Vers l'hybridation des covariances d'erreur d'ébauche pour la prévision climatique

Sébastien Barthélémy^{1,3} - François Counillon^{1,2,3}

¹UiB ²NERSC ³BCCR

23 Janvier 2020





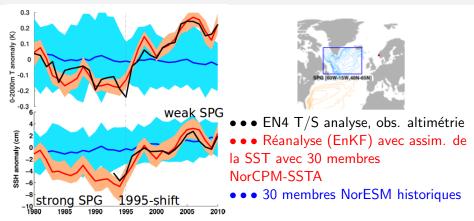


- Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
 - DEnKF et hybridation des covariances
 - Différentes méthodes d'hybridation
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
 - Set up des expériences
 - Static hybridization
 - Dual resolution
 - Dual static hybridization
 - Comparaison des résultats des méthodes d'hybridation
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
 - NorCPM et set-up des expériences numériques
 - Résultats numériques
 - Perspective : application à la prévision de la gyre sub-polaire
- Conclusion

1. Une courte introduction

- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
- 5. Conclusion

Pourquoi hybrider les covariances d'erreur d'ébauche pour la prévision climatique ?



- La taille de l'ensemble est limitée par les coûts de calcul ;
- Hybridation: améliorer les résultats de l'assimilation sans augmenter le coût de calcul;
 - But à long terme: initialisation de NorCPM high res.

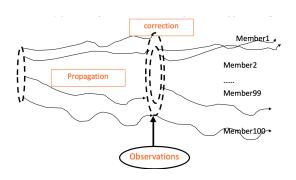
- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
- 5. Conclusion

- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
 - DEnKF et hybridation des covariances
 - Différentes méthodes d'hybridation
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
- Conclusion

Le Deterministic Ensemble Kalman Filter, DEnKF - (Sakov & Oke, 2008)

- Version déterministe de l'EnKF;
- Approximation linéaire de l'ETKF pour des petites corrections ;
- Deux étapes: propagation et correction.

Etape de propagation



Le Deterministic Ensemble Kalman Filter, DEnKF - (Sakov & Oke, 2008)

Etape d'analyse

 \mathbf{E}_1 est un ensemble de taille N_1 .

La moyenne \mathbf{x}_1 et les anomalies \mathbf{A}_1 sont mises à jour de manière indépendante :

$$\mathbf{x}_1^a = \mathbf{x}_1^f + \mathbf{K}_1 \left(\mathbf{d} - \mathbf{H} \mathbf{x}_1^f \right) \tag{1}$$

$$\mathbf{A}_1^a = \mathbf{A}_1^f - \frac{1}{2}\mathbf{K}_1\mathbf{H}\mathbf{A}_1^f \tag{2}$$

où:

$$\mathbf{K}_{1} = \mathbf{P}_{1}^{f} \mathbf{H}^{T} \left(\mathbf{H} \mathbf{P}_{1}^{f} \mathbf{H}^{T} + \mathbf{R} \right)^{-1}$$
 (3)

$$\mathbf{P}_{1}^{f} = \frac{\mathbf{A}_{1}^{f} \left(\mathbf{A}_{1}^{f}\right)^{T}}{N_{1} - 1} \tag{4}$$

Implémentation en termes de scaled observation anomalies (Sakov et al., 2009) ⇒ efficace numériquement.

Hybridation des covariances d'erreur d'ébauche - (Hamill & Snyder, 2000)

- Le sous-échantillonnage de l'ensemble \mathbf{E}_1 résulte en une mauvaise estimation de \mathbf{P}_1 .
- o Remplacer \mathbf{P}_1^f par une matrice \mathbf{P}_h^f dans les eq. (3) et (4) avec:

$$\mathbf{P}_{h}^{f} = (1 - \alpha)\mathbf{P}_{1}^{f} + \alpha\mathbf{P}_{2}^{f}, \qquad \alpha \in [0; 1]$$
(5)

où \mathbf{P}_2^f sont les covariances d'erreur d'ébauche d'un ensemble \mathbf{E}_2 de taille N_2 .

• La dimension du sous-espace de l'incrément d'analyse est maintenant :

$$\mathsf{rang}(\mathbf{P}_h^f\mathbf{H}^T) = \mathsf{min}(p, N_1 + N_2 - 1) \geq \mathsf{min}(p, N_1 - 1) = \mathsf{rang}(\mathbf{P}_1^f\mathbf{H}^T)$$

où p est le nombre d'observations.

- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
 - DEnKF et hybridation des covariances
 - Différentes méthodes d'hybridation
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
- 5. Conclusion

Static hybridization - (Counillon et al., 2009)

- $\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_d$ est l'ensemble dynamique initial ;
- $\mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_s$ est un ensemble statique issu d'un run climatologique.
- $\bullet \mathbf{P}_h^f = \lambda (1 \alpha) \mathbf{P}_d^f + \alpha \beta \mathbf{P}_s^f$
- λ est le facteur d'**inflation** et β est un facteur d'**échelle**.
- $\alpha = 0$, full dynamic $\equiv \text{EnKF}$;
- $\alpha = 1$, full static \equiv ensemble d'EnOI.

Dual resolution - (Rainwater & Hunt, 2013)

Modèle haute résolution

- $\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_H$ est l'ensemble dynamique haute résolution ;
- ullet ${f E}_2={f E}_L$ est un ensemble dynamique basse résolution ;
- $\bullet \ \mathbf{P}_{h}^{f} = \lambda (1 \alpha_{H}) \mathbf{P}_{H}^{f} + \lambda \alpha_{H} \, \pi_{LH} \left(\mathbf{P}_{L}^{f} \right)$
- o π_{LH} est l'opérateur d'interpolation du modèle LR vers le modèle HR.

Modèle basse résolution

- $\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_L$ est un ensemble dynamique basse résolution ;
- $\mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_H$ est l'ensemble dynamique haute résolution ;
- $\bullet \ \mathbf{P}_{h}^{f} = \lambda (1 \alpha_{L}) \pi_{HL} \left(\mathbf{P}_{H}^{f} \right) + \lambda \alpha_{L} \mathbf{P}_{L}^{f}$
- o π_{HL} est l'opérateur d'interpolation du modèle HR vers le modèle LR.

Dual static hybridization

Modèle haute résolution

- ullet $\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_{H,d}$ est le modèle dynamique haute résolution ;
- ullet $\mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_{L,d}$ est le modéle dynamique basse résolution ;
- $\mathbf{E}_3 = \mathbf{E}_{H,s}$ est le modèle statique haute résolution.

$$\circ \mathbf{P}_{h}^{f} = \lambda \alpha_{H,1} \mathbf{P}_{H,d}^{f} + \lambda \alpha_{H,2} \pi_{LH} \left(\mathbf{P}_{L,d}^{f} \right) + \alpha_{H,3} \beta \mathbf{P}_{H,s},$$

 $\alpha_{H,1} + \alpha_{H,2} + \alpha_{H,3} = 1$

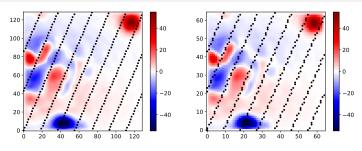
Modèle basse résolution

- ullet ${f E}_1={f E}_{L,d}$ est le modèle dynamique basse résolution ;
- ullet ${f E}_2={f E}_{H,d}$ est le modèle dynamique haute résolution ;
- $\mathbf{E}_3 = \mathbf{E}_{L,s}$ is the static low res. ensemble;
- $\bullet \ \mathbf{P}_{h}^{f} = \lambda \alpha_{L,1} \pi_{HL} \left(\mathbf{P}_{H,d}^{f} \right) + \lambda \alpha_{L,2} \, \mathbf{P}_{L,d}^{f} + \alpha_{L,3} \beta \mathbf{P}_{L,s},$
- $\alpha_{1,1} + \alpha_{1,2} + \alpha_{1,3} = 1$

- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
- Conclusion

- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
 - Set up des expériences
 - Static hybridization
 - Dual resolution
 - Dual static hybridization
 - Comparaison des résultats des méthodes d'hybridation
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
- 5. Conclusion

Set up des expériences

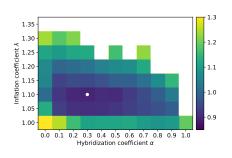


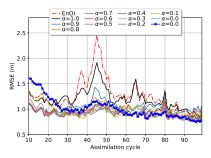
- \circ HR \sim 16000 points de grille, LR \sim 4000 points de grille ;
- Expériences jumelles avec 300 observations synthétiques sur 100 cycles d'assimilation;
- ullet **Observations synthétiques :** true run + bruit $arepsilon \sim \mathcal{N}\left(0,\mathbf{R}
 ight)$
- Erreur d'observation : $\sigma_{o,H}=0.2~\text{m}$ et $\sigma_{o,L}=0.24~\text{m}$
- Rayon de localisation : $L_r = 17.7$ ("local analysis")
- Viscosité : $\nu_t = 2.10^{-12}$ Pa.s et $\nu = 2.10^{-11}$ Pa.s
- **Pas de temps** : $\Delta t_H = 2.5$ s et $\Delta t_L = 5$ s
- Facteur d'échelle : $\beta = 0.04$

- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
 - Set up des expériences
 - Static hybridization
 - Dual resolution
 - Dual static hybridization
 - Comparaison des résultats des méthodes d'hybridation
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
- 5. Conclusion

Static hybridization

• $N_d = 20$ membres dynamiques, $N_s = 200$ membres statiques.



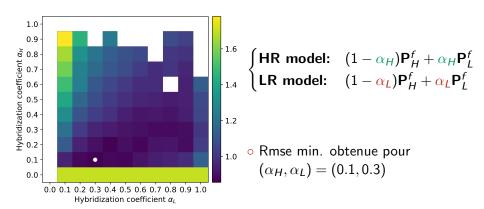


- L'hybride avec $\alpha = 1$ (ensemble d'EnOI) est meilleur que l'EnOI;
- \bullet Avant convergence, l'hybride est meilleur que le full dynamic, $\alpha=0$;
- Après convergence, l'hybride et le full dynamic sont équivalents ;
- Les résultats sont en accord avec (Counillon et al., 2009).

- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
 - Set up des expériences
 - Static hybridization
 - Dual resolution
 - Dual static hybridization
 - Comparaison des résultats des méthodes d'hybridation
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
- 5 Conclusion

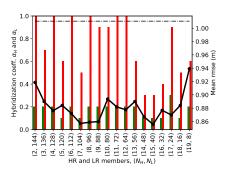
Dual resolution - 20 membres HR

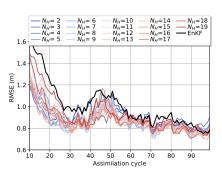
- Ressources de calcul \sim 20 membres HR : $(N_H, N_L) = (15, 40)$;
- Coefficient d'inflation $\lambda = 1.1$.



Dual resolution - 20 membres HR

$$\begin{cases} \text{HR model:} & (1 - \alpha_H) \mathbf{P}_H^f + \alpha_H \mathbf{P}_L^f \\ \text{LR model:} & (1 - \alpha_L) \mathbf{P}_H^f + \alpha_L \mathbf{P}_L^f \end{cases}$$



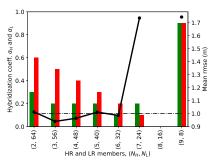


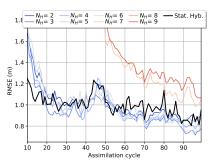
- Amélioration de la rmse par rapport à l'EnKF pour chaque combinaison de (N_H, N_L) ;
- (α_H, α_L) optimaux vérifient $\alpha_H < \alpha_L$.

Dual resolution - 10 membres HR

 \circ Ressources de calcul \sim propager 10 membres HR.

$$\begin{cases} \text{HR model:} & (1 - \alpha_H) \mathbf{P}_H^f + \alpha_H \mathbf{P}_L^f \\ \text{LR model:} & (1 - \alpha_L) \mathbf{P}_H^f + \alpha_L \mathbf{P}_L^f \end{cases}$$



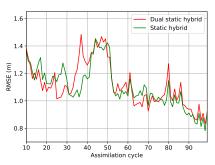


- Amélioration par rapport au static hybrid après convergence (cycle d'assimilation 30);
- (α_H, α_L) optimaux vérifient $\alpha_H < \alpha_L$.

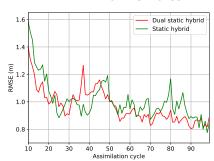
- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
 - Set up des expériences
 - Static hybridization
 - Dual resolution
 - Dual static hybridization
 - Comparaison des résultats des méthodes d'hybridation
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
- 5. Conclusion

Dual static hybridization

$HR \sim 3$ membres



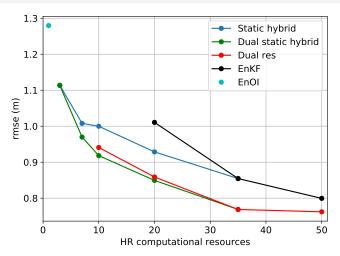
$HR \sim 7$ membres



- o Ressources de calcul \sim 3 membres HR: pas d'amélioration par rapport au *static hybridization* ;
- $(\alpha_{H,1}, \alpha_{H,2}, \alpha_{H,3}) = (0.24, 0.06, 0.7), (\alpha_{L,1}, \alpha_{L,2}, \alpha_{L,3}) = (0.24, 0.06, 0.7)$
- \circ Ressources de calcul \sim **7 membres HR**: très faible amélioration avant et après les cycles d'assimilation 20 et 50 respectivement ;
- $(\alpha_{H,1}, \alpha_{H,2}, \alpha_{H,3}) = (0.72, 0.18, 0.1), (\alpha_{L,1}, \alpha_{L,2}, \alpha_{L,3}) = (0.24, 0.36, 0.4)$

- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
 - Set up des expériences
 - Static hybridization
 - Dual resolution
 - Dual static hybridization
 - Comparaison des résultats des méthodes d'hybridation
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
- 5. Conclusion

Comparaison des résultats



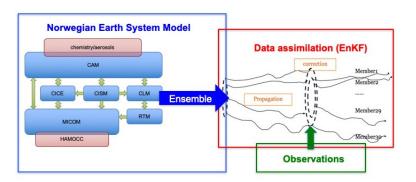
- Soumission prochaine à QJRMS;
- Sources bientôt disponibles avec le package DAPPER (Raanes et al., 2018).

- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
- 5. Conclusion

- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
 - NorCPM et set-up des expériences numériques
 - Résultats numériques
 - Perspective : application à la prévision de la gyre sub-polaire
- 5. Conclusion

Quelques mots à propos de NorCPM

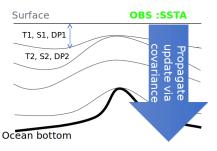
NorCPM = NorESM + EnKF



- Correction de l'état océanique (MICOM) avec l'EnKF : assimilation de la SST :
- o Limitation à 30 membres dynamiques du fait des coûts de calcul.

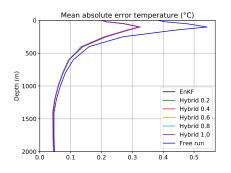
Set-up des expériences numériques

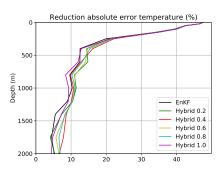
- Méthode d'hybridization : static hybrid ;
- 30 membres dynamiques et 315 membres statiques générés avec un run climatologique et des forçages pré-industriels;
- o L'ensemble statique est différent chaque mois ;
- o Assimilation "full field" mensuelle sur une période de 10 ans ;
- o Observations synthétiques avec signal du changement climatique ;
- Les covariances sont calculées en coordonnées isopycnales.



- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
 - NorCPM et set-up des expériences numériques
 - Résultats numériques
 - Perspective : application à la prévision de la gyre sub-polaire
- 5. Conclusion

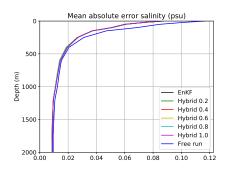
Résultats température, erreur absolue

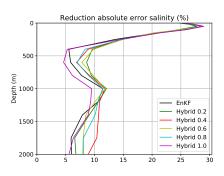




 La mer Noire et la mer Caspienne ne sont pas prises en compte dans les résultats;

Résultats salinité, erreur absolue

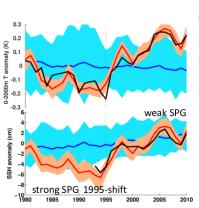




- La mer Noire et la mer Caspienne ne sont pas prises en compte dans les résultats.
- Le besoin d'hybridation est differént selon les régions : 0.4 pour l'Atlantique et l'océan Indien, 0.6 pour le Pacifique.

- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
 - NorCPM et set-up des expériences numériques
 - Résultats numériques
 - Perspective : application à la prévision de la gyre sub-polaire
- Conclusion

SPG prediction with NorCPM-SSTA



EN4 T/S analysis; altimetry observations

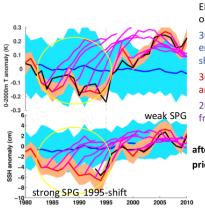
30-member NorESM hist. ensemble (solid=mean, shading=min/max)



30-member NorCPM-SSTA reanalysis using anomaly EnKF assimilation of SST obs.

Courtesy: Ingo Bethke & Yiguo Wang

SPG prediction with NorCPM-SSTA



EN4 T/S analysis; altimetry observations

30-member NorESM hist. ensemble (solid=mean, shading=min/max)



30-member NorCPM-SSTA reanalysis using anomaly EnKF assimilation of SST obs.

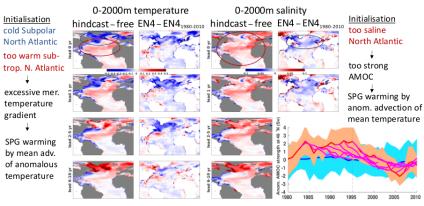
20-member hindcast experiment initialised from NorCPM-SSTA reanalysis

after 1994 – hindcast trends match observed trends \checkmark prior 1994 – hindcasts opposite to observed trends X

Causes for false SPG warmings?
Possible to rectify?

Courtesy: Ingo Bethke & Yiguo Wang

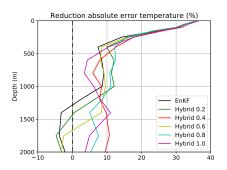
Composite anomaly patterns of 0-2000m temperature and salinity

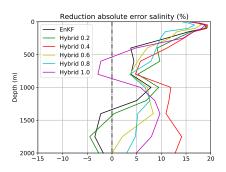


start years: 1983, 1985, 1987, 1989, 1991, 1993

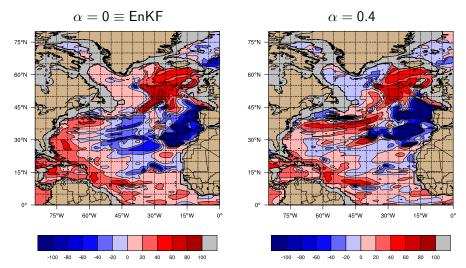
Courtesy: Ingo Bethke & Yiguo Wang

• Résultats du *static hybrid* sur l'Atlantique nord: pourcentage de réduction de l'erreur absolue par rapport au free run de 0 à 2000 m.

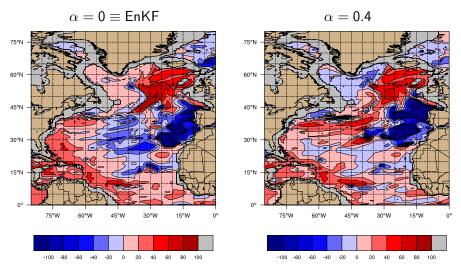




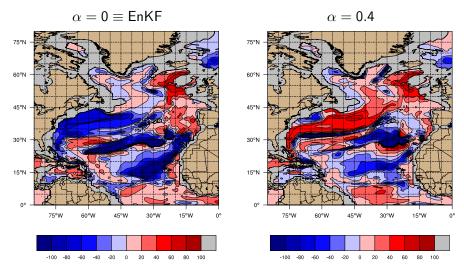
 Pourcentage de réduction de l'erreur absolue de température par rapport au free run à 750 m de profondeur.



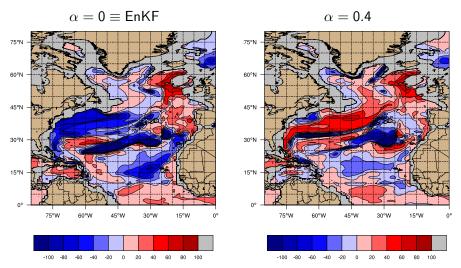
• Pourcentage de réduction de l'erreur absolue de **salinité** par rapport au free run à 750 m de profondeur.



 Poucentage de réduction de l'erreur absolue de température par rapport au free run à 1500 m de profondeur.



• Pourcentage de réduction de l'erreur absolue de **salinité** par rapport au free run à 1500 m de profondeur.



- 1. Une courte introduction
- 2. Assimilation de données et hybridation des covariances
- 3. Expériences numériques sur le modèle QG
- 4. Expériences numériques avec NorCPM
- 5. Conclusion

Conclusion

Conclusion

- Développement et implémentation de différentes méthodes d'hybridation des covariances sur le modèle QG et dans NorCPM (static hybridization);
- Amélioration des résultats par rapport à l'EnKF (QG et NorCPM);
- Amélioration des résultats du dual resolution par rapport au static hybridization (QG);

Perspectives

- Tester l'hybridation en mode prévision avec NorCPM et avec des données réelles;
- Implémenter le dual resolution dans NorCPM;
- Estimation adaptative des coefficients d'hybridation (Ménétrier & Auligné, 2015);
- o Tester la prévision de la gyre sub-polaire avec l'hybridation ;
- Initialistation de la version haute-résolution de NorCPM.