



Thèse
présentée par
Grégoire Broquet



Caractérisation des erreurs de modélisation pour l'assimilation de données dans un modèle océanique régional du Golfe de Gascogne

Directeurs de thèse : **Pierre BRASSEUR** et **Jacques VERRON**

LEGI - UJF - INPG, Grenoble, Bourse DGA

Le 19 Janvier 2007

Contexte du travail de thèse

**Application du filtre SEEK pour
l'assimilation de données dans les modèles
de circulations aux Equations Primitives**

Assimilation de données :
Amélioration de la connaissance
d'un système par la combinaison
de l'information de leurs modèles
et de leurs observations.



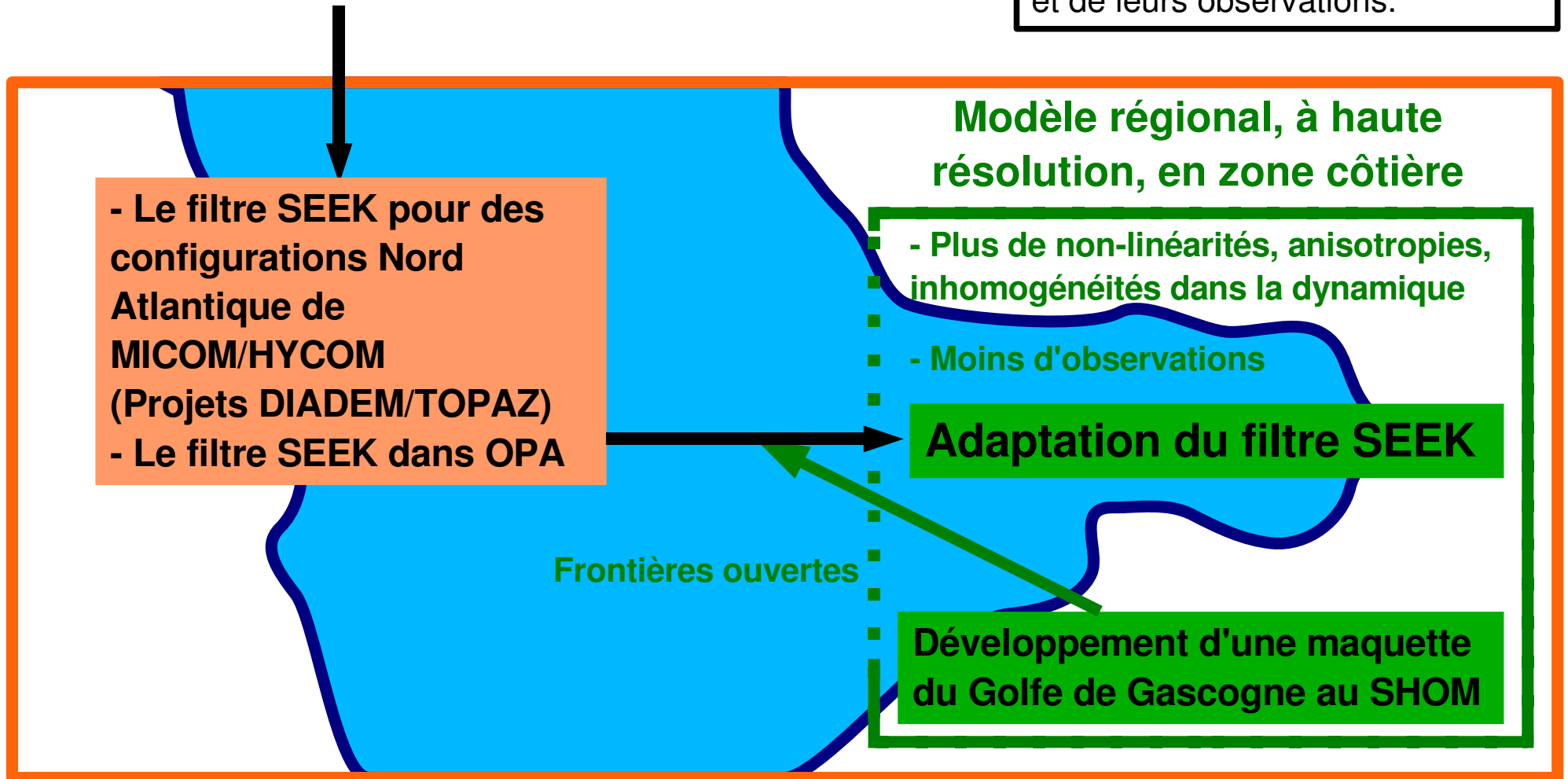
- Le filtre SEEK pour des configurations Nord Atlantique de MICOM/HYCOM (Projets DIADEM/TOPAZ)
- Le filtre SEEK dans OPA

Modèle de bassin à basse résolution

Contexte du travail de thèse

**Application du filtre SEEK pour
l'assimilation de données dans les modèles
de circulations aux Equations Primitives**

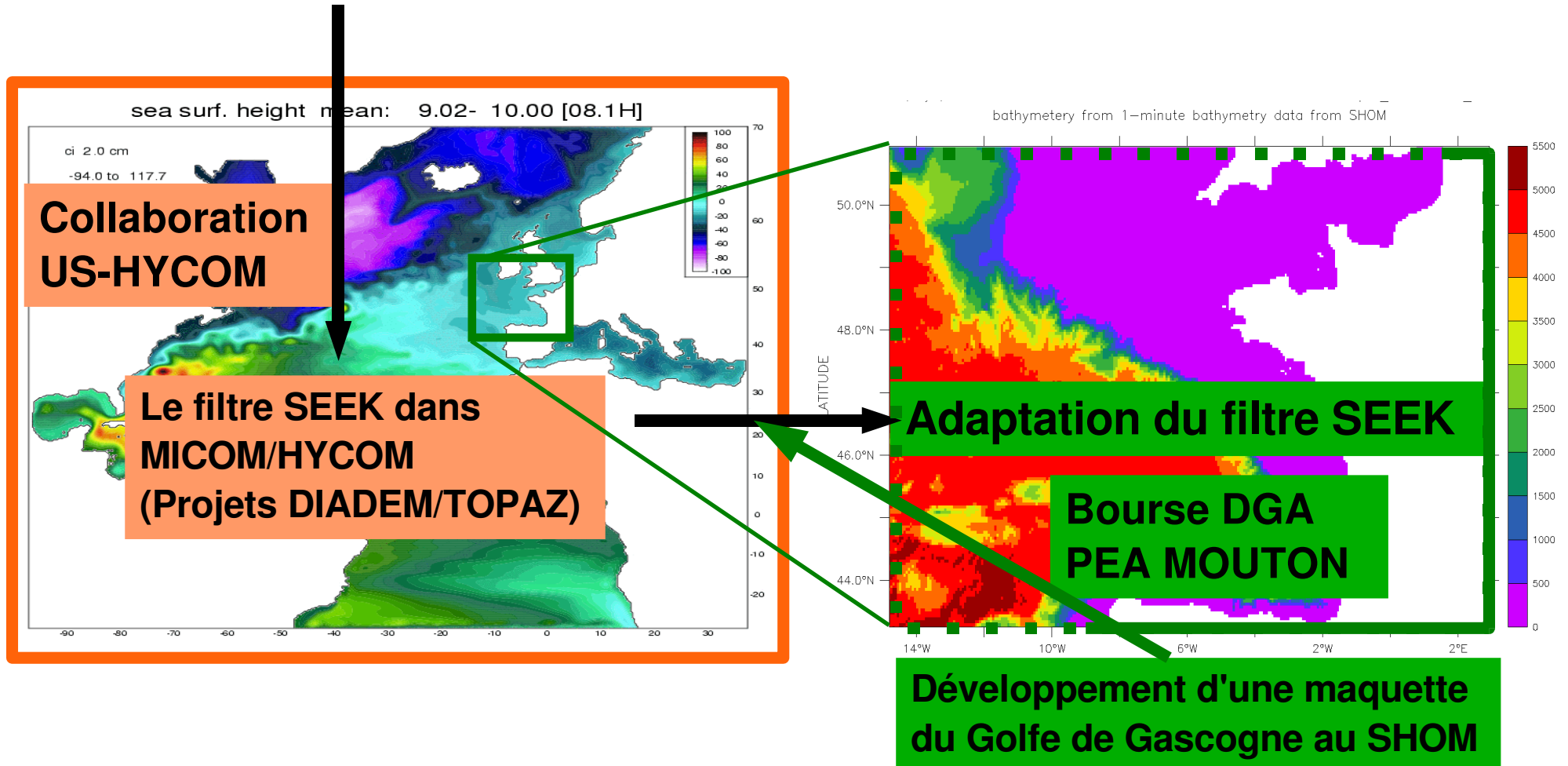
Assimilation de données :
Amélioration de la connaissance
d'un système par la combinaison
de l'information de leurs modèles
et de leurs observations.



Modèle de bassin à basse résolution

Contexte du travail de thèse

Application du filtre SEEK pour
l'assimilation de données dans les modèles
de circulations aux Equations Primitives



Objectifs

Adaptation des méthodes d'assimilation héritées du filtre SEEK au contrôle d'un modèle régional (configuration HYCOM du Golfe de Gascogne)



Etude de l'erreur modèle dans une configuration régionale pour sa représentation dans un filtre de Kalman

- Identification de sources d'erreur modèle : forçages aux limites**
- Estimation des statistiques de l'erreur modèle : développement d'une méthode d'ensemble**
- Caractérisation de l'erreur modèle : étude d'observabilité et de contrôlabilité**
- Amélioration de l'application du filtre SEEK au modèle régional par sa nouvelle paramétrisation**

Plan de la présentation

- **Cas d'étude expérimental**

- I. Le modèle HYCOM du Golfe de Gascogne

- **Cadre théorique et méthodologique de l'étude**

- II. Le filtre de Kalman et le SEEK appliqués aux modèles d'océans

- **Etude pour la paramétrisation du SEEK en modèle régional**

- III. Estimation et caractérisation de l'erreur modèle liée aux forçages aux limites

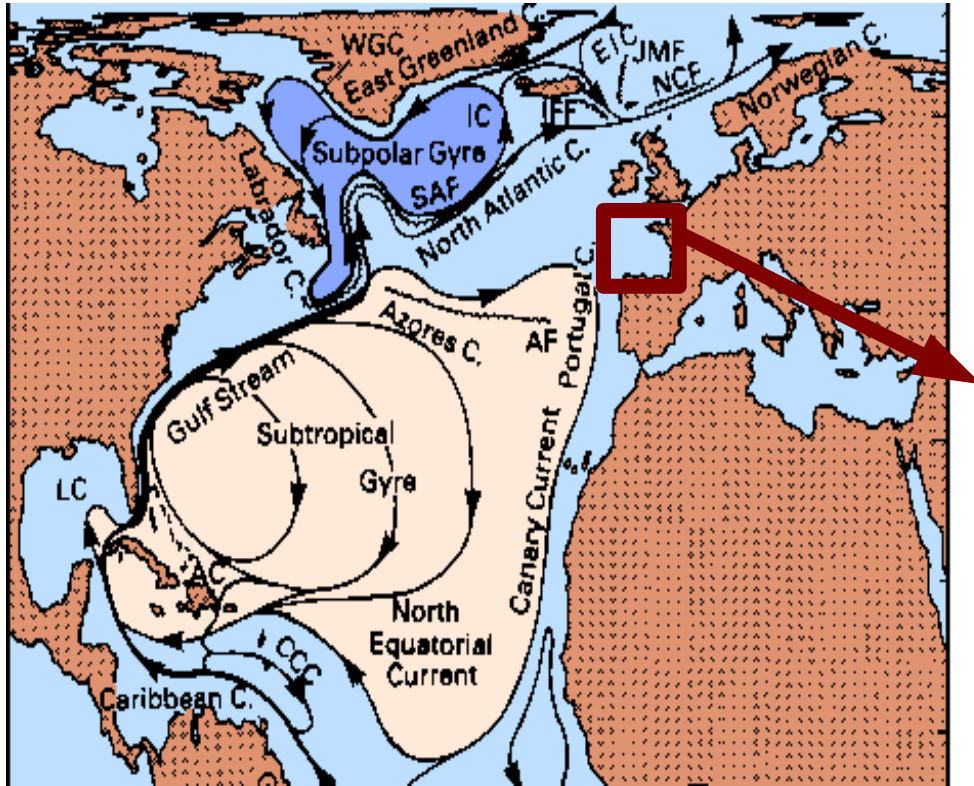
- **Expériences de validation de la nouvelle paramétrisation du SEEK**

- IV. Application du SEEK pour l'assimilation de SST dans le modèle du Golfe de Gascogne

I. Le modèle HYCOM du Golfe de Gascogne

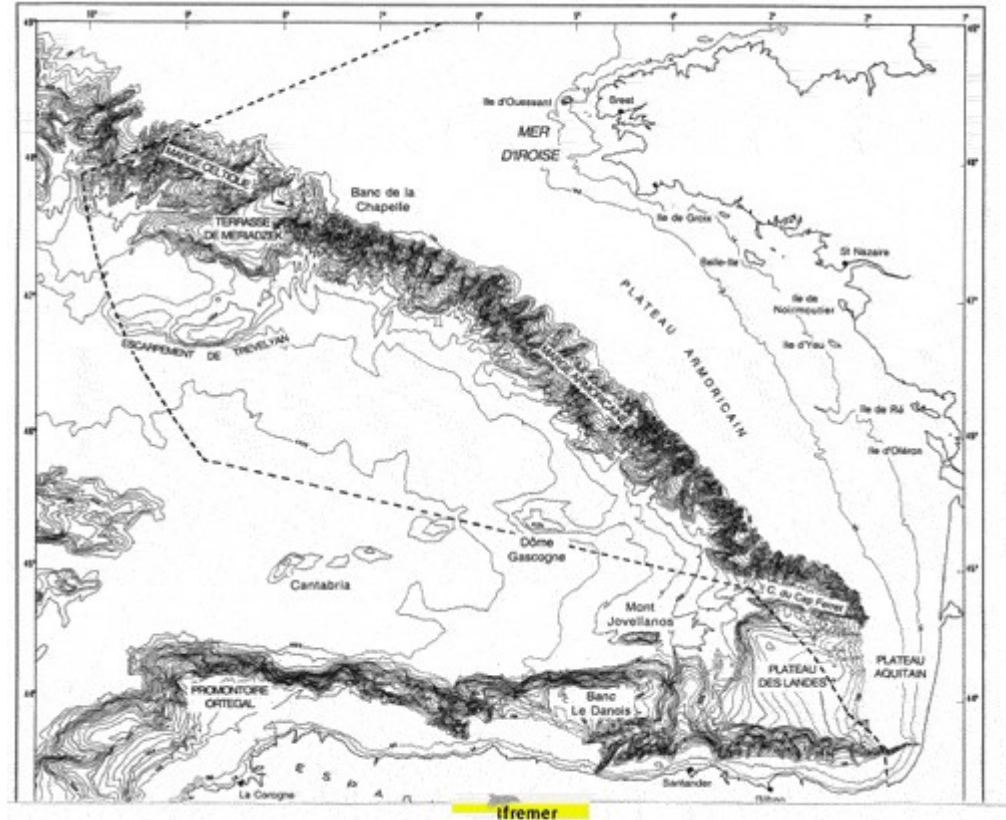
- **Dynamique régionale**
- **Présentation de HYCOM**
- **Développement du modèle**

Présentation de la région



Circulation de surface dans l'Atlantique Nord

Localisation en bordure de la **zone intergyre**, zone de courants faibles



Bathymétrie dans le Golfe de Gascogne

Séparation entre **Plateau** (très étendu), **talus** (abrupt) et **Bassin** du Golfe

Principaux phénomènes de circulation


 Dérive Nord Atlantique

 Courant de pente

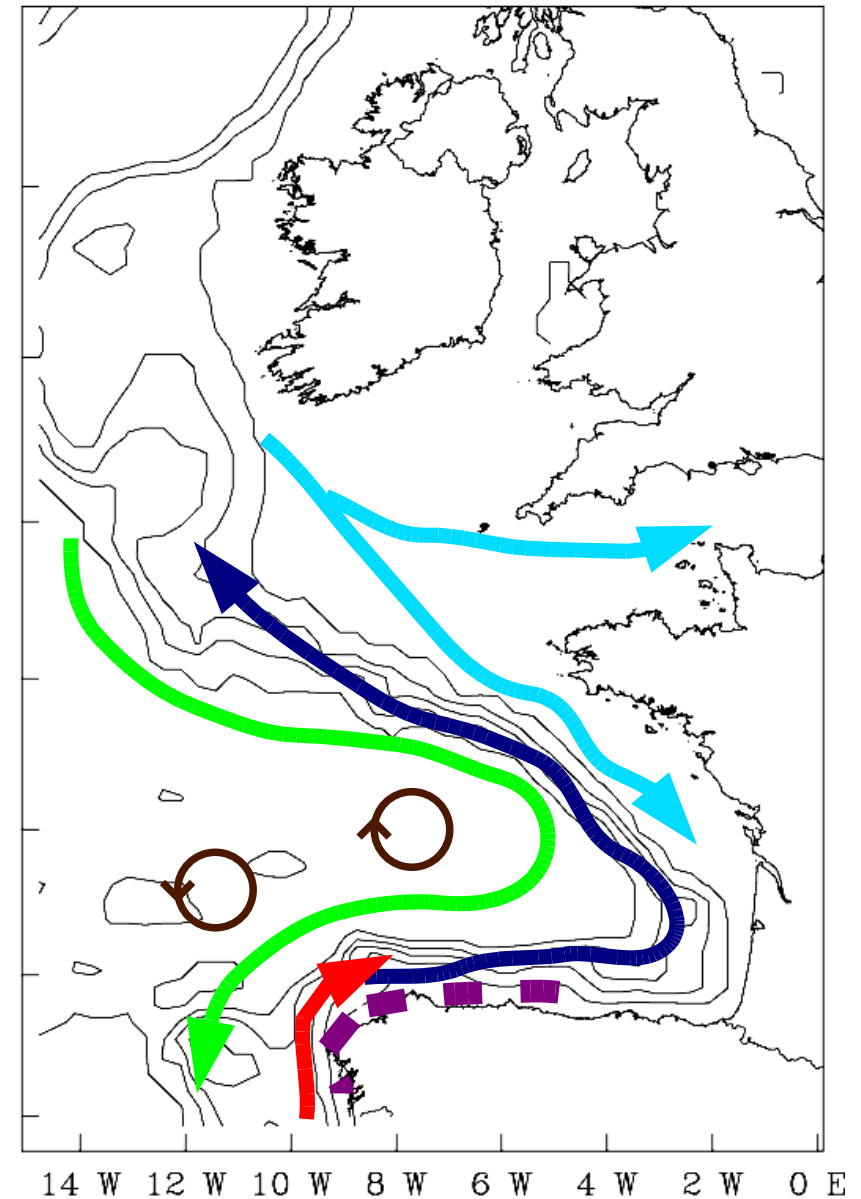
 Navidad

 Courants de plateau induits par les vents

 Upwellings

 SWODDIES

- Grande variabilité saisonnière
- Fort caractère barocline
- Importance du régime des vents



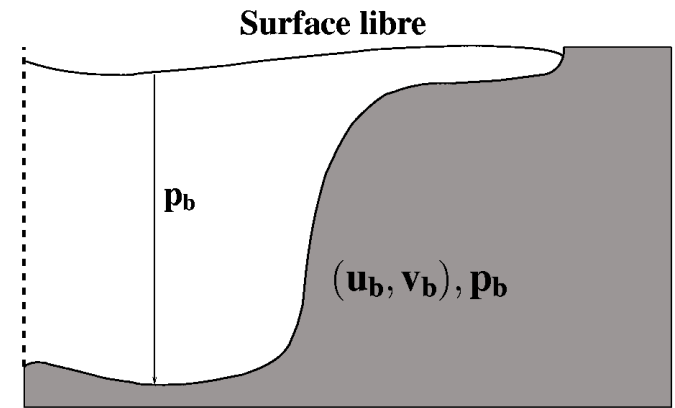
Caractéristiques du modèle HYCOM

(Bleck, 2002)

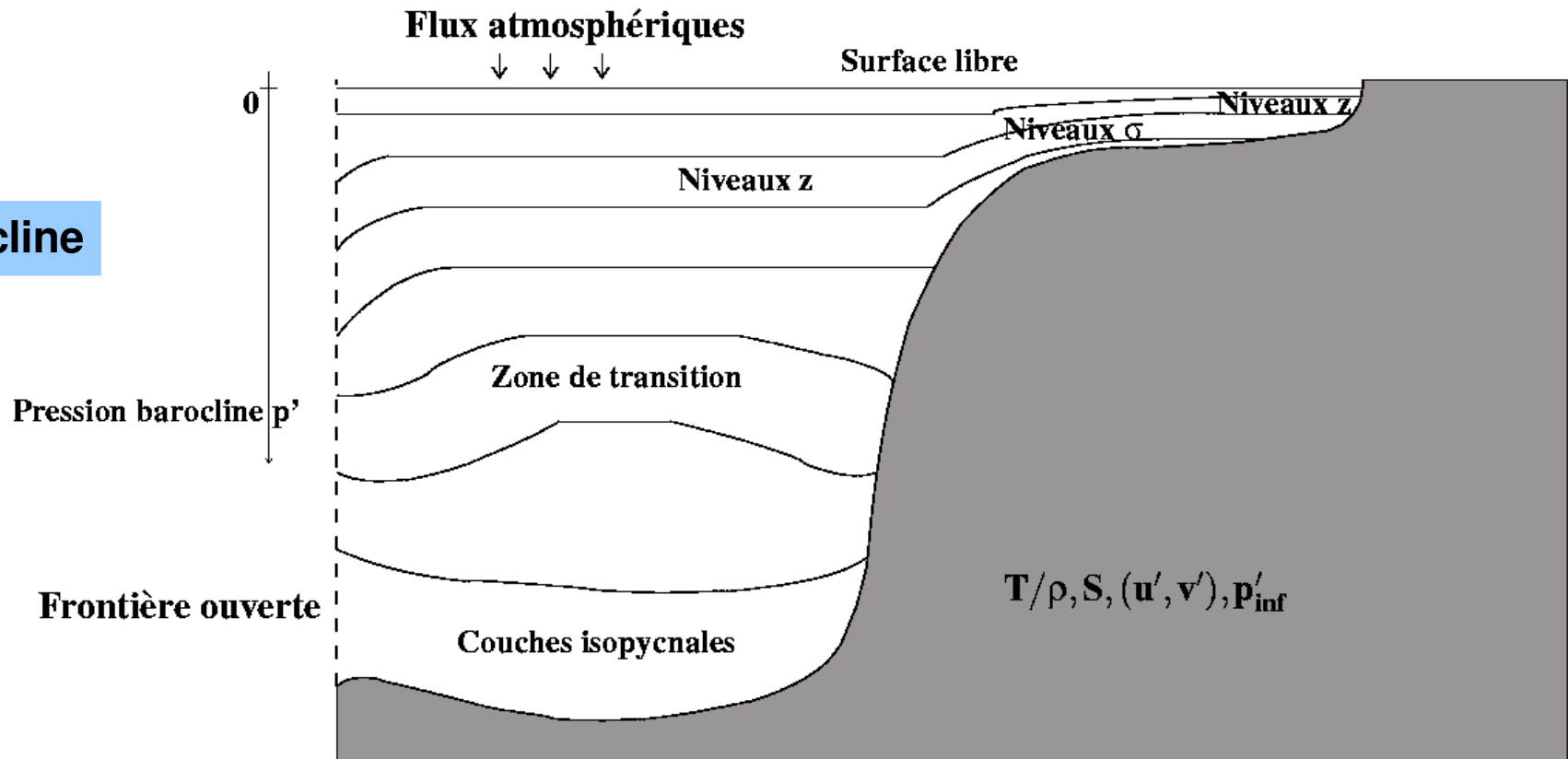
- Modèles en couches
- Coordonnée verticale hybride (adaptation du mode de résolution physique)
- Fortes contraintes sur les variables du modèle

Mode barotrope

Frontière Ouverte



Mode barocline



Forçages atmosphériques

Calculs de flux à l'interface air/mer à l'aide de jeux de paramètres atmosphériques :

$$w, T_a, q_{lw}, q_{shw}, E_v, (\tau_x, \tau_y)$$

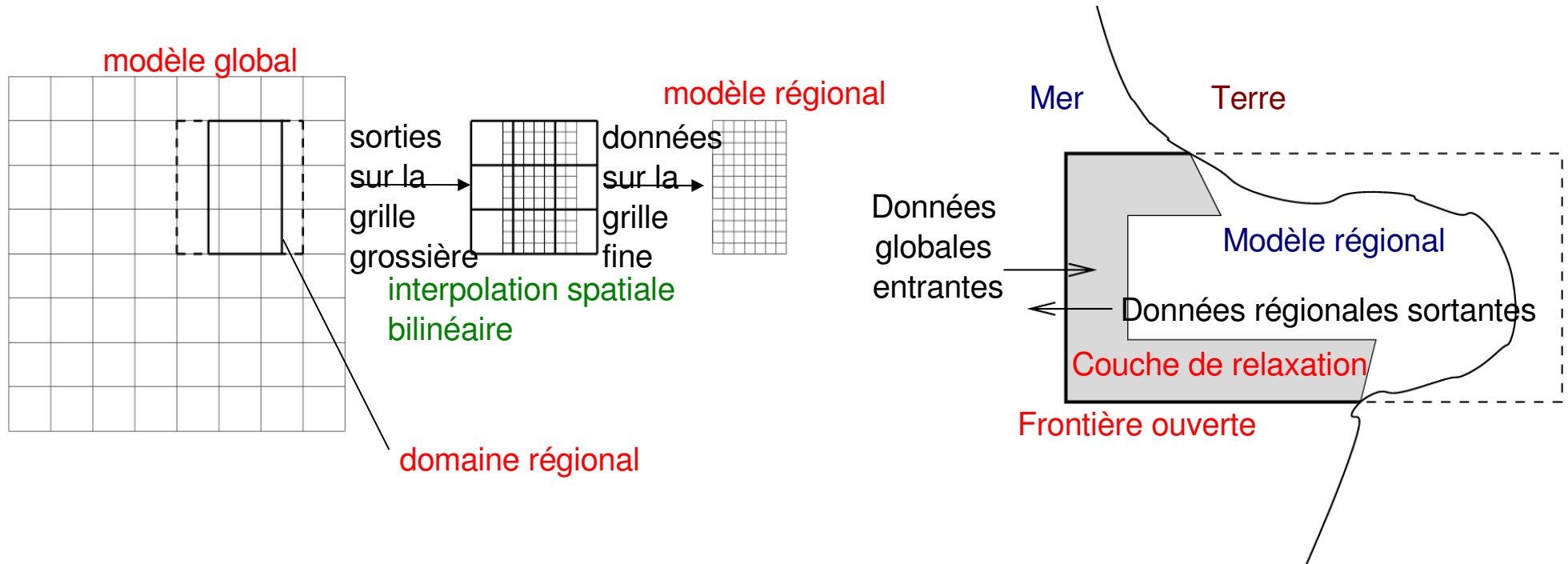
- **Formulations Bulk (Kara et al., 2000) pour les flux thermiques** : flux de chaleur latente et sensible calculés en fonction de la SST (température de surface) océanique
- **Flux de quantité de mouvement imposé par la tension de vent**
- Absence de flux d'eau douce (dans notre configuration)

Problème de l'imperfection de la formulation des forçages et des données de paramètres atmosphériques

Emboîtement de modèles

En mode «one way» : utilisation des CFO (Conditions aux Frontières Ouvertes)

(Blayo et Debreu, 2005)



CFO :

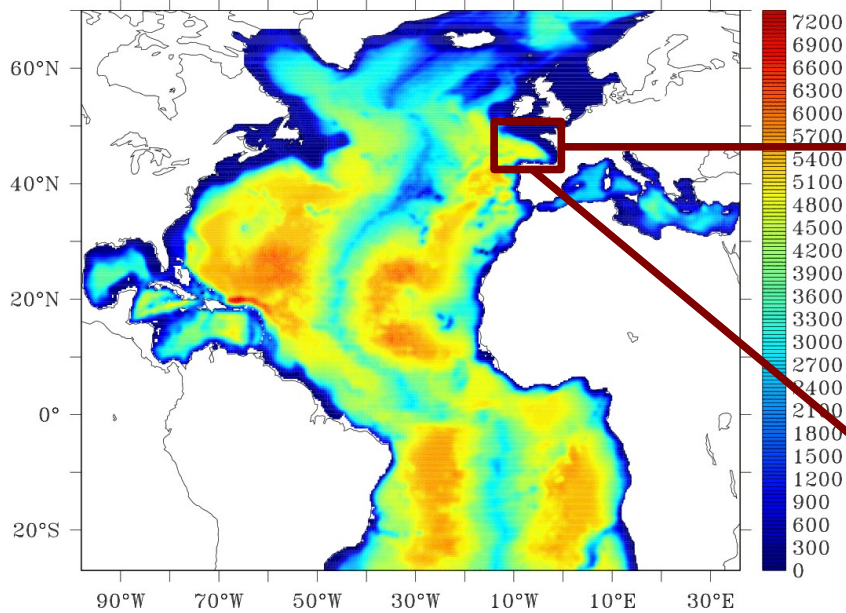
- **Méthode des caractéristiques en mode barotrope** (Oligier et Sunström, 1978)
- **Relaxation en mode barocline** (Davies, 1976)

Données utilisées pour les CFO :

$$p_b, (u_b, v_b), S, T, p', (u', v')$$

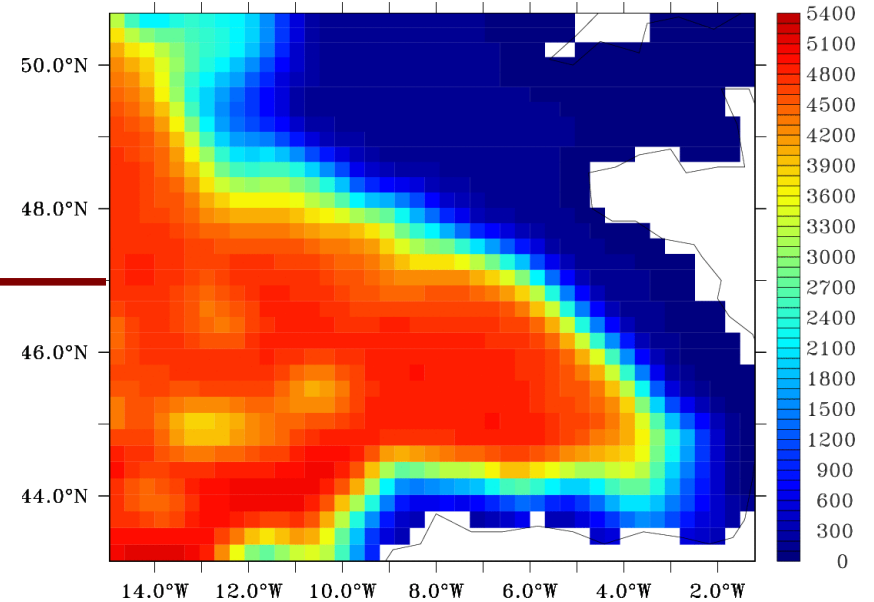
Problème de l'imperfection des formulations et des données utilisées pour les CFO

Les configurations emboîtées

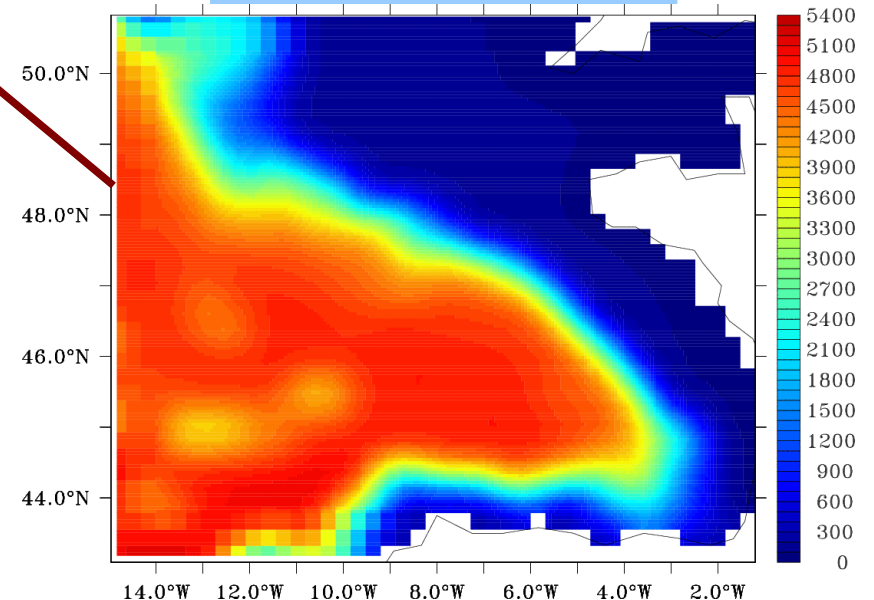


Bathymétrie de **NA3**

- Configurations au $1/3^\circ$ et au $1/15^\circ$ (grille Mercator)
- 26 couches verticales
- Données de bathymétrie ETOPO5



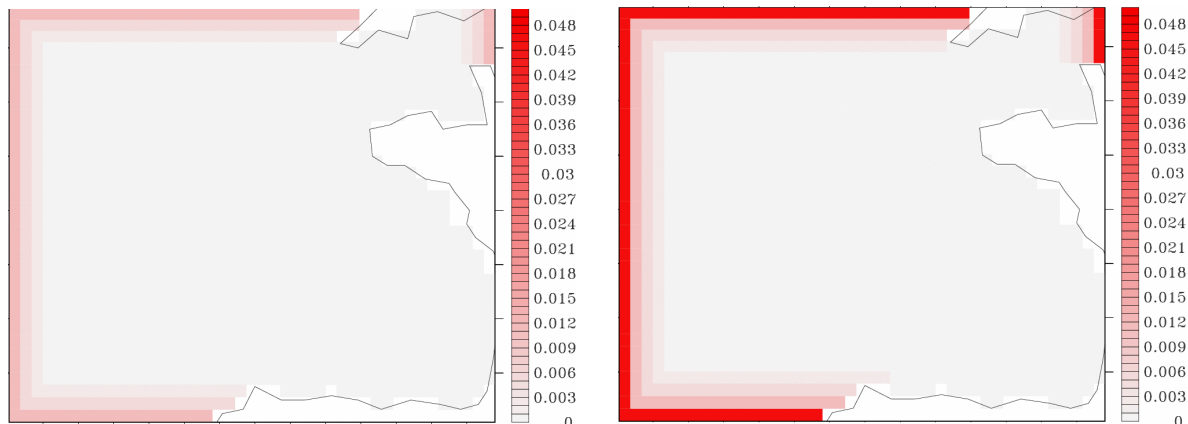
Bathymétrie de **BB3**



Bathymétrie de **BB15**

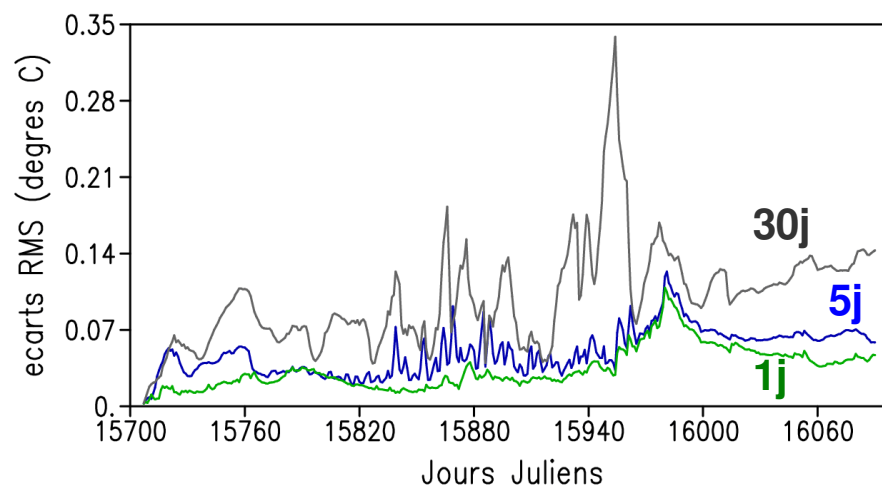
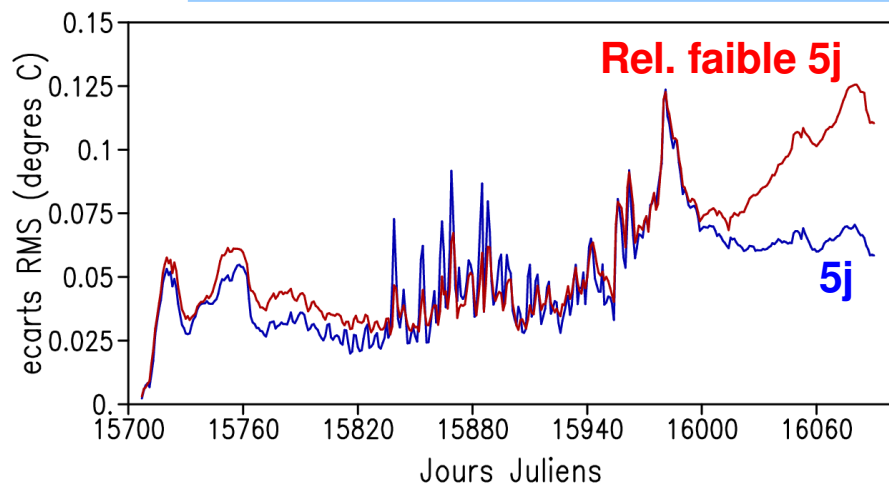
Le modèle du Golfe de Gascogne : Développement de l'emboîtement de modèles

Tests de validation des CFO



- Test de l'intensité de relaxation
- Test de la fréquence de lecture des données de NA3 : 1j, 5j, 30j et donnée fixes

Couches de relaxation pour BB3



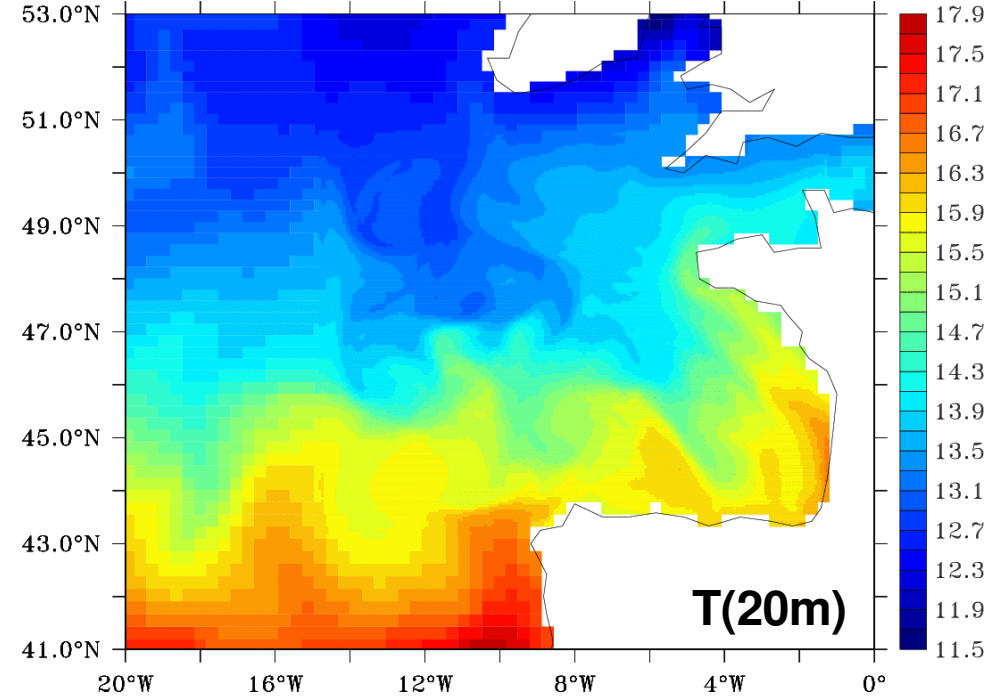
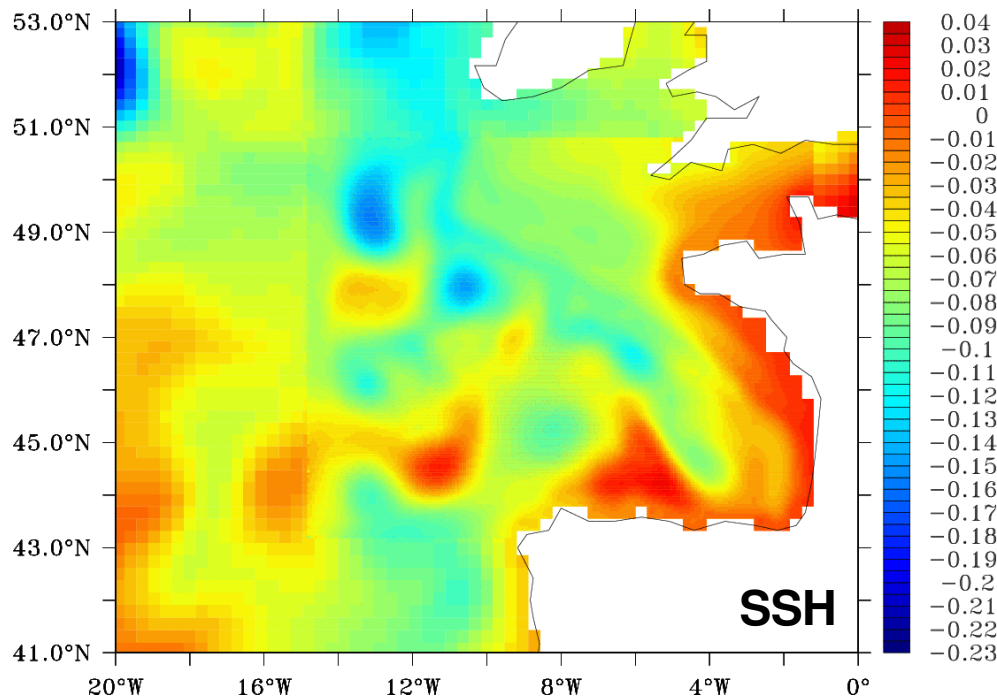
Ecarts en SST entre NA3 et BB3 sur 380j de simulation

L'impact de l'imperfection des CFO est faible → validation des CFO. L'erreur est essentiellement contenue en couche de relaxation pendant ~ 1 an. Rôle prépondérant de la CI et des forçages atmosphériques ?

Simulations sur NA3-BB15

22 ans (1979-2000) de données atmosphériques ECMWF (fréq 6h/ res 1°)

- **SIM-NA3** : Cl climatologie / 10 ans de spin-up / 22 ans de simulation en forçages interannuels
- **SIM-BB15** : Cl interpolée sur SIM-NA3 au 01/01/1993 / 2 ans de simulation en forçages interannuels



Sortie de SIM-NA3/SIM-BB15 : moyenne d'août

Développement d'une dynamique régionale

Le modèle du Golfe de Gascogne : **Développement de l'emboîtement de modèles**

Le modèle HYCOM du Golfe de Gascogne : Synthèse

- Caractère particulier de HYCOM (problème de la manipulation de l'état modèle)
- Forte influence des phénomènes/forçages atmosphériques
- Faible impact des CFO
- Imperfection des forçages aux limites → source d'erreur de modélisation

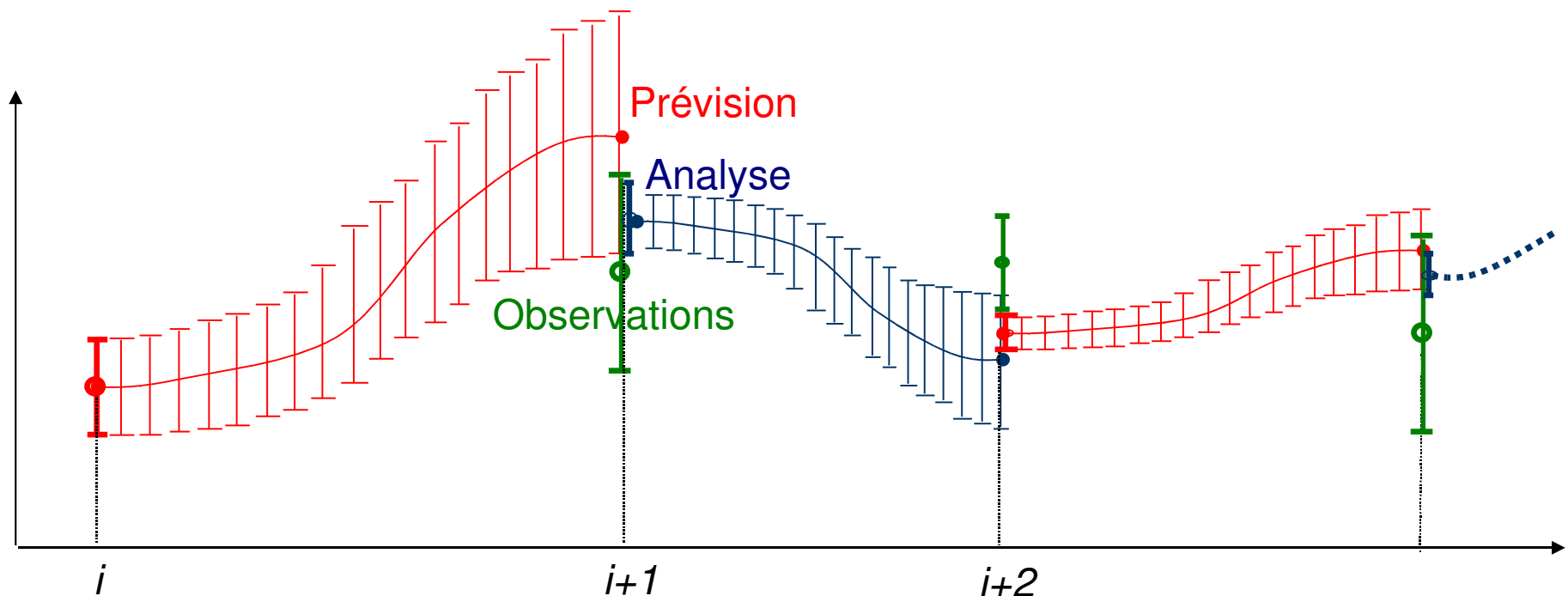
II. Le filtre de Kalman et le SEEK appliqués aux modèles d'océans

- **Principe général**
- **Le filtre SEEK dans HYCOM**
- **Méthodes d'ensemble pour l'estimation de l'erreur modèle**

Le filtre de Kalman

- Erreur sur la CI + erreur de modélisation → erreur de prévision que propage le modèle.
- Nécessité de considérer les erreurs de façon statistique.

Le filtre de Kalman : alternance de phases de **prévision** et d'**analyse** = **estimation** «linéaire» minimisant la variance sur l'erreur de la nouvelle CI à l'aide des observations passées



Equations du filtre de Kalman Etendu

Théorie du filtre de Kalman :

- le modèle est linéaire
- les erreurs sont gaussiennes, de moyenne nulle; indépendance entre erreur d'observation, erreur sur la CI et erreur modèle

Pour les modèles non linéaires : **Filtre de Kalman Etendu**

Etape de prévision

$$\mathbf{x}_{i+1}^f = m(\mathbf{x}_i^a)$$
$$\mathbf{P}_{i+1}^f = \mathbf{M}\mathbf{P}_i^a \mathbf{M}^T + \mathbf{Q}$$

Etape d'analyse

$$\mathbf{K}_{i+1} = \mathbf{P}_{i+1}^f \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_{i+1}^f \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$
$$\mathbf{x}_{i+1}^a = \mathbf{x}_{i+1}^f + \mathbf{K}_{i+1} (\mathbf{y}_{i+1} - h(\mathbf{x}_{i+1}^f))$$
$$\mathbf{P}_{i+1}^a = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{i+1} \mathbf{H}) \mathbf{P}_{i+1}^f$$

Erreur sur la CI \mathbf{P}_0 , erreur modèle \mathbf{Q} et erreur d'observation \mathbf{R} :

- supposées connues
- déterminent entièrement l'erreur de prévision \mathbf{P}^f et le calcul du gain optimal \mathbf{K}

→ Rôle fondamental de l'erreur modèle \mathbf{Q}

Schémas simplifiés – Le filtre SEEK

Modèles d'océans : $\dim(\mathbf{x}) \sim 10^6 - 10^7$

→ nécessité de schémas simplifiés comme **le filtre SEEK (Pham et al., 1998)**

- **Réduction ou élargissement de l'espace d'estimation** : ex suppression de (u,v)
- **Réduction de l'espace d'erreur** : ex $\mathbf{P} = \mathbf{S}\mathbf{S}^T$ (SEEK), $r \sim 10 - 100$
- **Simplification de l'étape de prévision** : ex $\mathbf{P} = \mathbf{B}$ (SEEK stationnaire) ou $\mathbf{P} = \mathbf{Q}$

Prescriptions usuelles de l'erreur modèle \mathbf{Q} ou de l'erreur stationnaire \mathbf{B} :

- Méthode analytique (OI) : covariances liées aux distances
- Facteur d'oubli (SEEK non stationnaire) : $\mathbf{Q} = \frac{1-\rho}{\rho} \mathbf{M} \mathbf{P}^a \mathbf{M}^T$ soit $\mathbf{P}^f = \frac{1}{\rho} \mathbf{M} \mathbf{P}^a \mathbf{M}^T$
- Variabilité du modèle (SEEK stationnaire)

Emploi usuel du filtre SEEK en modèle de bassin (Ballabrera-Poy et al., 2001; Penduff et al. 2002; Testut et al 2003) :

- SEEK stationnaire (initialisé avec la variabilité du modèle)
- Option locale : annulation des covariances entre variables éloignées horizontalement

→ Absence d'une description réaliste de l'erreur modèle à travers \mathbf{Q}

Le filtre SEEK dans les modèles MICOM/HYCOM

(Brasseur et al, 1999; Brankart et al. 2003; Birol et al. 2004)

Espace d'estimation : (T, S, p', SSH) en coordonnée isopycnale/hybride

→ Possibilité du passage en coordonnée z et de l'élargissement à $[(u_b, v_b), (u', v'), T, S, p', SSH]$

Sous-espaces d'estimation : découplage de (T, S) , (p') , (SSH)

Opérateurs d'ajustement (liés aux contraintes modèles) :

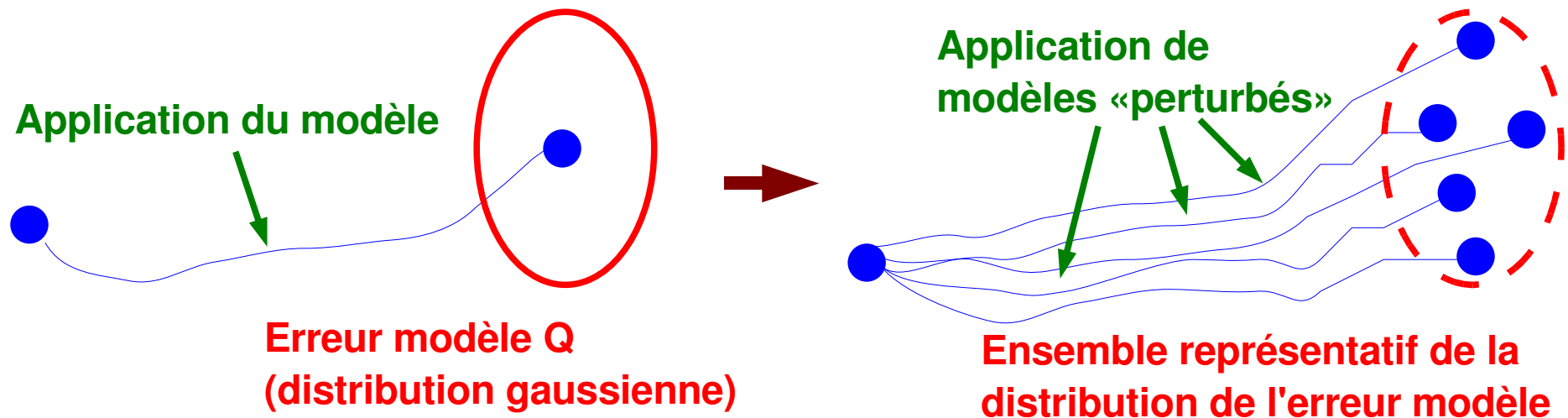
- Correction de (T, S) pour un respect des limitations physiques (ex $T < 32^\circ\text{C}$) et de la **stabilité hydrostatique** du modèle
- Correction de (p') pour le respect des épaisseurs de couches minimales et la cohérence entre (T, S, p', p_b) et la **SSH**

→ Accentuation du manque de confiance donnée à la paramétrisation de Q et limitation du rôle de l'analyse

Méthodes d'ensemble pour l'estimation de l'erreur modèle

Méthode d'ensemble : traduction du caractère statistique des erreurs en ensemble d'estimations (réduction de l'espace d'erreur $r \sim 100-500$)

Application au calcul de l'erreur modèle : intégration suivant un ensemble de modèles perturbés (nécessité de connaître les sources d'incertitude)



Les statistiques de l'erreur modèle sont estimées sur l'ensemble des états obtenus en fin de prévision :

- réalisme de l'estimation
- prise en compte du caractère non gaussien de la distribution des erreurs introduites

Le filtre de Kalman et le SEEK appliqués aux modèles d'océans : Synthèse

- Importante adaptation des schémas théoriques aux modèles d'océans
- Problème de l'estimation des paramétrisations d'erreur (modèle en particulier)
- En modèle régional, les méthodes d'ensemble permettent une formulation adaptée de l'erreur modèle

III. Estimation et caractérisation de l'erreur modèle liée aux forçages aux limites

- **Expériences d'ensemble**
- **Etude de l'erreur liée aux forçages
atmosphériques**
- **Etude de l'erreur liée aux Conditions
aux Frontières Ouvertes**

Génération des ensembles

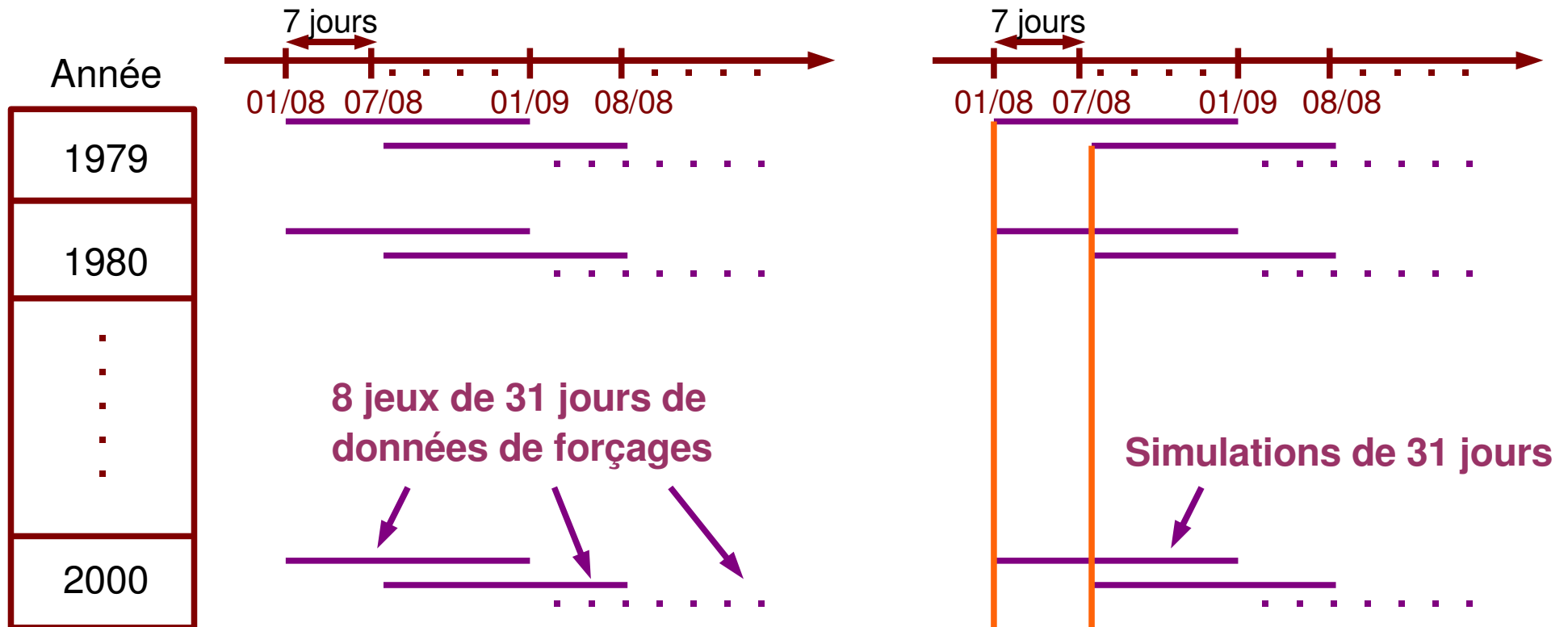
2 expériences d'ensemble pour l'estimation de l'erreur modèle liée :

i) aux forçages atmosphériques ii) aux CFO

Ensemble de données de forçages réalistes représentatives de la distribution de probabilité de l'erreur sur ces données sur la période Août Octobre

→ **ensemble de simulations** représentatives de l'erreur modèle sur Août Octobre

22 ans de données de forçages



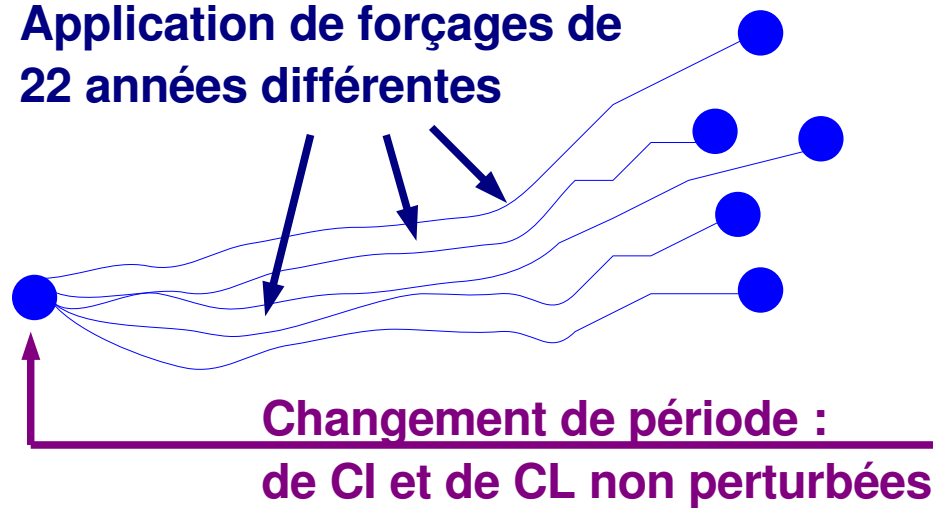
Les «perturbations» sont estimées a posteriori

CI issues de SIM-BB15 en 1994

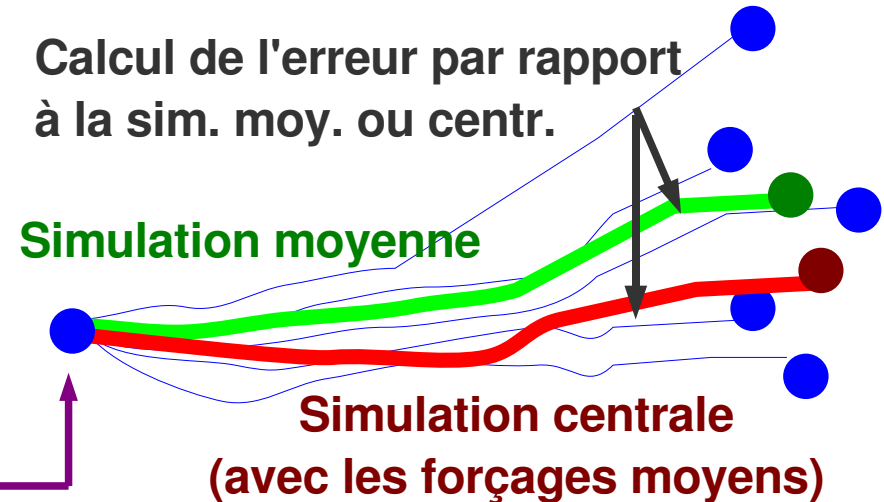
Simulations moyennes, centrales, et calcul des erreurs

2 sous-ensembles de simulations

Application de forçages de 22 années différentes



Calcul de l'erreur par rapport à la sim. moy. ou centr.

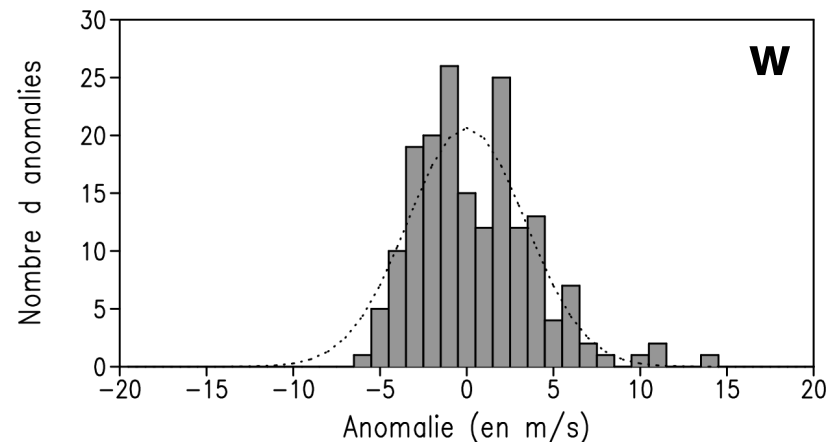
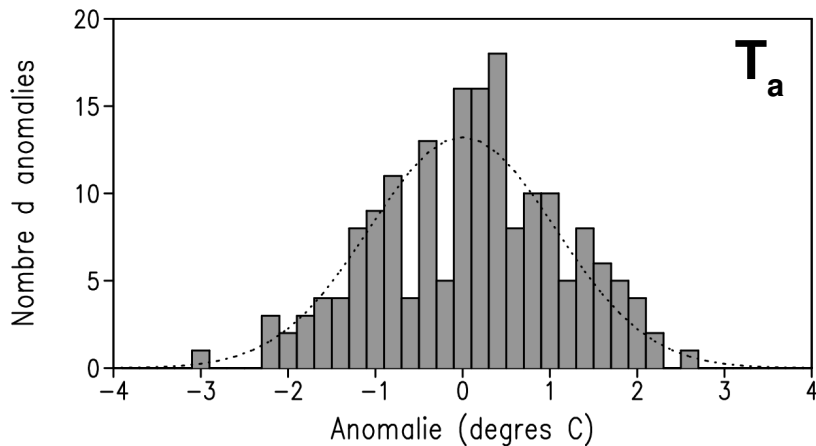


- Les simulations de référence permettent le calcul des erreurs liées à la perturbation des forçages en soustrayant l'influence de la variation de la CI et des CL non perturbées

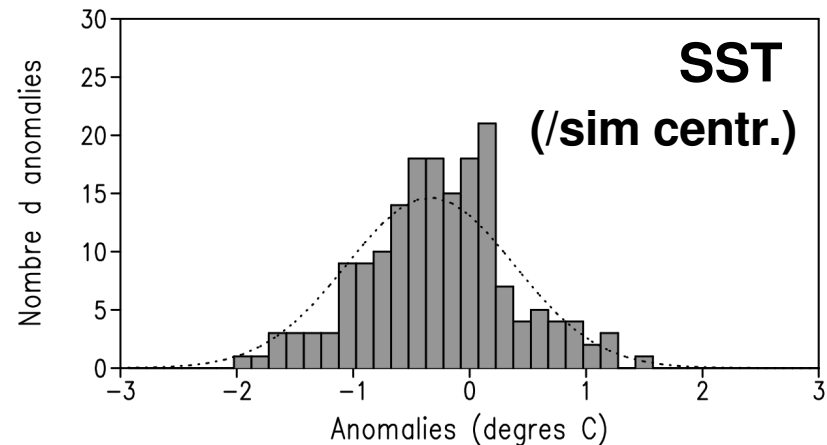
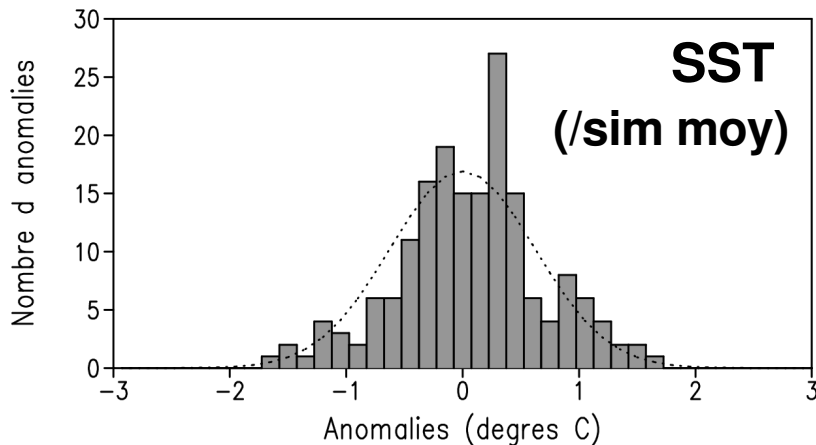
Choix de la simulation de référence pour les calculs des erreurs :
→ **préférence de la simulation centrale**

- Calcul des covariances d'erreur en fonction de la taille d'ensemble et de la durée des simulations (correspondance avec le cycle d'assimilation de données)

Aspect des distributions d'erreurs



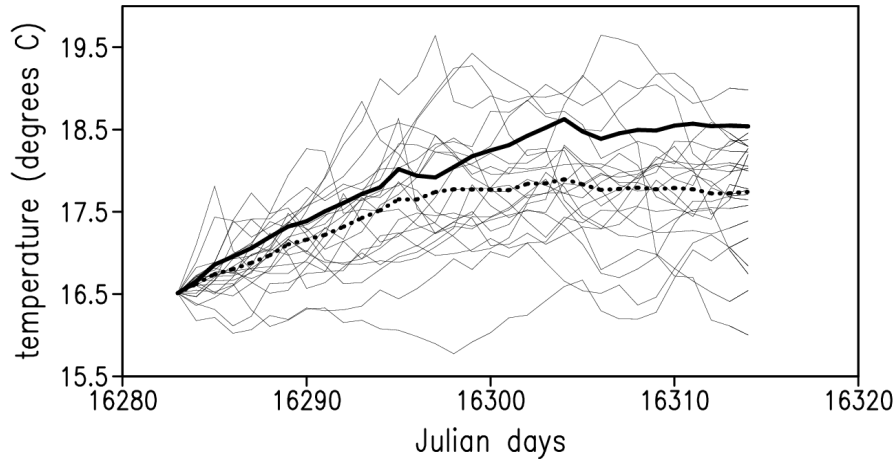
176 anomalies sur les paramètres atmosphériques à 16j en ($11.7^\circ\text{O}, 45.4^\circ$)



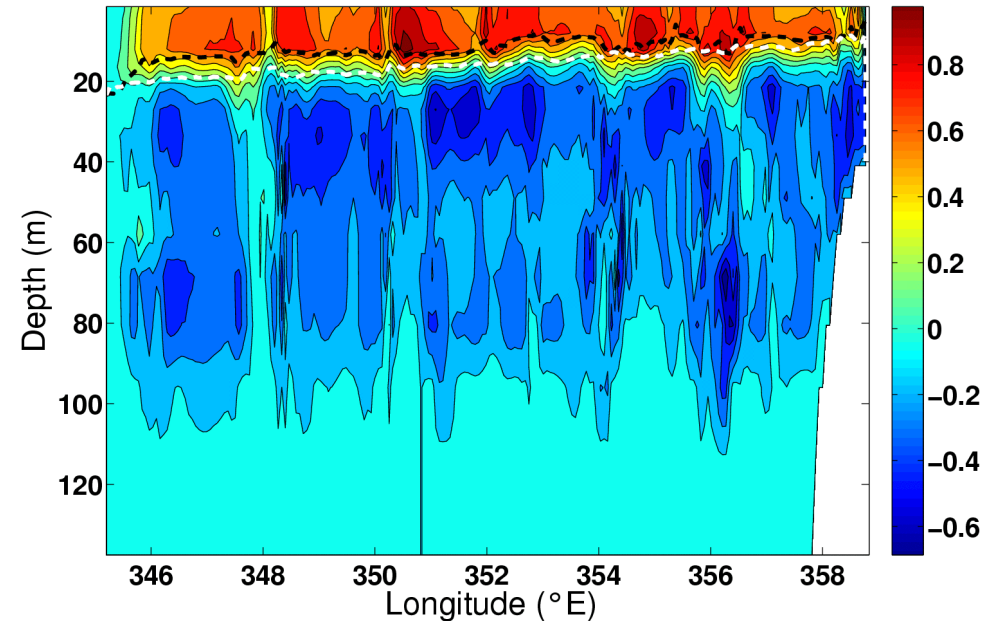
176 anomalies de SST à 10j en ($11.7^\circ\text{O}, 45.4^\circ$)

Distributions échantillonnant bien des distributions gaussiennes sauf là où les contraintes sont trop fortes. Sensibilité au choix de simulation de référence.

Q_{atm} - Divergences entre les simulations moyennes et centrales



Dispersion en SST($11.7^{\circ}O, 45.4^{\circ}N$) dans le 1er sous-ensemble



$T(\text{sim centr.}) - T(\text{sim moy})$ dans le 1er sous ensemble après 30j

Origine : Estimation d'une faible tension de vent pour la simulation centrale
→ **Problème du réalisme de l'estimation de paramètres ou de variables moyennes ou perturbées**

Similarité des divergences : le choix de la simulation de référence est sans conséquence sur les calculs de covariances d'erreur

Représenteurs

(Bennett, 1992; Echevin et al. 2000)

Outil pour l'étude de l'impact des paramétrisations des matrices de covariances d'erreur dans un filtre de Kalman

Etape d'analyse : $K = P^f H^T [H P^f H^T + R]^{-1}$ $x^a = x^f + K [y - H x^f]$

Si y scalaire (1 obs) : $x^a = x^f + \lambda r$ λ est réel $r = (P^f H^T) / (H P^f H^T)$

Schéma tel que $P^f = Q$:

$$r = (Q H^T) / (H Q H^T)$$

- Si $R = 0$ et $y - H x^f = 1$ $x^a = x^f + r$

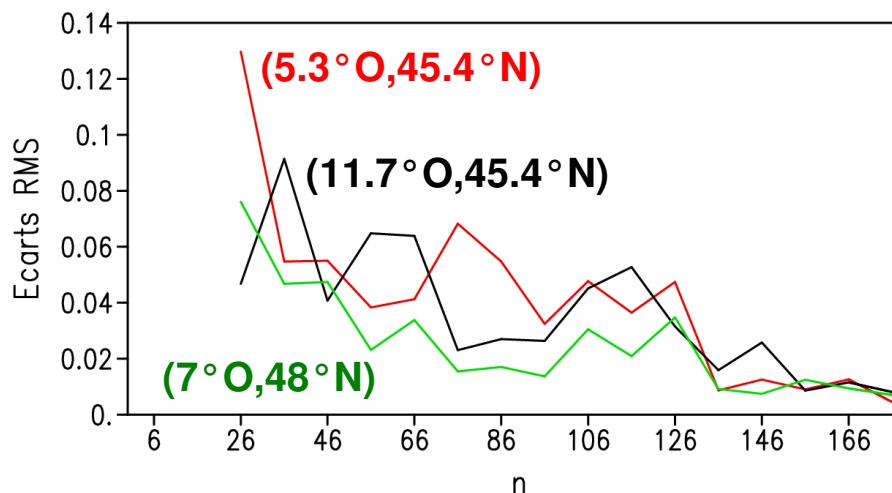
- Cas général : la correction est une combinaison linéaire des représenteurs associés aux observations assimilées

On peut anticiper le comportement d'un filtre de Kalman de rang réduit paramétré avec l'erreur modèle que l'on a estimée, et caractériser la structure de celle-ci

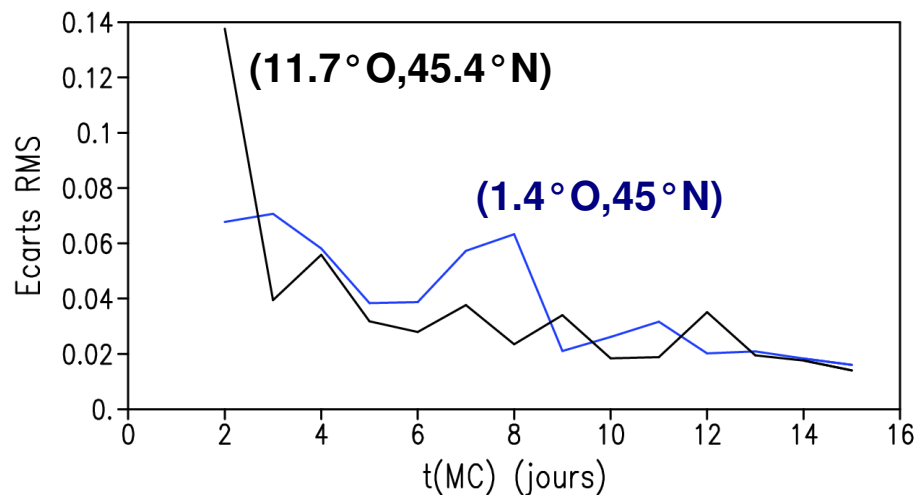
Convergence des calculs de covariance

Estimée à travers la convergence des calculs de représentants

Ecart RMS sur SST entre repr. d'obs. de SST calculés avec n et $n-10$ éléments

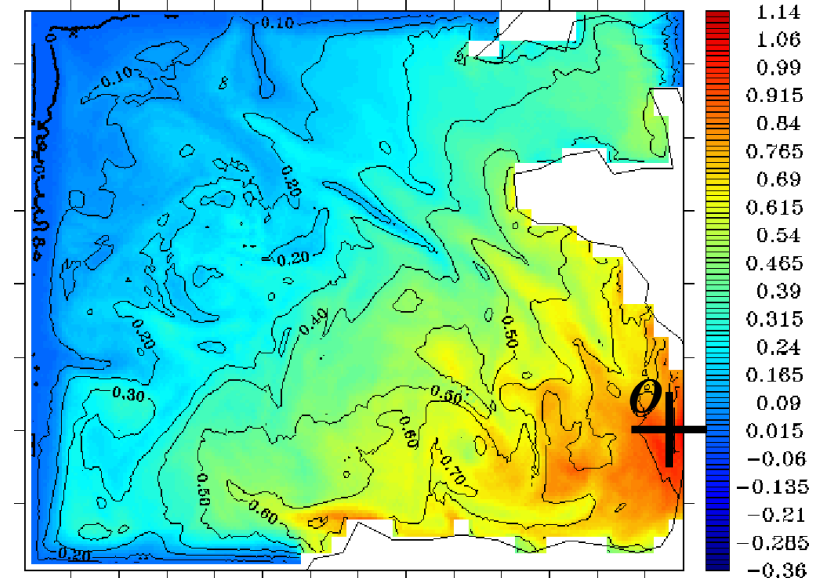
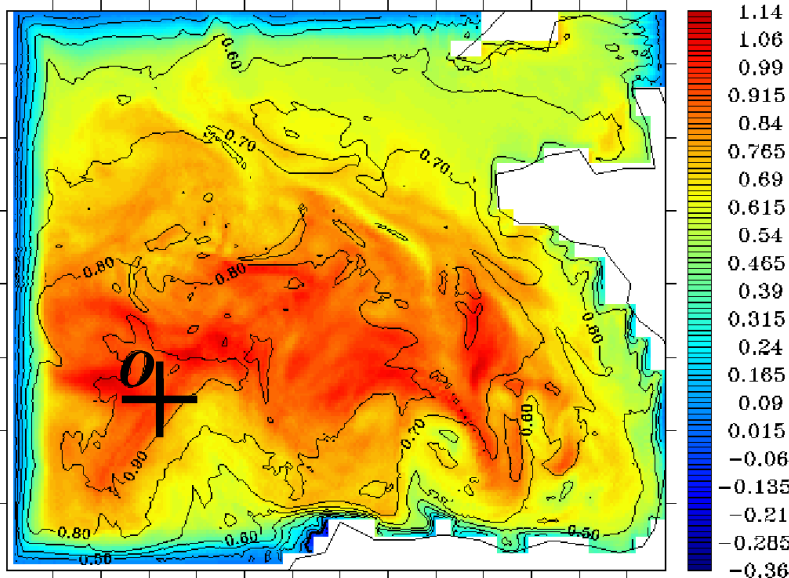


Ecart RMS sur SST entre repr. d'obs de SST pour les cycles d'assimilation t_{MC} et $t_{MC}-1$

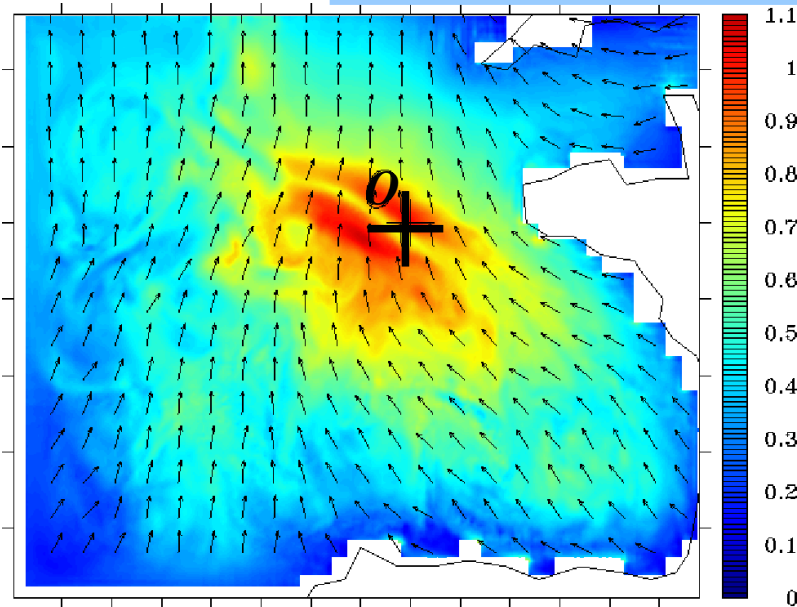


- Convergence constatée avec la taille des ensembles
- Pour des cycles d'assimilation $>10j$, l'erreur évolue peu en fonction de ceux-ci

Représentateurs en couche de mélange



SST des repr. de SST en O et corrélations associées

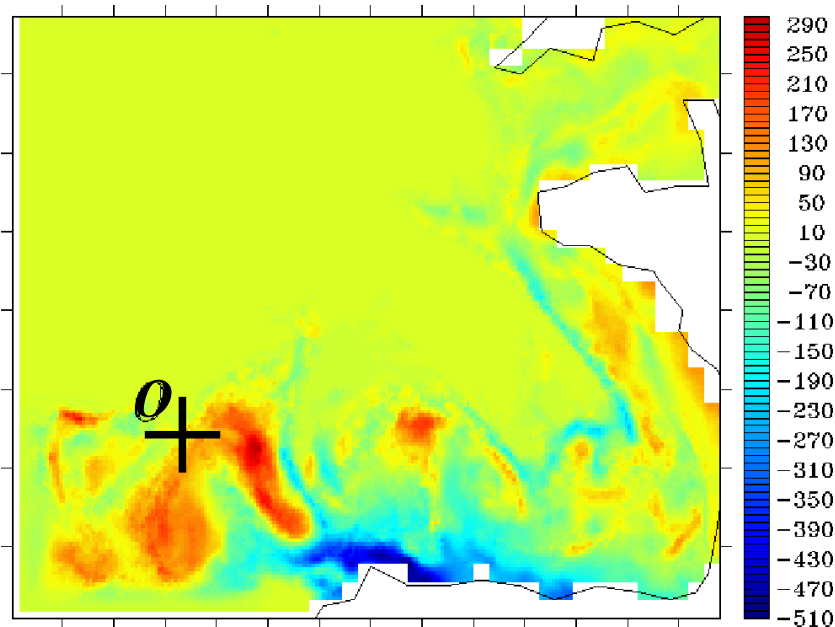


(u_t, v_t) sur le repr. de v_t en O

- Large extension de l'influence des observations à l'échelle de la région
- Dépendance de cette extension à la localisation et à la nature des observations
- **Caractères anisotropes et inhomogènes de la dynamique côtière**

Etude de l'erreur modèle : Erreur liée aux forçages atmosphériques

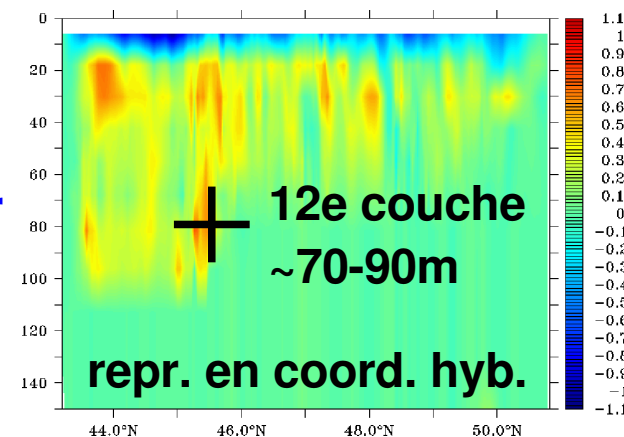
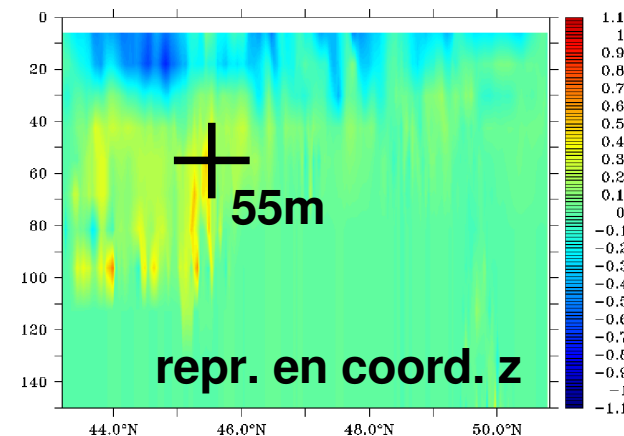
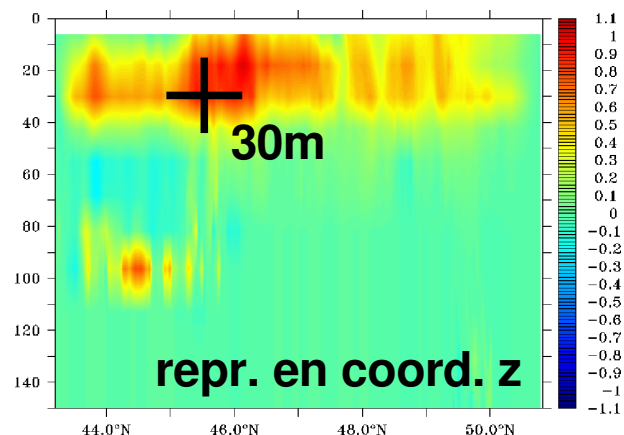
Structure des représenteurs en profondeur



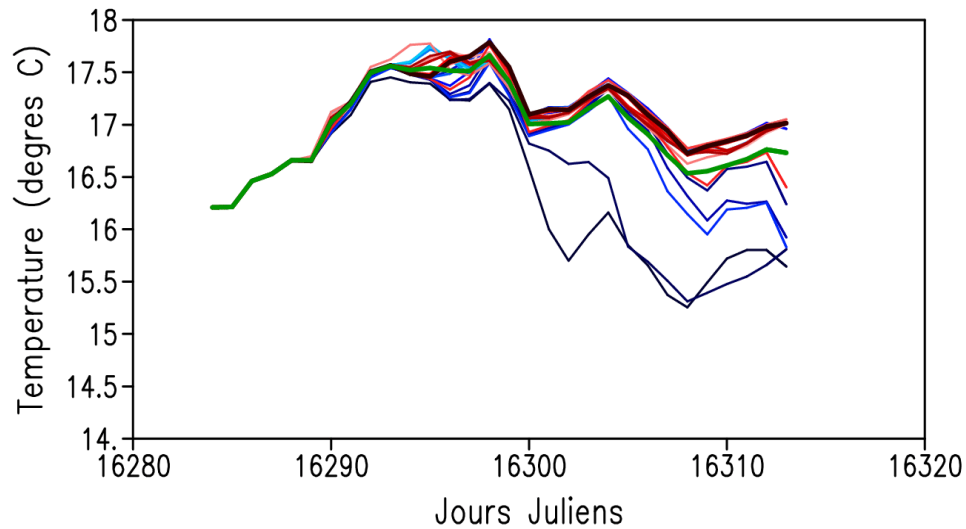
Section
(11.7°O) de T
de repr. de T
en profondeur.

Epaisseur de la 11e couche (~100m)
du repr. de SSH en O calculé en
coordonnée hybride

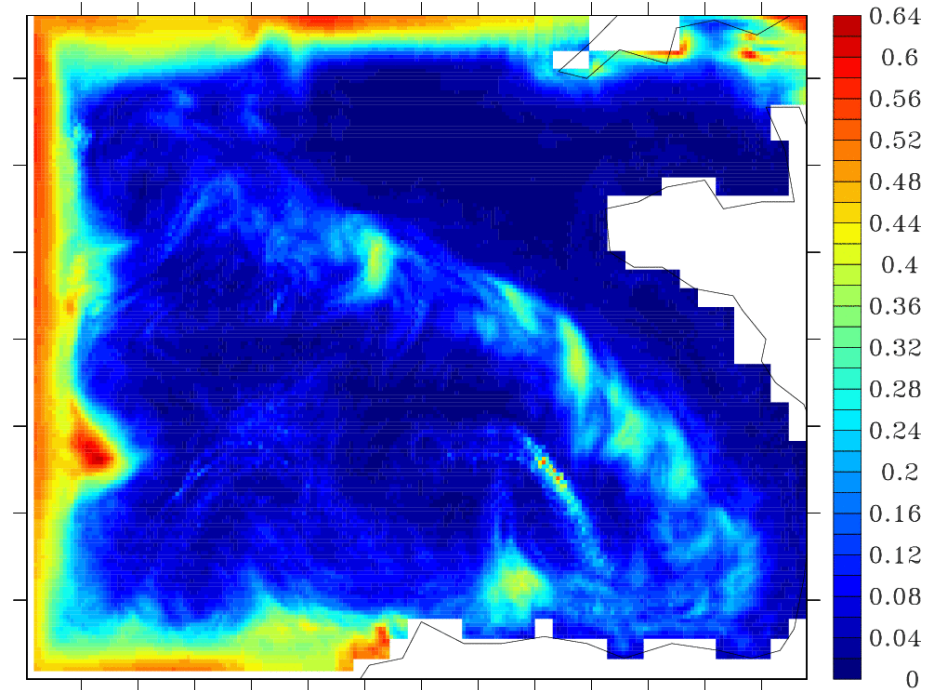
- En profondeur, influence locale, et inexistante sous les 120m
- Les observations en profondeur ne semblent pas apporter plus d'information
- Influence de la coordonne verticale de l'espace d'estimation : avantage de la coordonnée hybride



Q_{CFO} - Faible dispersion de l'ensemble des simulations



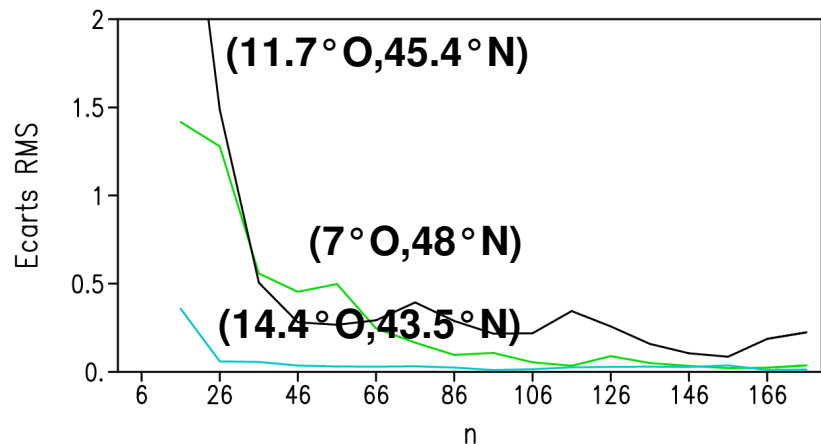
Dispersion en SST(14.5°O,43.4°N)
dans le 1er sous-ensemble



Ecart-type sur les anomalies de T
en 5e couche hybride à 15j

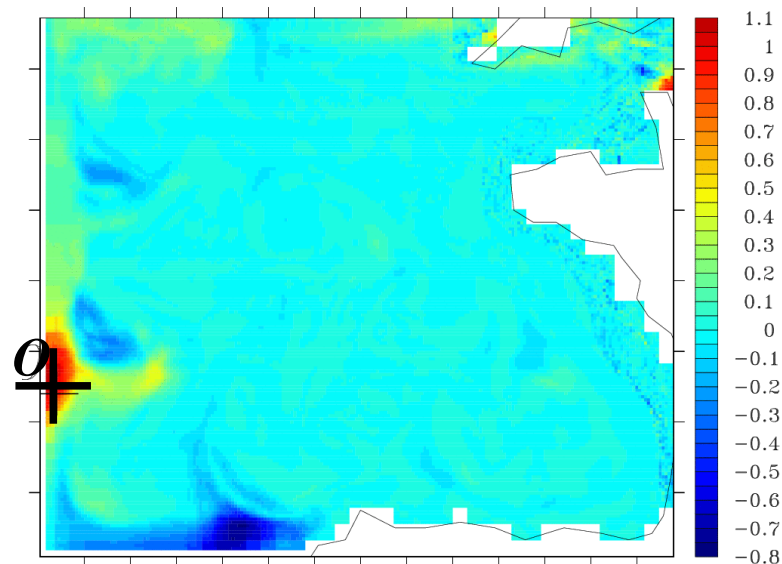
La dispersion générée par la perturbation des données de CFO ne pénètre pas des couches de relaxation vers l'intérieur du domaine

Calculs de représenteurs

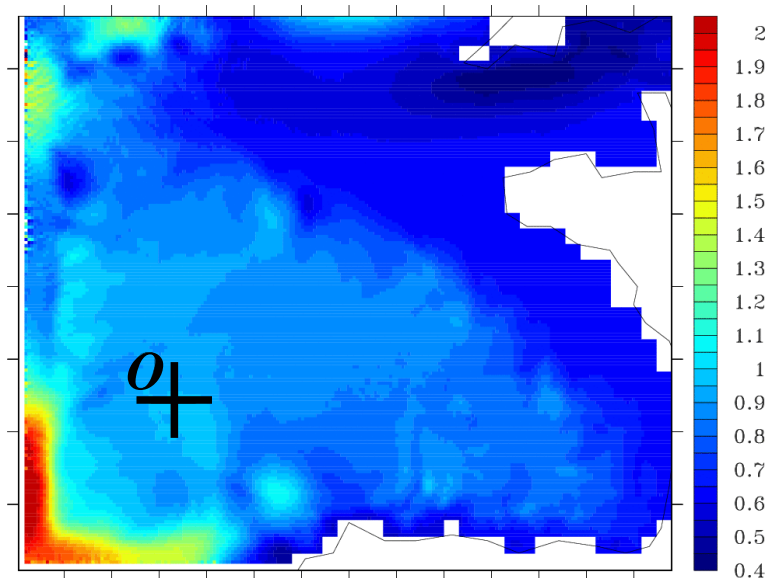


Ecart RMS sur la SST entre repr. associés à des obs. de SST calculés avec n et $n-10$ éléments.

- Faiblesse de la robustesse des calculs
- Problème de cohérence physique de la structure des représenteurs
- L'erreur liée aux CFO ne semble pas majeure pour le modèle



13e couche: T du repr. de T en O



SSH du repr. de SSH en O

Estimation et caractérisation de l'erreur modèle liée aux forçages aux limites : Synthèse

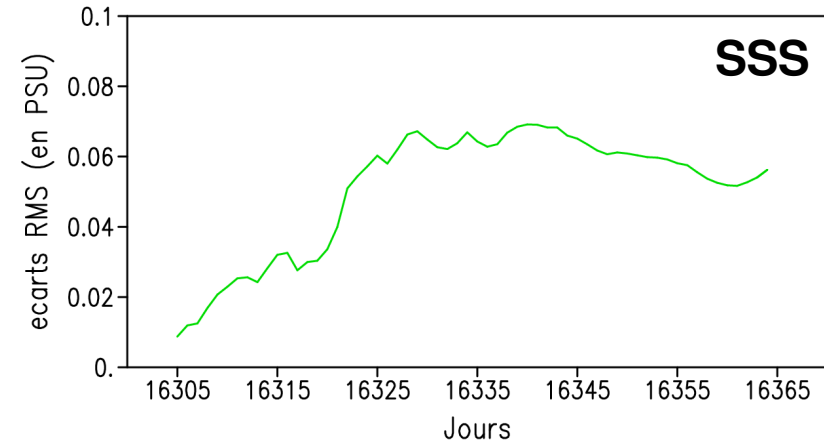
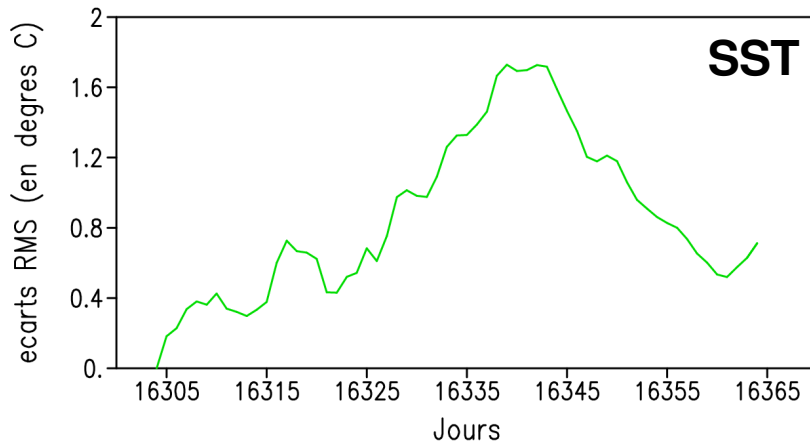
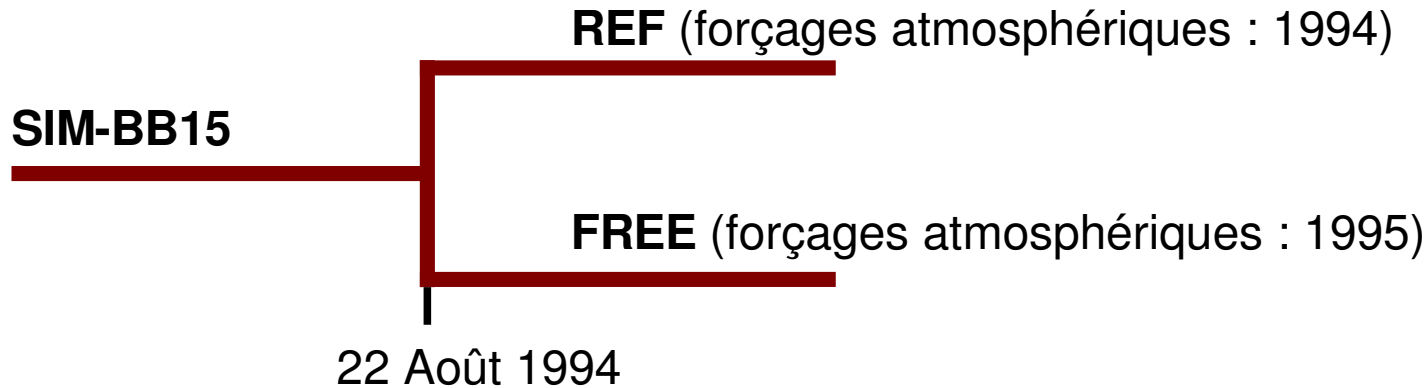
- Avantages de la méthode d'ensemble
 - **génération d'erreurs gaussiennes** avec des forçages «réalistes»
 - mise en évidence d'une **réponse non linéaire** du modèle
 - **complexité des erreurs estimées**
- Possibilité d'interpréter les structures des représentés à travers certains mécanismes de la dynamique côtière ↔ **réalisme de l'erreur**
- Les **données de surface** permettent un important **contrôle de l'erreur liée aux forçages atmosphériques**
- **Faible impact de l'erreur sur les CFO**

IV. Application du SEEK pour l'assimilation de SST dans le modèle du Golfe de Gascogne

- **Principe des expériences jumelles**
- **Résultats liés à l'emploi de l'erreur modèle liée aux forçages atmosphériques**
- **Comparaison avec les résultats donnés par une paramétrisation classique**

Simulation «réelle» et simulation libre

2 simulations du 4e sous-ensemble des expériences pour l'estimation de l'erreur modèle liée aux forçages atmosphériques, allongées à 60j : **l'état « réel »**, et la **simulation modèle** supposée reproduire cet état réel.



Écarts RMS sur les variables de surface entre FREE et REF

Simulations avec assimilation de données

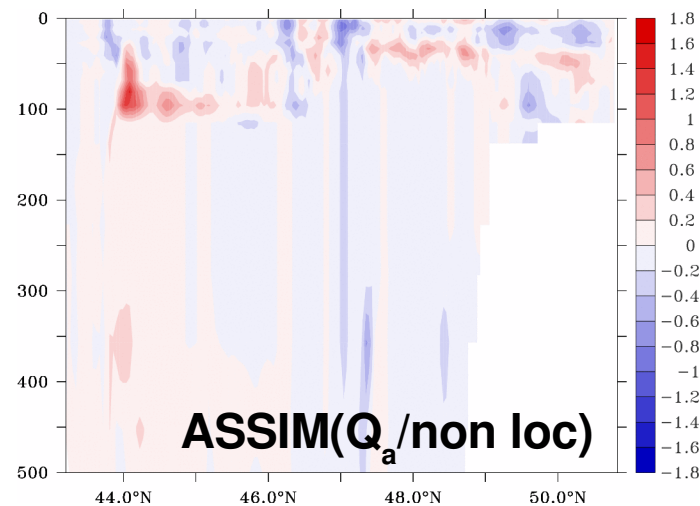
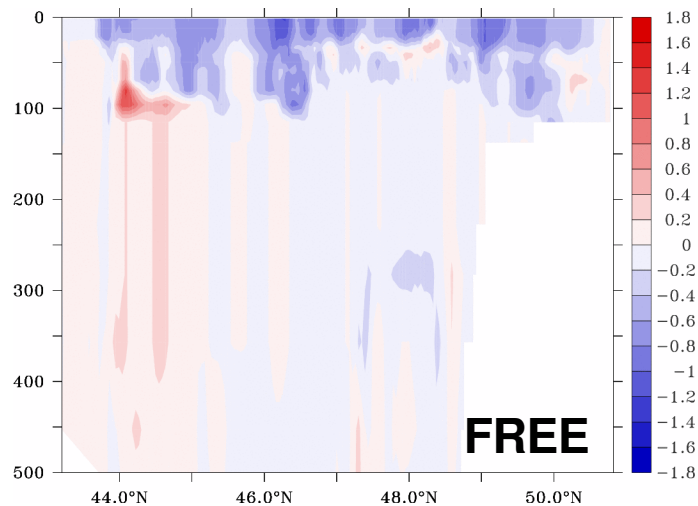
- Toute la SST de REF est observée :
- Assimilation de cette SST sur les simulations ASSIM utilisant le même modèle que FREE.

Tests de différentes paramétrisations du filtre SEEK stationnaire pour réaliser l'assimilation de données :

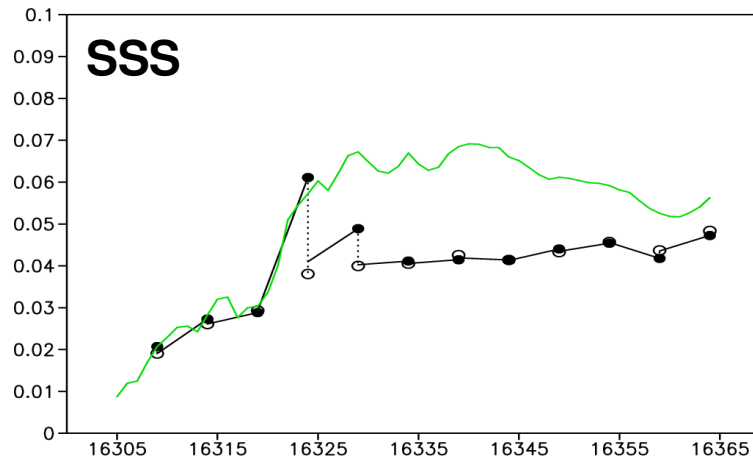
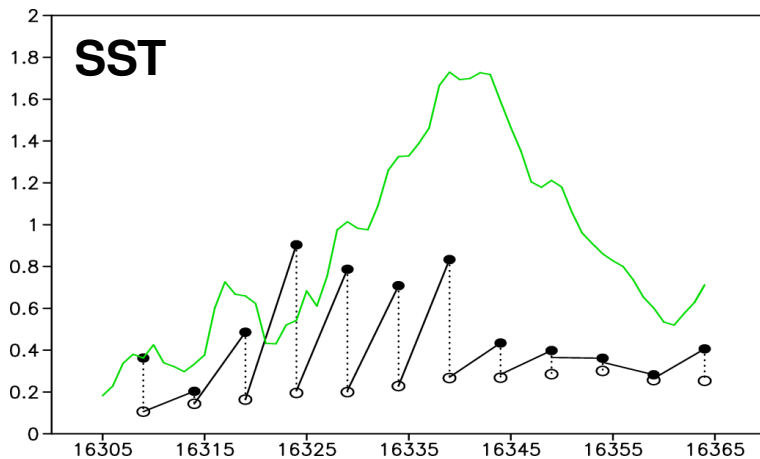
- **Réglages constants** : cycle d'assimilation de 5j / espace d'estimation composé de $(\mathbf{T}, \mathbf{S}, \mathbf{p}')$ / emploi des opérateurs d'ajustement classiques.
- **Paramétrisation de B** : \mathbf{Q}_a matrice d'erreur modèle liée aux forçages atmosphériques (39 EOFs) ou \mathbf{P}_v liée à la variabilité temporelle de FREE sur les 60j de simulations (59 EOFs)
- **Option locale** : séparation des sous-espace d'estimation (\mathbf{T}, \mathbf{S}) et \mathbf{p}' et option de localité horizontale ou non.

Paramétrisation classique du filtre SEEK dans HYCOM : avec $\mathbf{B}=\mathbf{P}_v$ et l'option locale

Cohérence des corrections avec Q_a



Section ($10^\circ O$) d'écart à REF après 60j en T



Ecart RMS sur SST/S entre REF et ASSIM avec Q_a / option non locale

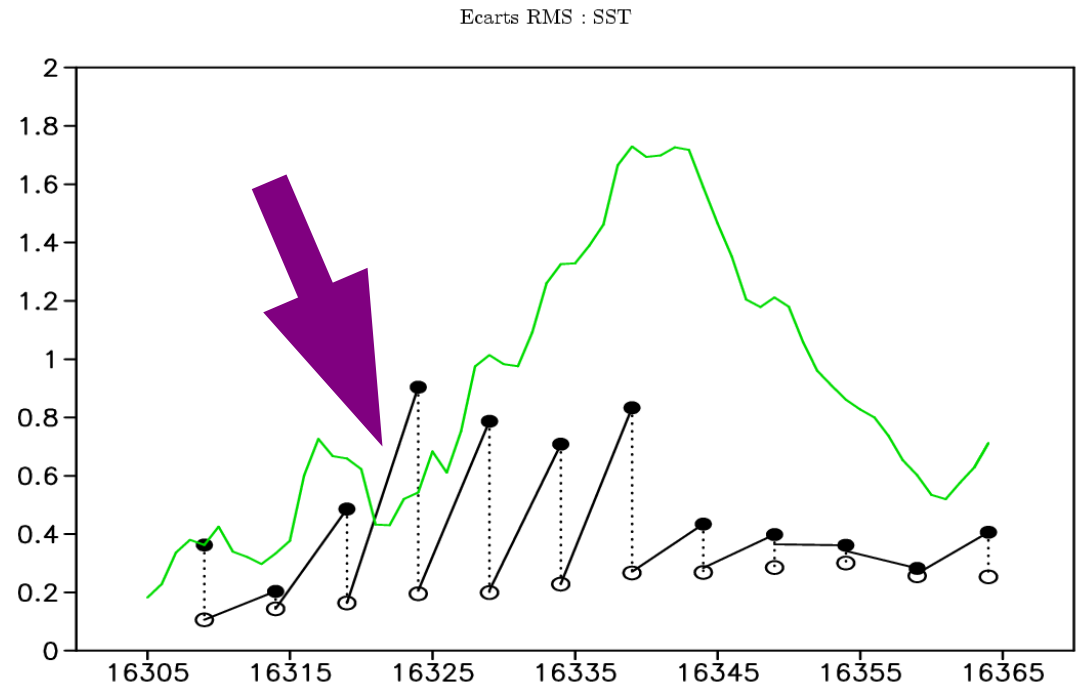
- La correction est positive et importante, même sur les variables non observées.

- Résultats meilleurs en option non locale que locale : la correction des p' est cohérente.

Application du filtre SEEK : **Emploi de l'erreur liée aux forçages atmosphériques**

Importance de la croissance de l'erreur en phase de prévision

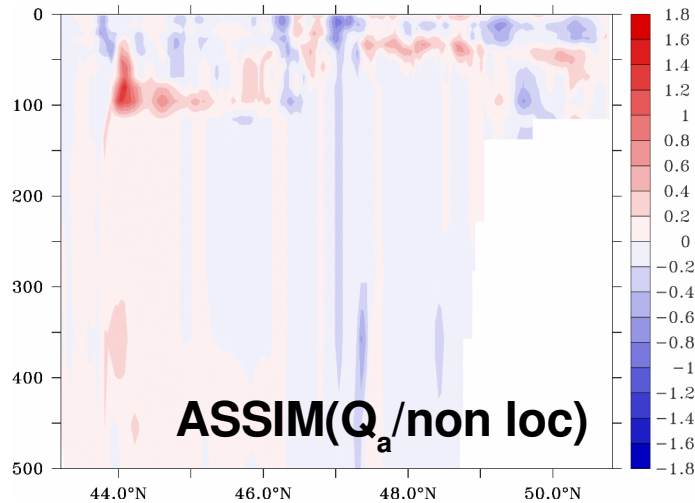
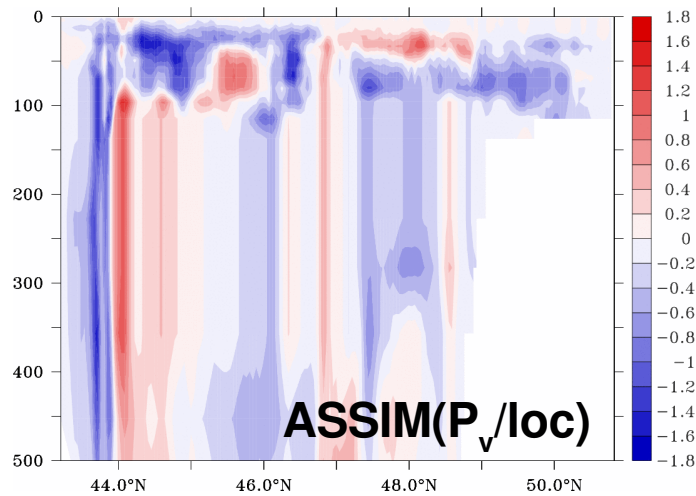
Ecart RMS en SST entre REF et ASSIM avec Q_a / option non locale



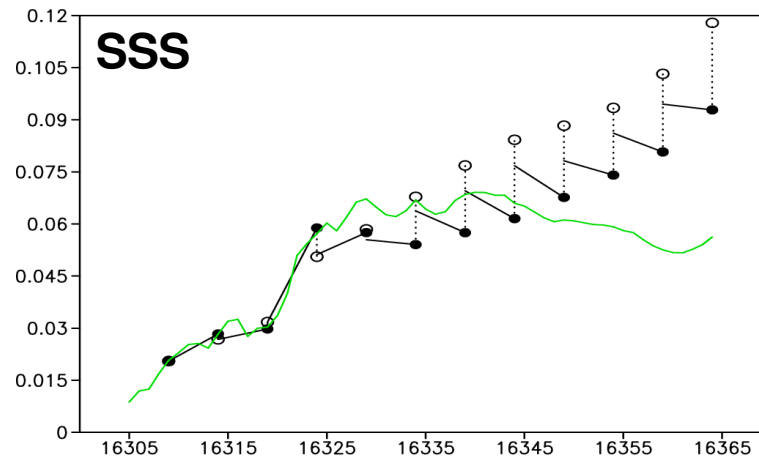
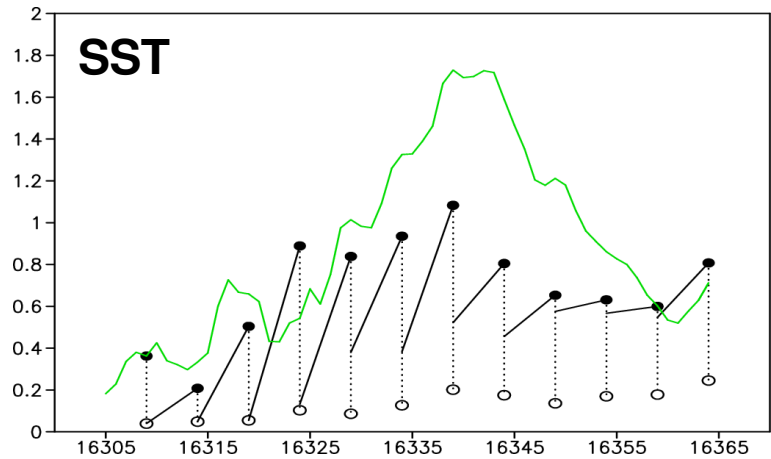
Forte croissance de l'erreur après analyse :
→ nécessité de corriger explicitement les forçages atmosphériques

Application du filtre SEEK : Emploi de l'erreur liée aux forçages atmosphériques

Impact de la paramétrisation de l'erreur



Section ($10^\circ O$) d'écarts à REF après 60j en T



Ecarts RMS en SST/S entre REF et ASSIM avec P_v / option locale

- Seule la correction en SST est correcte en utilisant P_v .

- La localité ne joue plus de rôle.

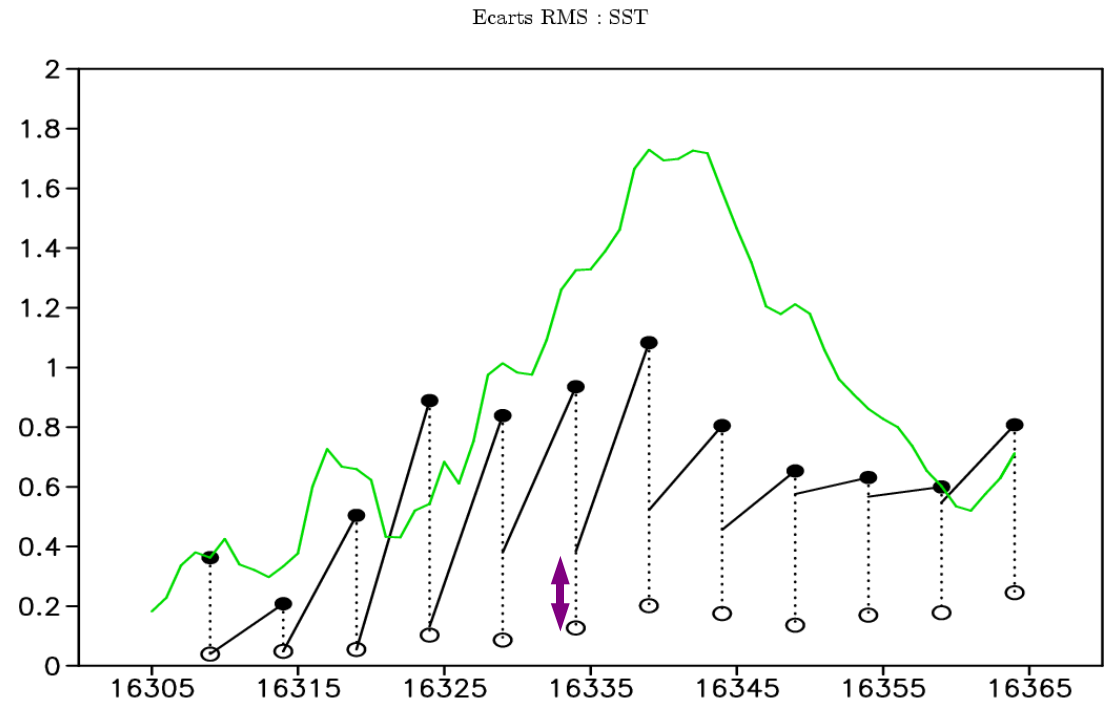
- L'état général est dégradé par rapport à FREE-BB15 : de l'erreur est générée en profondeur.

→ L'impact du paramétrage de B est mis en évidence

Application du filtre SEEK : Comparaison avec l'emploi de la paramétrisation classique

Influence des opérateurs d'ajustement

Écarts RMS en SST entre REF et ASSIM avec P_v / option locale



Correction importante réalisée par les opérateurs d'ajustement avec P_v : forte détérioration des écarts en sortie d'analyse
→ La qualité des corrections réalisées avec Q_a est également appréciable par leur respect de la physique du modèle

Application du filtre SEEK : Comparaison avec l'emploi de la paramétrisation classique

Application du SEEK pour l'assimilation de données dans le modèle du Golfe de Gascogne : Synthèse

- Confirmation du rôle majeur de la paramétrisation de l'erreur modèle
- Validation de la nouvelle paramétrisation du filtre SEEK au niveau de l'analyse et du recul du rôle de l'opération d'ajustement
- Problème de la correction des paramètres atmosphériques

Conclusion

- **Synthèse des travaux réalisés**
- **Résultats**
- **Principaux enseignements de l'étude**
- **Perspective**

Synthèse des travaux réalisés

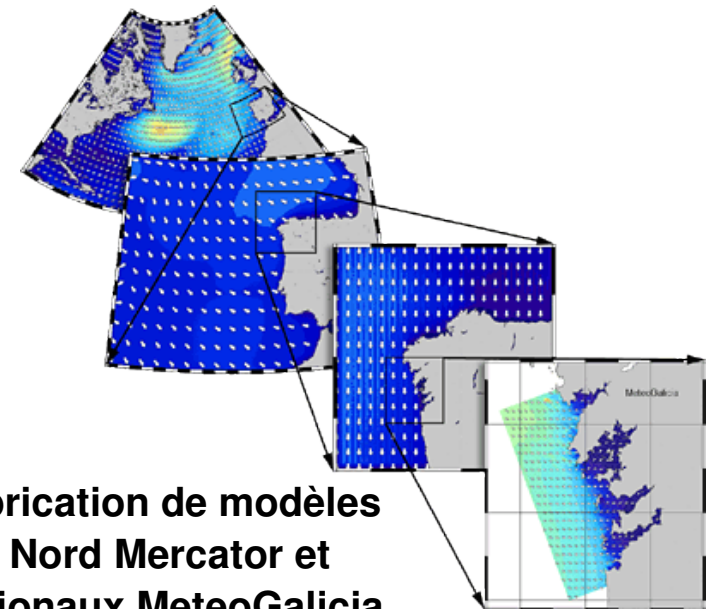
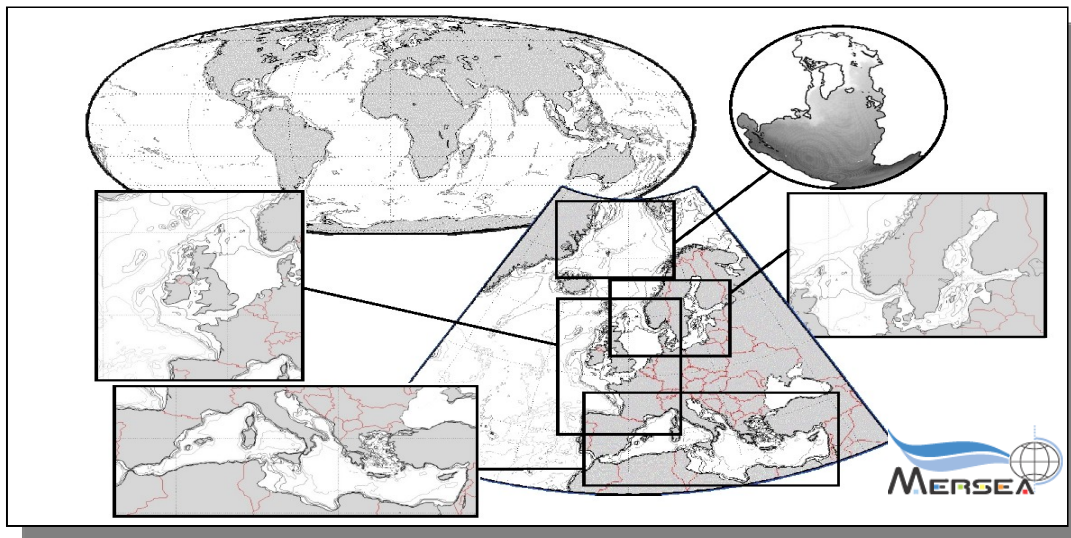
- **Mise en place du modèle emboîté du Golfe de Gascogne** (avec évaluation des CFO)
- **Développement de méthodes d'ensemble** pour l'estimation d'erreur modèle avec utilisation de paramètres réalistes (par «sous-ensembles»)
- **Estimation et étude d'erreurs modèles liées aux forçages aux limites** de la configuration régionale, à travers une systématisation de l'usage des **représentateurs**
- **Mise en place d'expériences d'assimilation de SST** avec une nouvelle paramétrisation du filtre SEEK

Résultats

- **Caractérisations de la complexité de l'erreur modèle estimée en zone côtière**
- **Importante contrôlabilité de l'erreur liée aux forçages atmosphériques à l'aide des observations de surface**
- **Influence faible des erreurs sur les CFO**
- **Progrès apportés à l'adaptation du filtre SEEK pour son application en modèle régional en zone côtière**

Principaux enseignements de l'étude

- Enseignements méthodologiques :
 - **Rôle clé de la paramétrisation de l'erreur modèle**, et de son réalisme physique
 - **Utilité des méthodes d'ensemble**, même à coût élevé, en zone côtière pour l'estimation des erreurs
 - Stratégie des systèmes opérationnels : compatibilité CFO/Etats initiaux
- l'approche de prescription de CFO ne semble pas suffisante



Imbrication de modèles
Atl. Nord Mercator et
régionaux MeteoGalicia

Perspectives

- Retour au problème de l'**erreur sur la condition initiale**, même en modèle emboîté
- Autres sources d'**erreur modèle**
- **Expériences d'assimilation dans un cadre réaliste**
- Mise en place de l'**assimilation de données pour l'ensemble de l'emboîtement de modèles**

MERCI !

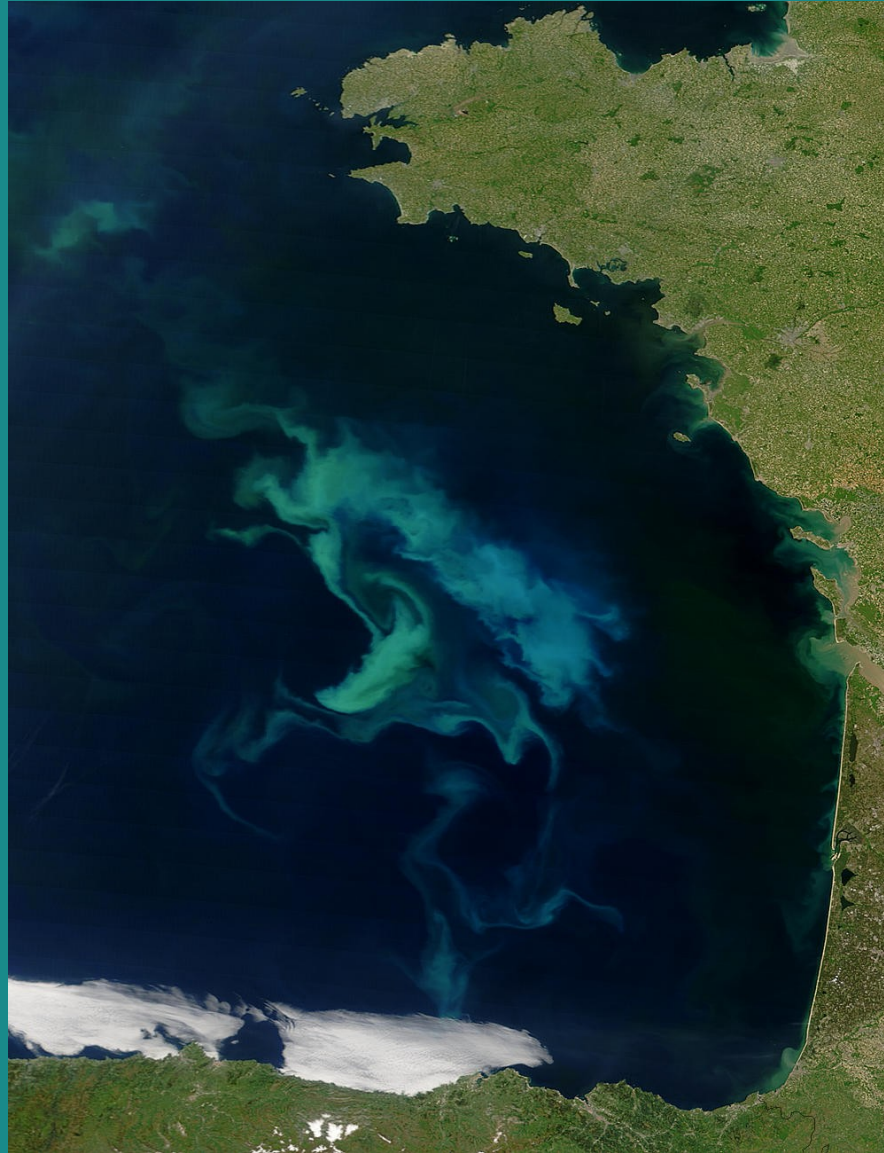


Image satellite Aqua (NASA)