données IASI pour ajuster le modèle dans cet environnement très particulier de la station de Concordia. La seconde phase de Concordiasi, de septembre à novembre 2010, permet d'étendre les réglages à une zone beaucoup plus large et dans des conditions météorologiques variées. L'ensemble des mesures de dropsondes effectuées depuis le début de la campagne est représenté sur la figure de droite. Les profils atmosphériques obtenus seront précieux pour documenter la performance des modèles météorologiques dans ces régions, et les améliorer.

Références

- Bouchard A, F. Rabier, V. Guidard & F. Karbou, 2010: Enhancements of satellite data assimilation over Antarctica. Mon. Wea. Rev., **138**, 2149–2173. Doi : 10.1175/2009MWR3071.1.
- Guedj S., F. Karbou, F. Rabier, A. Bouchard, 2010: Toward a better modelling of surface emissivity to improve AMSU data assimilation over Antarctica. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **48**, n°4, 1976-1985.
- Rabier F. et al., 2010: "The Concordiasi project in Antarctica" Bulletin of the American Meteorological Society, January 2010, 69-86.

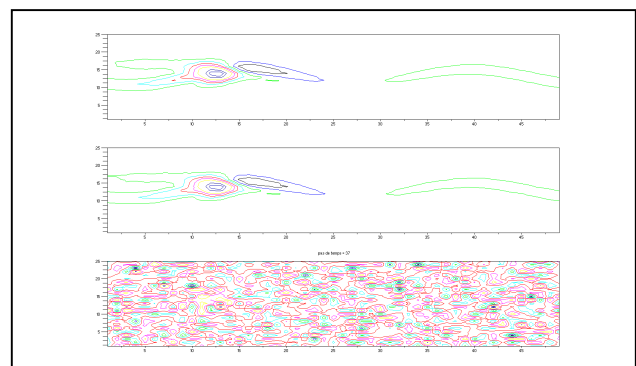
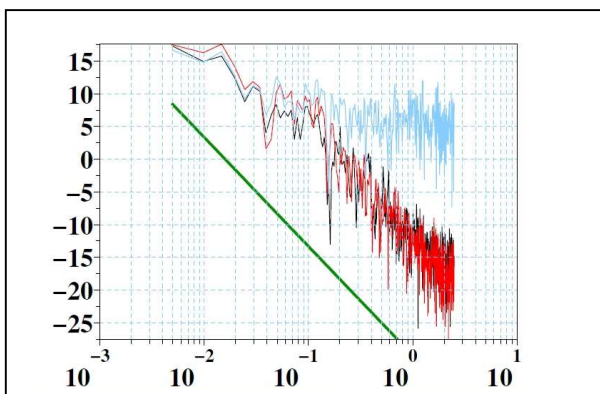
ENCADRÉS SCIENTIFIQUES

de l'unité de recherche

GMEI

GMEI-1 Estimation non-linéaire stochastique pour le filtrage de mesures turbulentes et l'assimilation de données géophysiques.

L'estimation non-linéaire stochastique permet de traiter des systèmes aléatoires ou contenant des erreurs aléatoires sortant du cadre linéaire ou Gaussien. Ces techniques innovantes sont adaptées à la plupart des questions d'apprentissage ou de filtrage séquentiel mais nécessitent une formalisation probabiliste des problèmes. Nous avons mis en œuvre les outils théoriques pour traiter le cas particulier des mesures ponctuelles réalisées au sol pour des écoulements atmosphériques turbulents. Nous avons alors démontré que les algorithmes, outre le filtrage des mesures, permettaient une estimation à haute cadence des grandeurs caractérisant la turbulence. Cette étude a été ensuite étendue au cadre de mesures réalisées en 2D par un LIDAR Doppler. Un démonstrateur sur données simulées a été développé. Nous avons alors élargi l'usage de ces techniques d'ingénierie stochastique au problème de l'assimilation de données. Dans ce cas, la difficulté portait sur la taille des systèmes à assimiler. Nous avons prouvé numériquement l'importance de la méthode de sélection d'état face à la dimension et montré que les sélections génétiques permettaient d'aller au delà du simple re-échantillonnage. Des premiers essais sur des modèles géophysiques simples ont été réalisés.



La figure de gauche montre un exemple de filtrage de mesures anémométriques réelles débruitées par notre algorithme. Les spectres de puissances montrés ici confirment que l'observation bruitée (en cyan) a été corrigée (en rouge) pour se confondre avec la réalité (en noir). On retrouve également la pente spectrale en $-5/3$ typique de ces échelles de turbulence. A droite la figure illustre le problème d'assimilation appliqué à un modèle quasi-géostrophique à deux couches, avec en bas le tourbillon des observations perturbées, au milieu le tourbillon du champ filtré par un algorithme stochastique à sélection génétique approché par 100 particules et en haut la référence qu'il fallait retrouver. Ces deux exemples montrent la pertinence de ces techniques innovantes pour traiter des questions issues de la mécanique des fluides géophysiques. Nous allons dans les années qui viennent poursuivre les applications à des mesures in-situ, notamment en télédétection, et développer de nouvelles stratégies pour l'assimilation de données appliquée à des systèmes de très grandes dimensions.

Références

- C. Baehr (2010): Nonlinear Filtering for observations on a random vector field along a random path. M2AN - ESAIM 2010, 44 (5), 921-945, DOI No: 10.1051/m2an/2010047
- C. Baehr and O. Pannekoucke (2009) : Some issues and results on the EnKF and particle filters for meteorological models. chapter in Chaotic Systems: Theory and Applications., 27-34. DOI No: 10.1142/9789814299725_0004. C. H. Skiadas and I. Dimotikalis Ed. World Scientific
- C. Baehr (2008) : Modélisation probabiliste de la turbulence atmosphérique afin d'en filtrer la mesure par approche particulière, thèse de doctorat de l'Université de Toulouse III.

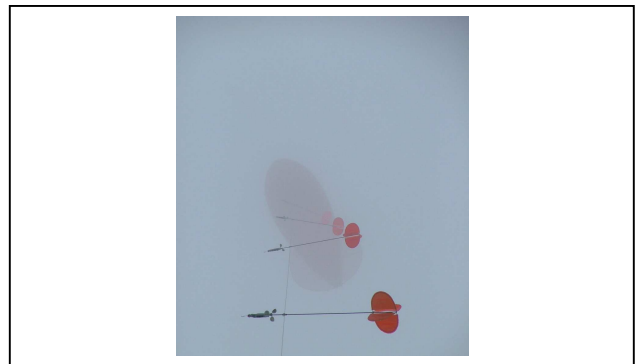
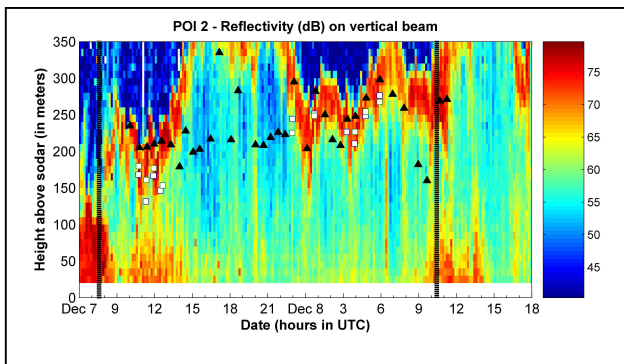
Phénomène difficile à prévoir, le brouillard constitue une gêne, voire un danger pour les activités de transports. Sur aéroport, sa présence réduit significativement la capacité des pistes et cause de nombreux et coûteux retards et annulations de vol.

Pour aider les acteurs du monde aérien à mieux tempérer les effets du brouillard, le CNRM/GAME a développé (en collaboration avec le Laboratoire d'Aérodologie) un modèle spécifique – COBEL-ISBA – déployé à Roissy-Charles de Gaulle depuis 2005.

En 2008-2009, une expérimentation a été conduite pour tester la capacité d'un sodar (télé-détection acoustique) à mesurer en temps réel l'épaisseur du brouillard. Elle a confirmé celle-ci. L'apport de cette information à la prévision du brouillard a ensuite été évalué : il est positif.

Parallèlement, le CNRM/GAME a conduit des travaux sur l'amélioration de l'assimilation du modèle en testant un filtre Kalman d'ensemble.

Enfin, le CNRM/GAME a apporté contribution à deux campagnes d'études du brouillard conduites par la communauté française : ParisFog and ToulouseFog dont les objectifs étaient de documenter sur une longue période l'ensemble des processus intervenant dans le cycle de vie du brouillard.



La figure de gauche est un « sodar-gramme » sur lequel est représenté (code couleur) l'intensité du signal acoustique détecté par le sodar de Roissy entre 7/12/2008 6UTC et le 08/12/ 2008 18UTC. Un brouillard s'est formé vers 8UTC le 7/12 et a persisté jusqu'au lendemain 10UTC. La ligne rouge de forte intensité à une altitude variant de 200 à plus de 350m signe le sommet de la couche de brouillard. Elle est bien corrélée avec les inversions (carrés blanc) mesurées par sondage sous ballon captif. Lorsque l'altitude maximale du sondage (triangle noir) demeure en deçà de cette ligne, le sondage ne détecte aucune inversion.

La figure de droite est une photo du ballon captif mis en place lors des épisodes de brouillard des campagnes ParisFog et ToulouseFog.

Références

A. Dabas, S. Rémy, T. Bergot, 2011 : Use of a sodar to improve the forecast of fogs and low clouds on airports. *Pure and Applied Geophysics*. In Press.

GMEI-3 Mise au point d'une mosaïque radar nationale de vents 3D et assimilation des vecteurs vents restitués dans le modèle AROME

La récente mise à niveau du réseau radar opérationnel français ARAMIS a permis le déploiement d'une nouvelle méthode de traitement Doppler autorisant la collecte simultanée de mesures de vitesse radiale et de réflectivité jusqu'à 250 km des radars. La disponibilité des mesures Doppler à longue portée a ouvert la voie à la mise en place d'une chaîne temps-réel de reconstruction des champs tridimensionnels du vecteur vent complet (u, v, w) au sein des systèmes précipitants échantillonnés par les radars du réseau de Météo-France. Initialement testée sur la région parisienne, cette application a été progressivement étendue à d'autres régions jusqu'à couvrir désormais l'ensemble du territoire métropolitain. Les figures ci-dessous présentent des sorties de cette application obtenues lors du passage de la tempête Klaus, le 24 janvier 2009.

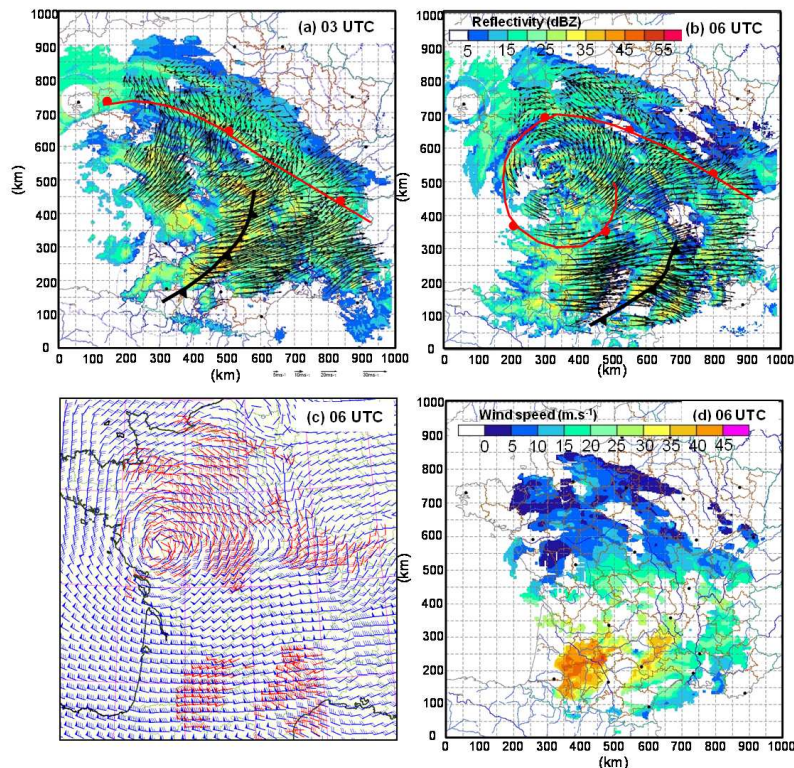


Figure: Champs de vent et de réflectivité 3D temps-réel obtenus le 24 janvier 2009 partir des 24 radars du réseau ARAMIS. (b) coupes horizontales des champs de vent horizontal (vecteurs) et de réflectivité à km d'altitude à 03:00 et 06:00 TU. (Vecteurs vent radar (rouges) et analyse (ALADIN, vecteurs bleus) le 24 janvier 06:00 TU à 1.5 km MSL. (d) force du vent 2km à 06:00 UTC. La position des fronts chaud et froid associés à la dépression est indiquée en (a) et (b). Le maximum de vent observé quelques dizaines de km au nord de Toulouse à 06 TU (d), avoisine 50 m/s. La résolution des champs de vent radar est de 2.5 km sur l'horizontale et 0.5 km sur verticale. La résolution temporelle est de 1 minutes. Ci-dessous la carte du réseau radar ARAMIS.

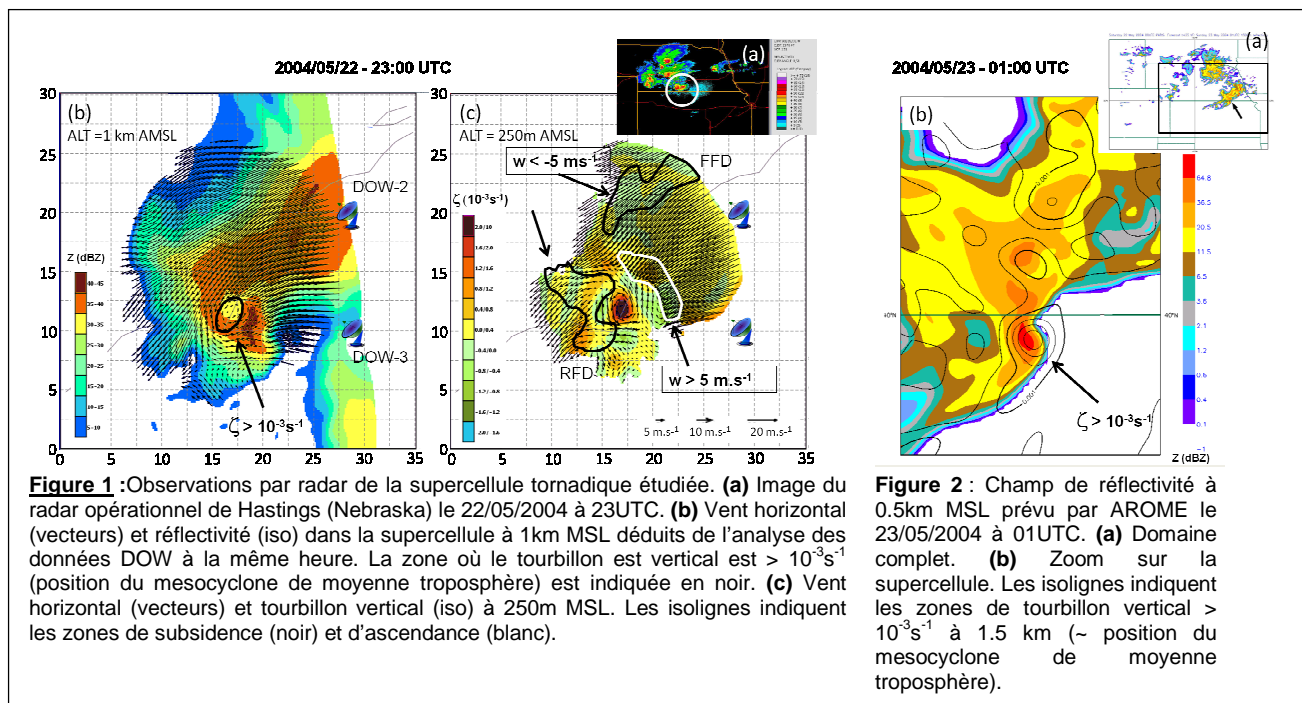
L'analyse des champs de vent reconstitués dans ce cadre purement opérationnel montre qu'il est possible d'obtenir des informations fiables, et potentiellement très utiles, sur la structure de l'écoulement au sein des systèmes précipitants et ce, quel que soit le type de système considéré. À cette mosaïque nationale, dont le passage à l'opérationnel est prévu courant 2012, viendront s'ajouter des analyses régionales à échelle plus fine (de l'ordre du km) dans les régions où le réseau est plus dense, permettant ainsi aux prévisionnistes de mieux anticiper l'évolution future des événements pluvieux suivis. Plus généralement, ces données pourront être utilisées aussi bien pour des applications de type recherche [études de cas, études statistiques, campagnes expérimentales (cf. projet HYMEX)], qu'opérationnelles (prévision immédiate, sécurisation de la navigation aérienne). Les jeux de données ainsi obtenus constituent également une base inestimable dans l'optique d'évaluer les vents et structures dynamiques de moyenne échelle prévus par les modèles numériques à haute résolution comme AROME ou MESO-NH. L'apport de l'assimilation des vecteurs vents horizontaux reconstitués sera également évalué prochainement sur quelques cas précis (par ex : les inondations de Draguignan en 2010).

Références

- Bousquet, O., A. Kergomard, P. Dupuy and P. Tabary, 2011: Real-time nation-wide production of a 3-d wind and reflectivity radar composite in France: science, engineering and applications. QJRM (soumis).
- Bousquet O., T. Montmerle, and P. Tabary, 2008: Using operationally synthesized multiple-Doppler winds for high resolution NWP model horizontal wind verification. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L10803, doi: 10.1029/2008GL033975
- Bousquet, O., P. Tabary, and J. Parent du Châtelet, 2008: Operational multiple-Doppler wind retrieval inferred from long range radar velocity measurements. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **47**, 2929–2945. doi: 10.1175/2008JAMC1878.1
- Bousquet O., P. Tabary, and J. Parent du Châtelet, 2007: On the use of operationally synthesized multiple-Doppler wind fields. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L22813, doi: 10.1029/2007GL030464

Les supercellules sont les orages les plus intenses et peuvent être à l'origine d'un phénomène particulièrement violent: la tornade. L'intérêt pour ces phénomènes a été exacerbé par la tornade dite « de Hautmont » (village du nord de la France ayant été partiellement détruit) d'août 2008. Son passage dévastateur associé à des vents violents (>370 km/h) a motivé des études visant à évaluer et améliorer la prévision de ce type de phénomène. Les modèles opérationnels n'ayant pas la capacité d'analyser explicitement les tornades, la prévision du risque d'orage tornadique repose actuellement sur des indices ad hoc basés sur les propriétés de l'environnement de grande échelle. Ces indices, calculés notamment à partir de la CAPE, ne permettent néanmoins pas d'identifier précisément les zones potentiellement impactées et sont, de plus, mal adaptés aux modèles de prévision non hydrostatiques tels qu'AROME dans lesquels la CAPE est explicitement consommée par les orages.

Le travail présenté ci-dessous vise à évaluer l'apport d'un modèle opérationnel à haute résolution pour la prévision du risque de tornade à partir d'études de processus basées sur l'observation d'une supercellule tornadique par radars Doppler. Les observations, collectées dans la région des Grandes Plaines d'Amérique du Nord par des radars de recherche mobiles à très haute résolution spatio-temporelle sont traitées afin d'accéder à la dynamique supercellulaire et étudier les mécanismes conduisant à la tornadogénèse. Des simulations numériques sont ensuite réalisées avec le modèle AROME en adaptation dynamique afin d'évaluer sa capacité à générer une organisation supercellulaire réaliste de la convection.



L'analyse des données radar a permis de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu en identifiant notamment les interactions entre les structures de petite et moyenne échelles pilotant le cycle de vie de la tornade. Les simulations numériques ont montré la capacité du modèle opérationnel AROME à reproduire le cycle de vie de l'orage observé avec réalisme, même si l'on note toutefois un léger décalage spatio-temporel vis à vis des observations (décalage pouvant vraisemblablement être corrigé en assimilant les observations radars). Le résultat le plus prometteur tient cependant à l'apparente capacité du modèle à générer des structures convectives cohérentes avec le schéma conceptuel de la supercellule (mesocyclone de moyenne troposphère, division cellulaire). Ce point suggère en effet que de nouveaux indices, mieux adaptés aux échelles résolues par ces modèles et prenant notamment en compte la dynamique supercellulaire, pourraient permettre d'améliorer considérablement la prévision du risque de supercellules et de tornades.

Références

Flouttard A. and O. Bousquet, 2011: On the use of high resolution NWP system to improve tornado watches. En preparation (Geophys. Res. Lett.).
 Flouttard A., 2010 : Prévision du risque d'occurrence de tornades avec le modèle AROME à partir d'études de processus basées sur des observations s radars. Stage de fin d'études IT IENM. 91pp

Les particules d'aérosol, plus spécifiquement les noyaux de condensation nuageuse ont un impact avéré sur la microphysique des nuages en modifiant la concentration des gouttelettes. Il a aussi été vérifié expérimentalement que ces modifications de la concentration de gouttelettes affectent les propriétés radiatives des nuages. Il est cependant très difficile de détecter un impact de ces changements de la microphysique sur l'étendue spatiale et la durée de vie des nuages, ce qui affecterait considérablement le système climatique. Cette problématique constituait un des objectifs majeurs des expériences EUCAARI (Kulmala et al., 2009) et VOCALS auxquelles a largement contribué le CNRM/GAME en participant aux campagnes de terrain, à l'analyse des données collectées et à leur interprétation dans un cadre de modélisation LES des phénomènes observés. La figure 1 montre le champ horizontal d'épaisseur optique mesuré par le radiomètre MODIS le 15 mai 2008 sur la mer du nord à l'est de la côte anglaise. Ce système nuageux a été échantillonné par l'ATR-42 de SAFIRE et la base de données a servi à initialiser le modèle Meso-NH. La distribution statistique des épaisseurs optiques simulées est comparée dans la figure 2 aux distributions statistiques calculées (i) sur un domaine restreint à la trajectoire de l'avion (domaine 1) et (ii) sur un domaine adjacent au nord est de la trajectoire dans lequel l'épaisseur optique est plus forte (domaine 2)

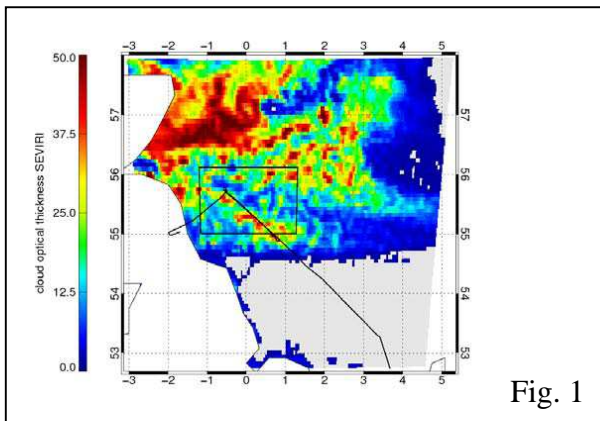


Fig. 1

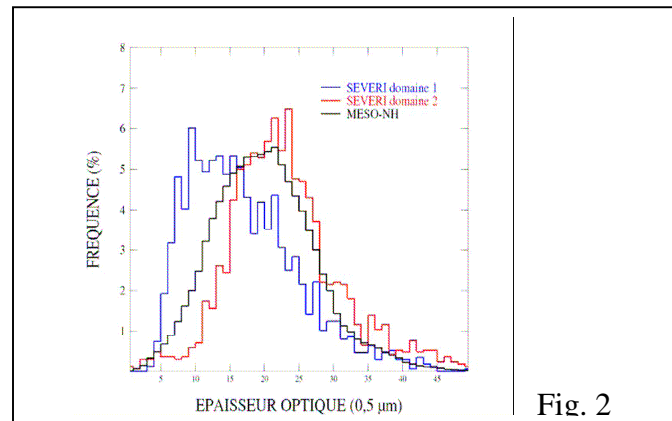


Fig. 2

Ces bases de données ont aussi servi à étudier comment la structure verticale de la couche limite peut moduler l'impact de l'aérosol sur la dynamique nuageuse (Sandu et al. 2009) et à déterminer empiriquement les meilleures valeurs de paramètres à utiliser dans les paramétrisations bulk de la microphysique nuageuse (Geoffroy et al. 2010).

Dans les modèles de climat, l'effet indirect de l'aérosol est paramétré en utilisant un coefficient empirique qui relie le rayon volumique moyen des gouttelettes à leur rayon effectif. Des mesures in situ suggéraient que ce coefficient pouvait dépendre de la concentration de gouttelettes et que sa variation devait atténuer l'effet indirect de l'aérosol. Les bases de données ont été revisitées pour montrer qu'il s'agissait d'un artefact instrumental et une valeur précise de ce coefficient a été obtenue qui s'applique à tous les types de nuages de couche limite (Brenquier et al. 2011)

Ces travaux se poursuivent en se focalisant sur le cycle diurne des nuages de couche limite qui pourrait être un bon indicateur de l'impact des aérosols sur les nuages.

Références

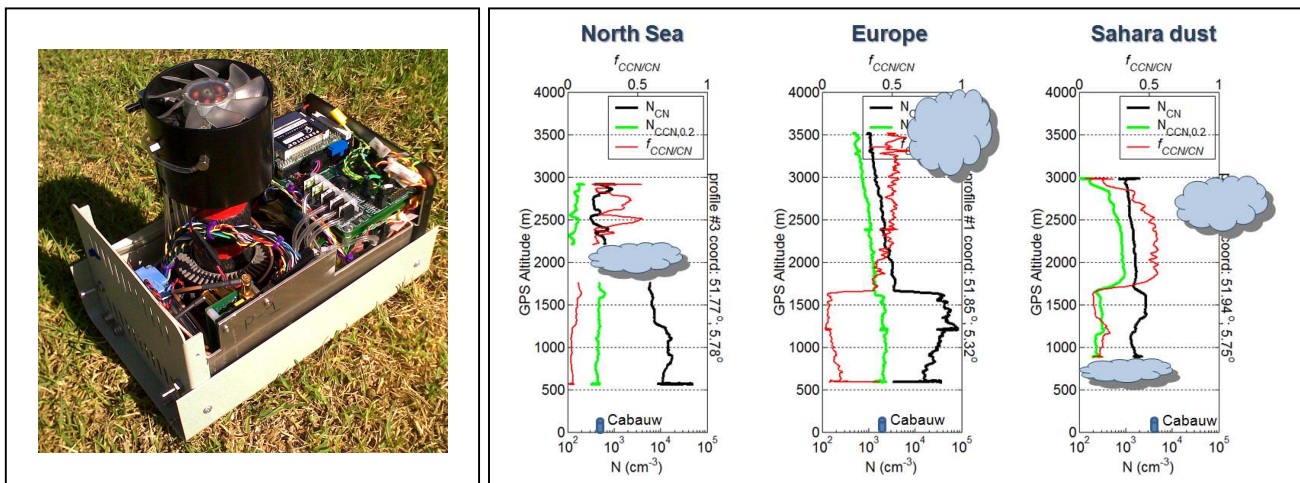
- Sandu, I., J. L. Brenquier, O. Thouron and B. Stevens, (2009), How important is the vertical structure for the representation of aerosol impacts on the diurnal cycle of marine stratocumulus? *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 4039-4052
- Geoffroy O., J.-L. Brenquier, and F. Burnet, 2010, Parametric representation of the cloud droplet spectra for LES warm bulk microphysical schemes, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 4835-4848, doi:10.5194/acp-10-4835-2010.
- Brenquier, J. L., F. Burnet, and O. Geoffroy, 2011: Cloud optical thickness and liquid water path. Does the k coefficient vary with droplet concentration? *Atmos. Chem. Phys. Discussion*.

GMEI-6 Développement instrumental pour la microphysique des nuages et des aérosols

La caractérisation fine des propriétés des aérosols est essentielle pour aborder les thématiques liées à la qualité de l'air et aux interactions aérosol/nuage/rayonnement.

Le CNRM/GAME développe pour cela depuis 2005 la plate-forme aérosol de l'ATR-42 de SAFIRE, un dispositif complexe d'aspiration de l'aérosol atmosphérique placé en aval de la veine de prélèvement communautaire conçue au GMEI, et des instruments qui permettent sa caractérisation chimique (CNRS-LaMP et CNRS-LACE), optique et microphysique (GMEI). Cette plate-forme a été complétée dans le cadre de l'expérience EUCAARI par différents instruments (Dual-CCNC et DMA-CCNC) pour la mesure temps réel des propriétés hygroscopiques de l'aérosol sub-micronique, et néphélomètre multi longueur d'onde pour les propriétés optiques.

En particulier, un compteur de noyaux de condensation nuageux (CCN) à flux continu contrôlé en pression permettant une mesure plus précise à toutes les altitudes (photo de gauche) et un compteur à double colonne (Dual-CCNC) permettant la mesure simultanée des CCN à différentes valeurs de sursaturation, développés par G. Roberts venu de Scripps Institution of Oceanography renforcer l'équipe GMEI/MNPCA depuis 2008, constituent le dernier maillon de la plate-forme aéroportée.



La figure de droite indique en fonction de l'altitude les valeurs de concentration en nombre total de particules (noir) et en CCN à 0.2% de sursaturation (vert) mesurées dans trois masses d'air très différentes (marine issue de mer du Nord, pollution locale et transport de poussières du Sahara) échantillonnées par l'ATR-42 pendant l'expérience EUCAARI aux Pays-Bas. Le profil rouge est le rapport des deux. Les mesures de CCN réalisées au site sol de Cabauw sont indiquées sur l'axe des abscisses. La diversité des situations, avec des écarts d'un ordre de grandeur, et la variabilité observée entre les différentes couches d'aérosols montrent l'apport des mesures aéroportées pour étudier les interactions aérosols-nuages.

L'ATR-42 était à cette occasion le premier avion de recherche équipé à la fois pour la mesure de l'aérosol et la télédétection couplée lidar/radar du profil vertical de l'aérosol et des nuages (CNRS-LATMOS). Les profils d'extinction lidar mesurés simultanément sont actuellement examinés pour établir le lien avec ces mesures in situ.

Références :

Crumeyroille S. : Impact des systèmes convectifs sur les propriétés hygroscopiques des aérosols: analyse de deux cas d'étude durant la campagne AMMA, thèse de l'université P. Sabatier, 2008.

Crumeyroille, S., H. E. Manninen, K. Selegri, G. Roberts, L. Gomes, M. Kulmala, R. Weigel, P. Laj, and A. Schwarzenboeck, New particle formation events measured onboard the ATR-42 aircraft during the EUCAARI campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 6721-6735, Doi:10.5194/acpd-10-9329-2010.

Roberts, G., D. Day, L. Russell, E. Dunlea, J. Jimenez, J. Tomlinson, D. Collins, Y. Shinozuka, and A. Clarke, Characterization of particle cloud droplet activity and composition in the free troposphere and the boundary layer during INTEX-B. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, p. 6627-6644, Doi:10.5194/acp-10-6627-2010.

Le CNRM-GAME, et plus particulièrement le GMEI, maintient, fait évoluer et met en œuvre un ensemble de moyens de mesures mobiles, facilement projetables sur le terrain. Ces moyens instrumentaux contribuent à la caractérisation du profil vertical de l'atmosphère et de la couche limite (stations de radiosondage, radar profileur de vent, télémètre de nuage, moyens de sondage par ballon captif) et à la documentation des échanges d'énergie entre la surface terrestre ou l'océan et l'atmosphère (stations sol, stations de mesure du bilan d'énergie à la surface par la méthode des corrélations turbulentes, scintillomètre) lors de campagnes de mesures de la communauté de durées de quelques mois jusqu'aux cycles annuels. Ces instruments bénéficient d'efforts particuliers sur les aspects énergie (instruments rendus autonomes) transmission de données par des solutions sans fil, et de développement de méthodes de traitement et validation des données. Le tableau ci-dessous illustre le plan de charge de ces 3 dernières années, avec notamment la mise en œuvre de mesures de flux turbulents sur le navire Antea lors de la campagne Gogasmos, réalisée en 2009 dans le Golfe de Gascogne en collaboration avec la DT-INSU et le LATMOS.



Les principaux type de campagnes réalisées concernent les surfaces continentales (en vert), l'interface océan – atmosphère, (en bleu), la prévision du brouillard, les activités en lien avec l'aéronautique (en gris) et la couche limite (en rouge). Une partie de l'activité sur la période 2008 – 2011 a été consacrée à la préparation des dispositifs instrumentaux qui seront mis en œuvre lors des campagnes BLLAST et HYMEX.

Références :

Eigenmann, R., Kalthoff, N., Foken, T., Dorninger, M., Kohler, M., Legain, D., Pigeon, G., Pigué, B., Schüttemeyer, D. and Traulle, O. , Surface energy balance and turbulence network during the Convective and Orographically-induced Precipitation Study (COPS). Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, n/a. Doi: 10.1002/qj.704

Lauvaux, T., B. Gioli, C. Sarrat, P. J. Rayner, P. Ciais, F. Chevallier, J. Noilhan, F. Miglietta, Y. Brunet, E. Ceschia, H. Dolman, J. A. Elbers, C. Gerbig, R. Hutjes, N. Jarosz, D. Legain, and M. Uliasz, 2009: Bridging the gap between atmospheric concentrations and local ecosystem measurements, Geophys. Res. Lett., 36, L19809, Doi:10.1029/2009GL039574.

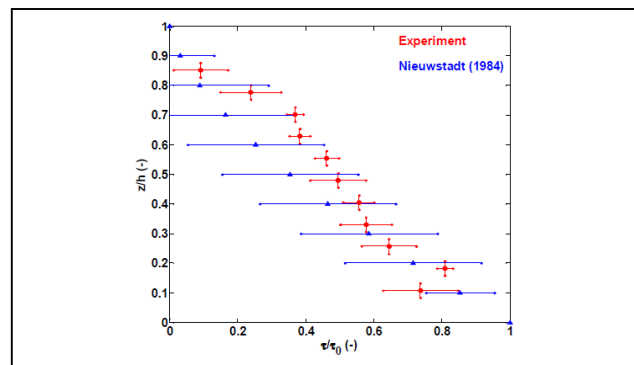
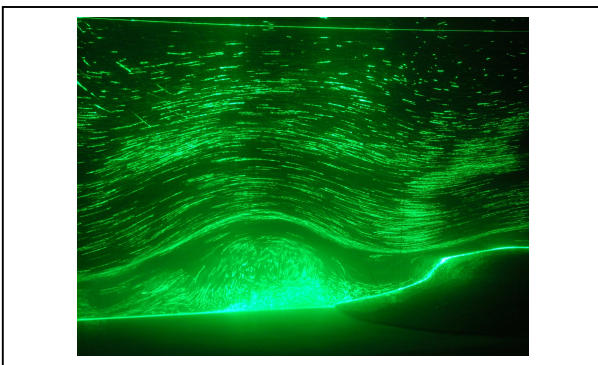
Bourras D., A. Weill, G. Caniaux, L. Eymard, B. Boulès, S. Letourneur, D. Legain, E. Key, F. Baudin, B. Pigué, O. Traullé, G. Bouhours, B. Sinardet, J. Barrié, J.P. Vinson, F. Boutet, C. Berthod, A. Cléménçon, Turbulent air-sea fluxes in the Gulf of Guinea during the AMMA experiment. Journal of Geophysical Research, 114, C04014, Doi: 10.1029/2008JC004951.

GMEI-8 Sonder la couche limite atmosphérique dans une veine hydraulique

La grande veine hydraulique stratifiée du CNRM-GAME a été spécialement conçue pour l'étude de la couche limite atmosphérique. Il s'agit d'un instrument unique en Europe, ce qui constitue une des raisons de son appartenance au réseau européen de grandes infrastructures hydrauliques HYDRALAB.

Cette veine de 22m de long permet d'accéder à des jeux de données précis et complets dans des régimes d'écoulements parfaitement contrôlés similaires à l'atmosphère réelle (très grand nombre de Reynolds), et ce pour un coût réduit par rapport à une campagne de mesure in situ. L'utilisation de l'eau a en effet plusieurs avantages pour l'étude de la couche limite atmosphérique en laboratoire, que ce soit en termes de contrôle de l'écoulement, de gamme de paramètres accessibles, ou encore de mesure.

Construite en 1984 pour caractériser le vent à petit échelle sur des sites réels complexes, les travaux conduits récemment dans cette veine confirment son potentiel pour la recherche sur la couche limite atmosphérique, en conditions neutres (Tomas et al. 2010) mais aussi en présence d'une stratification en densité (Knigge et al. 2010, Steeneveld et al. 2010).



La figure de gauche est une visualisation obtenue lors d'expériences de laboratoire sur l'interaction de la couche limite atmosphérique avec le champ d'ondes internes de gravité généré sur un relief. Cela peut conduire à la formation d'un tourbillon turbulent d'axe parallèle à celui du relief (rotor), qui représente un danger pour les avions. Ces expériences reportées dans Knigge et al. (2010) constituent une première et ont permis de mieux comprendre les conditions atmosphériques propices à l'apparition de ce phénomène.

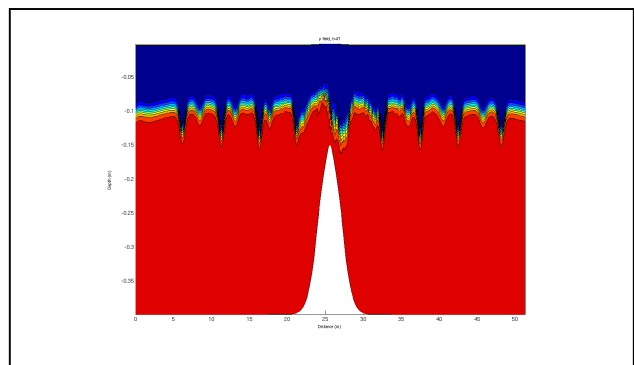
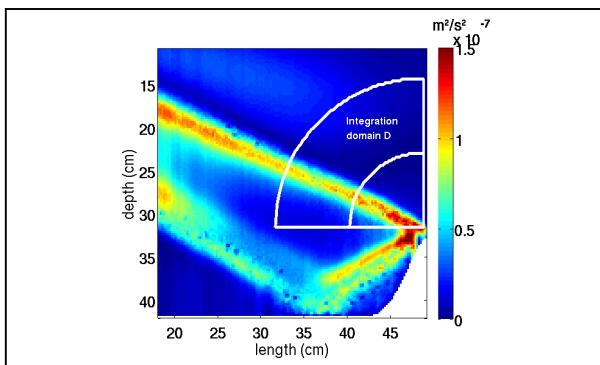
La figure de droite montre (en rouge) le profil vertical du flux de quantité de mouvement mesuré dans une expérience de laboratoire modélisant une couche limite stable (Steeneveld et al. 2010). Ces mesures sont en accord avec celles réalisées dans l'atmosphère réelle (en bleu), ce qui confirme la pertinence de cette approche pour l'étude de la couche limite atmosphérique stable. Le développement de cette thématique de recherche dans l'équipe de simulation physique (SPEA) du CNRM-GAME, en relation avec la modélisation numérique en météorologie, fait partie de ses toutes premières priorités pour les années à venir.

Références

- Knigge C., D. Etling, A. Paci, and O. Eiff (2010) : Laboratory experiments on mountain induced rotors, Quarterly Journal Royal Meteorological Society, 136 :442-450, <http://dx.doi.org/10.1002/qj.564>
- Steeneveld G.-J., D. Dobrovolschi, A. Paci, O. Eiff, L. Lacaze and A.A.M. Holtslag (2010): Sensing the stable boundary layer in a towing tank, 19th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Keystone CO (USA), August 2-6, 2010, <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/172503.pdf>
- Tomas S., O. Eiff and V. Masson (2010) : Experimental Investigation of Turbulent Momentum Transfer in a Neutral Boundary Layer over a Rough Surface, Boundary-Layer Meteorology, <http://dx.doi.org/10.1007/s10546-010-9566-0>

Les ondes de gravité internes 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. Dans l'océan, comme dans l'atmosphère, les ondes de gravité internes ont un impact sur la circulation à grande échelle et la structure en densité. S'il est aujourd'hui clair que ces ondes ont un rôle important sur la circulation thermohaline, de nombreuses questions restent ouvertes concernant la génération, la propagation et le déferlement des ondes internes.

Une partie importante du mélange turbulent permettant d'assurer la remontée des eaux profondes formées aux hautes latitudes serait associée à ces ondes. Notre objectif est de quantifier précisément l'ensemble du bilan d'énergie de la marée interne générée sur une dorsale océanique, en s'appuyant sur des outils de modélisation numérique développés au Laboratoire d'Aérodynamique (Auclair et al. 2010) et de simulation hydraulique au CNRM-GAME.



La figure de gauche représente le champ d'énergie mécanique des ondes internes émises par une dorsale océanique, obtenu à partir de la mesure simultanée de la vitesse et de la densité en laboratoire. Ces mesures ont permis de mettre en évidence un régime dans lequel l'énergie radiée est maximale (Dossmann et al., in revision). La figure de droite est le résultat d'une simulation numérique réalisée pour définir la configuration d'expériences de laboratoire sur la génération d'ondes solitaires à la pycnocline, en relation avec des phénomènes de transfert d'énergie et de transport de nutriments observés dans le golfe de Gascogne.

Ces travaux s'inscrivent dans une thématique clé des activités de recherche menées dans l'équipe de simulation physique (SPEA) du CNRM-GAME : l'étude des ondes internes générées sur une topographie dans l'atmosphère et dans l'océan. Ils participent au développement d'approches mixtes simulation hydraulique et modélisation numérique. Une version « expérience de laboratoire » du code Meso-NH est également en cours de développement pour aborder des problématiques atmosphériques.

Références

Thèse d'Yvan Dossmann en co-encadrement CNRM-GAME (A. Paci) et Laboratoire d'Aérodynamique (F. Auclair), début en octobre 2009: « Ondes internes générées sur une dorsale océanique : du laboratoire à l'océan ».

Dossmann Y., A. Paci, F. Auclair and J.W. Floor (2011): Simultaneous velocity and density measurements for an energy-based approach to internal waves generated over a ridge, submitted to Experiments in Fluids, *in revision*.

Auclair F., C. Estournel, J.W. Floor, M. Herrmann, C. Nguyen and P. Marsaleix (2010): A non-hydrostatic, energy conserving algorithm for regional ocean modeling, Ocean Modelling, Volume 36, Issues 1-2, 2011, Pages 49-70,

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.09.006>

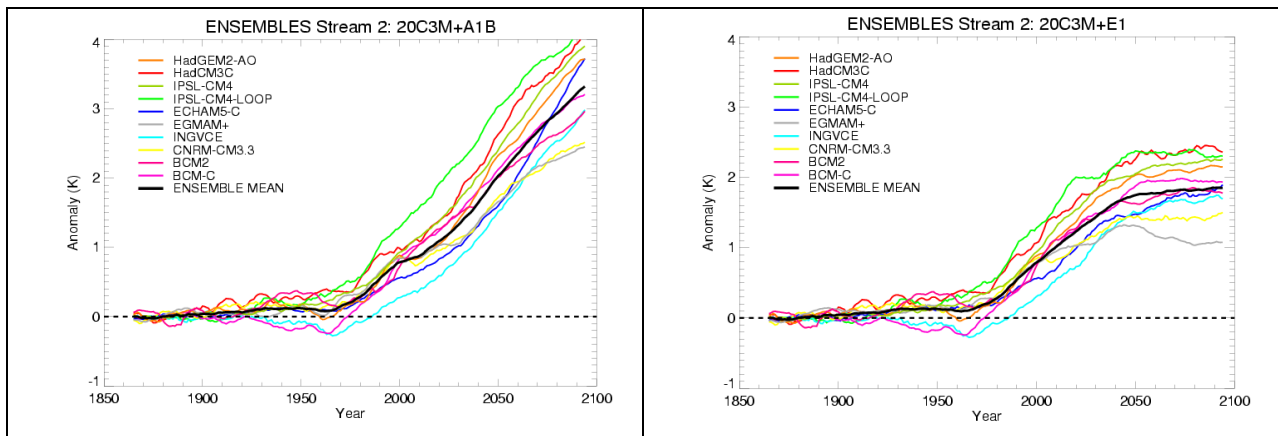
ENCADRÉS SCIENTIFIQUES

de l'unité de recherche

GMGEC

GMGEC-1 « Stream-2 » du projet FP6-ENSEMBLES : évaluation d'un nouveau scénario d'émission pour le 21^{ème} siècle

Le dernier rapport du GIEC paru en 2007, s'est appuyé sur des simulations du climat de la planète réalisées par une vingtaine d'instituts scientifiques. Ces simulations ont été menées de manière coordonnée au plan européen et ont constitué le « Stream-1 » du projet FP6-ENSEMBLES. Le CNRM-GAME a participé à cet exercice, en mettant en œuvre le modèle climatique CNRM-CM3.1. Ce système, dans lequel les couplages sont gérés par le coupleur OASIS, représente la circulation atmosphérique (ARPEGE-Climat), océanique (OPA), la glace de mer (GELATO) et l'écoulement des rivières (TRIP). Suivant l'esprit du projet ENSEMBLES, plusieurs aspects du modèle ont ensuite été améliorés, conduisant à CNRM-CM3.3 : les échanges énergétiques entre l'océan et l'atmosphère, la prise en compte des changements d'utilisation des sols, l'effet des éruptions volcaniques et l'impact climatique des poussières sulfatées. Un nouvel ensemble de simulations, le « Stream-2 » a alors été réalisé avec ce nouveau modèle en prenant notamment en compte le nouveau scénario E1 d'émissions de gaz à effet de serre et de précurseurs d'aérosols. Ce scénario correspond à l'objectif de l'Union Européenne visant à stabiliser la concentration atmosphérique du CO₂ à 450ppm vers 2050 ; il a été comparé au scénario SRES-A1B du GIEC, qui est considéré comme un scénario « médian ».



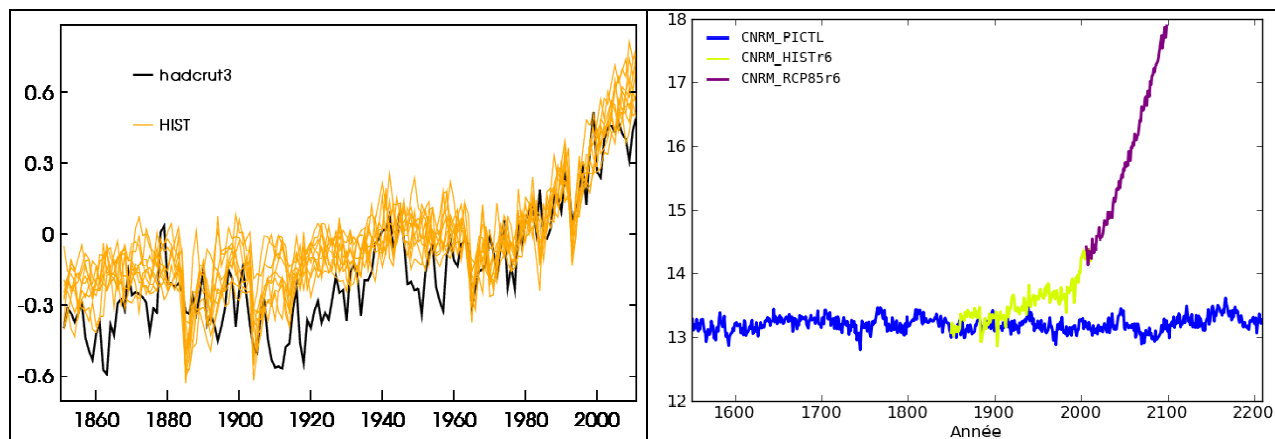
Les figures de gauche et de droite représentent l'anomalie de température moyenne globale de l'air près de la surface simulée par les principaux modèles climatiques européens, respectivement pour les deux scénarios SRES-A1B et E1, sur la période 1860-2100. Les simulations menées par le CNRM-GAME apparaissent en jaune. Pour certains modèles, des simulations avec et sans cycle du carbone ont été produites. Pour un scénario donné, ces différences de traitement contribuent à élargir l'incertitude liée à la modélisation. Le réchauffement global simulé en retenant le scénario E1 est inférieur à 2°C pour la plupart des modèles, tandis qu'il est compris entre 2,5 et 4°C pour le scénario médian « classique » A1B. Le scénario E1 permet une stabilisation relative de la température globale ou de la surface de glace de mer quelques décennies après la diminution des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, même dans ce scénario, le niveau des mers devrait continuer à s'élever pendant plusieurs siècles, à un rythme cependant moins élevé que dans le cas du scénario A1B.

Référence

Johns, T. C., J.-F. Royer, I. Höschel, H. Huebener, E. Roeckner, E. Manzini, W. May, J.-L. Dufresne, O.H. Otterå, D. P. van Vuuren, D. Salas y Melia, M.A. Giorgetta, S. Denvil, S. Yang, P. G. Fogli, J. Körper, J. F. Tjiputra, E. Stehfest, and C. D. Hewitt, 2011: Climate change under aggressive mitigation: The ENSEMBLES multi-model experiment. *Climate Dyn.*, online, doi: 10.1007/s00382-011-1005-5.

GMGEC-2 Développement et évaluation du modèle CNRM-CM5

La contribution du CNRM-GAME au prochain rapport du GIEC se traduit notamment par la réalisation d'un total de près de 9000 ans de nouvelles simulations climatiques dans le cadre du projet international CMIP5. La participation à ce projet des différents instituts européens d'études climatiques s'effectue dans le cadre coordonné du projet européen FP7-COMBINE. Le nouveau modèle climatique couplé global CNRM-CM5 a été développé à cette fin en collaboration forte avec le CERFACS. Il s'appuie sur le cœur couplé océan-atmosphère NEMO3.2 (IPSL) / ARPEGE-Climat v5 (Météo-France). Les échanges surface-atmosphère, la glace de mer et l'écoulement des fleuves au sein de CNRM-CM5 sont respectivement représentés par SURFEX v5, GELATO v5 et TRIP. Ce nouveau modèle, d'une résolution horizontale proche de 150 km, est couplé par OASIS3. Validé par de nombreuses expériences en climat actuel et préindustriel (milieu du 19^{ème} siècle), en termes de variabilité (Oscillations Nord-Atlantique et Nord-Pacifique, El Niño...), de téléconnexions (El Niño / Mousson Africaine), nous montrons ici quelques résultats donnant un aperçu des performances du modèle en termes de dérive de long terme et de sensibilité climatique.



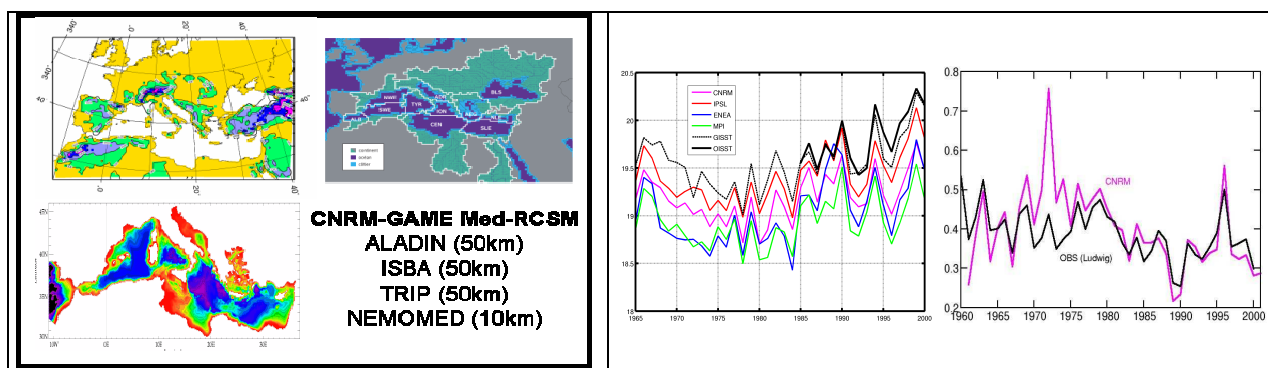
La figure de gauche compare les anomalies de la température à 2m en moyenne globale par rapport à 1961-1990 (°C) observées (HadCRUT3, en noir) et simulées par 10 réalisations de la période 1850-2005 par CNRM-CM5. Ces expériences incluent la variabilité solaire, l'effet des éruptions volcaniques et les évolutions anthropiques des concentrations des gaz à effet de serre et aérosols atmosphériques. Le réchauffement observé, qui s'est produit en deux temps, est relativement bien simulé par CNRM-CM5. Par ailleurs, le refroidissement temporaire qui se produit lors d'éruptions volcaniques majeures, d'ailleurs sous-estimé par les observations dans le cas du Krakatoa (1883), est généralement bien représenté. La figure de droite présente une simulation de la température à 2m du milieu du 19^{ème} siècle, sans évolution des gaz à effet de serre ou aérosols (en bleu), confirmant la stabilité du modèle. Les courbes en vert et mauve représentent une simulation 1850-2005 prolongée jusqu'en 2100 en suivant le scénario à fortes émissions de gaz à effet de serre RCP8.5. Ce scénario se traduit par une augmentation de la température planétaire de près de 4°C par rapport aux conditions actuelles.

Référence

Voldoire, A., C. Cassou, D. Salas y Méliá, B. Decharme, E. Sanchez-Gomez, S. Sénési, S. Valcke, I. Beau, A. Alias, M. Chevallier, M. Déqué, H. Douville, E. Maisonave, S. Planton, D. Saint-Martin, S. Tyteca, R. Alkama, S. Belamari, A. Braun, F. Chauvin, and S. Szopa, 2011: The CNRM-CM5.1 global climate model : description and basic evaluation. En préparation.

GMGEC-3 : Régionalisation du climat sur le domaine méditerranéen

Les caractéristiques physiques de la zone méditerranéenne (relief et trait de côte complexes, fort contraste terre-mer, petites îles, couplage air-mer, vents régionaux, interaction nuages-rayonnement et aérosols-rayonnement) ont amené récemment au développement d'une nouvelle génération de Modèles Régionaux de Climat (MRC) dédiés à l'étude de la variabilité passée et future du climat méditerranéen. Ces nouveaux modèles incluent le couplage interactif des différentes composantes du système climatique régional : atmosphère, surface continentale, végétation, hydrologie de surface, rivière et océan.



En s'appuyant sur un premier modèle régional de climat couplé océan-atmosphère dédié à la Méditerranée (Somot et al, 2008), le CNRM-GAME a mis en place un tout premier Modèle Régional du Système Climatique méditerranéen (MRSC) dans le cadre des projets ANR-CICLE, ANR-MEDUP et FP6-CIRCE. Ce MRSC (figure de gauche) est construit à partir d'ALADIN-Climat (résolution horizontale de 50 km ; Colin et al., 2010) pour la composante atmosphérique régionale, ISBA (50 km) pour les surfaces continentales (incluant sol, végétation et hydrologie), TRIP (50 km) pour les fleuves et NEMO-MED8 (10 km ; Beuvier et al., 2010) pour la mer Méditerranée. Toutes les composantes sont couplées quotidiennement grâce au coupleur OASIS, et des simulations sur les derniers 50 ans ont été réalisées en utilisant les réanalyses ERA40 et ERA-Interim comme conditions aux frontières. Ces simulations ne contiennent pas d'assimilation de données régionales mais fournissent néanmoins des champs homogènes dans le temps, à haute-résolution spatio-temporelle et cohérents pour les différentes composantes du climat méditerranéen. Les figures de droite montrent des séries inter-annuelles pour la température de surface de la mer Méditerranée (°C) et le débit cumulé des fleuves méditerranéens (mm/jour) simulés par le modèle du CNRM-GAME et par trois autres MRSC sur la période 1960-2001 (les observations sont en noir). On obtient un très bon accord avec les observations pour ces variables pour les moyennes, la variabilité inter-annuelle et les tendances. Ces modèles contribuent déjà à améliorer notre compréhension de la variabilité passée du climat méditerranéen incluant celle des extrêmes (projet HyMeX) et permettront bientôt une modélisation plus cohérente de ses possibles évolutions futures (projet Med-CORDEX).

Références

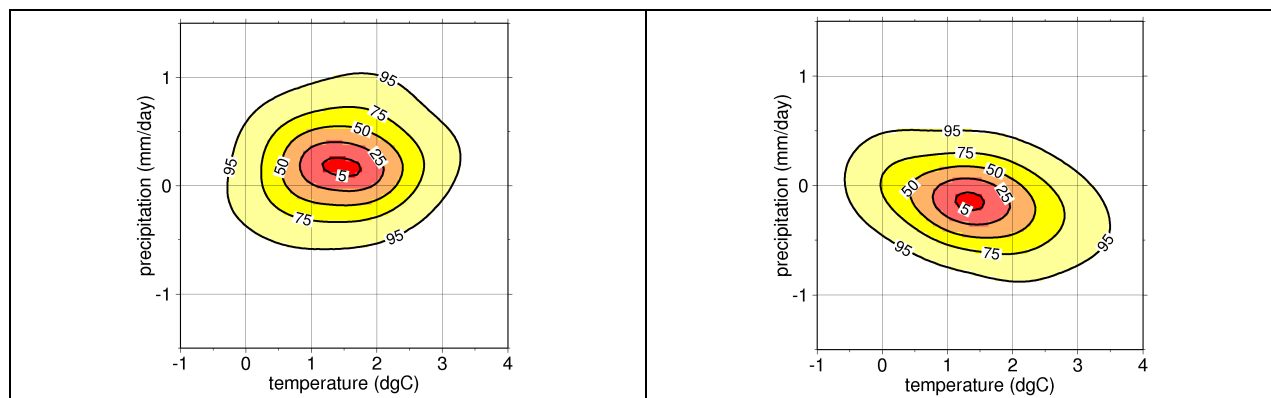
Somot, S., F. Sevault, M. Déqué M., and M. Crépon, 2008: 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled Atmosphere-Ocean Regional Climate Model. *Global and Planetary Change*, 63 (2-3), 112-126, doi:10.1016/j.gloplacha.2007.10.003.

Beuvier, J., F. Sevault, M. Herrmann, H. Kontoyiannis, W. Ludwig, M. Rixen, E. Stanev, K. Béranger, and S. Somot, 2010: Modelling the Mediterranean Sea interannual variability over the last 40 years: focus on the EMT. *J. Geophys. Res. - Ocean*, 115, C08017, doi:10.1029/2009JC005950.

Colin, J., M. Déqué, R. Radu, and S. Somot, 2010: Sensitivity study of heavy precipitations in Limited Area Model climate simulation: influence of the size of the domain and the use of the spectral nudging technique. *Tellus-A*, 62 (5), 591-604, doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00467.x.

GMGEC-4 : Incertitudes sur le changement climatique régional

Les exercices successifs du GIEC ont montré que le réchauffement à l'échelle planétaire induit par l'accroissement des concentrations en gaz à effet de serre était entaché d'une incertitude dont une partie est liée aux choix de modélisation numérique. C'est encore plus vrai lorsqu'on descend à une échelle régionale. De plus, si on s'intéresse à la première moitié du 21^{ème} siècle, la variabilité naturelle du climat d'une année sur l'autre induit une incertitude sur les moyennes trentenaires censées décrire le climat. Dans le projet FP7-ENSEMBLES la plupart des modèles européens régionaux ont effectué une descente d'échelle dynamique des scénarios de l'AR4 en passant de la maille à 250 km des modèles globaux à une maille à 25 km sur l'Europe. Au total 17 réalisations sont disponibles en combinant les modèles globaux et régionaux. Un système de pondération a été mis en place, en utilisant une descente d'échelle des réanalyses ERA40 (1958-2001) pour attribuer une note aux modèles régionaux. Les densités de probabilité des modèles individuels (variabilité interannuelle) ont été combinées avec ces poids pour former une seule densité pour chaque capitale européenne. Les figures ci-dessous montrent les densités conjointes de la réponse en température et précipitations pour Paris.



La figure de gauche montre la densité de probabilité en hiver (DJF), celle de droite la densité en été (JJA). L'abscisse indique la réponse en température, l'ordonnée la réponse en précipitations. La réponse est calculée comme la différence entre la moyenne 2021-2050 et la moyenne 1961-1990. Les iso-densités sont en fait cotées par la probabilité de se trouver à l'intérieur du contour (en %). Ainsi la zone jaune clair et au-delà correspond à la zone des réponses possibles (à 95% d'acceptation), tandis que la zone orangé clair et au-delà correspond aux réponses médianes (50% de chances). En hiver, il n'y a pas de lien entre la réponse en température et en précipitations, tandis qu'en été il y a une corrélation négative entre les deux paramètres : les réponses sèches correspondent à des réchauffements plus marqués. Le réchauffement se situe le plus probablement entre 1°C et 2°C, mais la plage [0°-3°] est possible. Les pluies ont tendance à augmenter en hiver et diminuer en été, mais un changement de signe opposé est seulement moins probable

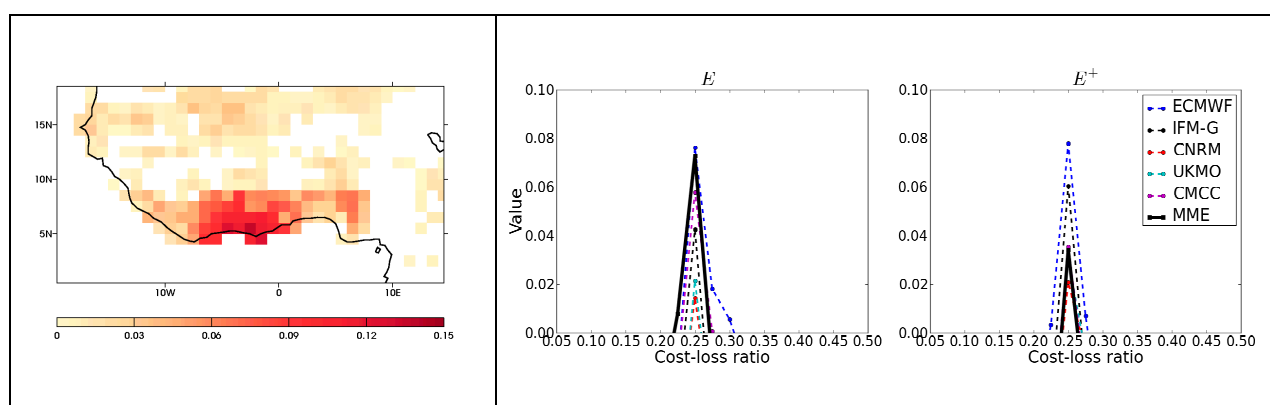
Références

Déqué, M., D. P. Rowell, D. Lüthi, F. Giorgi, J. H. Christensen, B. Rockel, D. Jacob, E. Kjellström, M. Castro, and B. van den Hurk, 2007: An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81, 53-70, doi: 10.1007/s10584-006-9228-x.

Déqué, M., 2009: Temperature and precipitation probability density functions in ENSEMBLES regional scenarios. ENSEMBLES technical report n°5, 63 pp.

Déqué, M., and S. Somot, 2010: Weighted frequency distributions express modelling uncertainties in the ENSEMBLES regional climate experiments. *Climate Res.*, 44 (2-3):195-209, doi:10.3354/cr00866.

Dans le cadre du projet FP6-ENSEMBLES, des prévisions d'ensemble saisonnières de cinq modèles couplés océan-atmosphère européens ont été initialisées en février, mai, août et novembre sur la période 1960-2005. Les prévisions de précipitation du multi-modèle ENSEMBLES à 2 à 4 mois d'échéance ont été évaluées sous forme déterministe et probabiliste (après correction par la méthode quantile-quantile (Déqué, 2007)) sur trois régions d'Afrique pour des saisons de fortes pluies (Afrique de l'ouest en juin-juillet-août, Afrique du sud en décembre-janvier-février et Corne de l'Afrique en mars-avril-mai et septembre-octobre-novembre). Les données GPCP Full Data Reanalysis v.4 ont été choisies comme référence. Par ailleurs, une méthode simple a été mise en œuvre pour évaluer la valeur économique potentielle des prévisions.



La figure de gauche montre le « Ranked Probability Skill Score » (RPSS) calculé pour les déciles de précipitation sur la région de l'Afrique de l'ouest. Seuls les points de grille où $RPSS > 0$ sont montrés. La valeur économique potentielle des modèles sur l'Afrique du sud en été austral est calculée en utilisant un modèle simplifié coût-pertes pour les événements de précipitation inférieure au 1^{er} quartile (E^-) et supérieure au 3^{ème} quartile (E^+) (figure de droite). La figure de gauche montre que le multi-modèle apporte de l'information utile vis-à-vis de la climatologie sur les précipitations de la saison de mousson ouest-africaine sur le nord du Golfe de Guinée, et dans une moindre mesure sur certaines régions du Sahel. Le RPSS reste faible en moyenne sur le domaine mais est nettement amélioré par rapport aux scores obtenus avec les modèles pris individuellement. Cette amélioration est également constatée pour les autres régions d'étude. La valeur économique des modèles sur l'Afrique du sud (figure de droite) est positive pour les ratios coût-pertes proches de la probabilité de l'événement considéré. L'approche multi-modèle ne permet pas d'améliorer les valeurs des modèles individuels. De manière générale, les résultats obtenus sont meilleurs sur l'Afrique de l'ouest et l'Afrique du sud que sur la Corne de l'Afrique. La prévisibilité des précipitations sur l'Afrique par le multi-modèle paraît plus forte là où des liens avec les conditions de surface des océans ont été établis et sont correctement reproduits par le multi-modèle ENSEMBLES.

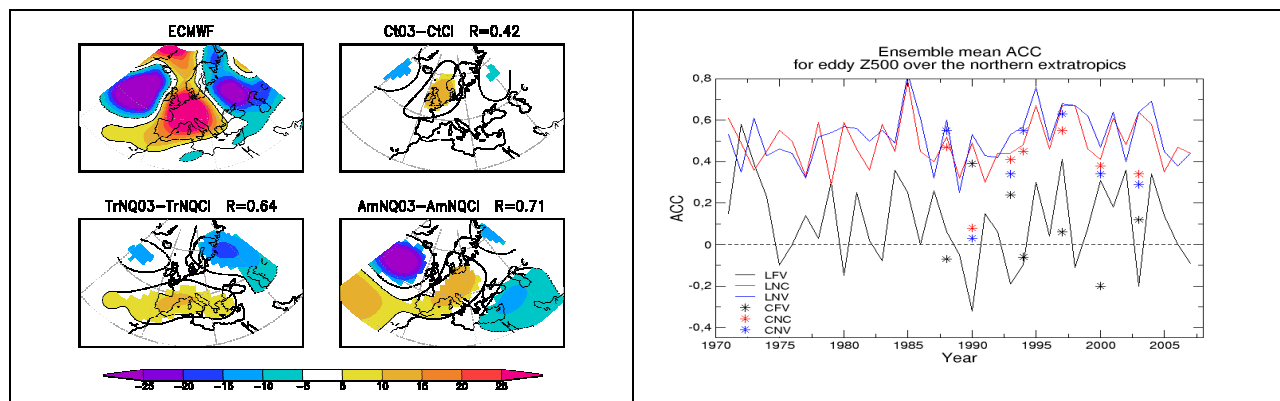
Références

Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16-26, doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.030.

Batté, L., and M. Déqué, 2011: Seasonal predictions of precipitation over Africa using coupled ocean-atmosphere general circulation models : skill of the ENSEMBLES project multimodel ensemble forecasts. *Tellus A*, online, doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00493.x.

GMGEC-6 : Projet ANR IRCAAM : Influence des tropiques sur la prévisibilité estivale aux moyennes latitudes de l'Hémisphère Nord

Selon le dernier rapport du GIEC, la fréquence, la durée et l'intensité des vagues de chaleur devraient augmenter au cours du 21^{ème} siècle dans la plupart des régions des moyennes latitudes. En Europe, l'été 2003 a été marqué par une canicule sans précédent qui a souligné la vulnérabilité de nos sociétés face à l'aléa climatique et l'enjeu économique et sociétal que représente la prévision saisonnière, à savoir la possibilité d'anticiper la probabilité d'occurrence de tels événements quelques mois à l'avance. Le projet ANR IRCAAM (2007-2010), coordonné par le CNRM-GAME, vise à comprendre l'influence de la circulation atmosphérique tropicale sur la variabilité extratropicale et à quantifier le gain potentiel de prévisibilité aux moyennes et hautes latitudes de l'Hémisphère Nord lié à une amélioration de la prévisibilité tropicale. La technique utilisée est celle du « nudging en point de grille » qui permet de guider un modèle atmosphérique global (ARPEGE-Climat, LMDZ, ou modèle simplifié) vers des analyses, ici dans tout ou partie de la ceinture tropicale. Les résultats soulignent le rôle de l'Atlantique Tropical comme source de forçage de l'anomalie anticyclonique observée sur l'Europe en 2003, et montrent plus généralement que l'amélioration de la prévisibilité tropicale représente un enjeu majeur pour améliorer les systèmes dynamiques de prévision saisonnière à nos latitudes.



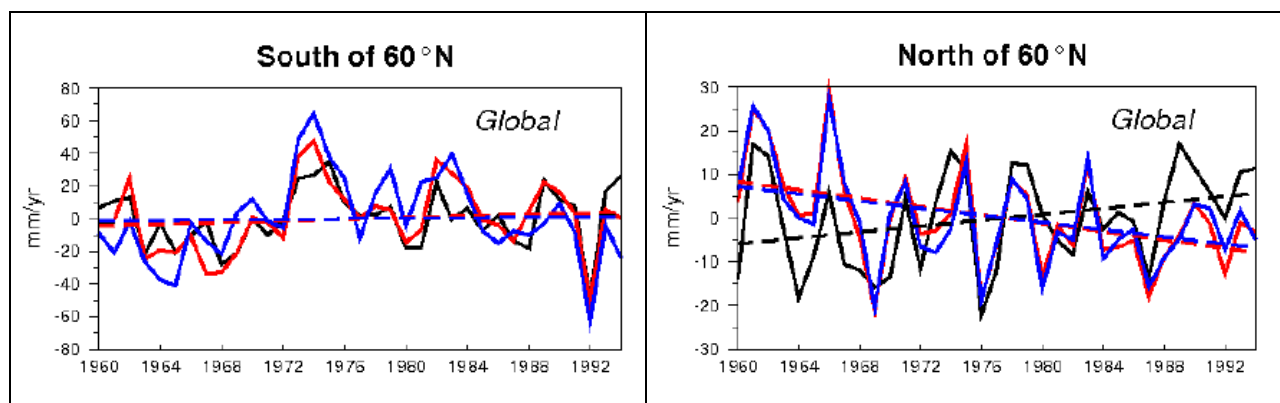
La figure de gauche montre les anomalies (en mètres) de la composante stationnaire du géopotential à 500 hPa moyennée de juin à septembre 2003, d'une part dans les analyses opérationnelles ECMWF, d'autre part dans des ensembles de simulations ARPEGE-Climat forcées par des températures de surface de la mer observées. Le forçage océanique global ne permet pas au modèle de reproduire l'anomalie anticyclonique observée sur l'Europe dans l'expérience de contrôle (Ct03-CtCl). En revanche, le nudging en zone tropicale (Tr03-TrCl) ou limité à l'Amérique Centrale et aux Caraïbes (Am03-AmCl) permet de mieux reproduire le « pattern » observé (cf. corrélation R avec les anomalies ECMWF) même si l'amplitude du signal demeure sous-estimée. La figure de droite généralise ce résultat grâce aux études de cas réalisées avec ARPEGE-Climat (symboles) et aux simulations d'ensemble conduites avec LMDZ de 1971 à 2008 (lignes). Le nudging tropical améliore sensiblement les scores obtenus sur l'Hémisphère Nord relativement au seul effet des températures de surface de la mer (CFV et LFN), qu'il soit mis en oeuvre avec (CNV et LNV) ou sans (CNC et LNC) forçage océanique.

Références

- Douville, H., 2010: Rapport final du projet ANR VMC IRCAAM, 30 pp, <http://www.cnrm.meteo.fr/ircaam/>
- Bielli, S., H. Douville, and B. Pohl, 2010: Understanding the West African monsoon variability and its remote effects: an illustration of the grid point nudging methodology. *Climate Dyn.*, 35, 159-174, doi:10.1007/s00382-009-0667-8.
- Douville, H., S. Bielli, C. Cassou, M. Déqué, N. Hall, S. Tyteca, A. Voldoire, 2011: Tropical influence on boreal summer mid-latitude stationary waves. *Climate Dyn.*, online, doi:10.1007/s00382-011-0997-1

GMGEC-7 : Projet RTRA CYMENT: Modélisation hydrologique globale et analyse des tendances récentes sur les débits des grands bassins

Selon le dernier rapport du GIEC, les conséquences hydrologiques du réchauffement global demeurent très incertaines, y compris à l'échelle continentale. Comprendre les tendances observées sur les débits des grands bassins représente donc un enjeu crucial pour contraindre les projections hydrologiques du 21^{ème} siècle. Dans le cadre du projet CYMENT, le modèle hydrologique ISBA du CNRM-GAME, associé au modèle de routage des fleuves TRIP, a été forcé par des réanalyses corrigées de leurs biais systématiques afin de simuler globalement les débits des grands fleuves sur la période 1950-2006. En collaboration avec le LEGOS, des observations satellitaires de variations des stocks d'eau (mission gravimétrique GRACE lancée en 2002) ont par ailleurs été utilisées pour valider les bilans d'eau simulés à l'échelle des grands bassins. Cette comparaison témoigne du bon comportement du modèle ISBA, aussi bien en terme de cycle annuel que de variabilité interannuelle. Elle renforce ainsi la confiance que l'on peut avoir dans les variations globales de débits simulées, qui sont conformes aux observations au sud de 60°N mais montrent une tendance contradictoire au nord de 60°N. Ce paradoxe souligne une faiblesse de la modélisation, liée à l'absence de représentation du pergélisol (et de sa fonte récente) dans le modèle ISBA comme dans la plupart des modèles globaux.



La figure de gauche montre, en moyenne annuelle sur l'ensemble des grands bassins dont l'embouchure se situe au sud de 60°N et pour lesque ls nous disposons d'observations *in situ* de débit, l'évolution de 1960 à 1994 des anomalies de ruissellement observées (en noir) et simulées (en couleur) par le modèle ISBA en utilisant deux jeux de précipitations distincts. La variabilité interannuelle est correctement reproduite, ainsi que l'absence de tendance à long-terme (des tendances régionales existent et sont relativement bien reproduites). En revanche, la figure de droite montre que la tendance à l'augmentation des débits observée au nord de 60°N (notamment sur les grands bassins Sibériens et Nord-Américains) n'est pas simulée. Quel que soit le jeu de précipitations utilisé, le modèle ISBA indique au contraire une diminution des débits. Plutôt qu'un effet anti-transpirant du dioxyde de carbone émis par l'homme (hypothèse émise par nos collègues anglais), ce paradoxe suggère le rôle important du pergélisol aux hautes latitudes dont la fonte progressive pourrait alimenter les rivières mais n'est pas simulée (faute de paramétrisation du gel profond) dans la plupart des modèles hydrologiques globaux.

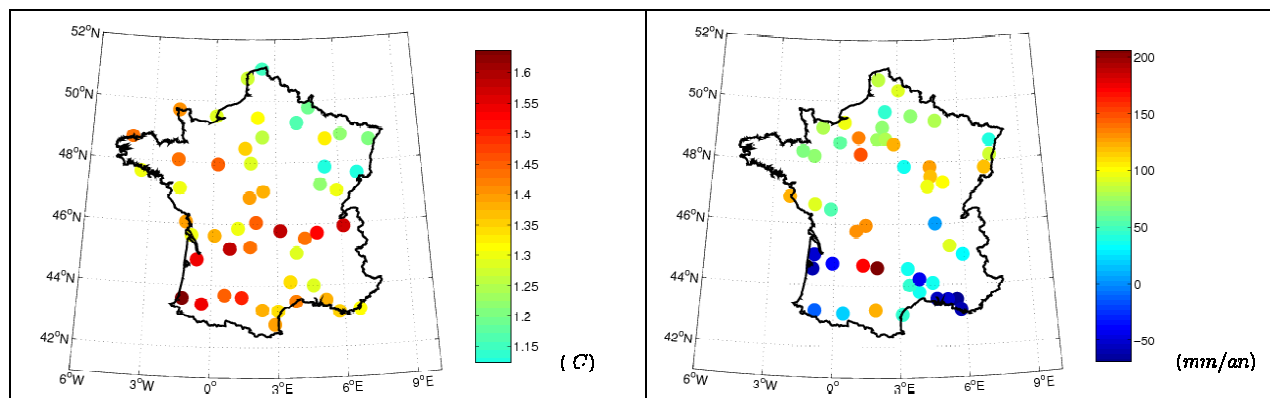
Références

Alkama, R., B. Decharme, H. Douville, M. Becker, A. Cazenave, J. Sheffield, A. Voldoire, S. Tyteca, and P. Le Moigne, 2010: Global evaluation of the ISBA-TRIP continental hydrologic system. Part 1: A twofold constraint using GRACE Terrestrial Water Storage estimates and in-situ river discharges. *J. Hydrometeorology*, 11, 583-600, doi:10.1175/2010JHM1211.1.

Alkama, R., B. Decharme, H. Douville, and A. Ribes, 2011: Trends in global and basin-scale runoff over the late 20th century: Methodological issues and sources of uncertainty. *J. Climate*, online, doi: 10.1175/2010JCLI3921.1.

GMGEC-8 : Détection statistique des changements climatiques

Selon le dernier rapport du GIEC, la détection d'un changement observé consiste à montrer que ce changement est significativement différent, d'un point de vue statistique, de ce qui pourrait être expliqué par la seule variabilité interne du climat. Les recherches conduites au CNRM-GAME sur ce sujet ont tout d'abord concerné les aspects méthodologiques des études de détection à l'échelle régionale, dans le cadre d'une thèse en collaboration avec l'Institut de Mathématiques de Toulouse (Ribes, 2009). Une amélioration de la méthode des « empreintes digitales optimales » a été proposée grâce à l'application de techniques statistiques récentes (« Regularized Optimal Fingerprint », Ribes et al, 2009). Une méthode de détection originale a ensuite été développée, basée sur la recherche d'un certain signal temporel dans des séries observées (« Temporal Optimal Detection » ou TOD, Ribes et al, 2010). Cette méthode ne requiert que peu d'hypothèses quant à la capacité des modèles à simuler avec précision les changements en cours et la variabilité interne aux échelles considérées. Ces différentes méthodes ont été appliquées avec succès sur différents jeux de données observées couvrant le bassin Méditerranéen (projet européen CIRCE) et la France (données homogénéisées de Météo France).



La figure de gauche représente le signal de changement de la température moyenne annuelle entre 1900 et 2006, extrait des observations par application de la méthode de détection TOD. Le réchauffement est généralisé et varie de +1.1°C à +1.65°C environ selon la localisation. L'outil statistique mis en oeuvre permet de conclure que ce changement est significatif (c'est-à-dire non explicable par la variabilité interne). On peut également montrer que la distribution spatiale de ce changement est non uniforme, ce qui autorise l'interprétation du gradient Nord-Est / Sud-Ouest observé. La figure de droite présente le même type de résultat pour les cumuls annuels de précipitations. Le constat est ici différent puisque le signal estimé montre des contrastes régionaux prononcés, y compris quant au signe du changement. Bien que l'évolution des cumuls de précipitations en moyenne sur l'ensemble du territoire ne montre pas de changement significatif, ces contrastes régionaux, eux, ne sont pas compatibles avec la variabilité interne. Ils conduisent donc à rechercher une interprétation par un forçage externe au système climatique.

Références

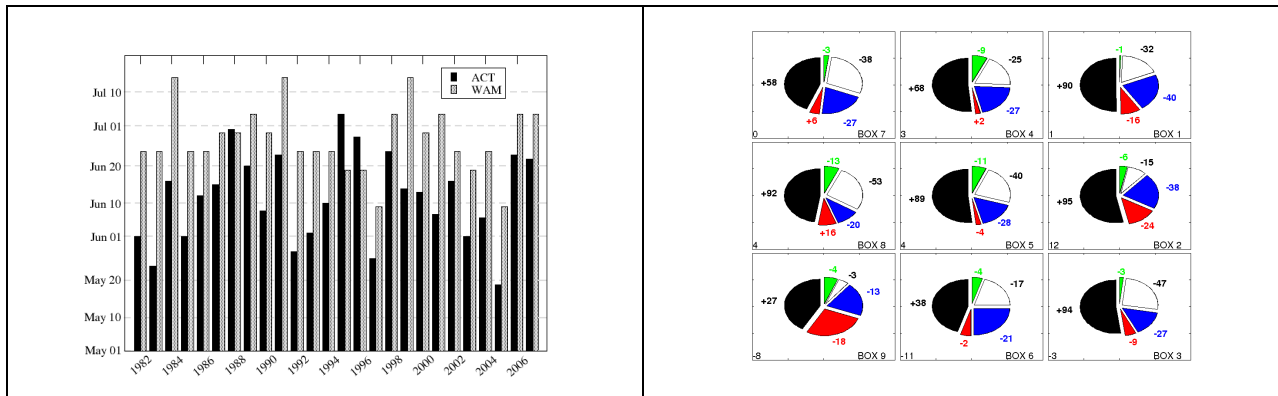
Ribes, A., 2009: Détection statistique des changements climatiques. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, soutenue le 11 septembre 2009 au CNRM-GAME, 142 pp.

Ribes, A., J.-M. Azaïs, and S. Planton, 2009 : Adaptation of the optimal fingerprint method for climate change detection using a well-conditioned covariance matrix estimate. *Climate Dyn.*, 33(5), 707-722, doi:10.1007/s00382-009-0561-4.

Ribes, A., J.-M. Azaïs, and S. Planton, 2010 : A method for regional climate change detection using smooth temporal patterns. *Climate Dyn.*, 35(2-3), 391-406, doi:10.1007/s00382-009-0670-0.

GMGEC-9 : Campagne AMMA-EGEE : Langue d'eau Froide et Mousson Africaine

La langue d'eau froide Atlantique correspond à un refroidissement des températures de surface de l'océan de 6 à 8°C entre avril et juillet. Classiquement, ce phénomène est interprété comme une conséquence de la mousson africaine : le renforcement des vents sur l'Atlantique provoquerait la divergence des courants océaniques de part et d'autre de l'équateur et la remontée d'eaux froides en surface. Les résultats issus des campagnes AMMA/EGEE montrent qu'il existe un couplage fort entre la mise en place de la langue d'eau froide et le déclenchement de la mousson africaine (figure de gauche) et que la langue d'eau froide ne doit pas être vue comme une réponse passive de l'océan à la mise en place du flux de mousson sur l'Atlantique équatorial est (Caniaux *et al.*, 2011). L'origine du refroidissement des températures de surface de la mer pendant la saison froide a fait l'objet d'études par bilans de chaleur dans la couche limite océanique à l'aide de flotteurs PROVOR (Wade *et al.*, 2011) ainsi qu'à l'aide d'une simulation numérique réaliste (Giordani et Caniaux, 2011). On montre que les processus moteurs du refroidissement dans la langue d'eau froide proviennent de la diffusion verticale et de la perte par flux radiatif passant à la base de la couche mélangée (figure de droite), termes qui s'opposent au réchauffement par les flux de surface.



La figure de gauche montre les dates de mises en place de la langue d'eau froide (noir) comparées à celles du saut de la mousson africaine (gris) sur les 27 dernières années ; en moyenne la première (12 juin) est antérieure à la seconde (28 juin). La corrélation atteint 80% (en excluant des années 1998, 1995, 1996 et 1998 où le saut de mousson est peu distinct) et traduit le lien existant entre les deux phénomènes (tiré de Caniaux *et al.*, 2011). Sur la figure de droite, l'Atlantique tropical (15°W-15°E ; 5°N- 10°S) est divisé en 9 boîtes. Dans chacune d'elles, les disques illustrent les processus à l'œuvre dans la couche mélangée, calculés avec des flotteurs PROVOR (période 2005-2007). Noir : flux net de surface ; bleu : flux solaire passant à la base de la couche mélangée ; rouge : advection horizontale ; vert : entraînement ; blanc : résidu (différence entre tendance et somme des autres termes). Les chiffres sont en W.m⁻². Dans la langue d'eau froide (bande horizontale centrale), l'importance du résidu traduit celui du mélange vertical (tiré de Wade *et al.*, 2011).

Références

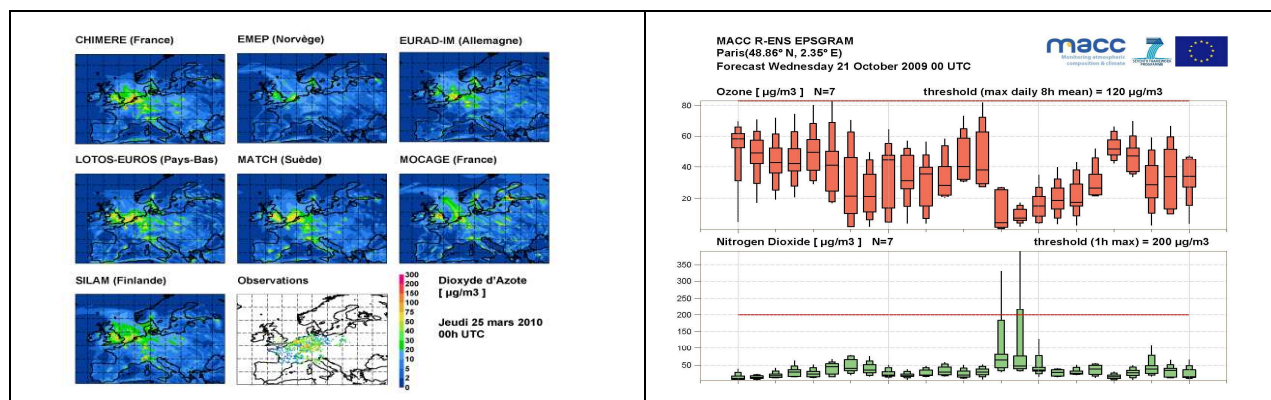
Caniaux, G., H. Giordani, J.-L. Redelsperger, F. Guichard, E. Key, and M. Wade, 2011: Coupling between the Atlantic cold tongue and the West African monsoon in boreal Spring and Summer. *J. Geophys. Res.*, online, doi: 10.1029/2010JC006570.

Giordani, H., and G. Caniaux, 2011: diagnosing vertical motion in the equatorial Atlantic. Submitted to *Ocean Dynamics*.

Wade, M., G. Caniaux, Y. DuPenhoat, M. Dengler, H. Giordani, and R. Hummels, 2011: A one dimensional modelling study of the diurnal cycle in the equatorial Atlantic at the PIRATA buoys during the EGEE-3 campaign. *Ocean Dynamics*, 61 (1), 1-20, doi:10.1007/s10236-010-0337-8.

GMGEC-10 : Le projet GMES-MACC : Monitoring Atmospheric Composition and Climate

Depuis près d'une dizaine d'années, des modèles numériques permettant de prévoir la qualité de l'air et de cartographier les observations se sont développés, et servent aujourd'hui de base à la fourniture de services opérationnels. La France, avec la plate-forme PREV'Air, née au lendemain de la canicule de 2003 et fruit de plusieurs années de recherche académique en amont, joue un rôle précurseur dans la mise en place d'un système européen de surveillance de l'environnement au bénéfice des citoyens, des décideurs et du secteur économique. Le programme GMES est né à la fin des années 1990 du renforcement de la concertation entre la Commission européenne et l'Agence Spatiale Européenne. GMES vise à répondre aux besoins de l'Union en matière de surveillance de l'environnement et à renforcer son rôle sur la scène mondiale. Le projet MACC correspond au volet « atmosphère » de GMES et est coordonné par le CEPMMT. Une part importante du projet se consacre à la qualité de l'air en Europe (résolution horizontale d'environ 20km actuellement sur l'Europe, avec une cible future à 10km) : la cartographie rapide des situations observées, la prévision pour les prochains jours et enfin la cartographie des situations passées. Ces éléments s'intégreront à terme dans le dispositif de gestion de la qualité de l'air aussi bien au niveau de l'Union qu'à celui des pays.



Au sein de MACC, le CNRM-GAME et les partenaires de PREV'Air jouent un rôle central et assurent la coordination sur cette thématique, en animant un groupe d'une douzaine d'équipes européennes. L'expérience de PREV'Air a montré la richesse d'une approche multi-modèles pour la prévision et la cartographie de la qualité de l'air. Dans MACC, l'approche est basée sur 7 modèles (figure de gauche). La dispersion inter-modèles (figure de droite) dépend fortement du polluant : elle est assez faible pour les espèces dont les distributions sont pilotées par la météorologie et les émissions, comme les oxydes d'azote, et est au contraire forte pour l'ozone, dont les concentrations dépendent de nombreux processus. Par des méthodes d'ensemble, il est possible d'utiliser cette information statistique pour construire des estimations plus fiables que celles des différents modèles et d'associer celle-ci d'une évaluation de l'incertitude associée. Pour bien des applications, cette incertitude constitue une information au moins aussi importante que l'estimation des concentrations de polluants elles-mêmes.

Références

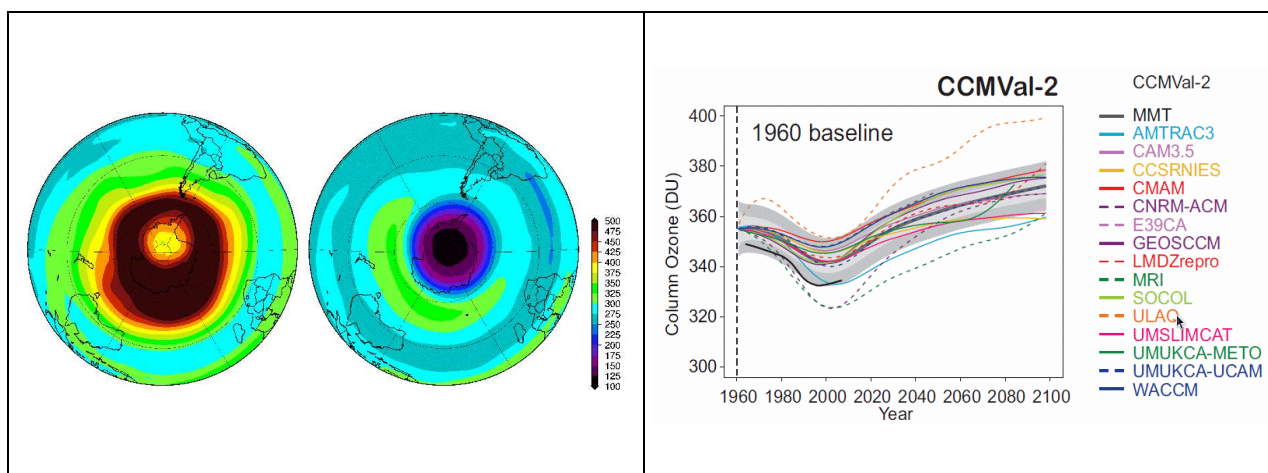
Hollingsworth, A. et al., 2008: The Global Earth-system Monitoring using Satellite and in-situ data (GEMS) Project: Towards a monitoring and forecasting system for atmospheric composition. Bull. Amer. Meteor. Soc., 89 (8), 1147-1164, doi:10.1175/2008BAMS2355.1.

Huijnen, V. et al., 2010: Comparison of OMI NO₂ tropospheric columns with an ensemble of global and European regional air quality models. Atmos. Chem. Phys., 10, 3273-3296, doi:10.5194/acp-10-3273-2010.

Ordonez, C. et al., 2010: Global model simulations of air pollution during the 2003 European heat wave. Atmos. Chem. Phys., 10, 789-815, doi:10.5194/acp-10-789-2010.

GMGEC-11 : Participation aux exercices internationaux de simulation des interactions chimie-climat

Les interactions entre la chimie atmosphérique et le climat se déroulent via l'absorption du rayonnement tellurique ou solaire par un certain nombre de gaz, comme l'ozone ou le méthane, gaz qui sont eux-mêmes dépendant de la chimie atmosphérique. Pour tenir compte de ces interactions, il est alors nécessaire de résoudre l'ensemble des processus atmosphériques allant de la dynamique de l'atmosphère au transfert radiatif, via la chimie atmosphérique, en tenant compte des processus de surface comme les émissions et le dépôt des espèces chimiques afin de modéliser l'ensemble du système. Tous ces processus sont donc pris en compte, à différents degrés de complexité, dans des modèles dits CCMs (pour Chemistry-Climate Models) et pouvant être regroupés au sein de différents exercices d'intercomparaison, tels CCM-Val2 et ACCMIP. Le programme CCM-Val2 (2005-2010) se focalise sur l'interaction de la stratosphère avec le climat par des simulations de 1960 jusqu'à la fin du 21^{ème} siècle, comme illustré par l'évolution du contenu en ozone (figure de droite). Parallèlement, ACCMIP (2009-) s'intéresse plus spécifiquement à l'impact de la chimie troposphérique sur le système climatique. Des simulations représentatives de différentes périodes depuis 1850 jusqu'à 2100 ont été réalisées par différents groupes de recherche (voir figure de droite).



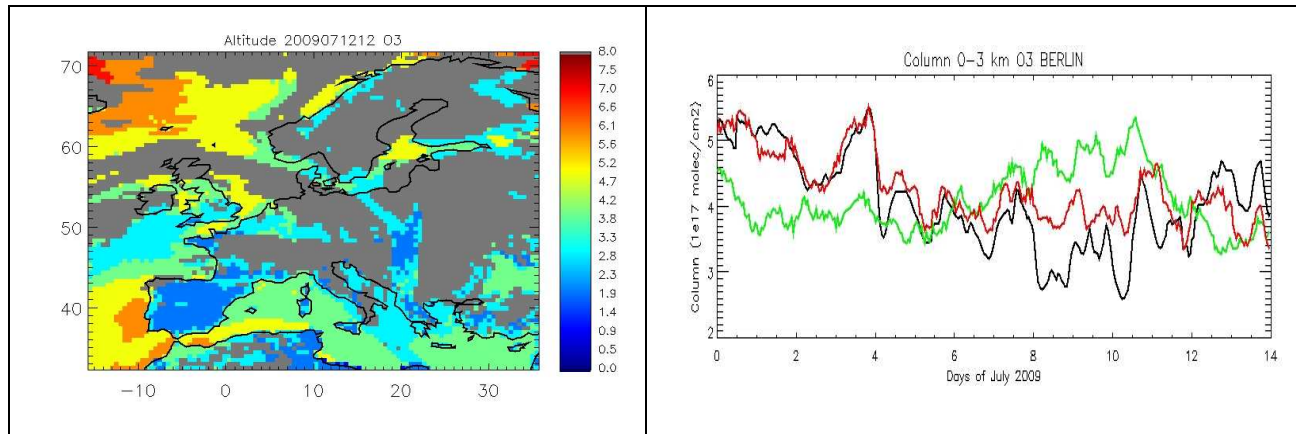
Les deux figures illustrent les contenus intégrés d'ozone, à gauche sur le Pôle sud pour 1850 et 2000, et à droite sur les moyennes latitudes de l'hémisphère Nord, de 1960 à 2100. A gauche, seuls les résultats intermédiaires de MOCAGE sont présentés alors qu'à droite la comparaison finale de l'ensemble des modèles participants est donnée, parmi lesquels celui du CNRM-GAME (CNRM-ACM). Dans les deux cas, l'influence des émissions anthropiques – notamment des CFCs - est mise en évidence par la perturbation de la colonne totale d'ozone. Cette mise en évidence est partagée par l'ensemble des modèles de CCM-Val2. Ces expériences démontrent la possibilité et la pertinence de ce type de simulations, et de la valeur ajoutée qu'elles apportent à la projection de l'évolution du système climatique.

Références

SPARC CCMVal., 2010: SPARC Report on the Evaluation of Chemistry-Climate Models, V. Eyring, T. G. Shepherd, D. W. Waugh (Eds.), SPARC Report No. 5, WCRP-132, WMO/TD-No. 1526, Genève, Switzerland, 434 pp.
Morgenstern, O. et al., 2010: Anthropogenic forcing of the Northern Annular Mode in CCMVal-2 Models. *J. Geophys. Res.*, 115, D00M03, doi:10.1029/2009JD013347.
WMO, World Meteorological Organization, 2011: Scientific assessment of stratospheric ozone: 2010. World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project, Report 52, Geneva, Switzerland, 438 pp.

GMGEC-12 Projet d'un sondeur géostationnaire pour la surveillance de la qualité de l'air en Europe

La variabilité spatio-temporelle des principaux polluants anthropiques est encore mal connue en dehors de la surface. C'est une des limitations qui affectent les prévisions de qualité de l'air, puisque des masses d'air de la troposphère libre peuvent influencer sur les concentrations de surface. Du fait de la rareté des mesures (sondes, aéroportées, sites de haute altitude...), les modèles de qualité de l'air y sont également moins bien validés qu'en surface, ce qui limite aussi la confiance que l'on peut leur accorder pour étudier, par exemple, l'évolution de la qualité de l'air dans un contexte de changement climatique. A la tête d'un vaste consortium international, le CNRM a coordonné la proposition à l'ESA d'un sondeur géostationnaire pour compléter le dispositif opérationnel de mesure de la qualité de l'air en Europe. Cette proposition, appelée MAGEAQ, visait la mesure de l'ozone et du monoxyde de carbone dans les basses couches de l'atmosphère, à l'aide d'un instrument multi-spectral mesurant dans l'infra-rouge et dans le visible. Le consortium, associé à un industriel (EADS-Astrium), a mis au point un instrument capable d'apporter sur chaque profil entre deux et trois informations indépendantes entre la surface et la tropopause. Cette caractéristique, associée à une cadence horaire et une résolution horizontale d'environ 10km, répondrait entièrement au besoin pour la surveillance et la prévision.



La figure de gauche présente l'altitude de sensibilité maximale du canal de mesure de MAGEAQ dans l'infrarouge thermique : de jour et en été, celle-ci se situe entre 2 et 3 kilomètres (les zones grises correspondent aux nuages, qui empêchent la mesure). La figure de droite illustre la capacité théorique de ce canal de MAGEAQ (rouge) à capturer la variabilité de la quantité d'ozone entre 0 et 3km au-dessus de Berlin (référence, noir). Les performances de MAGEAQ sont manifestes par rapport au canal correspondant de l'instrument IRS, qui sera sur Météosat Troisième Génération (vert) et qui est, lui, très peu sensible au contenu en ozone en basses couches. Cette proposition n'a toutefois pas été retenue pour « Earth Explorer 8 » en 2010. Pour autant, l'évaluation très positive reçue nous incite à poursuivre les études en collaboration avec des initiatives similaires aux Etats-Unis et en Asie, en particulier dans le cadre du projet POGQA financé par le RTRA STAE. MAGEAQ est sans doute en effet le complément idéal de la mission GMES Sentinel 4, qui mesurera le dioxyde d'azote dans l'ultraviolet.

Références

- Peuch, V.-H. et al., 2010: MAGEAQ: Monitoring the Atmosphere from Geostationary orbit for European Air Quality. Proposal to ESA for Earth Explorer Opportunity Mission EE-8.
- Claeyman, M. et al., 2011: A geostationary thermal infrared sensor to monitor the lowermost troposphere: O₃ and CO retrieval studies. *Atmos. Mes. Tech.*, 4, 297-317, doi:10.5194/amtd-3-3489-2010.
- Claeyman, M. et al., 2011: A thermal infrared instrument onboard a geostationary platform for CO and O₃ measurements in the lowermost troposphere: observing system simulation experiments. *Atmos. Mes. Tech.*, 4, 815-872, doi: 10.5194/amtd-4-815-2011.

ENCADRÉS SCIENTIFIQUES

de l'unité de recherche

GMME

GMME-1 Variabilité intrasaisonnière de la mousson africaine : Le rôle des moyennes latitudes et de la dépression thermique saharienne

La mousson africaine est ponctuée de périodes sèches et humides, persistant parfois plusieurs jours voire semaines. Leurs impacts sur les sociétés sahéliennes sont souvent dramatiques : une phase sèche peut réduire la sécurité alimentaire de la région, alors que des pluies particulièrement intenses et prolongées peuvent conduire à des inondations importantes. La compréhension et l'amélioration de la prévision de tels événements sont des enjeux majeurs pour prévenir et atténuer leurs impacts.

Dans le cadre du programme AMMA, une attention particulière a été portée sur cette variabilité intrasaisonnière de la mousson (Roehrig, 2010). À l'échelle de 15 jours, plusieurs origines ont été proposées, notamment les ondes équatoriales. L'étude de la variabilité intrasaisonnière de la dépression thermique (HL) saharienne, acteur essentiel de la mousson qui pilote en partie le flux d'humidité sur le continent, a mis en évidence des interactions entre les moyennes latitudes et la convection sur l'Afrique de l'Ouest. Les ondes de Rossby modulent également la structure de la dépression, les flux d'humidité et d'air sec et donc la convection. Cette mise en évidence d'un rôle des moyennes latitudes dans la variabilité intrasaisonnière de la mousson africaine pointe une source de prévisibilité et un espoir d'amélioration des prévisions sur le Sahel.

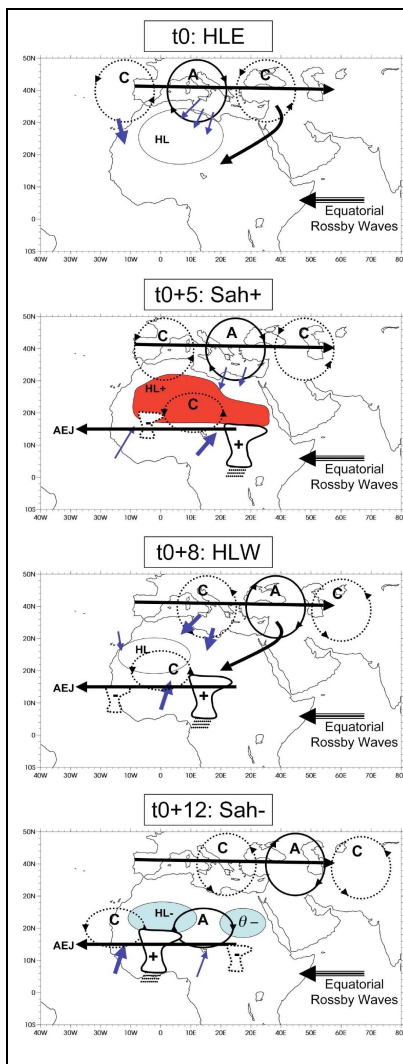


Schéma conceptuel proposé par Roehrig et al. (2011) des interactions entre les latitudes tempérées et la variabilité intrasaisonnière des pluies sur le Sahel.

à t_0 : Lors d'un événement **HLE**, le passage d'une onde de Rossby extratropicale affaiblit la ventilation de la dépression thermique (HL) sur la Lybie, induisant une anomalie chaude sur l'est de la Méditerranée. À l'inverse, la ventilation est renforcée sur le Maroc. En moyenne troposphère, une anomalie cyclonique se détache du train d'onde pour gagner l'Egypte et le Soudan.

à t_0+5 : 5 jours plus tard, la dépression thermique en rouge (HL) atteint son intensité et extension maximale suite à la réduction de la ventilation à l'est. Alors que l'onde de Rossby poursuit sa propagation vers l'est, l'anomalie cyclonique atteint le Tchad. Combinée au renforcement du HL, le flux de mousson et la convection s'intensifient sur l'est du Sahel (symbole Cb+) et s'affaiblissent à l'Ouest (symbole Cb-). On a ainsi une amplification du mode de variabilité Sahélien de Mounier et Janicot (2004) lors de sa phase positive (**Sah+**) caractérisée par un bipôle zonal d'anomalie de pluie.

à t_0+8 : 3 jours plus tard, les anomalies thermiques et de circulation se sont inversées (par rapport à t_0) sur la Méditerranée suite à la propagation de l'onde de Rossby extratropicale. Les ventilations sont alors renforcées sur la Lybie et réduites sur le Maroc. Le HL commence ainsi à se réduire et à se décaler vers l'ouest. Cette évolution contribue à la propagation du bipôle d'anomalie de pluie sur le Sahel vers l'ouest. Notons également à ce moment le détachement d'une anomalie cette fois-ci anticyclonique du train d'onde pour gagner l'Egypte et le Soudan.

à t_0+12 : 4 jours plus tard, l'anomalie froide θ - en bleu (« cold surge ») atteint le Sahel Est où elle conduit à l'affaiblissement de la convection. De même le HL atteint son minimum d'intensité et d'extension (zone bleue HL-). La succession des anomalies cyclonique et anticyclonique au sud du Sahara renforce le flux de mousson sur le Sahel Ouest et l'anomalie positive de pluie se retrouve sur l'Afrique de l'Ouest, schéma correspondant à la phase négative (**Sah-**) du mode de variabilité Sahélien.

Ce scénario d'interaction et amplification avec une onde de Rossby extratropicale intervient pour 1/3 des événements intrasaisonniers du mode Sahélien. Il complète le scénario d'interaction avec une onde de Rossby équatoriale (Janicot et al. 2010).

Références

Roehrig, R., F. Chauvin, and J.-P. Lafore, 2010 : Intraseasonal variability of the West African monsoon : the role of midlatitudes. *J. Climate*. In revision.

Roehrig, R.: Variabilité Intrasaisonnière de la mousson Africaine: Caractérisation et Modélisation. Thèse de l'Université Paris Est. Soutenue le 19 novembre 2010. pp395.

GMME-2 Systèmes nuageux et convection en Afrique (AMMA)

Les données de la campagne AMMA en 2006 fournissent une documentation inégalée de la convection et des systèmes nuageux durant la mousson ouest-africaine, permettant d'étudier les processus et interactions d'échelles en jeu, et d'évaluer/améliorer la capacité des modèles à les représenter à différentes échelles. Différentes études de cas de convection ont été menées concernant le cycle diurne de la convection isolée dans un environnement semi-aride (Lothon et al., 2010), le couplage entre la convection et les poussières désertiques (Kocha, 2011) et la convection organisée (Barthe et al., 2010). Ces études exploitent l'ensemble des observations AMMA (radar, lidar, ARM, surface, satellites,...) et une hiérarchie de modèles (Mésos-NH en mode LES ou CRM, AROME, ARPEGE) La Figure 1 illustre un bel exemple d'interactions entre une onde d'Est, une pulsation de mousson et une série d'événements convectifs observés par le radar du MIT et le profileur de vent de la station ARM lors de leur passage à Niamey localisés autour du Thalweg de l'onde et suivi par une période de faible activité convective. Une rétroaction positive de la convection sur le renforcement du Thalweg due au transport vertical de quantité de mouvement par la convection a été mise en évidence.

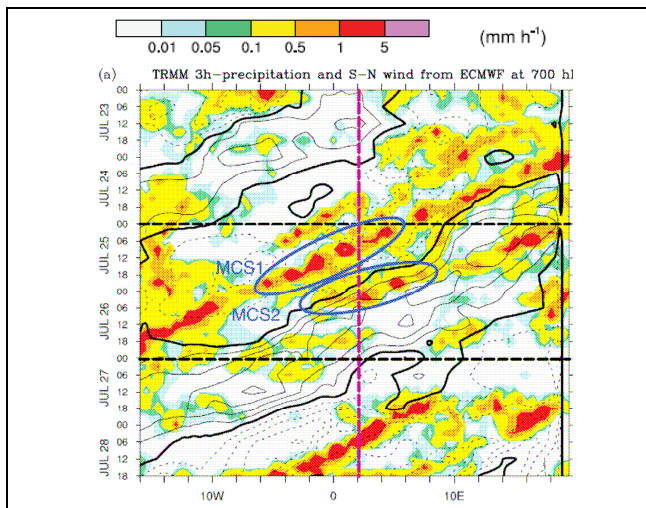


Fig. 1 : Diagramme longitude-temps du 23 au 28 juillet 2006 d'une succession de systèmes convectifs propagatifs (précipitation en couleur) couplés à une onde d'Est (isolignes de vent méridien). La ligne rouge indique la longitude de Niamey. D'après Barthe et al. (2010).

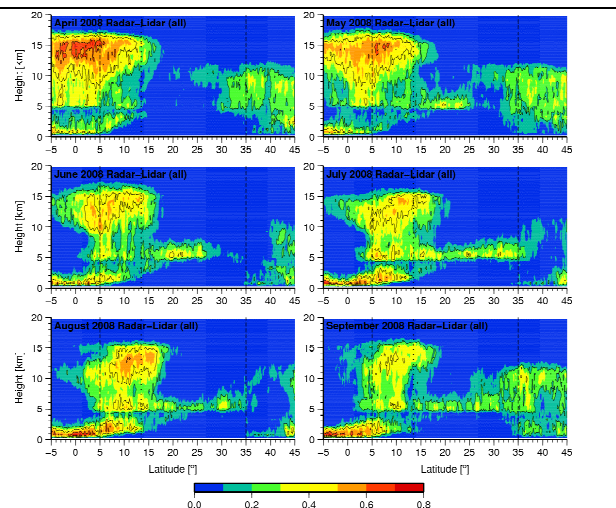


Fig. 2 : Evolution mensuelle (avril à septembre) de l'occurrence nuageuse (coupe latitude/altitude) où les précipitations ont été éliminées) telle qu'observée par les satellites CloudSat et CALIPSO en 2008.

Les données collectées en 2006 ainsi que les données des satellites CloudSat et CALIPSO (Fig. 2) ont aussi permis de documenter les différents types de nuages rencontrés en Afrique de l'Ouest (Bouniol et al., 2011) et les modes de croissance des hydrométéores constituant les systèmes convectifs (Bouniol et al., 2010). L'impact radiatif de chacun de ces types nuageux a été quantifié montrant en particulier un impact important des nuages de moyenne altitude à la fois dans les domaines solaire et infra-rouge.

Références

- Barthe C., N. Asencio, J.-P. Lafore, M. Chong and B. Campistron, 2010: Multi-scale analysis of the 25-27 July 2006 convective period over Niamey : comparison with radar data and other observations. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 190 - 208. DOI: 10.1002/qj.539.
- Bouniol D., J. Delanoë, C. Duroure, A. Protat, V. Giraud and G. Penide, 2010 : Microphysical characterization of West African MCS anvils. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 323-344. DOI: 10.1002/qj.557.
- Bouniol D., F. Couvreux, P-H Kamsu-Tamo, M. Leplay, F. Guichard, F. Favot and E. O'Connor, 2011: Observations of the diurnal and seasonal cycles of cloud occurrence, types and radiative impact over West Africa. A soumettre au *J. Applied Meteor. Climate*, mars 2011.
- Kocha C., 2011 : Interactions entre poussières désertiques et convection profonde en Afrique de l'Ouest : Observation et modélisation à échelle convective. Thèse de l'Université de Toulouse III, soutenance le 20 avril 2011.
- Lothon M., B. Campistron, M. Chong, F. Couvreux, F. Guichard, C. Rio and E. Williams, 2010: Life cycle of a mesoscale circular gust front observed by a C-band Doppler radar in West Africa. *Mon. Wea. Rev.*, doi:10.1175/2010MWR3480.

GMME-3 Systèmes précipitants méditerranéens : préparation de l'expérience HyMeX

Progresser dans la compréhension et la prévision des systèmes précipitants méditerranéens est un objectif majeur du programme HyMeX centré sur le cycle de l'eau en Méditerranée. Au cours de ce quadriennal, plusieurs études ont été conduites afin de mieux caractériser ces événements et définir la stratégie d'observations des campagnes terrain d'HyMeX.

Les schémas synoptiques favorables aux épisodes de pluies intenses (Nuissier et al., 2008,2011) ont ainsi été mis en évidence grâce à l'analyse de nombreux cas d'étude sur le Sud de la France. La figure 1 montre une composite de ces schémas synoptiques favorables aux épisodes de pluies intenses. Les environnements à mésoéchelle ont aussi été caractérisés aux moyens d'études de cas (Ducrocq et al., 2008) ainsi que re-analyses 3D-Var ALADIN et de méthodes de descente en échelle des re-analyses ERA-Interim (Duffourg et Ducrocq, 2011) appliquées à quelques dizaines de cas. Un des ingrédients majeurs identifiés – l'alimentation en humidité – a été analysé plus en détails (Duffourg, 2010). Ceci a permis de dresser le schéma conceptuel présenté figure 2.

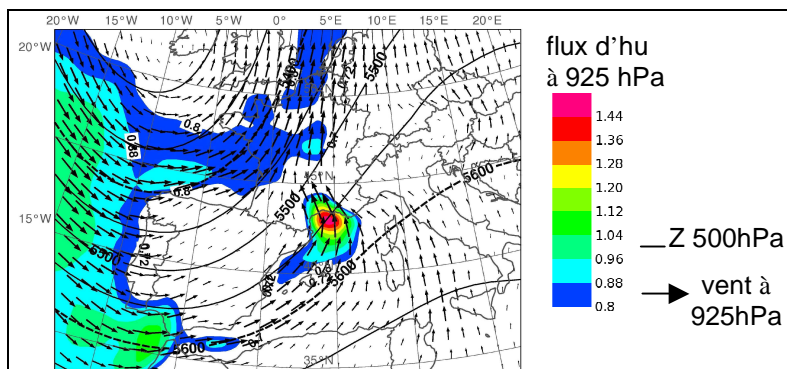


Fig. 1 : composite des analyses ERA40 du géopotentiel à 500hPa, du flux d'humidité et du vent à 925hPa pour les situations fortement précipitantes de 1958 à 2000. On note une circulation cyclonique en altitude associée, en basses couches, à un transport d'humidité vers les côtes françaises.

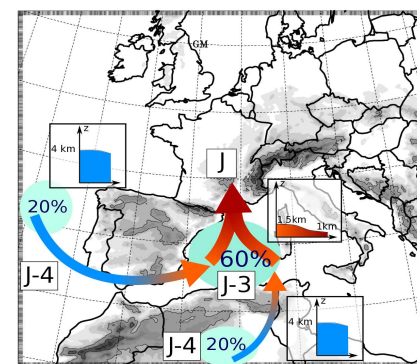


Fig. 2 : Schéma conceptuel de l'origine et du transport de l'humidité alimentant les systèmes précipitants (d'après Duffourg, 2011)

Des études de sensibilité à ces ingrédients à mésoéchelle ont été conduites à l'aide d'expériences de modélisation idéalisée de systèmes convectifs quasi-stationnaires avec le modèle MESO-NH à la résolution kilométrique (Bresson et al., 2009). Un flux de basses couches rapide et/ou humide favorise un ancrage des systèmes sur les contreforts du Massif Central, alors qu'un flux moins rapide et/ou moins humide permet le développement d'un courant de densité sous orage et des systèmes précipitants ancrés plus en amont sur la plaine ou la mer. Il a été aussi montré un impact sur la localisation et l'intensité des systèmes précipitants de la paramétrisation des flux de surface océan-atmosphère ou d'un couplage avec un modèle de couche limite océanique (Lebeaupin-Brossier, 2007).

Références

- Bresson., D. Ricard et V. Ducrocq, 2009 : Idealized mesoscale numerical study of Mediterranean heavy precipitating convective systems. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 103,45-55.
- Ducrocq V., O. Nuissier, D. Ricard, C. Lebeaupin et T. Thouvenin, 2008 : A numerical study of three catastrophic events over Southern France. II: Mesoscale triggering and stationarity factors. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134(630), 131-145, doi: 10.1002/qj.199.
- Duffourg F., 2010 : Sources et transports d'humidité pour les événements de pluies intenses en région méditerranéenne: caractérisation et assimilation à mésoéchelle de radiances satellitaires infrarouge. *Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier – Toulouse III*, 190p.
- Duffourg F. et V. Ducrocq, 2011 : Origin of the moisture feeding the Heavy Precipitating Systems over Southeastern France. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, sous presse, 16p.
- Lebeaupin-Brossier C., 2007 : Etude du couplage océan-atmosphère associé aux épisodes de pluie intense en région méditerranéenne. *Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier – Toulouse III*, soutenue le 19 décembre 2007.
- Nuissier O., V. Ducrocq et D. Ricard, 2008 : A numerical study of three catastrophic events over Southern France. I: Numerical framework and synoptic ingredients. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134(630), 111-130, doi: 10.1002/qj.200.
- Nuissier, O., B. Joly, A. Joly, V. Ducrocq, P. Arbogast, 2011 : A statistical downscaling to identify the Large Scale Circulation patterns associated with Heavy Precipitation Events over southern France, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, in revision.

GMME-4 Couches Limites Atmosphériques

Au cours du quadriennal, les études sur la couche limite atmosphérique se sont focalisées sur deux aspects : un premier volet sur la compréhension des processus et un autre qui vise l'amélioration de leur représentation dans les modèles.

Le premier s'est principalement appuyé sur les données de la campagne AMMA. Il a permis de caractériser la variabilité intra-saisonnière (Couvreur et al., 2010), le cycle saisonnier du bilan énergétique (Guichard et al., 2009), la transition couche limite/convection peu profonde/convection profonde en zone semi-aride (Lothon et al., 2011) et la variété des cycles diurnes de la CLA (Fig. 1). Les données de la campagne AMMA ont permis d'étudier cette variété de cycles diurnes le long d'un transect méridien climatique depuis le Golfe de Guinée jusqu'au désert du Sahara (Gounou, 2011). Ces cycles diurnes continentaux présentent de fortes variations en relation avec des équilibres entre processus et des signatures thermodynamiques distincts ; e.g. on note comment leur amplitude augmente avec la température (Fig 1).

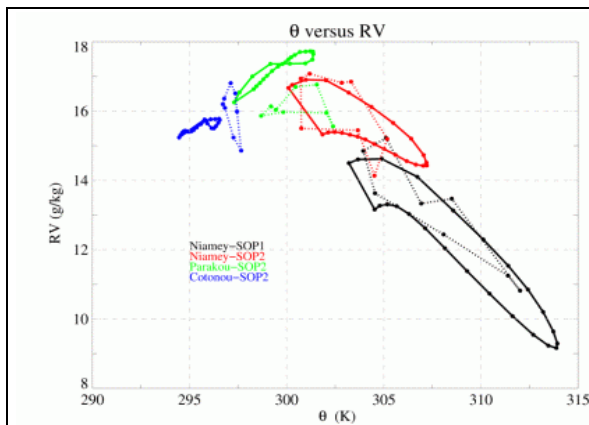


Fig. 1 : Cycle diurne moyen de l'humidité spécifique (rv) en fonction du cycle diurne moyen de la température potentielle (θ) moyennés sur les premiers 500m de la CLA simulés (lignes pleines) et observés (pointillés).

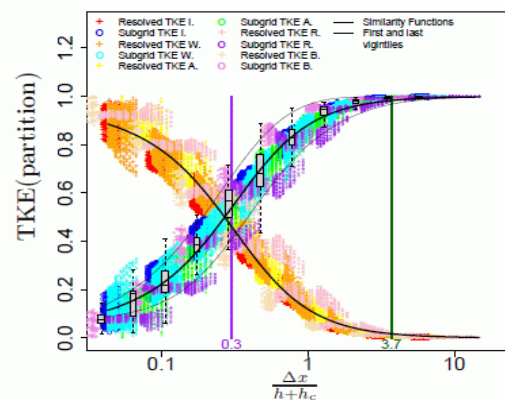


Fig. 2 : Partition de l'énergie cinétique résolue (couleurs chaudes) et sous-maillage (couleurs froides) en fonction de la maille normalisée dans la couche mélangée

Les travaux sur le second volet ont porté d'une part sur l'évaluation des paramétrisations en flux de masse via le développement d'un nouveau diagnostic (Couvreur et al., 2010) et l'amélioration de la formulation de l'entraînement et du déentraînement (Rio et al., 2010). D'autre part, dans le cadre de la thèse de R. Honnert, la caractérisation de la transition de la turbulence des échelles LES vers les échelles kilométriques a débuté (Fig. 2). Des lois de similitudes déterminant la partition résolue/sous-maillage pour différentes variables (énergie cinétique turbulente, flux et variance de température potentielle liquide et d'eau totale) ont été établies à partir de simulations explicites de cas variés de couches limites convectives sèches et nuageuses (Honnert et al., 2011).

Références

- Couvreur, F., F. Hourdin and C. Rio, 2010: Resolved versus parametrized boundary-layer plumes. Part I: a parametrization-oriented. *Boundary Layer Meteorology*. 134, Iss 3, 441-458 DOI 10.1007/s10546-009-9456-5
- Couvreur, F., F. Guichard, O. Bock, J.-P. Lafore, J.-L. Redelsperger, 2010 : Monsoon flux pulsations over West Africa prior to the monsoon onset *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136, Issue S1, 159-173, DOI 10.1002/qj.473.
- Gounou A., 2011 : Etude des processus pilotant les cycles diurnes de la Mousson Ouest Africaine, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, soutenue le 27 janvier 2011
- Guichard, F., L. Kergoat, E. Mougin, F. Timouk, F. Baup, P. Hiernaux and F. Lavenue, 2009 : Surface thermodynamics and radiative budget in the Sahelian Gourma: seasonal and diurnal cycles, *J. Hydrology*, 375, 161-177.
- Honnert R., V. Masson and F. Couvreur, 2011: A Diagnostic for evaluating the Representation of Turbulence in Atmospheric Models at the Kilometric Scale., en revision pour *J. Atmos. Sci.*
- Lothon, M., B. Campistron, M. Chong, F. Couvreur, F. Guichard, C. Rio, E. Williams, 2011: Life cycle of a mesoscale circular gust front observed by a C-band radar in West Africa, In press for *MWR*
- Rio, C., F. Hourdin, F. Couvreur and A. Jam, 2010 : Resolved versus parametrized boundary-layer plumes. Part II: Continuous formulation of mixing rates for mass-flux schemes. *Boundary Layer Meteorology*. 135(3), 469-483

Les estimations du bilan énergétique à la surface fournies par les données du programme AMMA ont montré que le rayonnement net (R^{net}) augmente considérablement dans les régions semi-arides sahéniennes pendant la mousson et que son cycle annuel est radicalement différent de celui du rayonnement solaire incident. Ce fonctionnement s'avère très distinct de celui généralement observé sur les continents, aux latitudes tempérées comme dans les tropiques humides. Ici, la dynamique saisonnière du flux radiatif incident fait effectivement intervenir l'humidité et la nébulosité mais aussi, et de manière remarquable, la température et la charge en aérosols de la colonne atmosphérique. L'augmentation de R^{net} résulte elle principalement d'un refroidissement de la surface et d'une diminution de l'albédo liée à la croissance de la végétation (Guichard et al., 2009, Fig. 1). La simulation de ce bilan énergétique par les modèles couplés surface-atmosphère s'avère au moins aussi problématique que celle des précipitations (Meynadier et al., 2010). Le projet international ALMIP (Boone et al., 2009) coordonné par le GAME a permis d'avancer sur ces questions et fournit des évaluations novatrices des modèles de surface.

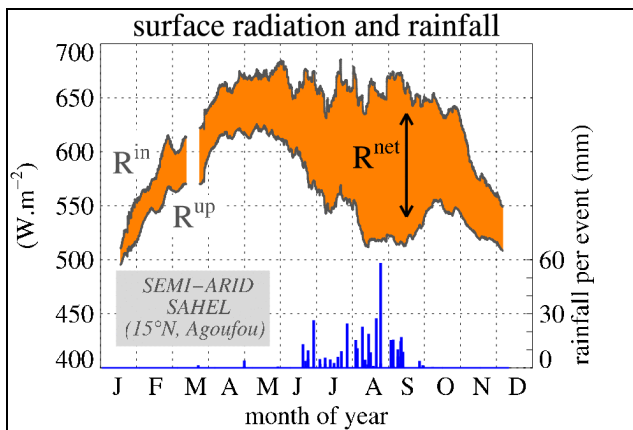


Fig. 1 : Cycle annuel du flux radiatif incident R^{in} et ascendant R^{up} à la surface. L'amplitude de R^{net} ($=R^{in}-R^{up}$) correspond à la plage orange, son épaisseur en été résulte de la diminution de R^{up} tandis que R^{in} varie peu.

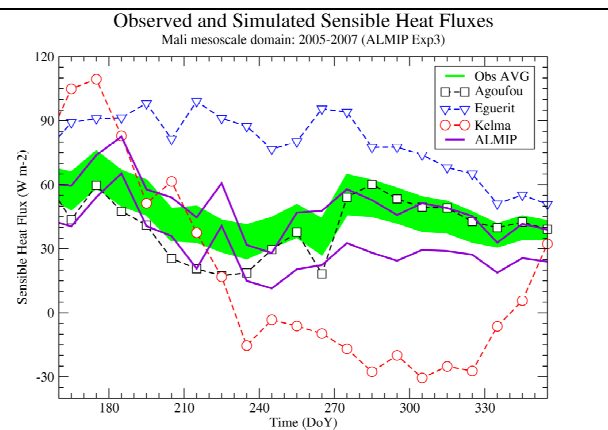


Fig. 2 : Cycle saisonnier du flux sensible: mesures locales en symboles et agrégées à mésoéchelle en plage verte; l'enveloppe des flux simulés par les modèles ALMIP est indiquée par les deux courbes violettes (moyenne $\pm \sigma$).

Il est difficile d'évaluer le réalisme de la simulation des flux turbulents avec uniquement des mesures locales. Des méthodes indirectes, basées sur des observations à l'échelle locale, upscalées avec l'aide de données de télédétection ont été développées. Elles montrent par exemple (Fig. 2) que le flux de chaleur sensible simulé par les modèles d'ALMIP se comparent favorablement aux estimations de flux agrégées au cours de la saison de mousson sur le site sahélien méso-échelle du Mali (60 km^2). Les modèles sont capables de simuler raisonnablement à la fois l'amplitude et la phase du cycle annuel. Les résultats d'ALMIP (flux de surface et humidité du sol) ont ensuite été utilisés pour l'évaluation de la composante de surface des modèles couplés à l'échelle régionale sur l'Afrique de l'ouest (e.g. Hourdin et al., 2009-projet AMMA-MIP; et Boone et al., 2010-projet WAMME).

Références

Boone, A., Y. Xue, I. Pocard-Leclercq, J. Feng, and P. deRosnay, 2010: Evaluation of the WAMME model surface fluxes using results from the AMMA land-surface model intercomparison project. *Clim. Dynamics*, 35(1), 127-142. DOI 10.1007/s00382-009-0653-1

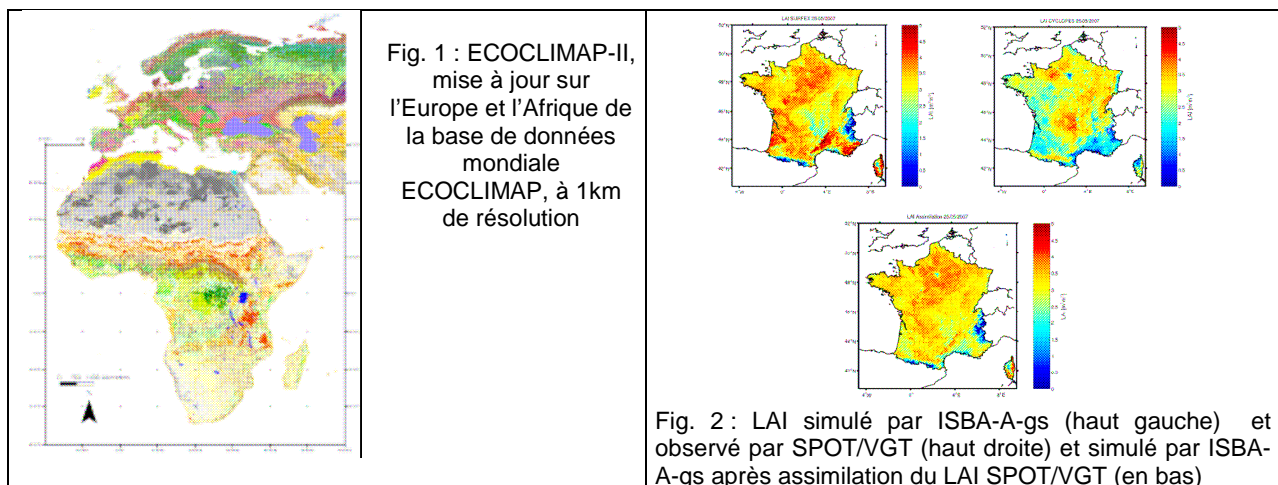
Boone, A., P. de Rosnay, and the ALMIP Working Group, 2009: The AMMA Land Surface Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90(12), 1865-1880, doi:10.1175/2009BAMS2786.1

Guichard, F., L. Kergoat, E. Mougin, F. Timouk, F. Baup, P. Hiernaux and F. Lavenue, 2009 : Surface thermodynamics and radiative budget in the Sahelian Gourma: seasonal and diurnal cycles, *J. Hydrology*, 375, 161-177. doi : 10.1016/j.jhydrol.2008.09.007

Hourdin, F., and coauthors, 2010: AMMA-Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91(1), 95-104.

Meynadier, R., O. Bock, F. Guichard, A. Boone, P. Roucou, J.-L. Redelsperger, 2010: The West African Monsoon water cycle. Part I: a hybrid water budget dataset. *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2010JD013917.

La modélisation des processus de surface en relation avec le cycle du carbone et l'hydrologie superficielle, requiert l'utilisation de la télédétection pour spatialiser et contraindre les modèles, et l'assimilation de données de télédétection dans différents domaines de longueur d'onde. Au cours du quadriennal, les travaux de recherche ont eu pour objectif de valider et d'améliorer la qualité des produits de télédétection (par exemple rayonnement incident et l'albédo du LSA-SAF d'EUMETSAT, l'humidité des sols ASCAT et SMOS), en déployant si nécessaire des réseaux de surface (réseau SMOSMANIA de 21 stations mesurant d'humidité des sols dans le sud de la France qui a permis de valider les produits humidité des sols ASCAT et SMOS) ou en réalisant des campagnes d'observations dédiées (composante in-situ sol de CAROLS, Albergel et al., 2010). La stratification du paysage s'appuie sur la base de données ECOCLIMAP comprenant une carte d'occupation des sols et les paramètres utilisés par le modèle de surface ISBA. ECOCLIMAP a fait l'objet d'une actualisation importante sur l'Europe et l'Afrique (Kaptué Tchuenté et al., 2010). Une analyse pluri-annuelle de données satellitaires a permis d'obtenir des écorégions homogènes (Fig. 1). Pour l'Afrique, cela a permis de mieux définir les zones de transition entre la forêt humide et le Sahel, qui sont particulièrement étudiées dans le cadre d'AMMA.



Ce quadriennal a vu le développement de l'assimilation d'observations de l'humidité superficielle du sol provenant de la télédétection afin d'initialiser l'humidité du sol dans la zone racinaire. Les observations réalisées sur le site de SMOSREX nous ont permis de vérifier l'impact positif d'un système d'assimilation de données d'humidité superficielle et d'indice foliaire de la végétation (au moyen d'un filtre de Kalman étendu simplifié) dans ISBA-A-gs, sur les flux d'eau, d'énergie et de carbone ainsi que sur l'indice foliaire (Albergel, 2010 ; Barbu, 2011). Un démonstrateur pré-opérationnel de ce système d'assimilation de données a été mis en place sur la France. La Figure 2 illustre l'impact de l'assimilation dans ISBA-A-gs d'estimations du LAI à partir de données satellitaires.

Références

- Albergel, C., Calvet, J.-C., Mahfouf, J.-F., Rüdiger, C., Barbu, A.L., Lafont, S., Roujean, J.-L., Walker, J.P., Crapeau, M., Wigneron, J.-P., Monitoring of water and carbon fluxes using a land data assimilation system: a case study for southwestern France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1109–1124, doi:10.5194/hess-14-1109-2010, 2010.
- Albergel, C., Assimilation de données de télédétection dans le modèle ISBA-A-gs pour une analyse conjointe de la biomasse et de l'état hydrique du sol, Thèse de doctorat, Toulouse 3, 2010.
- Barbu, A., Calvet, J.-C., Mahfouf, J.-F., Albergel, C., Lafont, S., Assimilation of Soil Wetness Index and Leaf Area Index into the ISBA-A-gs land surface model: grassland case study, *Biogeosciences*, sous presse, 2011.
- Kaptué Tchuenté, A., Roujean, J.-L., Faroux, S., ECOCLIMAP-II: an ecosystem classification and land surface parameter database of Western Africa at 1 km resolution for the African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) project, *Remote Sensing of Environment*, 114, 961–976, 2010.
- Kaptué Tchuenté, A., Cartographie des écosystèmes et paramètres biophysiques pour l'étude des flux hydriques sur le continent africain, Thèse de doctorat, Toulouse 3, 2010.
- Sabater, J.M., Rüdiger, C., Calvet, J.-C., Fritz, N., Jarlan, L., Kerr, Y., Joint assimilation of surface soil moisture and LAI observations into a land surface model, *Agric. For. Meteorol.*, 148(8-9), 1362-1373, 2008.

Au cours du quadriennal, les recherches effectuées sur le thème de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie régionale ont principalement porté sur la question de l'évolution des événements extrêmes (crues et sécheresses) et de la quantification de l'incertitude associée. Ces questions sont au cœur des travaux de la recherche sur les impacts du changement climatique et contribuent aux travaux du GIEC.

La mise en évidence de l'importance de la prise en compte de l'incertitude liée à la méthode de régionalisation et au modèle d'impact a été démontrée par les projets REXHYSS (GICC) sur la Seine, ainsi que CYPRIM (FNS) et MEDUP (ANR) sur la zone méditerranéenne. En particulier, les incertitudes associées à la représentation de la surface ont été évaluées en prenant en compte des changements d'occupation des sols et l'effet direct du CO₂ sur la végétation. Cet aspect est en cours d'étude grâce à ISBA-A-gs et de cartes de scénarios d'occupations du sol. L'effet direct du CO₂ modifie sensiblement le cycle hydrologique annuel.

Les travaux sur les pluies extrêmes ont montré que sur la période automnale, il fallait s'attendre à des débits extrêmes du même ordre de grandeur (voire plus fort) qu'actuellement, malgré des sols globalement plus secs (Quintana Segui, 2008 ; Fig.1). Concernant les sécheresses, une typologie sur les cinquante dernières années et à la fin du XXI^{ème} siècle a été effectuée dans le cadre du projet CLIMSEC (Fondation MAIF, Vidal et al., 2010, article récompensé par le prix Norbert Gerbier-Mumm 2010 de l'OMM).

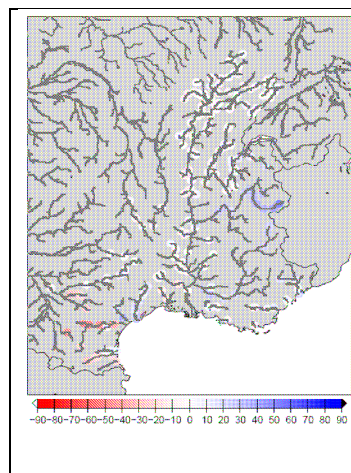


Fig. 1 : Evolution du quantile 99 (%) du débit dans le cadre du scénario CYPRIM (A2, méthode de régionalisation « quantile-quantile »). On note l'augmentation du quantile 99 sur l'Hérault entre les périodes 2071-2100 et 1960 -1990

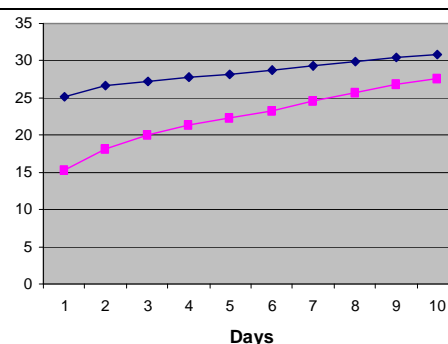


Fig. 2 : Erreur quadratique moyenne (m^3/s) de la prévision de débits sur 180 stations hydrologiques pour la version opérationnelle (bleu) et le modèle amélioré (rose).

Parallèlement aux études d'impact climatique, des travaux ont été menés en vue d'améliorer la représentation des processus hydrologiques dans la chaîne Safran-Isba-Modcou. La réponse hydrologique d'ISBA a été améliorée par l'introduction d'un profil exponentiel de conductivité hydrologique.

Concernant la prévision des débits à 10 jours d'échéance, un système d'assimilation de débits passés sur 150 stations sur la France a été développée (Thirel, 2009). Ce système, basé sur la méthode BLUE, assimile les débits observés afin de corriger les contenus initiaux en eau du sol d'ISBA. L'impact sur les scores de prévision de débit est net (Fig. 2). L'amélioration en début d'échéance est due à l'assimilation (Thirel et al., 2010), celle à partir de quelques jours est liée à l'amélioration de la physique du modèle (profil exponentiel de conductivité hydraulique).

Références

Quintana Segui, P., 2008 : Simulation hydrologique en région méditerranéenne avec SAFRAN-ISBA-MODCOU. Amélioration de la physique et évaluation des risques dans le cadre du changement climatique. Thèse de l'université de Toulouse III, soutenue le 10 décembre 2008

Thirel, G., 2009 : Amélioration des prévisions d'ensemble des débits sur la France de SAFRAN-ISBA-MODCOU. Thèse de l'Université de Toulouse III, soutenue le 23 novembre 2009

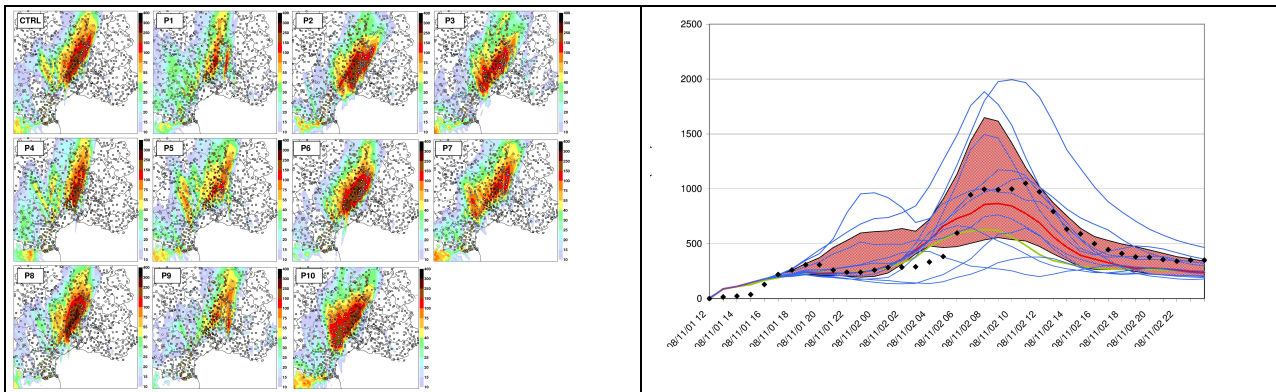
Quintana Seguí, P.; Ribes, A.; Martin, E.; Habets, F. & Boé, J. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins *Journal of Hydrology*, **2010**, 383, 111-124

Vidal, J.-P.; Martin, E.; Franchistéguy, L.; Habets, F.; Soubeyroux, J.-M.; Blanchard, M. & Baillon, M. Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite *Hydrology and Earth System Sciences*, **2010**, 14, 459-478

GMME-8 Prévisibilité à l'échelle convective des systèmes précipitants et crues rapides en région Méditerranéenne

En automne, les régions Méditerranéennes sont régulièrement exposées à des crues-éclair générées par des épisodes de fortes pluies. Dans le cadre du projet de recherche MEDUP (ANR VMC) coordonné par le GMME, un des objectifs principaux était de caractériser et quantifier les incertitudes associées à la prévision de ces événements ainsi que leur propagation dans la simulation hydrologique pour la prévision des débits. De nouvelles approches de prévision d'ensemble météorologique et hydrologique ont ainsi été développées et évaluées.

La conception de méthodes de prévision d'ensemble qui échantillonnent au mieux la distribution des erreurs de prévision des modèles d'échelle kilométrique résolvant la convection est encore une question ouverte. Différentes méthodes de perturbations des conditions initiales et aux limites ont ainsi été évaluées avec le modèle AROME pour plusieurs cas de précipitations intenses sur la base d'expérience de prévision d'ensemble d'une dizaine de membres (Vié et al., 2010). Combiner une descente en échelle des membres de la prévision d'ensemble à grande échelle PEARP de Météo-France à de l'assimilation d'ensemble à l'échelle convective donne de meilleurs scores probabilistes dans les premières 24 heures d'échéance que les deux méthodes prises indépendamment.



A droite : Cumuls de précipitations du 1 nov. 2008 à 12 UTC au 2 nov. 2008 à 12 UTC prévus par les 11 membres d'une expérience de prévision d'ensemble du modèle AROME, auxquels sont superposés les observations des pluviomètres. A gauche : Chroniques de débits sur 36h simulés par le modèle ISBA-TOPMODEL forcés par les 11 membres de l'ensemble AROME (bleu) à partir du 1 nov. 2008 à 12 UTC. La médiane de l'ensemble (rouge) et l'écart interquartile 25%-75% (plage rose) sont tracés, ainsi que les observations de débits et la simulation forcée par le modèle AROME opérationnel déterministe (vert).

Associés aux travaux sur la prévision d'ensemble à l'échelle convective, une prévision d'ensemble hydrologique pour les crues rapides est développée (Vincendon, 2010). Une méthode originale de perturbations des champs de pluies, basée sur une évaluation orientée objet des statistiques d'erreurs des prévisions déterministes du modèle opérationnel AROME a été conçue et évaluée sur quelques cas d'étude. Cette méthode a une performance équivalente au couplage direct d'ISBA-TOPMODEL avec les ensembles de prévisions AROME et représente une voie d'augmentation de la taille de l'ensemble de prévisions hydrologiques. Ces différentes méthodes de prévision d'ensemble seront plus amplement évaluées et améliorées dans le cadre du programme HyMeX (<http://www.hymex.org>) qui vise à améliorer la prévision des précipitations et crues rapides en Méditerranée.

Références

Vié B., Nuissier O. and Ducrocq V., 2010: Cloud-resolving ensemble simulations of mediterranean heavy precipitating events: uncertainty on initial conditions and lateral boundary conditions, *Mon. Wea. Rev.*, DOI:10.1175/2010MWR3487.1

Vincendon B., 2010: Apport des modèles météorologiques de résolution kilométrique pour la prévision des crues rapides Méditerranéennes : vers une prévision d'ensemble des débits en région Cévennes-Vivarais. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III soutenue le 16 décembre 2010.

Vincendon B., Ducrocq V., Nuissier O. and Vié B., 2011: Flash-flood ensemble forecasts based on convective-scale NWP. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, en révision

Le développement du modèle AROME et sa mise en place dans un cadre opérationnel se sont accompagnés d'actions de recherche sur l'assimilation de nouveaux types d'observations météorologiques pertinents à mésoéchelle. Ainsi les développements engagés au précédent quadriennal concernant les données de réflectivités radar (Caumont, 2007 ; Caumont et al., 2009) et les vitesses radar Doppler ont abouti depuis à une implémentation opérationnelle (voir encadré GMAP-10).

Un autre travail, sur les délais zénithaux GPS (ZTD), également commencé au cours du précédent quadriennal, a lui aussi donné lieu à une implémentation opérationnelle. Les travaux préliminaires à cette utilisation opérationnelle ont consisté à développer de nouveaux opérateurs d'observation pour ZTD dans le système d'assimilation 3DVar ALADIN/AROME ainsi qu'à évaluer l'apport de l'assimilation de ce type d'observation sur la prévision à haute résolution des systèmes convectifs précipitants (Yan, 2009). Par exemple, la figure 1 montre l'amélioration sur les prévisions de précipitations d'AROME à courte échéance obtenue en assimilant les observations de ZTD pour une situation de la campagne d'observations COPS. Un assèchement conforme aux observations sur une bande s'étendant de La Rochelle à Lille est visible. Des comparaisons aux données du lidar vapeur d'eau LEANDRE embarqué sur le SAFIRE/F20 confirment ces améliorations (Yan et al, 2009).

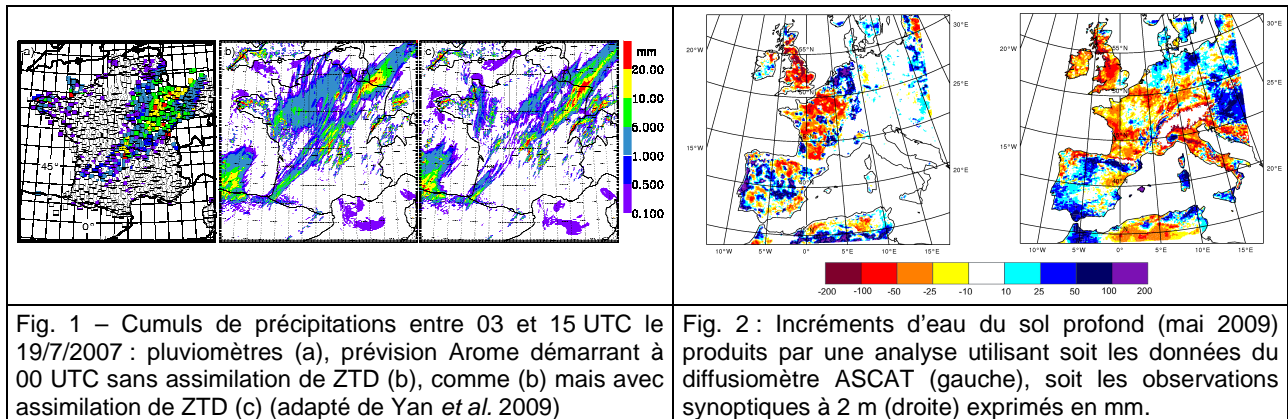


Fig. 1 – Cumuls de précipitations entre 03 et 15 UTC le 19/7/2007 : pluviomètres (a), prévision Arome démarrant à 00 UTC sans assimilation de ZTD (b), comme (b) mais avec assimilation de ZTD (c) (adapté de Yan *et al.* 2009)

Fig. 2 : Incréments d'eau du sol profond (mai 2009) produits par une analyse utilisant soit les données du diffusiomètre ASCAT (gauche), soit les observations synoptiques à 2 m (droite) exprimés en mm.

D'importants travaux ont été menés sur l'assimilation d'observations satellitaires pour améliorer l'état initial des surfaces continentales dans les modèles ALADIN et AROME. Un système d'assimilation basé sur un Filtre de Kalman Etendu (FKE) a été développé (Mahfouf et al., 2009). Sa capacité à assimiler des contenus en eau du sol superficiel provenant du radiomètre AMSR-E pour corriger l'eau du sol dans la zone racinaire a été démontrée (Draper et al., 2009, 2010). Le FKE a été couplé au système 3D-Var du modèle Aladin pour assimiler les indices d'humidité du sol superficiel du diffusiomètre ASCAT (disponibles en temps réel). Il apparaît (Mahfouf, 2010) que les corrections apportées à l'eau du sol dans la zone racinaire sont comparables à celles obtenues avec l'analyse dans le sol opérationnelle (basée sur une interpolation optimale utilisant des observations de température et d'humidité relative à 2 mètres) comme le montrent la Figure 2 et les scores de prévisions des variables à 2 mètres (non montré).

Références

Caumont, O., Ducrocq, V., Wattrelot, É., Jaubert, G. and Pradier-Vabre, S., 2010: 1D+3DVar assimilation of radar reflectivity data: A proof of concept, *Tellus Series A-Dynamic Meteorology and Oceanography*, Volume (62A(2)), 173-187, doi : 10.1111/j.1600-0870.2009.00430.x

Caumont, O. , 2007: Simulation et assimilation de données radar pour la prévision de la convection profonde à fine échelle. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, soutenue le 4 décembre 2007.

Mahfouf, J.-F., K. Bergaoui, C. Draper, F. Bouyssel, F. Taillefer, and L. Taseva, 2009: A comparison of two-offline soil analysis scheme for assimilation of screen level observations. *J. Geophys. Res.*, **114** : D80105. DOI:10.1029/2008JD011077

Mahfouf, J.-F., 2010 : Assimilation of satellite derived soil moisture from ASCAT in a limited area NWP model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **136**, 784-798

Yan, X., 2009 : *Assimilation de données GPS pour la prévision de la convection profonde*. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III soutenue 10 mars 2009.

Yan, X., V. Ducrocq, G. Jaubert, P. Brousseau, P. Poli, C. Champollion, C. Flamant, K. Boniface, 2009 : The benefit of GPS zenith delay assimilation to high-resolution quantitative precipitation forecasts: a case-study from COPS IOP 9. *Q. J. Royal Meteor. Soc.*, **135**(644), 1788-1800, DOI: 10.1002/qj.508.

La modélisation urbaine au GAME s'attache à répondre aux enjeux actuels que sont la simulation environnementale des villes, l'impact du changement climatique en milieu urbain, et les stratégies d'adaptation des villes face à ce changement climatique.

Des simulations avec le modèle SURFEX (incluant le modèle de ville TEB) forcé par des projections climatiques issues de modèles régionaux de climat ont permis d'étudier l'évolution du climat parisien entre 1970-2007 et 2071-2099 selon deux scénarios d'émission A1B et A2. On observe une disparition quasi-totale des journées froides ($T_{MIN} < -5^{\circ}C$) dans le futur. En été, le nombre de journées très chaudes ($T_{MAX} > 30^{\circ}C$) augmente plus dans les zones périurbaines que dans le centre-ville. Le refroidissement habituellement généré par les jardins disparaît en raison d'un fort assèchement des sols. Enfin, les cas d'alerte canicule deviennent beaucoup plus fréquents, en particulier dans les zones les plus urbanisées où l'effet d'îlot de chaleur se superpose au réchauffement global (Fig. 1).

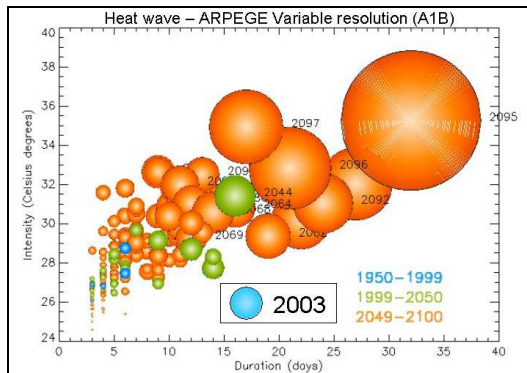


Fig. 1 : Canicules futures d'après ARPEGE-VR selon le scénario d'émission A1B

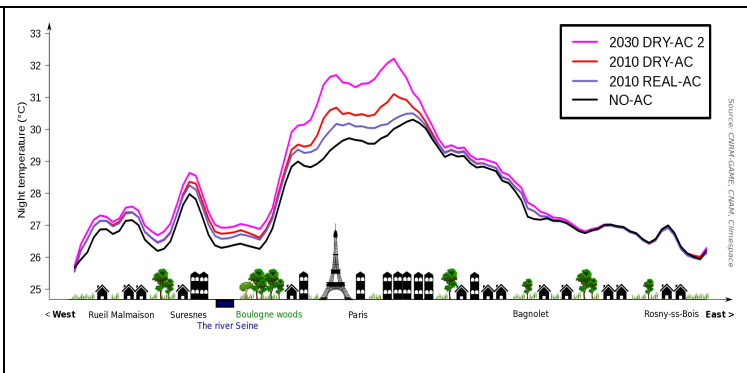


Fig. 2 : Coupe est-ouest de la température à 2 m selon les scénarios de climatisation : sans climatisation, rejets secs et humides, rejets secs uniquement, doublement des rejets secs.

En réponse à ces situations de stress thermique, on peut s'attendre à une multiplication des équipements en climatisation. Différents scénarios de climatisation actuels et futurs ont été simulés pour Paris pour l'épisode de la canicule de 2003. Ils montrent que les rejets d'air chaud dans l'atmosphère produits par les climatiseurs accentuent l'îlot de chaleur urbain - jusqu'à plus de $2^{\circ}C$ pour le scénario futur (Fig. 2) - en particulier pendant la nuit. En réponse à ce réchauffement, les besoins en climatisation sont renforcés. On assiste ainsi à une rétroaction positive.

L'évaluation de stratégies de mitigation et d'adaptation nécessite le raffinement des représentations des processus physiques et du micro-climat des rues par le modèle TEB Lemonsu et al., 2007 ; Hamdi et Masson, 2008). Les aspects liés à la consommation d'énergie par le chauffage ont été améliorés suite à la campagne de mesures CAPITOU (Masson et al., 2008 ; Pigeon et al., 2007). Une nouvelle version représentant de façon explicite la végétation dans la rue a aussi été développée. Elle permettra de tester des scénarios de verdissement des villes.

Ces recherches sont conduites au sein d'un cluster de projets de recherche pluridisciplinaires, associant des laboratoires de recherche en sciences de l'atmosphère, en socio-économie et en géographie et des agences d'urbanisme pour articuler de façon cohérente les scénarios macro-économiques, climatiques, technologiques et d'aménagement du territoire et proposer une évaluation des diverses stratégies d'adaptation de la ville au changement climatique.

Références

Hidalgo, J., V. Masson, and L. Gimeno-Presa, 2010 : Scaling the daytime urban breeze circulation. *JAMC*, 49(5), 889-901.
 Lemonsu, A., V. Masson, and E. Berthier, 2007 : Improvement of the hydrological component of an urban SVAT model. *Hydrological Processes*, 21, 2100-2111.
 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.
 Masson V., L. Gomes, G. Pigeon, C. Lioussé, V. Pont, J.-P. Lagouarde, J. Voogt, J. Salmond, T. R. Oke, J. Hidalgo, D. Legain, O. Garrouste, C. Lac, O. Connan, X. Briottet, S. Lachérade, P. Tulet, 2008 : The canopy and aerosol particles interactions in Toulouse urban layer (CAPITOU) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4), 135-157.
 Pigeon, G., D. Legain, P. Durand, and V. Masson, 2007 : Anthropogenic heat release in an old european city (Toulouse, France). *International Journal of Climatology*, 27, 1969-1981, doi :10.1002/joc.1530.

Les applications en météorologie, climat et suivi des surfaces continentales nécessitent une représentation précise des flux de surface et des variables du sol superficiel. Au cours de ce quadriennal, les travaux de recherche dans ce domaine ont visé à compléter la représentation du cycle du carbone dans le modèle ISBA. La version ISBA-CC simule les flux et réservoirs associés au cycle du carbone du sol (Gibelin et al., 2008). ISBA-CC utilise la paramétrisation de la photosynthèse d'ISBA-A-gs et calcule l'évolution de réservoirs de carbone correspondant à la biomasse aérienne et souterraine. Les validations sur les sites FLUXNET ont montré les bonnes performances de cette version d'ISBA pour la simulation des flux de chaleur sensible et latente ainsi que des flux nets de carbone (NEE). Des validations spatialisées sur la France de l'indice foliaire par comparaison avec des données satellitaires ont également été menées. Le code ISBA permet donc d'avoir une simulation cohérente de la végétation et des variables liées au cycle du carbone avec le cycle hydrologique. Les études réalisées avec le forçage SAFRAN sur la France permettent d'évaluer l'impact des conditions exceptionnelles de l'été 2003, de manière cohérente sur l'humidité du sol et l'indice foliaire (Fig. 1).

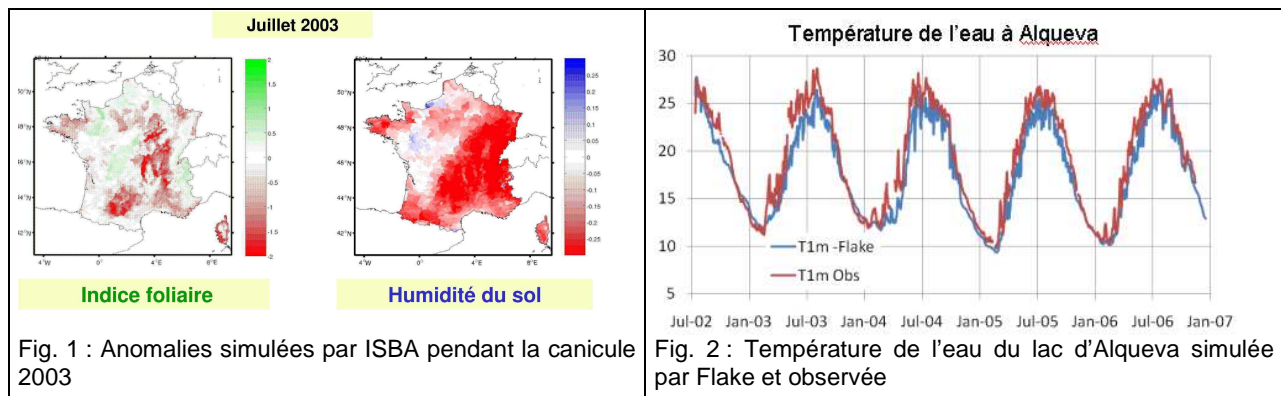


Fig. 1 : Anomalies simulées par ISBA pendant la canicule 2003

Fig. 2 : Température de l'eau du lac d'Alqueva simulée par Flake et observée

Afin d'améliorer la simulation des flux au-dessus des lacs dans les modèles météorologiques, le modèle unidimensionnel de lacs FLake a été testé en collaboration avec l'université d'Evora en mode forcé grâce à des données recueillies sur l'étang de Thau et au Portugal (Alqueva, Fig. 2), ainsi qu'en mode couplé avec l'atmosphère (Salgado et Le Moigne, 2010). La simulation de l'évolution de la température et de l'épaisseur de la couche de mélange permet une bonne estimation des flux de surface, moyennant la connaissance de la profondeur des lacs et du coefficient d'extinction de la lumière. Lors du séjour d'E. Kourzeneva (visiteur scientifique, U. St Petersburg), une base de données mondiale de profondeur de lacs (13000 données) a été créée, permettant à terme une utilisation pour des simulations régionales.

Au cours du quadriennal, le modèle de ville TEB a également été amélioré par la simulation explicite d'un profil atmosphérique dans la rue (Masson et Seity, 2009), ainsi que par l'introduction de la végétation dans les rues. Des travaux en cours portent sur l'introduction d'un bilan d'énergie séparé pour le sol et la végétation (Multi energy balance) dans ISBA. Ces développements, ainsi que l'ensemble des développements menés sur la surface par les différentes équipes du GAME travaillant sur la surface, sont intégrés dans le code de surface externalisé SURFEX, dont la gestion relève des activités de GMME. Ce code est maintenant très utilisé au sein du GAME et de Météo-France (modèles de prévision numérique AROME/ARPEGE, modèles de climat ARPEGE/ALADIN, modèle de recherche MESO-NH, modèles hydrologiques SIM et ISBA-TOPMODEL) et son utilisation se développe à l'extérieur du laboratoire. Un comité scientifique est en cours de constitution afin d'en assurer la gouvernance.

Références

- Gibelin, A.-L., J.-C. Calvet, and N. Viovy, 2008 : Modelling energy and CO₂ fluxes with an interactive vegetation land surface model – Evaluation at high and middle latitudes, *Agric. For. Meteorol.*, 148, 1611-1628.
- Salgado, R. and Le Moigne, 2010: Coupling the Flake model to the SURFEX externalized surface model, *Boreal environment research*, 15, 231-244.
- Masson, V. and Y., Seity. Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48, 1377–1397.

Les études sur les processus et la modélisation des phénomènes atmosphériques à méso-échelle sont conduites au sein de GMME à l'aide des modèles Méso-NH et AROME. Le modèle de recherche communautaire Méso-NH est privilégié pour des applications de recherche à haute résolution (kilométrique, LES) ou pour les études de processus exploitant la richesse des diagnostics associés au modèle. AROME, grâce à son coût numérique plus faible et à son système d'assimilation 3D-VAR, est désormais utilisé pour les études sur la prévisibilité ou l'assimilation de données.

L'utilisation d'AROME dans un cadre opérationnel apporte une évaluation dans de nombreux types de situations météorologiques des paramétrisations physiques partagées avec Méso-NH, et motive en retour des améliorations de la représentation des processus physiques. L'amélioration de la représentation des nuages de couche limites et des thermiques secs à méso-échelle a ainsi constitué une priorité au cours du quadriennal pour ces modèles. Une avancée importante a été réalisée avec le développement d'un nouveau schéma de convection peu profonde dans Méso-NH et AROME (Pergaud, 2008 ; Pergaud et al., 2009). Une analyse statistique de simulations LES dans Méso-NH a également permis de caractériser les distributions de la variabilité nuageuse sous-maille, et a privilégié une distribution bi-modale plutôt que les distributions théoriques unimodales classiquement utilisées dans les modèles (Fig.1, Perraud, 2010 ; Perraud et al., 2011).

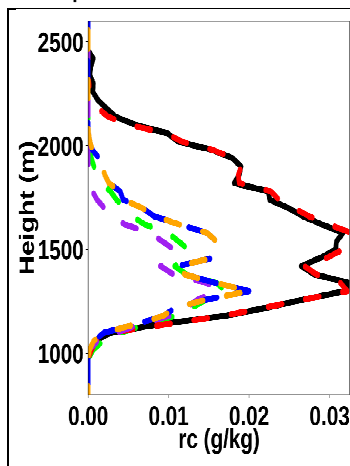


Fig. 1 : Profil vertical de contenu en eau nuageuse moyen pour le cas de cumulus ARM simulé par la LES (noir) et estimé par une distribution gaussienne (vert), une distribution triangulaire (violet), des distributions beta (bleu, orange) et une double distribution gaussienne (rouge).

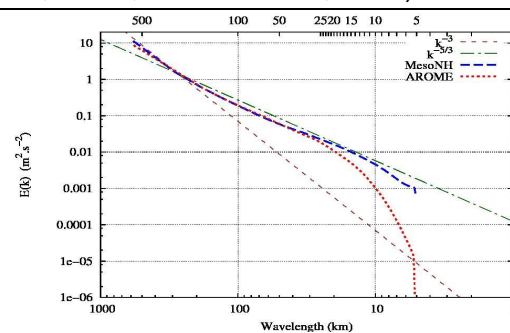


Fig. 2 : Spectres d'énergie cinétique dans l'atmosphère libre (entre 3 et 9 km) pour AROME (en rouge) et Méso-NH (en bleu) sur un cas de convection sur le Sud-ouest de la France. Les spectres théoriques en k^{-3} et $k^{-5/3}$ sont aussi indiqués.

Plusieurs travaux ont démarré afin de préparer l'avenir de la prévision numérique du temps à haute résolution et les modèles à la nouvelle architecture des calculateurs massivement parallèles. Un enjeu prochain pour AROME porte sur son adaptation aux échelles sub-kilométriques, tandis que celui de Méso-NH est d'améliorer ses schémas numériques en termes de précision et d'efficacité, et de s'adapter aux grandes grilles pour les études d'interaction d'échelles afin de tirer parti au mieux des capacités des futures machines scalaires (Pantillon et al., 2011). Afin d'appréhender les échelles sub-kilométriques, une analyse des forces et faiblesses du modèle AROME est menée aux résolutions kilométriques et sub-kilométriques, en s'appuyant sur le modèle Méso-NH, pour des études de cas comparatives sur des situations convectives. La Figure 2 illustre sur un cas de cellules convectives une comparaison des spectres d'énergie cinétique pour les deux modèles par rapport aux pentes en -3 et en $-5/3$ caractéristiques de la gamme d'échelles simulées. Elle indique également une résolution effective un peu plus fine pour Méso-NH que pour AROME.

Références

- Pantillon, F., P.Mascart, J.-P.Chaboureaux, C.Lac, J.Escobar and J.Duron, 2011 : Seamless Meso-NH modeling over very large grids. *C.R.Mecanique*. 339, 136-140.
- Pergaud, J., 2008: Etude et paramétrisation de la turbulence et des nuages de couche limite. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, soutenue le 04 décembre 2008.
- Pergaud, J., V. Masson, S. Malardel, and F. Couvreux, 2009 : A parameterization of dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction. *Bound.-Layer. Meteor.*, 132, 83-106.
- Perraud, E., Vers une amélioration du schéma statistique de nuages de méso-échelle dans les modèles Arome et Méso-NH, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier (Toulouse III), soutenue le 17 septembre 2010.
- Perraud, E., F.Couvreux, S.Malardel, V.Masson, C.Lac and O.Thouaron, 2011. Evaluation of statistical distributions for the parameterization of subgrid boundary-layer clouds. Accepted to *Boundary Layer Meteorology*.

ENCADRÉS SCIENTIFIQUES

de l'unité de recherche

CEN

CEN-1 Modélisation distribuée de la production en eau du haut bassin versant nivoglacière d'un glacier tropical

Les glaciers andins, situés dans une région clé pour la dynamique du climat mondial, en sont d'excellents indicateurs de variabilité. Leurs apports en eau maintiennent en saison sèche des débits d'étiage minimums, essentiels pour les populations vivant au pied des cordillères (tant pour l'hydroélectricité que l'eau potable).

Pour prévoir le devenir nivoglacière des hauts bassins andins, il importe au préalable de savoir reproduire sous le climat actuel l'évolution de la glace et de la neige et celle du débit des rivières. Faisant suite à des applications des modèles de manteau neigeux détaillés Crocus et ISBA-Crocus sur des sites locaux, une modélisation hydro-nivale distribuée du haut bassin versant du Rio Zongo (3.3 km²) englacé à 63 % a été mise en œuvre pendant une période totale de 19 mois. Issue d'une collaboration entre le CNRM-GAME, l'IRD et le LGGE, elle s'appuie sur les mesures de surface du SOERE GLACIOCLIM (Figure 1).



Figure 1 – Station météorologique sur glacier
(photo P. Wagnon - IRD)

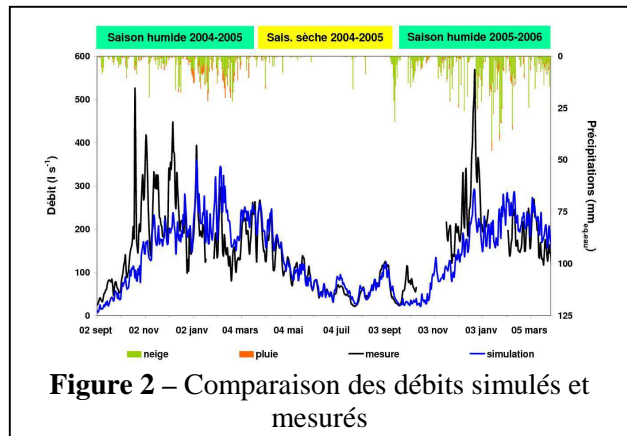


Figure 2 – Comparaison des débits simulés et mesurés

Adaptés au contexte glaciaire, via l'introduction d'une représentation de la fraction d'enneigement, et aux caractéristiques du climat tropical, via un nouveau paramétrage de l'albédo des cristaux de neige fraîche, etc., les modèles se sont révélés performants pour simuler l'enneigement fugace des moraines, les variations de masse du glacier et au final, les débits du torrent émissaire (Figure 2). En complément à la validation de la modélisation, le fonctionnement nivo-hydrologique du haut bassin a été précisé quant à la distribution, en fonction de l'altitude et de la saison, des contributions en eau des surfaces glaciaires et morainiques, et la très forte vulnérabilité du glacier à un accroissement de +1°C de la température de l'air.

Références

Gascoïn, S., A. Ducharne, P. Ribstein, **Y. Lejeune** and P. Wagnon (2009) : Dependence of bare soil albedo on soil moisture on the moraine of the Zongo glacier (Bolivia): Implications for land surface modelling. *Journal of Geophysical Research*, 114, D19102 doi:10.1029/2009JD011709.

Lejeune, Y., P. Wagnon, L. Bouilloud, P. Chevallier, P. Etchevers, E. Martin, E. Sicart and F. Habets (2007) : Melting of snow cover in a tropical mountain environment in Bolivia : Processes and modeling. *Journal of Hydrometeorology*, 8(4), 922-937.

Soruco, A., C. Vincent, B. Francou, P. Ribstein, T. Berger, J.E. Sicart, P. Wagnon, Y. Arnaud, V. Favier and **Y. Lejeune** (2009) : Mass balance of Zongo glacier, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods. *Annals of Glaciology*, 50(50), 1-8, doi:10.3189/172756409787769799.

Lejeune, Y., 2009 : Apports des modèles de neige CROCUS et de sol ISBA à l'étude du bilan glaciologique d'un glacier tropical et du bilan hydrologique de son bassin, thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, 358 pp, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00480008/fr/>.

Le manteau neigeux est généralement perçu comme une enveloppe isolante préservant le sol des variations de température atmosphériques. Néanmoins, les propriétés thermiques de la neige sont très variables et leur prise en compte dans les modèles de manteau neigeux est incomplète pour simuler finement le régime thermique des sols sous des climats différents. En outre, une bonne représentation des propriétés thermiques du manteau neigeux est requise pour simuler de façon réaliste son bilan d'énergie et l'évolution temporelle de ses propriétés thermiques, optiques et mécaniques. L'air et la glace, constituants principaux de la neige, possèdent des conductivités thermiques de l'ordre de 0,02 et 2,3 W/(m.K) respectivement. Les transferts thermiques sont donc environ 100 fois plus faciles dans la glace que dans l'air. Dans la neige, ils s'effectuent surtout dans la glace, à travers les grains et leurs points de contact. La conductivité thermique de la neige est donc intimement liée à l'organisation tridimensionnelle du réseau de cristaux de glace qui la compose. Cette dernière évolue sous l'effet des métamorphoses de la neige, qui dépendent en grande partie du gradient vertical de température.



Figure 1 – Insertion des sondes dans la neige au col de Porte (Chartreuse, 1310m alt.)

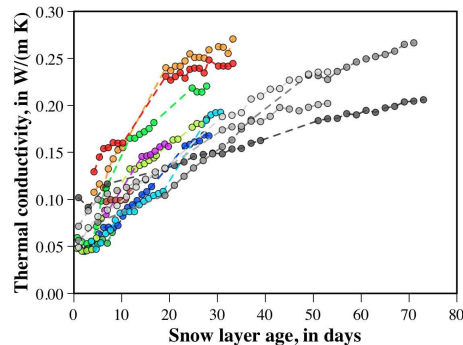


Figure 2 – Evolution temporelle de la conductivité thermique de la neige

Des sondes enfouies dans la neige permettent de mesurer sa conductivité thermique (figure 1). Cette méthode a été mise en œuvre pour la première fois en continu sur le terrain en collaboration avec le LGGE (CNRS/Univ. Joseph Fourier, Grenoble) pour suivre l'évolution de la conductivité thermique du manteau neigeux dans les Alpes. La conductivité thermique des couches de neige fraîche est faible, généralement de l'ordre de 0,05 W/m.K, ce qui confirme le caractère très isolant de ce type de neige. Elle augmente après la chute, traduisant des transformations rapides de ses propriétés physiques. L'augmentation de la conductivité thermique avec le temps (figure 2) s'explique au premier ordre par la densification sous l'effet du tassement, qui contribue à augmenter la densité de points de contact entre les cristaux de glace dans la neige. Néanmoins, la densification seule n'explique pas la variabilité de la conductivité thermique de la neige.

La modélisation à l'échelle microscopique et macroscopique est indispensable pour mieux comprendre et représenter l'évolution des propriétés thermiques de la neige au cours du temps.

Références

Morin., S., F. Domine, L. Arnaud and G. Picard, In-situ monitoring of the effective thermal conductivity of snow, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 64, 73–80, doi : [10.1016/j.coldregions.2010.02.008](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.02.008), 2010. Page 57

La neige est un milieu poreux constitué d'un mélange de grains de glace, d'air et parfois d'eau liquide, qui ne cesse de se transformer au cours du temps. La modification de sa structure interne, appelée « métamorphose », résulte de phénomènes thermodynamiques et mécaniques interagissant au sein du manteau neigeux. En effet, l'évolution thermodynamique d'un ensemble de grains de neige peut mener à un amincissement de certains ponts de glace, et donc à leur déformation, entraînant une réorganisation mécanique des grains entre eux. Inversement, dans le manteau neigeux, le poids des couches supérieures modifie la géométrie et l'agencement des grains de glace, ce qui influe sur la thermodynamique des métamorphoses. Une bonne compréhension du comportement mécanique de la neige à l'échelle des grains est donc indispensable à une meilleure modélisation des métamorphoses de neige. Dans le cadre du projet « Snow-White », financé par l'ANR, coordonné par J. Meyssonier (LGGE) et regroupant plusieurs laboratoires grenoblois, nous nous sommes ainsi intéressés aux mécanismes de déformation lente de la neige en étudiant l'évolution de petits échantillons (environ $8 \times 8 \times 8 \text{ mm}^3$) soumis à des essais de compression uniaxiale. Pour cela, nous avons réalisé plusieurs séries d'images tomographiques d'un même échantillon se déformant au cours du temps.

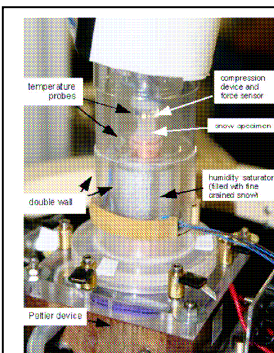


Figure 1 –
Réalisation d'un
essai de
compression
uniaxiale dans notre
cellule cryogénique
($T_{\text{int}} = -15^\circ\text{C}$, $T_{\text{ext}} =$
 $+23^\circ\text{C}$)

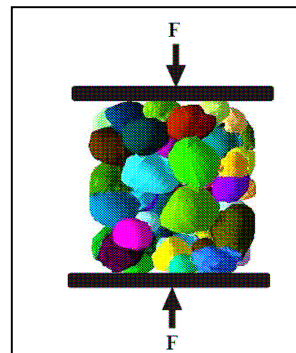


Figure 2 –
Modélisation par
DEM d'un test de
compression à partir
de la géométrie réelle
de l'échantillon
enregistrée par DCT
(Diamètre de
l'échantillon : 8 mm)

Pour mieux appréhender l'importance du caractère anisotrope de la glace sur le comportement mécanique de la neige, nous avons complété nos observations avec des images obtenues par DCT (Diffraction Contrast Tomography), une technique récemment mise au point par W. Ludwig (ESRF et MATEIS) qui permet d'accéder aux orientations cristallines des grains constituant le matériau imagé. Les premiers résultats expérimentaux sont actuellement confrontés à deux modèles mécaniques distincts : un modèle analytique développé par François Nicot (Cemagref) et un Modèle par Éléments Discrets (DEM) mis au point par un groupe de chercheurs du laboratoire 3S-R (coordination Félix Darve). En plus de son impact en terme de modélisation mécanique de la neige à micro-échelle, ce projet a permis de développer ou d'améliorer différents outils indispensables à l'étude de la microstructure de la neige : on notera la mise au point d'un algorithme de segmentation en grains et sa validation par DCT, ou bien la réalisation de séries d'images tomographiques d'un échantillon à température négative sous rayonnement X dans une salle d'acquisition à température ambiante, via l'utilisation d'une cellule cryogénique développée pour l'occasion.

Références

Gillibert, L., Flin, F., Kozicki, J., Rolland du Roscoat, S., Ludwig, W., Coeurjolly, D., Chareyre, B., Philip, A., Lesaffre, B. and Meyssonier, J.: Curvature-driven grain segmentation and its validation using snow images obtained by Diffraction Contrast Tomography, in *Proceedings of W3D*, in press.
Rolland du Roscoat, S., King, A., Philip, A., Reischig, P., Ludwig, W., Flin, F. and Meyssonier, J.: Analysis of snow microstructure by means of X-ray Diffraction Contrast Tomography, *Adv. Eng. Mater.*, doi : 10.1002/adem.201000221, in press.

La surface spécifique (SS) de la neige représente l'ensemble des surfaces développées d'interface air/glace par unité de masse de neige et est généralement exprimée en $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$. Cette définition permet de calculer le rayon d'une assemblée de sphères identiques ayant le même rapport surface/volume que la neige, dénommé rayon optique : $SS = 3 / (r_{\text{opt}} \cdot \rho_{\text{glace}})$. La surface spécifique peut être calculée à l'échelle microscopique, notamment par le biais d'algorithmes appliqués à des images tridimensionnelles (3D) obtenues par tomographie X (figure 1). Cette quantité est importante pour le bilan chimique et énergétique du manteau neigeux car elle contrôle son albédo dans le domaine proche infra-rouge du spectre solaire. En outre, elle gouverne pour une large part la signature du manteau neigeux en télédétection micro-onde active et passive. Le métamorphisme de la neige modifie sa SS, faisant d'elle une variable diagnostique de son évolution micro-structurale. Au cours de la saison 2009-2010, un suivi hebdomadaire systématique de la surface spécifique a été conduit au Col de Porte (Chartreuse, 1310m d'alt.), afin d'en mesurer la variabilité verticale et temporelle avec une finesse alors inégalée (figure 2).

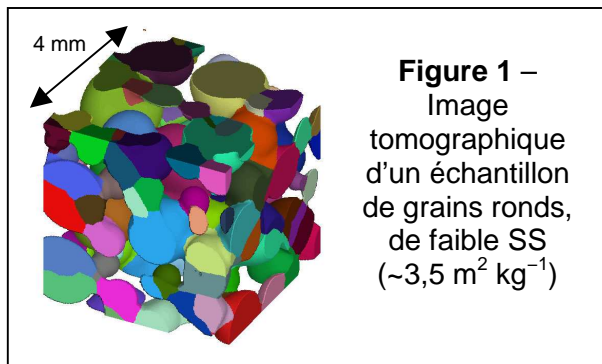


Figure 1 –
Image
tomographique
d'un échantillon
de grains ronds,
de faible SS
($\sim 3,5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$)

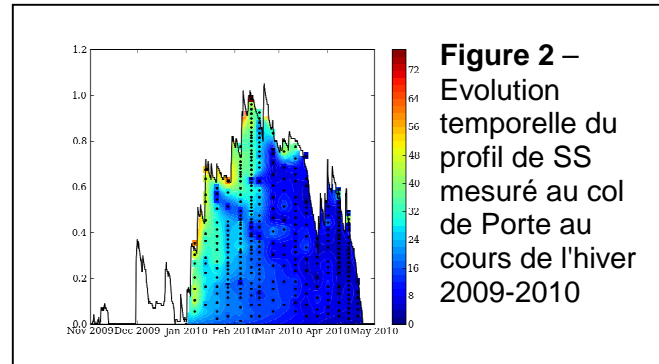


Figure 2 –
Evolution
temporelle du
profil de SS
mesuré au col
de Porte au
cours de l'hiver
2009-2010

Au Col de Porte, les mesures révèlent que la SS évolue au cours du temps, passant de valeurs élevées au moment de la chute à des valeurs plus faibles. Ceci traduit les transformations morphologiques de grains de neige au cours du métamorphisme. Par ailleurs, l'humidification (obtention de grains ronds) conduit à des diminutions spectaculaires de la SS, comme le montrent les profils de SS basse en fin de saison. Ces données sont utiles au développement et à l'évaluation de nouvelles versions du modèle de manteau neigeux Crocus, dans lequel la SS sera une variable pronostique de base, eu égard aux avantages revêtus par cette variable physique. En plus des estimations de SS classiques, l'analyse d'images tomographiques permet d'accéder à des mesures d'aires généralement difficiles à réaliser macroscopiquement, telles la mesure de la *surface spécifique de contact entre les grains*, qui caractérise la taille des liaisons entre les grains de glace constituant la neige et qui joue un rôle clef pour les propriétés mécaniques de ce matériau.

Références

Morin, S., F. Dominé, C. Carmagnola, Y. Lejeune, B. Lesaffre, A. Dufour, J.-M. Willemet, H.-W. Jacobi, A. Hasan, Observation and simulation of the vertical profile of specific surface area throughout the snow season 2009-2010 in a French alpine site, *EOS Trans. AGU, Fall Meet. Suppl.*, Abstract C33D-0563, 2010.

Flin, F., Lesaffre, B., Dufour, A., Gillibert, L., Hasan, A., Rolland du Roscoat, S., Cabanes, S. and Pugliese, P., 2011 : On the Computations of Specific Surface Area and Specific Grain Contact Area from Snow 3D Images, in Furukawa, Y., ed., 'Physics and Chemistry of Ice', Hokkaido University Press, Proceedings of the 12th International Conference on the Physics and Chemistry of Ice held at Sapporo, Japan, 5-10 September 2010, 321-328, in press.

Le Centre d'Etudes de la Neige dispose d'outils d'investigations des propriétés de la neige en laboratoire (chambre froides à St Martin d'Hères et au col de Porte) et en conditions naturelles sur le terrain : sites du col de Porte et du col du lac Blanc. Ce dernier est essentiellement dédié à l'étude du transport de neige par le vent (voir fiche CEN-9).

La chambre froide du site du Laboratoire du Col de Porte, qui a vu son dispositif de production de froid rénové à l'automne 2006, permet d'étudier et de stocker une neige récente prélevée aux abords du Laboratoire qui se situe en Chartreuse à une altitude de 1325 mètres d'altitude (voir Figure 1). En 2007, Météo-France a décidé de lancer la rénovation de la chambre froide de Saint-Martin-d'Hères. La maîtrise d'œuvre a été assurée par le CEN et le cœur du dispositif est un groupe froid standard d'une puissance frigorifique de 19 kW à une température de -45°C . Les premières expérimentations scientifiques ont été réalisées au début de l'année 2011. Les principales caractéristiques de cet équipement sont une température paramétrable entre 0 et -35°C , une régulation très stable et la possibilité unique d'ajuster et de contrôler l'hygrométrie à l'intérieur de la cellule d'expérimentation. Les deux chambres sont équipées de systèmes macrophotographiques pour prise de vue de cristaux de neige (voir Figure 2).



Figure 1 – Vue d'ensemble du site du col de Porte



Figure 2 – équipement macrophotographique dans la chambre froide du col de Porte.

Depuis 1961 le Centre d'Etudes de la Neige collecte au col de Porte des mesures météorologiques et nivologiques. Le site est situé près de Grenoble, dans le massif de la Chartreuse (altitude : 1325m, latitude : $45^{\circ}30'N$, longitude : $5^{\circ}77' E$).

Le site du Col de Porte permet l'acquisition de données nivo-météorologiques de bonne qualité, qui sont indispensables à la construction et l'évaluation de modèles de manteau neigeux quel que soit leur niveau de complexité. Les données horaires sont disponibles depuis 1993. Les données au pas quotidien sont disponibles depuis l'origine : elles constituent une série de référence pour caractériser l'évolution climatique de cette zone.

Le site est également indispensable à d'autres développements en physique de la neige, qu'il s'agisse de capteurs en test ou de réalisation d'expériences sur le terrain ou dans la chambre froide attenante au laboratoire.

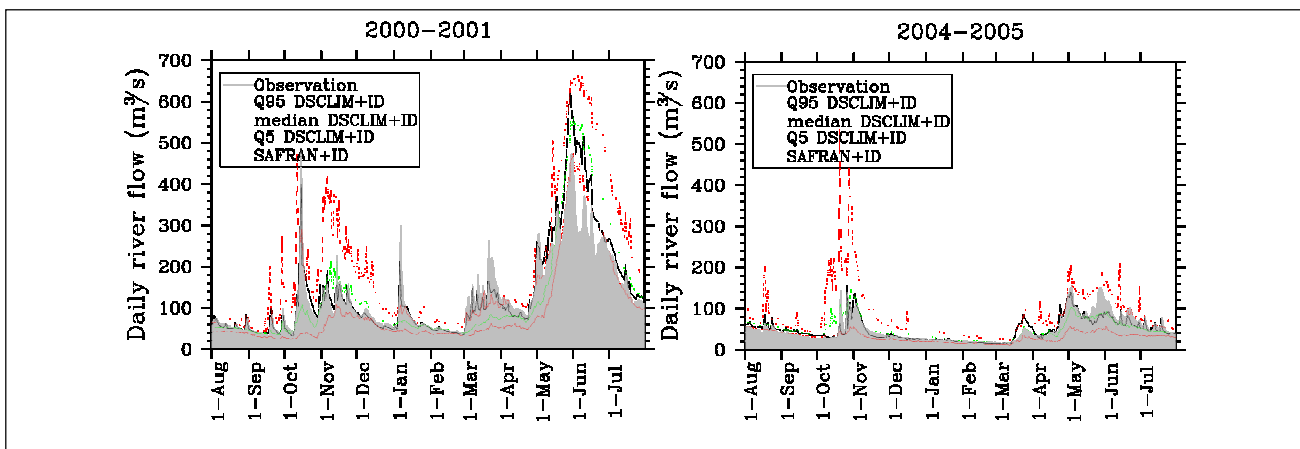
Références

Plus de 30 publications scientifiques ont utilisé les données nivo-météorologiques du col de Porte pour de multiples applications en modélisation de la neige. Une liste non exhaustive est disponible à cette adresse : <http://www.cnrm-game.fr/spip.php?article533>

Les travaux en microstructure de la neige s'appuient fortement sur les installations frigorifiques du CEN.

CEN-6 Incertitudes associées à la modélisation de l'impact du changement climatique sur le régime hydrologique du bassin de la Haute Durance.

Le changement climatique impose de rechercher des stratégies optimales et durables pour gérer au mieux la ressource en eau et les ressources énergétiques associées, en particulier dans le massif alpin. La forte variabilité spatiale des processus hydrologiques en montagne a une influence majeure sur la répartition temporelle des débits en rivière. Pour une étude d'impact du changement climatique, il est donc nécessaire de disposer de scénarios météorologiques futurs adaptés à l'échelle des processus mis en jeu dans le modèle d'impact hydrologique (ISBA-Durance, Lafaysse et al, 2011). Les GCM utilisés pour les projections climatiques n'ayant pas une résolution suffisante face à cette contrainte, il est nécessaire d'utiliser des modèles de descente d'échelle. Trois méthodes statistiques développées au CERFACS (Boé et al, 2006), au LTHE et à EDF/DTG sont utilisées. Pour un jour donné et un scénario de grande échelle donné, ces méthodes proposent une distribution des variables météorologiques à échelle fine. Les scénarios météorologiques générés à partir des circulations de grande échelle réanalysées sur la période 1959-2006 (NCEP) ont été injectés dans le modèle hydrologique. La médiane et les quantiles Q5 et Q95 des débits ainsi obtenus sont représentés ci-dessous, pour deux années distinctes, respectivement en vert et rouge :



Si la dispersion entre les scénarios est relativement importante, le scénario médian est souvent proche des débits simulés en forçant le modèle par les analyses météorologiques locales SAFRAN (noir). La comparaison avec les débits observés (grisé) montre que l'erreur introduite par la descente d'échelle est d'un ordre de grandeur comparable à l'erreur propre du modèle hydrologique. La chaîne de modélisation est capable de représenter la variabilité inter-annuelle des débits, illustrée ci-dessus par deux années respectivement bien et mal enneigées, associées à une onde de fonte plus ou moins importante. Ce résultat est satisfaisant puisque les débits sont simulés uniquement à partir de deux champs de circulation de grande échelle.

L'applicabilité de cette méthode est toutefois soumise à deux hypothèses particulièrement délicates, qu'il nous faut impérativement mettre à l'épreuve avant de générer des scénarios hydrologiques futurs pour ce bassin :

- la stationnarité temporelle du lien d'échelle représenté par les modèles statistiques ;
- la validité des circulations de grande échelle simulés par les modèles climatiques.

Références

Boé et al, 2006 A simple statistical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling, *J. Geophys. Res.* 111

Lafaysse et al, 2011 Influence of spatial discretization, underground water storage, and glacier melt on a physically based hydrological model of the Upper Durance River basin, *J. Hydrol.*

Accepted

CEN-7 Détermination de l'albédo des surfaces enneigées par télédétection et assimilation dans un modèle numérique de neige

Les glaciers tempérés sont extrêmement sensibles aux effets du changement climatique car la modification de leur bilan énergétique affecte en retour leur bilan de masse. Les flux d'énergie sur la surface des glaciers sont régis par de nombreux paramètres tels que l'albédo qui commande le rapport du rayonnement d'onde courte effectivement absorbé par le glacier. Des données télé-détectées, acquises par des capteurs terrestres ou embarqués sur satellite permettent de déterminer l'albédo de surface avec une résolution spatiale et temporelle relativement élevée. Deux méthodes ont été conçues pour mesurer et tracer l'albédo du glacier de Saint Sorlin (Grandes Rousses, France). La première méthode utilise des images numériques de type photographique terrestre prises dans les bandes visibles et proche infra-rouge du spectre électromagnétique solaire. La deuxième méthode emploie des données de réflectivité dans d'autres bandes du spectre acquises par la sonde MODIS à bord du satellite TERRA (fig. 1). Deux algorithmes ont été développés afin de convertir les mesures de réflectivité spectrale en valeur de l'albédo qui est la variable directement utilisable dans le calcul du bilan du glacier. Ceci a exigé de modéliser le comportement bi-directionnel de réflectivité de la glace et de la neige, ainsi que de convertir les données initiales d'albédo spectral à bande étroite en une valeur d'albédo à bande large utilisable pour la modélisation du bilan du glacier (fig. 1).

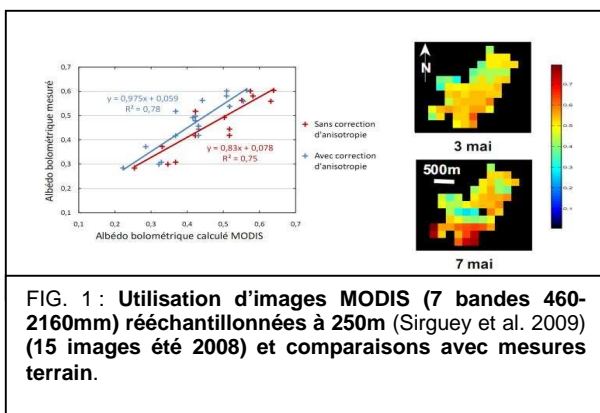


FIG. 1 : Utilisation d'images MODIS (7 bandes 460-2160nm) rééchantillonnées à 250m (Sirguey et al. 2009) (15 images été 2008) et comparaisons avec mesures terrain.

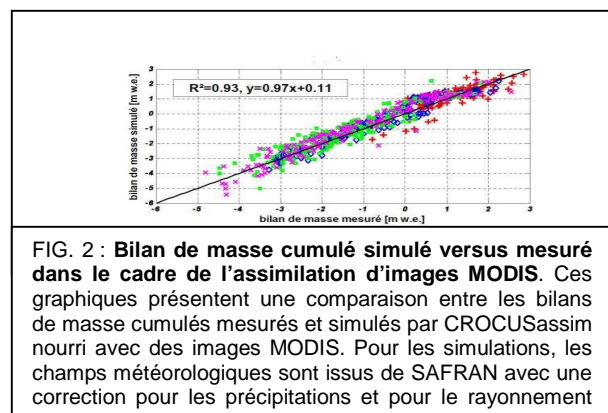


FIG. 2 : Bilan de masse cumulé simulé versus mesuré dans le cadre de l'assimilation d'images MODIS. Ces graphiques présentent une comparaison entre les bilans de masse cumulés mesurés et simulés par CROCUSassim nourri avec des images MODIS. Pour les simulations, les champs météorologiques sont issus de SAFRAN avec une correction pour les précipitations et pour le rayonnement

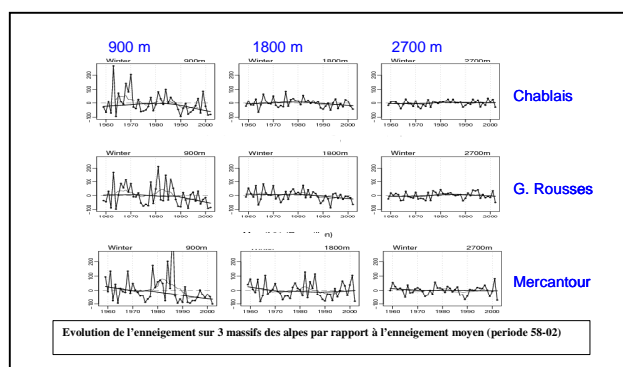
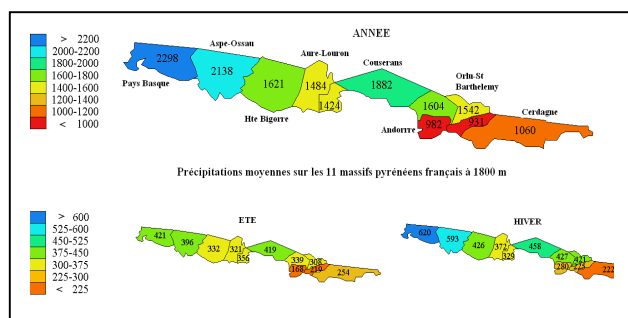
Deux séries chronologiques de mesures d'albédo de surface du glacier de Saint Sorlin ont été calculées couvrant les étés 2008 et 2009. Les cartes de l'albédo ont été validées grâce à des mesures au sol à différents endroits choisis sur le glacier. Ces cartes d'albédo ont été ensuite assimilées dans le modèle CROCUS qui simule le manteau neigeux. On a pu montrer qu'une telle assimilation de valeurs restituées à distance d'albédo permettait d'améliorer significativement la simulation numérique du bilan de masse du glacier. L'évaluation de la méthode et des résultats a été menée grâce à des mesures de type glaciologique du glacier conduit par le SOERE GLACIOCLIM (fig. 2).

Références

Marie DUMONT, 2010. DÉTERMINATION DE L'ALBÉDO DES SURFACES ENNEIGÉES PAR TÉLÉDÉTECTION : Application à la reconstruction du bilan de masse du glacier de Saint Sorlin, Thèse de doctorat de l'Université Paris Est ,Spécialité : Sciences, Ingénierie et Environnement, soutenue le 17 Décembre 2010

CEN-8 45 années de simulation de l'enneigement et des principales conditions météorologiques dans les massifs alpins et pyrénéens.

En France, l'absence de longues séries de données météorologiques et nivologiques mesurées ne permet pas de réaliser une climatologie objective en zone de montagne. Le recours à la modélisation numérique du manteau neigeux est une des solutions pour remédier à ce problème. Le projet ERA40 mené par le CEP a mis à disposition de la communauté scientifique des champs atmosphériques analysés sur une période de 40 ans. Ces données, complétées pour les années plus récentes par des sorties du modèle Arpège de prévision météorologique, ont été partiellement traitées par le CEN sur un domaine couvrant les massifs français Alps et Pyrénéens. Elles ont permis de réaliser une climatologie des conditions météorologiques et de l'enneigement depuis 1958 dans les Alpes et depuis 1990 dans les Pyrénées françaises en utilisant la modélisation développée initialement pour la prévision opérationnelle du risque d'avalanches. Cet outil, composé d'un modèle d'analyse météorologique Safran et d'un modèle déterminisme de neige Crocus, simule à l'échelle d'un massif montagneux et par tranches d'altitudes l'évolution horaire du manteaux neigeux jour après jour tout au long d'une année.



Les deux illustrations ci dessus montrent la richesse des résultats que l'on peut obtenir que ce soit sur les paramètres météorologiques : température de l'air, précipitations, vent... ou les paramètres nivologiques : hauteur de neige au sol, durée d'enneigement..... en moyenne, variabilité inter-annuelle, tendance....par massif ou groupe de massifs et par altitude.

Par exemple, la variabilité spatiale des précipitations annuelles est très importante aussi bien dans les Alpes avec à 1800 m environ 2000 mm dans les massifs des Aravis, du Chablais et de la Chartreuse et moins de 850 mm dans le Queyras que dans les Pyrénées avec 2200 mm dans le Pays Basque et la moitié moins à l'Est en Cerdagne ou Capcir-Puymorens.

Quant à l'enneigement, il est caractérisé par une très grande variabilité inter annuelle. Depuis le milieu de la décennie 80, tous les paramètres qui le caractérisent hors couvert forestier à savoir hauteur de neige ou durée de l'enneigement subissent une baisse remarquable de 50 à 80% à basse altitude (< 1200m), plus faible au fur et à mesure où nous prenons de l'altitude et devenant quasi nulle à partir de 2400 m. Cette tendance sur l'enneigement est très corrélée à l'évolution des températures de l'air qui, après un point bas dans la décennie 1970, ont augmenté de 0,5 à 2 degrés selon les massifs,. augmentation plus faible à l'Est des Alpes et des Pyrénées.

Références

Durand et al., 2009a, Reanalysis of 44 year of climate in the French Alps (1958–2002): methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol **48**, Issue 3. pp 429-449.

Durand et al., 2009b, Reanalysis of 47 Years of Climate in the French Alps (1958–2005): Climatology and Trends for Snow Cover, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol **48**, Issue 12. Pp. 2487–2512.

Malou N.A. Maris, 2009, Results of 50 years of climate reanalysis in the French Pyrenees (1958-2008) using the SAFRAN and CROCUS models, proceeding of ISSW 2009, Davos, Pp 219-223

CEN-9 Étude sur les paramètres nivo-météorologiques représentatifs des évènements de transport de neige par le vent à échelle locale.

L'observation, l'analyse et la compréhension des effets du vent sur la neige est un sujet majeur d'études pour le CEN. Ce phénomène a une grande importance pour la stabilité du manteau neigeux par son action de redistribution de grandes quantités de neige qui modifie localement le risque de déclenchement spontané. Le vent est aussi une des principales causes de formation de plaques à l'origine de la plupart des déclenchements provoqués d'avalanches. D'autres effets comme les congères, les corniches, l'interaction entre le fluide et la surface ainsi que la modification des grains sont aussi étudiés. Le CEN poursuit donc son action d'observation des effets des différents modes de transport sur le site expérimental de l'Alpe d'Huez en utilisant différents types de capteurs incluant des mesures à distance. En parallèle, différents efforts de modélisation numérique tant pour le vent à échelle très fine que pour la modification induite des caractéristiques du manteau neigeux et sa redistribution sont en cours de développement. Le but visé est une modélisation opérationnelle des effets du transport éolien de la neige à une échelle kilométrique sur les principaux massifs montagneux français.



Figure 1 : détail des accumulations dues au vent au Col du Lac Blanc (2 700m).

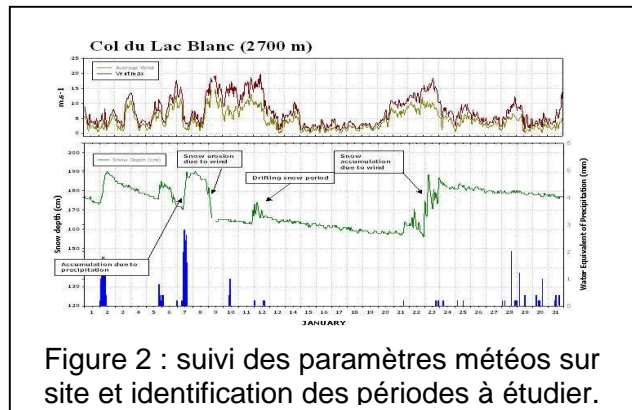


Figure 2 : suivi des paramètres météo sur site et identification des périodes à étudier.

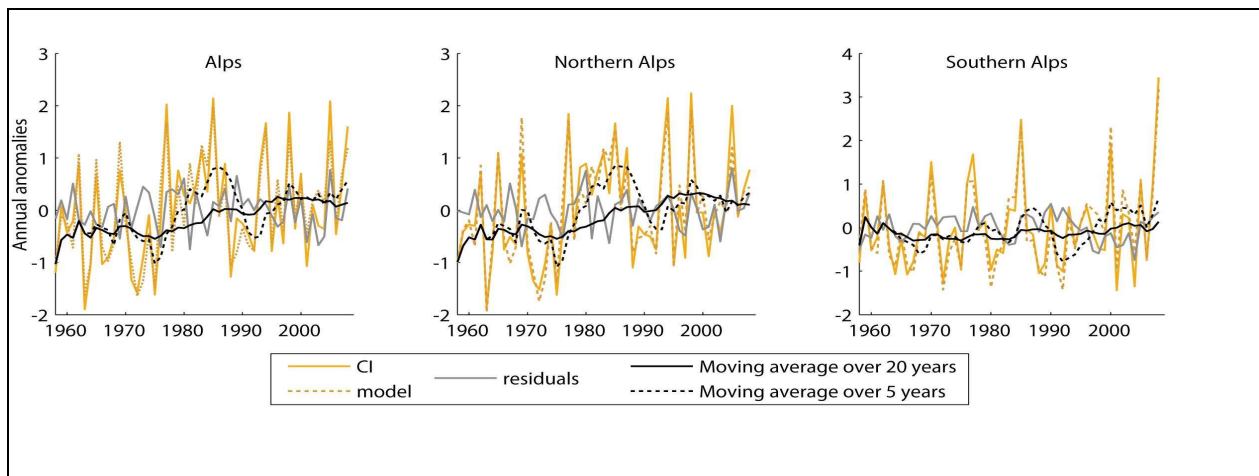
Le site du Col du Lac Blanc se comporte comme une soufflerie naturelle (fig. 1) où les vents sont canalisés selon un axe nord-sud, facilitant ainsi la validation des différents modèles développés sur cette thématique. De nombreux épisodes de transport de neige par le vent (145 sur les 10 dernières années) ont été observés et documentés sur ce site expérimental (fig. 2). Des périodes d'observations intensives permettent de compléter ce dispositif par des mesures spécifiques : profils verticaux de densité de neige déplacée et du vent à échelle fine, suivi précis de la répartition des précipitations, observations de la structure du manteau neigeux et des caractéristiques des particules de neige susceptibles d'être déplacées. Grâce aux séries de mesures effectuées au Col du Lac Blanc et l'examen minutieux des événements de transport, une généralisation 3D de la modélisation spécifique a été développée. Elle permet de simuler de manière réaliste les transferts horizontaux et verticaux de masse de neige sur un domaine montagneux restreint (maille de 50m). Le développement et la poursuite de cette série de modèles sont en cours actuellement dans le contexte d'un couplage complet entre un modèle météorologique complexe (Meso-NH) et une modélisation fine des processus physiques.

Références

Durand, Y., Guyomarc'h, G., Mérindol, L., & J.G. Corripio (2005) - *Improvement of a numerical snow drift model and field validation*. Cold Regions Science and Technology, **43(1-2)**, 93-103
Guyomarc'h G. & Y. Durand (2010) - *Key parameters for local drifting snow events*. International Snow Science Workshop (ISSW 2010), Squaw Valley (CA - USA)
Vionnet V., E. Martin, V. Masson, E. Brun, Y. Durand, G. Guyomarc'h & C. Lac (2011) – *Simulations of snow-drift events in alpine terrain using a meso-scale atmospheric model*. IUGG 2011, Melbourne 2011/6/27

CEN-10 Etude climatologique de l'activité avalancheuse naturelle au cours des 50 dernières années sur les Alpes françaises

Les fluctuations récentes du climat montagnard sont assez bien documentées en Europe et en Amérique du Nord. Pour les Alpes françaises, elles ont été étudiées^{1,2} en intégrant l'ensemble des données disponibles la chaîne SCM depuis 1958, rendant compte de la diminution de l'enneigement à basse et moyenne altitude, à la fois en termes de cumul et de durée, mais aussi de l'augmentation de la variabilité, notamment des températures hivernales. En revanche, la réponse des avalanches aux fluctuations climatiques reste peu documentée. Cette étude s'intéresse à l'évolution de l'activité avalancheuse dans les Alpes françaises durant les dernières décennies et à ses liens avec le climat. Les travaux se basent sur une série d'observations exceptionnelle, l'Enquête Permanente sur les Avalanches³ (EPA, Cemagref UR ETNA), et sur des données nivo-météorologiques issues de la chaîne de modèles Safran-Crocus-Mepra (SCM, Météo-France). Un indice composite IC d'activité avalancheuse a été construit sur la base des observations de l'EPA et de l'indice modélisé MEpra. Afin de déterminer les variables nivo-météorologiques les plus représentatives de l'activité avalancheuse, une régression « stepwise » a été réalisée à partir des données annuelles normalisées sur 51 ans. Cette technique permet de choisir les variables à inclure dans un modèle linéaire en sélectionnant ou en éliminant à chaque pas une des variables explicatives selon sa significativité statistique.



Le modèle de régression le plus efficace ($R^2=0,88$) est celui privilégiant la température et les variables Crocus d'exposition sud. Il représente parfaitement la variabilité inter-annuelle de la variable et permet de détecter les années exceptionnellement fortes en termes d'activité avalancheuse, répertoriées par le Centre d'Etude de la Neige⁴. En appliquant le test de Spearman, on détecte une légère non stationnarité du modèle IC à l'échelle des Alpes et des Alpes du Nord. Elle est due à une augmentation très significative des températures maximales à 3000m notamment dans les Alpes du Nord et de l'épaisseur de neige humide à 3000m versant Nord (lien de cause à effet). Le signal le plus marquant dégagé par la moyenne mobile sur 5 ans semble tout de même bien être la rupture/inflexion au début des années 1980 présente dans la majorité des séries, en hiver et au printemps, déjà détectée pour les altitudes d'arrêt des avalanches (diminution de 1977 à 2006 pour les événements avalancheux de forte amplitude - caractérisés par des altitudes d'arrêt basses) ou pour les variables nivo-météorologiques (augmentation des températures et du rapport entre les précipitations pluvieuses et neigeuses pouvant expliquer la diminution de la couverture neigeuse)^{1,2,3}.

L'étude se poursuit avec une analyse spatiale et temporelle plus fine des principaux cycles avalancheux à l'échelle de la journée et du massif et de leur caractérisation nivo-météorologique.

Références

¹ Durand et al., 2009a, Reanalysis of 44 year of climate in the French Alps (1958–2002): methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol 48, Issue 3. pp 429-449.

² Durand et al., 2009b, Reanalysis of 47 Years of Climate in the French Alps (1958–2005): Climatology and Trends for Snow Cover, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol 48, Issue 12. Pp. 2487–2512.

³ Eckert et al, 2010, Assessing the response of snow avalanche runout altitudes to climate fluctuations using hierarchical modeling: application to 61 winters of data in France, *Journal of Climate*. 23, pp 3157-3180.

⁴ Goetz et al., 2008, Aperçu nivo-climatologique des massifs des Alpes, de la Corse et des Pyrénées : situations avalancheuses remarquables, Note de travail du Centre d'Etude de la Neige, n°26.

Le projet OPTIMISM a débuté en septembre 2009 et est à l'initiative de chercheurs du laboratoire LOCEAN (université de Jussieu à Paris). Prenant en compte la sensibilité particulière des régions arctiques au réchauffement climatique et le fait que la glace de mer est non seulement un indicateur sur l'évolution du réchauffement climatique mais aussi un des principaux acteurs de la machine climatique, il a été décidé de concevoir un dispositif d'observation autonome capable de transmettre en temps réel l'épaisseur de la glace de mer arctique ainsi qu'un certain nombre de paramètres de flux échangés entre l'eau, la glace, l'atmosphère et qui régissent le bilan de masse de cette glace. Ce dispositif est construit sur la base d'un flotteur cylindrique instrumenté conçu lors de précédentes études par le LOCEAN et dénommé Ice-T. Dans le cadre du projet, le flotteur est chargé de supporter une partie aérienne constituée d'un mât de mesures météorologiques. Les difficultés sont nombreuses : problèmes de résistance mécanique de la structure, capacité du dispositif à assurer une autonomie électrique durant les longs mois de dérive au milieu des glaces, stabilité de l'ensemble durant les phases de flottaison, problèmes de givrage éventuel des capteurs... Le Centre d'Etudes de la Neige est partenaire de ce projet et intervient durant certaines phases de tests de la station de mesures.

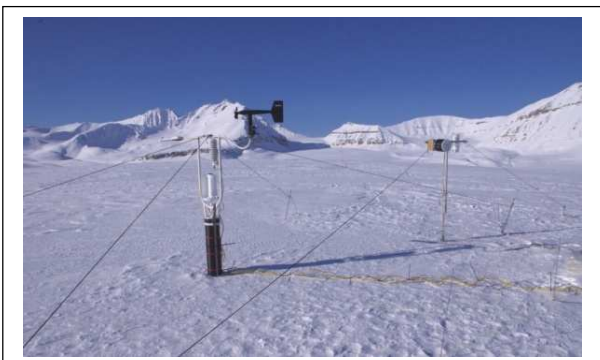


Figure 1 : Site de Ny-Alesund



Figure 2 : Site du Col de Porte

Durant l'hiver 2009-2010, Le mât météo a été testé sur le site du Col du Lac Blanc (domaine skiable de l'Alpe d'Huez, 2600 m d'altitude). Cette première étape a permis de s'assurer de la bonne résistance de la structure et du bon fonctionnement des capteurs. Au printemps 2010, le dispositif de mesures a été transporté sur la base scientifique de Ny-Alesund sur l'île de Spitzberg (Figure 1). Durant cette campagne, le CEN a été chargé d'effectuer des mesures complémentaires de température de surface de la neige à l'aide d'un thermomètre infrarouge et de sondes platines. Ces informations ont permis de valider les mesures de températures de surface utilisées dans l'estimation de flux Bulk et obtenues à partir d'un capteur radiatif présent sur la station météorologique. En décembre 2010, le flotteur Ice-T a été installé sur le site du Laboratoire du Col de Porte (Figure 2). Des sondes de températures placées sous l'enveloppe externe du flotteur cylindrique seront chargées de fournir un profil vertical de température dans l'eau, la glace, la neige. Les mesures effectuées dans la neige au Col de Porte, doivent être comparées à celles réalisées habituellement par le CEN dans le parc à instruments du Laboratoire.

Références

R. Loiseil, L. Eymard, N. Amarouche, J.M. Panel, A. Lourenço, A. Matulka, A. Weill, F. Vivier, M. Dechambre, A. Viola, V. Vitale, S. Argenti, H. Kupfer. « BEAR, une station de mesure pour l'Océan Arctique. (sous-titre BEAR, un système de mesure du bilan d'énergie sur une bouée océanographique autonome, projet ANR OPTIMISM pour l'étude du bilan d'énergie à la surface de l'océan arctique) ». La Météorologie (ISSN : 0026-1181). Sous presse.