

*Le système d'assimilation  
préopérationnel 4D-Var du SMC:  
résultats préliminaires*

**Pierre Gauthier**

**Monique Tanguay**

**Nils Ek**

**Simon Pellerin**

***Collaboration:***

**Mark Buehner, Stéphane Laroche, Jean-François Mahfouf,  
Josée Morneau, Michel Valin, Ayrton Zadra**

1.

Le travail présenté dans ce séminaire a été réalisé en collaboration avec Monique Tanguay, Simon Pellerin et Nils Ek. Nous tenons à souligner que ce travail est également fait en collaboration étroite avec Stéphane Laroche, Jean-François Mahfouf et Ayrton Zadra: nous bénéficions des améliorations qu'ils ont apporté à la physique simplifiée utilisée par les modèles linéaire-tangent et adjoint. Il faut aussi souligner le travail de Mark Buehner qui a, au cours de la dernière année, utilisé le cadre de développement du 4D-Var pour étudier la nature des vecteurs singuliers et leur dépendance à divers paramètres tels la norme utilisée ou les paramétrages utilisés. Son travail vise à introduire un terme de background qui dépend de l'écoulement, pour donner un estimé plus exact de l'apport de l'assimilation à la qualité du champ d'essai.

## Sommaire

- Rappel du dernier séminaire
  - **Position du problème et description de l'implantation de l'algorithme**
- Développement effectué depuis
  - **Généralisation de la gestion de cycles à l'analyse variationnelle 4D (inclusion de *LABE* dans *Kuklos*)**
- Configuration d'un premier cycle 4D-Var
  - **Réglages préliminaires**
  - **Résultats d'un premier cycle complet (1 mois)**

2.

Au moment du dernier séminaire en avril 2002,, nous avons complété la mise en place des éléments nécessaires pour coupler le modèle GEM-DM au 3D-Var et obtenir un système 4D-Var. Nous rappellerons rapidement la position du problème et les grandes lignes de l'implémentation de l'algorithme.

Le travail de développement effectué depuis a permis d'obtenir un système qui gère une analyse complète du 4D-Var, incluant la minimisation effectuée en boucle interne avec un modèle simplifié et un certain nombre de boucles externes par laquelle l'impact de la correction effectuée aux grandes échelles des conditions initiales est estimé par une intégration du modèle de prévision opérationnel à pleine résolution en utilisant l'ensemble complet des paramètres sous-maille. Ce logiciel de Lancement de la Boucle Externe (LABE), a été inclus dans le système KUKLOS ce qui nous a permis de réaliser un cycle complet d'assimilation 4D-Var qui a duré un mois. Nous présenterons ces résultats en fin de séminaire. Mais auparavant, on présentera une description de la configuration du système 4D-Var.

## Sommaire (suite)

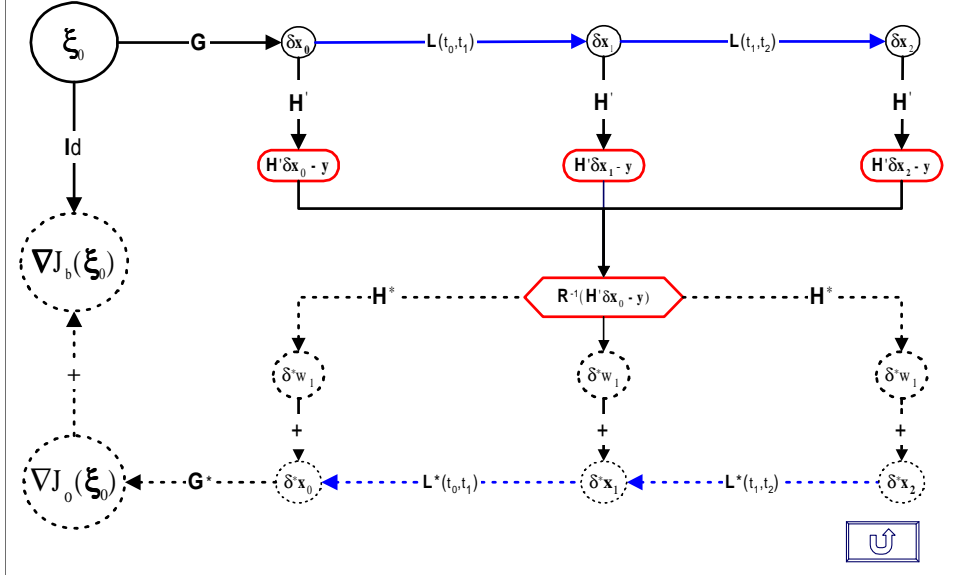
- Impacts de changements aux paramétrages de surface du modèle simplifié
- Covariances de prévision implicites induites par la dynamique
- Tests de validation
- Conclusions

3.

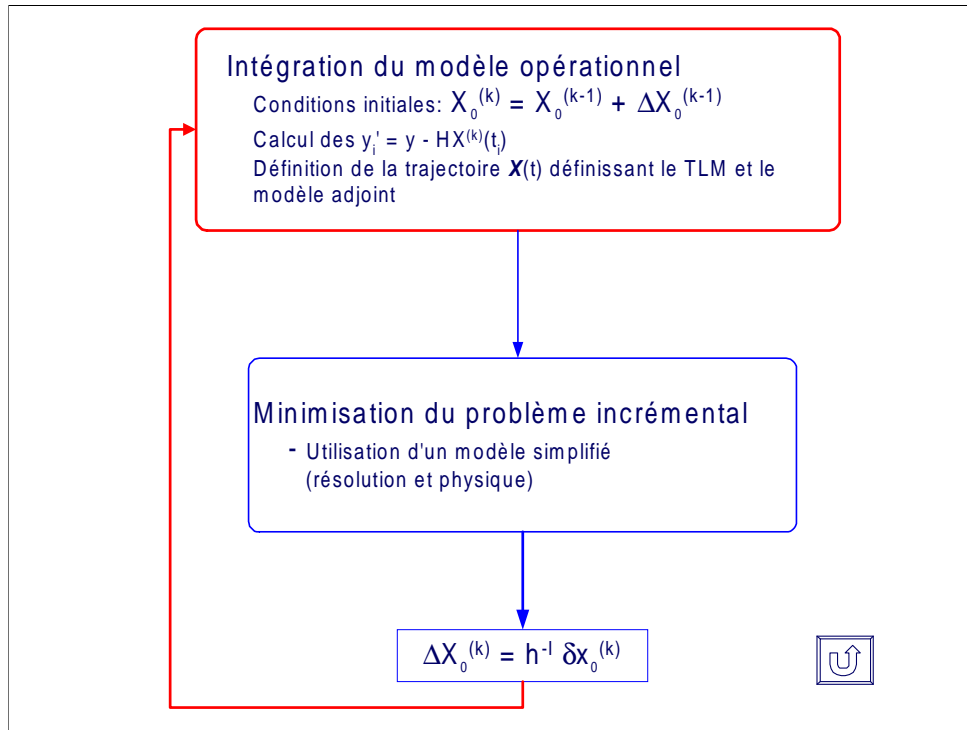
A ce titre, l'impact de changements apportés aux paramétrages de la physique simplifiée sera évalué. A l'aide d'une série d'expériences à une seule donnée, nous examinerons les covariances d'erreur de prévision implicites induites par la dynamique. Ceci s'appuie sur l'équivalence existant entre le 4D-Var et filtre de Kalman.

Etant donné la complexité du système, quelques tests ont été conçus pour s'assurer du bon fonctionnement du 4D-Var. Après avoir résumé les conclusions tirées des résultats obtenus, on présentera finalement les directions de recherche et développement qui sont actuellement explorées en vue de conduire à un système 4D-Var opérationnel dont l'implémentation est prévue au cours de la prochaine année.

## Opérations impliquées dans une itération interne du 4D-Var

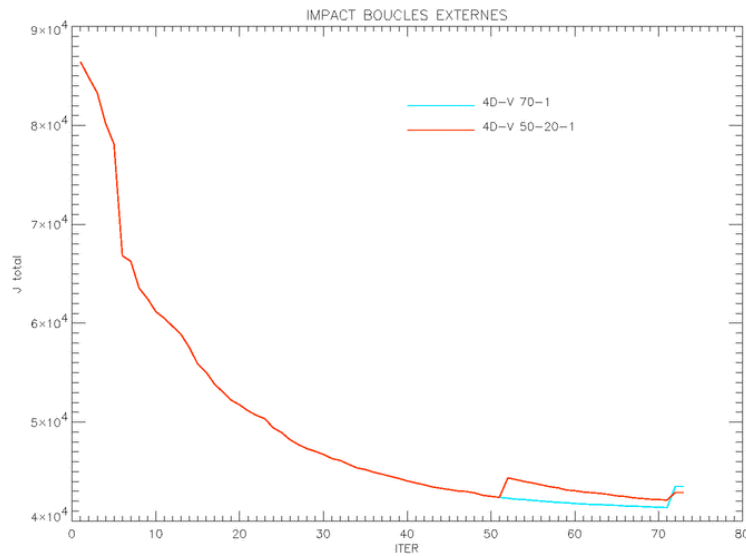


- Le développement du 4D-Var repose sur l'exécution simultanée de deux unités distinctes, le 3D-Var et GEM-DM. Dans le séminaire précédent, une description des mécanismes d'échange avait été donnée ainsi que des mesures de la performance de l'analyse en termes de temps de mur.
- Ce schéma englobe le 3D-Var qui gère ainsi la minimisation alors que GEM-DM est exécuté en mode asservi, c'est-à-dire qu'il attend ses instructions du 3D-Var.
- Depuis avril 2002, les mécanismes d'échanges ont été élargis pour permettre par exemple, le calcul des vecteurs singuliers (séminaire de Mark Buehner, Sept. 2002)



- Le travail de développement s'est poursuivi pour construire des outils de lancement de la minimisation de la boucle interne qui gère l'exécution simultanée du 3D-Var et de GEM-DM (script LMIN4D)
- La boucle externe est également gérée de façon à permettre de varier les configurations de chacune des boucles internes ainsi que du traitement des boucles externes (Lanceur de Boucle Externes ou LABE) qui fait lui-même appel à LMIN4D pour chacune des boucle interne.
- Finalement, LABE est inclus dans KUKLOS qui peut donc gérer ainsi les cycles d'assimilation du 3D-Var et du 4D-Var

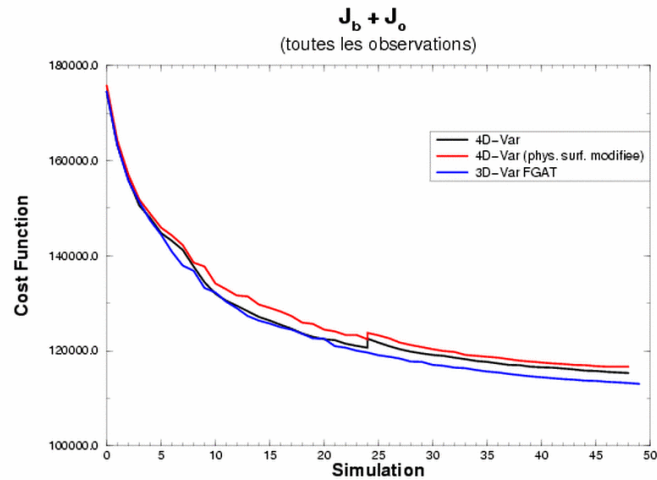
## Impact des itérations externes



6.

- Pour décider de la configuration de la minimisation, plusieurs expériences ont été conduites pour déterminer le nombre d'itérations de la boucle externe ainsi que le nombre d'itérations qui doivent être faites dans chacune des boucles internes.
- Le graphique ci-dessus montre l'impact de la boucle externe. Il indique que le rafraîchissement de la trajectoire conduit à une réévaluation de l'écart aux observations par rapport à une intégration du modèle nonlinéaire à pleine résolution et pleine physique (i.e., le modèle opérationnel). La hauteur du saut est une mesure de l'impact des différences entre le modèle simplifié utilisé dans la minimisation et le modèle opérationnel.
- Avec deux itérations externes, on constate que l'ajustement final aux observations (mesuré par la valeur de  $J$ ) est amélioré. Il faut rappeler qu'en 4D-Var, la réévaluation des écarts aux observations implique une intégration du modèle opérationnel sur la fenêtre d'assimilation qui est ici de 6-h.

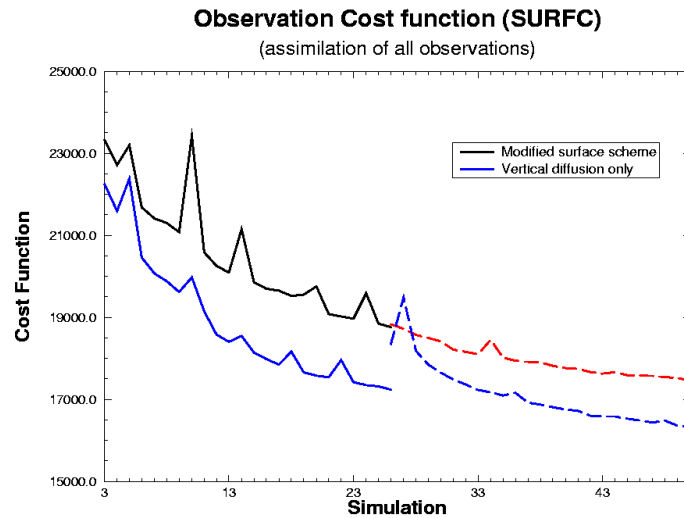
## Impact de changements au traitement de la surface (Stéphane Laroche)



7.

Cette figure présente la fonction coût totale en fonction du nombre d'itérations pour une expérience réalisée par Stéphane Laroche dans laquelle la physique utilisée dans le modèle nonlinéaire correspond à celle du modèle simplifié. La courbe en rouge indique que dans ce cas, le saut associé au rafraîchissement de trajectoire est réduit passablement. Ceci indique l'importance d'avoir une physique simplifiée qui soit cohérente avec celle du modèle nonlinéaire à haute résolution (I.e., modèle opérationnel)

## Impact de changements au traitement de la surface (Stéphane Laroche)

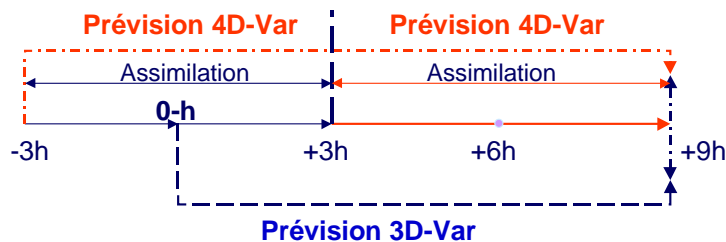


8.

Le saut observé sur la figure précédente est encore plus visible lorsque l'on examine le comportement du terme  $J_0$  associé aux observations de surface. La physique simplifiée utilisée ici ne concernait que la diffusion verticale près de la surface (surface drag).



## Représentation schématique des fenêtres d'assimilation impliquées



Fenêtre d'assimilation:  $-3h < t < +3h$   
Période de validation :  $+3h < t < +9h$




9.

Un cycle d'assimilation 4D-Var implique des intégrations sur toute la fenêtre d'assimilation qui est ici de 6-h. Pour les besoins du cycle, l'analyse est définie au temps central qui correspond à l'heure synoptique. C'est à ce moment qu'est alors effectuée l'analyse des champs de surface qui sont utilisés pour effectuer une intégration du modèle non linéaire qui donne le champ d'essai pour la prochaine analyse.

Il faut souligner ici que le redémarrage du modèle, tel que pratiqué ici à CMC-MRB, force une remise à zéro des variables prognostiques de la physique. L'argument invoqué est que celles-ci s'ajustent rapidement en quelques pas de temps à ce qui est donné par les variables de la dynamique. Toutefois, ceci est toutefois susceptible d'introduire un déséquilibre dans l'état du modèle qui pourrait altérer l'équilibre induit dans l'analyse par le 4D-Var. Bien qu'il soit techniquement possible de redémarrer le modèle en conservant les variables physiques du champ d'essai, nous avons estimé que ceci pourrait potentiellement conduire à une dérive du cycle d'assimilation.

## Traitement des champs physiques

- Prévion (champ d'essai) est initiée à 0-h de la façon habituelle (variables prognostiques de la physique sont mises à zéro) 
- Préservation de l'équilibre dynamique interne
  - **Etat complet est conservé à T = +3-h**
- Impact du filtre digital (Nils Ek)
  - **Si nécessaire, il sera remplacé par un filtre digital incrémental**

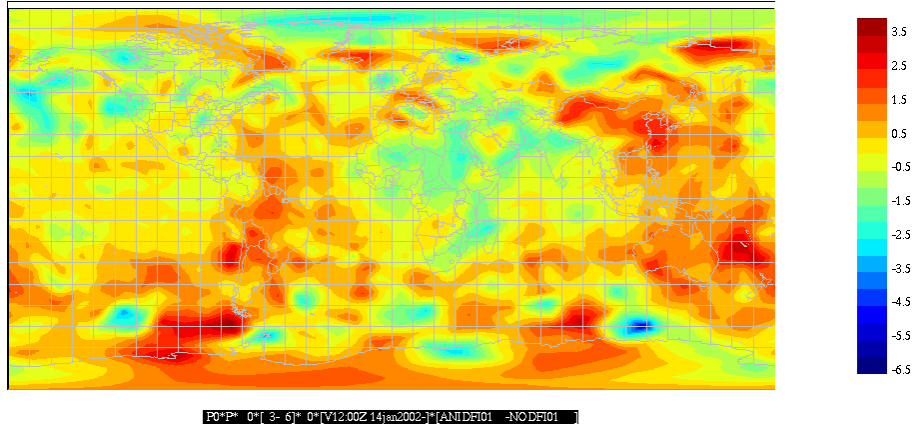
$$\hat{\mathbf{X}}_a = \hat{\mathbf{X}}_a(t) + (\mathbf{X}_b(t) - \hat{\mathbf{X}}_b(t))$$
$$\mathbf{X}_a(t_0) = \mathbf{X}_b(t_0) + \delta\mathbf{X}_a(t_0)$$
$$\hat{\mathbf{X}}(t) = \text{Etat filtré au temps } t \text{ par filtre digital}$$

10.

Nous n'avons pas voulu adresser ce problème tout de suite bien que nous reconnaissons qu'il serait souhaitable de le faire mais dans le cadre d'un projet à être effectué en collaboration avec le groupe des paramétrages physiques. Toutefois, tel qu'illustré plus haut, le champ d'essai est le résultat d'une intégration de 9-h et la trajectoire utilisée est déjà le résultat d'une intégration de 3-h ce qui permet de rétablir l'équilibre physioco-dynamique. Toutes les boucles externes, sont ensuite redémarrées en conservant les variables physiques de ce champ d'essai à +3-h

Dans Gauthier et Thépaut (2001), il a été montré que l'analyse 4D-Var ne souffre pas de problème de spin-up aussi important qu'une analyse séquentielle comme le 3D-Var. Par contre, s'il s'avérait utile de faire un tel ajustement, il serait nettement préférable de le faire en mode incrémental. En absence d'observations, une initialisation par filtre digital incrémental préserve l'équilibre existant dans le champ d'essai. Une approche non-incrémentale a pour effet de filter les ondes de marée et semi-diurnes. Ce signal est apparent dans la correction apportée au champ d'essai par le filtre digital à la pression de surface.

Application du filtre digital au champ d'essai  $X_b$   
Correction apportée à la pression de surface par le filtre  
digital non-incrémental



11.

Cette figure illustre la correction à la pression de surface apportée par un filtre digital appliqué à une prévision de 6-h. C'est ce signal que préserve une application d'un filtre digital incrémental.

## Expériences d'assimilation: cycle 4D-Var

- Assimilation 3D-Var avec calcul des innovations au temps 'exact'
  - "First-Guess at Appropriate Time" (FGAT) (Lönnerberg, 1988)
  - Incréments produits à l'heure synoptique
- Assimilation 4D-Var 6-h
  - ajustement effectué à T - 3-h
  - Analyse obtenue d'une intégration 6-h
  - Deux boucles (50+20) avec diffusion verticale
- 3D-Var opérationnel avec toutes les observations
- GEM-DM en configuration "opérationnelle"
  - (i.e., pleine physique, et pleine résolution)
- Période du 16 décembre 2001 au 15 janvier 2002

12.

Les expériences présentées dans ce séminaire comparent les analyses et prévisions 4D-Var contre leur équivalent obtenu avec le 3D-Var. Des expériences FGAT ont aussi été réalisées mais elles ne montrent pas de différences significatives par rapport à un 3D-Var conventionnel. Soulingons ici qu'aucun gain n'est observé avec les observations utilisées opérationnellement. Hors, le thinning des observations tend à privilégier les observations proches de l'heure synoptique.

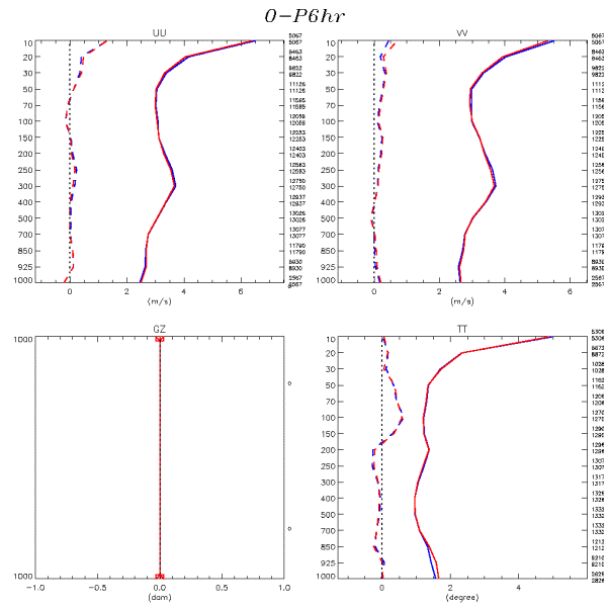
Les expériences conduites ici utilisent toutes les observations utilisées opérationnellement et le modèle dit nonlinéaire correspond au modèle opérationnel. Après avoir expérimenté avec différentes configurations de la minimisation, le 4D-Var utilise deux boucles externes comprenant respectivement 50 et 20 itérations pour la minimisation des boucles internes..

Le cycle 4D-Var a été réalisé pour une période d'un mois allant du 16 décembre 2001 jusqu'au 15 janvier 2002. Cette période a été retenue parce qu'elle correspond à celle utilisée pour le développement qui a conduit à l'implémentation AMSU-b/GOES.

## 4D-Var vs. 3D-Var

Vérifications des prévisions 6-h pour la période du 16/12/2001 au 15/01/2002 sur l'hémisphère Nord

— 4D-Var  
— 3D-Var



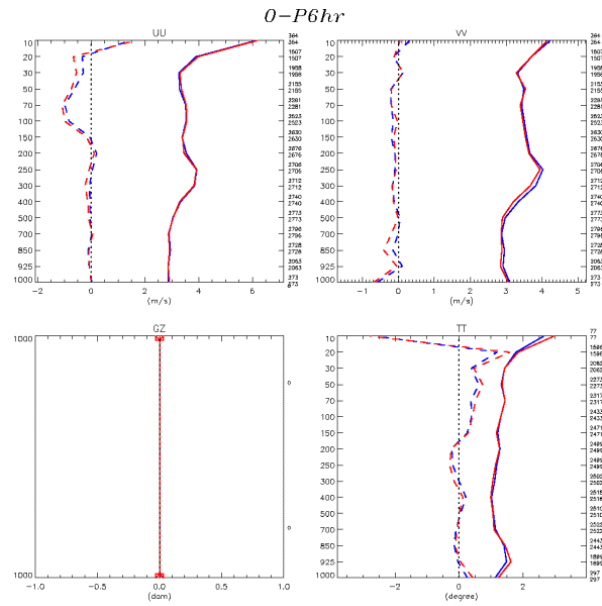
13.

Les résultats montrent un signal neutre sur les innovations calculées par rapport aux radiosondages sur l'hémisphère Nord...

## 4D-Var vs. 3D-Var

Vérifications des prévisions 6-h pour la période du 16/12/2001 au 15/01/2002 sur l'hémisphère Sud

— 4D-Var  
— 3D-Var



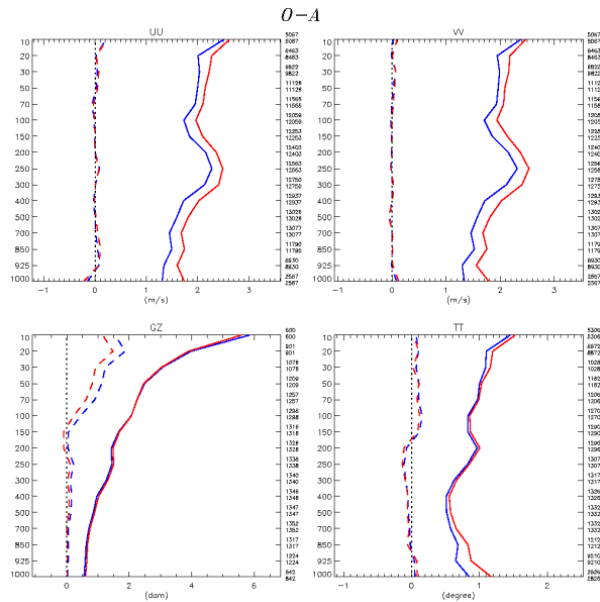
14.

... et sur l'hémisphère Sud.

4D-Var vs. 3D-Var  
Vérifications des  
analyses contre  
radiosondages sur  
l'hémisphère Nord



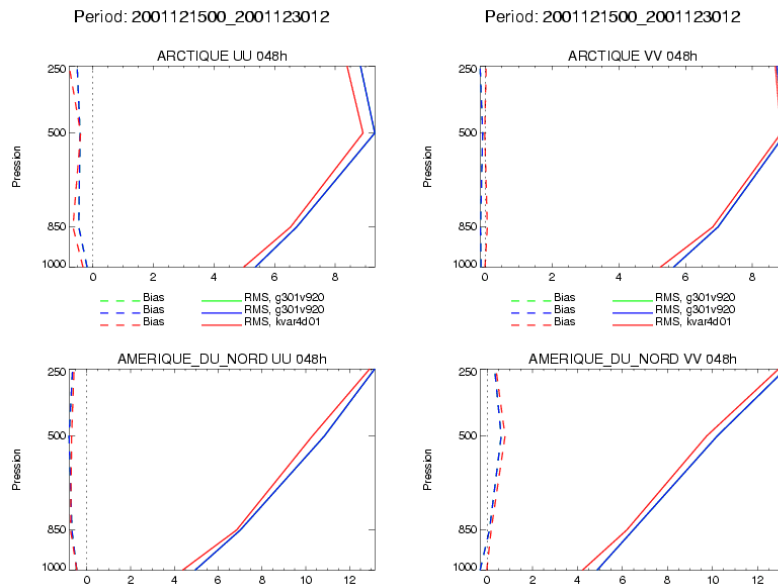
— 4D-Var  
— 3D-Var



15.

Par contre, une dégradation significative a été observée dans l'écart entre les analyses et les observations sur l'hémisphère Nord. Il faut toutefois se rappeler que cet écart disparaît complètement après 6-h d'intégration comme le montraient les graphiques des O-P. De plus, il faut aussi noter que l'écart au radiosondages mesure l'impact sur une prévision de 3-h pour le 4D-Var. Finalement, nous avons noté que le 4D-Var collait beaucoup mieux aux données asynoptiques comme les AIREP et les données ATOVS.

## 4D-Var vs. 3D-Var: Vérifications des prévisions à 48-h



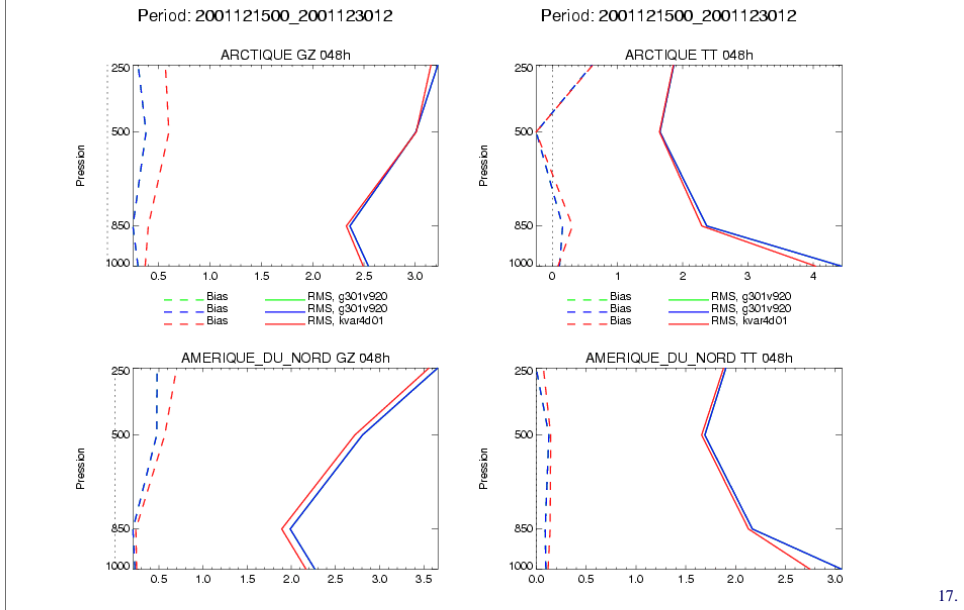
16.

Mesuré sur l'Amérique du Nord, l'impact du 4D-Var est nettement positif sur les prévisions à 48-h. Bien que ce signal positif ne prévaille pas partout, il demeure néanmoins représentatif de l'ensemble des résultats. Nous avons noté par exemple un impact notable dans les tropiques par exemple. Les vérifications présentées ont été produites en comparant une prévision contre sa propre analyse. Comme nous avons noté un écart plus grand entre l'analyse 4D-Var et les radiosondages, une validation contre radiosondages doit être faite pour établir clairement l'existence d'un impact positif.

Le graphique ci-dessus représente l'impact sur les composantes du vent et la vérification n'a été complétée que pour les deux premières semaines du cycle. Le travail est en cours pour inclure les deux dernières semaines dans l'évaluation.

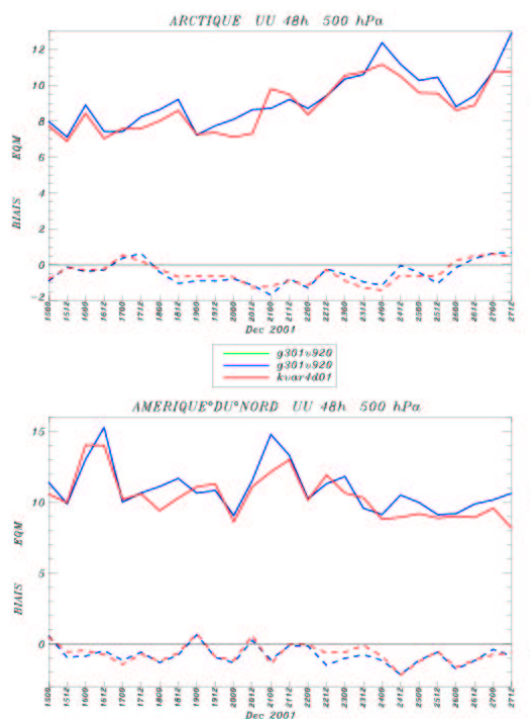


## 4D-Var vs. 3D-Var: Vérifications des prévisions à 48-h



... et ici nous observons également un impact positif sur la température et le géopotentiel.

### 4D-Var vs. 3D-Var: Vérifications des prévisions à 48-h



18.

Ce graphique illustre la variation au jour le jour de l'erreur de la prévision à 48-h pour la composante U du vent. Bien qu'un impact systématiquement positif soit observé, nous rappelons que d'autres aspects de la prévision en différentes régions montrent un impact neutre ou négatif.

## Diagnostic de ce premier cycle

- Résultats positifs en termes d'impact sur la prévision
- Dégradation des écarts de l'analyse aux observations
  - **Ajustement est mieux ou comparable pour les observations asynoptiques**
  - **Dégradation par rapport aux radiosondages**

19.

Les résultats sont extrêmement positifs compte tenu du fait que ceci constitue le tout premier cycle d'assimilation 4D-Var. En résumé, le problème le plus important est la dégradation des écarts de l'analyse par rapport aux observations de radiosondages. Il nous faut en trouver la cause. Toutefois, l'analyse 4D-Var concorde beaucoup mieux avec les observations asynoptiques que ne le fait le 3D-Var.

## Coût informatique (sur NEC-SX6)

- Pour des scenario 50/20 :
  - **Boucle interne (50+20 itérations) :**
  - **Coût (moyen/realtime) total : 78 minutes**
  - **Coût moyen par itération : 67 secondes.**
- Boucles externes
  - **(intégration GEMDM HR, 6 heures; pas de temps 45 min.):**
  - **Coût moyen: 2.5 minutes**
- Coût total de l'analyse:
  - **total :  $54 + 24 + 2 \times 2.5 = 83$  minutes.**

20.

Sur le NEC-SX6, le 4D-Var en configuration 50/20 s'exécute en 83 minutes ce qui correspond à 7 fois le temps d'exécution du 3D-Var opérationnel. Cet estimé inclut le coût additionnel des intégrations du modèle opérationnel réalisées en boucle externe.

## Résumé des points examinés en 3D-Var

- 3D-Var: impact de la projection de  $N_K$  à  $(N_{K-1})$  niveaux
  - Relativement mineur
  - Différences importantes observées en présence du QC-Var
- 3D-Var: impact de la simple précision
  - Test dans lequel on tronque la fonction coût et son gradient à 32-bits.
  - Différences négligeables
- Impact du filtre digital
  - Activé à chaque itération externe et dans la production du champ d'essai (intégration 9-h)
  - Pas d'impact significatif pouvant expliquer l'écart observé dans les O-A (résultats obtenus d'un autre cycle 4D-Var)

21.

Du fait que l'analyse 4D-Var demande une intégration de modèle à chaque itération, l'ajustement fait aux champs de surface est immédiatement perdu lorsque démarre l'intégration du modèle linéaire-tangent puisqu'au tout premier pas de temps, la physique remplace ces champs par des valeurs diagnostiques basées sur l'état au niveau supérieur. Des expériences ont donc été faites pour forcer une contrainte de même nature dans le 3D-Var et les résultats n'ont montré qu'un impact relativement mineur. Les différences observées étaient, comme on pouvait s'y attendre, localisées près de la surface.

Un autre point important est que le modèle fonctionne à simple précision et cette imprécision pourrait potentiellement avoir un impact sur le comportement de la minimisation. Encore une fois, on a tronqué, dans le 3D-Var, à simple précision l'évaluation des fonctions coût et de leur gradient. Les résultats ont montré des différences qu'on peut considérer comme négligeable.

Finalement, l'activation du filtre digital à chaque itération externe en 4D-Var ne semble pas montré d'impact suffisant permettant d'expliquer les écarts importants observés entre les analyses 4D-Var et les données de radiosondages.

Remarque: pour tous ces tests, il est important de désactiver le contrôle de qualité variationnel qui semble montrer une sensibilité surprenante à de légers changements dans les analyses.

## Quelques diagnostics...

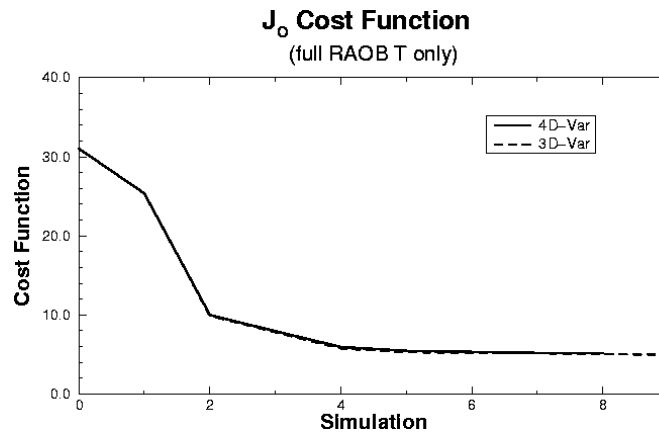
- Assimilation d'un seul radiosondage
  - **Tester l'habilité du 4D-Var à déterminer des conditions initiales conduisant à une prévision qui colle mieux aux observations**
- Assimilation à 1 observation (u, v ou T)
  - **Examen des covariances implicites induites par le 4D-Var**

22.

Pour tenter d'expliquer l'écart entre les analyses 4D-Var et les RAOBs, une série d'expérience a été conduite dans lesquelles un seul radiosondage est utilisé. Ceci nous permet d'examiner l'aptitude du 4D-Var à corriger les conditions initiales qui conduirait à une prévision (3-h) qui collerait aussi bien aux observations que ne le fait le 3D-Var.

Une série d'expériences à une seule donnée a été faite pour comparer les covariances implicites induites par le 4D-Var avec celles du 3D-Var qui sont stationnaires.

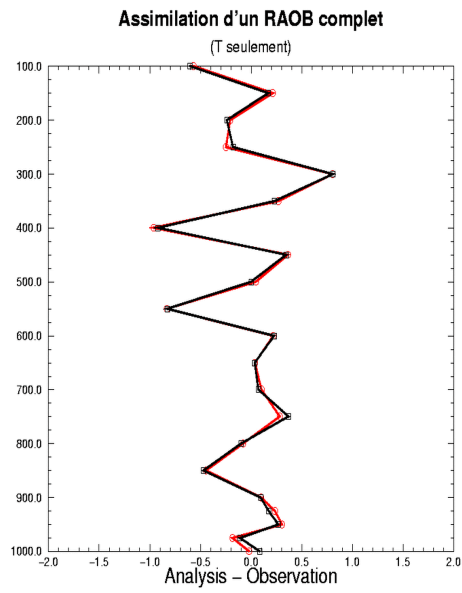
## Assimilation d'un seul RAOB avec T seulement



23.

Aucune différence n'est observée entre le 3D-Var et le 4D-Var lorsqu'on n'utilise que les données de température du radiosondage. Le comportement de la fonction coût ( $J_o$ ) est virtuellement identique dans les deux cas.

Comparaison  
des écarts aux  
observations  
( $H(X_a) - y$ )

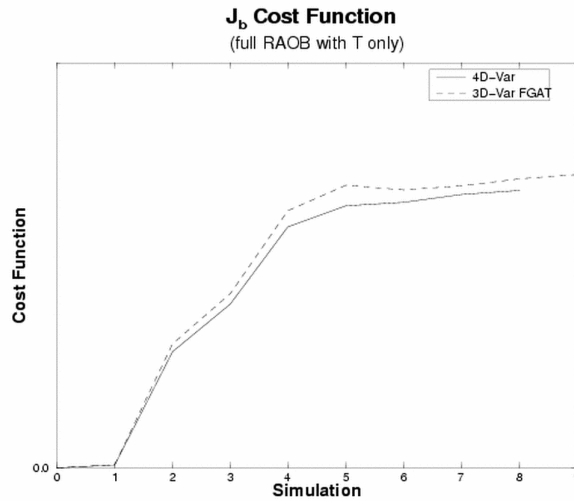


24.

Les O-A représentés ici pour tout le radiosondage sont également presque identiques comme le montre cette figure.



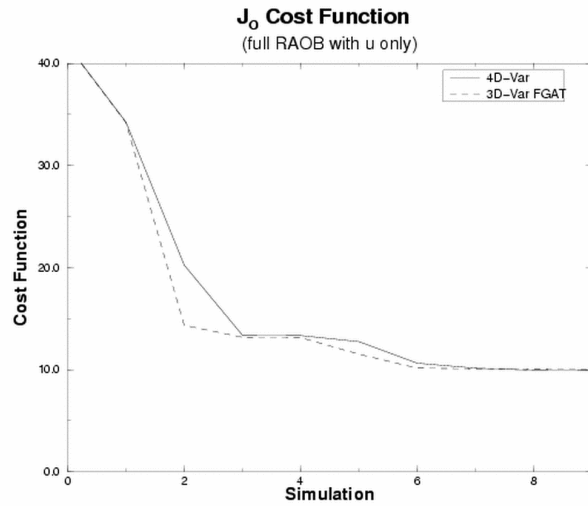
## Assimilation d'un seul RAOB avec T seulement



25.

Cependant, on note que  $J_b$  prend une valeur légèrement plus élevée. Or  $J_b$  est en quelque sorte une mesure de la norme de l'incrément d'analyse globale mesuré par rapport à la norme définie par les covariances d'erreur de prévision. Soulignons que c'est la norme de l'incrément au temps initial qui est mesurée ici.

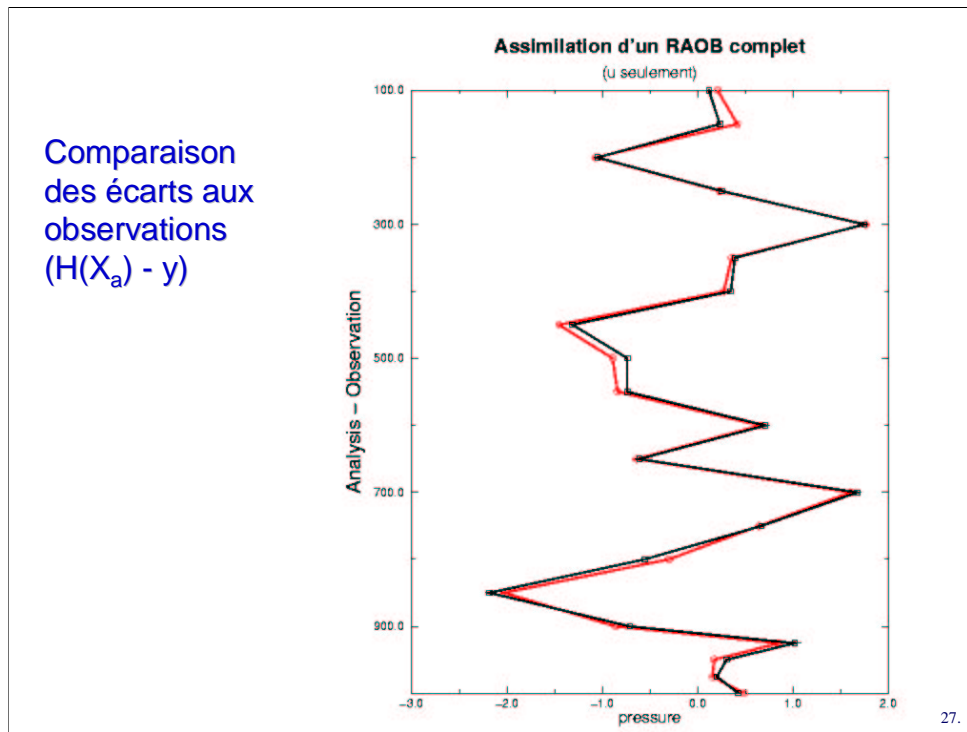
## Assimilation d'un seul RAOB avec $u$ seulement



26.

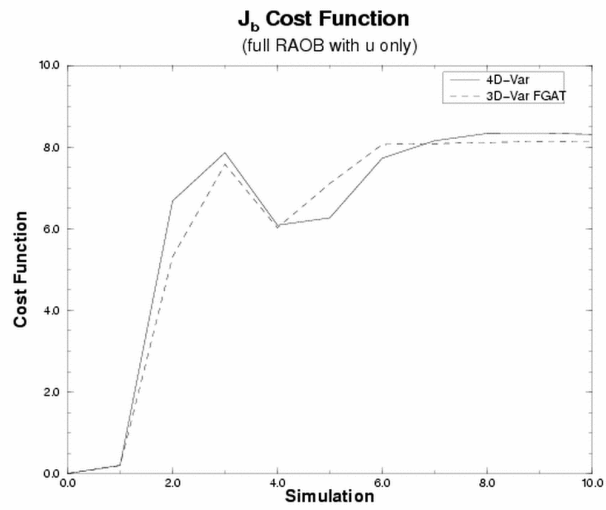
Nous avons répété ces expériences en n'assimilant que les données de  $u$  et les conclusions sont assez semblables que celles tirées pour l'assimilation de  $T$ . La figure ci-dessous montre le comportement de la fonction de coût  $J_0$  en fonction du nombre d'itérations.

Comparaison  
des écarts aux  
observations  
( $H(X_a) - y$ )



Les O-A représentés ici pour tout le radiosondage sont encore une fois presque identiques comme le montre cette figure. Il faut toutefois souligner qu'un écart légèrement plus grand est observé près du niveau du 500 hPa

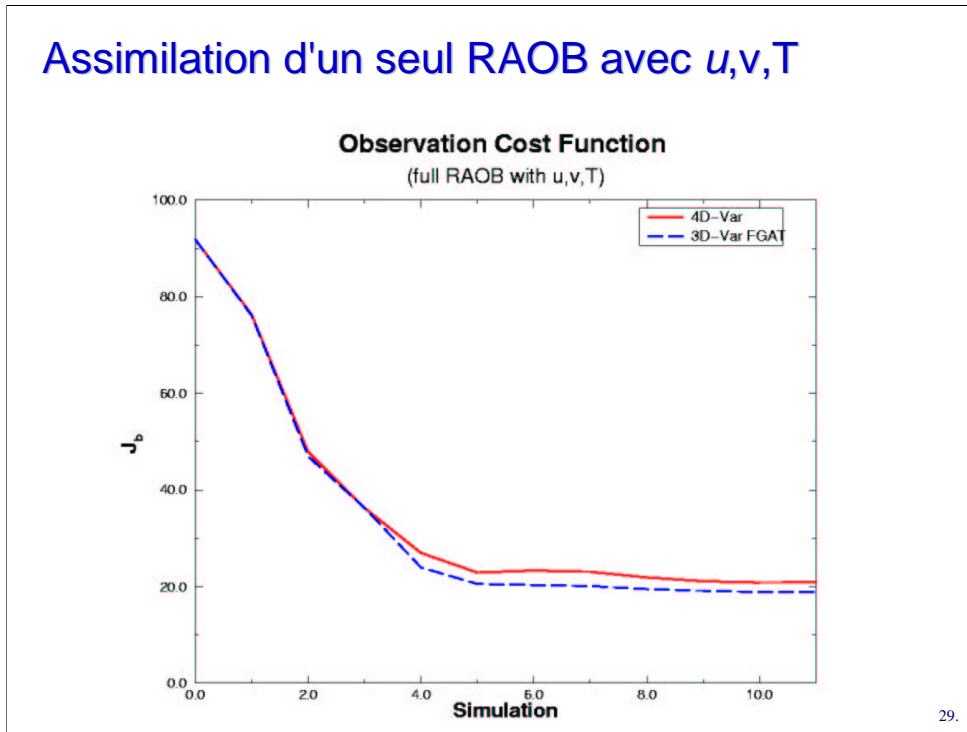
## Assimilation d'un seul RAOB avec $u$ seulement



28.

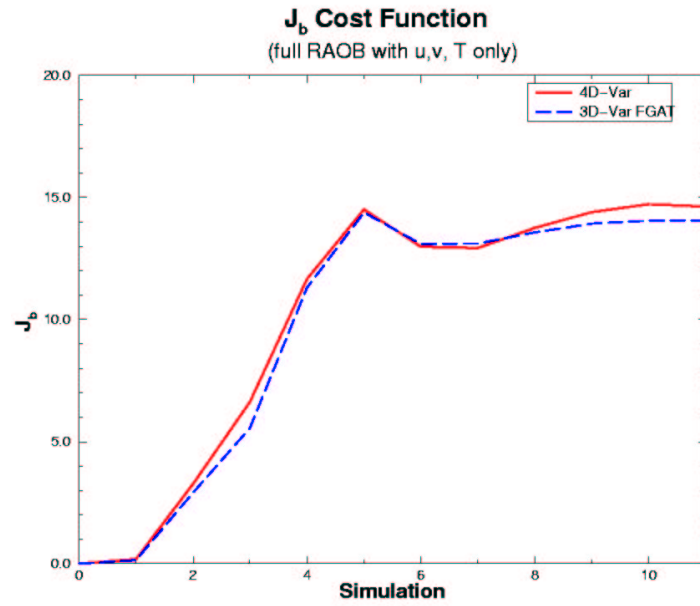
En ce qui concerne  $J_b$ , il ne semble pas y avoir ici d'écart majeur entre le 3D-Var et le 4D-Var.

## Assimilation d'un seul RAOB avec $u,v,T$



Le problème commence à apparaître dans cette expérience lorsque  $u,v$  et  $T$  sont assimilés. Nous assimilons donc le radiosondage au complet dans cette expérience. On note immédiatement que le 4D-Var s'ajuste globalement moins bien à l'ensemble des données comme le montre le graphe de  $J_o$  en fonction du nombre d'itérations.

## Assimilation d'un seul RAOB avec $u, v, T$



30.

Une dégradation est également observée pour  $J_b$  tout comme dans l'expérience où on n'assimilait que les données de température.

## Equivalence entre le filtre de Kalman et le 4D-Var

- Expérience avec une observation au temps  $t_0 + T$ 
  - **Conditions initiales:**  $\mathbf{X}_a(t_0), \mathbf{B}(t_0)$
  - **Cas linéaire avec une observation à  $t_0 + T$  et sans erreur de modèle**
- Incrément d'analyse du filtre de Kalman

$$\begin{aligned}\delta \mathbf{x}_a(t_0 + T) &= \mathbf{B}(t_0 + T) \mathbf{H}^T (\mathbf{R} + \mathbf{H} \mathbf{B}(t_0 + T) \mathbf{H}^T)^{-1} \mathbf{y}'(t_0 + T) \\ &= (\mathbf{L} \mathbf{B}_0 \mathbf{L}^T) \mathbf{H}^T (\mathbf{R} + \mathbf{H} \mathbf{L} \mathbf{B}_0 \mathbf{L}^T \mathbf{H}^T)^{-1} \mathbf{y}'(t_0 + T) \\ \mathbf{y}' &= \mathbf{y} - \mathbf{H}(\mathbf{X}_b(t_0 + T))\end{aligned}$$

- Ici  $\mathbf{L} \equiv \mathbf{L}(t_0, t_0 + T)$  est le propagateur du système linéaire tangent

31.

La théorie de l'interpolation statistique nous donne l'expression suivante pour l'incrément d'analyse en  $t_0 + T$ : les covariances d'erreur de prévision sont le résultat d'une intégration de  $t_0$  jusqu'à  $t_0 + T$  qui correspond ici au temps d'observation.

- Incrément d'analyse du 4D-Var

$$\begin{aligned}\delta \mathbf{x}_a(t_0) &= \mathbf{B}_0 \left( L^T \mathbf{H}^T \right) \left( \mathbf{R} + (\mathbf{H}L) \mathbf{B}_0 (L^T \mathbf{H}^T) \right)^{-1} \mathbf{y}'(t_0 + T) \\ \delta \mathbf{x}_a(t_0 + T) &= L \delta \mathbf{x}_a(t_0) \\ &= L \mathbf{B}_0 L^T \mathbf{H}^T \left( \mathbf{R} + \mathbf{H} (L \mathbf{B}_0 L^T) \mathbf{H}^T \right)^{-1} \mathbf{y}'(t_0 + T)\end{aligned}$$

- **Incréments d'analyse sont identiques à ceux du filtre de Kalman à la fin de la période d'assimilation**

32.

En considérant que l'intégration du linéaire-tangent fait partie intégrante de l'opérateur d'observation, l'expression ci-dessus établit qu'un 4D-Var sur la fenêtre  $t_a$  jusqu'à  $t_a + T$  produit le même incrément d'analyse au temps final que ce qu'on obtiendrait avec un filtre de Kalman. On suppose ici que le 4D-Var et le filtre de Kalman sont tous deux initiés avec les mêmes covariances d'erreur de prévision en  $t = t_a$ .



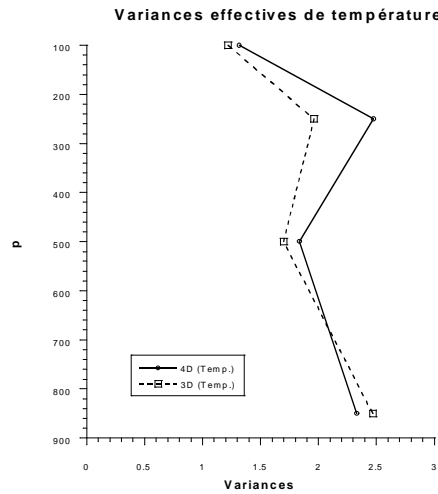
## Relations entre incréments d'analyse à une observation et covariances $B(t)$

- Observation de u  $\Delta u \rightarrow \mathbf{B}_{uu}$   
 $\Delta v \rightarrow \mathbf{B}_{vu}$   
 $\Delta T \rightarrow \mathbf{B}_{Tu}$
- Observation de T  $\Delta u \rightarrow \mathbf{B}_{uT}$   
 $\Delta v \rightarrow \mathbf{B}_{vT}$   
 $\Delta T \rightarrow \mathbf{B}_{TT}$
- **Incréments d'analyse sont identiques à ceux du filtre de Kalman au temps d'observation**

33.

De ceci, il découle qu'un incrément d'analyse obtenu d'une observation de u nous permet d'obtenir une représentation partielle de  $\langle uu \rangle$ ,  $\langle vu \rangle$ , et  $\langle Tu \rangle$ . D'autres covariances peuvent être obtenues en utilisant une seule observation de T.

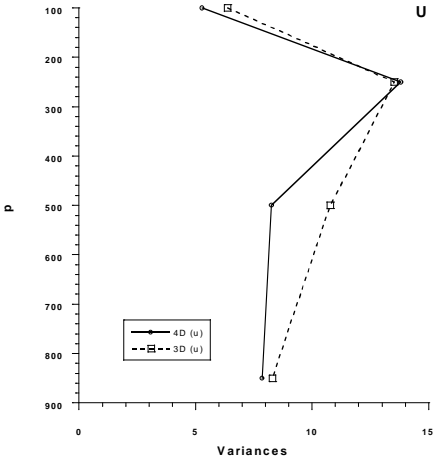
## Variances effectives



34.

En répétant plusieurs expériences de ce type, les variances d'erreur effectives du 4D-Var ont pu être obtenues. Elles sont illustrées ici pour T et elles sont plus élevées lorsqu'on s'approche du courant-jet

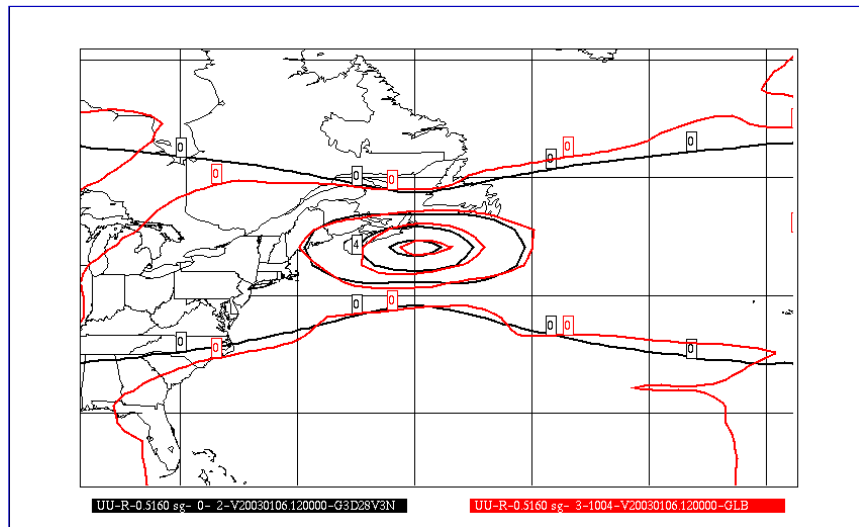
# Variances effectives (vents)



35.

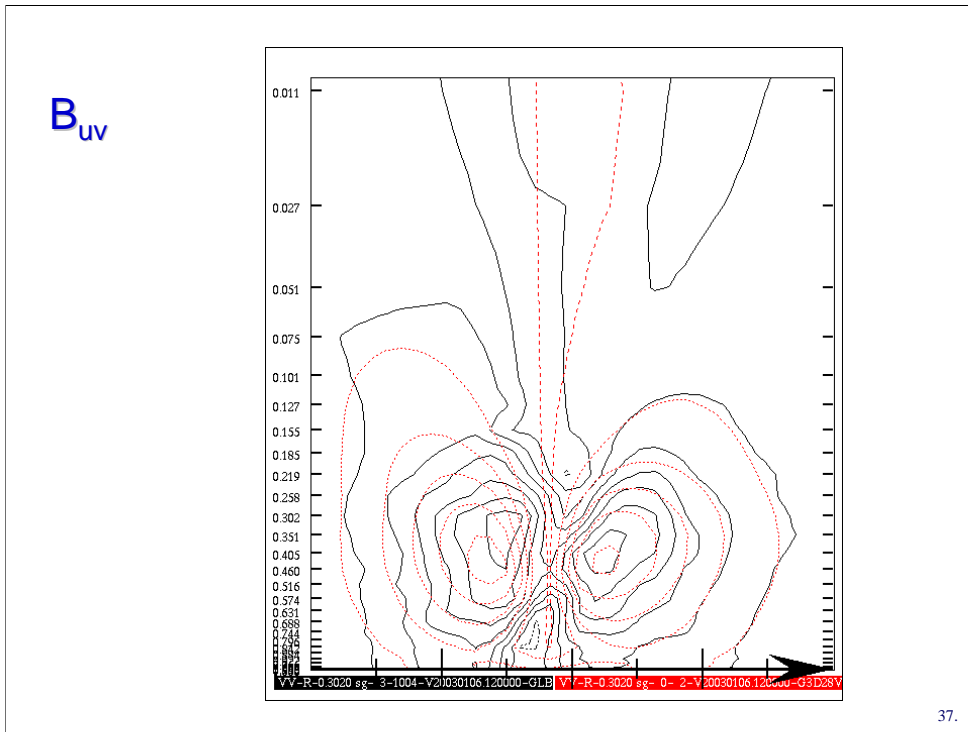
Pour les vents, on note une sous-estimation presque partout des variances d'erreur effectives du 4D-Var.

$B_{uu}$



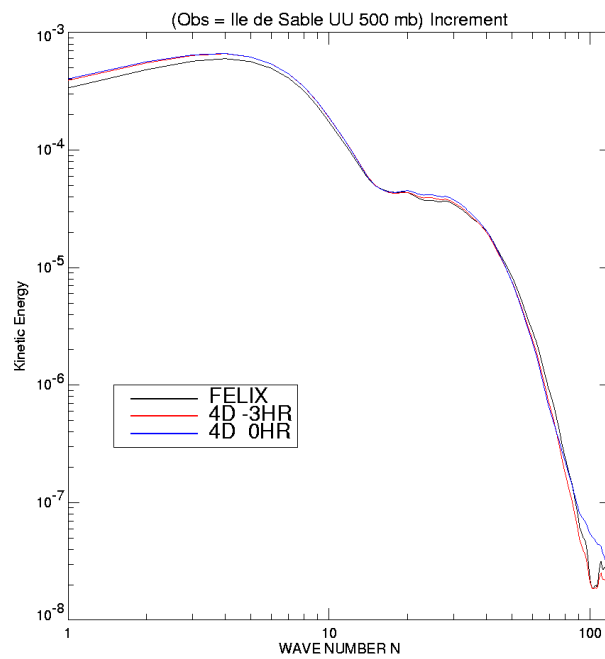
36.

Les covariances du 3D-Var et du 4D-Var concordent assez bien bien qu'on note un léger décalage (d'un demi-point de grille) par rapport à la position de l'observation.



Une coupe verticale de  $B_{uv}$  révèle une nature plus bruyante des covariances induites par le 4D-Var.

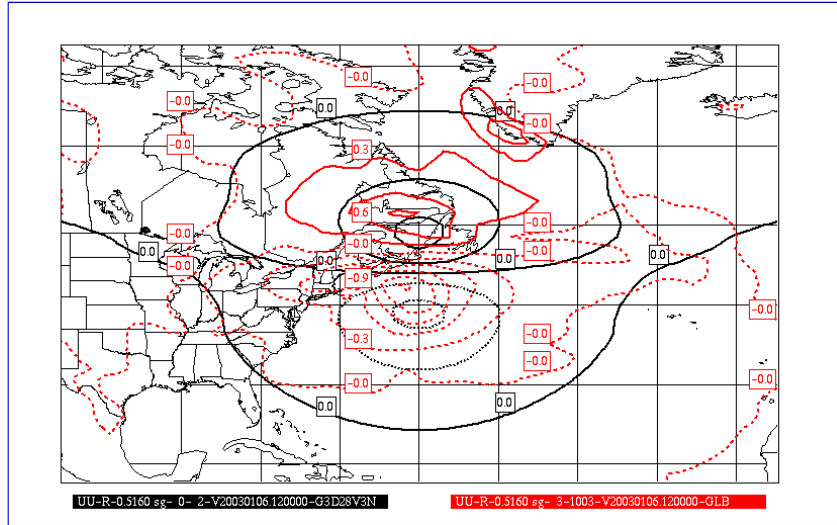
Spectre  
d'énergie  
cinétique  
associé à  
l'incrément  
vent



38.

Ces spectres d'énergie cinétique sont incorrectement calculés (A. Zadra, communication personnelle). Le repli spectral de l'incrément du 3D-Var dans les grands nombres d'ondes n'est que le reflet de ceci.

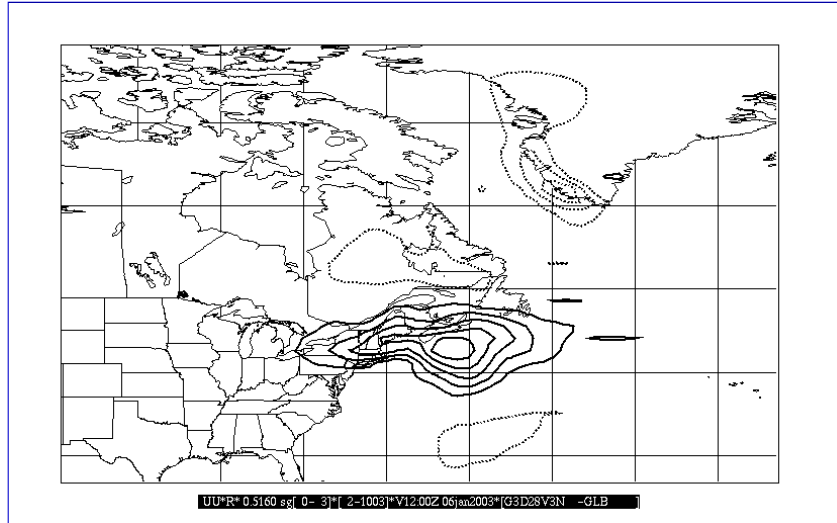
$B_{uT}$



39.

En comparant les covariances  $B_{\langle uT \rangle}$  du 3D-Var et du 4D-Var, on note une structure sur la côte du Groënland qui apparaît suspecte.

**Différences entre  $\Delta u_{3D}$  et  $\Delta u_{4D}$  (1 obs. T à 500 hPa)**



40.

La différence entre les deux incréments précédents fait ressortir encore mieux cette structure.



## Le 4D-Var identité

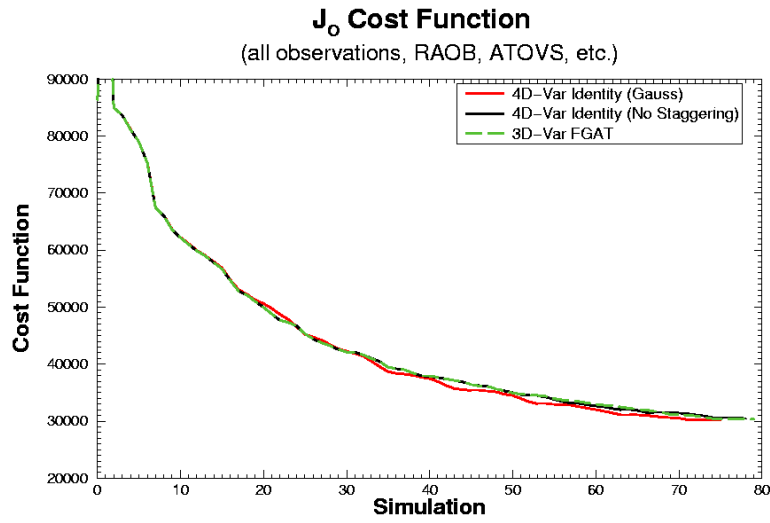


- Validation en remplaçant TLM/Adj par Identité
  - **impact des changements de variables**
  - **changement de grille**
  - **grilles décalées pour les vents**

41.

Si on remplace le modèle linéaire-tangent par l'identité, nous devrions en principe reproduire exactement le 3D-Var. Ceci nous permet de tester l'impact de certaines opérations comme les changements de variables (e.g.,  $\log q$  à  $q$ ) effectuant le passage des variables d'analyse aux variables utilisées par le modèle. Des changements de grille sont aussi nécessaires pour passer de la grille gaussienne d'analyse à la grille lat-lon de GEM. Il faut aussi inclure le passage des vents vers une grille décalée de type Arakawa-C.

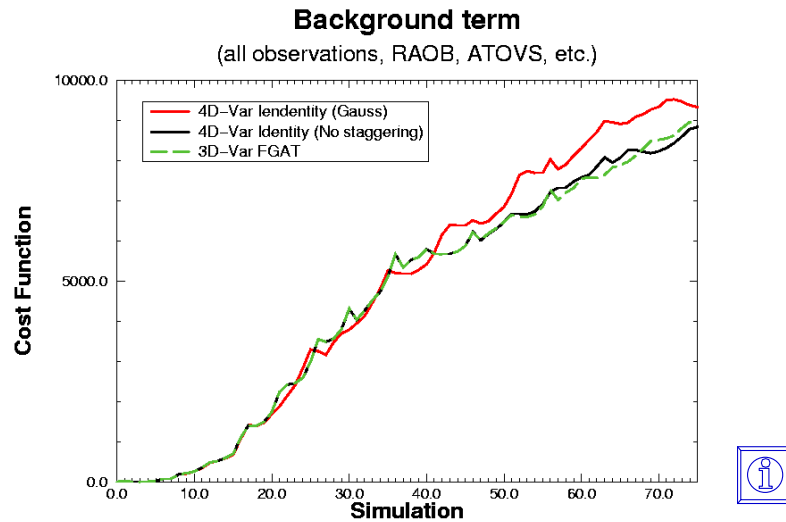
## Validation du 4D-Var: le 4D-Var identité



42.

En utilisant toutes les observations, ces opérations ne montrent pas d'impact significatif sur l'évaluation de  $J_0$ .

## Validation du 4D-Var: le 4D-Var identité



43.

Par contre, l'élimination du staggering montre un impact important qui rapproche le 4D-Var identité du 3D-Var. Nous avons donc inclus, à même le 3D-Var, les opérateurs nécessaires qui permettent de passer directement des coefficients spectraux du tourbillon et de la divergence aux vents définis sur la grille décalée utilisée par GEM.

## Conclusions

- Cycles d'assimilation 4D-Var
  - **Gérés dans un environnement automatisé**
  - **Développement est en phase avec celui du 3D-Var et de GEM-DM**
  - **Interface de contrôle fournit la flexibilité requise pour étudier différentes configurations du 4D-Var incrémental**
- Points en examen
  - **Transparence de l'interface entre le 3D-Var et GEM-DM (e.g., validation du 4D-Var identité)**
  - **Comportement de la dynamique du modèle et son impact sur l'évolution des incréments**

44.

Dans ce séminaire, nous avons décrit en premier lieu comment a été construit un environnement automatisé permettant de réaliser des cycles d'assimilation 4D-Var tout en conservant une synchronisation avec le développement effectué dans le 3D-Var et dans GEM-DM. Cet environnement fournit une interface de contrôle qui offre toute la flexibilité nécessaire pour étudier différentes configurations du 4D-Var incrémental.

En ce moment, nous sommes en train d'étudier les causes des différences observées entre le 4D-Var-Identité et le 3D-Var. De plus, nous examinons également l'impact de la dynamique, de la physique et de la numérique de GEM sur les structures des covariances d'erreur implicites induites par le 4D-Var. Ce type d'intégration diffère beaucoup du cadre normal dans lequel est intégré le modèle. Il permet de soulever des problèmes qui, dans d'autres contextes, peuvent passer inaperçus. Le but visé est d'obtenir une configuration du modèle qui conduit à des estimés corrects des covariances d'erreur. Celles-ci étant reliées à la variabilité atmosphérique, c'est donc l'aptitude du modèle à bien représenter la variabilité atmosphérique qui est examinée.