



# Assimilation de données lagrangiennes pour l'océanographie

Maëlle Nodet, Jacques Blum

► **To cite this version:**

Maëlle Nodet, Jacques Blum. Assimilation de données lagrangiennes pour l'océanographie. Colloque National sur l'Assimilation de Données, May 2006, Toulouse, France. inria-00173087

**HAL Id: inria-00173087**

**<https://hal.inria.fr/inria-00173087>**

Submitted on 18 Sep 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Assimilation de données lagrangiennes pour l'océanographie

Maëlle Nodet, Jacques Blum

Laboratoire J.-A. Dieudonné, Université de Nice, Parc Valrose, 06100 Nice

**Résumé** : Nous étudions l'assimilation variationnelle de données lagrangiennes (positions des flotteurs dérivants), ainsi que leur complémentarité avec les données de profils verticaux de température, en expériences jumelles dans un modèle aux équations primitives de l'océan. La qualité de l'identification est estimée en fonction du temps, du niveau vertical et de la densité des observations.

## 1 Introduction

L'étude de l'océan est cruciale pour de nombreuses raisons : son rôle dans le système climatique mondial, son rôle environnemental, économique. L'océanographie a longtemps souffert du manque de données. Depuis l'arrivée des satellites dans les années 1990, on dispose désormais d'observations ayant une bonne couverture spatiale et temporelle des paramètres de surface de l'océan. Ces données de surface sont complémentaires de données de profondeur. Pour cette raison, de nombreux programmes internationaux visent à déployer des flotteurs, fixes ou dérivants, en profondeur, pour mesurer les courants, température, salinité, etc.

En parallèle, les modèles de circulation océanique sont devenus plus réalistes. Tirer le meilleur parti des modèles et des observations est l'objet de l'assimilation de données (AD). Il existe deux types de méthodes d'AD, les méthodes variationnelles, représentées par le 4D-Var, et les méthodes séquentielles, représentées par le Filtre de Kalman.

Nous nous intéressons au problème d'assimilation de données de positions de flotteurs dérivants (en profondeur). Contrairement à la majorité des données assimilées actuellement en océanographie, dites eulériennes, les positions de flotteurs dérivants sont des données lagrangiennes, c'est-à-dire que l'instrument de mesure se déplace avec les courants. Le problème est alors que les variables observées (les positions de particules lagrangiennes) ne sont pas des variables d'état du modèle (température, salinité, vitesses, ...) ; de plus la relation liant les positions aux vitesses est non linéaire. Plusieurs méthodes consistent à contourner ce problème : Mead (2005) utilise un modèle Shallow-Water formulé en coordonnées lagrangiennes ; Assenbaum et Réverdin (2005), et Molcard et al. (2003) transforment les données de positions en données de vitesses ; Ide et al. (2002, 2003, 2005) ajoutent les positions dans le vecteur d'état du modèle. Dans tous les cas, les auteurs se ramènent au cas standard où les variables observées sont des variables d'état. Une autre façon de procéder (Nodet, 2006) est d'assimiler directement les positions dans le modèle, par une méthode variationnelle, sans modifier le modèle ni les observations, en utilisant un « opérateur d'observation » approprié.

L'objectif de notre travail est d'étudier la complémentarité entre les données lagrangiennes et un autre type de données : les profils de température. Pour cela, nous utilisons la méthode lagrangienne introduite dans Nodet (2006) avec le modèle d'océan OPAVAR dans une configuration idéalisée, et nous effectuons des expériences jumelles. Nous présentons quelques résultats préliminaires mettant en évidence la complémentarité entre les positions et les profils de température.

Ce papier est organisé comme suit : dans le deuxième paragraphe nous présentons la configuration du modèle numérique, les données et nous rappelons la méthode d'assimilation ; dans le troisième paragraphe nous présentons quelques résultats d'expériences numériques.

## 2 Modèles et méthodes

### 2.1 Le modèle d'océan et la configuration

Nous utilisons le modèle réaliste aux équations primitives OPA (Madec et al., 1998) dont les variables d'état sont  $u$ ,  $v$ ,  $T$  et  $S$ . Nous l'utilisons dans une configuration idéalisée, mais représentative de la circulation aux moyennes latitudes, où l'écoulement est énergétique, non-linéaire, instable et la turbulence océanique active. Notre domaine est un bassin idéalisé à fond plat et à toit rigide de dimensions 3600 km par 2800 km pour 5000 mètres de profondeur. La résolution horizontale est de 20 km, il y a 11 niveaux sur la verticale. Tous les forçages sont négligés, à l'exception d'un vent stationnaire, qui génère une circulation en double-gyre.

### 2.2 Les données lagrangiennes

Les flotteurs dérivants réels ont des caractéristiques très variées. On peut distinguer en particulier deux types de flotteurs. Les flotteurs acoustiques (suivis en profondeur par un réseau de sources acoustiques) délivrent des données de position, de température et de salinité toutes les 8 heures. Les flotteurs du programme international Argo (3000 flotteurs prévus sur les océans du globe) fonctionnent tout autrement : ils dérivent en profondeur pendant dix jours, puis plongent à deux mille mètres et remontent rapidement à la surface, en mesurant un profil de température et de salinité. Une fois en surface, ils transmettent leurs données et sont positionnés par GPS. Ces flotteurs ont été lancés pour délivrer des profils thermohalins, mais délivrent également des données lagrangiennes.

Dans nos expériences jumelles, nous utilisons des données de position synthétiques, générées à partir d'une sortie du modèle, appelé état vrai. Si l'on note  $U=(u,v)$  la vitesse horizontale du fluide pour l'état vrai, les positions  $\xi(t)$  d'un flotteur au temps  $t$  sont solutions de l'équation  $d\xi/dt = U(t,\xi(t))$ .

### 2.3 Assimilation variationnelle

L'assimilation variationnelle est basée sur la théorie du contrôle optimal (cf Lions, 1968, pour les équations aux dérivées partielles), introduite en météorologie par Le Dimet et Talagrand (1986). L'idée est la suivante : les fluides géophysiques présentent une forte sensibilité aux conditions initiales, très partiellement connues pour l'océan. En vue d'effectuer de bonnes prévisions, on cherche donc le meilleur état initial, ie celui dont l'évolution sur une fenêtre temporelle donnée coïncide le mieux avec les observations que l'on a sur cette fenêtre. Pour cela, on forme la fonction coût suivante :  $J(x_0) = \| H(M(x_0)) - y^o \|^2 + w \| x_0 - x^b \|^2$ , où  $x_0$  représente l'état initial  $u_0, v_0, T_0, S_0$ ,  $M$  représente le modèle d'océan, qui régit l'évolution des variables  $u, v, T$  et  $S$  au cours du temps, et  $H$  l'opérateur d'observation (qui exprime les variables observées en fonction des variables d'état du modèle),  $y^o$  est le vecteur des observations,  $x^b$  est un autre état de l'océan appelé ébauche et  $w$  est un paramètre. Ainsi, le minimum de  $J$  est à la fois proche des observations et proche de l'ébauche (ce dernier terme est ajouté pour régulariser le problème de minimisation de  $J$ , qui est mal posé lorsque la fonction coût n'est formée que du premier terme d'écart aux observations).

On utilise la formulation incrémentale du problème (voir Courtier et al., 1994), qui consiste à linéariser les opérateurs  $M$  et  $H$  et à minimiser la fonctionnelle quadratique associée à ces opérateurs. Nous avons utilisé le 4D-Var incrémental développé pour OPA par Weaver et al. (2003), dans laquelle en particulier la formulation de la matrice de covariance d'erreurs d'ébauche  $B$  est faite selon Weaver et Courtier (2001). En pratique, la minimisation se fait par une méthode de descente dans la direction du gradient, calculé grâce à l'état adjoint du modèle et de l'opérateur d'observation  $H$ . Notre travail a consisté à implémenter les opérateurs d'observation correspondant aux positions lagrangiennes et aux profils verticaux de température, ainsi que les opérateurs tangents et adjoints associés.

### 2.4 L'opérateur d'observation

Nous avons implémenté deux opérateurs, l'un correspondant aux positions de flotteurs dérivants, l'autre aux profils de température. La fonction coût s'écrit alors  $J=J^p + J^f + J^b$ , ( $p$ ) pour le terme d'observation des profils, ( $f$ ) pour les positions des flotteurs, et ( $b$ ) pour le terme d'ébauche. L'opérateur d'observation des positions de flotteurs a été décrit dans Nodet (2006). Pour l'observation des profils, l'opérateur est tout simplement une interpolation de la température sur une verticale donnée. L'assimilation des profils Argo seuls a été étudiée par Forget (2004), qui obtient de bons résultats en expériences jumelles comme avec des données réelles.

## 3 Résultats numériques

### 3.1 Principe des expériences jumelles

Comme nous l'avons dit précédemment, nous avons effectué des expériences jumelles. Afin de pouvoir effectuer des diagnostics quantitatifs précis, on n'utilise pas des données réelles, mais synthétiques, obtenues à partir d'un état vrai, qui se substitue, dans notre expérience, à la réalité. L'état vrai étant parfaitement connu, il est alors aisé d'analyser quantitativement l'efficacité de la méthode. Il s'agit bien sûr d'expériences idéalisées, car les données sont parfaitement consistantes avec le modèle, ce qui n'est bien sûr jamais le cas dans la réalité, notamment en raison de l'erreur modèle.

On se donne donc un état vrai, qui sert à simuler les observations, sur une fenêtre temporelle donnée. Ensuite on se donne une ébauche, qui sert de premier itéré pour l'algorithme de minimisation de la fonction coût. Après assimilation, on obtient un état initial analysé, que l'on peut faire évoluer pour obtenir des prévisions. L'évolution libre de l'ébauche sur la fenêtre temporelle nous donne un run de contrôle, sans assimilation.

### 3.2 Assimilation conjointe de données lagrangiennes et de profils de température

Nous présentons deux résultats préliminaires mettant en évidence l'intérêt de l'assimilation conjointe des profils et positions et leur complémentarité. Pour la première expérience, nous considérons 1000 flotteurs dérivant à 1000 mètres de profondeur pendant 10 jours. Les positions et les profils sont mesurés une fois par jour. La figure 1 présente des coupes horizontales des champs de vitesse et de température à la fin de la fenêtre temporelle, pour divers états de l'océan : l'état vrai, l'ébauche (sans assimilation) et l'état analysé. On remarque que l'assimilation restitue très bien les structures principales de l'écoulement.

Pour la deuxième expérience, nous reprenons le même jeu de flotteurs, avec les mêmes caractéristiques, et nous effectuons trois expériences : assimilation des profils et des positions (ie l'expérience précédente), des profils seuls, et des positions seules. La figure 2 présente des erreurs aux sens des moindres carrés (RMS) pour ces diverses expériences ainsi que l'ébauche (run sans assimilation), selon les formules suivantes : l'erreur relative en fonction du temps est l'écart RMS entre l'état vrai et l'état étudié sur toute la grille, normalisé par la norme RMS de l'état vrai ; l'erreur relative finale en fonction du niveau est l'écart RMS entre l'état vrai et l'état étudié au temps final et au niveau  $k$ , normalisé par la norme de l'état vrai.

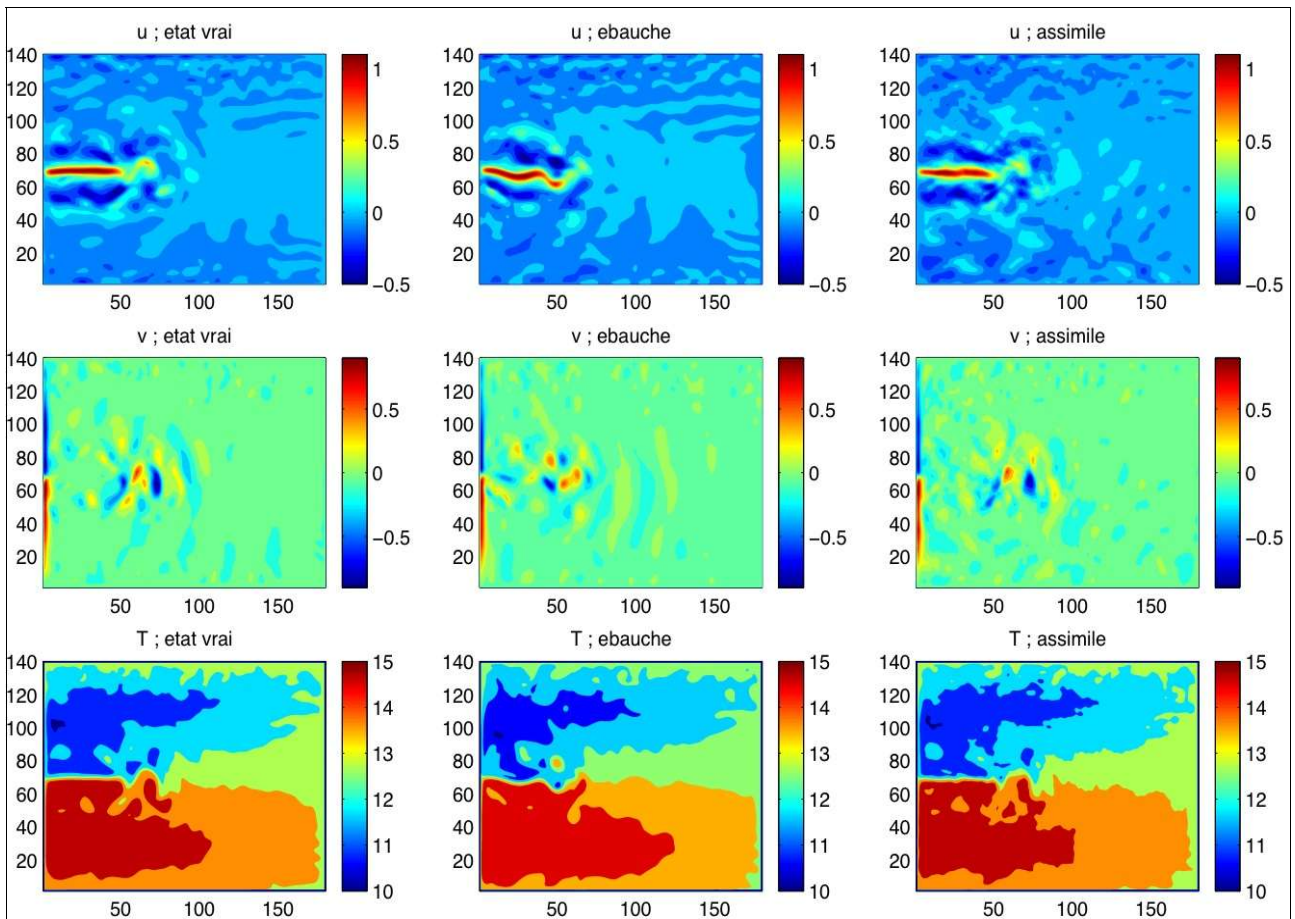


Figure 1. Coupes horizontales à la fin de la fenêtre temporelle des champs de vitesse et de température, au niveau 2, pour l'état vrai, l'ébauche (sans assimilation) et l'état analysé après assimilation de données de positions et de profils de température.

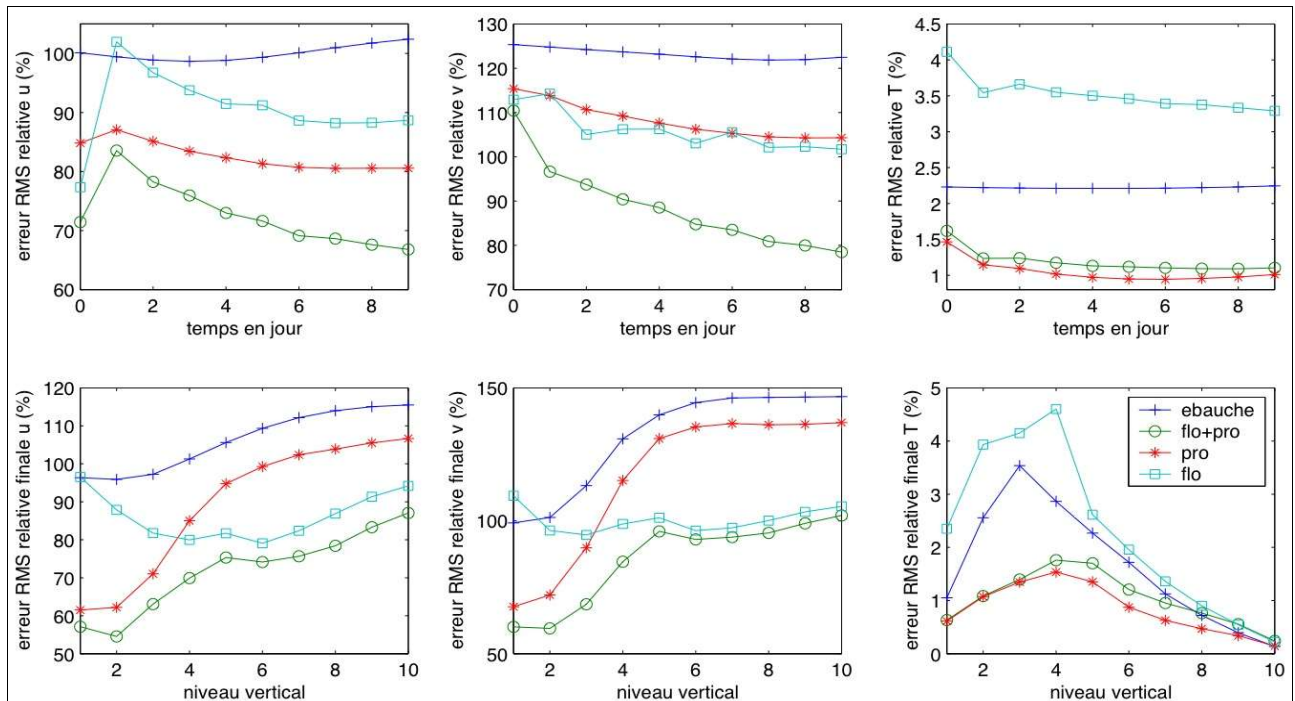


Figure 2. Erreurs RMS relatives en fonction du temps (en haut) et erreurs RMS relatives finales en fonction du niveau vertical (en bas) pour l'ébauche (pas d'assimilation), et les états analysés obtenus en assimilant les profils seuls (pro), les positions seules (flo) ou les profils et les positions (flo+pro).

Pour l'erreur en fonction du temps (en haut), on remarque que l'assimilation des profils seuls donne de bons résultats, et améliore aussi les vitesses. Par contre, les données de positions seules ne contiennent pas assez d'information et donnent de mauvais résultats. L'assimilation conjointe des positions et des profils donne de bons résultats pour les vitesses comme pour la température. La complémentarité entre profils et positions est également mise en évidence par l'erreur finale en fonction du niveau (en bas), où l'on voit que les profils restituent bien les vitesses en surface et la température, et les positions restituent plutôt les vitesses en profondeur.

#### 4 Conclusion et perspectives

Nous avons mis en évidence, grâce à l'implémentation d'une méthode variationnelle d'assimilation de données lagrangiennes, la complémentarité entre les positions de flotteurs dérivants et les profils verticaux de température. La méthode donne des résultats satisfaisants en expériences jumelles, et devra être étudiée pour des données réelles. Elle présente une limitation à l'heure actuelle : le nombre de flotteurs doit être assez grand (300) pour assurer la convergence de l'algorithme, il est pour l'instant trois fois supérieur au nombre de flotteurs Argo prévus dans la zone, ce qui sera un point crucial à traiter lorsque nous étudierons l'assimilation de données réelles.

##### Remerciements

Les auteurs remercient Bruno Ferron, Fabienne Gaillard, Herlé Mercier pour les discussions fructueuses, Anthony Weaver pour OPAVAR, LODYC pour OPA et l'IDRIS pour les moyens de calcul.

##### Références :

- Assenbaum M and Reverdin G 2005 *Near real-time analysis of the mesoscale circulation during the POMME experiment*, Deep-sea Res. I 52 1345–73
- Courtier P, Thépaut J-N and Hollingsworth A 1994 *A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach*, Q. J. R. Meteorol. Soc. 120 1367–87
- Forget G 2004 *4D-Var assimilation of Argo profiles applied to North Atlantic ocean climate monitoring*, PhD Thesis University of Bretagne Occidentale, Brest, France
- Giering R and Kaminski T 1998 *Recipes for adjoint code construction*, ACM Trans. Math. Softw. 24 437–74
- Ide K, Kuznetsov L and Jones C 2002 *Lagrangian data assimilation for point-vortex system*, J. Turbulence 3 053
- Kamachi M and O'Brien J 1995 *Continuous data assimilation of drifting buoy trajectory into an equatorial Pacific Ocean model*, J. Mar. Syst. 6 159–78
- Kuznetsov L, Ide K and Jones C 2003 *A method for assimilation of Lagrangian data*, Mon. Weather Rev. 131 2247–60
- Le Dimet F X, Talagrand O 1986 *Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects*, Tellus A 38 97
- Lions J L 1968 *Contrôle optimal de systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles*, (Paris: Dunod Gauthier-Villars)
- Madec G, Delecluse P, Imbard M and Levy C 1998 *OPA8.1 ocean general circulation model reference manual*, Notes du pôle de Modélisation de l'IPSL vol 11 (Paris: Inst. Pierre Simon Laplace)
- Mead J 2005 *Assimilation of simulated float data in Lagrangian coordinates*, Ocean Model. 8 369–94
- Molcard A, Piterbarg L, Griffa A, Özgökmen T and Mariano A 2003 *Assimilation of drifter observations for the reconstruction of the Eulerian circulation field*, J. Geophys. Res. 108 (C3) 3056
- Nodet M 2006 *Variational assimilation of Lagrangian data in oceanography*, Inverse Problems 22 245–263
- Özgökmen T, Molcard A, Chin T, Piterbarg L and Griffa A 2003 *Assimilation of drifter observation in primitive equation models of mid-latitude ocean circulation*, J. Geophys. Res. Oceans 108 (C7) 3238
- Salman H, Kuznetsov L, Jones C and Ide K 2006 *A method for assimilating Lagrangian data into a shallow-water equation ocean model*, Mon. Weather Rev. at press
- Weaver A T and Courtier P 2001 *Correlation modeling on the sphere using a generalized diffusion equation*, Q. J. R. Meteorol. Soc. 127 1815–46
- Weaver A T, Vialard J and Anderson D L T 2003 *Three- and four-dimensional variational assimilation with an ocean general circulation model of the tropical Pacific Ocean: I. Formulation, internal diagnostics and consistency checks*, Mon. Weather Rev. 131 1360–78

## TABLE DES MATIERES

<b>Assimilation de données lagrangiennes pour l'océanographie.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Modèles et méthodes.....</b>	<b>1</b>
2.1 Le modèle d'océan et la configuration.....	1
2.2 Les données lagrangiennes.....	1
2.3 Assimilation variationnelle.....	2
2.4 L'opérateur d'observation.....	2
<b>3 Résultats numériques.....</b>	<b>2</b>
3.1 Principe des expériences jumelles.....	2
3.2 Assimilation conjointe de données lagrangiennes et de profils de température.....	2
<b>4 Conclusion et perspectives.....</b>	<b>4</b>