

Laboratoire de Physique des Océans
UMR n° 6523 IFREMER – CNRS – UBO

F. Gaillard
C. Kermabon
H. Mercier

Avril 2003 - R.INT. DRO/UM/LPO 03-06

POMME



Reconstruction des champs 4D:

**Analyse basée sur les profils et mesures
eulériennes - Expériences 7 et 9**

SOMMAIRE

1	<i>Introduction</i>	5
2	<i>Le modèle</i>	5
2.1	Principe du modèle	5
2.2	La configuration	6
2.3	Les données	8
3	<i>Caractéristiques des runs</i>	12
3.1	Le run 7	12
3.2	Le run 9	17
4	<i>Références</i>	24
5	<i>Annexe : Exemples de résultats</i>	25

1 Introduction

Ce document présente une synthèse combinant différents types de mesures in situ avec les analyses de données altimétriques faites par SOPRANE. Le modèle diagnostique avec filtre de kalman (KA_meso_V1.5, Kermabon et al, 2003), reconstruit les champs de température, salinité et courants sur un pavé d’océan. Nous présentons deux expériences, basées sur le même jeu de données. L’expérience 7 utilise les modes verticaux définis pour l’expérience de référence (Gaillard et al. 2002). L’expérience 9 utilise un jeu de modes plus adapté à la zone POMME et prend en compte des contraintes supplémentaires, introduites sous la forme de pseudo-données.

2 Le modèle

2.1 Principe du modèle

Le modèle employé pour synthétiser les données, appelé KA_meso_V1, est inspiré du modèle développé pour l’inversion des données de tomographie (Gaillard et al. 1997). Il utilise le filtre de Kalman, et alterne étapes d’analyse et étapes de prévision. Une description complète de la méthode mise en œuvre est fournie dans le document « Analyse de champs tridimensionnels : Description des méthodes mises en œuvre ». Nous rappelons brièvement ici quelles en sont les caractéristiques principales.

Les champs de température et de salinité sont projetés sur des modes verticaux orthogonaux. La température est projetée sur un nombre N_T de modes empiriques. Pour représenter la salinité, nous avons choisi une approche basée sur l’équation d’état et qui prend comme ébauche l’équilibre hydrostatique. D’une anomalie de température nous déduisons une anomalie de salinité neutre (sans signal de densité) que nous complétons par une anomalie de salinité active (avec signal de densité) projetée sur un autre jeu de modes empiriques. L’anomalie de densité est reliée au courant géostrophique. Les variables température, salinité et anomalie de densité in-situ s’expriment donc :

$$T(x,y,z)=T_0(x,y,z)+\sum_{k=1}^{N_T}\mu_k^T(x,y)L_k^T(z)$$
$$S(x,y,z)=S_0(x,y,z)+\sum_{k=1}^{N_T}\mu_k^T(x,y)\alpha(z)L_k^T(z)+\sum_{k=1}^{N_{Sa}}\mu_k^{Sa}(x,y)L_k^{Sa}(z)$$
$$\rho(x,y,z)=\rho_0(x,y,z)+\sum_{k=1}^{N_{Sa}}\mu_k^{Sa}(x,y)\beta(z)L_k^{Sa}(z)$$

et la fonction courant :

$$\Psi(x,y,z)=\mu_0(x,y)F_0(z)+\sum_{k=1}^{N_{Sa}}\mu_k^{Sa}(x,y)F_k(z)$$

Les inconnues du système sont les fonctions horizontales $\mu_k(x,y)$, correspondant à chacun des modes de température et de salinité active. Ces fonctions sont ensuite écrites sous forme de séries de Fourier à troncature circulaire. L'ensemble des coefficients de Fourier constitue le vecteur des inconnues du système \mathbf{x} (ou vecteur d'état). Cette approche permet en premier lieu d'utiliser la donnée à l'endroit où elle a été collectée, sans interpolation, elle permet également des calculs précis et simples des termes dérivés de la fonction courant.

L'équation de prédiction, habituellement fournie par un modèle dynamique, est ici simplifiée à l'extrême puisque remplacée par une persistance (premier terme du membre de droite), modérée par un facteur d'oubli (rappel à la climatologie). La covariance de l'erreur de prédiction est proportionnelle à la covariance de la climatologie (diagonale). Le facteur d'oubli a une structure gaussienne.

$$x_i^f = \nu x_{i-1}^a + (1-\nu)x^c$$

$$Q_{i-1} = (1-\nu)^2 P^c$$

$$\nu = \exp\left(-\frac{t_i - t_{i-1}}{t_m}\right)^2$$

2.2 La configuration

2.2.1 Le domaine

L'expérience POMME s'est déroulée au large de la péninsule ibérique, principalement dans la zone délimitée par le rectangle jaune de la figure 1. La méthode d'analyse utilisée repose sur une décomposition en modes sur la verticale et spectrale dans la dimension horizontale. Deux zones carrées sont définies: la zone d'inversion, correspondant à un domaine périodique et la zone d'observation qui définit la zone de prise en compte des données. Afin de profiter des mesures d'opportunité (XBT, profileurs), la zone d'observation est prise légèrement plus étendue que la zone POMME stricte, la zone d'inversion est choisie telle que les mesures effectuées près d'une frontière de la zone d'observation n'influent pas les points de la frontière opposée, via la périodicité du champ, ceci compte tenu des covariances spatiales utilisées. La prise en compte de ces contraintes a conduit au choix de la configuration décrite dans le tableau 1.

Origine de la zone	42°N-17°W
Dimension de la zone d'inversion (λ_{\max})	1280 km
Dimension de la zone d'observation	1040 km
Résolution ($\lambda_{\min}/2$)	40 km
Tranche d'eau analysée	0-2200 m
Période analysée	Du 01/09/2000 (jour 244) au 31/10/2001 (jour 669)
Périodicité des analyses	1 jour

Tableau 1 : Paramètres définissant la configuration commune aux expériences 7 et 9.

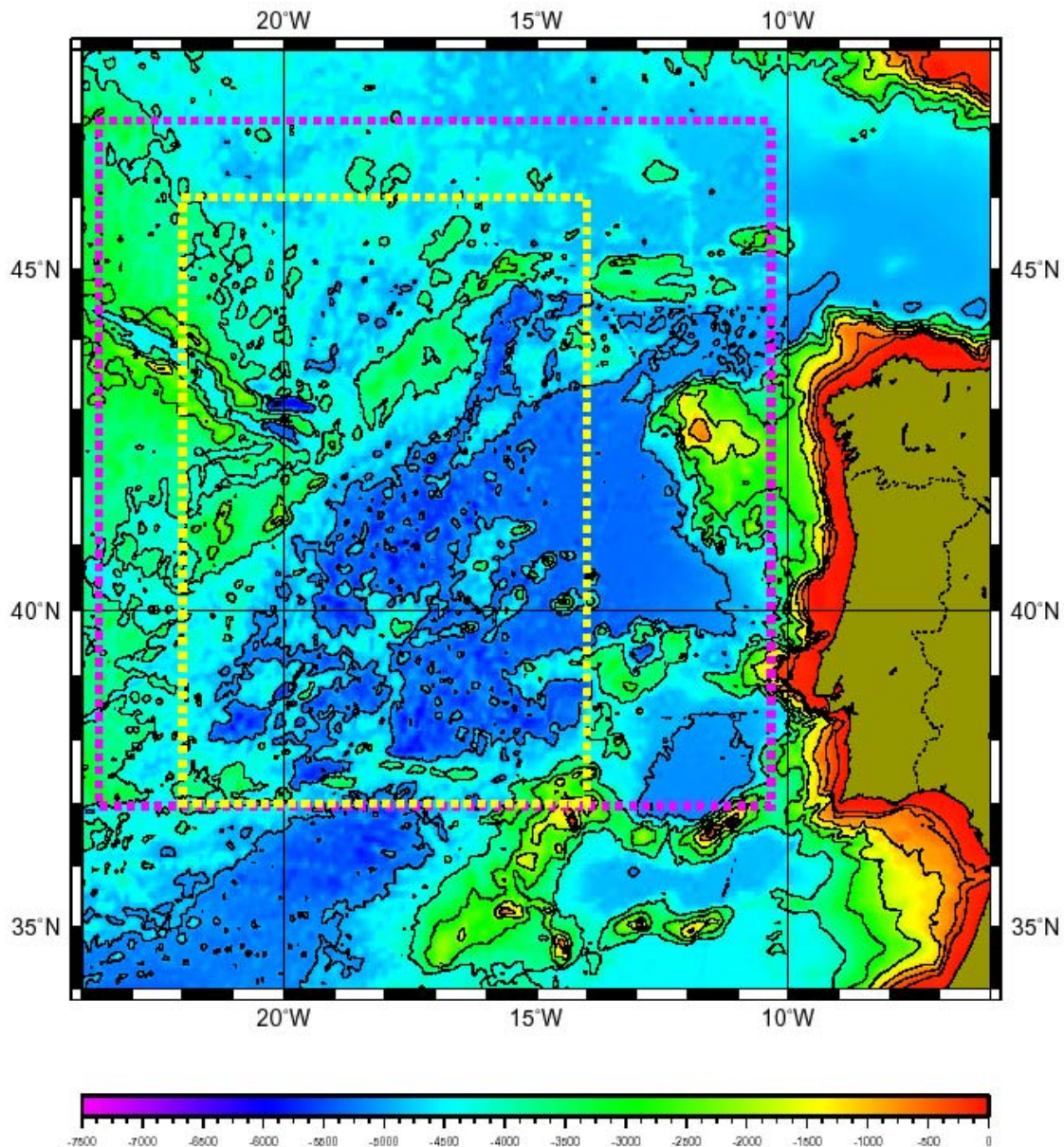


Figure 1 : Bathymétrie de la zone POMME. Le rectangle magenta délimite la zone sur laquelle les observations sont prises en compte, le rectangle jaune la zone sur laquelle nous présenterons les résultats.

2.2.2 Construction des modes verticaux

Les profils de référence de température et de salinité sont construits comme la moyenne d'un ensemble de profils CTD. Les coefficients d'expansion thermique et halin sont calculés pour ces profils à partir de l'équation d'état. On en déduit les profils $\alpha(z)$ et $\beta(z)$ qui permettront respectivement de déduire l'anomalie de salinité neutre de l'anomalie de température et l'anomalie de densité de l'anomalie de salinité active.

La même base de données est utilisée pour calculer les fonctions empiriques orthogonales. Les profils sont centrés sur les profils moyens et les modes de température sont calculés. Chaque profil de température est ensuite transformé en un profil de salinité neutre qui est soustrait de l'anomalie de salinité. On calcule alors les modes correspondant à la partie active

de l'anomalie de salinité. Le profil de référence fait office de climatologie, ce qui suppose que le rappel se fait vers un océan au repos, sans structure horizontale ni courant

2.3 Les données

Les données prises en compte par l'inversion sont :

- Les données de température et de salinité issues de profils CORIOLIS
- Les vitesses de courant U et V issues de SOPRANE
- Les vitesses de courant U et V issues du VM-ADCP des campagnes POMME sur les navires IFREMER
- Les vitesses de courant U et V issues de l'ADCP du mouillage N de POMME.
- Les températures issues de mouillage
- Les salinités issues de mouillage
- Les vitesses U et V issues de mouillage

2.3.1 Les Profils de température et salinité

Les analyses prennent en compte les profils de température et de salinité fournis par CORIOLIS sous la forme de fichiers hebdomadaires, ces même fichiers sont fournis à MERCATOR. Ils sont regroupés par type de données : les types CTD, XBT, Profileurs ont été transmis directement à CORIOLIS, les types BA et TE viennent du GTS. Nous travaillons, non pas sur les fichiers 'originaux', mais sur les fichiers interpolés sur niveaux standards produits et utilisés par CORIOLIS pour effectuer les analyses objectives.

2.3.2 Courants SOPRANE à 100m

Les champs analysés SOPRANE mis à disposition par la cellule temps réel de POMME sont utilisés sous la forme du courant à 100 m. Ne disposant pas au moment des analyses de l'erreur SOPRANE, nous avons utilisé les erreurs altimétriques (MSLA) (figure 2).

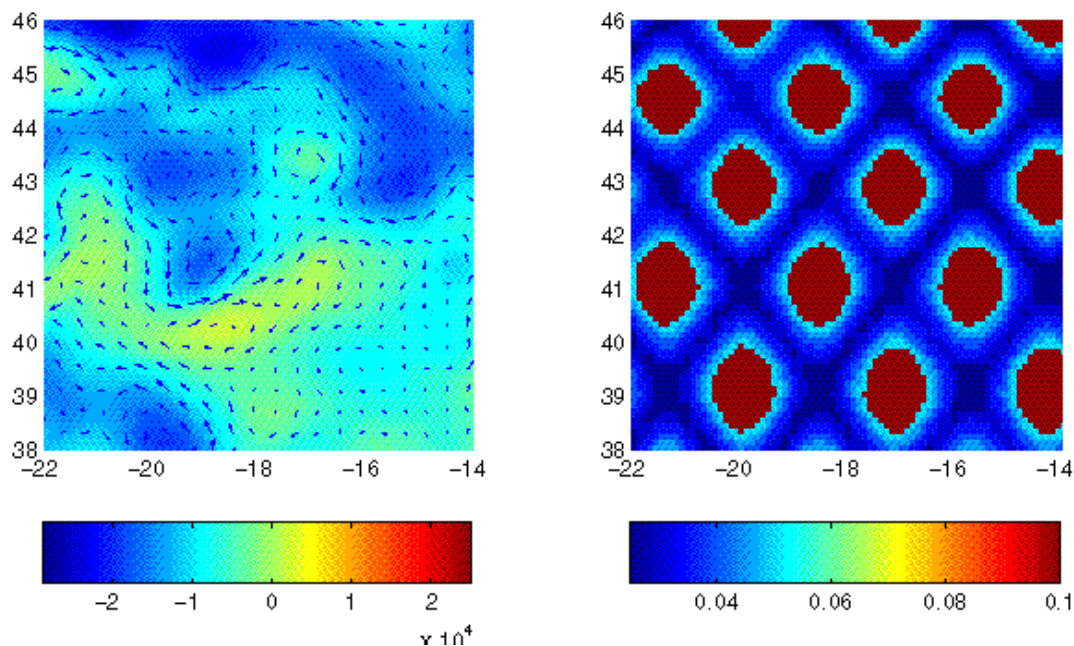


Figure 2: Champs de fonction courant analysés par SOPRANE. A gauche la fonction courant et les vecteurs vitesse au premier niveau (100 m) début février. A droite l'erreur MSLA correspondante.

2.3.3 Les ADCP de coque

Nous avons fait porter un gros effort sur la préparation des données ADCP de coque, jusqu'ici peu utilisées de manière quantitative. Ces données ADCP ont été traitées avec le logiciel CASCADE (Coatanoan et al, 2002). Le traitement a consisté à calculer la vitesse absolue à partir des mesures Doppler. Il a fallu pour cela :

- prendre en compte la meilleure vitesse et attitude navire disponible,
- définir des critères de détection des données erronées,
- effectuer des moyennes d'ensembles pour améliorer le rapport signal/bruit,
- retirer des données le signal de marée barotrope connu,
- moyenner sur des échelles de 10 km.

Afin de filtrer les mesures sur la verticale et dans certains cas de combler les absences de données sur 1 bin, dues à un manque de réflecteurs aux environs de 200 à 400 m, un filtre linéaire de poids (1/4,1/2,1/4) a été passé dans les directions horizontales et verticale. Un exemple de sections ADCP après filtrage est donné figure 3. Les campagnes prises en compte sont les suivantes :

- PMO0 Thalassa
- POM1-LEG1, POM1-LEG2 Atalante
- POM2 Atalante
- POM3-LEG1, POM3-LEG2 Thalasa

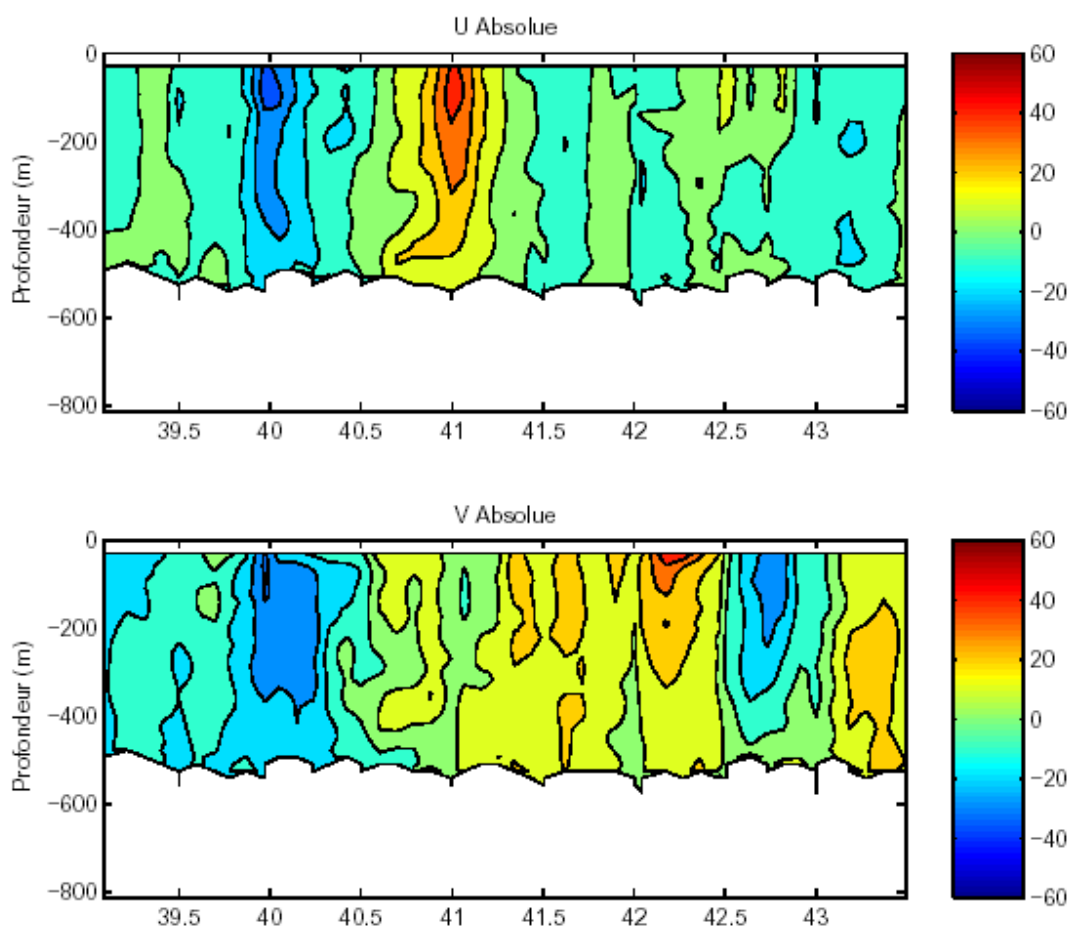


Figure 3: Exemple de section ADCP NB-75 effectuée durant POMME-1, Leg 1 (Atalante)

2.3.4 Les mesures eulériennes

Des mesures sur mouillages ont permis de collecter des séries temporelles de température, salinité et courant sur la période POMME (figure 4). Trois mouillages d'observation physique intensive étaient disposés le long de 18°W, complétés par des mouillages de tomographie aux points E et W (Billant et al, 2002). Des mouillages à vocation pluridisciplinaire ont été disposés en 4 autres points.

Toutes les données issues de mouillages ont été filtrées avec un filtre passe bas ($f_c = 48$ h) les données filtrées ont ensuite été moyennées sur 24 h. La figure 5 illustre l'effet du filtrage et du sous-échantillonnage sur les séries de température et de courant.

Seul l'ADCP du mouillage N est pris en compte dans les expériences présentées, les autres séries n'étant pas disponibles au moment des analyses.

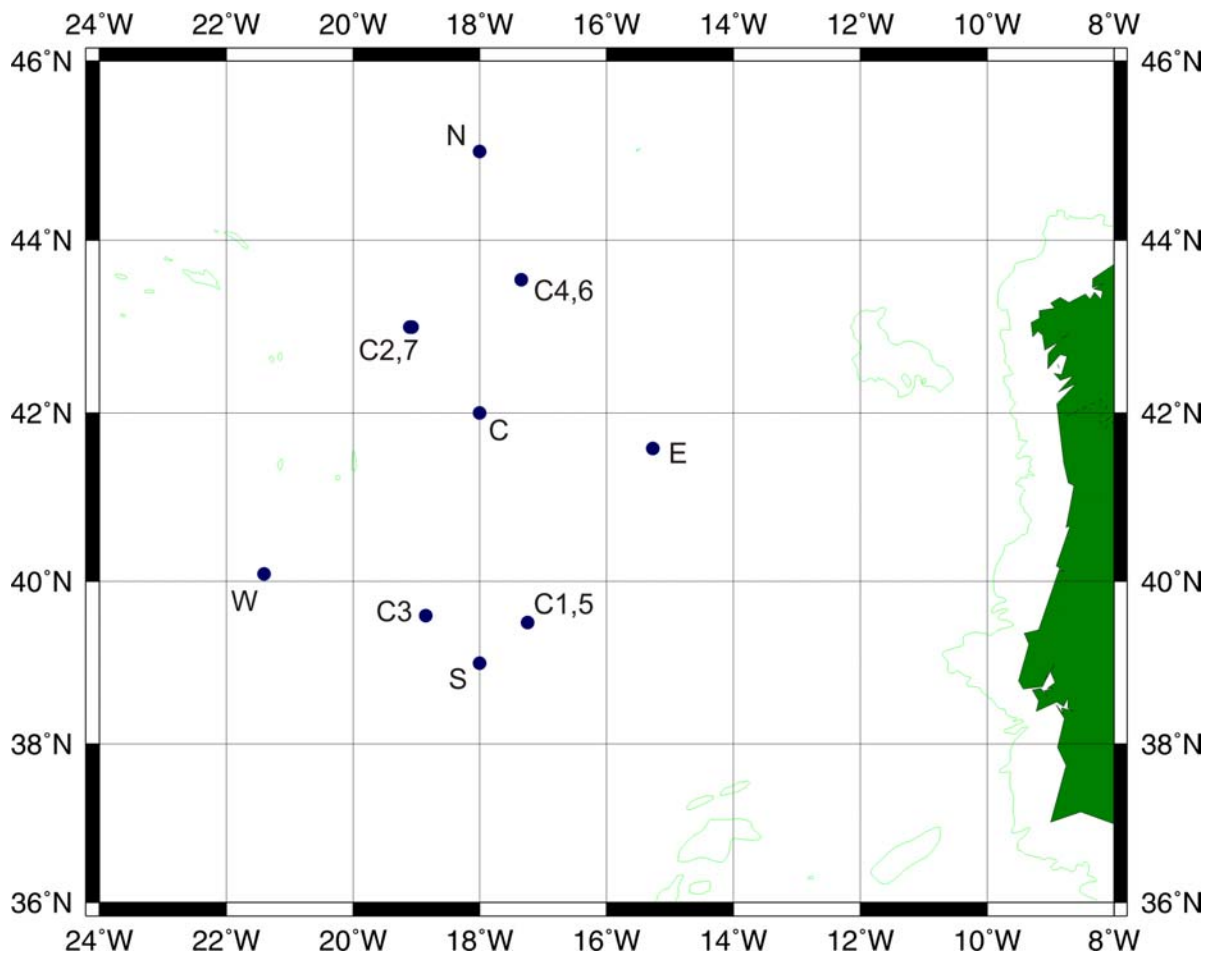


Figure 4: Position des mouillages POMME

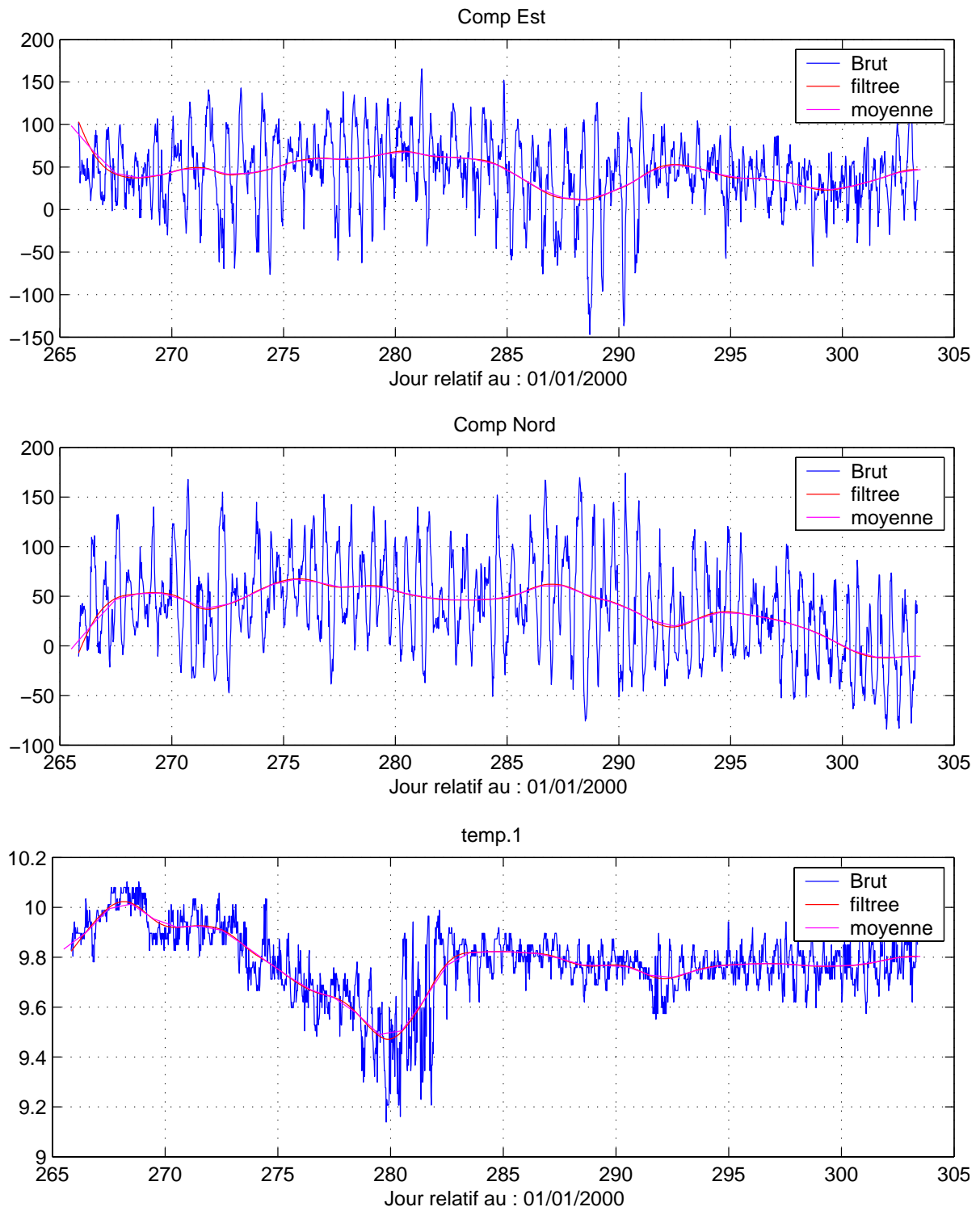


Figure 5: Mesures eulériennes de courant et de température. Données brutes, données filtrées à 48heures et série sous échantillonnée après moyenne sur 24 heures du signal filtré.

3 Caractéristiques des expériences

3.1 L'expérience 7

3.1.1 Les profils moyens et les modes verticaux

La base de données utilisée pour construire les profils de référence (profils moyens et modes verticaux) est constituée de profils CTD de la décennie 1990. Les positions des stations utilisées sont données figure 2. Les campagnes prises en compte sont : des campagnes CANIGO, les campagnes ARCANE, la campagne CHAOS et des campagnes de Kolterman. Pour l'expérience 7, les champs sont reconstruits sur 4 modes de température et 2 modes de salinité actifs. Les profils moyens et les modes sont présentés figure 6 et 7. Les variances a priori de ces modes sont fournies tableau 2.

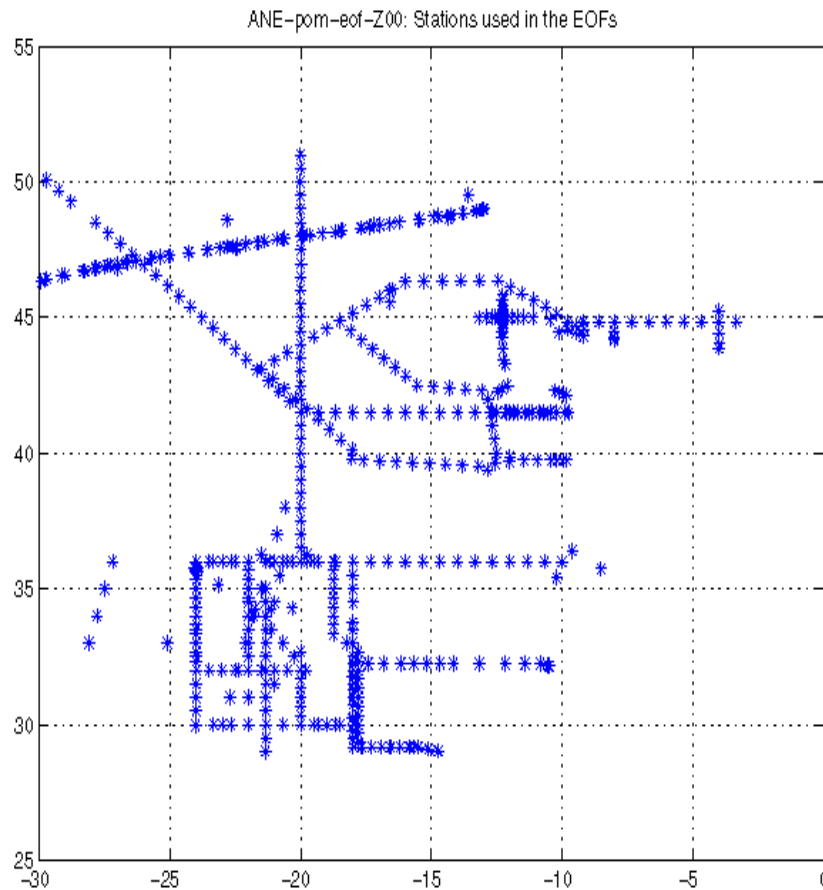


Figure 6 : Position des stations hydrologiques (profils CTD) utilisées pour construire les profils de référence et les modes verticaux.

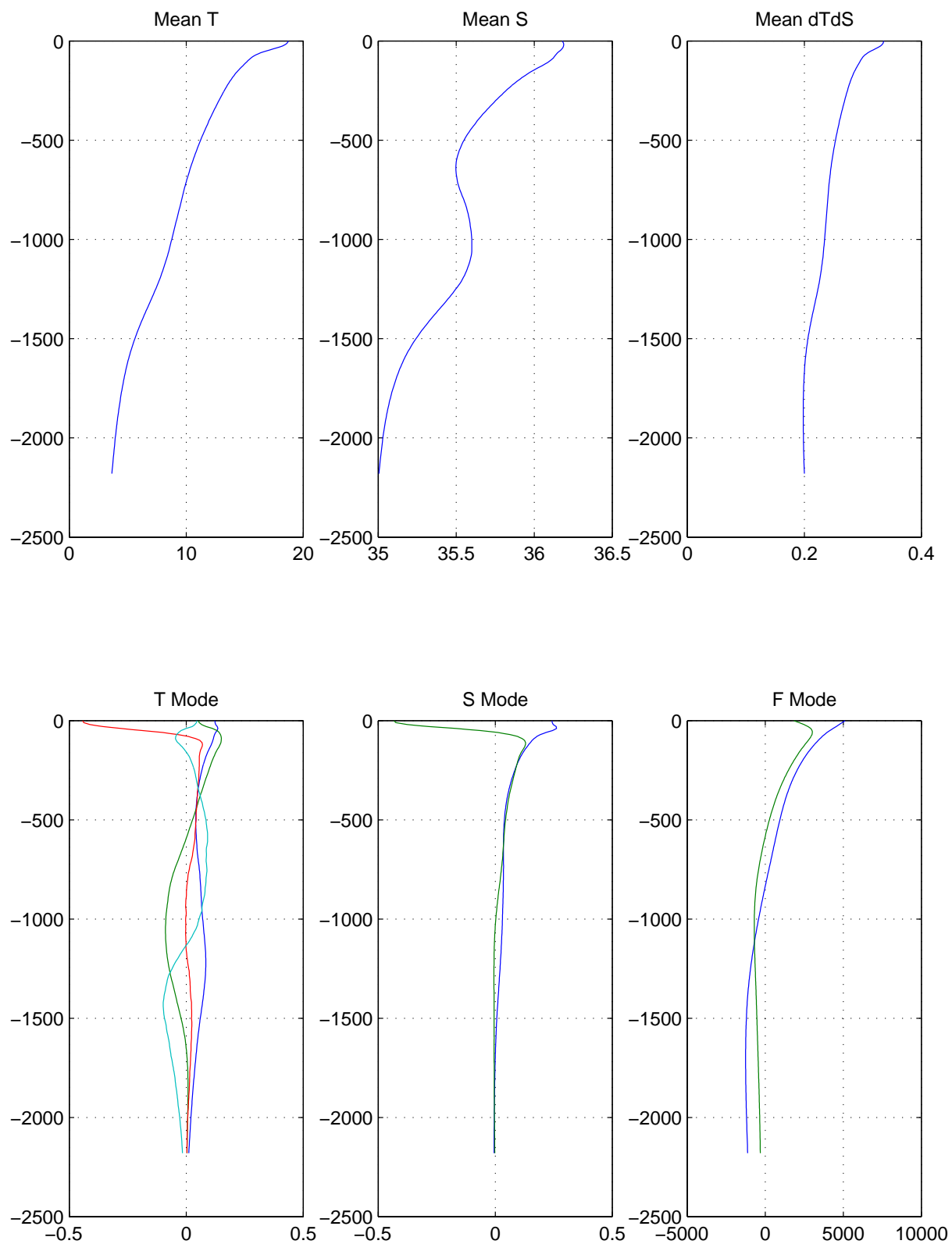


Figure 7 : Profils moyens de température, salinité et coefficient de conversion $T_n - S_n$ (haut) et modes de température, salinité et fonction courant (bas) utilisés pour l'expérience 7

	Expérience 7	Expérience 9
Paramètres Kalman		
Temps de mémoire	15 jours	15 jours
Erreur de prédiction (% de l'amplitude de la variabilité climatologique par jour)	15%	3%
Paramètres définissant la variance a priori des modes		
Amplitude mode 1 température	1.5	5
Rapport mode barotrope	1	0.5
Rapport Mode 1 - température	2	1.0
Rapport Mode 2 - température	2	0.5
Rapport Mode 3 - température	1	0.3
Rapport Mode 4 - température	1	0.2
Rapport Mode 1 - salinité	1	0.1
Rapport Mode 2 - salinité	1	0.075
Rapport Mode 3 - salinité	Non utilisé	0.05
Echelles des modes	80 km	80 km
Erreurs 'modèle' sur les données		
Erreur coefficient Mode 1 de T	1.5	1.0
Erreur coefficient Mode 2 de T	1.3	0.5
Erreur coefficient Mode 3 de T	0.6	0.3
Erreur coefficient Mode 4 de T	0.4	0.2
T couches (en % de la variance a priori du niveau)	10 %	10 %
S couches (en % de la variance a priori du niveau)	10 %	10 %
T Mouillage(en % de la variance a priori du niveau)	5 %	5 %
S Mouillage(en % de la variance a priori du niveau)	5 %	5 %
Erreur Soprane : U, V (m/s)	0.03, 0.02	0.02, 0.01
Erreur VMADCP (m/s)	0.02	0.02
Erreur U, V mouillage (m/s)		
Erreur MADCP (m/s)	0.01	0.005

Tableau 2 : Paramètres définissant les expériences 7 et 9

3.1.2 L'état initial

Une analyse préliminaire, appelée analyse de référence a été effectuée pour les années 2000-2001 complètes, avec les mêmes profils de référence et modes, mais en utilisant pour seules données les champs SOPRANE de vitesse et les champs de température produits par analyse

objective. Nous disposons donc d'un état de départ pour cette analyse. Le jour de reprise utilisé est le 30/08/2000 (jour 242).

3.1.3 Diagnostics

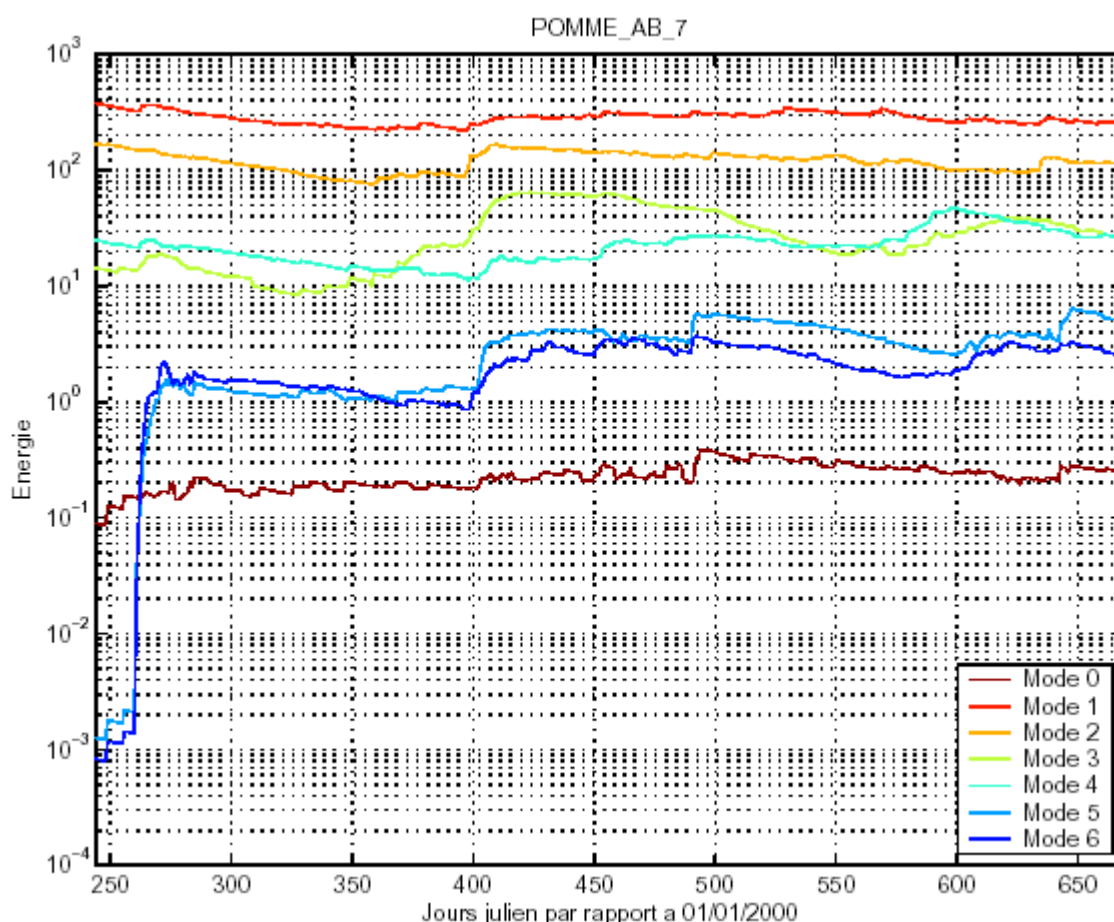


Figure 8 :Energie des modes au cours de l'analyse 7.

L'examen des résidus montre des valeurs résidus/bruit d'ordre 1, ce qui indique que la solution proposée est en accord avec les données. Il existe cependant des variations selon les types de données. Si les valeurs 'erreur de mesure' sont assez bien définies, les valeurs prises comme erreur modèle sont plus subjectives. Elles seront réajustées en fonction des résultats de cette expérience.

L'énergie associée aux modes subit un accroissement lors des campagnes, l'augmentation du nombre d'observations conduit à une meilleure détermination du champ, ou réciproquement : le champ est insuffisamment déterminé en dehors de ces périodes. Le mode 1 température est largement dominant.

Les champs de température et fonction courant à 100m et 1000m (présentés en annexe) sont en accord dans leurs grandes lignes avec les analyses indépendantes de température (V. Thierry) et de fonction courant (M. Assenbaum). Une étude quantitative des caractéristiques de ces différentes analyses est en cours.

La comparaison des diagrammes θ -S de l'analyse avec leurs homologues issus des CTD révèle un problème dans la représentation de la salinité (figure 17). La contrainte de neutralité, sous jacente à la décomposition en mode choisie, conduit, en l'absence de mesure de salinité, à proposer une salinité qui conserve la densité. Ce qui est plausible en sub-surface

devient absurde près de la surface en période de réchauffement ou de refroidissement. Il faudra donc veiller à relâcher cette contrainte.

3.2 L'expérience 9

3.2.1 Les profils moyens et les modes verticaux

La base de données utilisée pour construire les profils de référence reprend la base utilisée pour l'expérience 7, à laquelle on a ajouté les données CTD des campagnes POMME. Disposant d'un plus grand nombre de station, la zone géographique de prise en compte des profils a été réduite. Les position des stations utilisées sont données figure 11. Afin de mieux représenter la fonction courant barocline, nous prenons en compte 3 modes de salinité active. Les profils moyens et les modes sont présentés figure 12.

Les variances a priori de ces modes ont été modifiées par rapport à celles du run 7. Elles prennent en compte à la fois les valeurs RMS des coefficients des modes (calculées en même temps que les modes) et les résultats d'un run d'essai. Elles sont fournies tableau 2.

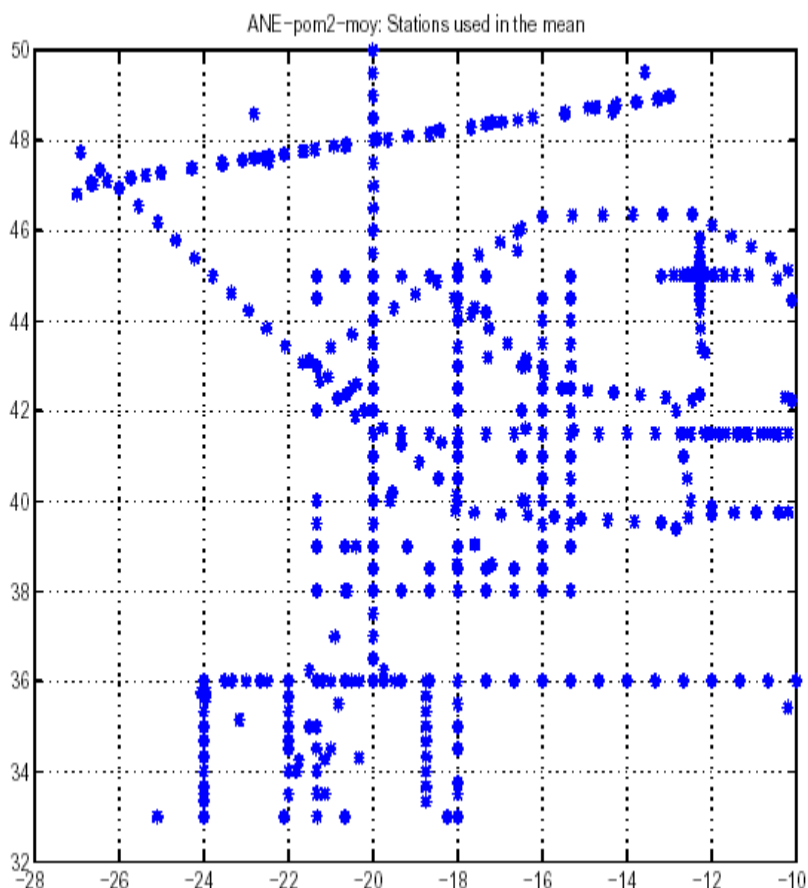


Figure 11 : position des stations CTD utilisées pour construire les profils moyens et les modes verticaux de l'expérience 9.

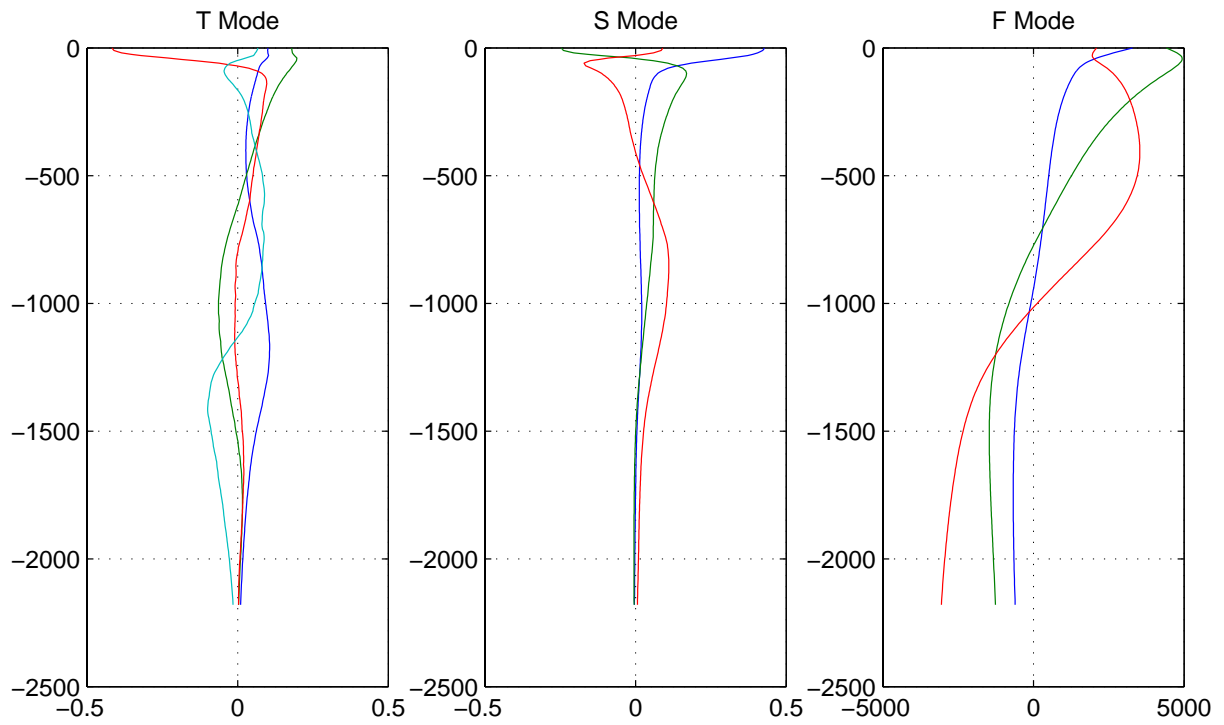
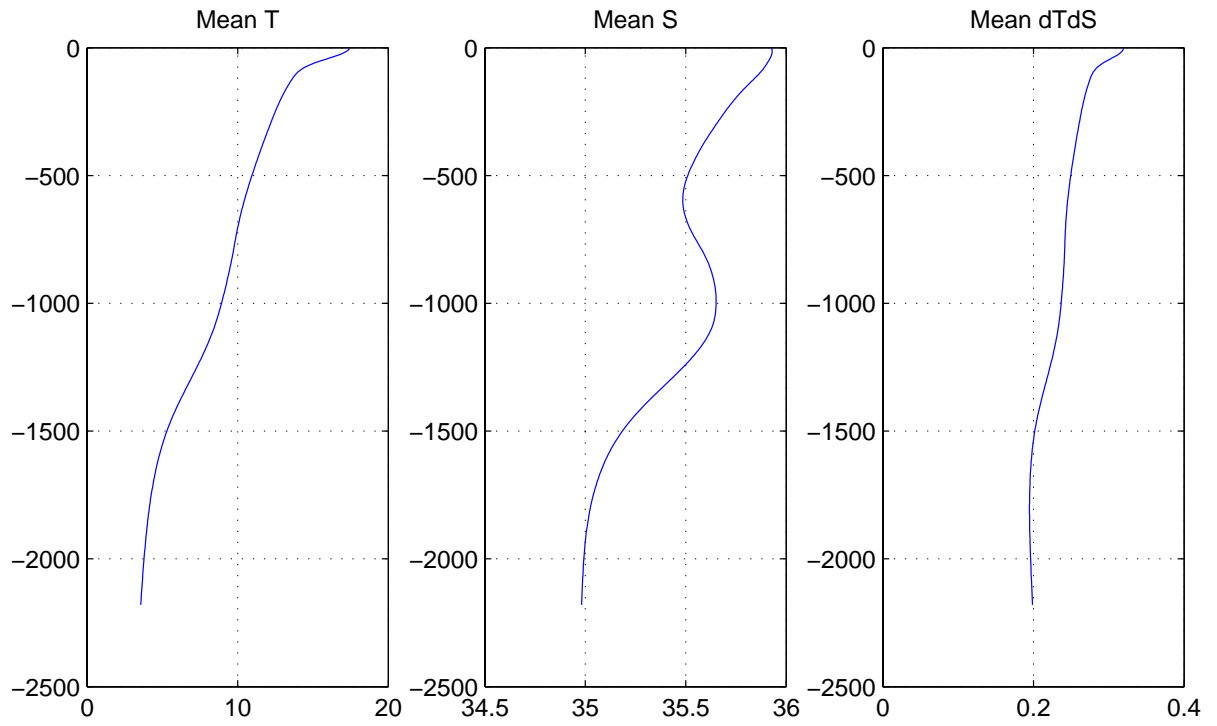


Figure 12 : Profils moyens et modes verticaux de l'expérience 9.

3.2.2 L'état initial

La base verticale ayant changé, le run de référence ne peut plus être utilisé pour initialiser l'analyse. Afin de donner aux modes une idée a priori du signal saisonnier, nous avons utilisé le résultats d'une expérience d'essai faite avec ces modes. Le résultat fourni pour le jour 600 de cette analyse, soit le 23/08/2001 est affecté au jour 234 (22/08/2000). L'expérience 9 est donc initialisée avec un état de fin août 2001.

3.2.3 Modification des données utilisées

Les données prises en compte pour cette expérience sont identiques à celle de l'expérience 7, mais nous avons revu les valeurs des erreurs de représentativité (voir tableau 2)

Nous avons de plus apporté des modifications sur deux types de données : les profils et les séries temporelles.

Introduction d'une contrainte θ -S

L'examen des diagrammes θ -S montre que la contrainte de conservation de la densité appliquée en cas d'absence de mesure de salinité n'est pas justifiée en surface. Nous avons donc introduit une contrainte de relation T-S moyenne par niveau. Le calcul a été fait à partir de la base de données utilisée pour la construction des profils moyens et des modes. Les histogrammes à deux dimensions de la distribution température-salinité ont été construits à chaque niveau (illustrés figure 13). Une courbe de probabilité maximale dS(dT) a ensuite été ajustée.

Nous avons alors introduit cette contrainte sous la forme d'une pseudo-salinité, calculée à partir de l'anomalie de température, en utilisant la relation statistique. L'erreur associée correspond à l'erreur d'estimation de la courbe.

Interpolation des profils de température et de salinité en surface

Nous avons remarqué que suite à des pertes de données lors de la transmission, ou de la réduction par méthode des cordes, des portions de profils manquaient. Ce point est très pénalisant près de la surface avec la représentation en modes. Nous avons donc décidé d'interpoler les profils en cas de trou rencontré entre 0 et 300m. Un trou est comblé si la différence de température entre les 2 points à interpoler n'excède pas 1 degré. Ceci a été réalisé pour tous les profils issus de flotteurs PROVOR.

Elimination de profils aberrants

Les profils de température et de salinité d'une bouée (données de type 'TESAC') ne sont pas prises en compte entre le 13 et le 14 mai 2001. En effet, il s'avère que ces profils sont incorrects.

Température et salinité des mouillages

Une autre effet indésirable des modes a été révélé par l'expérience 7. On constate une anomalie de température aux profondeurs inférieures à 50 mètres, stationnaire au dessus des points de mouillage. La contrainte imposée par les séries temporelles à de nombreux niveaux oblige à faire appel aux modes élevés. Le mode 3 en particulier est très intensifié en surface, or les données sont rarement disponibles pour estimer précisément l'amplitude de ce mode. Nous avons donc choisi, pour les mouillages dont le niveau de mesure le plus élevé est 100 ou 150 m (mouillages N et S), de créer une pseudo série de température à 20 mètres, extrapolée à partir de la mesure à 100 ou 150 m. La pseudo salinité a été ajoutée en se basant sur la méthode mise en œuvre pour les profils.

La transformation d'une mesure à 100 ou 150 m en une mesure à 20 m a été faite en se basant à nouveau sur la base CTD. La figure 14 montre le diagramme des anomalies par rapport au profil moyen de T_100 ou T_150 en fonction de T_20. Les saisons sont codées par couleur. On remarque que les anomalies d'hiver ou d'été suivent au premier ordre une droite, de même pente, mais dont la constante s'inverse. Nous faisons l'hypothèse que cette constante varie linéairement entre ces deux extrêmes en fonction des saisons. La figure 15 présente les courbes de températures à 100m (ou 150m) et à 20m ('pseudo-température') pour les mouillages N et S. A ces pseudo-données, nous associons une erreur de 1°C.

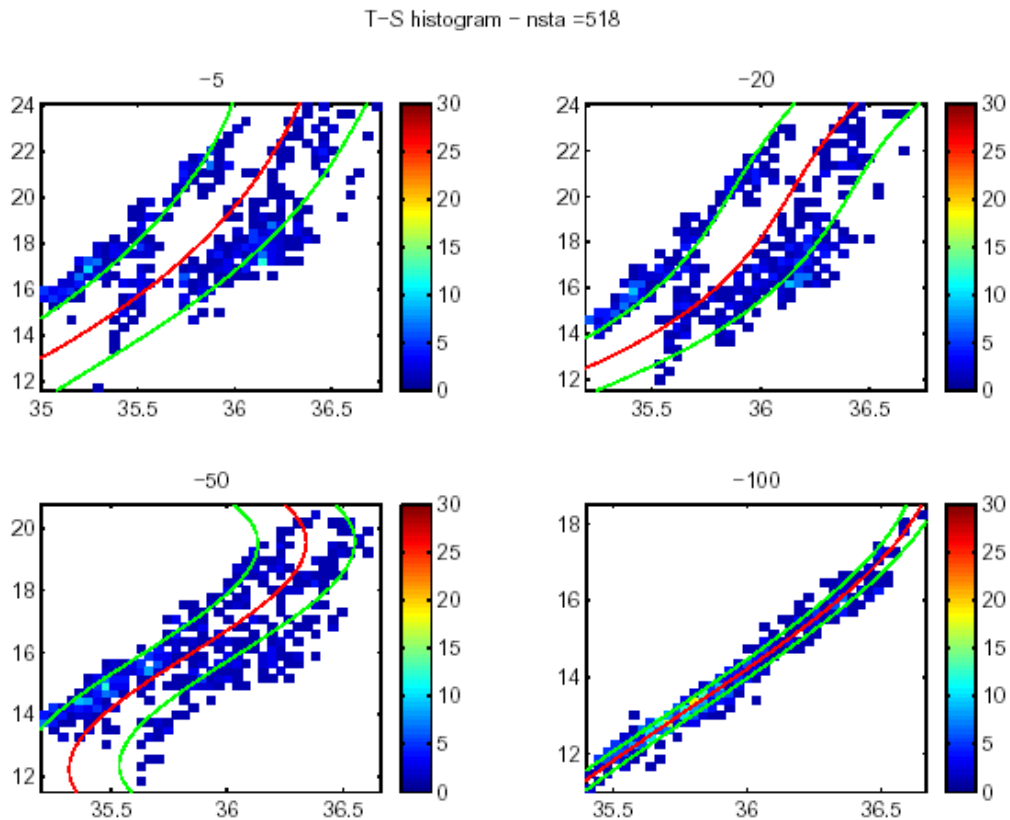


Figure 13-a : Histogramme des salinité-températures par niveau sur la région Pomme. La courbe rouge est l'ajustement S(T), les courbes vertes représentent 'estimation de l'erreur.

T-S histogram - nsta =518

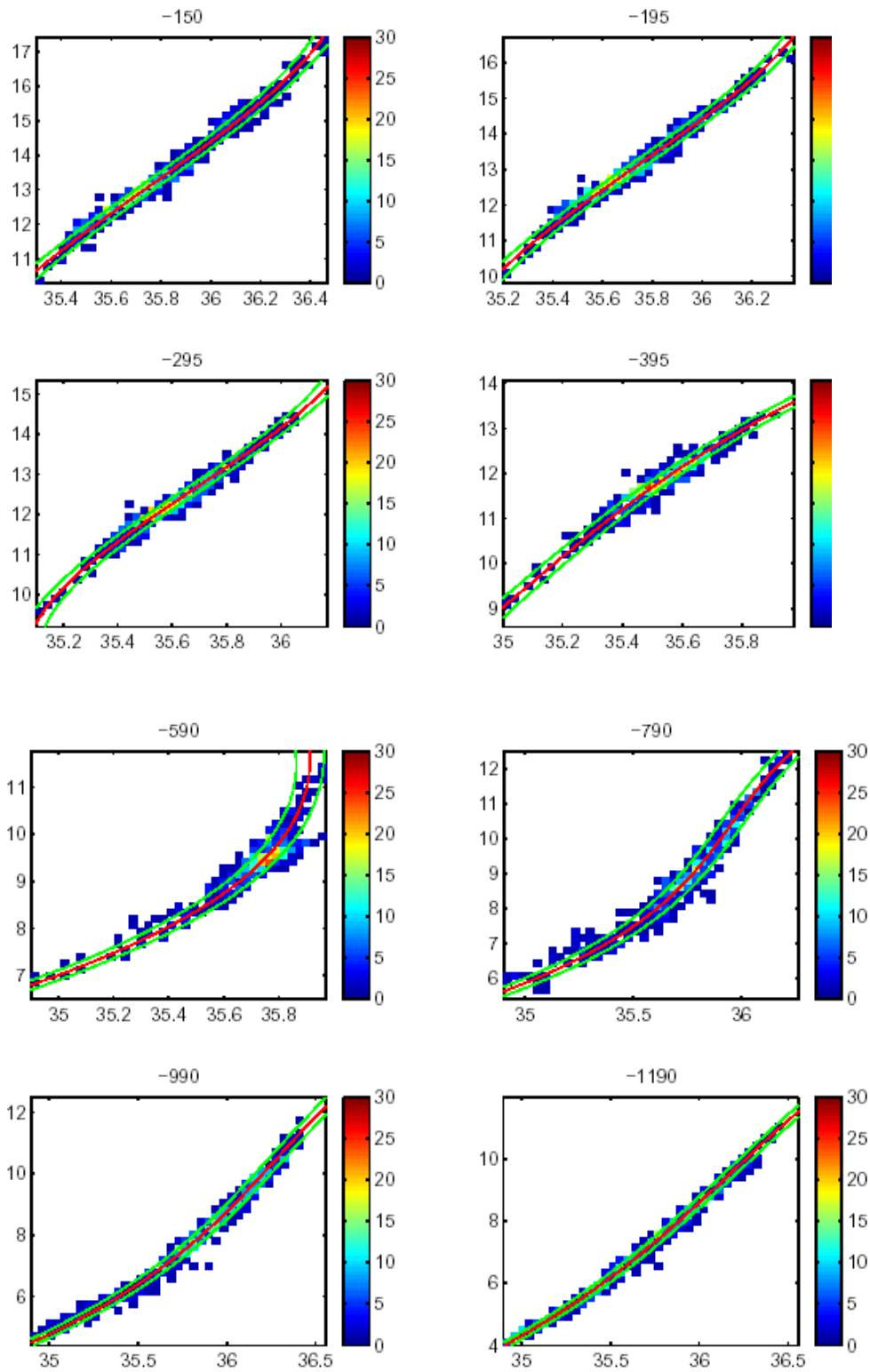


Figure 13-b : Histogrammes salinité-température par niveau, suite.

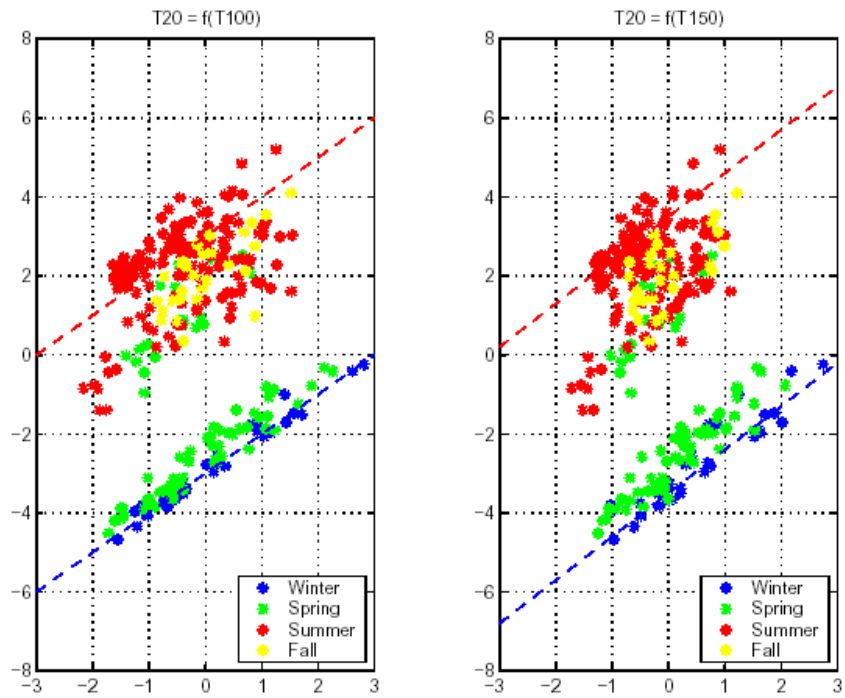


Figure 14 : Relation entre anomalie de température à 20 mètres et anomalie de température à 100 ou 150 mètres établie à partir de la base de données CTD. Les lignes pointillées sont les ajustements correspondant aux saisons extrêmes.

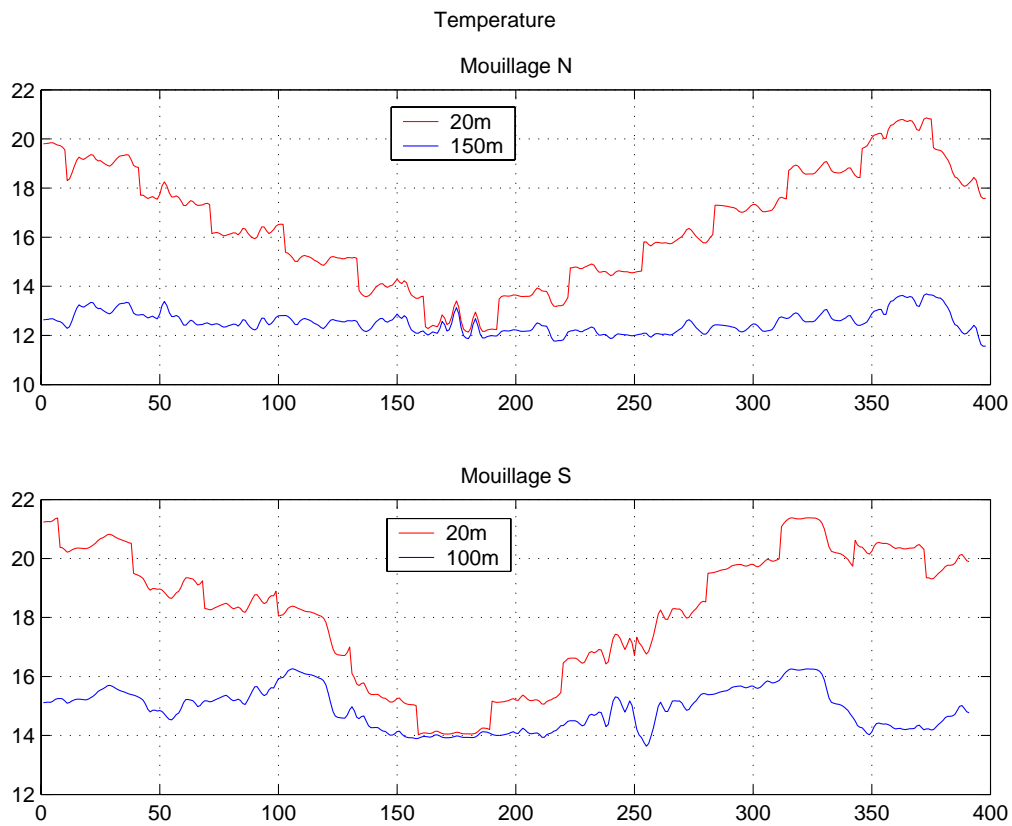


Figure 15 : Séries de températures à 100m (ou 150m) et à 20m ('pseudo-température') pour les mouillages N et S.

3.2.4 Diagnostics

La répartition de l'énergie sur les différents modes est différentes de ce qu'elle était dans le cas de l'expérience 7. L'état initial étant moins bon, le modèle s'ajuste à l'arrivée des données de la première campagne Pomme (à partir du jour 270). C'est vrai en particulier pour le mode 1 de température, le mode barotrope et le premier mode barocline (mode 5). Un autre saut est visible lors des campagnes de 2001 (février-mars-avril et septembre octobre). Si le niveau des modes de température neutres est le même que lors du run 7, celui des modes actifs est plus élevé ici (mode barotrope en particulier).

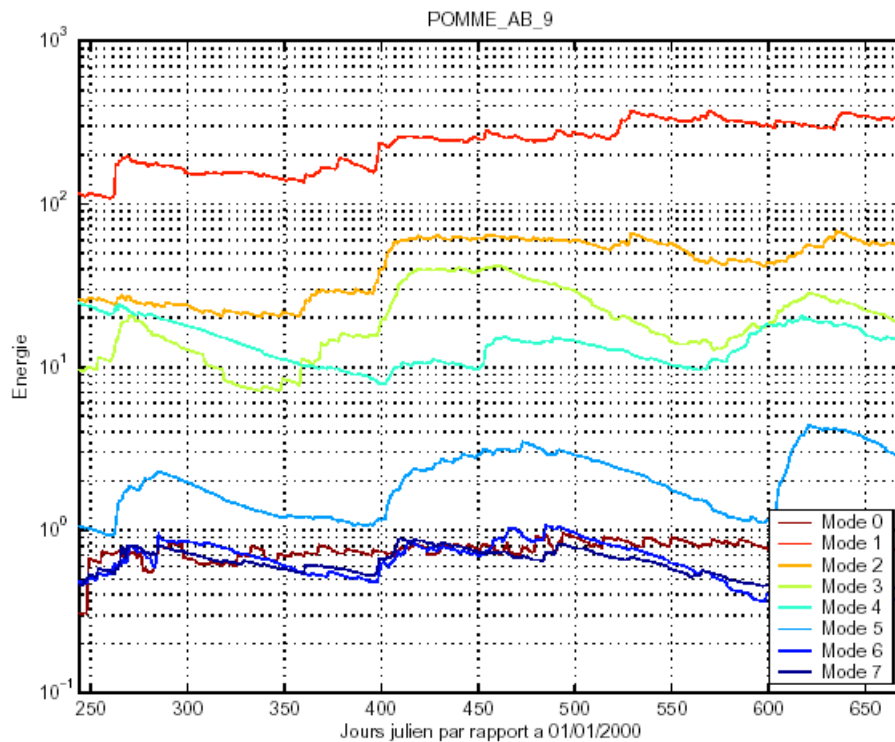


Figure 16 : Energie des modes de l'expérience 9

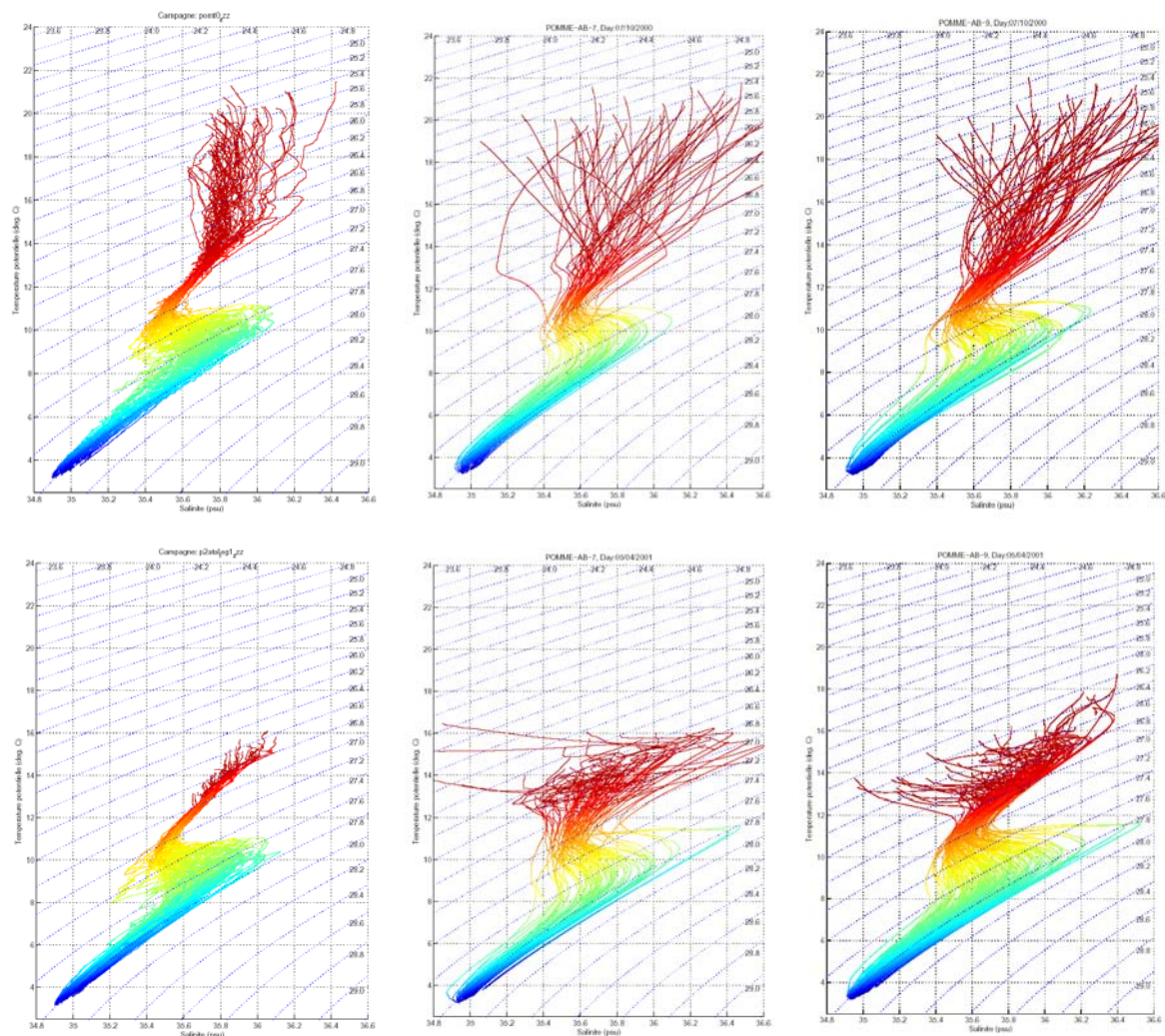


Figure 17: Diagrammes θ -S en octobre (gauche) et avril (droite) lors des campagnes Pomme (haut) et dans les expériences 7 (milieu) et 9 (bas)

4 Références

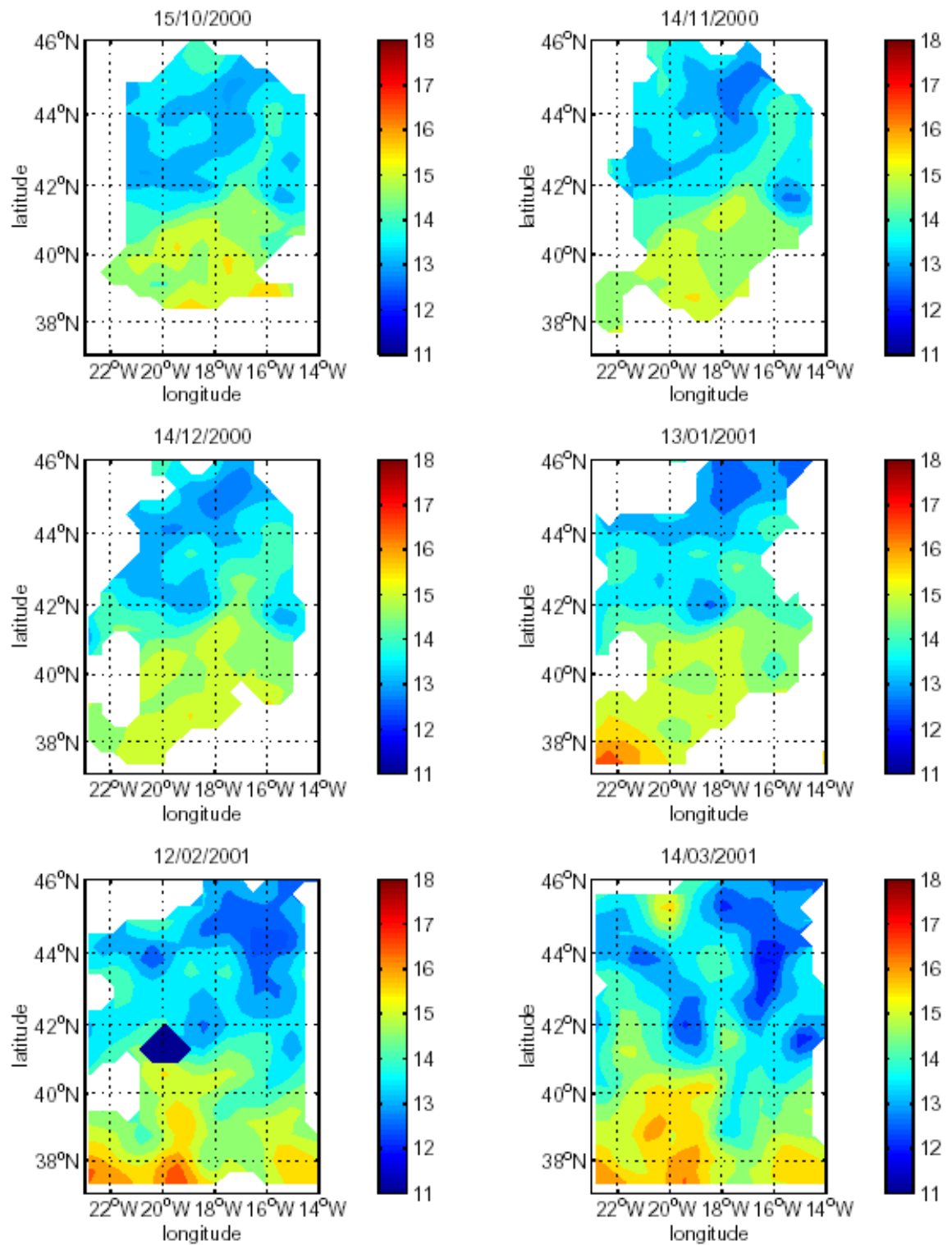
- Billant, A., P. Branellec, 2002 : POMME : Rapport de données eulériennes. Rapport LPO 02-18.
- Coatanoan, C., P. Lherminier, F. Gaillard, C. Kermabon, 2002 : POMME : Traitement des données d'ADCP de coque RDI-NB 75. Rapport interne LPO 02-04.
- Kermabon, C. et F. Gaillard, 2003 : Inversion avec filtre de Kalman, Version 1.5 : Documentation utilisateur. Rapport LPO – 03 – 05.
- Gaillard F., Y. Desaubies, U. Send and F. Schott, 1997: A 4-D analysis of the thermal structure in the Gulf of Lions. J. Geophys. Res.,102, C6: 12515-12537.

Gaillard, F., C. Kermabon, et H. Mercier, 2002 : Synthèse des données par filtrage de kalman : reconstruction des champs 4D sur la zone POMME : Analyse de référence'. Rapport LPO – 02-06.
Gaillard, F., 2003 : Description de la méthode. Document provisoire.

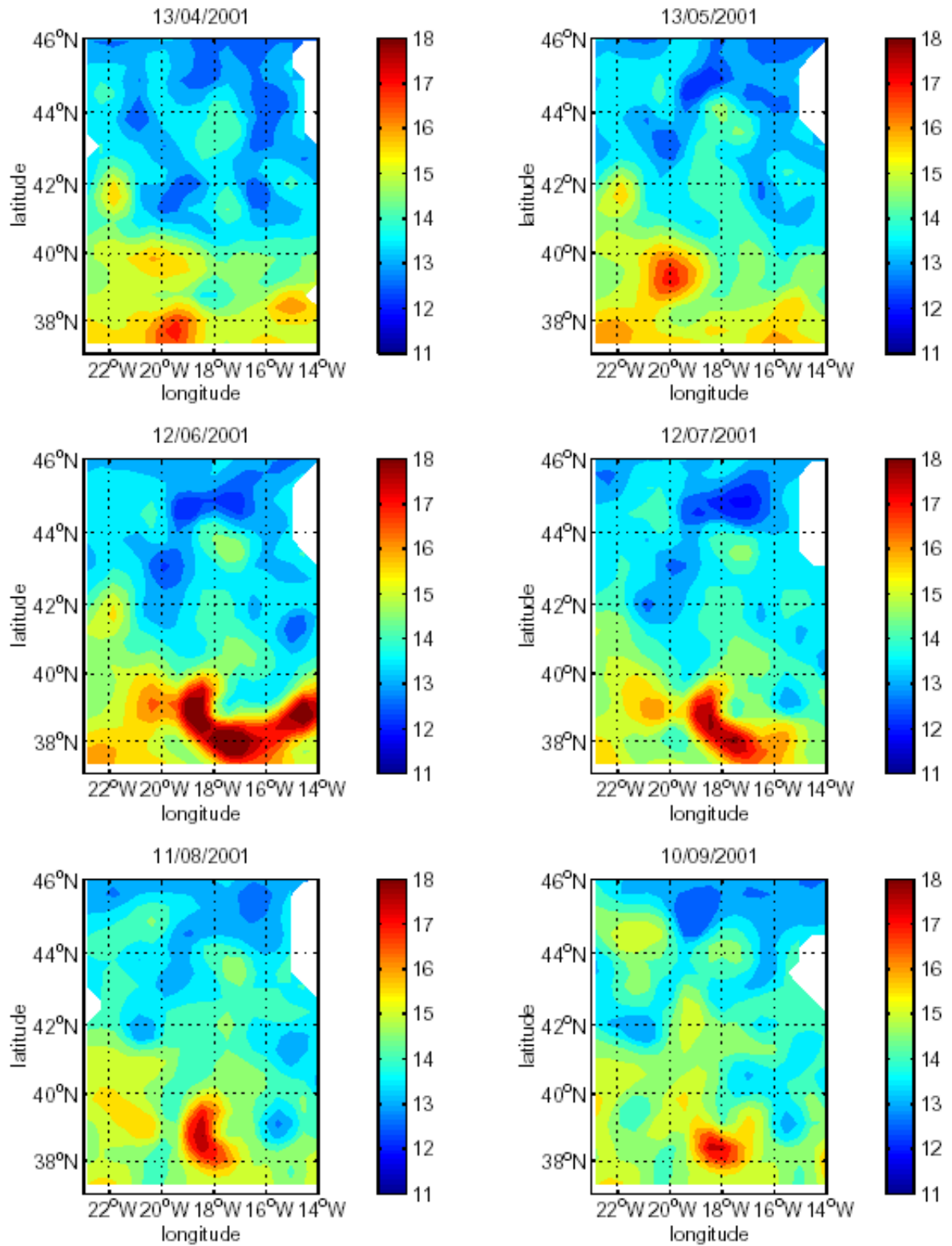
5 Annexe : Exemples de résultats

Les champs obtenus dans chacune des expériences sont présentés au niveau 100 m (température et fonction courant) et au niveau 1000 m (salinité) dans les pages suivantes.

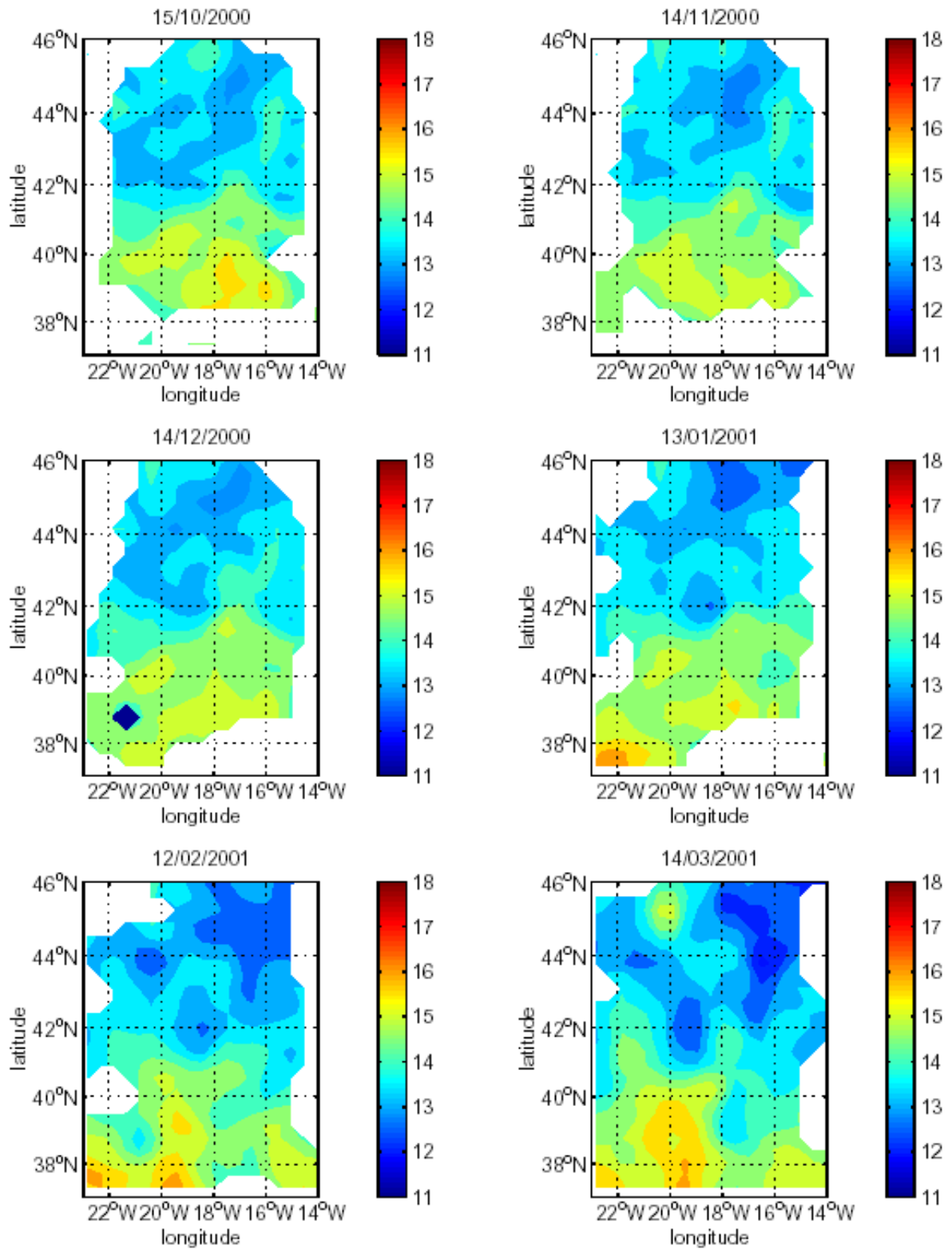
POMME_AB_7 : TEMP - 100m - Masque 75 %



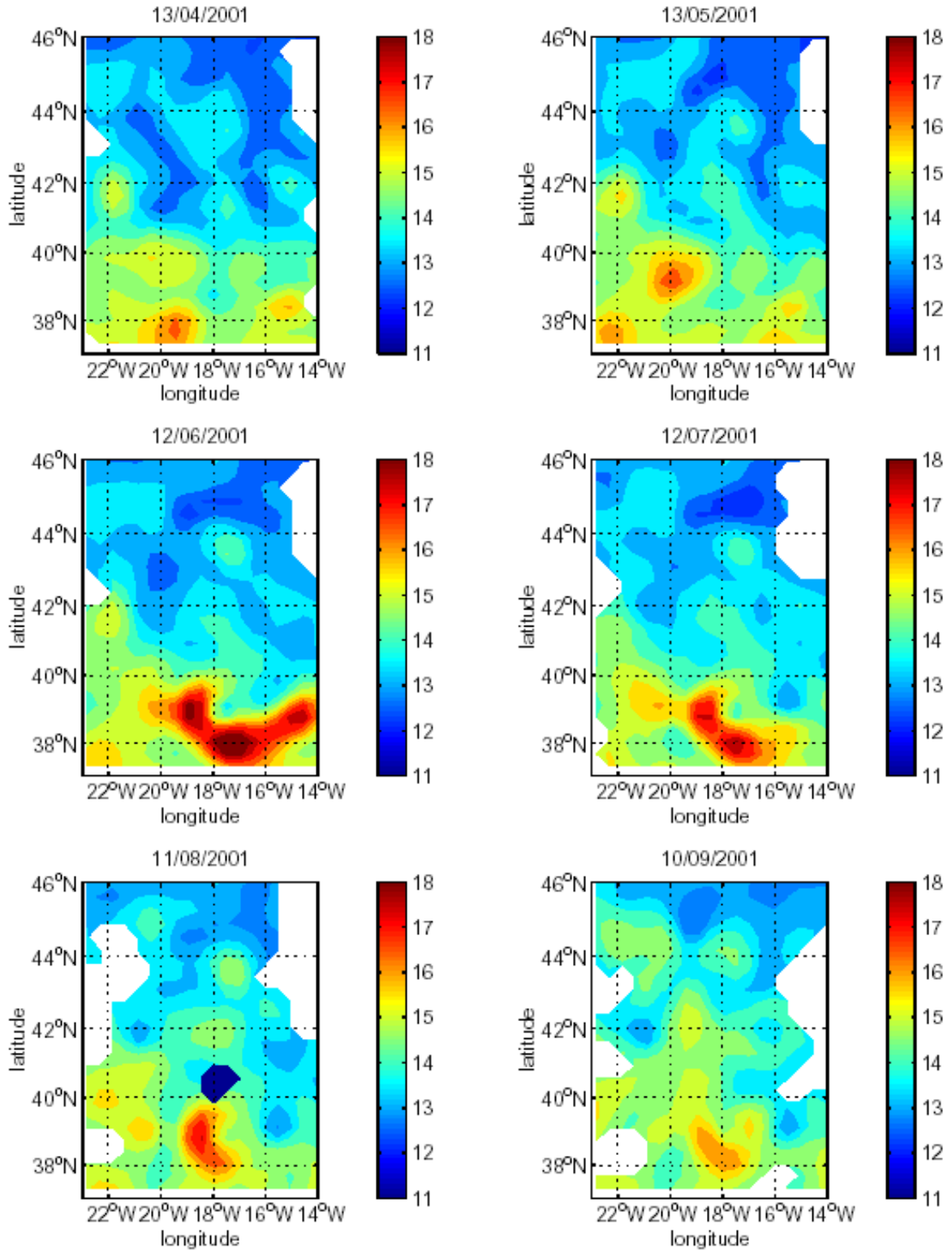
POMME_AB_7 : TEMP - 100m - Masque 75 %



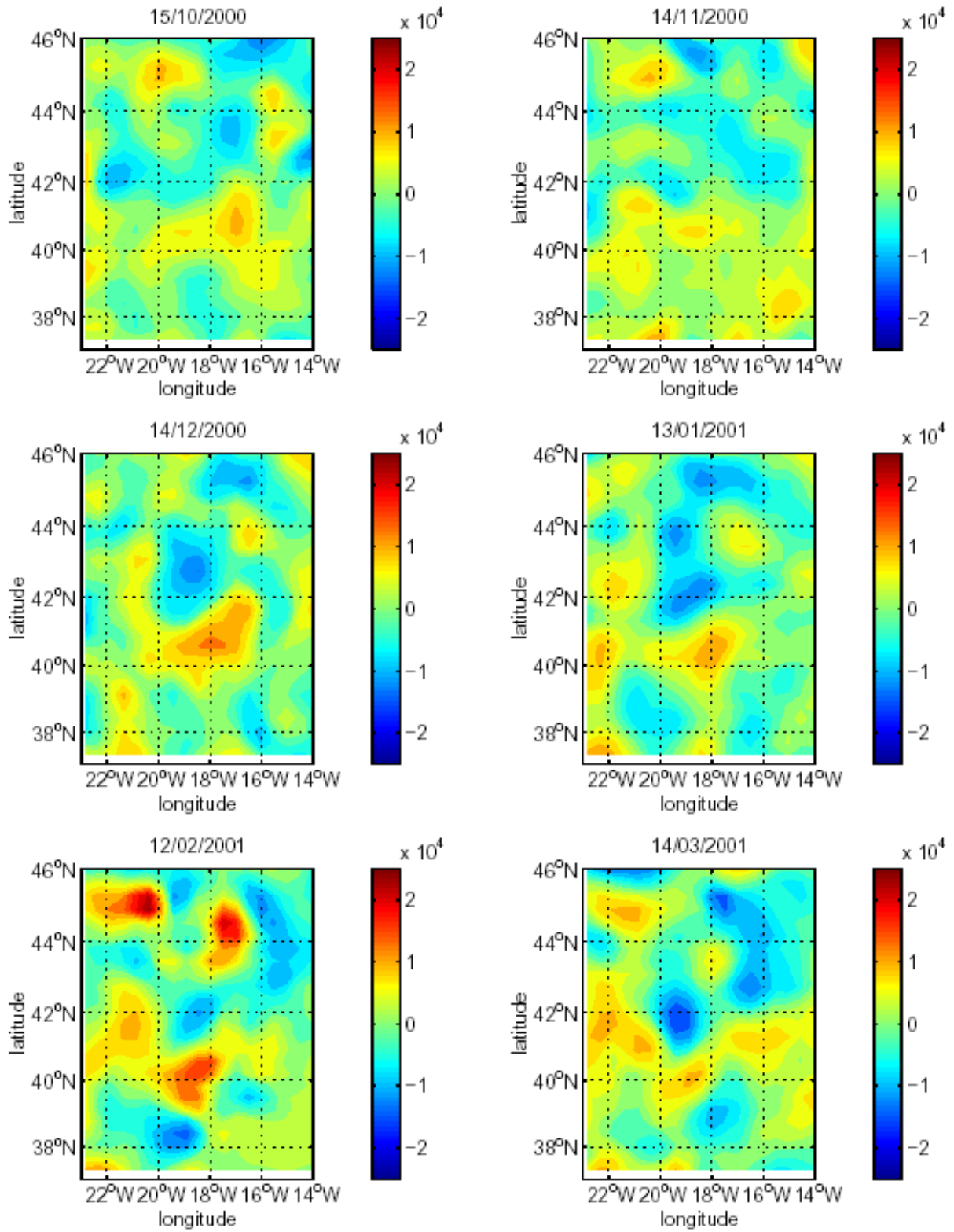
POMME_AB_9 : TEMP - 100m - Masque 50 %



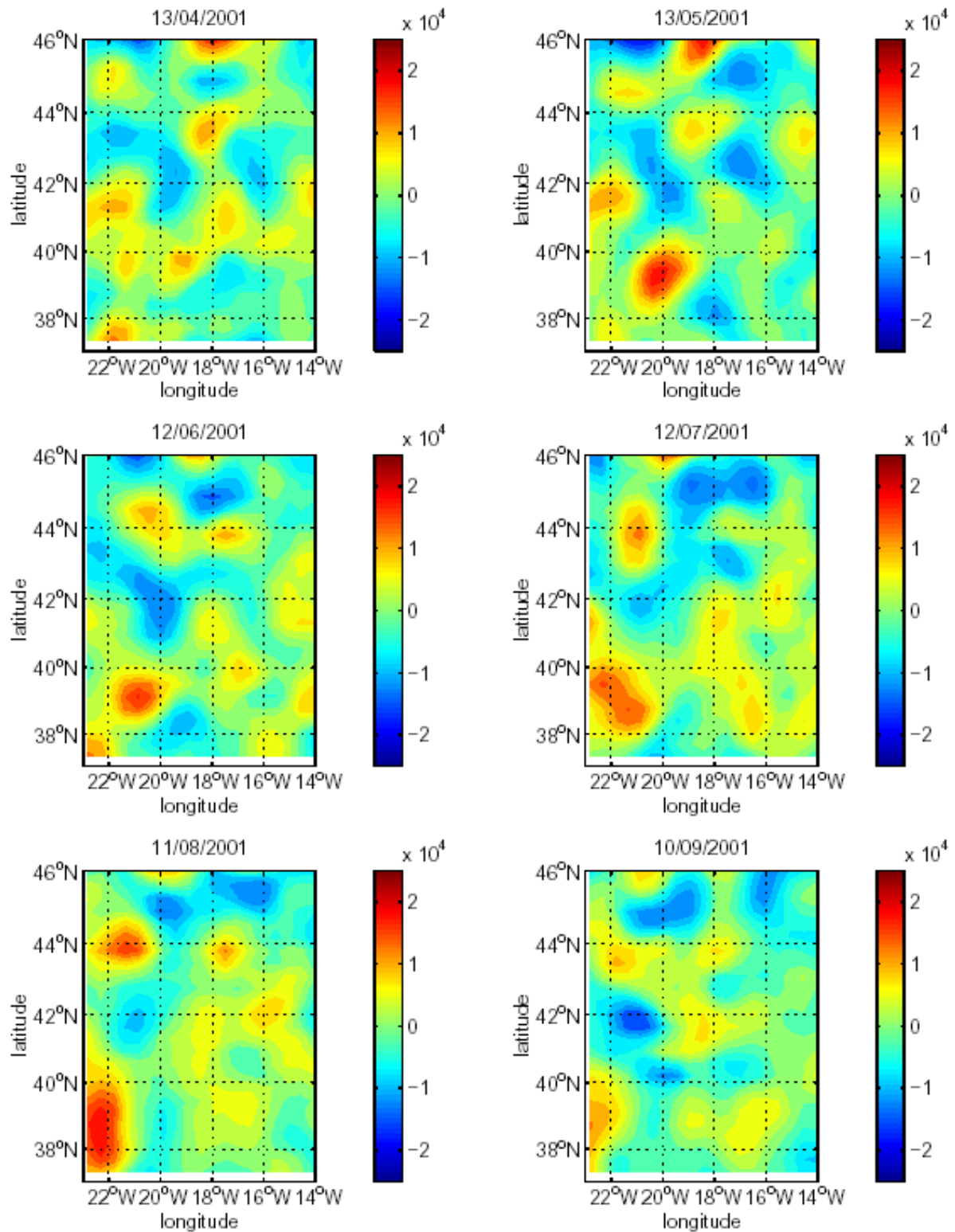
POMME_AB_9 : TEMP - 100m - Masque 50 %



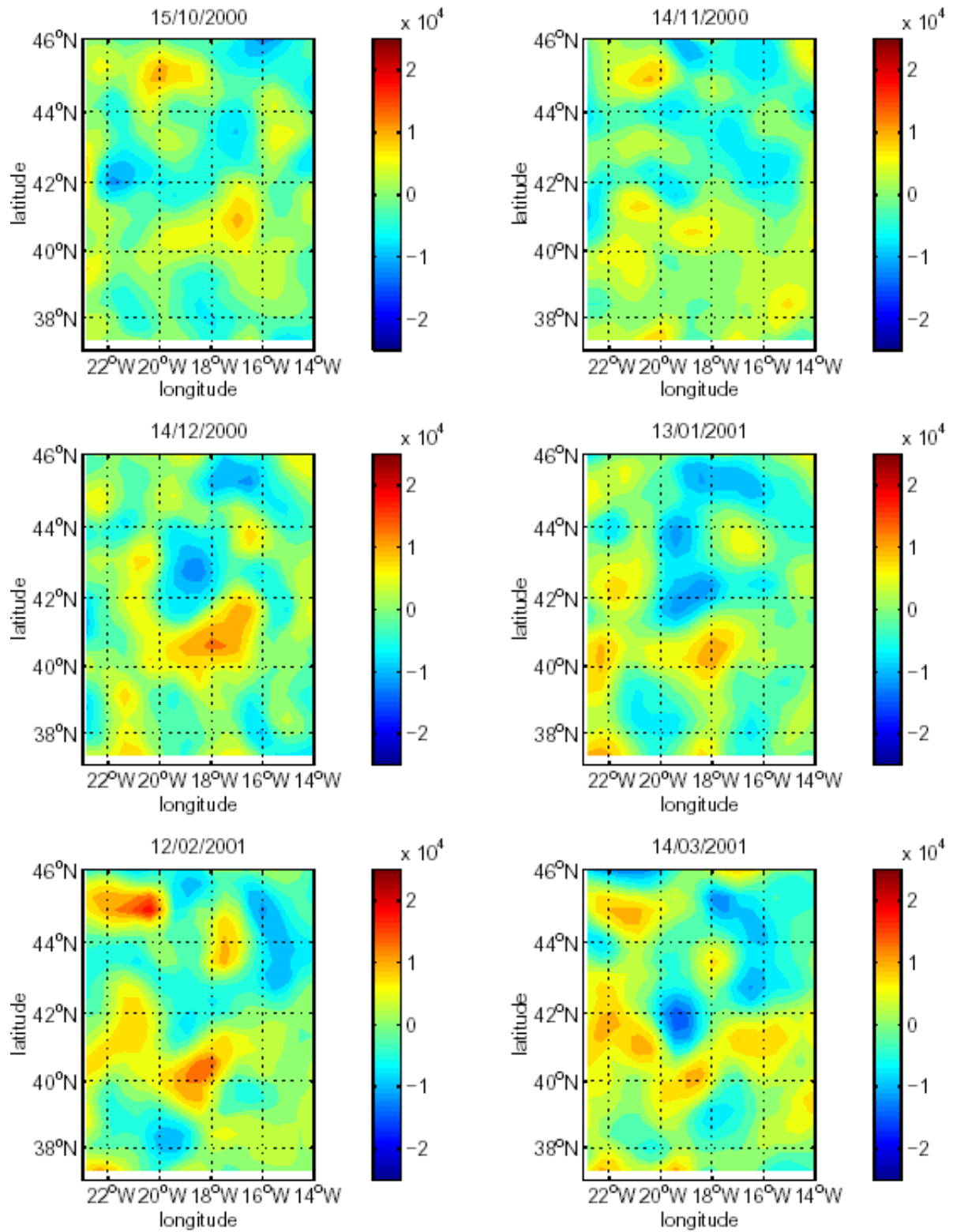
POMME_AB_7 : PSIA - 100m - Sans masque



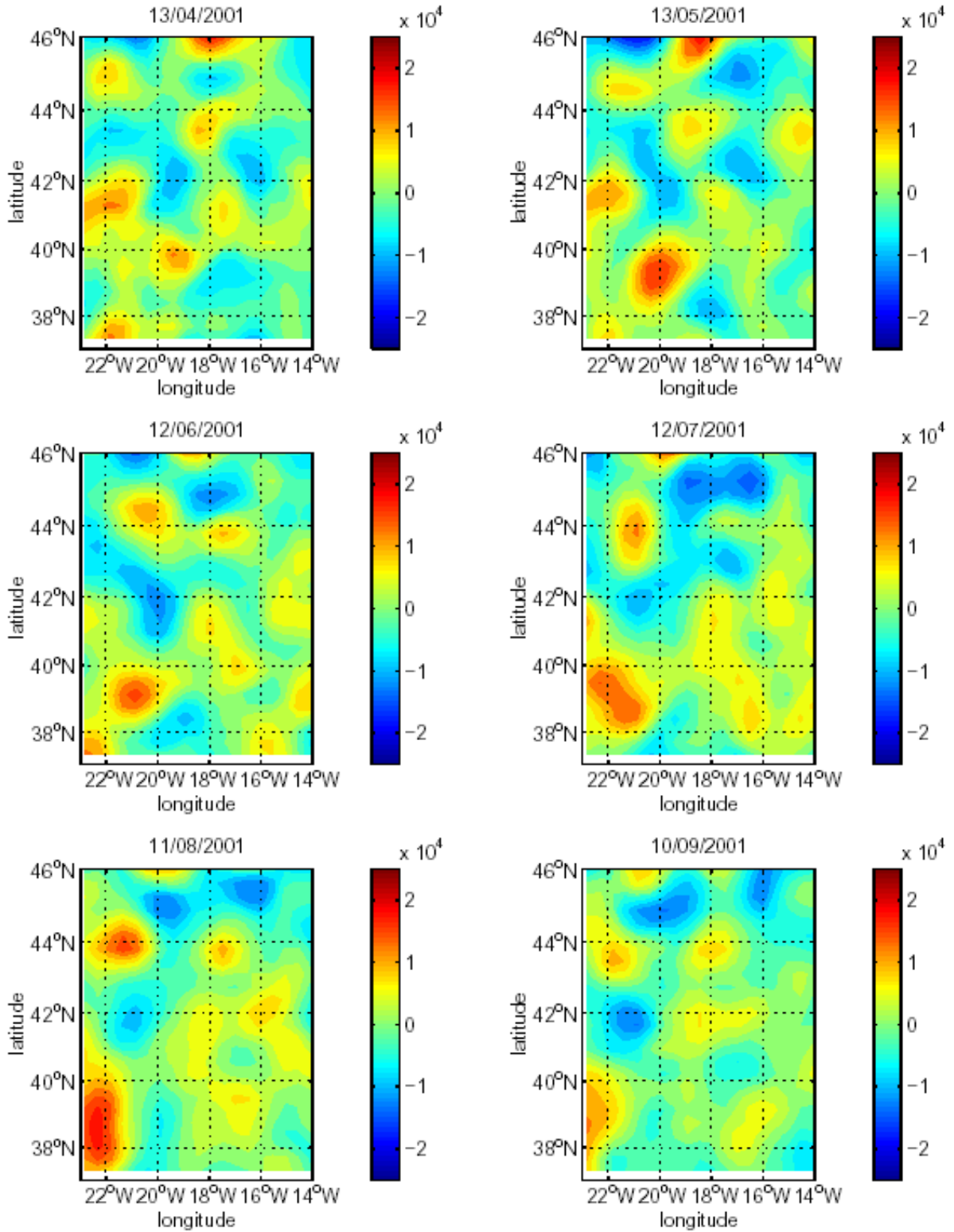
POMME_AB_7 : PSIA - 100m - Sans masque



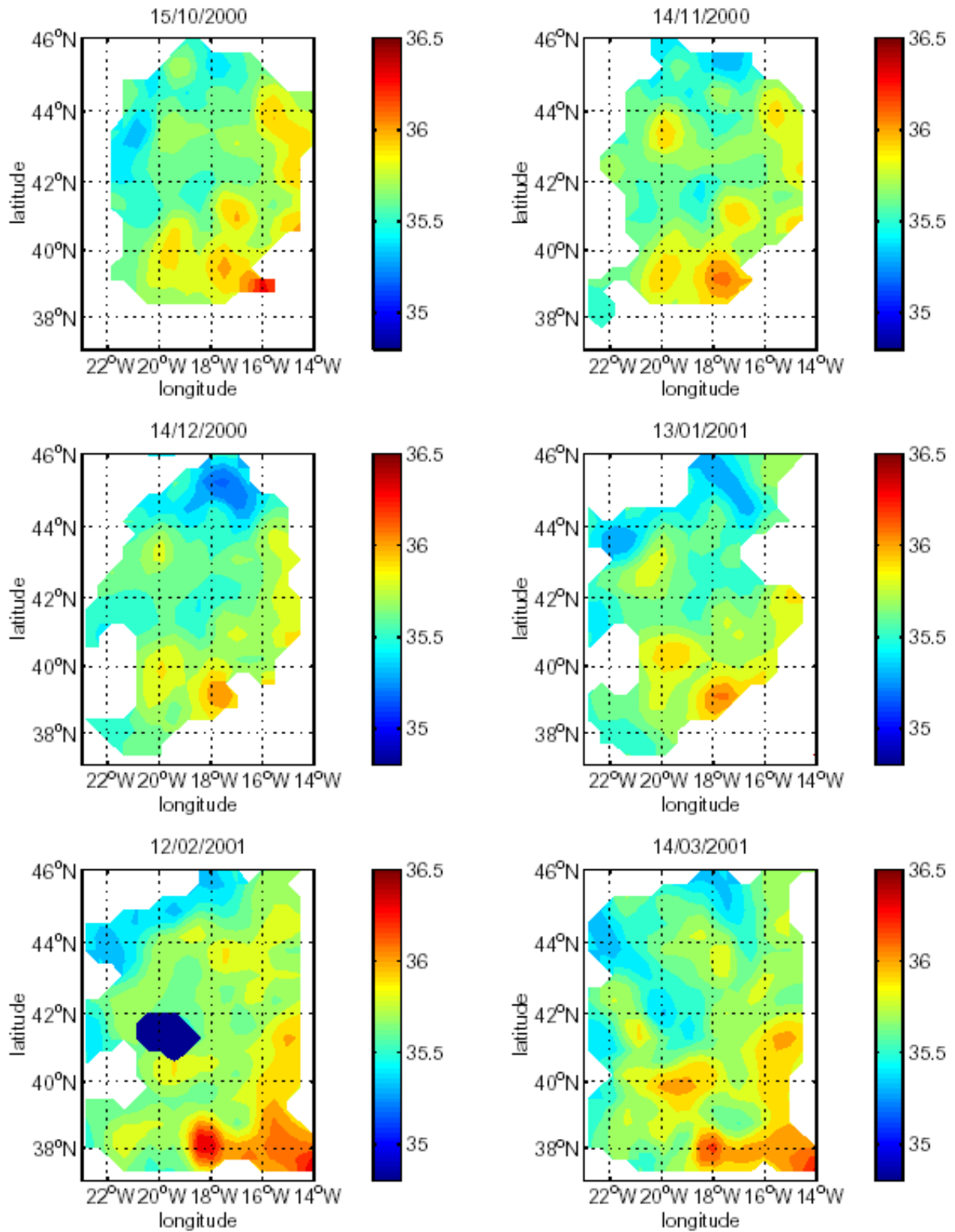
POMME_AB_9 : PSIA - 100m - Sans masque



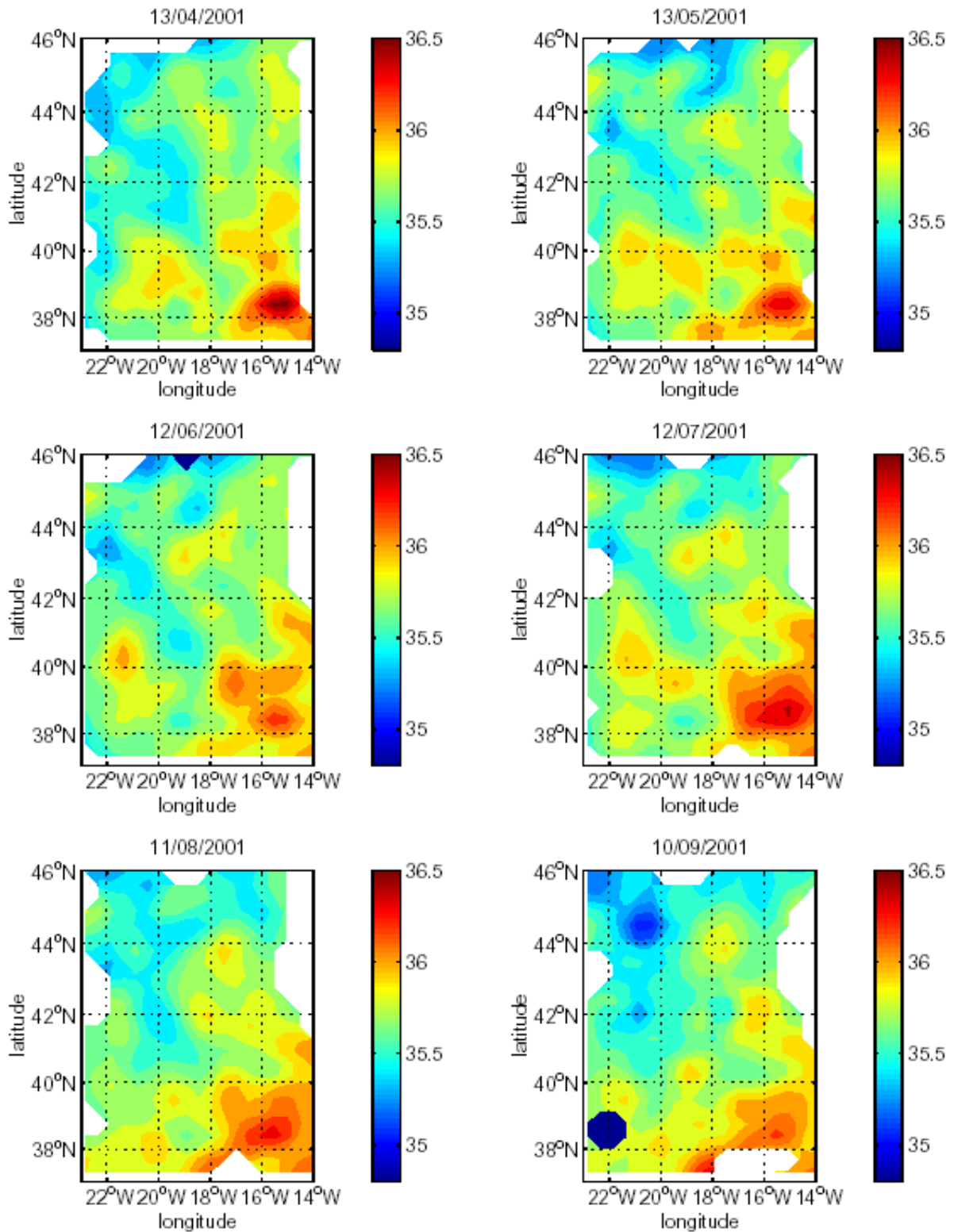
POMME_AB_9 : PSIA - 100m - Sans masque



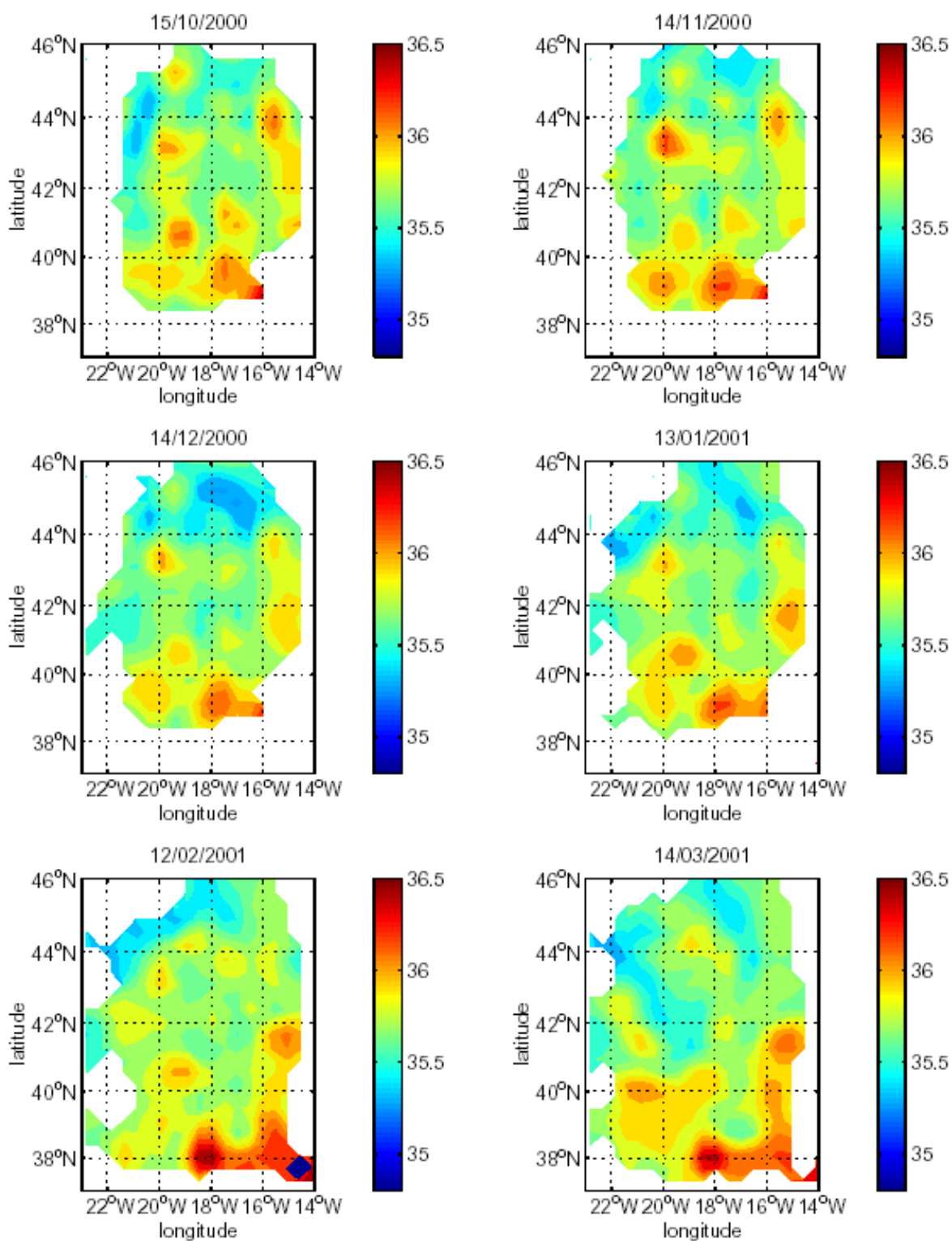
POMME_AB_7 : PSAL - 1000m - Masque 75 %



POMME_AB_7 : PSAL - 1000m - Masque 75 %



POMME_AB_9: PSAL - 1000m - Masque 50 %



POMME_AB_9 : PSAL - 1000m - Masque 50 %

