

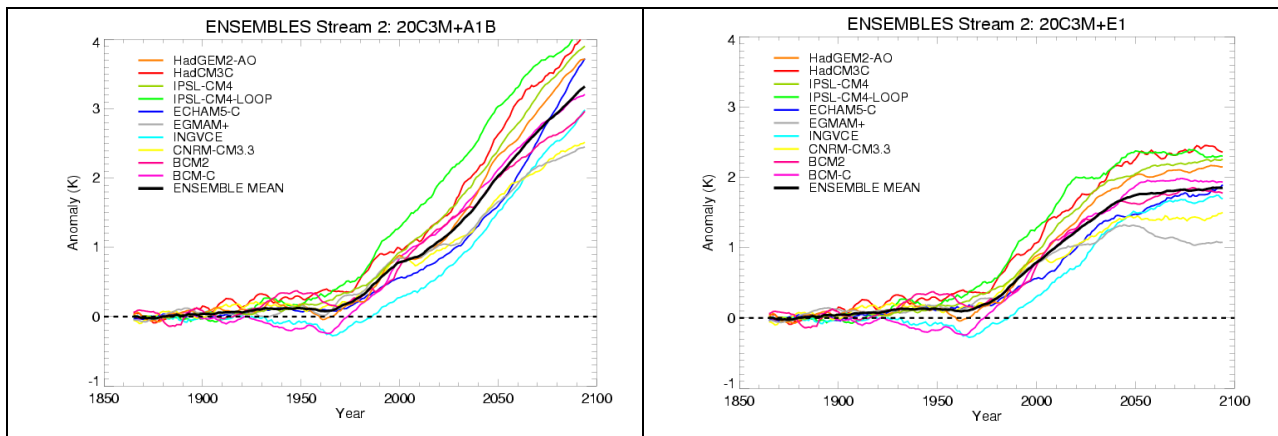
ENCADRÉS SCIENTIFIQUES

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 ».



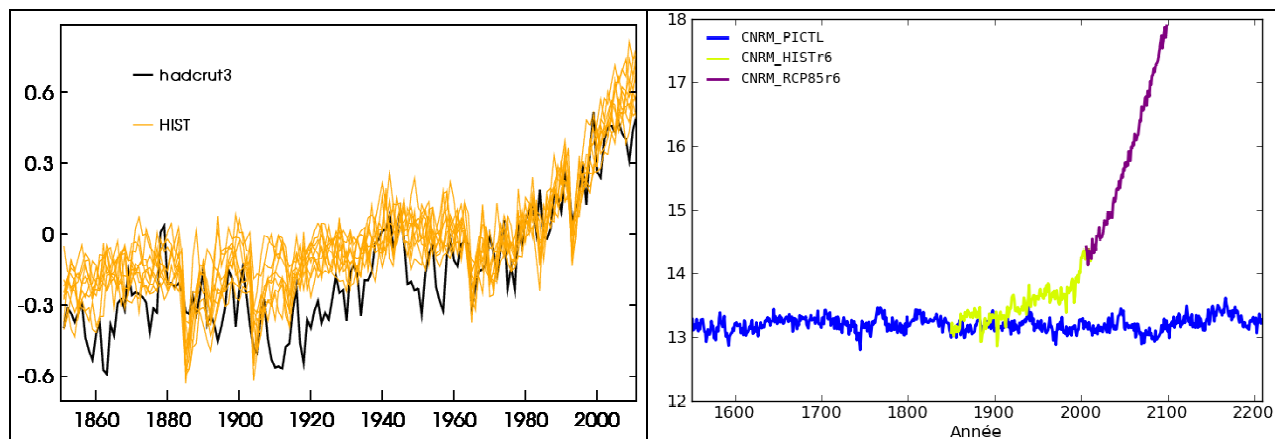
Les figures de gauche et de droite représentent l'anomalie de température moyenne globale de l'air près de la surface simulée par les principaux modèles climatiques européens, respectivement pour les deux scénarios SRES-A1B et E1, sur la période 1860-2100. Les simulations menées par le CNRM-GAME apparaissent 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.



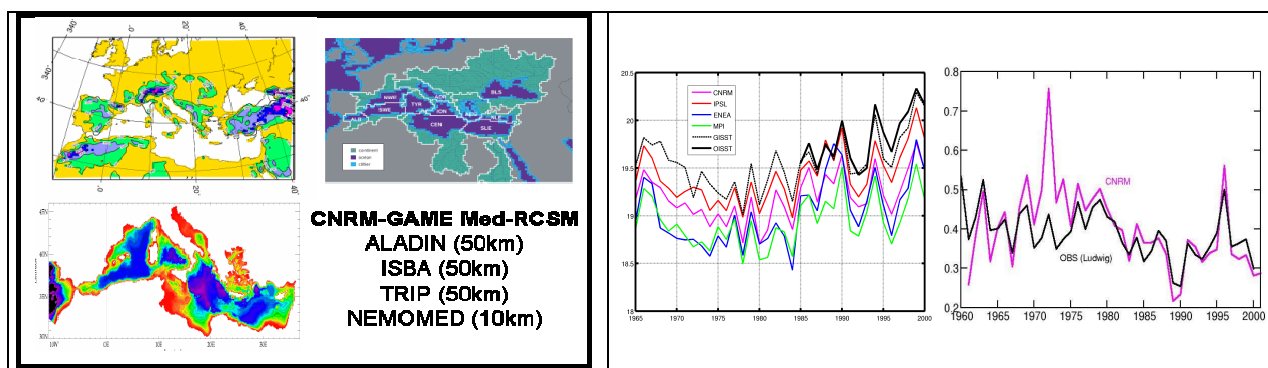
La figure de gauche compare les anomalies de la température à 2m en moyenne globale par rapport à 1961-1990 (°C) observées (HadCRUT3, en noir) et simulées par 10 réalisations de la période 1850-2005 par CNRM-CM5. Ces expériences incluent la variabilité solaire, l'effet des éruptions volcaniques et les 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

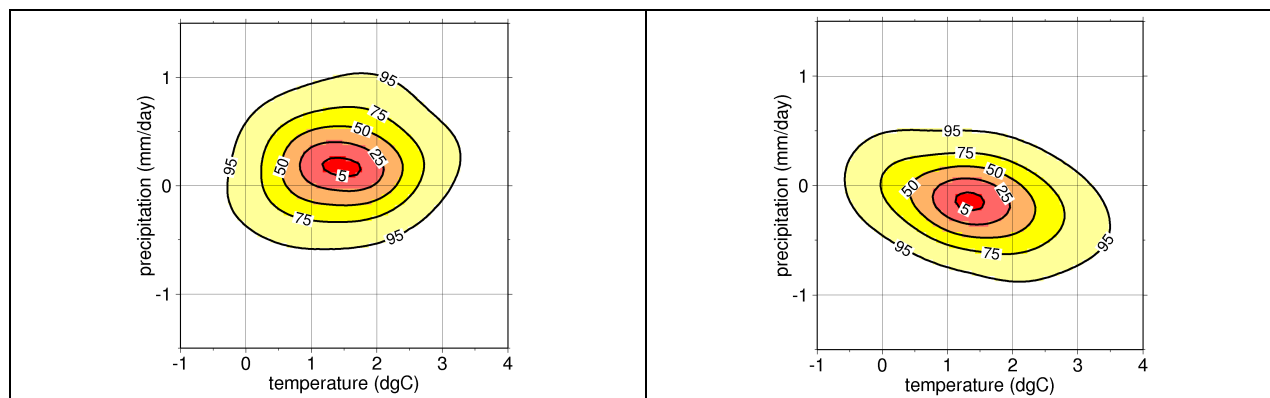
Somot, S., F. Sevault, M. Déqué M., and M. Crépon, 2008: 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled Atmosphere-Ocean Regional Climate Model. *Global and Planetary Change*, 63 (2-3), 112-126, doi:10.1016/j.gloplacha.2007.10.003.

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

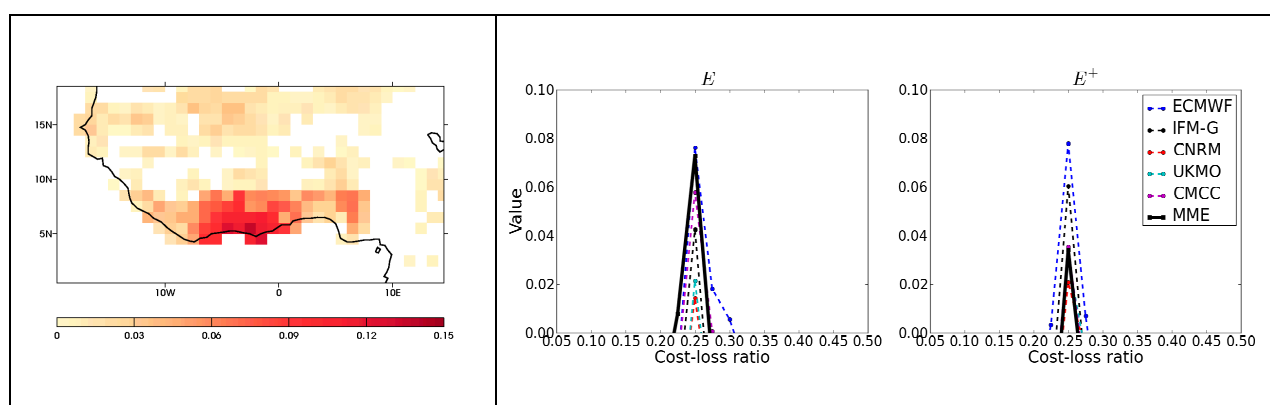
Déqué, M., D. P. Rowell, D. Lüthi, F. Giorgi, J. H. Christensen, B. Rockel, D. Jacob, E. Kjellström, M. Castro, and B. van den Hurk, 2007: An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81, 53-70, doi: 10.1007/s10584-006-9228-x.

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.

GMGEC-5 : Prévisibilité saisonnière multi-modèles sur l'Afrique

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.

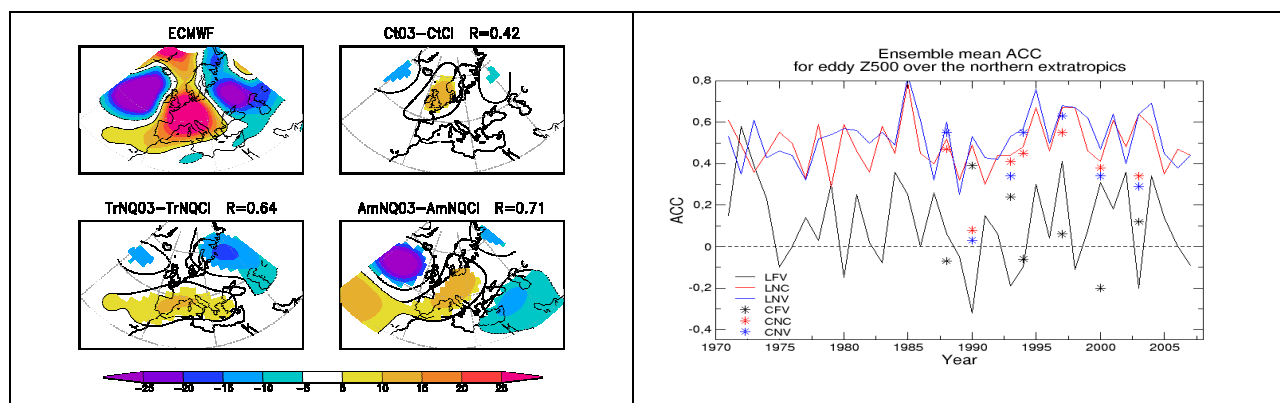
Références

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.



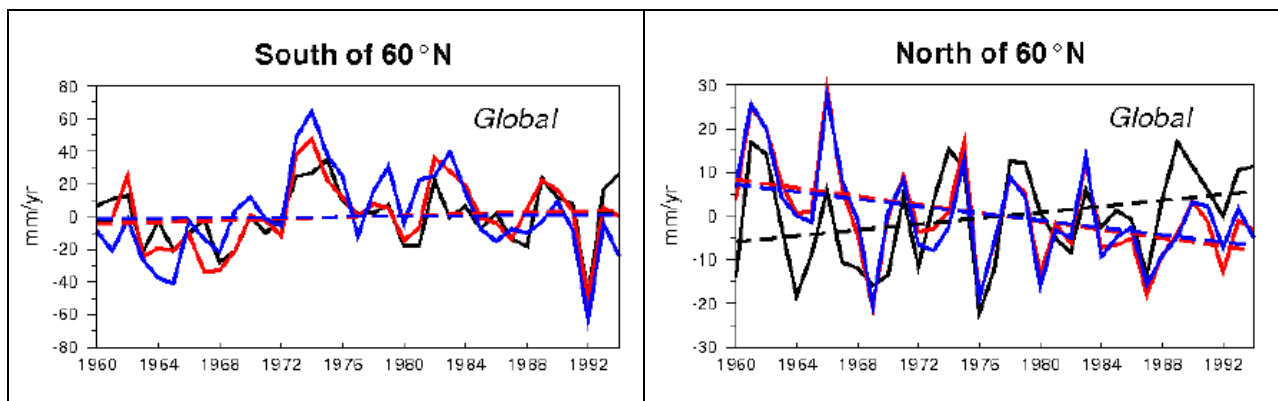
La figure de gauche montre les anomalies (en mètres) de la composante stationnaire du géopotential à 500 hPa moyennée de juin à septembre 2003, d'une part dans les analyses opérationnelles ECMWF, d'autre part dans des ensembles de simulations ARPEGE-Climat forcées par des températures de surface de la 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.

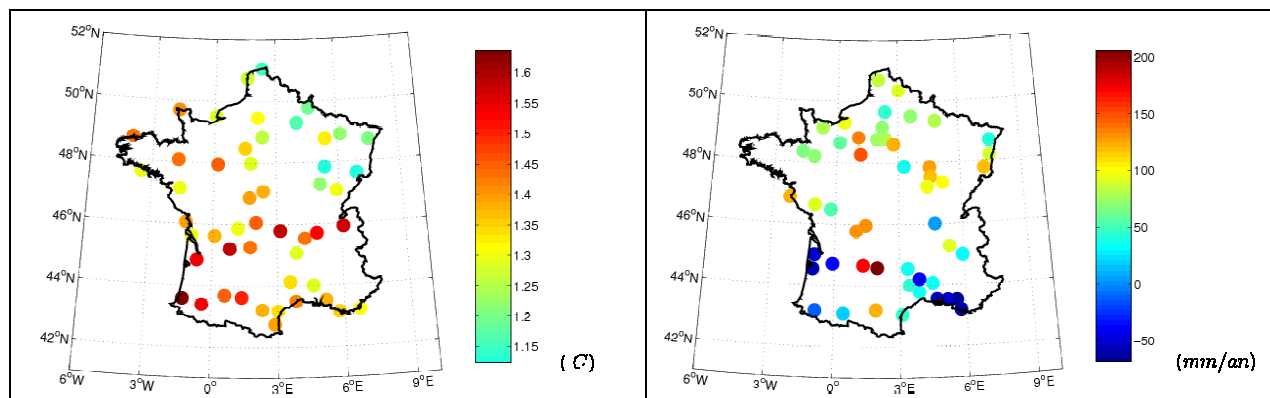
Références

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

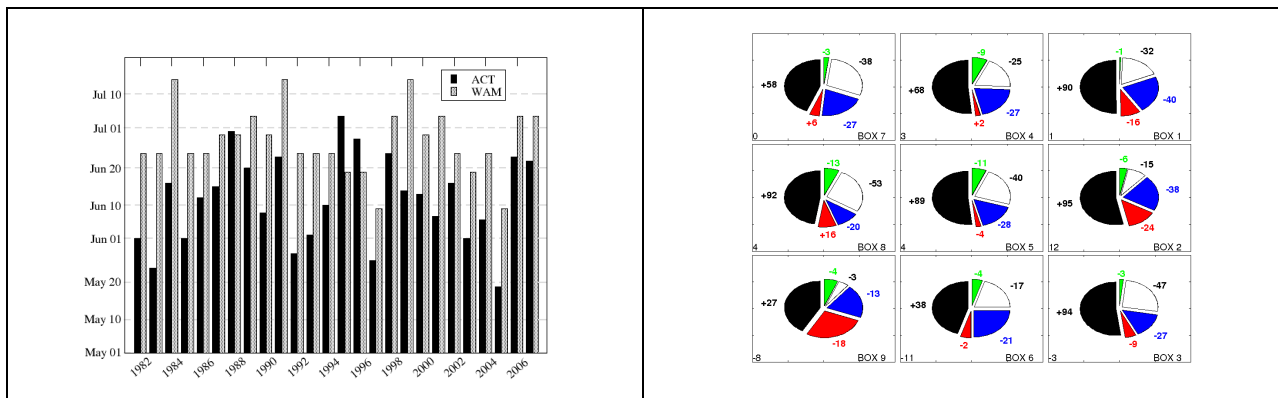
Ribes, A., 2009: Détection statistique des changements climatiques. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, soutenue le 11 septembre 2009 au CNRM-GAME, 142 pp.

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 Moussoon 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

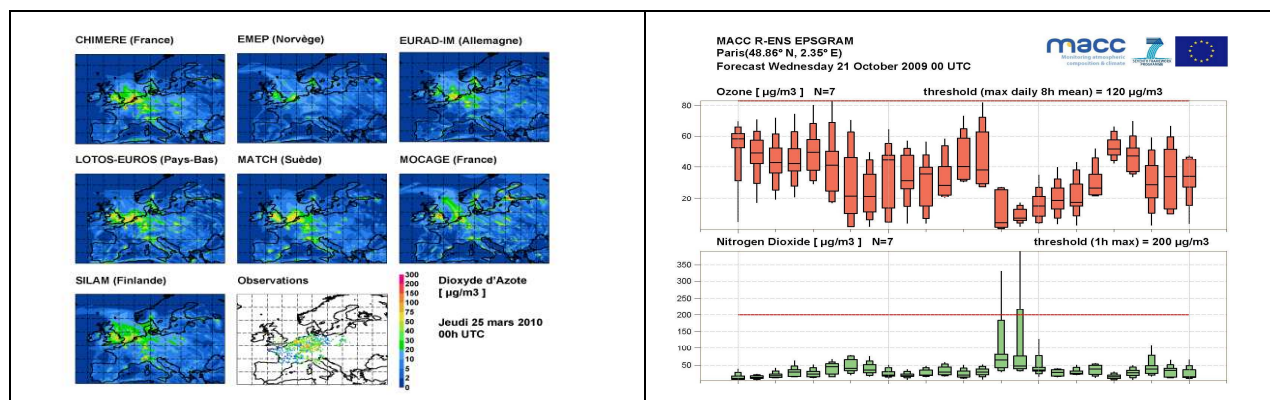
Caniaux, G., H. Giordani, J.-L. Redelsperger, F. Guichard, E. Key, and M. Wade, 2011: Coupling between the Atlantic cold tongue and the West African monsoon in boreal Spring and Summer. *J. Geophys. Res.*, online, doi: 10.1029/2010JC006570.

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'assortir 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

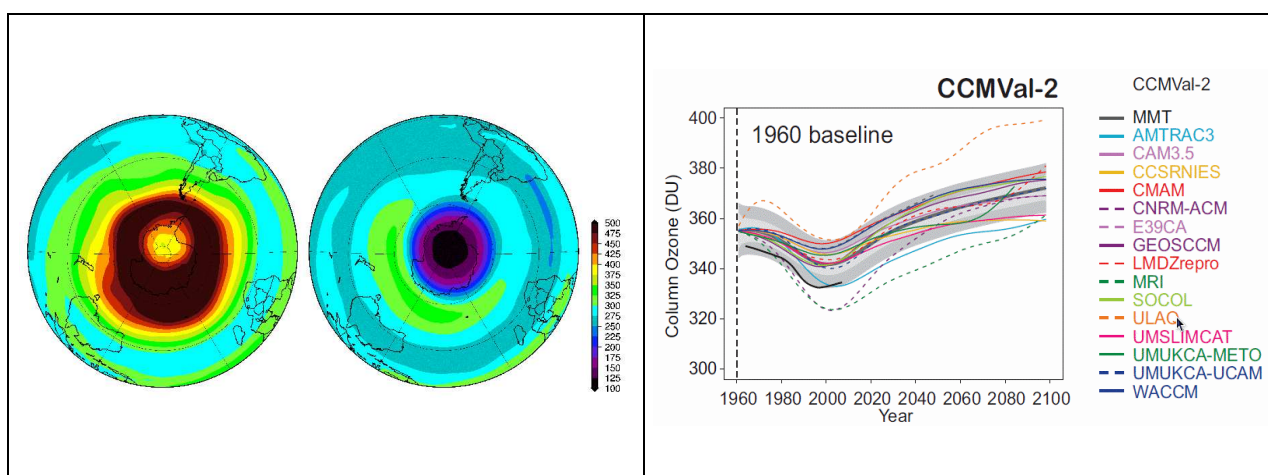
Hollingsworth, A. et al., 2008: The Global Earth-system Monitoring using Satellite and in-situ data (GEMS) Project: Towards a monitoring and forecasting system for atmospheric composition. Bull. Amer. Meteor. Soc., 89 (8), 1147-1164, doi:10.1175/2008BAMS2355.1.

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).



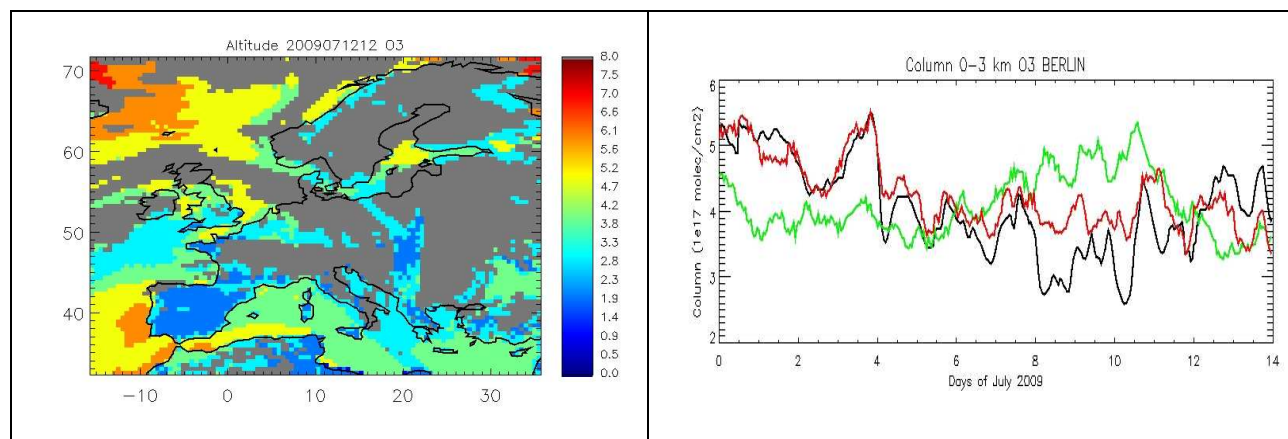
Les deux figures illustrent les contenus intégrés d'ozone, à gauche sur le Pôle sud pour 1850 et 2000, et à droite sur les moyennes latitudes de l'hémisphère Nord, de 1960 à 2100. A gauche, seuls les résultats intermédiaires de MOCAGE sont présentés alors qu'à droite la comparaison finale de l'ensemble 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.