

3^{ÈME} COLLOQUE NATIONAL SUR L'ASSIMILATION DE DONNÉES



GRENOBLE, 9-10 DÉCEMBRE 2010



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES



INRIA INSU



**METEO
FRANCE**

Toujours un temps d'avance

PROGRAMME

JEUDI 9 DÉCEMBRE

10h-10h45 Accueil, café

10h45-11h Eric Blayo, Marc Bocquet : Introduction

Session 1. Président de séance : Emmanuel COSME

11h-11h30 **Marc Bocquet** : Construction multi-échelles optimale de l'espace de contrôle en assimilation de données.

11h30-12h **Emilie Neveu** : Méthodes multigrilles pour le 4D-VAR.

12h-12h30 **Jérôme Monnier** : Modélisation multi-échelles d'écoulements de glace. Vers l'assimilation variationnelle de données et le couplage.

12h30-14h Déjeuner

Session 2. Président de séance : Olivier TALAGRAND

14h-14h50 **Peter-Jan van Leeuwen** : Data Assimilation activities in the UK National Centre for Earth Observation.

14h50-15h20 **Robert Miller** : An implicit particle filter for data assimilation.

15h20-15h50 **Anthony Weaver** : Développements récents pour la modélisation de covariance d'erreur d'ébauche et d'observation dans le système NEMOVAR.

15h50-16h40 Pause café et session posters

Session 3. Président de séance : Jacques VERRON

16h40-17h30 **Vivien Mallet** : Revue des bibliothèques pour l'assimilation de données et exemple de la bibliothèque Verdandi.

17h30-18h **Marie Dumont** : ADAC: Assimilation de Données d'Albédo dans un modèle d'évolution du manteau neigeux, CROCUS.

18h-18h30 **Philippe Rogel** : Constraining a climate model with ocean reanalyses for the initialisation of decadal predictions.

18h30 FIN DU PREMIER JOUR

VENDREDI 10 DÉCEMBRE

Session 4. Président de séance : Arthur VIDARD

- 9h-9h50 **Philippe Moireau** : Filtrage réduit de type Unscented et application à l'identification paramétrique pour les systèmes distribués
- 9h50-10h20 **Emmanuel Cosme** : Diagnostics pour une paramétrisation efficace du filtre adaptatif.
- 10h20-10h50 **Hubert Varella** : Utilisation des ondelettes pour la spécification des corrélations locales d'erreur d'ébauche.
- 10h50-11h50 Pause café, session posters

Session 5. Président de séance : Jean PAILLEUX

- 11h50-12h20 **Olivier Talagrand** : Gaussianité des erreurs et méthodes de maximum d'entropie. Le projet PREVASSEMBLE.
- 12h20-12h50 **François-Xavier Le Dimet** : Méthodes du second ordre pour la propagation d'incertitudes.
- 12h50-14h15 Déjeuner

Session 6. Président de séance : Slimane BEKKI

- 14h15-14h45 **Jean-François Mahfouf** : Développement d'un système d'analyse dans le sol pour la prévision numérique du temps.
- 14h45-15h15 **Gilles Forêt** : SMOQA (synergie modèles/observations pour l'étude de la qualité de l'air).
- 15h15-15h45 **Victor Winiarek** : Tests statistiques bayésiens pour la modélisation inverse opérationnelle suite à un rejet atmosphérique radioactif.
- 15h45-16h30 Discussions, conclusions, perspectives
- 16h30 FIN DU COLLOQUE

LISTE DES POSTERS

1. Assimilation de données satellitaires d'ozone à haute résolution sur l'Europe avec MOCAGE-VALENTINA. *J. BARRÉ, V.-H. PEUCH, J.-L. ATTIE, M. CLAEYMAN & L. EL AMRAOUI*
2. Assimilation variationnelle dans NEMO avec YAO : premiers résultats. *M. BERRADA, J. BRAJARD, C. DELTEL, M. CRÉPON, F. BADRAN & S. THIRIA*
3. Un nouvel algorithme d'assimilation de données : le nudging direct et rétrograde avec inversion de la diffusion. *J. BLUM, D. AUROUX, P. BANSART & E. COSME*
4. Modèle adjoint et assimilation de données pour un modèle d'évolution de calotte polaire. *B. BONAN, M. NODET & C. RITZ*
5. Extensions non-gaussiennes du filtre SEEK pour l'assimilation de données dans les modèles couplés physico-biogéochimiques de l'océan. *P. BRASSEUR, D. BÉAL, J.-M. BRANKART, G. BROQUET, F. CASTRUCCIO, M. DORON, C. FONTANA, C. LAUVERNET, Y. OURMIÈRES & J. VERRON*
6. Assimilation des observations satellitaires dans un modèle de qualité de l'air. *A. COMAN, G. FORÉT, M. EREMENKO, G. DUFOUR, B. GAUBERT, A. BOYNARD, M. BEEKMANN, J.M. FLAUD & G. BERGAMETTI*
7. Problèmes de lissage dans un cadre Bayésien et solutions linéaires gaussiennes. *E. COSME, J. VERRON, P. BRASSEUR, J.-M. BRANKART, J. BLUM & D. AUROUX*
8. Évaluation ensembliste des performances de réseaux d'observation spatiaux et in situ dans l'océan côtier. *P. DE MEY, N. AYOUB, J. LAMOUREUX & M. LE HÉNAFF*
9. Réduction de l'incertitude sur trois paramètres principaux d'un modèle biogéochimique dans un modèle océanique couplé physique-biogéochimique 3D de l'Atlantique Nord. *M. DORON, P. BRASSEUR, J.-M. BRANKART & C. FONTANA*
10. Contrôle du courant nord méditerranéen par l'altimétrie côtière d'AltiKa : une approche par simulation du système d'observation (OSSE). *A. DUCHEZ, J. VERRON & J.-M. BRANKART*
11. Assimilation séquentielle de données couleur de l'eau dans un modèle couplé physique-biogéochimique de l'Atlantique Nord. *C. FONTANA, P. BRASSEUR, J.-M. BRANKART & M. DORON*
12. Assimilation séquentielle dans un modèle haute résolution de l'Atlantique

Tropical. *N. FREYCHET, E. COSME, E. KPEMLIE & P. BRASSEUR*

13. Méthodes inverses en glaciologie pour l'initialisation du champ de glissement à la base des calottes polaires. *F. GILLET-CHAULET, O. GAGLIARDINI, C. RITZ, M. NODET & G. DURAND*
14. Inversion des conditions basales d'un glacier soumis à un « surge ». *M. JAY-ALLEMAND, F. GILLET-CHAULET & O. GAGLIARDINI*
15. Etat de l'art des applications développées sous le semi-générateur de code adjoint YAO : interface industrielle par la société CLIMMOD. *A. KANE, Z. POUSSI & T. LAUVAUX*
16. Assimilation des observations nuageuses/pluvieuses au-dessus des surfaces continentales: limitations et progrès accomplis. *F. KARBOU, P. BAUER, A. GEER & W. BELL*
17. Assimilation variationnelle pour la datation croisée des forages profonds de l'Antarctique et du Groënland. *B. LEMIEUX-DUDON, H. TOYE MAHAMADOU KELE & E. BLAYO*
18. Reduced-order minimax state estimation. *V. MALLET & S. ZHUK*
19. Ajustement optimal des paramètres de forçage atmosphériques dans des simulations océaniques globales. *M. MEINVIELLE, J.-M. BRANKART, P. BRASSEUR & B. BARNIER*
20. Glider assimilation in the Solomon sea. *A. MELET, J. VERRON & J.-M. BRANKART*
21. Modélisation des corrélations de l'erreur d'ébauche dans le système NEMOVAR. *I. MIROUZE & A. WEAVER*
22. Assimilation spectrale à haute résolution des colonnes totales d'ozone IASi avec un modèle de chimie-transport. *B. PAJOT, D. CARIOLLE, S. MASSART, A. PIACENTINI & O. PANNEKOUCKE*
23. Représentation de l'erreur de modèle dans l'assimilation d'ensemble de Météo-France. *L. RAYNAUD, L. BERRE & G. DESROZIERS*
24. Analyse de sensibilité de l'océan par méthode adjointe. *É. REMY, A. VIDARD & É. GREINER*
25. Assimilation de données pour les feux de forêt. *M. ROCHOUX, S. RICCI, S. MASSART, R. PAOLI, B. CUENOT & A. TROUVÉ*
26. Assimilation directe de séquences d'images dans les modèles numériques. *I. SOUOPGUI, A. VIDARD, O. TITAUD, F.-X. LE DIMET*
27. Transformation Gaussienne des statistiques d'erreur pour un filtre de Kalman

de rang réduit : Application à un système d'analyse de la glace de mer. C.-E. TESTUT, É. GREINER, G. GARRIC & J.-M. BRANKART

28. Un système d'assimilation de débits passés pour des prévisions d'ensemble de débits sur la France. G. THIREL, E. MARTIN, F. REGIMBEAU, J.-F. MAHFOUF, S. MASSART, S. RICCI & F. HABETS
29. Assimilation du couvert de neige de MODIS dans le modèle LISFLOOD pour EFAS (European Flood Alert System). G. THIREL, P. SALAMON, P. BUREK & M. KALAS
30. On the use of Finite-Time Lyapunov Exponents and Vectors for direct assimilation of tracer images in ocean models. O. TITAUD, J.-M. BRANKART & J. VERRON
31. VODA: Assimilation variationnelle de données pour des applications océaniques multi-échelles. A. VIDARD *et al.*
32. Assimilation des mesures de déplacement issues de la corrélation d'amplitude et de l'interférométrie différentielle (D-InSAR) pour l'estimation des paramètres de failles co-sismiques. Y. YAN, E. TROUVÉ, V. PINEL, E. PATHIER, G. MAURIS & S. GALICHET
33. Construction optimale de réseaux de mesures pour la qualité de l'air. L. WU & M. BOCQUET

RESUMES DES PRESENTATIONS ORALES

Construction multi-échelles optimale de l'espace de contrôle en assimilation de données

M. BOCQUET & L. WU

En assimilation de données pour l'atmosphère et l'océan, et tout particulièrement en chimie atmosphérique, le choix de la résolution de l'espace de contrôle est déterminant pour les analyses. Et cependant, en l'absence de cadre théorique, ce choix est très peu exploré. Nous proposons de rendre compte de travaux récents sur l'assimilation de données multi-échelles abordant cette question par (1) le développement d'un cadre conceptuel et mathématique pour une assimilation multi-échelles des observations. Le formalisme, probabiliste et de nature bayésienne, rend compatible l'analyse BLUE et la structure multi-échelles de l'espace de contrôle. Cette approche permet notamment le calcul explicite d'erreurs qui dépendent de l'échelle, dont les erreurs de représentativité. (2) la construction optimale d'un maillage de l'espace de contrôle, à l'aide de structures multi-échelles adaptatives (pavages) dans le cadre décrit précédemment. On montre ainsi que l'essentiel des degrés de liberté pour le signal d'une grille fine peut être capté par un maillage adaptatif dont le nombre de mailles est très significativement inférieur au nombre de mailles de la grille fine. (3) la construction de solutions analytiques asymptotiques (à grand nombre de mailles) permettant de déterminer des grilles (optimales pour l'assimilation de données) de l'espace de contrôle de façon très peu coûteuse. Elles sont comparées à celles construites par les techniques du point précédent. Ces trois points sont illustrés par plusieurs applications en chimie atmosphérique: modélisation inverse des flux de CO₂, surveillance globale pour le traité d'interdiction des essais nucléaires, et dispersion de traceur.

Méthodes multigrilles pour le 4D-VAR

É. NEVEU, L. DEBREU & F.-X. LE DIMET

Depuis ces trente dernières années, les systèmes d'observation de la Terre et les modèles numériques se sont perfectionnés et complexifiés pour nous fournir toujours plus de données, réelles et numériques. Ces données, de nature très diverse, forment maintenant un ensemble conséquent d'informations précises mais hétérogènes sur les structures et la dynamique des fluides géophysiques. Dans les années 1980, des méthodes d'optimisation, capables de combiner les informations entre elles, ont permis d'estimer les paramètres des modèles numériques et d'obtenir une meilleure prévision des courants marins et atmosphériques. Ces méthodes puissantes, appelées assimilation variationnelle de données, peinent à tirer profit de la toujours plus grande complexité des informations de par le manque de puissance de calcul disponible. L'approche, que nous développons, s'intéresse à l'utilisation des méthodes multigrilles, jusque là réservées à la résolution de systèmes d'équations différentielle, pour résoudre l'assimilation haute résolution de données. Les méthodes multigrilles sont des méthodes de résolution itératives, améliorées par des corrections calculées sur des grilles de plus basses résolutions. Nous dérivons les algorithmes multigrilles sur un exemple d'assimilation d'une équation de Burgers, non linéaire. Nous montrons que les méthodes multigrilles convergent plus vite que les méthodes monogrilles, avec un coût moindre, et qu'elles reposent sur des bases théoriques solides, contrairement à la méthode multi-incrémentale qui ne permet pas de résoudre l'assimilation à haute résolution, mais qui est pourtant utilisée dans les centres de prévision opérationnelle.

Modélisation multi-échelles d'écoulements de glace. Vers l'assimilation variationnelle de données et le couplage

J. MONNIER

(financement LEFE/ASSIM)

Nous développons au sein de l'Institut de Mathématiques de Toulouse - INSA, en collaboration avec le LGGE Grenoble (CNRS-INSU LEFE-ASSIM 08, ANR Adage 09) et le LEGOS Toulouse (PRES 09), un ensemble de travaux mathématiques, numériques et logiciels de modélisation d'écoulements multi-échelles de glace (application Antarctique). L'objectif étant un système d'assimilation variationnelle de données hétérogènes (méthodes adjointes) et le couplage de deux classes de modèles. Nous présentons ici nos états d'avancements d'une part sur le modèle petite-échelle dit "full-Stokes", d'autre part sur le modèle grande échelle dit "shallow-ice".

1) Modèle "full Stokes" (surface libre rhéologie loi de puissance). Nous avons élaboré un solveur éléments finis ordre 2 Stokes surface libre ALE avec adjoint et minimisation (plateforme de calcul DassFlow-Ice). Une attention toute particulière a été portée sur la performance du solveur direct, basé sur une formulation originale de décomposition-relaxation de la rhéologie et traitée par lagrangien. Des premiers tests d'analyse de sensibilité sur cas test académique sont en cours, avec transfert auprès de nos collègues pour application sur des données du glacier Astrolabe. Une version parallèle (MPI) et 3D du code suivra. L'approche mathématique est pour l'instant classique: les données potentiellement assimilées sont du type in-situ et/ou satellitaires "standards".

2) Modèles "shallow". Un problème ouvert en modélisation grande échelle des écoulements de glace est l'élaboration d'un modèle mathématique compatible avec les différents régimes rencontrés. Les régimes observés diffèrent de part leurs conditions basales (adhérence vs friction). Dans le cas newtonien, et à partir d'un nouveau formalisme simple de dérivation de modèles asymptotiques (films minces, [JP Vila 09]), nous montrons comment dériver des familles de modèles d'ordres souhaités (0, 1 ou 2) et comptables. Ces modèles peuvent être à une seule équation (type lubrification) ou bien à 2 équations (type "shallow moyenne"). Nous illustrerons le mécanisme de dérivation dans le cas 1D newtonien ainsi que deux exemples de modèles d'ordre 1 compatibles, modèles sélectionnés selon les régimes considérés.

Data Assimilation activities in the UK National Centre for Earth Observation

P.-J. VAN LEEUWEN

The National Centre for Earth Observation (NCEO) of the UK is a large partnership of universities and a few other bodies funded by the National Environmental Research Council (NERC) to improve our understanding of the Earth System. Data assimilation is an important part of the program. A special data-assimilation theme exists within NCEO that concentrates on fundamental data-assimilation issues, like nonlinear methods, data-assimilation in coupled models with different time scales, data-assimilation in nested models, observation impacts, as well as on providing data-assimilation training for Earth system scientists. The developed methodologies and ideas feed through into the other theme's like climate, carbon cycle, natural hazards, and solid Earth science. In this talk I will present a few new developments in these application areas, ranging from carbon cycling to high-resolution numerical weather forecasting.

In the second part of the talk I will present recent developments in nonlinear filtering, particularly particle filtering, and how the so-called 'curse of dimensionality' can be solved. Use is made of the so-called proposal density, which allows one to add future observations into the model equations, pushing the model runs towards these observations. Furthermore, at observation time we force the ensemble to have almost equal weights resulting in a very

effective particle filter that scales ideally with the dimension of the system. Examples are shown from application to the Lorenz 1996 model in both 40 and 1000 dimensional settings with only 20 particles.

An Implicit Particle Filter for Data Assimilation
R. MILLER

A new particle filter, designed to overcome the problem of sample impoverishment, is described. This particle filter works by direct sampling of the posterior probability density function (pdf), so all of the particles in the simulation are chosen to lie in high probability regions of state space, conditioned by observations. Examples of the filter applied to simple models are presented, along with methods for parameter estimation.

Développements récents pour la modélisation de covariance d'erreur d'ébauche et d'observation dans le système NEMOVAR

A. WEAVER, I. MIROUZE, A. PIACENTINI, T. PANGAUD & O. TITAUD
(financement LEFE/ASSIM)

NEMOVAR est un système d'assimilation variationnel incrémental pour NEMO («Nucleus for Modelling of the Ocean»), développé par plusieurs équipes pour diverses applications. Dans cette présentation, on donnera une synthèse des travaux récents menés au CERFACS pour la modélisation de covariance d'erreur d'ébauche et d'observation dans NEMOVAR. Les corrélations spatiales d'erreur d'ébauche sont modélisées grâce à un opérateur de diffusion, dont une version implicite a été récemment développée. Comparée à une version explicite existante, la version implicite améliore nettement l'efficacité de l'analyse, surtout dans le cadre générale de corrélations inhomogènes et anisotropes. Le lien entre le modèle de diffusion implicite et une famille classique de fonctions de corrélations (Whittle-Matérn) utilisée en géostatistiques sera évoqué. Les corrélations existantes pour les erreurs d'observation sont souvent négligées en assimilation de données océaniques, même si cette hypothèse est difficile à justifier pour certains types de données. En particulier, le besoin de fournir une Topographie Dynamique Moyenne (TDM) comme niveau de référence pour les mesures d'anomalies de niveau de la mer résulte pour la Topographie Dynamique Absolue (TDA) en des composantes corrélées spatialement et temporellement. Ces corrélations ne devraient pas être négligées, surtout au vu de la grande incertitude dans les produits existants pour la TDM. Un modèle de covariance d'erreur d'observation qui prend en compte les corrélations d'erreur dans la TDA sera donc présenté. Enfin, des études sur l'estimation des paramètres de covariance à partir de statistiques sur les innovations seront abordées. L'impact des développements ci-dessus sera illustré sur une configuration globale (ORCA1) de NEMO.

ADAC : Assimilation de données d'albédo dans un modèle d'évolution du manteau neigeux, CROCUS

M. DUMONT, Y. DURAND, J. GARDELLE & Y. ARNAUD

Le projet LEFE ADAC (Assimilation de données d'albédo dans un modèle d'évolution du manteau neigeux, CROCUS) a pour objectif de tester les méthodes d'assimilation variationnelle classiques (1D Var) sur un modèle de neige opérationnellement utilisé au Centre d'Etudes de la Neige pour la prévision du risque d'avalanche. Il s'agit d'évaluer l'impact de l'assimilation d'observation de surface sur la simulation du manteau neigeux et ce, en particulier, dans un premier objectif de simulation du bilan de masse spatialisé d'un glacier tempéré. D'une part, un adjoint de l'opérateur qui relie l'albédo aux caractéristiques physiques des grains a été développé et tester en un point, au Col de Porte. D'autre part, une méthode de traitement des images satellitales MODIS et des photographies terrestres est mise en place afin d'obtenir des données d'albédo sur les surfaces enneigées et englacées. Par suite, ces données sont assimilées dans une version spatialisée de CROCUS adaptée à la modélisation du bilan de masse d'un glacier tempéré. Ce modèle est testé sur plusieurs années hydrologiques sur le site du glacier de Saint Sorlin. L'impact de l'assimilation (ou forçage selon cas) des données d'albédo sur la simulation du bilan de masse spatialisé est très significatif.

Constraining a climate model with ocean reanalyses for the initialisation of decadal predictions

P. ROGEL, E. SANCHEW, C. CASSOU & E. FERNANDEZ

Climate prediction at interannual to decadal time scales is mainly an initial value problem. In addition, the memory of the climate system lies mostly in the ocean. Therefore, the initialisation of coupled models is a crucial point for the quality of such predictions, which are of high interest both for the society and for climate change assessment, as shown by the IPCC/CMIP5 requirements for the so-called "short term projection" experiments. One characteristic of coupled models is that their climatological behaviour is substantially different, in a statistical sense, from the real world climate. One clear consequence is that their reaction to an initialisation procedure at a close-to-the-real-climate situation will be to drift towards a state compatible with their own climate attractor. The time scale adjustment involved here is of the order of one to several years, of the order of the lead time looked for. Hence, alternatives to that method, which is extensively used for seasonal prediction, and which has been shown to be efficient despite a posterior systematic error correction, must be explored. One reason is that it is not insured that the systematic error is stationary enough to be properly estimated over the limited sample we are able to verify against with the current observed and reanalysed period (e.g. over ERA40) at our disposal, covering at most five decades as of now. In this presentation, we show a series of sensitivity experiments with the ARPEGE-NEMO CM5 coupled model, developed at CNRM and CERFACS. These experiments involve a full field initialisation method, and an anomaly initialisation method, in coupled mode, and several tests in both coupled and forced mode, used to carefully check the influence of constraining the tropical oceans. A particular focus will be on the influence of the time varying ocean observation system. The reference observed/reanalysed ocean state is the most recent ECMWF reanalysis using the NEMOVAR system. Observation estimates of upper ocean heat content as well as long term sea level tide gauge and satellite measurements and reconstructions are the test bench used in these sensitivity experiments.

Reduced-order Unscented Kalman Filtering with application to parameter identification in large-dimensional systems

P. MOIREAU

We propose a general reduced-order filtering formulation of the so-called Unscented Kalman Filter (UKF), valid for any choice of sampling points distribution. Reduced-order filters are becoming increasingly popular in order to handle large-dimensional systems when the uncertainty space itself is of reduced size. The advantage of a reduced version of the UKF filter is therefore to benefit in large dimensional systems from the ability of UKF to deal with non-linear operators without requiring tangent operator computations, which of course is of considerable interest for complex systems. The algorithms are derived in discrete time as in the classical UKF formalism --well-adapted to time discretized dynamical equations --and then extended to consistent continuous-time versions for the purpose of linearized error analysis. As an example, this reduced-order filtering approach can be used in particular for the estimation of parameters in large dynamical systems arising from the discretization of partial differential equations, when state estimation can be handled by an adequate Luenberger observer inspired from feedback control, and the remaining error is concentrated on the parameter space.

Diagnostics pour une paramétrisation efficace du filtre adaptatif

E. KPEMLIE, J.-M. BRANKART, N. FREYCHET, E. COSME, P. BRASSEUR & J. VERRON

Dans les applications du filtre de Kalman, une paramétrisation adaptative des statistiques d'erreur est souvent nécessaire pour éviter une divergence du filtre et empêcher également des estimations d'erreur incompatibles avec la réalité. Afin d'éviter cette divergence, le filtrage adaptatif introduit par Dee (1995) cherche à répondre aux insuffisances de la paramétrisation statistique des différentes erreurs du modèle ou de l'observation en utilisant les différences réelles entre les prévisions et les observations. Ainsi donc, les statistiques d'erreurs sont améliorées d'après une suite temporelle d'écart entre les prévisions et les observations, tout en tenant compte de la séquence des précédentes innovations, en donnant plus du poids aux dernières innovations avec une décroissance du poids vers le passé. La méthode est basée sur un formalisme de la fonction de vraisemblance et l'utilisation des innovations permettant de déterminer des paramètres adaptatifs optimaux en plus du vecteur d'état du système de Kalman. Cependant, une difficulté majeure de la méthode est que la complexité du calcul des paramètres adaptatifs est, en général plus complexe que l'estimation du vecteur d'état du système. Dans ce travail, nous montrons comment le problème du filtrage adaptatif décrit ci-dessus peut être formulé avantageusement pour un filtre racine carrée de rang réduit et estimer les paramètres adaptatifs optimaux avec un coût numérique supplémentaire négligeable. Une formulation spécifique au cas d'une analyse localisée est aussi présentée. Le schéma adaptatif développé est implémenté avec le filtre SEEK dans un modèle de circulation océanique simplifiée (le modèle Shallow-Water). Il en ressort que le filtre adaptatif donne une meilleure réponse que le filtre simple et reste prometteur dans l'évolution des outils d'assimilation de données. Ce sont ces pistes explorées dans ce travail. D. P. Dee (1995): On-line estimation of error covariance parameters for atmospheric data assimilation. Mon. Wea. Rev., 123, 1128-1145 .

Utilisation des ondelettes pour la spécification des corrélations locales d'erreur d'ébauche

H. VARELLA, L. BERRE & G. DESROZIERS

Actuellement, les corrélations d'erreur d'ébauche fournies par le système d'assimilation d'ensemble (AEARP) sont moyennées sur le globe par une méthode diagonale spectrale. Cette moyenne spatiale est utile afin de réduire le bruit d'échantillonnage induit par la petite taille de l'ensemble. Les corrélations obtenues sont néanmoins homogènes, alors qu'une approche hétérogène permettrait de mieux représenter les variations locales induites par la densité locale des observations, la climatologie locale et la situation météorologique. Une manière d'inclure de l'hétérogénéité est d'utiliser les ondelettes pour filtrer localement le bruit d'échantillonnage. Des études antérieures ont montré que l'utilisation des ondelettes permettait de représenter les variations géographiques des corrélations. Dans ce travail, l'approche ondelette a donc été testée et comparée, relativement à l'approche spectrale, dans le cadre du système d'assimilation 4D-Var du modèle global ARPEGE. Les matrices de corrélation ondelette et spectrale ont alors été estimées sur une période de calibration de trois semaines. Dans une première partie, les résultats du diagnostic des matrices de corrélation ainsi calculées ont montré que les ondelettes, contrairement au spectral, étaient aussi bien capables de représenter l'hétérogénéité des corrélations horizontales que verticales. Cette capacité permet ainsi aux ondelettes d'agir sur le calcul local des incréments d'analyse à travers une matrice de corrélation d'erreur d'ébauche hétérogène. Dans une seconde partie, une étude d'impact de cette matrice sur la performance des prévisions a ensuite été entreprise. Les résultats montrent que l'approche ondelette permet, relativement à l'approche spectrale, d'améliorer significativement les prévisions des variables d'intérêt sur tout le globe. Ils montrent également que l'amélioration est sensible à la période d'impact considérée, dans le sens où plus la période d'impact est proche de la période de calibration, meilleure est l'amélioration des prévisions.

Gaussianité des erreurs et méthodes de maximum d'entropie. Le projet PREVASSEMBLE.

O. TALAGRAND, C. PIRES & M. BOCQUET

Des statistiques effectuées sur le système d'assimilation du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) montrent que l'innovation associée aux observations de radiances satellitaires ne suit pas une loi gaussienne. La question se pose dans ces conditions de la pertinence de l'utilisation d'un schéma d'assimilation fondé sur la théorie de l'estimation statistique linéaire, qui n'est en général pas bayésienne dans le cas non-gaussien. Une méthode de maximum d'entropie, contrainte par les quatre premiers moments statistiques de l'innovation, est mise en œuvre, et comparée à l'estimation statistique linéaire. Les résultats suggèrent que la méthode de maximum d'entropie peut conduire, par rapport à l'estimation linéaire, à une réduction de 20 à 60% de l'erreur quadratique d'estimation.

On présentera par ailleurs le projet PREVASSEMBLE, soutenu par l'ANR, et dont l'objet est l'étude des méthodes d'ensemble pour l'assimilation et la prévision, dans leurs différents aspects : théorie, mise en œuvre algorithmique, validation, possibilités et limites, ... Trois partenaires participent à ce projet : l'IPSL, l'INRIA/IRISA et Météo-France. Les résultats déjà obtenus, et les travaux qui doivent les suivre, seront brièvement présentés et discutés.

Méthodes du second ordre pour la propagation d'incertitudes

F.-X. LE DIMET, I. GEZADZE & V. SHUTYAEV

On peut poser le problème de l'assimilation de données comme la reconstruction d'un système à partir d'informations hétérogènes en nature, qualité et densité: modèles, données, statistiques, images. L'approche variationnelle n'est pas qu'une approche algorithmique, elle permet de définir un Système d'Optimalité (S.O.) qui contient toute l'information disponible. Tous les ingrédients des méthodes variationnelles contiennent des erreurs qui se propagent vers l'analyse puis la prévision aussi est-il logique que l'évaluation de la propagation des erreurs parte du système d'optimalité. La dérivation du système d'optimalité met évidence un système adjoint du second ordre qui permettra de mettre en évidence les équations gouvernant la propagation des incertitudes. Dans le cas linéaire (ou faiblement non-linéaire) la covariance de l'erreur d'analyse est égale à (approchée par) le hessien de la fonction coût, qui est dérivé de l'adjoint au second ordre. Dans le cas non linéaire l'analyse de la propagation d'erreur permet de définir des problèmes auxiliaires conduisant à l'évaluation de termes correcteurs au hessien de la fonction coût. Ils sont évalués par la résolution, par la méthode de Newton Gauss, d'un problème d'optimisation. Ces termes de compensation peuvent être évalués dans des espaces réduits. On obtient des méthodes beaucoup plus efficaces que les méthodes dites d'"ensemble" et aussi fondées sur une base théorique. Des applications numériques seront présentées.

Développement d'un système d'analyse dans le sol pour la prévision numérique du temps

J.-F. MAHFOUF

(financement LEFE/ASSIM)

Je présenterai quelques résultats récents obtenus avec un système d'analyse dans le sol utilisant une approche de type Filtre de Kalman Etendu pour les modèles de prévision du temps de Météo-France. Dans un premier temps, une approche de type "Jacobiens analytiques" a été mise en oeuvre pour assimiler l'eau du sol dérivée du diffusiomètre ASCAT dans le modèle à aire limitée ALADIN. Cette approche simple a permis de coupler les assimilations atmosphérique et dans le sol. Dans un second temps, je décrirai comment l'information sur les précipitations a été utilisée pour améliorer le comportement du filtre. D'une part un ensemble de prévisions a été utilisé pour définir la matrice d'erreur de modèle et d'autre part une analyse de précipitations a été combinée aux autres types d'observations disponibles. Je conclurai sur les développements futurs envisagés, comme l'utilisation des données d'eau du sol de la mission SMOS.

SMOQA (synergie modèles/observations pour l'étude de la qualité de l'air)

G. FORÊT, G. DUFOUR, A. COMAN, B. GAUBERT, M. EREMENKO, A. BOYNARD, A. UNG & M. BEEKMANN

(financement LEFE/ASSIM)

Les modèles régionaux de pollution sont des outils centraux pour l'évaluation, la prévision et le contrôle de la qualité de l'air. Leur utilisation pour la prévision opérationnelle et l'évaluation des scénarios de réduction des émissions nécessite d'améliorer encore leur précision. Pour cela, nous avons fait le choix des méthodes d'assimilation et de modélisation inverse pour corriger et les champs simulés a posteriori et les cadastres d'émissions de polluants primaires. Nous présenterons les activités développées au cours de projet SMOQA pour l'assimilation des données de surface et satellite ainsi que pour l'inversion des sources biogéniques d'isoprène en Europe. Concernant la modélisation inverse, la principale partie

des travaux a consisté en une étude préparatoire à l'inversion des émissions biogéniques d'isoprène à partir des colonnes troposphériques du formaldéhyde. Grâce à un algorithme original de traceur, nous avons déterminé les zones sources les plus importantes et établi la dimension de l'espace des observations afin qu'elles représentent une contrainte pertinente pour l'inversion. Un premier inventaire des émissions d'isoprène a été inversé à partir des observations de SCIAMACHY, montrant ainsi l'apport significatif des observations satellitaires de formaldéhyde même dans une région, l'Europe, où les sources biogéniques d'isoprène restent faibles. Par ailleurs, un système d'assimilation des observations d'ozone a été développé dans le cadre du projet SMOQA. Ce système est basé sur le modèle de qualité de l'air CHIMERE couplé à un filtre de Kalman d'ensemble. Il permet actuellement l'assimilation des observations d'ozone de surface mais aussi des observations satellitaires (IASI). Nous proposons ici de décrire le système et les résultats obtenus avec les différentes données utilisées ainsi que les travaux en cours pour améliorer l'estimation des erreurs du modèle par l'ensemble utilisé dans la procédure d'assimilation.

Tests statistiques bayésiens pour la modélisation inverse opérationnelle suite à un rejet atmosphérique radioactif

V. WINIAREK, J. VIRA, M. BOCQUET, M. SOFIEV & O. SAUNIER

Dans le cas d'un rejet accidentel de particules radioactives émanant d'une centrale nucléaire, les autorités ont besoin de prévisions précises et en temps réel des champs de concentrations de radionucléides afin de prendre les décisions adéquates. Or la précision des panaches prédits est fortement dépendante de l'estimation du terme source. Dans de nombreuses études académiques, y compris avec des données réelles, les méthodes d'assimilation de données et de modélisation inverse ont montré leur efficacité dans la reconstruction du terme source. Dans cette étude, une méthode semi-automatique est proposée pour la reconstruction séquentielle du panache, en implémentant un algorithme d'assimilation de données séquentiel basé sur la modélisation inverse. L'objectif est de proposer un système suffisamment simple pour une utilisation opérationnelle, sans perdre en efficacité. Les performances du système ont été testées à travers une inter-comparaison des situations française et finlandaise. Deux modèles de dispersion ont été utilisés: Polair3D et SILAM, développés dans deux centres de recherche différents. Différentes localisations de rejet, de même que différentes situations météorologiques ont été testées. Les réseaux de surveillance existants et prévus pour un déploiement futur ont été utilisés et des erreurs d'observation importantes et réalistes ont été introduites. Bien que ces erreurs d'observation présentent en moyenne un biais non-nul, le système d'assimilation de données proposé permet d'atténuer le biais lors de la reconstruction de la source, améliorant les performances du système. De plus, dans le cas où la centrale responsable de l'accident n'est pas connue, des outils statistiques bayésiens et robustes ont été développés et testés pour départager les centrales suspectées.

RESUMES DES POSTERS

1. Assimilation de données satellitaires d'ozone à haute résolution sur l'Europe avec MOCAGE-VALENTINA.

J. BARRÉ, V.-H. PEUCH, J.-L. ATTIE, M. CLAEYMAN & L. EL AMRAOUI

L'assimilation est dans cette étude utilisée pour estimer le bilan d'ozone troposphérique et évaluer l'impact de données satellitaires d'ozone pour la prévision de la qualité de l'air. Un tel objectif nécessite de travailler à relativement haute résolution, de manière à permettre de représenter la variabilité des processus impliqués (panaches dans les basses couches, filaments dans la haute troposphère). Ici, nous utilisons le modèle de chimie transport MOCAGE (CNRM) et le coupleur PALM (CERFACS) via l'interface VALENTINA. Dans cette étude, trois sondeurs spatiaux : OMI (Ozone Monitoring Instrument : Aura/NASA), IASI (Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge : MetOp A/CNES) qui restituent les colonnes totales d'ozone et MLS (Microwave Limb Sounder : Aura/NASA) qui restitue des profils d'ozone dans les niveaux de la basse stratosphère (LS) et autour de la tropopause (UT/LS), sont assimilés à haute résolution (grille régulière 0.2° , soit environ 20 km) au sur l'Europe. De par la sensibilité des ces instruments majoritairement en stratosphère et en basse stratosphère, la contrainte affectée au modèle sur le champ d'ozone se situe dans ces régions de l'atmosphère. Dans cette étude nous estimons l'impact qu'a cette assimilation sur le bilan d'ozone troposphérique (au travers notamment d'une meilleure contrainte de la variabilité des échanges au niveau de la tropopause) ainsi que l'effet de la résolution (0.2° ou 2°) sur ce même bilan. Un cas particulier d'intrusion d'ozone stratosphérique est montré. Les structures filamentaires d'ozone au niveau de l'UT/LS et de la troposphère libre sont renforcées avec l'assimilation de MLS ; en meilleur accord avec les données in-situ aéroportées MOZAIC que la simulation brute du modèle. Enfin une étude de la variabilité temporelle de la colonne troposphérique montre que cette variabilité est avant tout pilotée par la haute troposphère mais aussi par la troposphère libre. L'assimilation a pour résultat d'augmenter la variabilité temporelle sur la colonne troposphérique et en particulier au niveau de la haute troposphère.

2. Assimilation variationnelle dans NEMO avec YAO : premiers résultats

M. BERRADA, J. BRAJARD, C. DELTEL, M. CRÉPON, F. BADRAN & S. THIRIA

YAO est un logiciel d'aide à l'assimilation variationnelle. Il permet de coder un modèle direct qui représente le phénomène physique dans un formalisme de graphe modulaire. Cette approche modulaire permet un codage semi-automatique de l'adjoint nécessaire au calcul du gradient de la fonction coût dans le cadre de l'assimilation variationnelle. Nous considérons ici le modèle NEMO qui est un modèle de simulation océanique, devenu une plate-forme Européenne de la modélisation de l'océan. Il regroupe plusieurs composants du système climatique océanique : la circulation océanique et les transports de chaleur associés, la glace de mer et la biogéochimie marine. Nous avons implémenté dans le formalisme de YAO la configuration GYRE de NEMO qui est un modèle simplifié de la dynamique de la région du Gulf Stream. Nous montrons ici les tests de l'adjoint et quelques expériences jumelles qui montrent l'efficacité du code.

3. Un nouvel algorithme d'assimilation de données: le nudging direct et rétrograde avec inversion de la diffusion

J. BLUM, D. AUROUX, P. BANSART & E. COSME
(financement LEFE/ASSIM)

L'algorithme BFN du nudging direct et rétrograde, introduit en 2005 par Auroux et Blum, consiste à résoudre les équations directes du modèle avec un terme de rappel aux observations, puis en repartant de l'état final ainsi obtenu, à résoudre les mêmes équations de façon rétrograde avec un terme de rappel opposé en signe à celui du nudging direct. On obtient à la fin de la résolution rétrograde une première estimation de l'état initial et on répète ce procédé de façon itérative jusqu'à convergence de l'état initial. On propose ici une amélioration de cet algorithme visant à lui donner plus de stabilité numérique, en inversant le signe de la viscosité dans la résolution rétrograde, ce qui ne nuit pas à la physique du phénomène dans la mesure où ce terme correspond à une paramétrisation des phénomènes sous-maille ou à une stabilisation numérique et non à une vraie diffusion physique. L'algorithme ainsi modifié a été comparé à l'algorithme du BFN usuel, à la méthode quasi-inverse de Pu-Kalnay ainsi qu'à une méthode variationnelle classique pour une équation de Burgers 1D avec ou sans chocs. Des tests sont en cours sur un modèle aux équations primitives avec assimilation de données synthétiques altimétriques ou in situ (température ou courantométrie). Les résultats sont extrêmement encourageants du fait de la simplicité de mise en oeuvre de l'algorithme (comparativement au 4D VAR par exemple), à l'absence de linéarisation et à la rapidité de convergence. De plus l'estimation de l'état final sur la période d'assimilation de données est en général plus performante qu'avec un algorithme variationnel, notamment dans le cas d'observations bruitées, et la prédiction qui suit sur une période de temps sans assimilation de données est améliorée par rapport à un algorithme du type 4D-VAR.

4. Modèle adjoint et assimilation de données pour un modèle d'évolution de calotte polaire

B. BONAN, M. NODET & C. RITZ

Par leurs gains et pertes en masse, les glaciers et calottes polaires jouent un rôle majeur dans l'évolution du niveau de la mer. Des observations récentes montrent que d'importants changements dans la vitesse d'évolution des calottes polaires en Antarctique et au Groenland ont lieu. Cela peut suggérer que des changements irréversibles ont été enclenchés, d'où des impacts encore mal évalués sur l'évolution du niveau des mers. Il existe de nombreux modèles de calotte déterminant l'évolution de la hauteur de la calotte sur une période de temps en fonction de différents facteurs tels les conditions climatiques (par exemple la température en surface). Cependant, ces conditions sont souvent très mal connues. Par contre, on dispose d'un certain nombre d'information sur la calotte elle-même, tels l'évolution de son volume au cours du temps et son étendue à certains instants. Tirer le meilleur parti des modèles et des observations est l'objet de l'assimilation de données. On présentera tout d'abord le modèle simplifié d'évolution de calotte polaire utilisé (inspiré d'un modèle 2D, Winnie, développé par le LGGE de Grenoble) ainsi que le modèle adjoint associé. On s'intéressera aussi à l'assimilation de l'évolution du volume d'une calotte polaire au cours du temps, ainsi que de son étendue, afin de retrouver le forçage climatique, dans le cadre d'expériences jumelles. Enfin, on terminera sur quelques perspectives sur l'assimilation de données en glaciologie.

5. Extensions non-gaussiennes du filtre SEEK pour l'assimilation de données dans les modèles couplés physico-biogéochimiques de l'océan

P. BRASSEUR, D. BÉAL, J.-M. BRANKART, G. BROQUET, F. CASTRUCCIO, M. DORON,
C. FONTANA, C. LAUVERNET, Y. OURMIÈRES & J. VERRON
(financement LEFE/ASSIM)

Les méthodes ensemblistes constituent un cadre méthodologique séduisant pour examiner la question de l'assimilation de données en présence de statistiques d'erreur non-gaussiennes. Dans cet exposé, nous proposons de décrire quelques adaptations du filtre de Kalman qui ont été réalisées afin de prendre en compte efficacement le caractère non-gaussien des distributions d'erreur représentées par des ensembles. Ces développements ont été réalisés dans le contexte applicatif de l'assimilation de données dans les modèles couplés physico-biogéochimiques de l'océan. La première adaptation permet d'intégrer explicitement des contraintes d'inégalités (comme des conditions d'équilibre hydrostatique ou des contraintes de positivité des concentrations de traceurs) dans la procédure de filtrage, sous une hypothèse de distributions gaussiennes tronquées. La seconde comporte une étape d'analyse non-linéaire qui procède par transformation anamorphique locale des variables de contrôle. Ces extensions ont pu être directement introduites dans le cadre du SEEK (filtre de Kalman de rang faible permettant une mise en oeuvre à coût réduit dans des modèles numériques de grande taille) à la simple condition de remplacer l'étape de prévision linéaire par une prévision d'ensemble. D'autres voies méthodologiques sont en cours d'exploration dans le cadre de ce SEEK d'ensemble, visant notamment à améliorer l'efficacité algorithmique de l'étape d'analyse par une approche de superposition de distributions gaussiennes. Des exemples illustreront la supériorité des méthodes non-linéaires pour l'estimation de l'état et la réduction des incertitudes sur les paramétrisations des processus biologiques modélisés.

6. Assimilation des observations satellitaires dans un modèle de QA

A. COMAN, G. FORÊT, M. EREMENKO, G. DUFOUR, B. GAUBERT, A. BOYNARD, M.
BEEKMANN, J. M. FLAUD & G. BERGAMETTI

Dans le domaine de la qualité de l'air, un des moyens classiquement utilisé pour améliorer les performances des modèles de chimie-transport est l'assimilation de données. Dans le cas de l'ozone, un des polluants les plus surveillé, cette approche a déjà été mise en oeuvre pour utiliser les mesures de surface, réalisées par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air, pour corriger les champs d'ozone de surface simulés par les modèles. Il a été montré que l'assimilation permet de corriger significativement les champs simulés, en revanche l'effet de cette correction se dissipe assez rapidement (moins de 24 heures), ce qui limite son utilité pour la prévision. Dans ce cas, une des limites de cette approche tient à la nature des observations dont la couverture spatiale reste limitée. Pour l'ozone, les observations satellitaires produites par les sondeurs de dernière génération, et notamment par le sondeur IASI, permettent d'envisager une meilleure contrainte pour les modèles à travers leur assimilation. On présente ici l'assimilation de colonnes troposphériques (0-6 km) d'ozone sur les champs simulés par le modèle Chimere sur une simulation couvrant un mois (Juillet 2007), en utilisant un Filtre de Kalman d'Ensemble. Les corrections apportées par les observations IASI sur les champs d'ozone simulés sont analysées et une évaluation des performances du système est réalisée à partir d'observations indépendantes (sondes, MOZAIC, stations de surface).

7. Problèmes de lissage dans un cadre Bayésien et solutions linéaires gaussiennes

E. COSME, J. VERRON, P. BRASSEUR, J.-M. BRANKART, J. BLUM & D. AUROUX

Les algorithmes de lissage sont de plus en plus utilisés dans l'étude des fluides géophysiques, mais le panorama global des différentes méthodes peut parfois paraître confus. Nous proposons une synthèse des différents algorithmes de lissage linéaires gaussiens (lisseur séquentiel à intervalle fixe, lisseur à retard fixe, lisseur d'ensemble, lisseur direct-rétrograde ou RTS, et lisseur à double filtre), en précisant la formulation Bayésienne des problèmes qu'ils résolvent et des stratégies qu'ils emploient pour ce faire.

8. Évaluation ensembliste des performances de réseaux d'observation spatiaux et in situ dans l'océan côtier

P. DE MEY, N. AYOUB, J. LAMOUREUX & M. LE HÉNAFF

Dans ce poster, nous cherchons à caractériser objectivement la performance de réseaux d'observation satellitaires et à la mer en termes de valeur ajoutée à des estimés a priori. Notre approche utilise les outils classiques de la théorie de l'estimation, qui sont communs avec l'assimilation de données, mais ne dépend pas d'une méthode d'assimilation particulière. L'objectif est de fournir des informations objectives sur la performance des réseaux, étant donnée une description des erreurs de l'estimé (typiquement une prévision modèle), aux fins par exemple d'aider des agences à prendre des décisions de déploiement, qui sont en général coûteuses. Ce besoin est particulièrement évident dans les zones côtières où les déploiements sont plus récents et encore non pérennes, et où les intérêts économiques sont particulièrement présents. L'approche initiale, publiée par Le Hénaff et al. (2009), utilise une diagonalisation de la Représenter Matrix, par exemple obtenue par modélisation stochastique. Dans ce poster, nous montrons une nouvelle formulation basée sur les vecteurs singuliers de la matrice S de Sakov et al. (Tellus, 2010), qui est construite à partir de la projection de la matrice d'échantillons produite par une méthode d'ensemble dans l'espace d'observation. Des exemples de modes de réseau et de représentants modaux issus d'une modélisation stochastique ou d'un filtre de Kalman d'ensemble (EnKF) sont montrés dans les zones d'intérêt de l'équipe (actuellement le Golfe de Gascogne). En outre, on montre l'intérêt potentiel de cette approche pour la validation des ensembles produits par un EnKF (consistency analysis). Cette étude s'inscrit également dans le projet « Multisensor Impact assessment in Coastal and Shelf Seas » (MICSS) soumis dans le cadre de l'Ocean Surface Topography Science Team et sélectionné par le CNES et la NASA en 2008 (PI: P. De Mey; Co-Is: N. Ayoub, F. Birol, J. Lamouroux et F. Lyard).

9. Réduction de l'incertitude sur trois paramètres principaux d'un modèle biogéochimique dans un modèle océanique couplé physique-biogéochimique 3D de l'Atlantique Nord

M. DORON, P. BRASSEUR, J.-M. BRANKART & C. FONTANA

Un modèle couplé physique-biogéochimique OPA/NEMO (dans une configuration Drakkar, Barnier et al. 2006) et LOBSTER (6 variables biogéochimiques, Lévy et al. 2005) est utilisé dans une configuration 3D sur l'Atlantique Nord. Afin d'étudier la possibilité de réduire l'incertitude sur les paramètres-clés du modèle biogéochimique (croissance et mortalité du phytoplancton, broutage du zooplancton), des expériences du type Monte Carlo avec perturbation des paramètres sont effectuées. La réponse du modèle sur les variables biogéochimiques à 30 jours est nonlinéaire, non-Gaussienne et spatialement hétérogène. Des expériences jumelles ont permis de montrer qu'il était possible d'estimer les paramètres à partir d'observations de surface de phytoplancton, à condition de prendre en compte la réponse du modèle définie par l'ensemble. Ceci est fait au moyen de l'introduction d'une transformation nonlinéaire (anamorphose) locale, qui s'appuie sur les percentiles de la distribution marginale des variables pour « redresser » la distribution sur une Gaussienne (Béal et al. 2010). L'analyse peut alors se faire dans l'espace anamorphosé dans le contexte d'estimation optimale, sous l'hypothèse de Gaussianité et avec l'approximation de rang réduite, dans le cas où le vecteur d'état est augmenté (variables plus paramètres). Les résultats obtenus pour les expériences jumelles sont satisfaisants (Doron et al. en préparation) et montrent que l'on peut réduire l'incertitude sur les paramètres dans le cas où l'on utilise la transformation d'anamorphose. Les perspectives sont d'appliquer cette méthodologie à un cas plus réaliste, où les observations sont des données satellitaires de couleur de l'océan, (concentration en chlorophylle a, proxy du phytoplancton), pour réduire l'incertitude sur les paramètres biogéochimiques.

10. Contrôle du courant nord méditerranéen par l'altimétrie côtière d'AltiKa : une approche par simulation du système d'observation (OSSE)

A. DUCHEZ, J. VERRON & J.-M. BRANKART

La circulation côtière du golfe du Lion est à la fois influencée par le courant nord méditerranéen (CNM: branche nord de la circulation globale méditerranéenne) et forcée par une grande variété de forçages atmosphériques. Modéliser correctement le CNM est d'une importance cruciale afin de représenter correctement la circulation de ce golfe ainsi que les processus de plus fine échelle. Pour ce faire, une étude d'optimisation des systèmes d'observation (OSSE) utilisant le filtre SEEK a été mise en place dans une configuration régionale au $1/16^\circ$. Des statistiques d'erreur adaptées à cette expérience ont alors été employées. La base de données synthétiques utilisée pour ces expériences (cousines) est composée de données altimétriques le long des traces du satellite AltiKa en conjonction de profils thermohalins in situ. Elle a été extraite d'une configuration régionale au $1/64^\circ$ dont la résolution permet une représentation réaliste de la circulation générale ainsi que des processus de plus fine échelle de ce golfe. Afin d'évaluer la qualité de cette expérience, des diagnostics statistiques ainsi que d'autres critères d'analyse de nature plus physique basés sur l'amélioration de la représentation du CNM ont été mis en place. Une comparaison entre une simulation libre au $1/16^\circ$ et cette expérience cousine montre que cette assimilation apporte une amélioration significative de la forme, la position et des caractéristiques thermohalines du CNM ainsi que de sa variabilité mésoéchelle et saisonnière. De manière connexe, l'assimilation a aussi permis d'améliorer la représentation, voire faire apparaître sur le plateau, des processus de fine échelle qu'une simulation libre au $1/16^\circ$ n'est pas capable de modéliser correctement. On note par exemple les up-downwellings côtiers, la formation d'eau dense et son cascading le long du talus ou la forme et la position du panache du Rhône qui influencent considérablement les caractéristiques des eaux du plateau.

11. Assimilation séquentielle de données couleur de l'eau dans un modèle couplé physique-biogéochimique de l'Atlantique Nord

C. FONTANA, P. BRASSEUR, J.-M. BRANKART & M. DORON

L'objectif de cette étude est de démontrer le gain, en termes de réalisme, apporté par l'assimilation de données satellitaires de chlorophylle dans un modèle couplé de grande échelle. Nous utilisons dans ce but le modèle physique NEMO 1/4° dans sa configuration Atlantique Nord couplé au modèle biogéochimique LOBSTER décrivant le cycle de l'azote à travers 6 variables d'états. Nous procédons alors à une simulation de l'année 1998 forcée par des champs atmosphériques réalistes issus des réanalyses ECMWF. Dans un premier temps, nous laissons le modèle évoluer selon sa dynamique propre. Nous comparons ensuite cette première simulation à différentes simulations assimilant des données couleur de l'eau SeaWiFS à travers un filtre de Kalman mis en place à l'aide de l'outil SESAM. Le filtre utilisé est de type SEEK, les modes d'erreurs sont obtenus à partir d'états du système sur une période temporelle englobant la date d'analyse considérée. Le vecteur d'état sur lequel sont appliquées les corrections multivariées contient l'ensemble des variables biogéochimiques. Après avoir paramétré la méthode, nous analysons comment le réalisme de la simulation est amélioré par l'assimilation de données. Cette analyse est obtenue en comparant différentes variables d'états biogéochimiques à des jeux de données in situ indépendants du processus d'assimilation. Les résultats montrent néanmoins certaines faiblesses du modèle dans des régions, notamment côtières, où des processus primordiaux ne sont pas pris en compte (e.g. apports de nutriments terrigènes). Ce travail décrit une première approche du problème, les perspectives offertes sont nombreuses. Parmi celles-ci on peut citer la mise en place de système de prédiction opérationnel ou encore le développement d'une méthode permettant d'obtenir des climatologies biogéochimiques réalistes à l'échelle globale.

12. Assimilation séquentielle dans un modèle haute résolution de l'Atlantique Tropical

N. FREYCHET, E. COSME, E. KPEMLIE & P. BRASSEUR

L'assimilation de données en océanographie s'est fortement développée depuis l'arrivée de réseaux d'observations couvrant une large partie de l'océan (satellites et flotteurs). La production de réanalyses ou la création d'états initiaux optimaux pour les prévisions en sont les principaux enjeux. Le filtre de Kalman de rang réduit (SEEK) est largement utilisé dans la communauté océanographique. Néanmoins, sa forme séquentielle peut produire une solution analysée discontinue, tant spatialement (dans le cas d'observations éparses) que temporellement. Ce problème peut être en partie corrigé par l'utilisation d'un lisseur, qui introduit des observations "futurs" dans le processus d'estimation. L'effet du lisseur SEEK (basé sur le filtre SEEK) est évalué avec une configuration réaliste de l'Atlantique Tropical. Nous présenterons les obstacles rencontrés lors de la mise en place du lisseur, ainsi que les bienfaits déjà identifiés. En particulier, il est montré que l'utilisation de forçages atmosphériques de haute fréquence temporelle peut être dramatiquement nuisible à l'assimilation d'observations altimétriques. Parmi les bienfaits, il est constaté que le lisseur est capable d'apporter une valeur ajoutée importante au filtre, en réduisant les erreurs présentes dans des directions instables du modèle, que le filtre n'a pas pu corriger. La solution lissée se révèle alors être un meilleur état initial dans le cadre d'une prévision.

13. Méthodes inverses en glaciologie pour l'initialisation du champ de glissement à la base des calottes polaires

F. GILLET-CHAULET, O. GAGLIARDINI, C. RITZ, M. NODET & G. DURAND

Les glaciers et les calottes polaires, en perdant ou gagnant de la masse, jouent un rôle majeur sur le niveau des mers. De nombreuses observations montrent clairement que les vitesses d'écoulement de l'Antarctique et du Groenland ont été profondément modifiées au cours des 10 dernières années, indiquant que de grands et peut-être irréversibles changements ont été initiés. Le dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) insiste sur le manque de connaissances concernant les processus moteurs de l'accélération observée des glaciers émissaires et conclut qu'aucune projection fiable de niveau des mers ne peut être faite pour le XXI^e siècle.

Les conditions à la base des calottes polaires, notamment le glissement de la glace sur le socle, contribuent en grande partie à la vitesse d'écoulement des glaciers émissaires. Les paramètres de la loi de glissement dépendent de la nature du socle et de la quantité d'eau, et sont très mal connus. Nous utilisons deux méthodes inverses pour contraindre le glissement à la base d'une calotte à partir de la connaissance des vitesses de surface:

- une méthode inverse de Robin adaptée récemment à la glaciologie par Arthern et Gudmundsson (J. Glaciol., 2010). Cette méthode repose sur la minimisation de la différence des vitesses basales obtenues par la résolution du problème direct classique où la surface libre est à contrainte nulle et le problème direct où les vitesses mesurées en surface sont imposées comme conditions de Dirichlet ;
- une méthode de contrôle reposant sur le fait que les équations de Stokes sont auto-adjointes pour une rhéologie linéaire.

Ces méthodes ont été implémentées dans le code éléments finis Elmer/Ice. Nous les appliquons à la calotte groenlandaise, et les distributions du paramètre de glissement obtenues par ces deux méthodes sont comparées et analysées. Ceci nous permet d'initialiser notre modèle à l'état présent pour fournir des scénarios réalistes de l'évolution de la dynamique de l'écoulement de la calotte dans le siècle à venir.

14. Inversion des conditions basales d'un glacier soumis à un « surge ».

Maxime JAY-ALLEMAND, Fabien GILLET-CHAULET & Olivier GAGLIARDINI

L'objectif de cette étude est d'étudier la variation des conditions de frottement à la base d'un glacier soumis à un « surge ». Ce phénomène, nommé « foirage » en français, est observé sur certains glaciers qui alternent des périodes d'accalmie de plusieurs années et de courtes périodes de foirage où les vitesses augmentent très significativement (un à deux ordres de grandeur). Pour cela, nous appliquons une méthode inverse de Robin adaptée récemment à la glaciologie par Arthern et Gudmundsson (J. Glaciol., 2010). Cette méthode repose sur la minimisation de la différence des vitesses basales obtenues par la résolution du problème direct classique où la surface libre est à contrainte nulle et le problème direct où les vitesses mesurées en surface sont imposées comme conditions de Dirichlet. La méthode est appliquée au glacier Variegated situé en Alsaka, qui comme son nom l'indique est soumis à de fortes variations de vitesses lors des périodes de surge. Pour ce glacier, nous possédons des données de surface (topographie et vitesses horizontales) le long d'une ligne d'écoulement centrale et à différentes dates pour la phase calme de 1966 à 1981 et la phase de surge qui lui a succédé de 1982 à 1983 (Raymond et Harrison, J. Glaciol., 1988). Dans un premier temps, pour chaque jeu de données, la distribution du frottement à la base du glacier est déterminée afin que les vitesses modélisées reproduisent les vitesses observées en réalisant un calcul diagnostique basé sur la géométrie de surface observée. Dans un deuxième temps, les distributions du frottement basal sont analysées et intégrées dans un calcul pronostique couvrant l'ensemble de la période de mesures, depuis le début de la

période calme jusqu'à la fin de la période de surge. Les changements de géométrie du glacier en fonction du temps sont alors comparés à ceux mesurés et les variations temporelles et spatiales du frottement basal lors du phénomène de surge sont quantifiées. Ces variations sont alors interprétées en terme de modification des pressions d'eau dans le réseau hydrologique sous-glaciaire.

15. État de l'art des applications développées sous le semi-générateur de code adjoint YAO : interface industrielle par la société CLIMMOD

A. KANE, Z. POUSSI & T. LAUVAUX

La volonté de modéliser des processus de plus en plus complexes a conduit à l'élaboration de systèmes numériques très avancés. Cependant face aux nombreux degrés de liberté peu contraints qui subsistent dans de tels systèmes, l'assimilation de données est devenue au fil des années une discipline à part entière incontournable pour des simulations de qualité surtout pour les systèmes opérationnels tels que les services de prévision météorologique. Jouissant d'une théorie fondamentale robuste, la mise en oeuvre d'un procédé d'assimilation peut cependant se révéler fastidieux et prohibitif suivant la méthode choisie restreignant ainsi le réalisme et la dimensionnalité des études en particulier pour les méthodes variationnelles. Le logiciel YAO développé au LOCEAN apporte une interface logicielle facilitant la mise en oeuvre des méthodes de contrôle en générant semi automatiquement un adjoint pour un algorithme de descente. En plus de cet apport non négligeable la société CLIMMOD, basée en Ile-de-France spécialisée en développement de codes numériques et en assimilation de données, propose un service complémentaire au logiciel YAO en assurant des formations, le développement d'application et la livraison clé en main d'adjoint d'application avec l'interfaçage des outils nécessaires pour mener à bien les expériences d'assimilation variationnelle. Au delà de l'aspect didactique que propose CLIMMOD, une part non négligeable des développements méthodologiques informatiques se retrouve déchargée du chercheur pour le consacrer à sa problématique scientifique et à la formulation du système à résoudre. Après avoir décrit succinctement YAO, nous voulons présenter à travers ce meeting un état de l'art sur les applications YAO développées en géophysique et le type de partenariat que propose CLIMMOD à la communauté scientifique. La mise en place de collaboration pour co-développer des outils pourra être abordée.

16. Assimilation des observations nuageuses/pluvieuses au-dessus des surfaces continentales : limitations et progrès accomplis

F. KARBOU, P. BAUER, A. GEER & W. BELL

(financement LEFE/ASSIM)

En assimilation de données, les observations satellitaires représentent la majorité des observations utilisées. Cependant, et malgré l'utilité de ces observations pour la prévision numérique du temps, en particulier les micro-ondes, leur exploitation dans les modèles est encore insuffisante. Cette sous exploitation est plus importante en cas de nuages/pluie et au-dessus des surfaces continentales. Le système IFS du CEPMMT exploite de façon opérationnelle les radiances nuageuses issues de quelques imageurs micro-ondes mais uniquement sur mer. Par ce projet, on cherche à étendre l'assimilation des observations micro-ondes nuageuses (1) aux surfaces continentales et (2) aux sondeurs micro-ondes qui renseignent sur la structure verticale de la température et d'humidité contrairement aux imageurs qui reflètent plutôt une information intégrée à la surface. Les premiers résultats obtenus de cette étude seront présentés. L'accent sera mis sur les solutions apportées pour mieux décrire l'émissivité des surfaces continentales. Nous évaluerons également le gain potentiel pour le système d'assimilation en termes de qualité des analyses et des prévisions.

17. Assimilation variationnelle pour la datation croisée de forages profonds en Antarctique et Groënland

B. LEMIEUX-DUDON, H. TOYE MAHAMADOU KELE & E. BLAYO

Les carottes de glace de l'Antarctique et du Groenland ont archivé les conditions environnementales et climatiques du passé. Les couches de neige successives forment un matériau poreux qui est advecté puis densifié jusqu'à la zone de fermeture des pores où le névé se transforme en glace en piégeant des échantillons de gaz de l'atmosphère. Des analyses physiques et chimiques sur le gaz et la glace permettent de construire des enregistrements fonction de la profondeur. Pour élaborer des scénarios climatiques à partir de ces enregistrements, il faut construire les chronologies gaz et glace des forages étudiés (i.e., relations profondeur-âge). Les chronologies estimées doivent être précises en terme absolu, car les études paléoclimatiques portent notamment sur les relations de phase entre les enregistrements climatiques locaux (souvent un proxy de la température locale du site de forage) et les variations de l'insolation aux grandes échelles de temps (le forçage climatique). Elles doivent aussi être précises en valeur relative car la comparaison des enregistrements issus de forages différents, en particulier localisés soit au Groenland soit en Antarctique, permet d'étudier la dynamique du climat Nord-Sud.

Les modèles glaciologiques de datation (densification du névé, écoulement de la glace, champ de température, de taux d'accumulation et d'épaisseur de la calotte) appliqués à un forage à la fois, permettent d'estimer les chronologies gaz et glace. Ces modèles directs sont néanmoins entachés d'erreur de nature essentiellement non paramétrique. S'ils modélisent en général correctement les tendances des échelles d'âge, ils ne sont pas en mesure de reproduire les variations rapides que l'on retrouve dans les jeux de données. A fortiori, assimiler ces jeux de données pour contraindre les paramètres modèle par méthode inverse pose des problèmes, même lors du traitement d'un forage unique (Parrenin et al, 2007,a,b; Buiron et al, 2010 soumis).

Les jeux de données sont souvent des observations indirectes et proviennent de mesures réalisées à la fois sur les carottes de glace mais aussi sur d'autres archives paléo (e.g., comptage de couches annuelles, événements paléo-magnétiques, couche de cendre volcanique documentée, synchronisation d'archive sur les fréquences orbitales, etc.). Parmi ces observations, les marqueurs dits stratigraphiques (e.g., méthane de l'atmosphère) sont essentiels pour synchroniser les enregistrements et assurer la cohérence des chronologies estimées pour différents forages. En effet, ils ont la caractéristique de présenter des variations synchrones dans les différents forages, à une échelle soit locale (e.g., Groenland), soit globale (globe tout entier).

Un code de datation croisée a été développé pendant la thèse de B. Lemieux-Dudon (2009). Il s'agit d'une approche Bayésienne et variationnelle qui repose sur l'identification de paramètres d'erreur modèle (des fonctions de la profondeur qui corrigent 3 grandeurs clé qui conditionnent la datation: taux d'accumulation, fonction d'amincissement et profondeur de piégeage du gaz). Cette approche permet d'estimer les chronologies gaz et glace de plusieurs forages simultanément en utilisant des contraintes de nature variée, dont des marqueurs stratigraphiques. Cette méthode a été appliquée (Lemieux-Dudon B. et al, 2010) pour calculer simultanément les chronologies de 3 forages d'Antarctique (EPICA Dome C, EPICA Droning Maud Land, Vostok) et un forage du Groenland (North Grip). Elle a aussi permis d'estimer la chronologie du forage de Talos Dome (Stenni B., Buiron D. et al, Nature Geosciences, 2010, accepted; Buiron et al, 2010 soumis).

18. Reduced-order minimax state estimation

V. MALLET & S. ZHUK

We introduce a new filtering approach for high-dimensional numerical systems. It is based on a reduction of the high-dimensional system to some low-dimensional Differential-Algebraic Equation (DAE), and on the application of linear minimax filtering to the resulting DAE. In the minimax approach, the model error and the observational error can be deterministic or stochastic, and of any shape provided they have bounded energy. In practice, it is assumed that the errors belong to some ellipsoid. Based on this information, the algorithm describes a reachability set that contains all states consistent with the model, the observations and the assumptions on the errors. In the non-reduced version of the filter, the estimator of the state is taken as Chebyshev center of the reachability set. Note that the non-reduced version of the filter coincides with the Kalman filter provided there is no systematic error and the description of the ellipsoid is reinterpreted in terms of variances. The non-reduced filter is intractable because it involves solving a high-dimensional matrix Riccati equation. The formulation of the filter for DAE allows to estimate only a part of the state or a projection of the state onto some subspace (e.g., computed from a proper orthogonal decomposition). The reduced-model error is decomposed into the projection of the model error onto the subspace and a commutation error between the projection operator and the model. The reachability set is provided in the subspace. Computing the reachability set and the estimator for the reduced state is tractable whenever the dimension N of the reduced space is low enough—the algorithm involves N calls to the tangent linear model. The performance of the filter will be illustrated in the talk, with a large quadratic model or with full air quality simulations if available at the time.

19. Ajustement optimal des paramètres de forçage atmosphériques dans des simulations océaniques globales

M. MEINVIELLE, J.-M. BRANKART, P. BRASSEUR & B. BARNIER

La température de surface des océans (SST) est beaucoup mieux estimée par l'observation spatiale que ne le sont les flux air-mer ou les variables atmosphériques proches de la surface permettant leur estimation. Or les modèles de circulation générale océanique utilisés pour les prévisions opérationnelles ou les simulations de la variabilité climatique récente utilisent pour leurs conditions limites de surface des formulations aérodynamiques globales (Bulk) qui ne font pas directement usage de cette SST. On peut donc dire que les modèles n'utilisent pas, sauf lorsqu'elle est assimilée, une des variables océaniques les mieux mesurées. L'objectif de ce travail est donc de définir une nouvelle approche de forçage des modèles de circulation océanique, qui permette de tirer pleinement profit de l'information sur les échanges air-mer qui est contenue dans la SST. Plus précisément, il s'agit d'évaluer un jeu de corrections de paramètres de forçage atmosphériques pour la réanalyse ERAinterim qui couvre la période de 1989 à 2007, par assimilation de données de SST dans la configuration globale ORCA2 du modèle NEMO. Par la suite, ce problème pourra être étendu à d'autres observations d'origine spatiale (salinité de surface avec SMOS). Pour atteindre cet objectif, l'idée est d'utiliser une méthode avancée d'assimilation de données pour corriger les champs atmosphériques de surface d'une façon qui soit cohérente avec notre connaissance des incertitudes sur les flux air-mer. Pour cela, nous utilisons une méthode séquentielle basée sur le filtre SEEK, combinée à des prévisions d'ensemble pour évaluer l'effet des incertitudes sur les paramètres. Le vecteur de contrôle est augmenté des paramètres atmosphériques, et une hypothèse de distribution de probabilité gaussienne tronquée est introduite pour assurer l'obtention de corrections réalistes. Les premiers résultats montrent qu'on peut évaluer, à l'échelle globale et sur une longue période, des corrections de paramètres de forçage réalistes qui mènent à une meilleure cohérence entre l'état du modèle libre, et les observations de surface.

20. Glider assimilation in the Solomon sea

A. MELET, J. VERRON & J.-M. BRANKART

In the southwest Pacific, the western boundary currents (WBC) connect the tropics to the equator at thermocline level. Therefore, they may impact the equatorial Pacific heat and transport budgets and play a role in the climate system. Those WBC transit through the Solomon Sea before reaching the equator. As available observations of the region are sparse, modeling provides a useful complementary tool to describe the oceanic circulation in this region, which shows high variability as shown by altimetric and modeling analysis. An integrated view of the circulation combining numerical simulation and available observations, through data assimilation, is probably the way to provide a realistic description of the Solomon Sea. Glider monitoring of the Solomon Sea circulation has been operated since 2007. Those autonomous underwater vehicles provide high temporal and along-trajectory resolution temperature and salinity data down to about 600 m, which are of interest for the control of meso-scale variability of the Solomon Sea WBC. This is the motivation of this work which focuses on the control of the Solomon Sea WBC, the New Guinea Coastal Undercurrent (NGCU), through assimilation of glider and other observational data. At this stage, the objective is rather to assess the capability of existing or expected observing system than to perform realistic data assimilation experiments per se. An observing system simulation experiments (OSSE) strategy is implemented in a twin experiment context to study the ability of glider observations to constrain the NGCU. From a methodological point of view, we performed original data assimilation in a multigrid model through a local reduced order analysis, based on a sequential scheme derived from the SEEK filter. Observations are located in a $1/12^\circ$ model of the Solomon Sea which is interactively nested in a $1/4^\circ$ southwest Pacific model, itself embedded through open boundary conditions in a global $1/4^\circ$ OGCM.

21. Modélisation des corrélations de l'erreur d'ébauche dans le système NEMOVAR

I. MIROUZE & A. WEAVER

Dans le système d'assimilation variationnelle de données océaniques NEMOVAR, les covariances de l'erreur d'ébauche sont basées sur une modélisation de corrélations quasi-gaussiennes à l'aide d'une équation de diffusion dont la solution est normalisée pour garantir un maximum à un. Lorsque cette équation est discrétisée temporellement par un schéma explicite, l'algorithme numérique résultant est soumis à un critère de stabilité et son coût (nombre d'itérations) dépend alors de la résolution du modèle et des échelles de corrélation utilisées. Pour palier ces limitations, une discrétisation implicite peut être préférée mais nécessite alors de résoudre un système linéaire à chaque itération. Les caractéristiques analytiques de la fonction de corrélation issue de la résolution implicite d'une équation de diffusion en dimension un (1D) sont tout d'abord établies, et en particulier son appartenance à la famille des fonctions de Matérn. Le problème des frontières est ensuite abordé et on montre comment il est possible de simuler des frontières transparentes, i.e. qui n'interfèrent pas sur les fonctions de corrélation tant qu'elles sont sur l'océan. Enfin, puisque les problèmes 1D sont généralement assez petit, la résolution de leurs systèmes linéaires peut se faire par une simple décomposition de Cholesky. Ces résultats sont ensuite étendus à la modélisation de fonctions de corrélation à deux ou trois dimensions et appliqués dans le système NEMOVAR en tenant compte de son organisation parallèle. Dans les configurations utilisées, l'algorithme implicite mis en place permet d'obtenir à coût réduit des performances d'assimilation similaires à celles obtenues avec un schéma explicite.

22. Assimilation spectrale à haute résolution des colonnes totales d'ozone IASI avec un modèle de chimie-transport

B. PAJOT, D. CARIOLLE, S. MASSART, A. PIACENTINI & O. PANNEKOUCKE

La plupart des modèles globaux de chimie-transport (CTM) ont une résolution horizontale de l'ordre de 2° (environ 250 km à l'équateur). Or cette résolution est bien plus grossière que la taille des pixels de l'instrument embarqué IASI, de l'ordre de 12 km. Une méthode largement utilisée pour assimiler de telles données consiste à moyenner de manière appropriée l'ensemble des mesures réalisées dans une même cellule du modèle (création de super-observations). Mais afin d'éviter la perte d'informations engendrée par cette moyenne, il serait préférable d'augmenter la résolution du modèle. Cette option a été examinée avec le système d'assimilation de données chimiques Valentina, développé au CERFACS, qui utilise le CTM Mocage développé au CNRM/Météo-France. Pour cela, alors que le CTM est discrétisé dans l'espace physique, le processus d'assimilation est mené dans l'espace spectral afin de diminuer la taille du vecteur de contrôle. L'accent de cette présentation sera mis sur les améliorations résultant de l'assimilation de données à une plus haute résolution. Pour cela, deux expériences ont été menées : l'une avec une grille modèle gaussienne à faible résolution $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ avec 64 points en latitude (correspondant à la troncature spectrale T42) et l'autre à haute résolution $0.7^\circ \times 0.7^\circ$ avec 256 points de latitude (correspondant à la troncature T170). Dans les deux cas sont successivement assimilées deux jeux de super-observations des colonnes totales d'ozone issues des données IASI : moyennées en T42 et en T170. Les résultats des diverses assimilations seront comparés entre eux ainsi qu'avec des observations indépendantes. Ce travail s'inscrit parallèlement dans le contexte de la mise-en-place d'une assimilation 4D-Var multi-incrémentale avec pré-conditionnement, prenant successivement place sur une grille modèle basse résolution T42, puis sur une grille T85 et enfin sur une grille haute résolution T170.

23. Représentation de l'erreur de modèle dans l'assimilation d'ensemble de Météo-France

L. RAYNAUD, L. BERRE & G. DESROZIERES
(financement LEFE/ASSIM)

Depuis juillet 2008, une assimilation variationnelle d'ensemble est mise en oeuvre de façon opérationnelle à Météo-France. Cela permet d'une part de fournir des variances d'erreur d'ébauche qui dépendent de la situation météorologique. D'autre part, cette assimilation d'ensemble sert aussi à initialiser une prévision d'ensemble. La version actuellement opérationnelle repose sur une hypothèse de modèle parfait, et les variances d'erreur obtenues sont augmentées a posteriori, pour tenir compte des erreurs de modèle. Le coefficient d'inflation des variances est choisi à l'aide de diagnostics relatifs au minimum de la fonction coût.

Dans cette étude, l'inflation a posteriori des variances est remplacée par une inflation multiplicative "en ligne" des perturbations de prévision, après chaque étape d'intégration du modèle sur 6h. L'inflation de ces perturbations est de l'ordre de 10%, et elle conduit à une augmentation de la dispersion de l'ensemble par un facteur 2, par rapport à la dispersion associée à une hypothèse de modèle parfait.

L'examen des spectres d'erreur et des cartes de variance indique que l'augmentation est un peu plus forte pour les échelles synoptiques et dans les régions pauvres en observations et actives sur le plan de la dynamique, comme dans la partie extratropicale de l'Hémisphère Sud. De plus, l'effet de l'analyse sur les perturbations d'ébauche se trouve renforcé. Des études d'impact indiquent que les nouvelles estimations de covariance ont un impact neutre à positif sur la qualité des prévisions, en plus d'être plus cohérentes avec les estimées basées sur les innovations.

24. Analyse de sensibilité de l'océan par méthode adjointe

É. REMY, A. VIDARD & É. GREINER

Dans cet exposé nous présentons une utilisation de l'adjoint pour une analyse de sensibilité de la réanalyse océanique globale au 1/4° produite à Mercator Océan, Glorys. Dans le but d'améliorer les analyses, nous estimons la sensibilité des prévisions aux conditions initiales et aux forçages atmosphériques. Les forçages atmosphériques ne sont pas contrôlés par le système d'assimilation actuel mais différentes études montrent que leurs erreurs peuvent avoir un impact non négligeable sur l'état océanique et induire des biais. Le développement de l'adjoint du code d'océan NEMO, intégré au code NEMOVAR, s'achève. Nous le testons donc ici dans une configuration océanique dite "eddy-permitting". Les premiers résultats sont présentés et montrent une grande disparité spatiale et saisonnière de la sensibilité de la température de surface océanique aux flux atmosphériques. Ces résultats montrent l'intérêt d'une stratégie de correction des flux forçant l'océan et aussi l'importance de la prise en compte de la dynamique océanique pour contraindre certaines régions, même sur des périodes courtes de l'ordre de la semaine.

25. Assimilation de données pour les feux de forêt

M. ROCHOUX, S. RICCI, S. MASSART, R. PAOLI, B. CUENOT & A. TROUVÉ

Prédire la propagation des feux de forêt reste un défi à part entière puisque la vitesse de propagation dépend des interactions multiéchelles entre la végétation, la topographie et le vent. Un modèle de feu peut donc difficilement prendre en compte tous les processus physiques mis en jeu et la paramétrisation de certains d'entre eux est par nature imparfaite et amène une incertitude sur les résultats de la simulation. Menée dans le cadre du projet ANR-COSINUS-IDEA (2010-2013), la présente étude a pour but de montrer, dans le contexte des expériences jumelles, comment l'assimilation de données peut améliorer la connaissance sur l'état du feu et ainsi conduire à une meilleure prédiction de sa propagation. Le modèle utilisé repose sur les équations de réaction-diffusion et propage ainsi un front de flamme en fonction de la densité de végétation. La première approche, développée à partir des travaux de Mandel, permet de contrôler le coefficient de diffusion en assimilant des mesures ponctuelles de température. Elle a montré un bon comportement de l'analyse (avec l'algorithme du BLUE), même si les phénomènes sont fortement non linéaires et les statistiques d'erreur sont non gaussiennes. L'étude des Degrees of Freedom from Signal (DFS) a également mis en valeur l'apport significatif d'information des observations situées au voisinage du front. Ce travail a conduit à l'assimilation de positions du front de flamme en 1D afin de se rapprocher des situations réelles. Ici, un modèle lagrangien a été choisi afin de simuler la position du front étant données une vitesse de propagation et une position initiale du front. La différence entre position observée et position simulée est alors traduite en une correction sur le champ de vitesse simulé par le modèle de combustion. Cette étude a montré un potentiel certain de l'assimilation de données pour cette application innovante des feux.

26. Assimilation directe de séquences d'images dans les modèles numériques

I. SOUOPGUI, A. VIDARD, O. TITAUD, F.-X. LE DIMET

During the last two decades about thirty satellites were launched to improve the knowledge of the atmosphere and of the oceans. They continuously provide a huge amount of data that are still underused by numerical forecast systems. In particular a significant amount of photographic images is available on which the dynamical evolution of some meteorological

or oceanic features (such as eddies, fronts, ...) that a human vision may easily detect is not optimally taken into account in realistic applications. Attempts to perform Image Assimilation have been done using *pseudo-observation* techniques: they provide some apparent velocity fields, which are assimilated as classical Eulerian velocity observations. However these measurements are obtained by some external procedures that are decoupled with the considered dynamical system and may therefore contain significant errors. Here, we suggest a more consistent approach where image sequences are considered as Lagrangian observations and are directly incorporated into the Optimality System in a Variational Data assimilation framework. The observations space, its associated distance and the observation operator are described and numerical results are shown using real images of a laboratory experiment.

27. Transformation Gaussienne des statistiques d'erreur pour un filtre de Kalman de rang réduit : Application à un système d'analyse de la glace de mer
C.-E. TESTUT, É. GREINER, G. GARRIC & J.-M. BRANKART

Les systèmes d'analyse Mercator-Océan sont actuellement basés sur le modèle d'Océan NEMO (Nucleus for European Models of the Ocean) couplé au modèle de glace de mer LIM2EVP et sur le système d'assimilation SAM2. Cet outil d'analyse est construit autour d'un filtre de Kalman de rang réduit dérivé du noyau du filtre SEEK développé initialement au LEGI. Les covariances de l'erreur d'ébauche de cet algorithme sont notamment représentées par des sous-espaces d'erreurs modélisés par un ensemble de modes d'erreurs multivariés. Dans de nombreux contextes d'application comme celui des réanalyses océaniques, les méthodes de génération de ces ensembles produisent des distributions d'erreurs non gaussiennes pour certaines variables du vecteur de contrôle en violation des hypothèses de base d'un filtre de Kalman. Pour pallier cette inconsistance, une approche consiste à introduire une technique de transformation de variable comme l'anamorphose gaussienne. Cette opération effectue une transformation de l'espace physique vers un espace où la distribution de probabilité devient gaussienne. L'impact de cette transformation opérée sur les sous-espaces d'erreurs peut en particulier être caractérisé par des diagnostics comme des représentateurs multivariés. Nous présentons ici à la fois la méthode utilisée ainsi que les résultats préliminaires dans le contexte d'une application à la composante glace de mer des systèmes de réanalyse de Mercator-Océan.

28. Un système d'assimilation de débits passés pour des prévisions d'ensemble de débits sur la France
G. THIREL, E. MARTIN, F. REGIMBEAU, J.-F. MAHFOUF, S. MASSART, S. RICCI & F. HABETS

Le modèle hydrométéorologique à base physique, SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM), est développé à Météo-France depuis plusieurs années. Ce modèle distribué est utilisé dans un mode pré-opérationnel depuis 2005 afin de produire des prévisions d'ensemble de débits à moyenne échéance basées sur les EPS du CEPMMT (51 membres, 10 jours d'échéance). Un système d'assimilation des débits passés a été implémenté dans le but d'améliorer les états initiaux de ces prévisions d'ensemble de débits. Les débits observés quotidiens d'une sélection de 186 stations de mesure distribuées sur la France ont été utilisés pour une période de 19 mois. L'opérateur d'analyse est le Best Linear Unbiased Operator (BLUE), et 3 configurations du système d'assimilation ont été testées, chacune modifiant l'humidité du sol d'une manière différente. Une amélioration optionnelle de la physique du modèle (le profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol) a été testée. La performance du système a été évaluée pour une sélection de 148 stations assimilées, mais aussi pour une

sélection de 49 stations totalement indépendantes, pour chacune des configurations. Une amélioration générale des débits simulés a été observée, et les modifications imposées par le BLUE sont restées faibles. Enfin, l'impact du système d'assimilation sur les prévisions d'ensemble de débits, et l'impact de la physique améliorée, ont été estimés séparément en comparaison des prévisions de débits opérationnelles. Les résultats montrent une amélioration significative des prévisions, et la meilleure configuration montre le bénéfice de la méthode tout au long des 10 jours d'échéance, même pour de très forts débits et pour des stations sur lesquelles l'assimilation n'est pas directement effectuée.

29. Assimilation du couvert de neige de MODIS dans le modèle LISFLOOD pour EFAS (European Flood Alert System)

G. THIREL, P. SALAMON, P. BUREK & M. KALAS

LISFLOOD est un modèle à base physique conçu initialement dans le but de permettre de simuler les crues des larges bassins européens. Il est utilisé au Joint Research Center (Commission Européenne) afin d'étudier notamment le changement climatique hydrologique et les sécheresses. Il sert aussi de base au système EFAS (European Flood Alert System) qui est un système de prévisions probabilistes des crues fonctionnant en temps réel et qui a pour but d'alerter les pays partenaires en Europe des crues avec une échéance de plusieurs jours. Le but de ce poster est de montrer la faisabilité et l'apport de l'assimilation de données satellites dans le modèle LISFLOOD en ce qui concerne la simulation des crues. Certaines crues ayant lieu au printemps lors de la fonte des neiges, notamment en ce qui concerne les Alpes, peuvent en effet être mal simulées en cas de mauvaise représentation du manteau neigeux. C'est pourquoi l'utilisation du couvert de neige observé par MODIS (qui est disponible de manière journalière et sur toute l'Europe) a été testée lors de cette étude. Tout d'abord l'amélioration des données MODIS sera abordée en montrant comment la qualité des images a été améliorée malgré la présence de nombreux nuages (images composites des deux satellites MODIS, utilisation des données des jours précédents, des pixels voisins ou des pixels la même altitude). Ensuite, trois méthodes d'assimilation ont été testées, à savoir des méthodes simples de modifications conditionnelles de la neige du modèle, l'utilisation du filtre de Kalman d'ensemble (EnKF), et du filtre particulaire. Il a été montré que si l'efficacité des méthodes simples dépend des cas, l'EnKF améliore le couvert de neige mais pas la simulation des crues, alors que l'utilisation du filtre particulaire semble prometteuse, et nous expliquerons pourquoi.

30. On the use of Finite-Time Lyapunov Exponents and Vectors for direct assimilation of tracer images in ocean models

O. TITAUD, J.-M. BRANKART & J. VERRON

Les images satellites de traceurs comme la SST et la couleur de l'océan contiennent des motifs (fronts, filaments, spirales ...) qui sont essentiellement dûs à la dynamique de l'écoulement. La relation entre ces motifs et l'écoulement peut être quantifiée en utilisant des outils lagrangiens comme les exposants de Lyapunov "temps-fini" (Finite Time Lyapunov Exponents - FTLE).

Le travail présenté dans ce poster exploite certaines propriétés des FTLE pour définir des opérateurs d'observations adaptés à l'assimilation directe d'images de traceurs dans les modèles océaniques. On montre que ces opérateurs ont de bonnes propriétés pour assurer la reconstruction des champs de vitesse à partir des images à haute résolution de SST et de couleur de l'eau.

Ce travail a été effectué au Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriel (LEGI) à Grenoble.

31. VODA: Assimilation variationnelle de données pour des applications océaniques multi-échelles.

A. VIDARD et al.

L'importance clé de l'assimilation de données pour l'océanographie et en particulier l'océanographie opérationnelle est maintenant bien reconnue. Un large spectre de recherches et d'applications dépend de la disponibilité rapide de produits informatifs océaniques. Le domaine de l'océanographie physique a maintenant atteint une maturité suffisante pour permettre de combiner les informations issues des modèles numériques et celles issues des observations au moyen des méthodes dites d'assimilation de données. Cela permet de fournir des analyses et des prévisions océaniques pour diverses échelles temporelles et spatiales. L'objectif du projet VODA est de développer et mettre en place des techniques avancées d'assimilation de données basées sur des méthodes de contrôle optimal, appliquées à la plateforme de modélisation océanique européenne NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) et sur des configurations allant de l'océan global basse résolution à des domaines régionaux à haute résolution en se basant sur l'outil développé dans le cadre de l'initiative NEMOVAR (assimilation variationnelle pour NEMO). Outre les applications opérationnelles, ce projet permettra de fournir une plateforme de recherche précieuse pour la communauté scientifique de l'océanographie numérique.

32. Assimilation des mesures de déplacement issues de la corrélation d'amplitude et de l'interférométrie différentielle (D-InSAR) pour l'estimation des paramètres de failles co-sismiques

Y. YAN, E. TROUVÉ, V. PINEL, E. PATHIER, G. MAURIS & S. GALICHET

Nous exploitons une série de données SAR satellitaires (ENVISAT), acquises entre octobre 2004 et juin 2006 afin de quantifier le champ de déplacement co-sismique induit en surface par le séisme du Pakistan (2005) et d'estimer les caractéristiques (géométrie et vecteur déplacement) de la faille à l'origine de ce séisme. Les mesures de déplacement sont extraites des images radars par deux techniques complémentaires : la corrélation d'amplitude, de précision pluri-décimétrique, apportant une information à proximité de la faille (Pathier et al, 2006) et l'interférométrie différentielle (D-InSAR), de précision centimétrique, apportant une information en champ lointain. Afin d'assimiler toutes les mesures disponibles afin de réduire les incertitudes en sortie, nous proposons 2 stratégies : une pré-fusion et l'inversion jointe. Dans un premier temps, le déplacement 3D en surface (3 composantes Est, Nord, Up), est calculé par une inversion linéaire à partir des mesures issues de la corrélation d'amplitude et de l'interférométrie différentielle. L'incertitude associée au déplacement est représentée de deux manières différentes relevant respectivement de la théorie des probabilités et de la théorie moins classique, des possibilités. A cette étape, l'évolution d'incertitude au cours de l'ajout de données est suivie en fonction de la façon comment l'incertitude est propagée. En particulier, l'effet de l'ajout de mesures issues de l'interférométrie différentielle sur la diminution de l'incertitude en sortie est analysé. Dans un second temps, les paramètres qui décrivent la géométrie de la faille sont estimés par une inversion non linéaire d'un modèle mécanique direct qui décrit le déplacement en surface induit par une rupture de la faille. Les 2 stratégies d'assimilation sont appliquées à ces 2 étapes, les avantages et les inconvénients de chacune des stratégies sont mis en évidence à travers les inter-comparaisons des résultats.

33. Construction optimale de réseaux de mesures pour la qualité de l'air L. WU & M. BOCQUET

Compte tenu de l'hétérogénéité des champs de polluants atmosphériques décrits soit par des méthodes statistiques soit par des modèles numériques de chimie-transport, la détermination de réseaux optimaux de mesures (pour l'ozone par exemple) est un problème scientifique intrinsèquement difficile. Pour résoudre ce problème, nous proposons une méthodologie constituée : d'une fonction de coût (ou critère), une méthode géostatistique pour l'estimation de l'ozone, et un algorithme de sélection de site utilisant un recuit simulé. Nous présentons deux applications pour le réseau Français de surveillance de la qualité de l'air BDQA (Base de Données pour la Qualité de l'Air) : 1) la réduction d'un réseau dense. En réduisant de moitié le réseau de façon optimale, l'écart-type de l'erreur d'estimation des concentrations d'ozone peut atteindre un minimum de 5 ppb, soit la même amplitude que l'erreur d'observation. 2) la redistribution du réseau des sites de fond. Dans ce cas, il faut estimer le champ d'ozone dans des régions où les observations ne sont pas disponibles. Il est donc nécessaire de recourir à une modèle numérique de chimie-transport, voire à des champs analysés. Trois types de fonction de coût : un critère géométrique, un critère géostatistique, et un critère physique, sont examinés. Dans chaque cas, l'amélioration est très significative. Pour l'objectif complexe qui est de rendre compte de l'hétérogénéité du champ d'ozone, le critère physique est le plus favorable. En général, les réseaux optimaux sont hétérogènes et s'adaptent aux particularités du champ d'ozone. Par exemple, il y a plus de sites autour des grandes agglomérations comme l'île-de-France où la concentration d'ozone est élevée et incertaine.