

Développements et applications réalistes du Filtre de Kalman d'Ensemble

Laurent BERTINO, Pavel SAKOV, François COUNILLON, Ehouarn SIMON

Nansen Environmental and Remote Sensing Center
Thormøhlensgate 47, 5006 Bergen, Norvège

laurent.bertino@nersc.no, pavel.sakov@nersc.no, francois.counillon@nersc.no,
ehouarn.simon@nersc.no

Thème – SS3 - Signaux et images en océanographie

Problème traité – Analyse de l'état optimal de l'océan connaissant un modèle numérique et un flot d'observations

Originalité – Les travaux décrivent un système opérationnel basé sur une méthode d'assimilation d'ensemble avancée

Résultats – L'assimilation de données fait plus qu'ingérer des observations, elle donne aussi des pistes pour les développements futurs du modèle

1 Position du problème

On considère le problème de l'assimilation de données dans un modèle numérique traduisant au mieux les équations de la physique du système (océanographique). Les observations couvrent imparfaitement le domaine considéré et ne concernent pas toutes les variables *prognostiques*, celles qui déterminent de manière unique l'état dynamique du système. Par exemple dans le système opérationnel TOPAZ, les données satellitaires d'altimètres, de température de surface de l'océan, de concentration de glace de mer, de dérives Lagrangiennes de ces mêmes glaces de mer, et les profils verticaux de température et de salinité sont assimilées (Sakov *et al.*, 2012), mais l'essentiel des courants profonds de l'océan ne sont pas observés.

Le modèle est lui aussi imparfait. Certaines de ces imperfections sont faciles à décrire, ne serait-ce que de manière simplifiée (imperfections des conditions initiales, des conditions aux limites, paramètres aux valeurs incertaines) alors que d'autres s'y prêtent bien moins (erreurs de discrétisation, approximations des équations).

Ayant ainsi à notre disposition observations et modèle, deux informations imparfaites, on va chercher l'algorithme qui va les combiner au mieux. Si l'on convient que la combinaison *optimale* est celle qui minimise les erreurs par rapport à l'état vrai inconnu, on peut aisément écrire une fonction coût à minimiser. De là découlent les différentes méthodes d'assimilation de données, qu'elles soient séquentielles (type Filtre de Kalman ou filtre à particules) ou bien variationnelles (par exemple méthodes de l'adjoint ou des *representers* (Bennett, 2002)).

La majorité de ces méthodes ne sont malheureusement optimales que sous des hypothèses très restrictives (les erreurs sont Gaussiennes et sans biais, ce qui revient à supposer que le système est linéaire, cas peu commun dans les systèmes océanographiques) sauf les filtres particuliers, qui souffrent par contre de la "malédiction de la dimensionalité", c'est à dire que leurs coûts de calculs s'envolent dès que la dimension du système augmente.

Le choix suivi pour le système TOPAZ est celui d'appliquer un filtre de Kalman d'Ensemble (EnKF) en dépit des hypothèses linéaires, afin de bénéficier de l'efficacité de son schéma d'analyse linéaire ainsi que de la flexibilité d'une méthode d'ensemble permettant de repousser quelque peu les limites de ces hypothèses, par exemple en utilisant une anamorphose Gaussienne (Simon and Bertino, 2009, 2012; Simon *et al.*, 2012).

2 Illustrations sur le système TOPAZ4

On utilise la version NERSC du modèle HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model, <http://www.hycom.org>) couplé à un modèle Elasto-Visco-Plastique de glace de mer (Lisæter et al., 2003) et au modèle biogéochimique NORWECOM (NORwegian ECOsystem Model). La méthode d'assimilation est une version déterministe de l'EnKF (Sakov and Oke, 2008) utilisant 100 membres dynamiques. Le système TOPAZ4 est exécuté en mode opérationnel par met.no et constitue la composante Arctique du système MyOcean. Fig. 1 illustre une analyse typique extraite de la page web de MyOcean (<http://www.myocean.eu>). On a déduit d'une réanalyse de 20 ans du système physique les conclusions suivantes :

- La méthode d'assimilation est stable malgré une couverture d'observation irrégulière sur la période 1991-2010.
- On peut modérer les effets de biais de modèle par une procédure d'estimation du biais en ligne.
- Le système respecte bien la plupart des observations, comme on pouvait s'y attendre.
- Dans le cas contraire (en particulier pour les observations de dérives de glace), l'assimilation de données permet de pointer du doigt les éléments déficients du modèle, comme la rhéologie du modèle de glace.

La réanalyse plus courte (2007-2010) conduite sur le système couplé physique-écosystème a utilisé un système d'assimilation quasiment similaire, mais en utilisant de surcroît la technique d'anamorphose Gaussienne pour mieux assimiler les données de Chlorophylle de surface dans les variables d'écosystème fortement non-Gaussiennes. Cette expérience indique que l'assimilation dans les modèles d'écosystèmes est plus un problème d'estimation de paramètres inconnus que d'estimation de variables d'état et justifierait à l'avenir l'utilisation de la technique de lissage d'ensemble au lieu de filtrage (Skjervheim et al., 2011).

De nouvelles observations de l'océan sont bientôt disponibles qui vont poser de nouveaux problèmes d'assimilation : épaisseurs de glaces fines par SMOS qui indiquent seulement une inégalité pour les glaces épaisses, données catégorielles d'âge de la glace (*First Year Ice, Multi Year Ice, Ridged Ice*), données intégrées dans l'espace par tomographie acoustique (<http://acobar.nersc.no>). Il restera alors à voir si ces types de données pourront aussi être assimilées par d'autres extensions de méthodes de filtrage de Kalman.

3 Remerciements

Les auteurs remercient les projets Européens MyOcean2, SANGOMA et GREENSEAS ainsi que les moyens de calcul du projet Norvégien NOTUR2.

Références

- Bennett, A. F., *Inverse Modeling of the Ocean and Atmosphere*, Cambridge University Press, 2002.
- Lisæter, K. A., J. Rosanova, and G. Evensen, Assimilation of ice concentration in a coupled ice-ocean model, using the ensemble Kalman filter, *Ocean Dynamics*, 53, 368–388, 2003.
- Sakov, P., and P. R. Oke, A deterministic formulation of the ensemble Kalman filter : an alternative to ensemble square root filters, *Tellus, Ser. A*, 60, 361–371, 2008.
- Sakov, P., F. Counillon, L. Bertino, K. A. Lisæter, P. R. Oke, and A. Korablev, TOPAZ4 : an ocean-sea ice data assimilation system for the North Atlantic and Arctic, *Ocean Sci.*, 8, 633–656, 2012.
- Simon, E., and L. Bertino, Application of the Gaussian anamorphosis to assimilation in a 3-D coupled physical-ecosystem model of the North Atlantic with the EnKF : a twin experiment, *Ocean Sci.*, 5, 495–510, 2009.
- Simon, E., and L. Bertino, Gaussian anamorphosis extension of the DEnKF for combined state parameter estimation : Application to a 1D ocean ecosystem model, *J. Marine Syst.*, 89, 1 – 18, 2012.
- Simon, E., A. Samuelsen, L. Bertino, and D. Dumont, Estimation of positive sum-to-one constrained zooplankton grazing preferences with the DEnKF : a twin experiment, *Ocean Sci.*, 8, 587–602, 2012.
- Skjervheim, J. A., G. Evensen, J. G. Vabø, and J. Hove, An Ensemble Smoother for Assisted History Matching, SPE 141929, 2011.

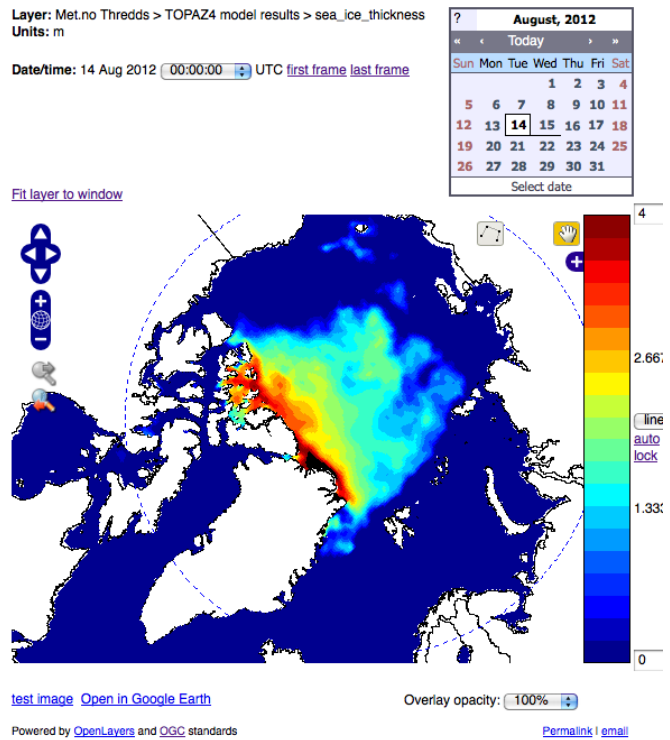


FIG. 1 – Epaisseur de glace sur l'Arctique en Août 2012 estimée par le système TOPAZ4