



# Projet Seine-Aval 6 **ARES**

« Analyse de Rejeux hydro-sédimentaires en  
Estuaire de Seine »

Novembre 2020

Coordination : Florent Grasso

Co-Auteurs : Eliott Bismuth, Romaric Verney

## TABLE DES MATIERES

<b>RESUME EXECUTIF</b>	<b>3</b>
<b>SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET</b>	<b>4</b>
<b>PARTICIPANTS AU SUIVI DE PROJET</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
<b>DESCRIPTION DU MODELE ET DES REJEUX HYDRO-SEDIMENTAIRE</b>	<b>6</b>
1 Le modèle « CurviSeine »	6
2 Les rejeux hydro-sédimentaires	7
3 Bathymétrie	8
<b>FREQUENCE DE MISE-A-JOUR DE LA BATHYMETRIE</b>	<b>10</b>
<b>COMPARAISON AVEC LES DONNEES DU RESEAU PHRESQUES</b>	<b>16</b>
1 Température	17
2 Salinité	18
3 Sédiments en suspension	20
4 Conclusions	23
<b>CONDITIONS HYDROLOGIQUES DECENNALES ET ANNUELLES DE L'ESTUAIRE</b>	<b>24</b>
<b>CONCLUSION</b>	<b>29</b>
<b>LISTE DES ILLUSTRATIONS</b>	<b>30</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>34</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>35</b>

Annexe 1. Figures d'anomalies annuelles de température, salinité et concentration en sédiments en suspension (moyenne, percentile 5 et percentile 95) par rapport aux climatologies décennales, pour les périodes 1990-2000 et 2005-2015.

## RESUME EXECUTIF

En se basant sur les travaux des programmes de recherche Seine-Aval précédents, et plus particulièrement le modèle numérique hydro-sédimentaire MARS3D « CurviSeine » (HYMOSED-SA5), le projet ARES (« Analyse de Rejeux hydro-sédimentaires en Estuaire de Seine ») du programme de recherche Seine-Aval 6 avait pour objectifs de :

- Produire un référentiel de données validées de la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire pour deux périodes de 11 ans,
- Mettre en place une stratégie d'actualisation annuelle de ce référentiel.

Ces deux objectifs principaux font l'objet de deux rapports distincts et complémentaires. Le rapport « *technique* » (« SA6-ARES - Rapport technique : actualisation du rejeu hydro-sédimentaire ») détaille les principales étapes nécessaires à l'actualisation annuelle du rejeu hydro-sédimentaire ARES. Le présent document décrit :

- le modèle ainsi que les paramètres de modélisation (forçages, grille bathymétrique, etc...) utilisés,
- la comparaison des sorties hydrologiques (température, salinité, sédiments en suspension) du modèle avec les données du réseau PHRESQUES (bouée SCENES et stations aval SYNAPSES),
- une étude de sensibilité du modèle à la grille bathymétrique pour l'année 2014, simulée avec la grille bathymétrique de 2010 et celle de 2016, en période d'évolution morphologique douce de l'estuaire de Seine,
- des résultats préliminaires concernant l'historique des conditions hydrologiques de l'estuaire de Seine, aux échelles décennales et annuelles.

Le modèle représente globalement bien les conditions hydrologiques de l'estuaire de Seine. Les variations saisonnières de température sont très bien captées, malgré une légère surestimation systématique, de l'ordre de 1°C. Les cycles vive-eau/morte-eau (VE/ME) sont aussi bien représentés pour la salinité et la concentration de sédiments en suspension (SSC). La salinité tend à être surestimée dans l'estuaire, en particulier dans le panache d'eau douce à l'embouchure. Pour la SSC, les quantités sont relativement bien reproduites par le modèle en amont, particulièrement en période de crue. En aval, le modèle semble surestimer l'effet des vagues sur la remise en suspension locale des sédiments, et donc les valeurs de concentrations.

Concernant la grille bathymétrique, les évolutions morphologiques observées entre 2010 et 2016 induisent des modifications hydrodynamiques, hydrologiques et sur la dynamique des sédiments en suspension significatives dans la partie aval de l'estuaire de Seine. Il est donc recommandé, pour l'actualisation du rejeu « référence », de mettre à jour la bathymétrie tous les 3-5 ans.

Enfin, la comparaison des résultats du modèle sur les deux périodes de 11 ans (1990-2000 et 2005-2015) montre un réchauffement global de la colonne d'eau de 0,2°C, une stratification plus marquée suite à l'intrusion d'eau saline favorisée par l'approfondissement du chenal de navigation, et une turbidité légèrement plus importante entre 2005 et 2015 qu'entre 1990 et 2000. La variabilité interannuelle est aussi importante et très bien corrélée avec les conditions météorologiques (pluviométrie, tempêtes, vagues) annuelles.

Afin de mieux caractériser ces variabilités, l'analyse des résultats doit être approfondie à des échelles de temps plus courtes (cycles vives eaux/mortes eaux, crue/étiage, tempêtes ...), ce qui fait partie des perspectives d'utilisation des rejeux hydro-sédimentaires du projet ARES.

## SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET

• **Equipe 1** : DYNECO/DHYSED, Ifremer

Coordination scientifique : Florent Grasso

Autres chercheurs (ou équivalents) : Eliott Bismuth, Romaric Verney, Mathieu Caillaud.

## PARTICIPANTS AU SUIVI DE PROJET

*Personnes ayant contribué au suivi du projet ou ponctuellement à un atelier de travail.*

**A compléter par le GIPSA**

GIP Seine-Aval :

Acteurs de l'estuaire :

Scientifiques :



## INTRODUCTION

Le projet SA5-HYMOSED a permis la calibration de l'outil MARS3D pour la simulation morphostatique de la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Ce projet a mis en évidence les capacités de l'outil à décrire la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques hydrodynamiques, de salinité et des matières en suspension dans les conditions morphologiques actuelles. Cette modélisation prend en compte de manière détaillée la variabilité des facteurs hydrodynamiques, hydrométéorologiques et anthropiques qui influencent la dynamique hydro-sédimentaire de l'échelle tidale à l'échelle annuelle. Le modèle MARS3D « CurviSeine » a démontré ses capacités à simuler la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire pour des situations contrastées d'un point de vue morphologique et hydro-météorologique.

Dans ce contexte, les objectifs du projet ARES sont :

- 1) produire un référentiel de données validées de la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire de Seine et,
- 2) mettre en place une stratégie d'actualisation annuelle de ce référentiel.

Le présent rapport est dédié à l'objectif 1), tandis que l'objectif 2) est traité dans un 2<sup>e</sup> rapport, intitulé « SA6-ARES - Rapport technique : actualisation du rejeu hydro-sédimentaire ».

Pour répondre à l'objectif 1), la modélisation des conditions hydro-sédimentaires de l'estuaire est effectuée sur deux périodes distinctes de 11 ans, en tenant compte des principales évolutions morphologiques, des travaux d'aménagement et des conditions hydro-météorologiques de chaque année. Les périodes de simulation sont : 1990-2000 (bathymétrie de référence 1995) et 2005-2015 (bathymétrie de référence de 2010). Ces deux périodes de simulation constituent le rejeu appelé « historique ». Pour une question de disponibilité des forçages hydro-météorologiques, une troisième période de 10 ans est simulée, 2009-2018 (bathymétrie de référence 2010 pour 2009-2014, et 2016 pour 2014-2018), qui constitue le rejeu dit « référence », qui sera actualisé annuellement. Les descriptions du modèle et des rejeux « historique » et « référence » sont présentées dans la première partie du rapport. De plus, l'année 2014, simulée avec les bathymétries 2010 et 2016, permet de mettre en évidence la modification des résultats de simulations avec une bathymétrie fixe dans la deuxième partie.

La qualité et la validité de ces résultats sont évaluées par comparaison aux données d'observation du réseau PHRESQUES, comprenant la bouée SCENES, et les trois stations aval du réseau SYNAPSES (Balise A, Fatouville et Tancarville). La totalité de la période de disponibilité de ces données est utilisée pour la validation des sorties du modèle, de 2015 à 2018, ce qui permet une bonne représentativité de la variabilité interannuelle des conditions hydro-météorologiques de l'estuaire. La validation du modèle est présentée dans la troisième partie.

Enfin, la comparaison des deux périodes de simulation du rejeu « historique » permet de voir l'évolution des conditions hydrologiques (température, salinité, concentration de sédiments en suspension) aux échelles décennale (11 ans) et annuelle. Ces résultats préliminaires sont présentés en quatrième partie et en annexe.

## DESCRIPTION DU MODELE ET DES REJEUX HYDRO-SEDIMENTAIRE

### 1 Le modèle « CurviSeine »

Le modèle « CurviSeine » (Figure 1), utilisé dans le cadre du projet ARES, est le même que celui utilisé pour les projets de modélisation des programmes Seine-Aval précédents (notamment SA5-HYMOSED), et est décrit en détail dans l'article de Grasso et al. (2018). Pour rappel, le modèle hydrodynamique MARS3D (Lazure et Dumas, 2008), en version curviligne non-orthogonale s'étendant du barrage de Poses jusqu'au large de la Baie de Seine, est couplé au modèle spectral de vagues WAVEWATCH III® (WW3) sur le même domaine. La modélisation des processus sédimentaires est assurée par le couplage de ce modèle hydrodynamique au modèle sédimentaire multi-couches, multi-classes (sable/vase) MUSTANG (Le Hir et al., 2011) morphostatique, prenant en compte les processus d'érosion, suspension, dépôt et consolidation (Grasso et al., 2015). Le dimensionnement des mailles (verticales et horizontales), les classes de sédiment, la prise en compte du dragage, etc. sont identiques à celles décrites dans le rapport SA5-HYMOSED – Volet « Modélisation ». La distribution initiale des sédiments est basée sur la distribution sédimentaire simulée après une année de *spinup* : à partir d'une distribution homogène des sédiments, le modèle simule une année hydrologique complète (débutant et terminant le 1<sup>er</sup> octobre) afin de produire une distribution sédimentaire réaliste, laquelle est utilisée comme condition initiale de la simulation définitive de l'année en question.

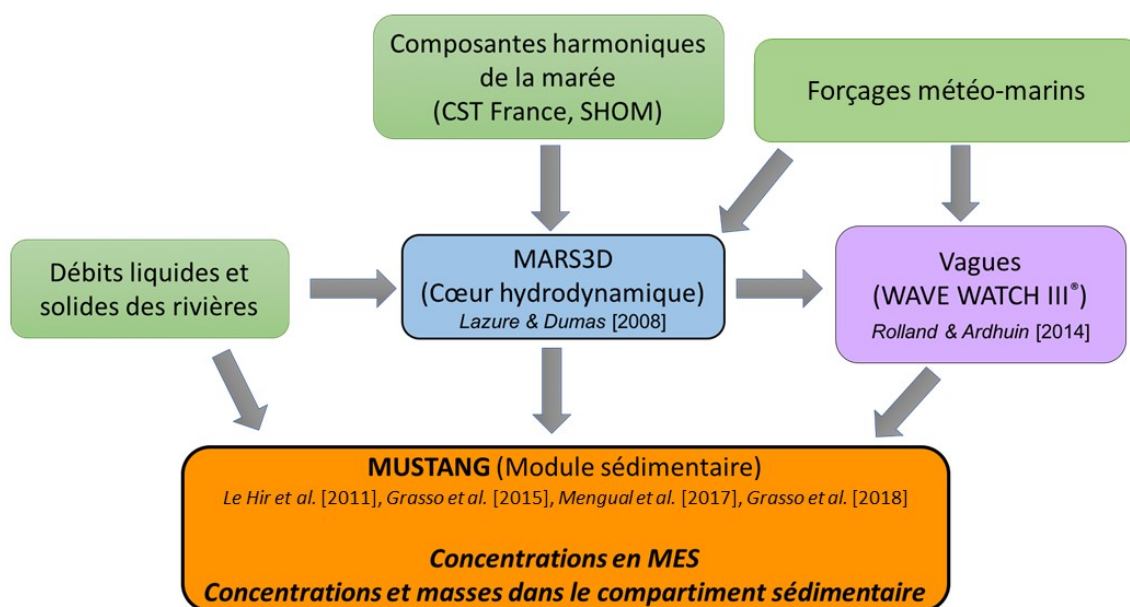


Figure 1. Schéma de fonctionnement du couplage MARS3D-Wavewatch3-MUSTANG.

La principale amélioration apportée au modèle « CurviSeine » est l'implémentation du calcul de la température dans la colonne d'eau. Dans cette optique, des conditions aux frontières réalistes sont appliquées à la frontière nord de la Baie de Seine (détails fournis ci-dessous), et en amont, les apports d'eau douce des sept affluents (la Risle, la Sainte-Gertrude, l'Austreberthe, le Cailly, l'Eure, l'Andelle et la Seine) se font à la température de la Seine au barrage de Poses, issue d'une chronique journalière. Sur le domaine de calcul, les échanges de chaleur atmosphère-eau sont calculés en prenant en compte les flux solaires, calculés selon la paramétrisation de Luyten et De Mulder (1992), et les flux thermiques selon la formule de Swinbank (Agoumi, 1982).

## 2 Les rejeux hydro-sédimentaires

La principale contrainte à la production de rejeux hydrodynamiques couvrant une période suffisamment longue, avec une bonne résolution spatiale et temporelle, et actualisable, est la disponibilité de forçages hydro-météorologiques répondant à ces critères. En effet, les modèles de ré-analyse atmosphériques et océaniques couvrant de longues périodes ont généralement une résolution spatiale et temporelle assez grossière, afin de limiter les temps de calcul, ou ne sont pas actualisés régulièrement. A l'inverse, si les modèles récents sont beaucoup plus précis, et actualisés, ils ne couvrent pas une période assez longue pour les besoins du projet ARES. La considération de cette contrainte a conduit à la production de deux rejeux hydro-sédimentaires distincts, différents par la résolution des forçages hydro-météorologiques dont ils sont issus (Tableau 1). Le premier rejeu, appelé « historique » par la suite, couvre les périodes 1990-2000 et 2005-2015 à partir de forçages de résolution spatiale et temporelle plus faible, alors que le rejeu « référence » couvre la période 2009-2018 à partir de forçages mieux résolus (Figure 2).

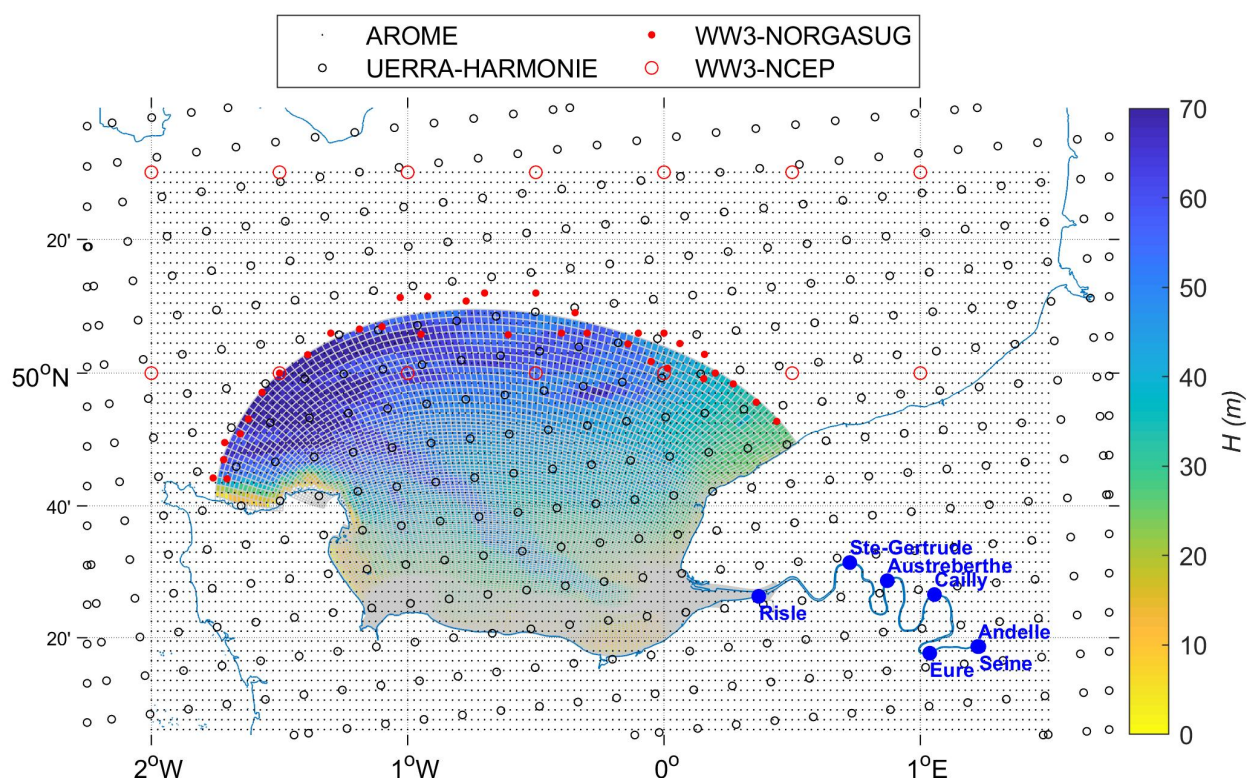


Figure 2. Grille bathymétrique du modèle, position des affluents, et emprise spatiale des forçages atmosphériques (noir) et des conditions aux frontières en terme de vagues (rouge), pour les rejeux « historique » et « référence ».

Concernant les forçages atmosphériques sur tout le domaine, les variables nécessaires aux calculs hydrodynamiques et thermodynamiques sont : la pression atmosphérique, la température de l'air, la vitesse et la direction du vent, l'humidité relative et la nébulosité. Pour le rejeu « historique », ces variables sont fournies par le système d'assimilation de données régional UERRA-HARMONIE, basé sur le modèle de ré-analyse global ERA5 implémenté par l'*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (Ridal *et al.*, 2018). Cette ré-analyse a une résolution spatiale de  $11 \times 11 \text{ km}^2$ , et une résolution temporelle de 6 heures. Pour le rejeu « référence », les variables atmosphériques proviennent du modèle régional horaire AROME de Météo-France, d'une résolution spatiale de  $1,3 \times 1,3 \text{ km}^2$ , disponible seulement à partir de décembre 2008.

Les forçages océaniques appliqués à la frontière nord du modèle sont la température et salinité, ainsi que les spectres de vagues provenant de l'Atlantique nord et de la Manche. Il n'y a pas de courants océaniques imposés à la frontière, la grille du modèle s'étendant suffisamment vers le large pour que les courants au niveau de la zone d'intérêt soient bien représentés, et les niveaux d'eau sont calculés par recombinaison harmonique de la base CST France (SHOM). La salinité imposée à la limite au large du rejeu « historique »

est constante (35,5 PSU), et correspond à la salinité moyenne au large de la Baie de Seine. La température provient d'une climatologie annuelle sur la colonne d'eau, issue d'une moyenne spatiale horaire des sorties du modèle MARS3D-MANGAE2500 ( $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$ , 40 niveaux) entre les années 2009 et 2018. Pour le rejeu « référence », les sorties de MARS3D-MANGAE2500 sont utilisées pour la température et la salinité à la frontière nord.

Concernant les spectres de vagues à la frontière, ils sont obtenus, dans le cas du rejeu « historique », par recombinaison spectrale à partir de séries temporelles de hauteur significative, période de pic et direction moyenne. Ces séries proviennent d'une simulation numérique rétrospective des climats de vagues de l'Océan Atlantique Nord du modèle WW3, forcée par des champs de vents de la ré-analyse atmosphérique NCEP-NCAR, notée WW3-NCEP (Bertin et al., 2013 ; Dodet et al., 2010). Ce forçage de vagues a une résolution spectrale de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  ( $\sim 55 \times 55 \text{ km}^2$ ) et temporelle de 6h. Pour le rejeu « référence », les spectres de vagues horaires sont issus du rejeu WW3 sur grille non-structurée NORGASUG (noté WW3-NORGASUG) sur la façade Golfe de Gascogne/Nord Atlantique (Boudiere et al., 2013). Les points de sorties de ces spectres au niveau de la frontière nord de la Baie de Seine sont distants au maximum d'une dizaine de kilomètres (Figure 2, points rouges).

**Tableau 1. Récapitulatif des forçages météo-marins pour chaque rejeu.**

	<b>Rejeu « historique »</b>	<b>Rejeu « référence »</b>
<b>Vagues</b>	WW3-NCEP $0,5^\circ \times 0,5^\circ \sim 55 \times 55 \text{ km}^2$ $dt = 6h$	WW3-NORGASUG $\sim 10\text{km}$ $dt = 1h$
<b>Température</b>	Climatologie annuelle $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$ $dt = 1h$	MARS3D-MANGAE2500 $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$ $dt = 1h$
<b>Salinité</b>	35,5 PSU	MARS3D-MANGAE2500 $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$ $dt = 1h$
<b>Forçages atmosphériques</b>	UERRA-HARMONIE $11 \times 11 \text{ km}^2$ $dt = 6h$	AROME $1,3 \times 1,3 \text{ km}^2$ $dt = 1h$

En amont, les forçages hydrologiques (débits liquides et solides, et température des affluents) sont les mêmes pour les deux rejeux, issus de la Banque Hydro et du modèle de flux solide développé par Landemaine et al. (2016) et fournis par le GIP Seine Aval.

### 3 Bathymétrie

Le modèle « CurviSeine » est opéré de manière morphostatique, c'est à dire qu'il n'y a pas de couplage morphodynamique. Cette hypothèse est valable lorsque les évolutions morphologiques (érosion/dépôt) sont relativement faibles et ne viennent pas perturber la circulation hydrodynamique (durée inférieure à 5-10 ans). La bathymétrie de l'année 1995 est utilisée pour le rejeu « historique » pour la période 1990-2000, celle de l'année 2010 est utilisée à la fois pour le rejeu « historique » (période 2005-2015) et le rejeu « référence » (période 2009-2014). Enfin, la bathymétrie de 2016 est utilisée pour le rejeu « référence » pour la période 2014-2018 (Figure 3). Entre 1995 et 2010, les importantes modifications bathymétriques (construction de Port 2000 au Havre, approfondissement du chenal de navigation, extension des digues, etc...) sont prises en compte. Entre 2010 et 2016, l'évolution morphologique est plutôt naturelle, puisque peu d'ouvrages anthropiques ont vu le jour durant cette période. Néanmoins, le fait d'avoir simulé l'année 2014 avec chacune de ces deux bathymétries permet d'estimer la nécessité d'une mise à jour régulière de la bathymétrie en



l'absence de modifications majeures de la morphologie sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire.

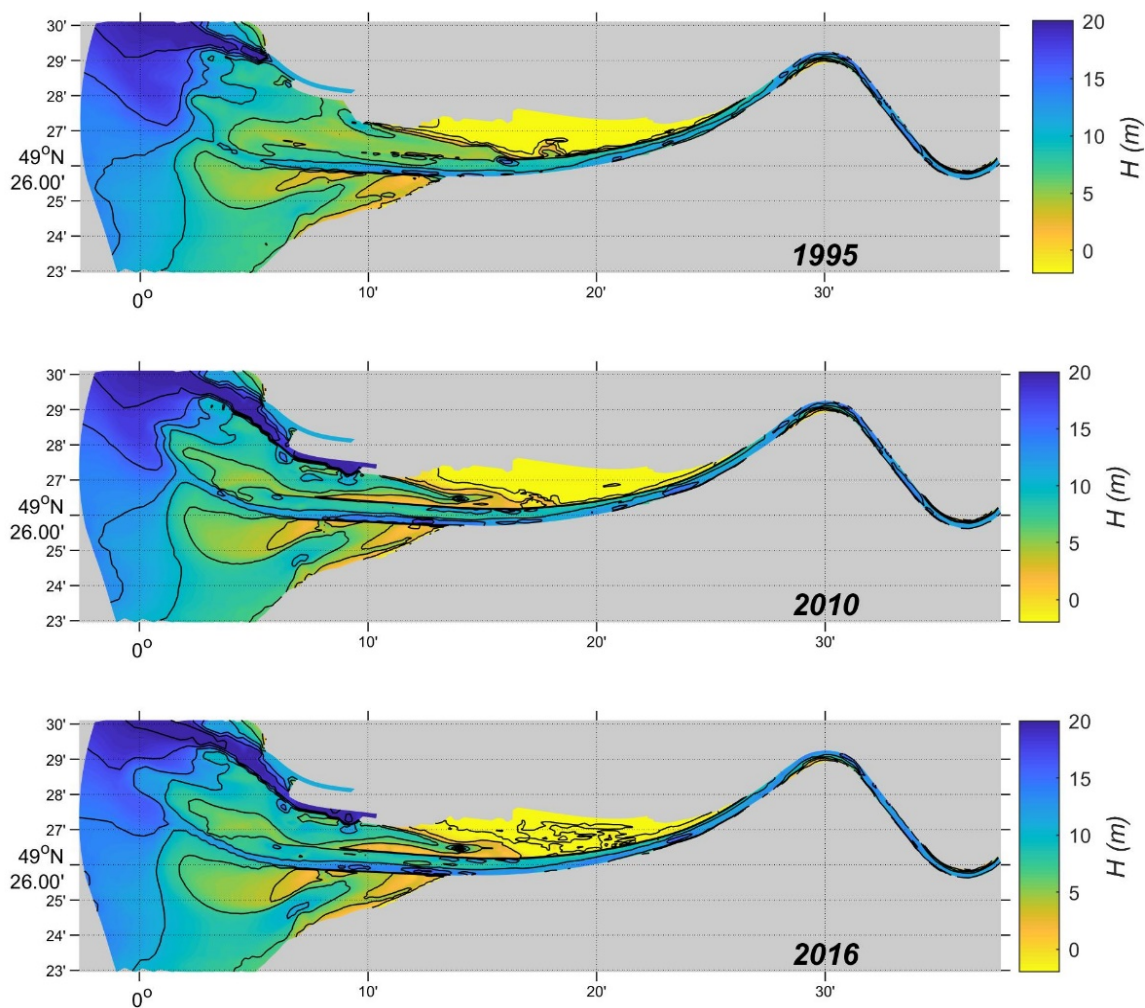
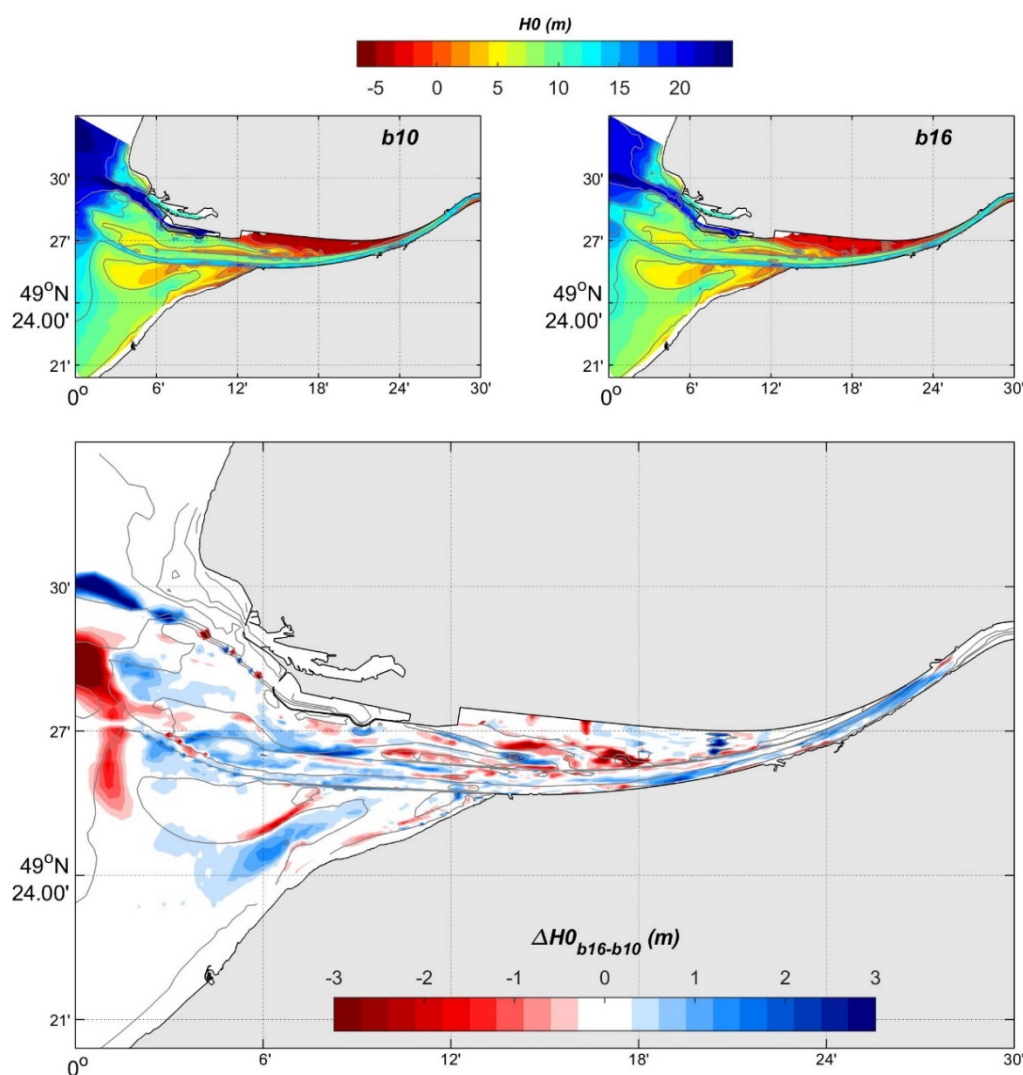


Figure 3. Bathymétries 1995, 2010 et 2016, utilisées pour les rejeux.

## FREQUENCE DE MISE-A-JOUR DE LA BATHYMETRIE

L'évolution morphodynamique de l'estuaire n'étant pas directement prise en compte par le modèle (approche « morphostatique »), il est nécessaire de mettre à jour le fichier de bathymétrie utilisé, pour tenir compte des modifications morphologiques à la fois naturelles et anthropiques. Pour le jeu « historique », ce travail est réalisé à travers l'utilisation de deux fichiers bathymétrique (1995 et 2010) qui mettent en évidence les ouvrages d'aménagements du Port du Havre, notamment. Depuis 2005, il y a eu peu d'aménagement d'envergure, l'évolution morphologique de l'embouchure de la Seine est principalement liée aux activités de dragages/clapages des Grands Ports Maritimes de Rouen et du Havre, et aux évolutions naturelles. Pour le jeu de « référence », la bathymétrie est mise à jour en 2016, et l'année 2014 a été simulée deux fois, une fois en utilisant la bathymétrie de 2010, et une fois avec la bathymétrie de 2016, ce qui permet d'estimer la sensibilité du modèle à la bathymétrie, et donc d'évaluer la nécessité de la mettre à jour régulièrement pour les périodes sans modification notable de la morphologie de l'estuaire. Les différences entre les deux bathymétries sont représentées sur la Figure 4.



**Figure 4. Haut : bathymétries de 2010 (gauche) et 2016 (droite). Bas : différentiel bathymétrique entre 2016 et 2010. Les zones en bleues correspondent à un approfondissement, celles en rouge indiquent une élévation.**

Les deux différences les plus importantes correspondent à l'approfondissement du chenal d'entrée du Port du Havre, et à l'élévation du site de clapage du Kannik. On observe une progradation du banc du Ratier vers l'Ouest et un engraissement de sa partie Sud-Est, ainsi qu'un comblement du chenal de mesure compensatoire en amont du pont de Normandie, et une migration du chenal nord vers le sud, plus en aval. On note aussi un approfondissement au nord de la digue basse nord, en face du port du Havre, ainsi qu'entre le banc du Ratier et la côte. Enfin, le chenal de navigation s'est approfondi d'environ 1 mètre en différents endroits entre Tancarville et l'embouchure.

Ces évolutions morphologiques ont un impact direct sur le fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire. En effet, l'approfondissement général du chenal induit une intrusion d'eau marine vers l'amont plus importante, se caractérisant par une augmentation de la salinité moyenne sur la colonne d'eau d'environ 1 PSU (Figure 5). Cette intensification de la remontée des eaux marines est associée à un renforcement de la stratification et donc la circulation barocline. Les courants annuels moyens de la maille de fond du modèle sont ainsi plus forts vers l'amont, alors que ceux de la maille de surface sont plus forts vers l'aval, de l'ordre de  $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ .

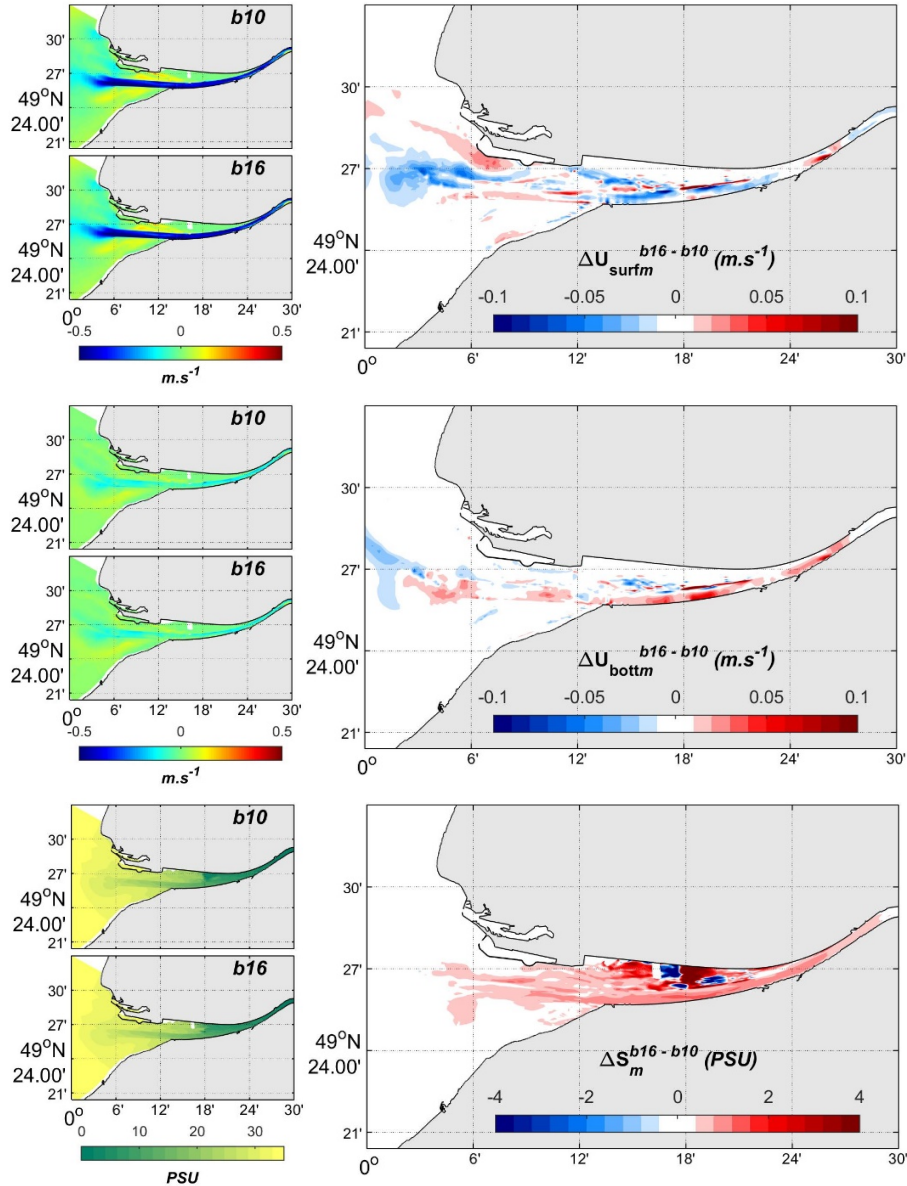
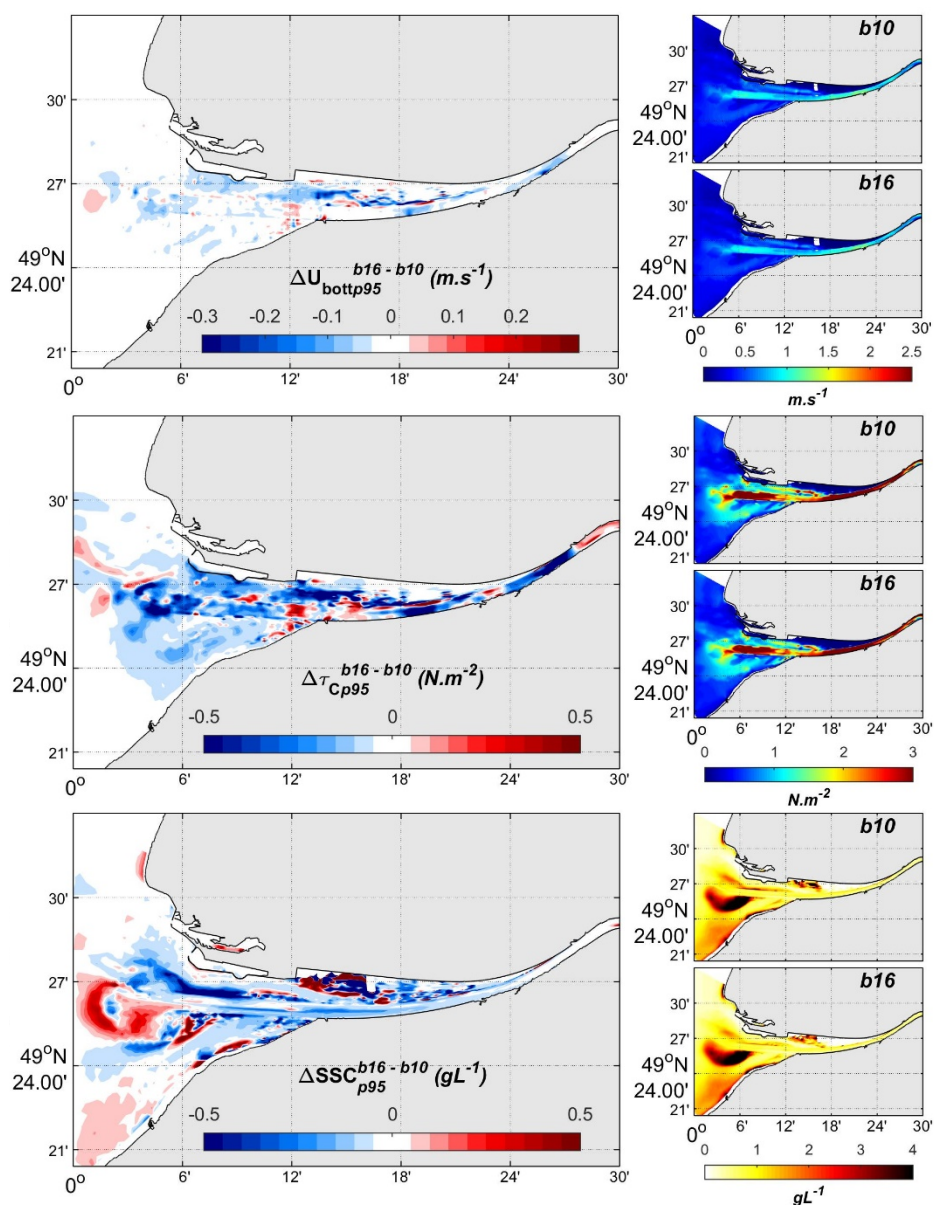


Figure 5. Différences annuelles moyennes entre les simulations de l'année 2014 sur les bathymétries 2016 et 2010, pour la composante Est du courant de surface (haut), de fond (milieu) et pour la salinité moyenne sur la colonne d'eau (bas).

Malgré une augmentation de la valeur moyenne des courants longitudinaux, leur intensité maximale dans le chenal est moins importante avec la bathymétrie de 2016 qu'avec celle de 2010 (Figure 6). Ceci s'explique par l'augmentation de la section verticale de l'estuaire suite à l'approfondissement global du chenal, ce qui contraint moins l'écoulement. Ainsi, les valeurs maximales (percentile 95) de la contrainte exercée par les courants sur le fond ( $\tau_c$ ) sont moins importantes le long du chenal, ce qui diminue l'érosion et donc la remise en suspension des sédiments, dont la concentration maximale est plus faible en 2016 qu'en 2010 de 0,1 à 0,3 g/L. À l'inverse, les élévations bathymétriques associées à la progradation du banc du Ratier et au site



de clapage du Kannik renforcent la contrainte exercée au fond par les courants (et les vagues, non-représentées ici), favorisant la remise en suspension locale des sédiments.



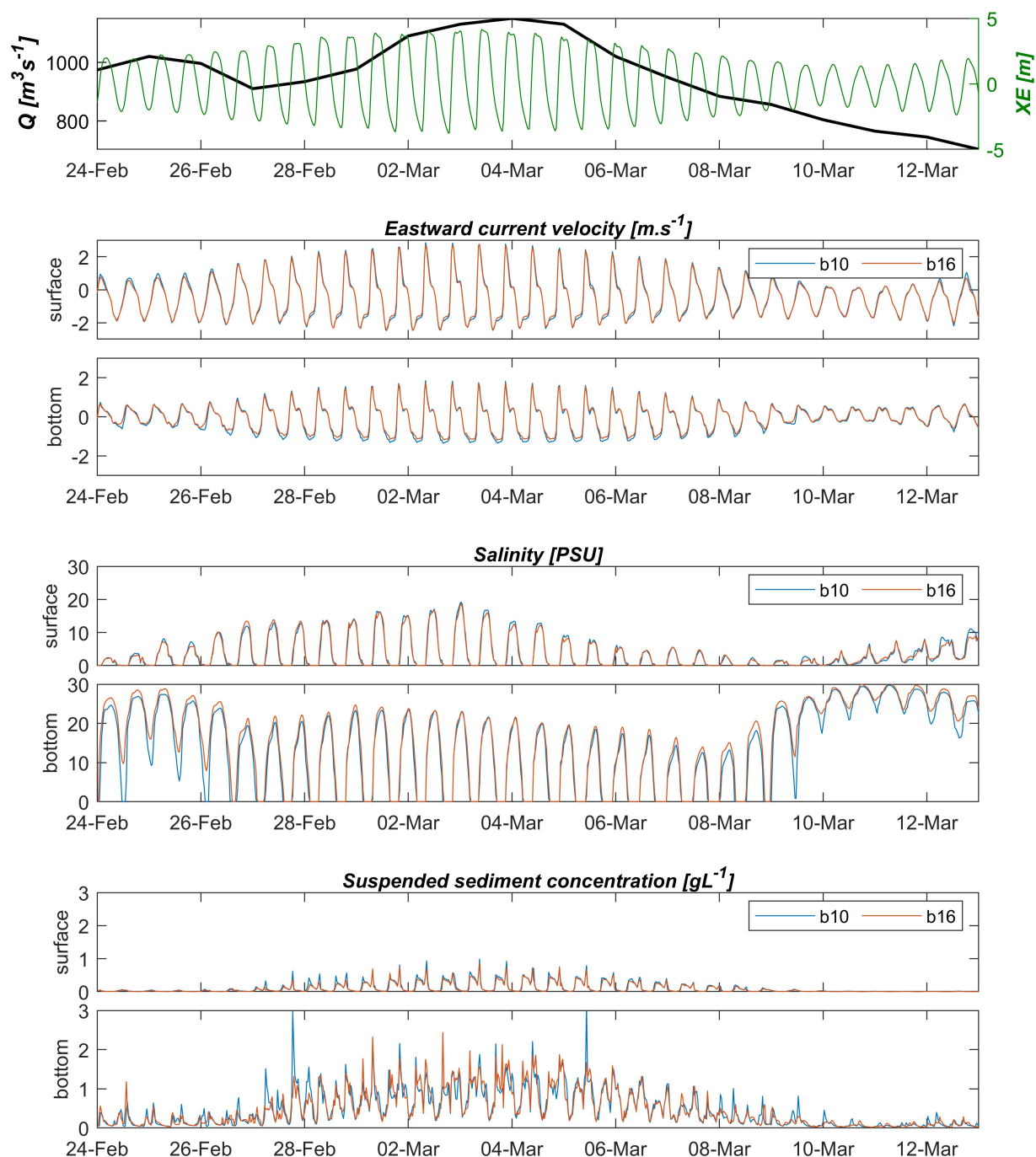
**Figure 6. Différences des valeurs maximales (percentile 95) annuelles entre les simulations de l'année 2014 sur les bathymétries 2016 et 2010, pour la composante Est du courant de fond (haut), la tension exercée par ces courants sur le fond (milieu) et pour la concentration de sédiments en suspension (bas).**

Ces tendances annuelles sont confirmées par la comparaison de ces paramètres à l'échelle d'un cycle vive-eau/morte-eau (VE/ME) au niveau de la station de mesures de Fatouville, en période de crue et d'étiage (Figure 7 et Figure 8). Ces figures montrent que les courants de jusant des marées de VE sont moins forts au fond avec la bathymétrie 2016 que 2010, de quelques cm/sec. Les courants de flot sont aussi moins marqués, notamment en surface lors des marées de ME. L'intrusion saline au fond est plus importante avec la bathymétrie 2016 lors des marées de ME (intensification de la circulation barocline en période de stratification), où la différence peut atteindre 5 à 10 PSU en période de crue, alors qu'il y a peu de différence pour les marées de VE (dé-stratification et mélange de la colonne d'eau). Pour la concentration de sédiments en suspension, la différence est très nette en étiage lors du flot des marées de VE, où les pics de concentration peuvent ponctuellement atteindre 2 g/L de plus avec la bathymétrie de 2010, la contrainte de fond étant plus élevée en 2010 car le chenal est moins profond qu'en 2016.

## **Conclusions**

Les évolutions bathymétriques observées entre 2010 et 2016 induisent des modifications significatives de l'hydrodynamique, de l'hydrologie et de la dynamique des sédiments en suspension dans la partie aval de l'estuaire de Seine estimées sur l'année 2014. Les courants moyens (surface et fond) sont principalement impactés par une intensification de la circulation barocline de l'ordre de 10% à 20% entre les bathymétries 2016 et 2010. La remontée des eaux marines induit une augmentation de la salinité moyenne d'environ 1 PSU entre l'engainement et Tancarville. La progradation du banc du Ratier est associée à une plus forte remise en suspension des sédiments à l'embouchure (au maximum  $+0,5 \text{ g.L}^{-1}$  localement), mais le niveau de concentration de sédiments en suspension est principalement réduit dans l'estuaire par le biais de la réduction de l'intensité maximale des courants de fond (à cause de l'approfondissement du chenal).

Au vu de cette analyse, il est conseillé de mettre à jour régulièrement la bathymétrie pour optimiser le réalisme des simulations futures du jeu ARES. Il paraîtrait raisonnable d'adopter une période d'actualisation de l'ordre de 3 à 5 ans.



**Figure 7. Comparaison des simulations de l'année 2014 sur les bathymétries 2016 et 2010 à Fatouville, sur un cycle VE/ME en période de crue. De haut en bas, le premier panneau montre le débit journalier de la Seine (noir) et le niveau d'eau (vert). Les 3 doubles panneaux suivants montrent les sorties de la simulation avec la bathymétrie 2016 (rouge) et 2010 (bleu) en surface (demi-panneau du haut) et au fond (demi-panneau du bas) pour la composante Est du courant, la salinité et la concentration de sédiments en suspension.**

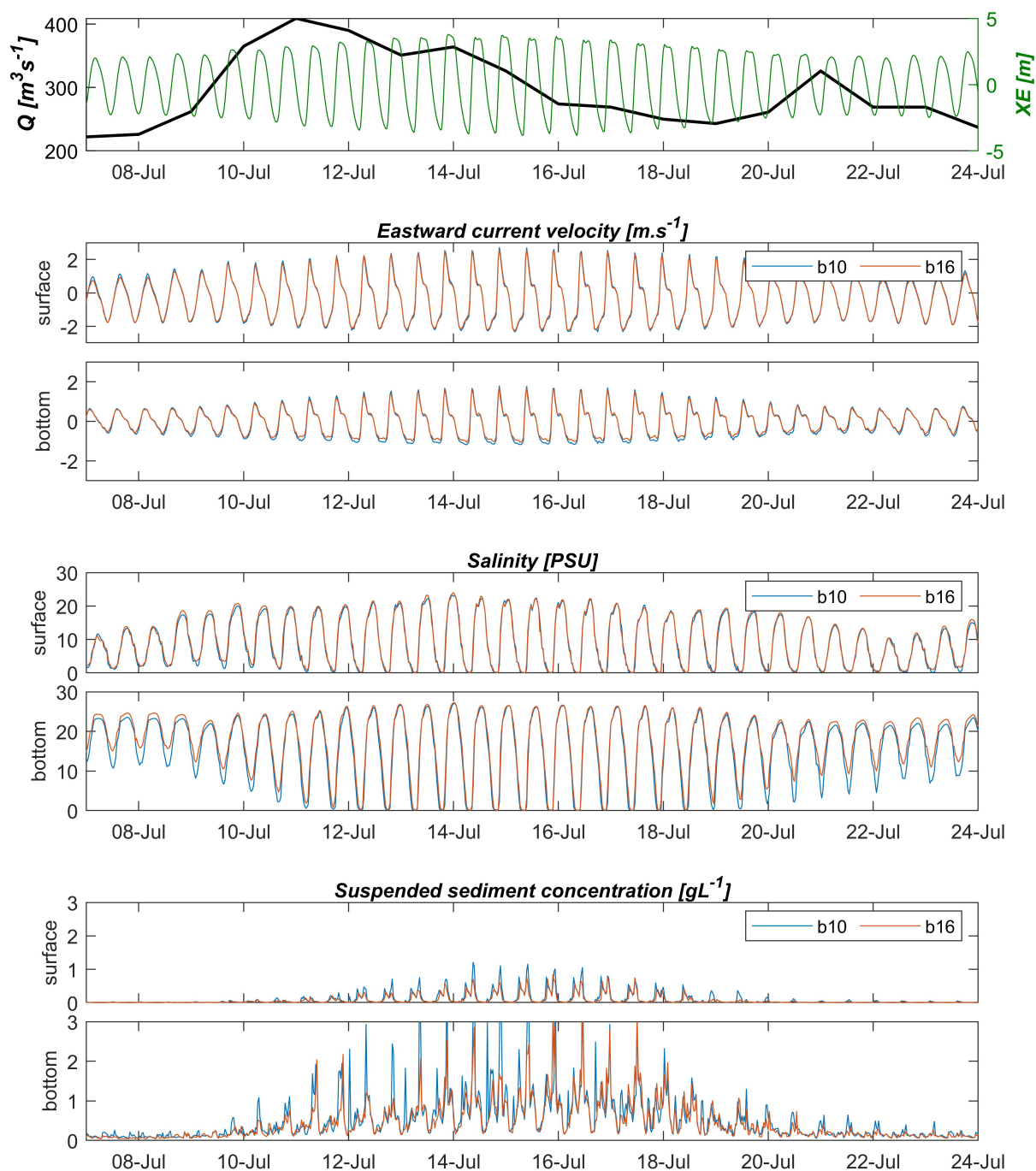


Figure 8. Comparaison des simulations de l'année 2014 sur les bathymétries 2016 et 2010 à Fatouville, sur un cycle VE/ME en période d'été. De haut en bas, le premier panneau montre le débit journalier de la Seine (noir) et le niveau d'eau (vert). Les 3 doubles panneaux suivants montrent les sorties de la simulation avec la bathymétrie 2016 (rouge) et 2010 (bleu) en surface (demi-panneau du haut) et au fond (demi-panneau du bas) pour la composante Est du courant, la salinité et la concentration de sédiments en suspension.

## COMPARAISON AVEC LES DONNEES DU RESEAU PHRESQUES

Les stations aval du réseau de mesures PHRESQUES en estuaire, incluant la bouée SCENES, au large du port du Havre, et les trois stations de mesures SYNAPSES (Balise A, Fatouville et Tancarville) permettent d'évaluer la fiabilité du modèle par rapport aux observations *in situ* haute-fréquence pour les variables hydrologiques (température, salinité et turbidité). Ces mesures sont disponibles depuis octobre 2015 (octobre 2017 pour la bouée SCENES), à la fréquence 5' (SYNAPSES), 15' (SCENES surface) et 30' (SCENES fond). Les données de turbidité sont converties en concentration en SSC grâce à la constitution de calibrations sur la base d'un très grand nombre de prélèvements *in situ* (Druine, 2018 ; Chapalain, 2019). Pour la bouée SCENES, la température et la concentration en sédiments en suspension sont disponibles en surface et au fond de la colonne d'eau, mais la salinité n'est disponible qu'en surface. Pour les trois stations SYNAPSES, la température est mesurée seulement au fond. Au niveau de Balise A, la salinité et la concentration de sédiments en suspension sont aussi mesurées au fond de la colonne d'eau, mais sont disponibles au fond et en surface à Fatouville et Tancarville. Néanmoins, des incertitudes existent sur les mesures de surface, notamment lorsque le coulissement du capteur est bloqué dans le tube de marnage, et ne peut pas suivre la ligne de flottaison. De plus, le *biofouling* rend certaines mesures douteuses. Les données de surface de salinité et turbidité n'ont donc pas été prises en compte pour la comparaison modèle/données.

Dans le modèle, la colonne d'eau étant discrétisée en 10 couches  $\sigma$  équidistantes, les sorties du rejeu « référence » sont interpolées à la profondeur des capteurs (1 mètre sous la surface et 1 mètre au-dessus du fond pour les capteurs de surface et de fond, respectivement), puis moyennées sur plusieurs mailles autour de la position de chaque station (Figure 9). Ce choix est fait pour éviter d'éventuels effets de bord, particulièrement à Fatouville et Tancarville, où les mesures sont réalisées à proximité de la berge, et où la bathymétrie du modèle peut être abrupte. Pour la correspondance avec la mesure de fond, la température et la salinité du modèle sont interpolées à la profondeur correspondant à la côte CMH du capteur, tandis que pour la MES, la valeur est interpolée à 1 mètre au-dessus du fond. En effet, les thermoclines et haloclines sont, localement, plutôt horizontales (et donc liées à la profondeur sous la surface), alors que la remise en suspension des sédiments dépend de l'altitude au-dessus du fond.

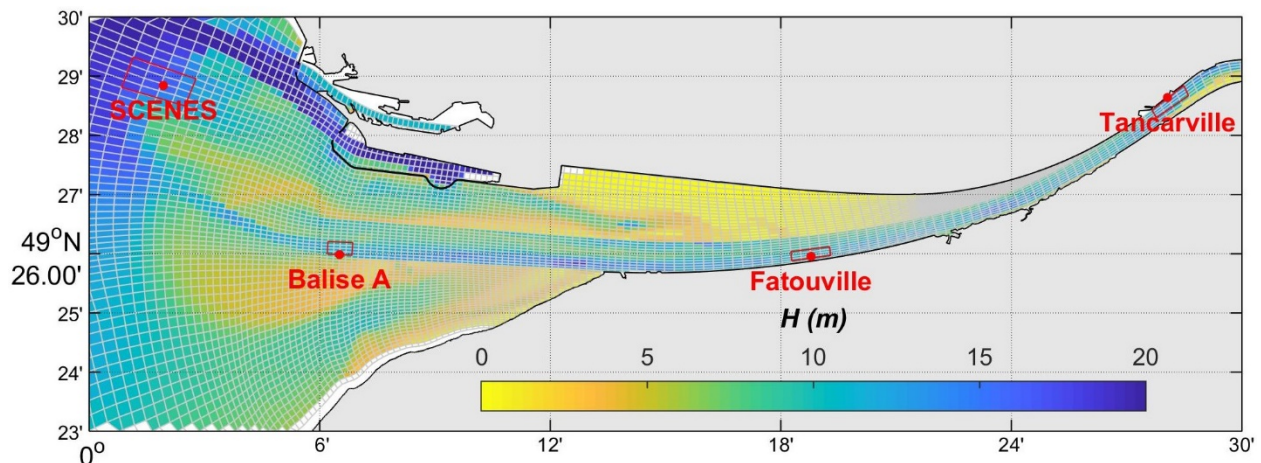


Figure 9. Position des stations de mesures PHRESQUES (points rouges), et points de maille du modèle sur lesquels sont moyennés les paramètres du modèle (rectangles rouges).



## 1 Température

Contrairement aux travaux de modélisation entrepris dans le cadre des programmes Seine-Aval précédents, la température de l'eau est ici prise en compte de manière réaliste, en appliquant la température de la Seine à tous les affluents considérés, et les sorties horaires du modèle de circulation MARS3D-MANGAE2500 sont imposées à la frontière nord de la Baie de Seine. De plus, sur l'ensemble des mailles du modèle, les échanges thermiques eau-atmosphère sont pris en compte par le calcul des flux solaires et thermiques (Luyten et De Mulder, 1992, Agoumi, 1982). Outre son influence sur la circulation, la température joue un rôle prépondérant sur le fonctionnement écologique de l'estuaire, il est donc important qu'elle soit bien représentée par le modèle.

La comparaison modèle/mesures de la température moyenne par marée est très concluante (Figure 10). Les variations saisonnières sont bien représentées par le modèle, ce qui se traduit par un excellent coefficient de corrélation pour tous les points de comparaison ( $r^2 > 0.94$ ). L'erreur quadratique et le biais montrent une légère sous-estimation systématique de la température du modèle par rapport aux mesures, de l'ordre de 1°C en moyenne. Cette tendance à la sous-évaluation paraît plus marquée en automne en aval (bouée SCENES et Balise A), alors qu'elle est plus marquée en hiver aux stations amont (Fatouville et Tancarville).

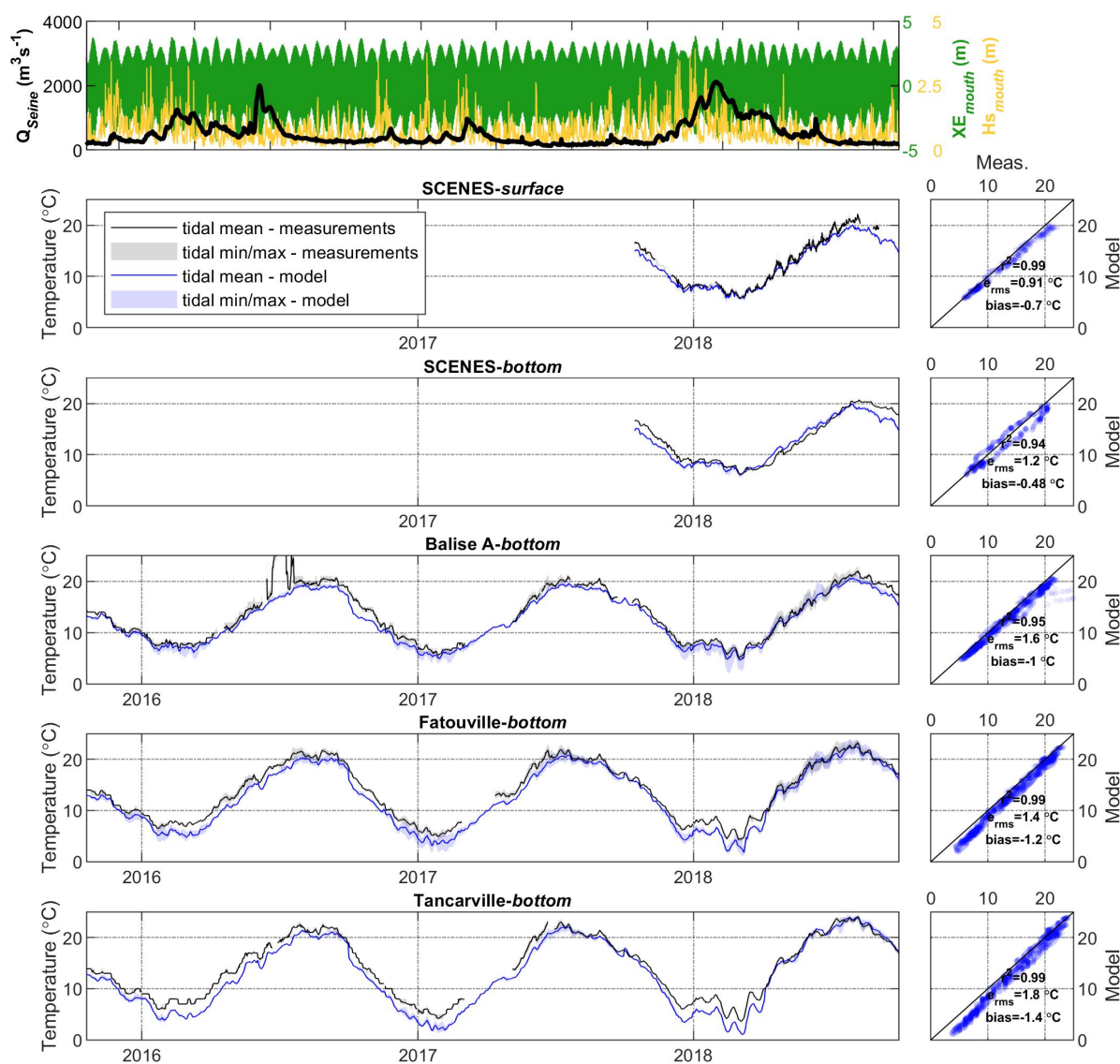
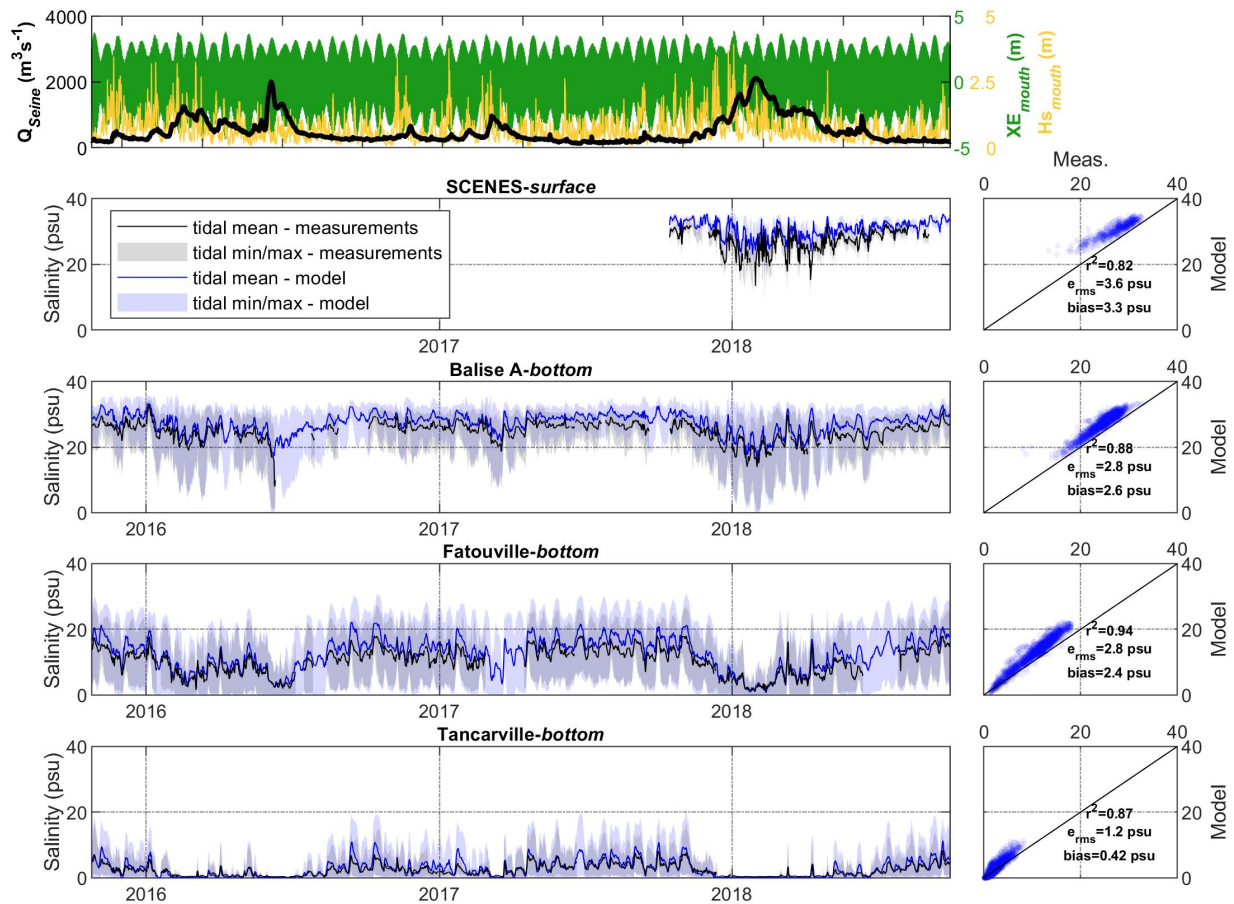


Figure 10. **Haut** : débit de la Seine (noir), niveau d'eau (vert) et hauteur significative des vagues (jaune) à l'embouchure. **Bas** : Comparaison entre la température moyenne par marée, calculée par le modèle (bleu) et mesurée aux stations du réseau PHRESQUES (noir), sous forme de série temporelle (gauche) et de régression linéaire (droite). Les enveloppes de couleurs sur les séries temporelles correspondent aux extrema par cycle de marée.

## 2 Salinité

À l'instar de la température, la salinité est un paramètre majeur du fonctionnement écologique de l'estuaire. Globalement, le modèle retrace bien les variations de salinité associées aux cycles VE/ME et de crues/étiages dans l'ensemble de l'estuaire (Figure 11). Néanmoins, il présente une légère tendance à la surestimation, de l'ordre de 3 PSU, pour les trois stations les plus aval (bouée SCENES, Balise A et Fatouville). À Tancarville, la surestimation est plus faible, de l'ordre de 0,5 PSU en moyenne, et se traduit principalement par des pics de salinité trop importants lors des marées de VE en périodes d'étiage.



**Figure 11.** Haut : débit de la Seine (noir), niveau d'eau (vert) et hauteur significative des vagues (jaune) à l'embouchure. Bas : Comparaison entre la salinité moyenne par marée, calculée par le modèle (bleu) et mesurée aux stations du réseau PHRESQUES (noir), sous forme de séries temporelles (gauche) et de régressions linéaires (droite). Les enveloppes de couleurs sur les séries temporelles correspondent aux extrema par cycle de marée.

La Figure 12, qui représente la salinité moyenne aux stations en fonction de classes de débit de  $250 \text{ m}^3$ , indique qu'en période de crue, le modèle semble bien représenter la prédominance d'eau fluviale en amont (Fatouville et Tancarville), alors que les intrusions salines en période d'étiage sont surestimées, particulièrement à Fatouville. En aval, le panache d'eau douce n'est pas assez marqué au niveau de Balise A et de la bouée SCENES, où la salinité est légèrement trop importante quel que soit le débit de la Seine. Il est possible que la résolution verticale du modèle en 10 couches  $\sigma$  équidistantes ne soit pas suffisante pour capter les forts gradients de salinité à cet endroit-là.

Le modèle semble par contre bien représenter la relation entre la salinité et le marnage, la marée étant le forçage principal des conditions hydrologiques de l'estuaire, comme le montre la Figure 13, qui représente la salinité moyenne par cycle de marée en fonction du marnage au Havre (par classes de 0,5 mètre). Sur l'ensemble de l'estuaire, la surestimation de la salinité du modèle ne semble pas liée au marnage, le biais avec les observations étant relativement constant en fonction du marnage.



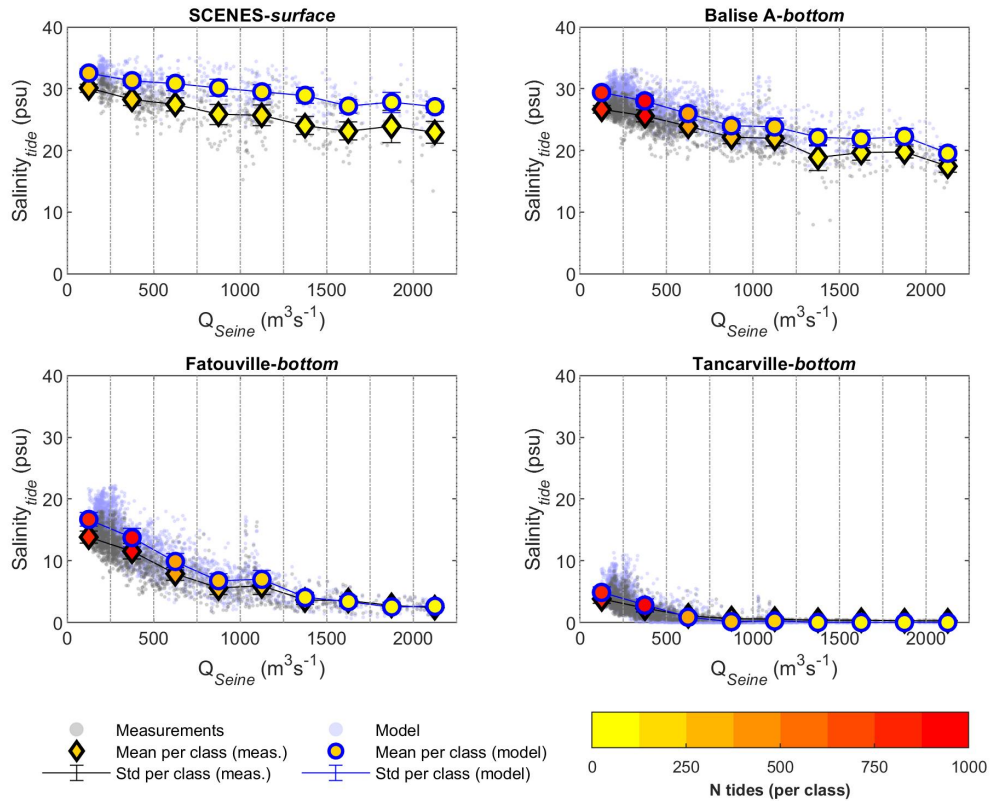


Figure 12. Comparaison de la salinité moyenne par cycle de marée en fonction du débit de la Seine, pour le modèle (bleu) et les mesures (noir), et par classes de débit (cercles bleus pour le modèle et losanges noirs pour les mesures). La barre de couleur représente le nombre de point (i.e. le nombre de marées) par classe de débit de 250 m³.

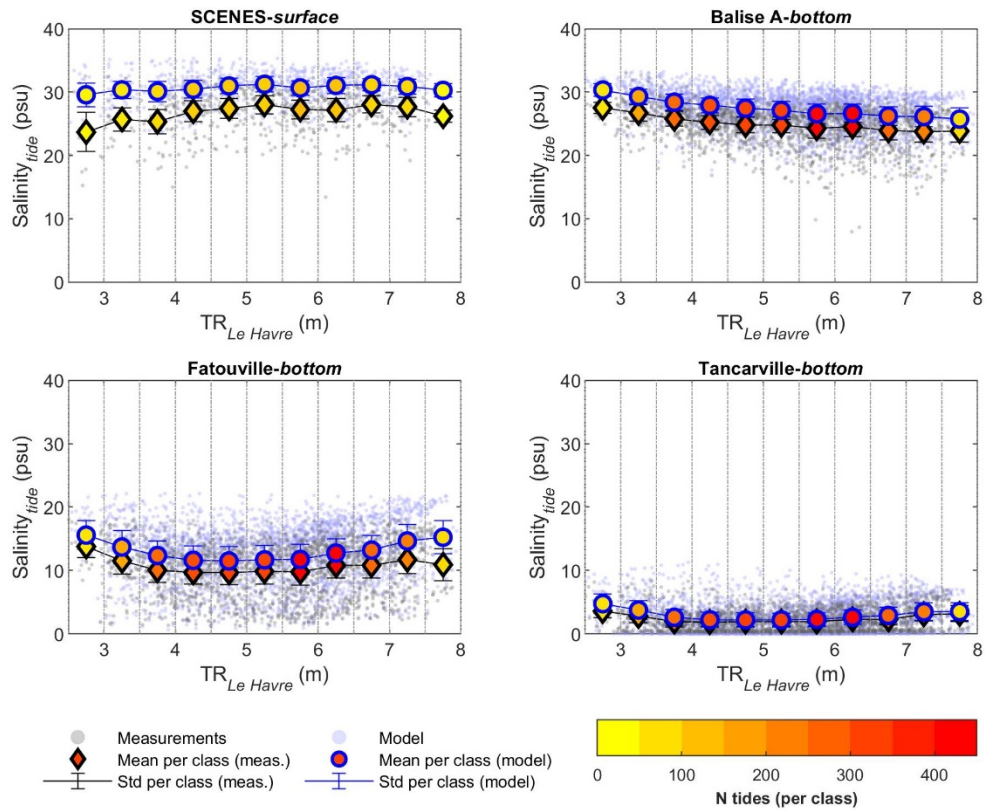


Figure 13. Comparaison de la salinité moyenne par cycle de marée en fonction du marnage au Havre, pour le modèle (bleu) et les mesures (noir), et par classes de débit (cercles bleus pour le modèle et losanges noirs pour les mesures). La barre de couleur représente le nombre de points (i.e. le nombre de marées) par classe de marnage de 0,5 m.

### 3 Sédiments en suspension

Globalement, le modèle représente assez bien les variations liées aux cycles VE/ME de concentration en sédiments en suspension (SSC) proche du fond, comme le montre la Figure 14. En aval (bouée SCENES et Balise A), le modèle a tendance à légèrement surestimer la SSC ( $\sim 0,06 \text{ g.L}^{-1}$ ) alors que la tendance est au contraire à la sous-estimation en amont (Fatouville et Tancarville,  $\sim 0,3 \text{ g.L}^{-1}$ ) pour les faibles débits, comme le confirme la Figure 15, qui montre la SSC moyennée par marée en fonction des classes de débit de  $250 \text{ m}^3$ . Cela indique que le modèle a tendance à ne pas assez remonter le bouchon vaseux vers l'amont en période d'étiage, comme il a déjà été constaté lors du projet SA5-HYMOSED. En période de crue, le modèle semble plus performant, particulièrement en amont où les valeurs de SSC simulées par le modèle sont en bonne corrélation avec les mesures (Figure 15).

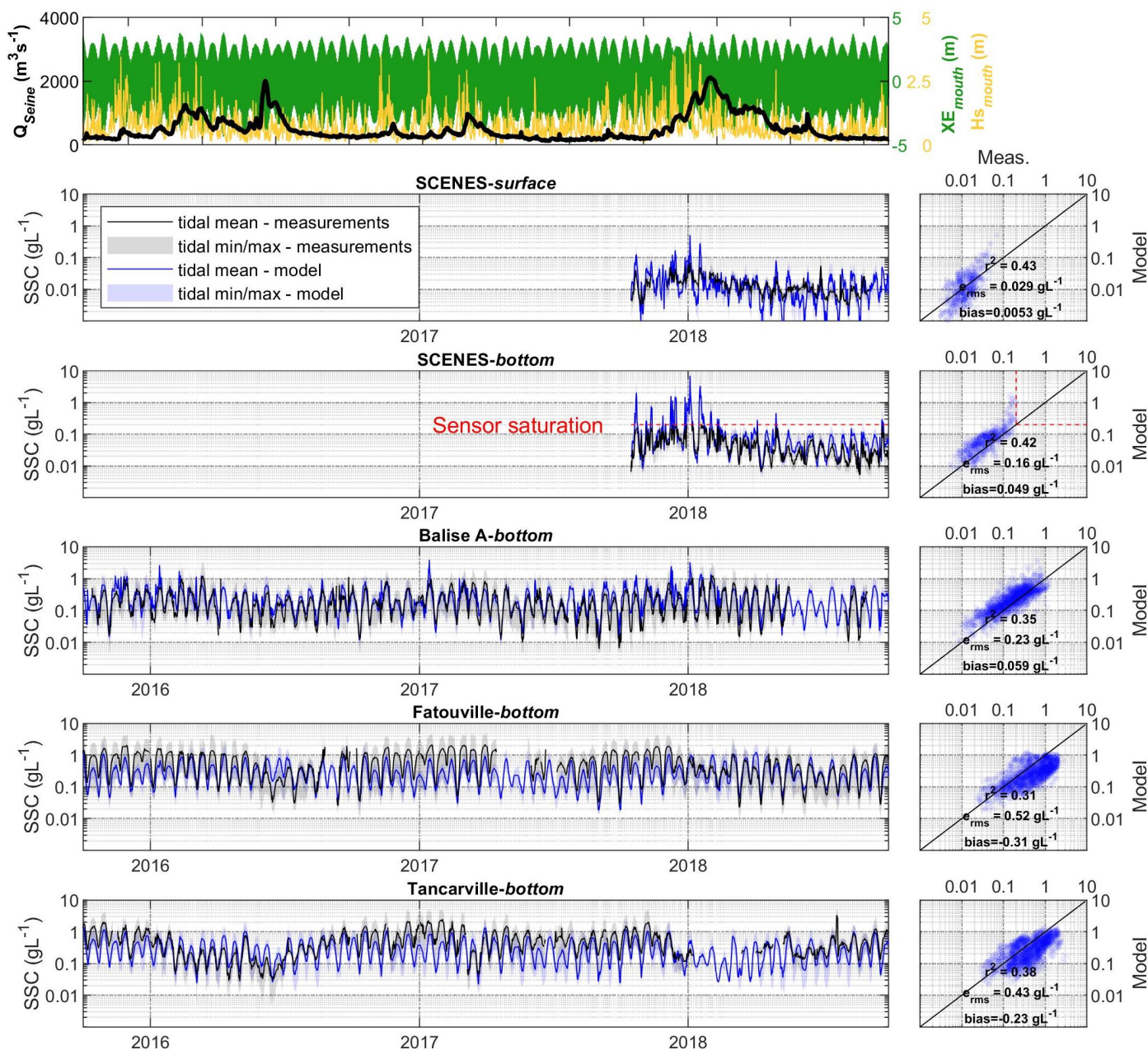


Figure 14. Haut : débit de la Seine (noir), niveau d'eau (vert) et hauteur significative des vagues (jaune) à l'embouchure. Bas : Comparaison entre la concentration de sédiments en suspension moyenne par marée, calculée par le modèle (bleu) et mesurée aux stations du réseau PHRESQUES (noir), sous forme de séries temporelles (gauche, échelle logarithmique en ordonnée) et de régressions linéaires (droite, échelles logarithmiques). Les enveloppes de couleurs sur les séries temporelles correspondent aux extrema par cycle de marée. A noter que le capteur de mesures à la station SCENES-fond sature au-delà de  $0,2 \text{ g.L}^{-1}$ .

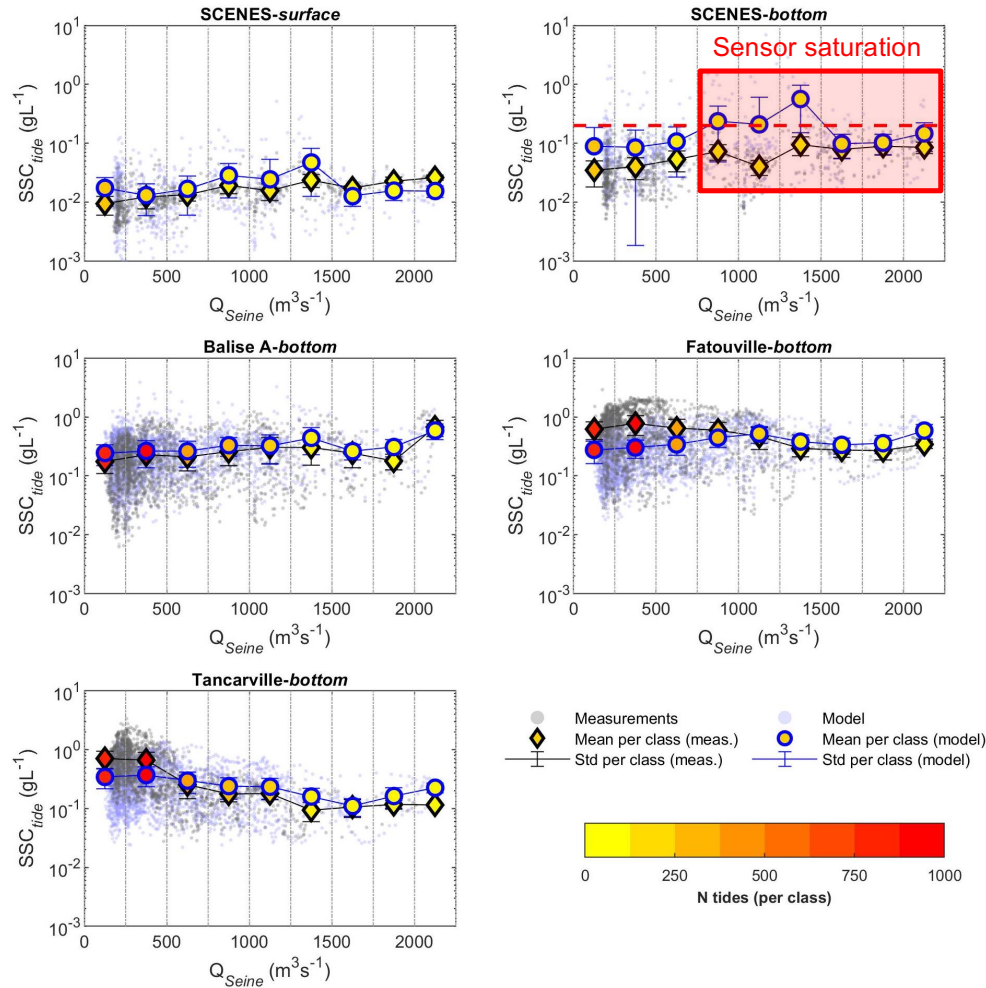


Figure 15. Comparaison de la concentration en sédiments en suspension moyenne par cycle de marée en fonction du débit de la Seine, pour le modèle (bleu) et les mesures (noir), et par classes de débit (cercles bleus pour le modèle et losanges noirs pour les mesures). La barre de couleur représente le nombre de point (i.e. le nombre de marées) par classe de débit de 250  $m^3$ . Il faut noter que le capteur de mesures à la station SCENES-fond sature au-delà de 0,2  $g.L^{-1}$ .

Comme pour la salinité, la concentration en sédiments en suspension observée est bien corrélée au marnage pour l'ensemble de l'estuaire (Figure 16). Cette relation est bien représentée par le modèle en amont (Fatouville et Tancarville) ainsi qu'en aval (Balise A). On note cependant que le modèle tend à surestimer les concentrations au fond à la station SCENES. Il est important de noter que les mesures de fond à la station SCENES ne sont plus représentatives de la dynamique réelle au-delà d'une certaine valeur car le capteur de mesures sature à partir de 0,2  $g.L^{-1}$  et ne peut donc pas mesurer de plus fortes valeurs.



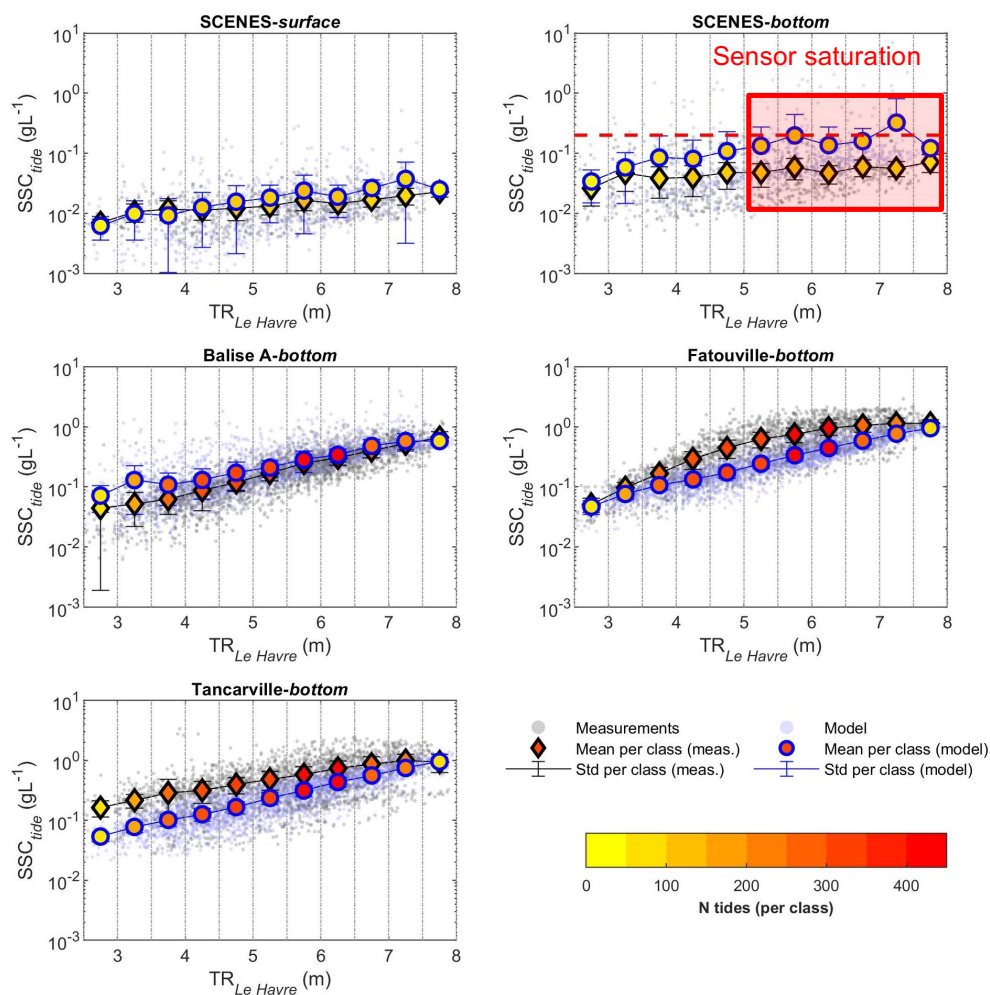


Figure 16. Comparaison de la concentration en sédiments en suspension moyenne par cycle de marée en fonction du marnage au Havre, pour le modèle (bleu) et les mesures (noir), et par classes de débit (cercles bleus pour le modèle et losanges noirs pour les mesures). La barre de couleur représente le nombre de points (i.e. le nombre de marées) par classe de marnage de 0,5 m. A noter que le capteur de mesures à la station SCENES-fond sature au-delà de 0,2  $g.L^{-1}$ .

Une part de la surestimation du modèle en aval peut être expliquée par l'influence des vagues sur la remise en suspension à l'embouchure. La Figure 17, qui montre la SSC en fonction de la hauteur des vagues à l'embouchure, indique que la SSC prévue par le modèle est surestimée lors d'épisodes de tempêtes aux stations SCENES et Balise A en surface (attention aux mesures de fond à la station SCENES qui sont biaisées par la saturation du capteur). Il est donc probable que le modèle surestime l'effet des vagues sur la remise en suspension des sédiments, ce qui se traduit par des concentrations plus élevées en aval.

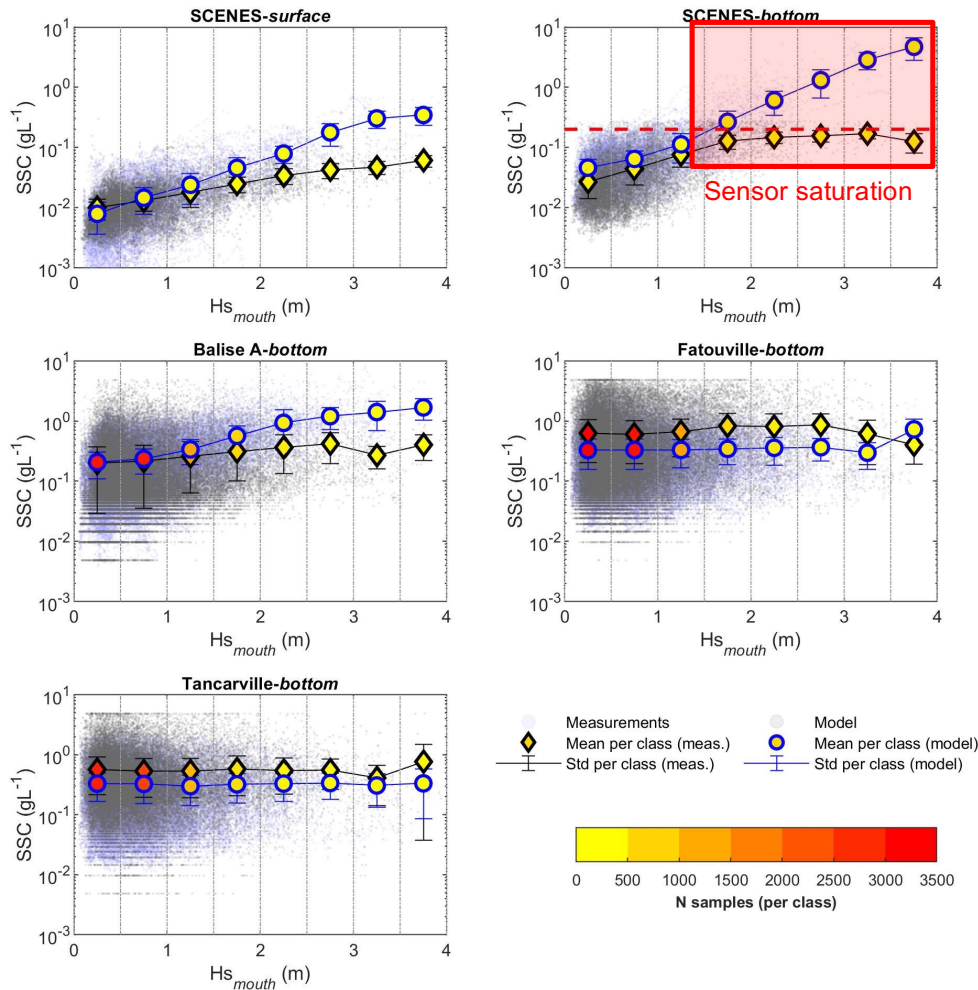


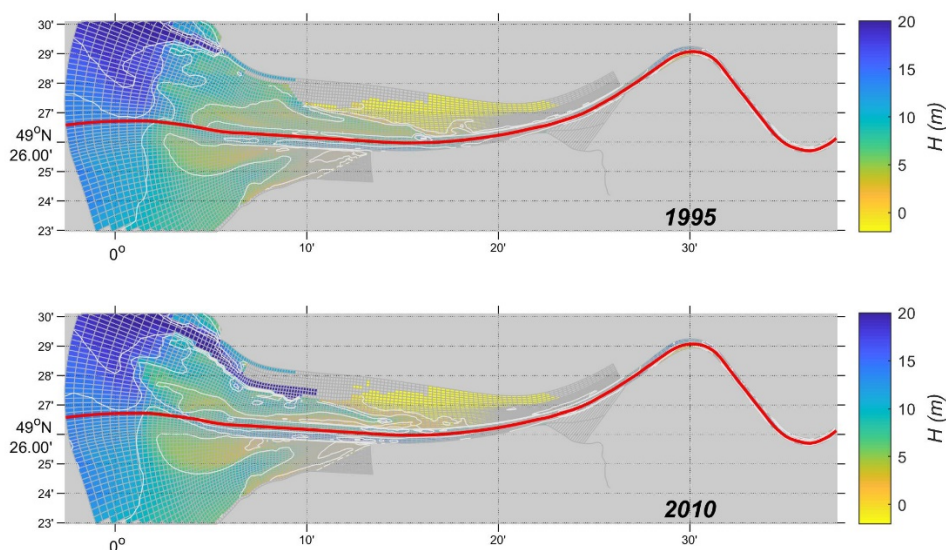
Figure 17. Comparaison de la concentration en sédiments en suspension instantanée en fonction de la hauteur significative des vagues à l'embouchure, pour le modèle (bleu) et les mesures (noir), et par classes de hauteurs de vagues (cercles bleus pour le modèle et losanges noirs pour les mesures). La barre de couleur représente le nombre de points par classe de hauteurs de vagues de 0,5 mètre. A noter que le capteur de mesures à la station SCENES-fond sature au-delà de  $0,2 \text{ g.L}^{-1}$ .

## 4 Conclusions

Globalement, le modèle représente de façon satisfaisante les conditions hydrologiques (température, salinité, turbidité) de l'Estuaire de la Seine. Les variations de températures saisonnières sont très bien captées, malgré une légère sous-estimation systématique de l'ordre de  $1^\circ\text{C}$ . De plus, le modèle représente très bien les variations liées aux cycles VE/ME pour la salinité et la concentration en sédiments en suspension, ce qui indique un comportement hydrodynamique adéquat. Cependant, la salinité est surestimée dans l'ensemble de l'estuaire, de 1 à 3 PSU. La SSC est plutôt sous-estimée en amont en période d'étiage, de moins de  $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , mais est très bien représentée en période de crue. En aval, la tendance est inversée, puisque le modèle semble surestimer l'effet des vagues sur la remise en suspension des sédiments à l'embouchure, ce qui se traduit par des concentrations simulées légèrement plus élevées que celle mesurées aux stations SCENES et Balise A ( $\sim 0,06 \text{ g.L}^{-1}$ ).

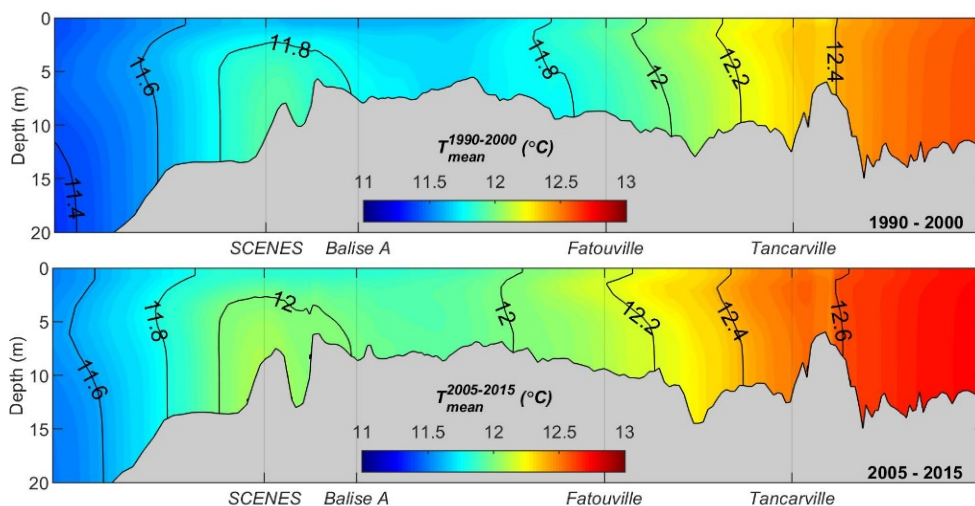
## CONDITIONS HYDROLOGIQUES DECENNALES ET ANNUELLES DE L'ESTUAIRE

Le rejeu « historique », couvrant deux périodes de 11 ans (1990-2000 et 2005-2015), permet : **(i)** de comparer les climatologies décennales (statistiques sur 11 ans) de différentes variables pour deux configurations morphologiques contrastées de l'estuaire (*i.e.* pré- et post- Port 2000), et **(ii)** d'évaluer la variabilité interannuelle du fonctionnement de l'estuaire à ces échelles temporelles. Les variables choisies sont la température, la salinité et la concentration de sédiments en suspension, en continuité avec la comparaison des résultats du modèle avec les données in-situ.



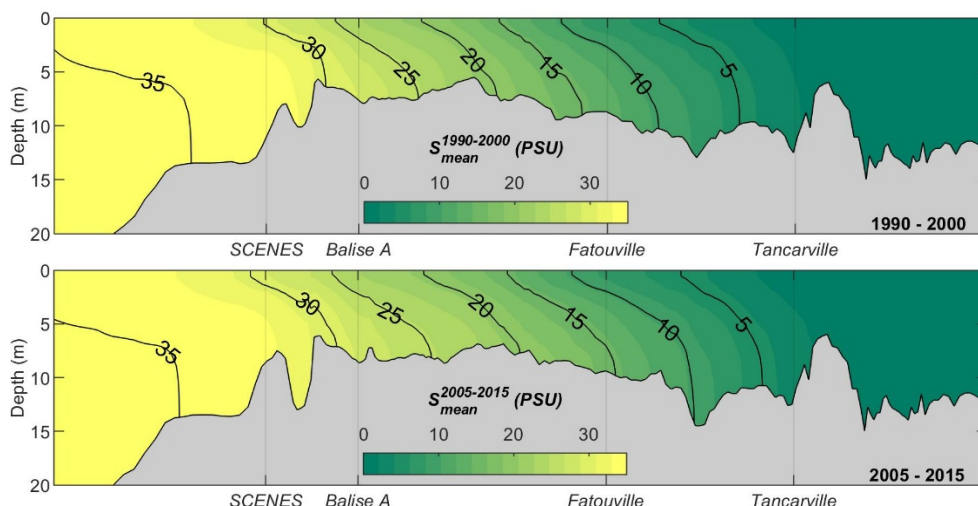
**Figure 18. Grilles bathymétriques de 1995 (utilisée pour la période 1990-2000) et 2010 (utilisée pour 2005-2015). La ligne rouge représente la radiale le long de laquelle sont comparés les résultats sur la colonne d'eau.**

La comparaison de la température moyenne sur la colonne d'eau, le long d'une radiale suivant le chenal de navigation (Figure 18), indique que l'estuaire a été globalement plus chaud sur la dernière décennie qu'entre 1990-2000, d'environ 0,2°C (Figure 19). Ce réchauffement paraît être lié à la fois à une augmentation de la température moyenne de l'eau des affluents en amont, mais aussi à un réchauffement des eaux océaniques en aval. Cette observation est cohérente avec les constats sur les impacts des changements climatiques, plus marqués ces dernières années qu'il y a 20 ans.



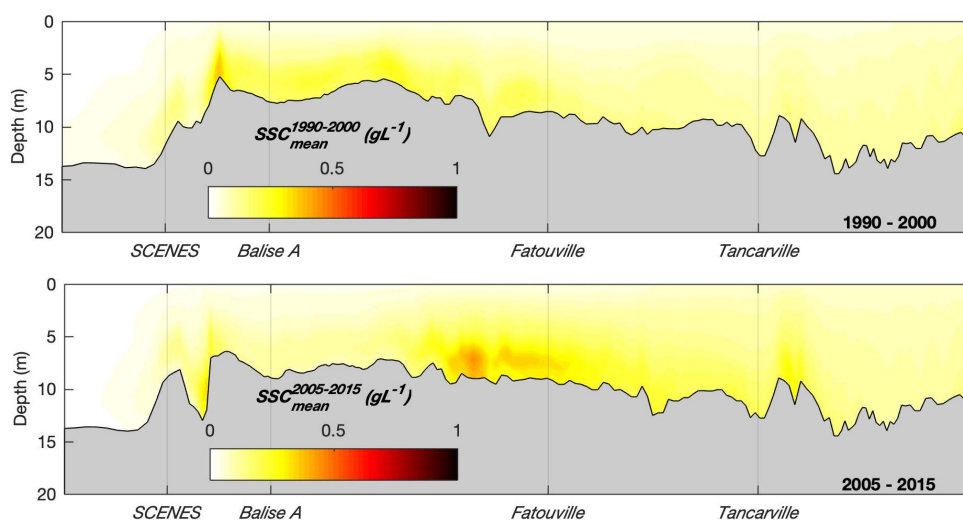
**Figure 19. Climatologies de la température moyenne de la colonne d'eau le long de la radiale longitudinale au milieu de l'estuaire de la Seine, pour 1990-2000 (haut) et 2005-2015 (bas).**

Concernant la salinité, les valeurs du percentile 95 (qui représente les valeurs maximales atteintes pendant la période de 11 ans) sont relativement similaires entre 1990-2000 et 2005-2015 (Figure 20). On note toutefois une accentuation de la stratification, avec des haloclines plus horizontales, pour la décennie 2005-2015. Ce phénomène est probablement lié aux importants travaux de chenalisation ayant eu lieu après 2000, favorisant une intrusion plus intense des eaux océaniques dans l'estuaire.



**Figure 20. Climatologies du percentile 95 de la salinité de la colonne d'eau sur une radiale longitudinale au milieu de l'estuaire de la Seine, pour 1990-2000 (haut) et 2005-2015 (bas).**

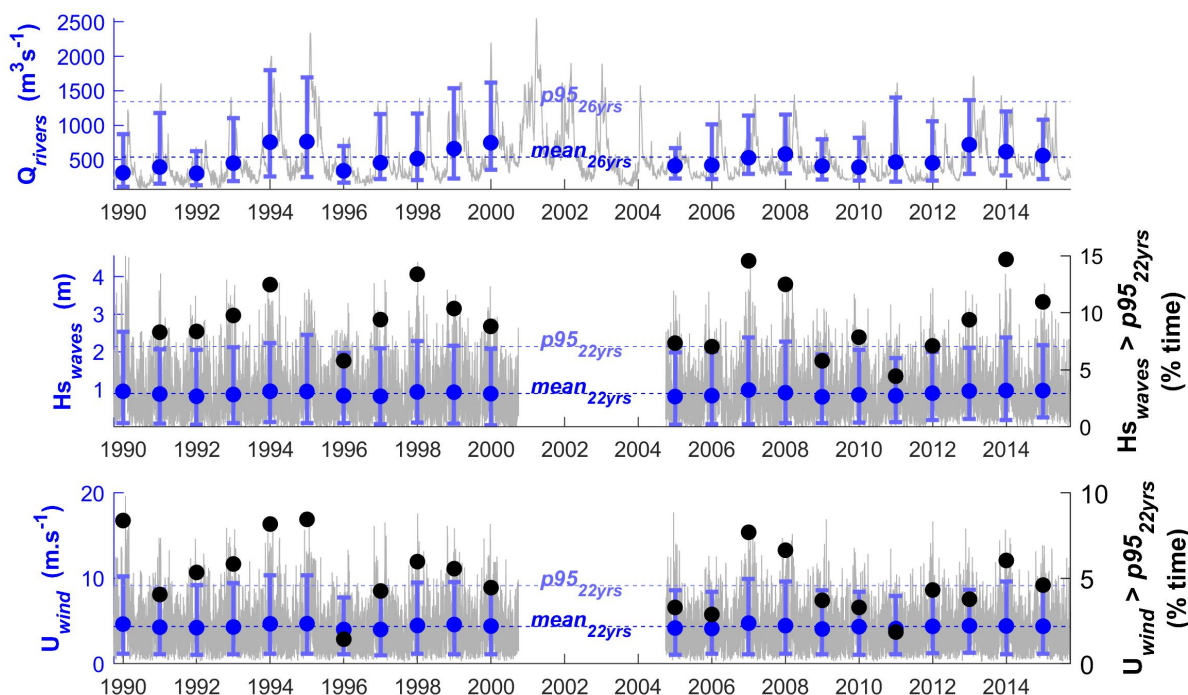
Pour la concentration moyenne de sédiments en suspension dans la colonne d'eau, il y a peu de différences entre les périodes 2005-2015 et 1990-2000, mais il y a une tendance à l'augmentation de la SSC dans la partie amont de l'estuaire (Fatouville-Tancarville) en 2005-2015 (Figure 21). Ces différences peuvent s'expliquer par le rétrécissement de l'estuaire entre 1995 et 2010 dû aux travaux d'extension de Port 2000. Cela induit une intensification des asymétries de marée, augmentant l'intensité du pompage tidal (Grasso et Le Hir, 2019), pouvant induire une augmentation de la concentration de sédiment en suspensions proche du fond.



**Figure 21. Climatologies de la concentration moyenne de sédiments en suspension de la colonne d'eau sur une radiale longitudinale au milieu de l'estuaire de la Seine, pour 1990-2000 (haut) et 2005-2015 (bas).**

Il est également intéressant d'étudier ces variables à l'échelle annuelle, et de les comparer avec la climatologie décennale en termes d'anomalies. Cela permet de caractériser chaque année, et de lier ces anomalies avec les principaux forçages de l'estuaire : le débit des affluents et les tempêtes (en termes de vitesse de vent et hauteur de vagues), représentés sur la Figure 22.





**Figure 22. Principaux forçages de l'estuaire : débit des affluents (haut), hauteur significative des vagues à l'embouchure (milieu) et vitesse moyenne des vents sur l'ensemble de la grille du modèle (bas). Sur chaque graphique, la courbe grise représente la valeur journalière (pour le débit) ou horaire (pour la hauteur des vagues et la vitesse du vent), les points bleus représentent la moyenne annuelle et les crochets bleus les percentiles 5 et 95 annuels. Les lignes pointillées horizontales représentent la moyenne et le percentile 95 de la période totale ; 26 ans (1990-2015) pour le débit, et 22 ans (1990-2000 et 2005-2015) pour la hauteur des vagues et la vitesse du vent. Pour la hauteur des vagues et la vitesse du vent, les points noirs représentent la durée annuelle (en % de l'année) où la valeur est supérieure au percentile 95 de la période totale de 22 ans.**

L'analyse spatiale du percentile 5 de la salinité sur une année permet notamment de visualiser la position et l'intensité du panache d'eau douce en Baie de Seine (Figure 23). Ainsi, une année particulièrement humide comme 2013, dont le débit annuel moyen a été supérieur à  $600 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , est caractérisée par une importante anomalie négative de salinité à l'embouchure de la Seine, de l'ordre de 4 à 5 PSU par rapport à la moyenne sur 2005-2015. À l'inverse, lors d'une année plutôt sèche comme 2010, où le pic de crue est inférieur à  $1000 \text{ m}^3/\text{sec}$ , et le débit moyen annuel est d'environ  $350 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , la salinité est supérieure de plusieurs PSU sur la portion de l'estuaire qui s'étend de l'embouchure jusqu'à Fatouville.

Pour la concentration de sédiments en suspension, les anomalies sur le percentile 95 annuel (Figure 24) sont plutôt localisées au niveau du chenal et du panache à l'embouchure. Il semblerait que les anomalies soient significativement impactées par le forçage hydrologique. Ainsi, durant les années plus humides (2013-2015), l'anomalie de SSC est davantage positive avec une intensification du panache turbide. Par contre, les années énergétiques en termes de tempêtes (2007-2008) ne font pas apparaître de comportement particulier sur la SSC.

Afin de mieux caractériser ces variabilités, l'analyse de ces résultats doit être approfondie à des échelles de temps plus courtes (cycles vives eaux/mortes eaux, crue/étiage, tempêtes ...), ce qui fait partie des perspectives d'utilisation des rejeux hydro-sédimentaires du projet ARES. Enfin, ces résultats permettent d'illustrer la variabilité interannuelle de certaines variables environnementales de l'estuaire, mais ils n'ont pas vocation à décrire une analyse exhaustive de son fonctionnement. La déclinaison des illustrations (anomalies horizontales '2DH' et verticales '2DV') pour les différentes variables étudiées (température, salinité, SSC) sont présentées en annexes. Des analyses plus spécifiques de ces rejeux pourront se faire par la suite en collaboration avec le GIPSA et/ou l'Iremer (DYNECO/DHYSYD).

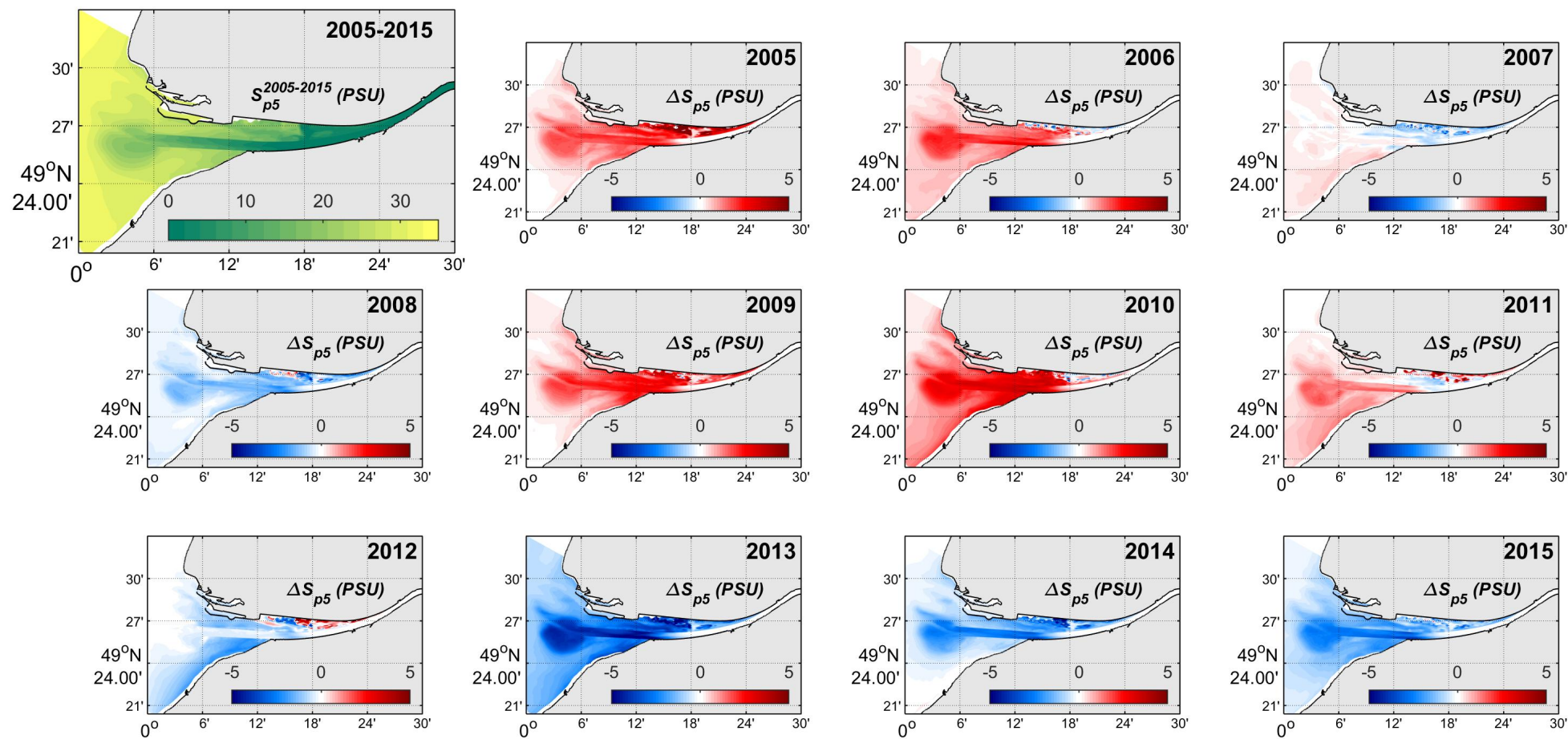


Figure 23. Anomalies annuelles (de 2005 à 2015) du percentile 5 de la salinité moyennée sur la colonne d'eau, par rapport à la climatologie 2005-2015 (panneau supérieur gauche).

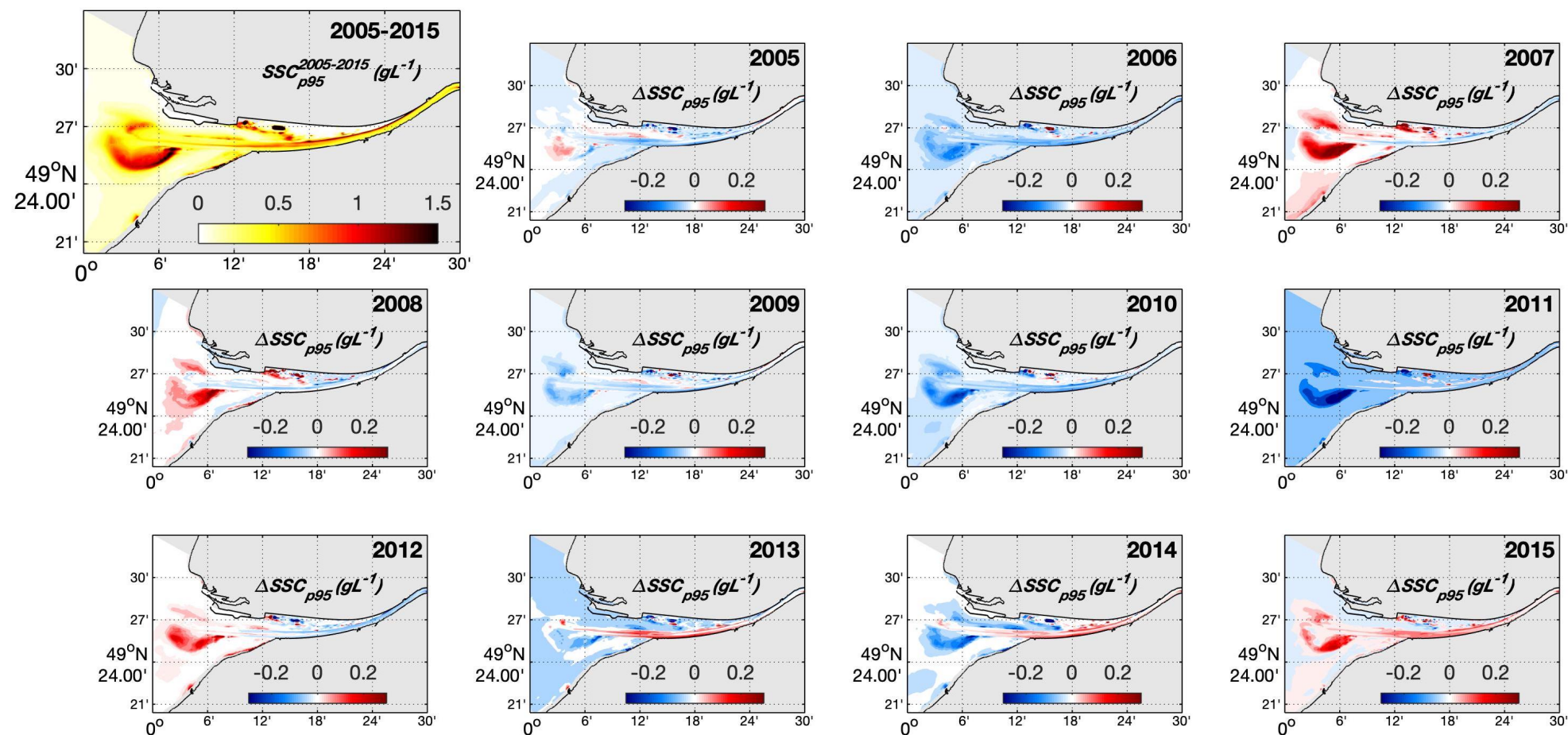


Figure 24. Anomalies annuelles (de 2005 à 2015) du percentile 95 de la concentration en sédiments en suspension moyennée sur la colonne d'eau, par rapport à la climatologie 2005-2015 (panneau supérieur gauche).

## CONCLUSION

Le modèle MARS3D « CurviSeine » a été utilisé pour produire deux rejeux de simulation de la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire de Seine, distincts par les forçages hydro-météorologiques utilisés. Le rejeu « historique », couvre les périodes 1990-2000 (bathymétrie 1995) et 2005-2015 (bathymétrie 2010), tandis que le rejeu « référence » couvre la période 2009-2018.

La comparaison des résultats du rejeu « référence » avec les données du réseau PHRESQUES sur la période 2015-2018 met en évidence la bonne capacité du modèle à représenter les conditions hydrologiques de l'estuaire de Seine. Les variations saisonnières de température sont bien reproduites, malgré une légère surestimation des températures hivernales en aval (Fatouville et Tancarville). De même, le modèle capte bien les variations de salinité et de concentration en sédiments en suspension des cycles de VE/ME à l'échelle de l'estuaire, ce qui indique un comportement hydrodynamique adéquat, malgré une performance généralement moins bonne en période d'étiage. La salinité est surestimée dans l'ensemble de l'estuaire aval, d'au maximum 3 PSU. La SSC est plutôt sous-estimée en amont en période d'étiage, de moins de  $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , mais est très bien représentée en période de crue. En aval, la tendance est inversée, puisque le modèle surestime légèrement l'effet des vagues sur la remise en suspension des sédiments à l'embouchure, ce qui se traduit par des concentrations simulées plus élevées que celle mesurées aux stations SCENES et Balise A ( $\sim 0,06 \text{ g.L}^{-1}$ ).

Les évolutions bathymétriques observées entre 2010 et 2016 induisent des modifications significatives de l'hydrodynamique, de l'hydrologie et de la dynamique des sédiments en suspension dans la partie aval de l'estuaire de Seine. Les courants moyens sont principalement impactés par une intensification de la circulation barocline de l'ordre de  $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ . La remontée des eaux marines induit une augmentation de la salinité moyenne d'environ 1 PSU entre l'engainement et Tancarville. La progradation du banc du Ratier renforce la remise en suspension des sédiments à l'embouchure (au maximum  $+0,5 \text{ g.L}^{-1}$ ), mais le niveau de concentration de sédiments en suspension est principalement réduit dans l'estuaire par le biais de la réduction de l'intensité maximale des courants de fond (approfondissement du chenal). Au vu de cette analyse, il est conseillé de mettre à jour régulièrement la bathymétrie pour optimiser le réalisme des simulations futures du rejeu ARES. Il paraîtrait raisonnable d'adopter une période d'actualisation de l'ordre de 3 à 5 ans.

La comparaison des conditions hydrologiques moyennes des deux périodes du rejeu « historique » mettent en évidence un réchauffement moyen de l'estuaire de l'ordre de  $0,2^\circ\text{C}$ , ainsi qu'une intrusion saline plus importante en profondeur, favorisée par l'approfondissement du chenal de navigation. De plus, la concentration en sédiments en suspension augmente légèrement dans l'estuaire amont (Fatouville-Tancarville), ce qui pourrait être expliqué par le rétrécissement de l'estuaire entre 1995 et 2010, dû aux travaux d'extension de Port 2000, qui induit une intensification des asymétries de marée, et donc du pompage tidal.

L'analyse comparative des deux périodes du rejeu « historique » à des échelles temporelles plus fines (saisonnières, cycle vive-eau/morte-eau, tempêtes, etc.) permettra d'approfondir l'analyse de l'évolution du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de Seine, et fait partie des perspectives d'utilisation des simulations du projet ARES.



## LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Schéma de fonctionnement du couplage MARS3D-Wavewatch3-MUSTANG.	6
Figure 2. Grille bathymétrique du modèle, position des affluents, et emprise spatiale des forçages atmosphériques (noir) et des conditions aux frontières en terme de vagues (rouge), pour les rejeux « historique » et « référence ».	7
Figure 3. Bathymétries 1995, 2010 et 2016, utilisées pour les rejeux.	9
Figure 4. Haut : bathymétries de 2010 (gauche) et 2016 (droite). Bas : différentiel bathymétrique entre 2016 et 2010. Les zones en bleues correspondent à un approfondissement, celles en rouge indiquent une élévation.	10
Figure 5. Différences annuelles moyennes entre les simulations de l'année 2014 sur les bathymétries 2016 et 2010, pour la composante Est du courant de surface (haut), de fond (milieu) et pour la salinité moyenne sur la colonne d'eau (bas).	11
Figure 6. Différences des valeurs maximales (percentile 95) annuelles entre les simulations de l'année 2014 sur les bathymétries 2016 et 2010, pour la composante Est du courant de fond (haut), la tension exercée par ces courants sur le fond (milieu) et pour la concentration de sédiments en suspension (bas).	12
Figure 7. Comparaison des simulations de l'année 2014 sur les bathymétries 2016 et 2010 à Fatouville, sur un cycle VE/ME en période de crue. De haut en bas, le premier panneau montre le débit journalier de la Seine (noir) et le niveau d'eau (vert). Les 3 doubles panneaux suivants montrent les sorties de la simulation avec la bathymétrie 2016 (rouge) et 2010 (bleu) en surface (demi-panneau du haut) et au fond (demi-panneau du bas) pour la composante Est du courant, la salinité et la concentration de sédiments en suspension.	14
Figure 8. Comparaison des simulations de l'année 2014 sur les bathymétries 2016 et 2010 à Fatouville, sur un cycle VE/ME en période d'étiage. De haut en bas, le premier panneau montre le débit journalier de la Seine (noir) et le niveau d'eau (vert). Les 3 doubles panneaux suivants montrent les sorties de la simulation avec la bathymétrie 2016 (rouge) et 2010 (bleu) en surface (demi-panneau du haut) et au fond (demi-panneau du bas) pour la composante Est du courant, la salinité et la concentration de sédiments en suspension.	15
Figure 9. Position des stations de mesures PHRESQUES (points rouges), et points de maille du modèle sur lesquels sont moyennés les paramètres du modèle (rectangles rouges).	16
Figure 10. Haut : débit de la Seine (noir), niveau d'eau (vert) et hauteur significative des vagues (jaune) à l'embouchure. Bas : Comparaison entre la température moyenne par marée, calculée par le modèle (bleu) et mesurée aux stations du réseau PHRESQUES (noir), sous forme de série temporelle (gauche) et de régression linéaire (droite). Les enveloppes de couleurs sur les séries temporelles correspondent aux extrema par cycle de marée.	17
Figure 11. Haut : débit de la Seine (noir), niveau d'eau (vert) et hauteur significative des vagues (jaune) à l'embouchure. Bas : Comparaison entre la salinité moyenne par marée, calculée par le modèle (bleu) et mesurée aux stations du réseau PHRESQUES (noir), sous forme de séries temporelles (gauche) et de régressions linéaires (droite). Les enveloppes de couleurs sur les séries temporelles correspondent aux extrema par cycle de marée.	18
Figure 12. Comparaison de la salinité moyenne par cycle de marée en fonction du débit de la Seine, pour le modèle (bleu) et les mesures (noir), et par classes de débit (cercles bleus pour le modèle et losanges noirs pour les mesures). La barre de couleur représente le nombre de point (i.e. le nombre de marées) par classe de débit de 250 m <sup>3</sup> .	19
Figure 13. Comparaison de la salinité moyenne par cycle de marée en fonction du marnage au Havre, pour le modèle (bleu) et les mesures (noir), et par classes de débit (cercles bleus pour le modèle et losanges noirs pour les mesures). La barre de couleur représente le nombre de points (i.e. le nombre de marées) par classe de marnage de 0,5 m.	19
Figure 14. Haut : débit de la Seine (noir), niveau d'eau (vert) et hauteur significative des vagues (jaune) à l'embouchure. Bas : Comparaison entre la concentration de sédiments en suspension moyenne par marée, calculée par le modèle (bleu) et mesurée aux stations du réseau PHRESQUES (noir), sous forme de séries temporelles (gauche, échelle logarithmique en ordonnée) et de régressions linéaires (droite, échelles	

logarithmiques). Les enveloppes de couleurs sur les séries temporelles correspondent aux extrema par cycle de marée. A noter que le capteur de mesures à la station SCENES-fond sature au-delà de $0,2 \text{ g.L}^{-1}$ .	20
Figure 15. Comparaison de la concentration en sédiments en suspension moyenne par cycle de marée en fonction du débit de la Seine, pour le modèle (bleu) et les mesures (noir), et par classes de débit (cercles bleus pour le modèle et losanges noirs pour les mesures). La barre de couleur représente le nombre de point (i.e. le nombre de marées) par classe de débit de $250 \text{ m}^3$ . Il faut noter que le capteur de mesures à la station SCENES-fond sature au-delà de $0,2 \text{ g.L}^{-1}$ .	21
Figure 16. Comparaison de la concentration en sédiments en suspension moyenne par cycle de marée en fonction du marnage au Havre, pour le modèle (bleu) et les mesures (noir), et par classes de débit (cercles bleus pour le modèle et losanges noirs pour les mesures). La barre de couleur représente le nombre de points (i.e. le nombre de marées) par classe de marnage de $0,5 \text{ m}$ . A noter que le capteur de mesures à la station SCENES-fond sature au-delà de $0,2 \text{ g.L}^{-1}$ .	22
Figure 17. Comparaison de la concentration en sédiments en suspension instantanée en fonction de la hauteur significative des vagues à l'embouchure, pour le modèle (bleu) et les mesures (noir), et par classes de hauteurs de vagues (cercles bleus pour le modèle et losanges noirs pour les mesures). La barre de couleur représente le nombre de points par classe de hauteurs de vagues de $0,5 \text{ mètre}$ . A noter que le capteur de mesures à la station SCENES-fond sature au-delà de $0,2 \text{ g.L}^{-1}$ .	23
Figure 18. Grilles bathymétriques de 1995 (utilisée pour la période 1990-2000) et 2010 (utilisée pour 2005-2015). La ligne rouge représente la radiale le long de laquelle sont comparés les résultats sur la colonne d'eau.	24
Figure 19. Climatologies de la température moyenne de la colonne d'eau le long de la radiale longitudinale au milieu de l'estuaire de la Seine, pour 1990-2000 (haut) et 2005-2015 (bas).	24
Figure 20. Climatologies du percentile 95 de la salinité de la colonne d'eau sur une radiale longitudinale au milieu de l'estuaire de la Seine, pour 1990-2000 (haut) et 2005-2015 (bas).	25
Figure 21. Climatologies de la concentration moyenne de sédiments en suspension de la colonne d'eau sur une radiale longitudinale au milieu de l'estuaire de la Seine, pour 1990-2000 (haut) et 2005-2015 (bas).	25
Figure 22. Principaux forçages de l'estuaire : débit des affluents (haut), hauteur significative des vagues à l'embouchure (milieu) et vitesse moyenne des vents sur l'ensemble de la grille du modèle (bas). Sur chaque graphique, la courbe grise représente la valeur journalière (pour le débit) ou horaire (pour la hauteur des vagues et la vitesse du vent), les points bleus représentent la moyenne annuelle et les crochets bleus les percentiles 5 et 95 annuels. Les lignes pointillées horizontales représentent la moyenne et le percentile 95 de la période totale ; 26 ans (1990-2015) pour le débit, et 22 ans (1990-2000 et 2005-2015) pour la hauteur des vagues et la vitesse du vent.	26
Figure 23. Anomalies annuelles (de 2005 à 2015) du percentile 5 de la salinité moyennée sur la colonne d'eau, par rapport à la climatologie 2005-2015 (panneau supérieur gauche).	27
Figure 24. Anomalies annuelles (de 2005 à 2015) du percentile 95 de la concentration en sédiments en suspension moyennée sur la colonne d'eau, par rapport à la climatologie 2005-2015 (panneau supérieur gauche).	28
Figure 25. Anomalies annuelles de la température moyenne de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.	35
Figure 26. Anomalies annuelles de la température minimale (percentile 5, gauche) et maximale (percentile 95, droite) de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 1990-2000. Les panneaux supérieurs représentent la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.	36
Figure 27. Anomalies annuelles de la température moyenne sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.	37

Figure 28. Anomalies annuelles de la température minimale (percentile 5) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	38
Figure 29. Anomalies annuelles de la température maximale (percentile 95) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	39
Figure 30. Anomalies annuelles de la température moyenne de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	40
Figure 31. Anomalies annuelles de la température minimale (percentile 5, gauche) et maximale (percentile 95, droite) de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 2005-2015. Les panneaux supérieurs représentent la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie par rapport à la moyenne décennale. _____	41
Figure 32. Anomalies annuelles de la température moyenne sur la colonne d'eau, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	42
Figure 33. Anomalies annuelles de la température minimale (percentile 5) sur la colonne d'eau, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	43
Figure 34. Anomalies annuelles de la température maximale (percentile 95) sur la colonne d'eau, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	44
Figure 35. Anomalies annuelles de la salinité moyenne de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	45
Figure 36. Anomalies annuelles de la salinité minimale (percentile 5, gauche) et maximale (percentile 95, droite) de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 1990-2000. Les panneaux supérieurs représentent la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie par rapport à la moyenne décennale. _____	46
Figure 37. Anomalies annuelles de la salinité moyenne sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	47
Figure 38. Anomalies annuelles de la salinité minimale (percentile 5) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	48
Figure 39. Anomalies annuelles de la salinité maximale (percentile 95) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	49
Figure 40. Anomalies annuelles de la salinité moyenne de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	50
Figure 41. Anomalies annuelles de la salinité minimale (percentile 5, gauche) et maximale (percentile 95, droite) de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 2005-2015. Les panneaux supérieurs représentent la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie par rapport à la moyenne décennale. _____	51
Figure 42. Anomalies annuelles de la salinité moyenne sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	52



Figure 43. Anomalies annuelles de la salinité minimale (percentile 5) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	53
Figure 44. Anomalies annuelles de la salinité maximale (percentile 95) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	54
Figure 45. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension moyenne de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	55
Figure 46. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension minimale (percentile 5, gauche) et maximale (percentile 95, droite) de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 1990-2000. Les panneaux supérieurs représentent la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie par rapport à la moyenne décennale. _____	56
Figure 47. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension moyenne sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	57
Figure 48. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension minimale (percentile 5) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	58
Figure 49. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension maximale (percentile 95) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	59
Figure 50. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension moyenne de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	60
Figure 51. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension minimale (percentile 5, gauche) et maximale (percentile 95, droite) de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 2005-2015. Les panneaux supérieurs représentent la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie par rapport à la moyenne décennale. _____	61
Figure 52. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension moyenne sur la colonne d'eau, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	62
Figure 53. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension minimale (percentile 5) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	63
Figure 54. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension maximale (percentile 95) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale. _____	64

Tableau 1. Récapitulatif des forçages météo-marins pour chaque rejeu. _____	8
---	---

## BIBLIOGRAPHIE

Agoumi, A., 1982. Modélisation du régime thermique de la Manche. PhD Thesis. École Nationale des Ponts et Chaussées.

Bertin, X., Prouteau E., Letetrel C., 2013. A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century. *Global and Planetary Change* 106, 77-83.

Boudiere E., Maisondieu C., Ardhuin F., Accensi M., Pineau-Guillou L., Lepesqueur J., 2013. A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters. *International Journal of Marine Energy*, 3-4, 40-52.

Chapalain M., 2019. Dynamique des matières en suspension en mer côtière : caractérisation, quantification et interactions sédiments/matière organique. PhD Thesis, Université de Bretagne occidentale.

Dodet G., Bertin X., Taborda R., 2010. Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling*, 31, 120-131.

Druine, F., 2018. Flux sédimentaires en estuaire de Seine : Quantification et variabilité multiéchelle sur la base de mesures de turbidité (réseau SYNAPSES). PhD Thesis, Université de Rouen.

Grasso F., Le Hir P., Bassoullet P., 2015. Numerical modelling of mixed-sediment consolidation. *Ocean Dynamics*, 65(4), 607-616.

Grasso F., Le Hir P., 2019. Influence of morphological changes on suspended sediment dynamics in a macrotidal estuary: diachronic analysis in the Seine Estuary (France) from 1960 to 2010. *Ocean Dynamics*, 69(1), 83-100.

Grasso F., Verney R., Le Hir P., *et al.*, 2018. Suspended sediment dynamics in the macrotidal Seine Estuary (France): 1. Numerical modeling of turbidity maximum dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, (123)1, 558-577.

Landemaine, V., 2016. Érosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle. PhD Thesis, Normandie Université.

Lazure P., Dumas F., 2008. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Ressources*, 31, 233-250.

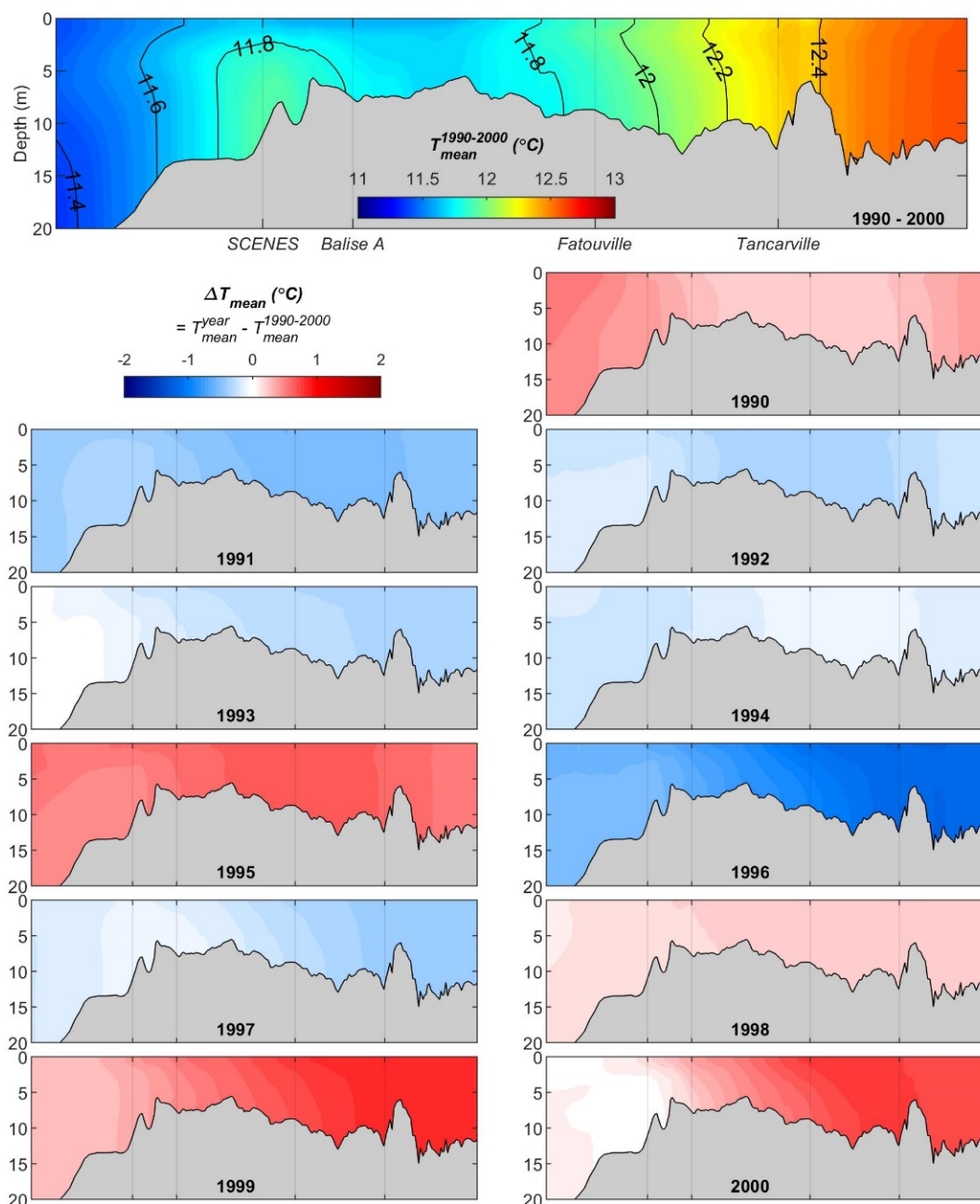
Le Hir P., Cayocca F., Waeles B., 2011. Dynamics of sand and mud mixtures: a multiprocess-based modelling strategy. *Continental Shelf Research*, 31, S135-S149.

Luyten P. J., De Mulder T., 1992. A module representing surface fluxes of momentum and heat. In : *Tech. Rep.*, 9. MUMM Brussels, p. 30.

Ridal, M., Schimanke, S., Hopsch, S., 2018. Documentation of the RRA system: UERRA, deliverable D322\_Lot1.1.1.2 in the scope of the Copernicus service C3S\_322\_Lot1, available via Copernicus.

## ANNEXES

**Annexe 1. Figures d'anomalies annuelles de température, salinité et concentration en sédiments en suspension (moyenne, percentile 5 et percentile 95) par rapport aux climatologies décennales, pour les périodes 1990-2000 et 2005-2015.**



**Figure 25. Anomalies annuelles de la température moyenne de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.**

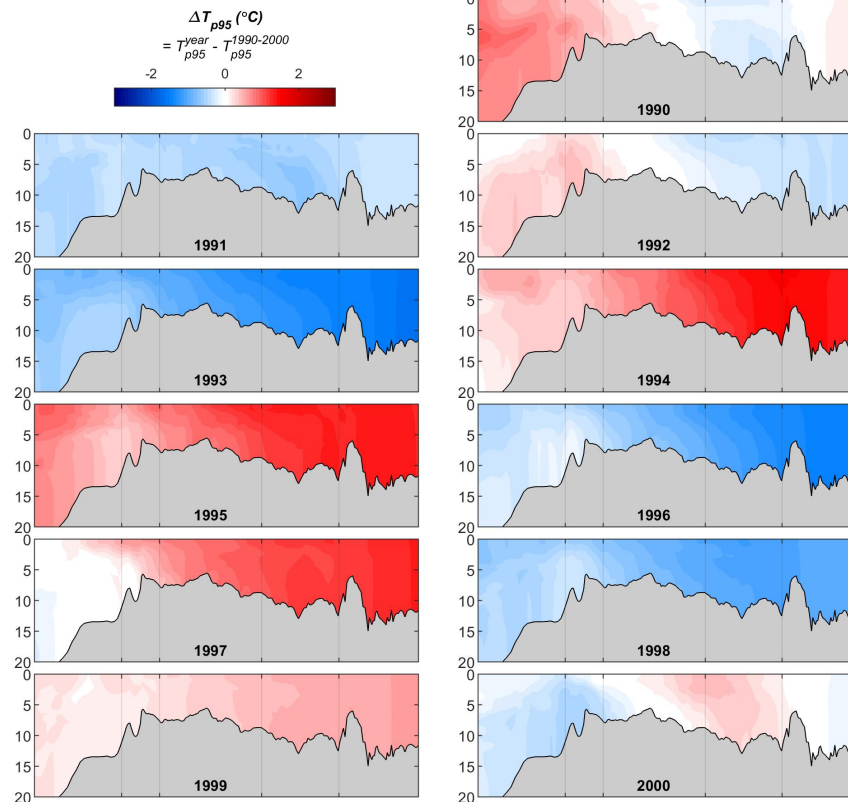
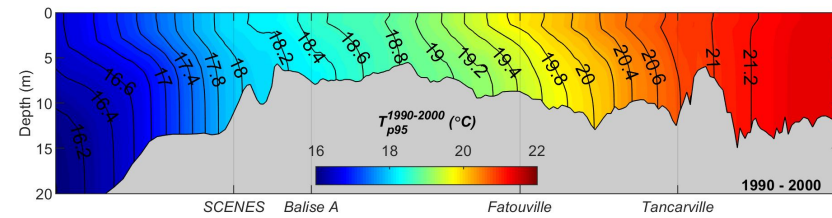
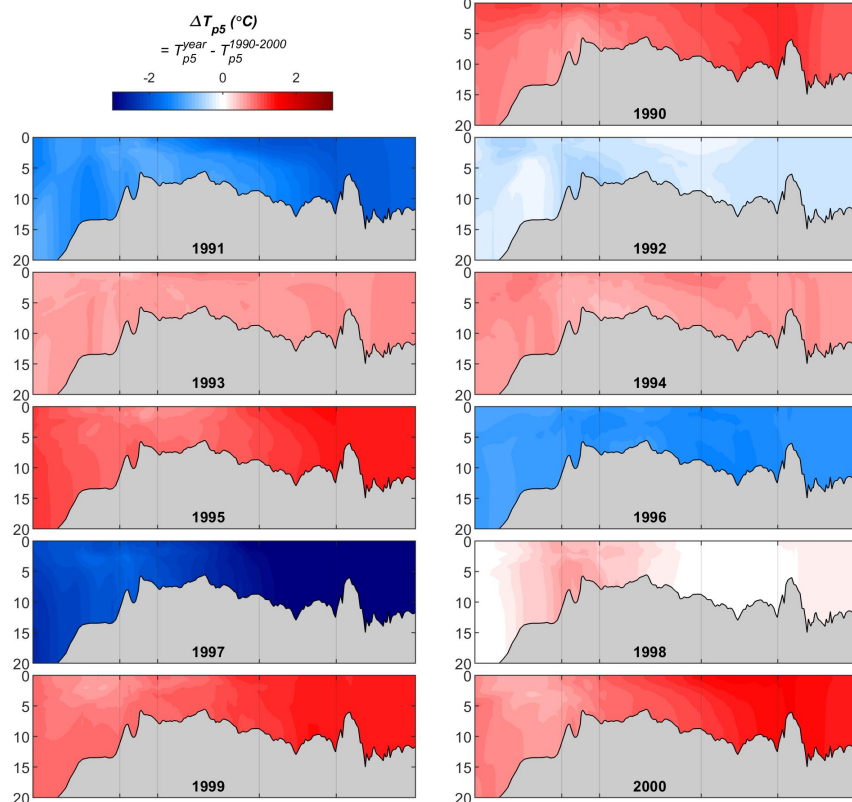
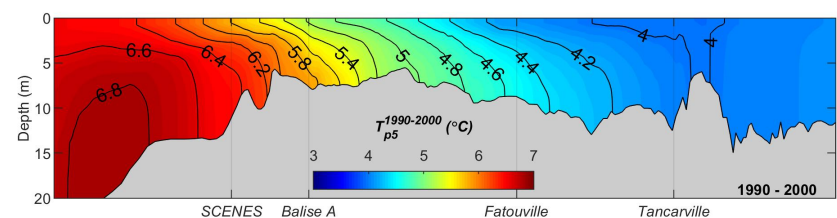


Figure 26. Anomalies annuelles de la température minimale (percentile 5, gauche) et maximale (percentile 95, droite) de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 1990-2000. Les panneaux supérieurs représentent la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.



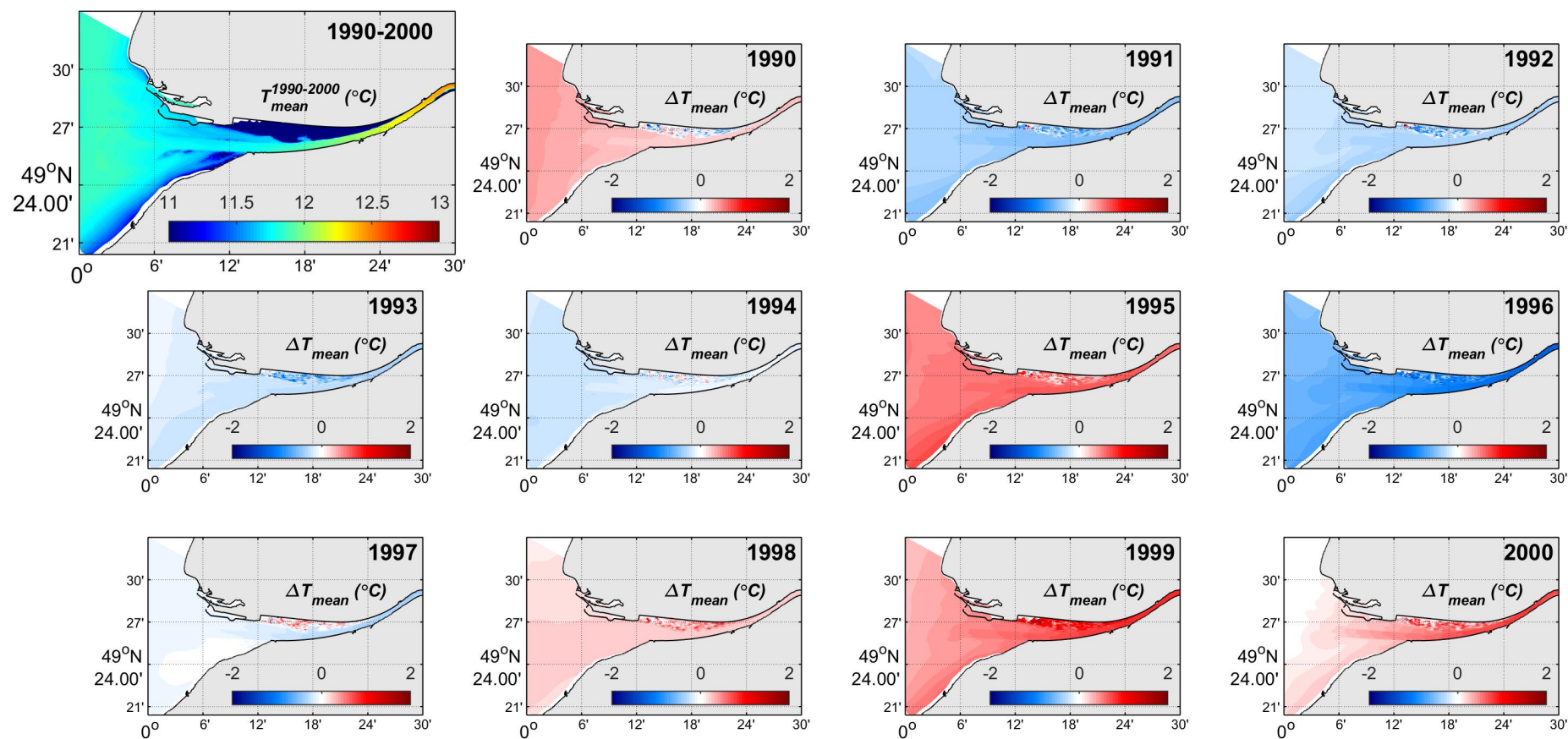


Figure 27. Anomalies annuelles de la température moyenne sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.



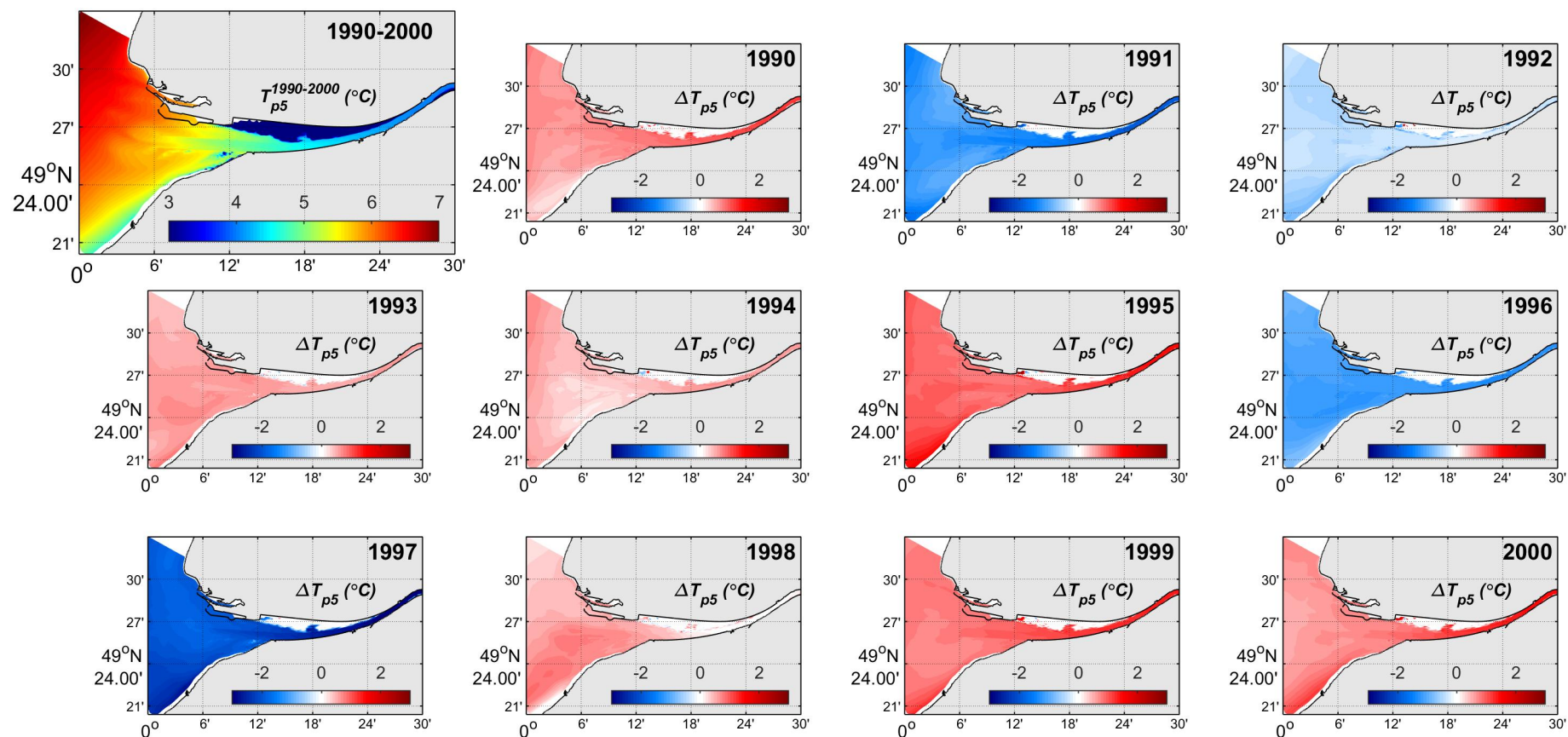


Figure 28. Anomalies annuelles de la température minimale (percentile 5) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.



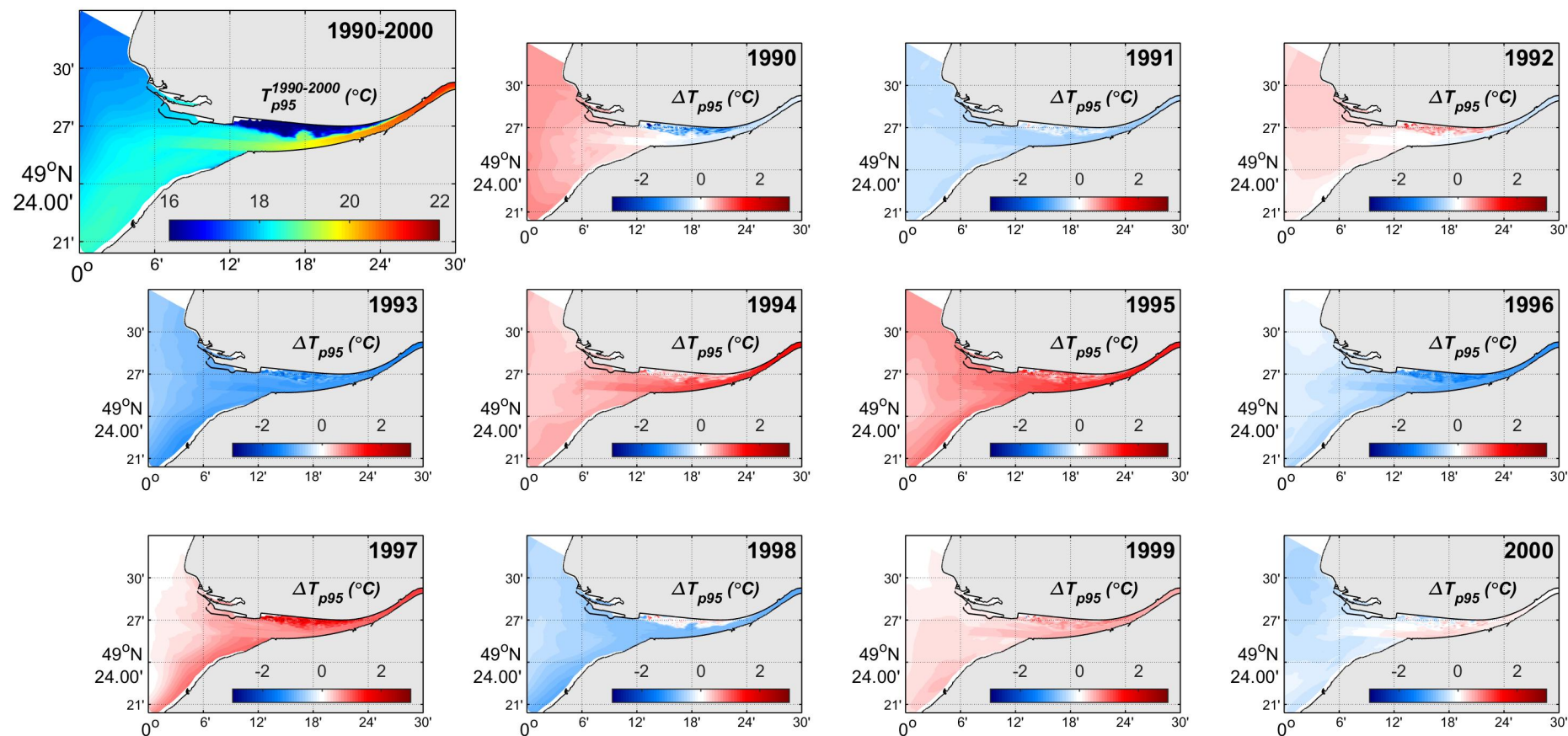


Figure 29. Anomalies annuelles de la température maximale (percentile 95) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.



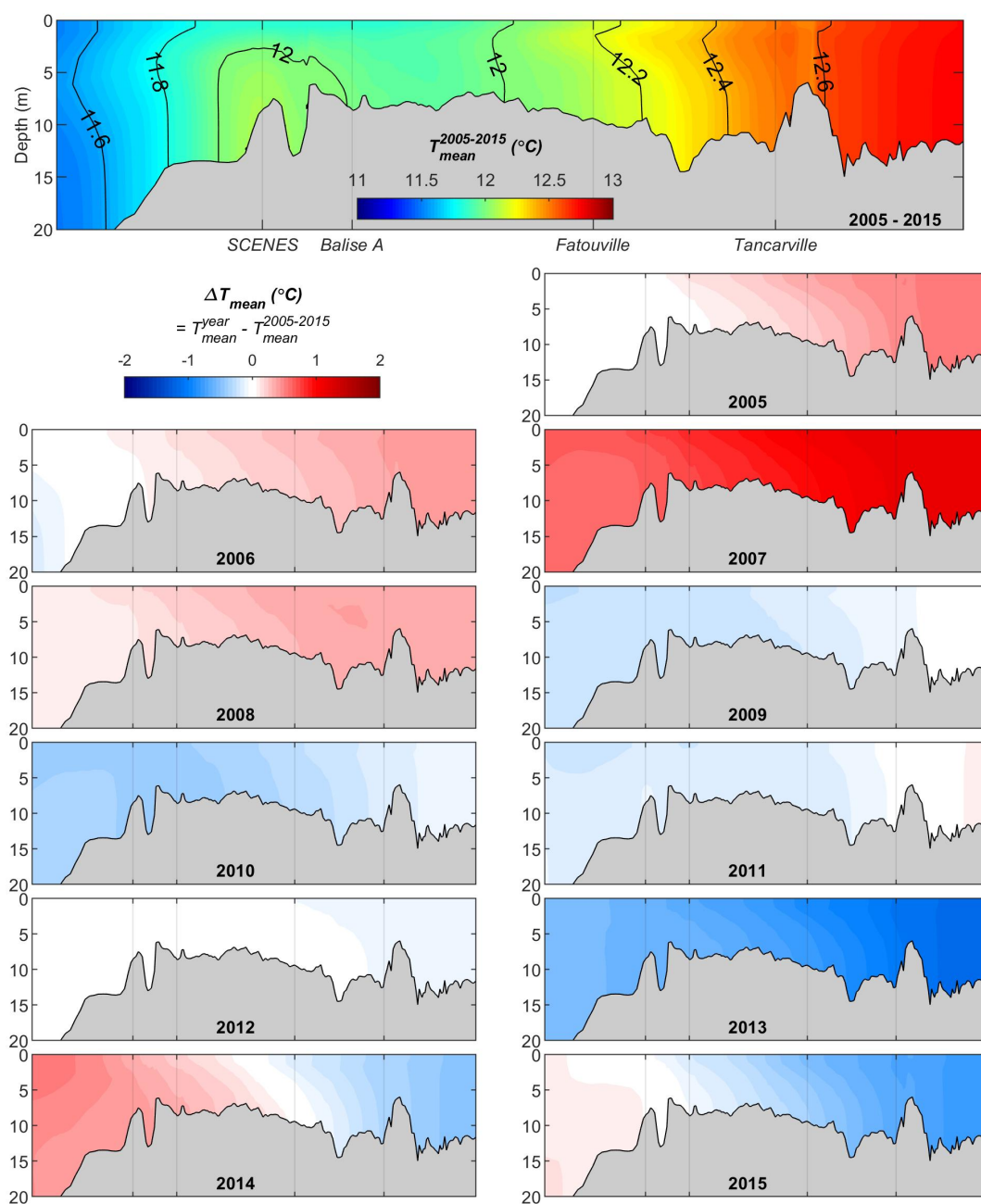


Figure 30. Anomalies annuelles de la température moyenne de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.

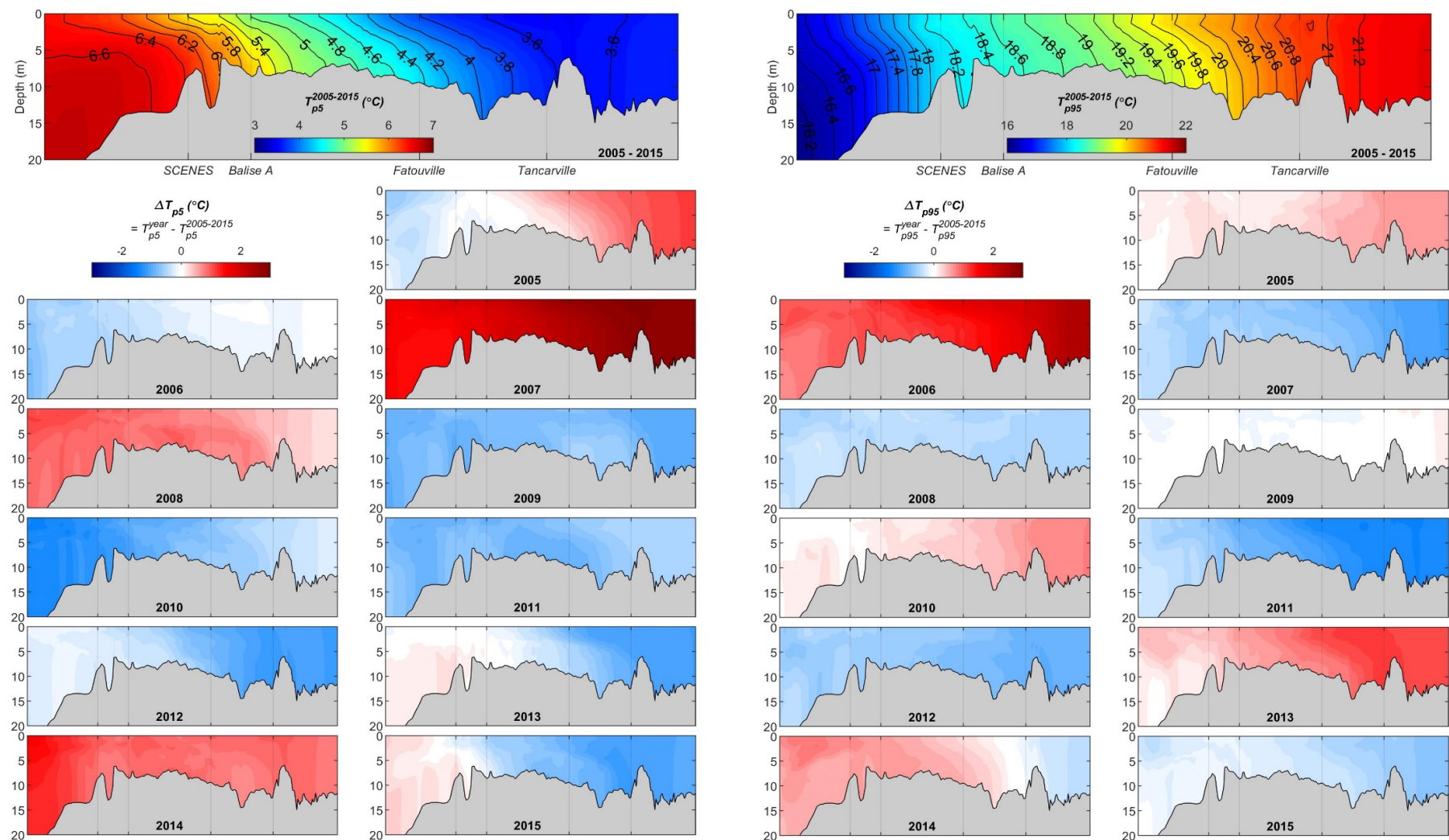


Figure 31. Anomalies annuelles de la température minimale (percentile 5, gauche) et maximale (percentile 95, droite) de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 2005-2015. Les panneaux supérieurs représentent la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie par rapport à la moyenne décennale.





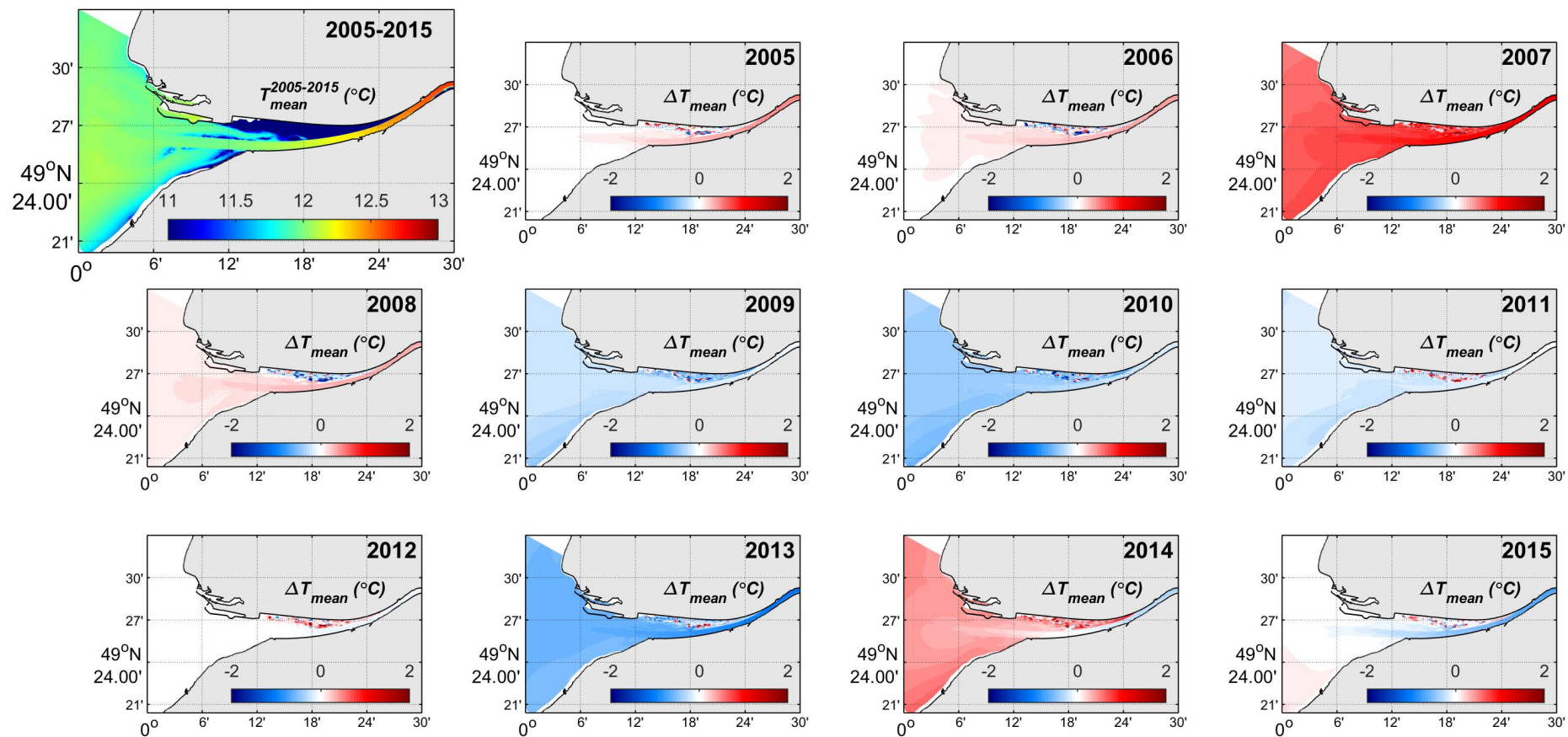


Figure 32. Anomalies annuelles de la température moyenne sur la colonne d'eau, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.

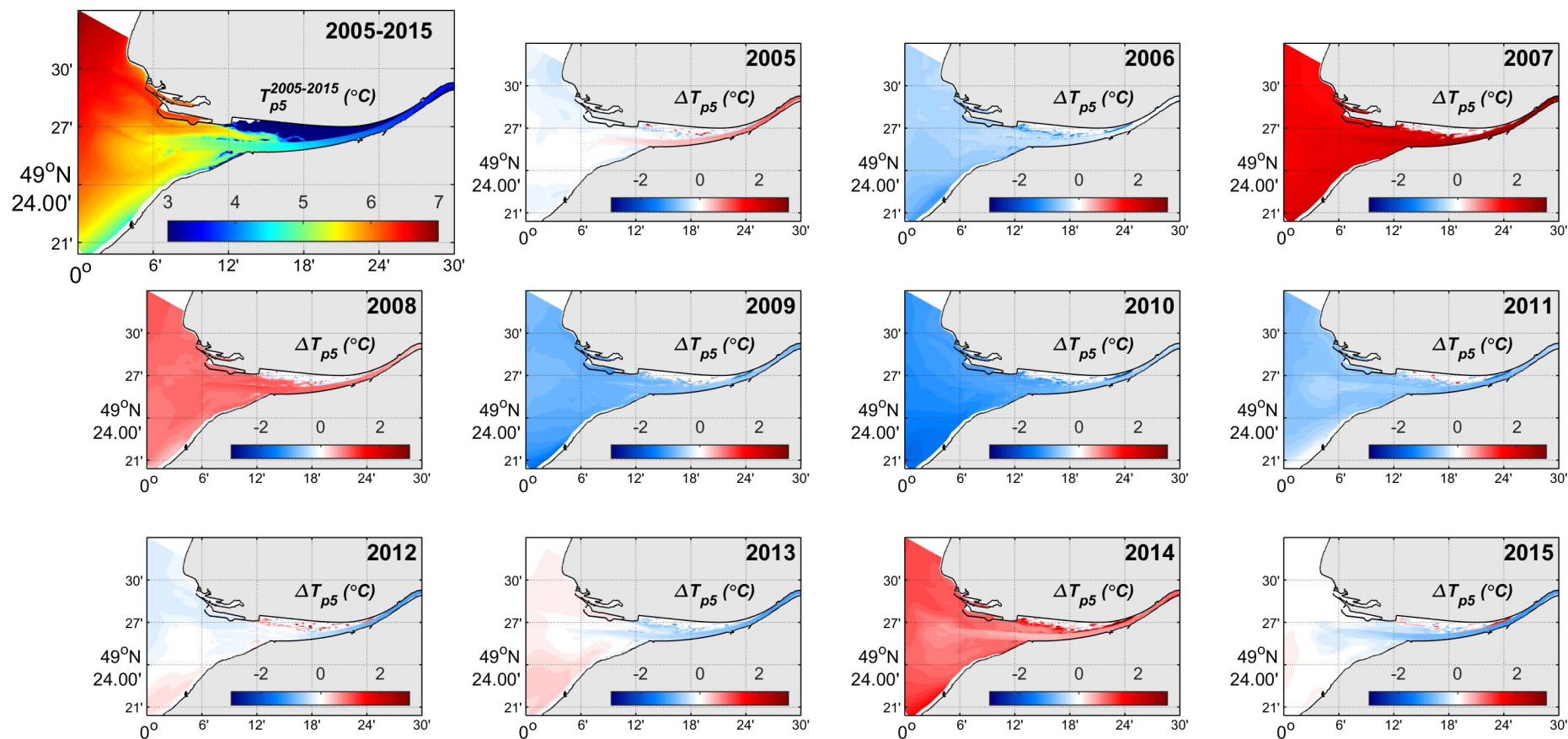


Figure 33. Anomalies annuelles de la température minimale (percentile 5) sur la colonne d'eau, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.

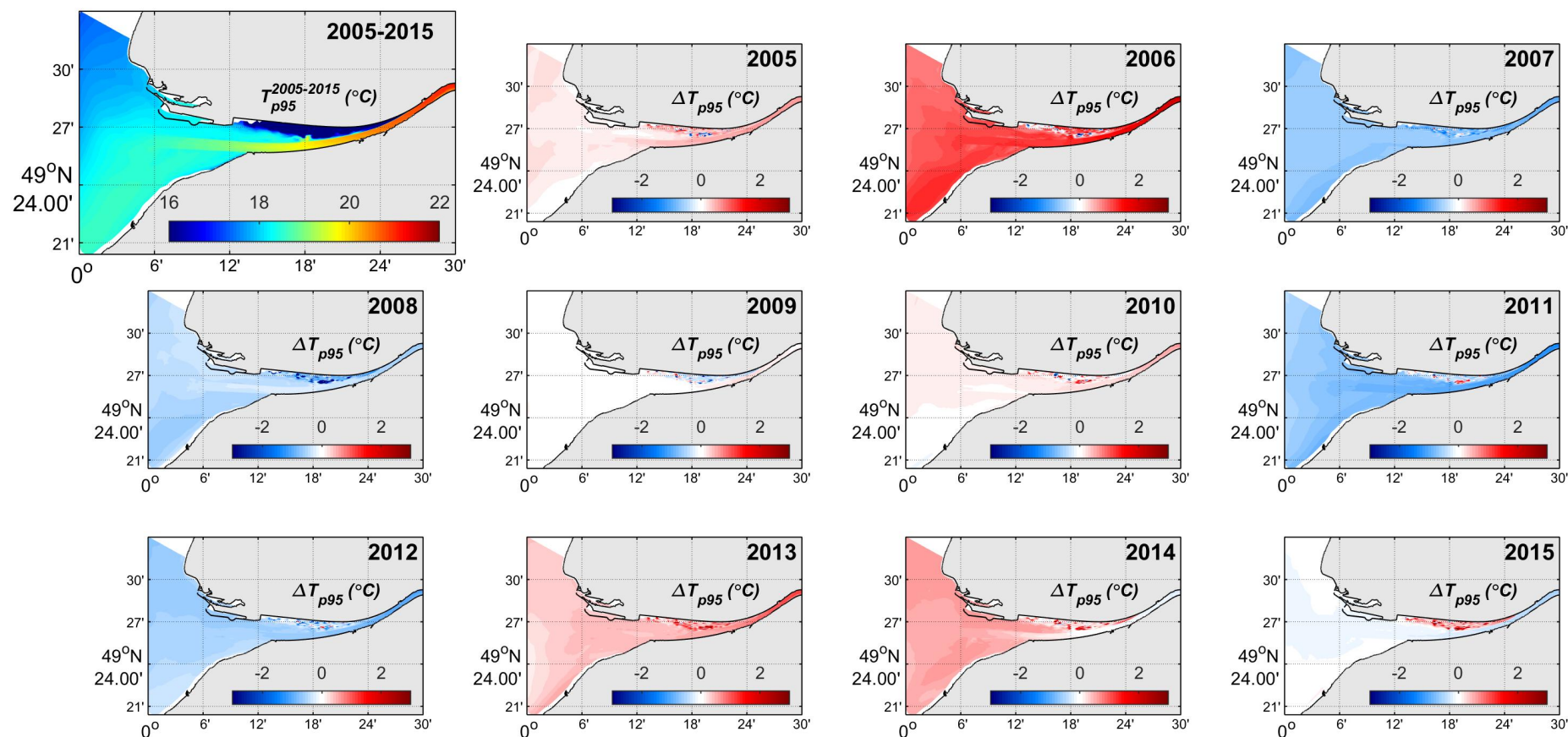


Figure 34. Anomalies annuelles de la température maximale (percentile 95) sur la colonne d'eau, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.

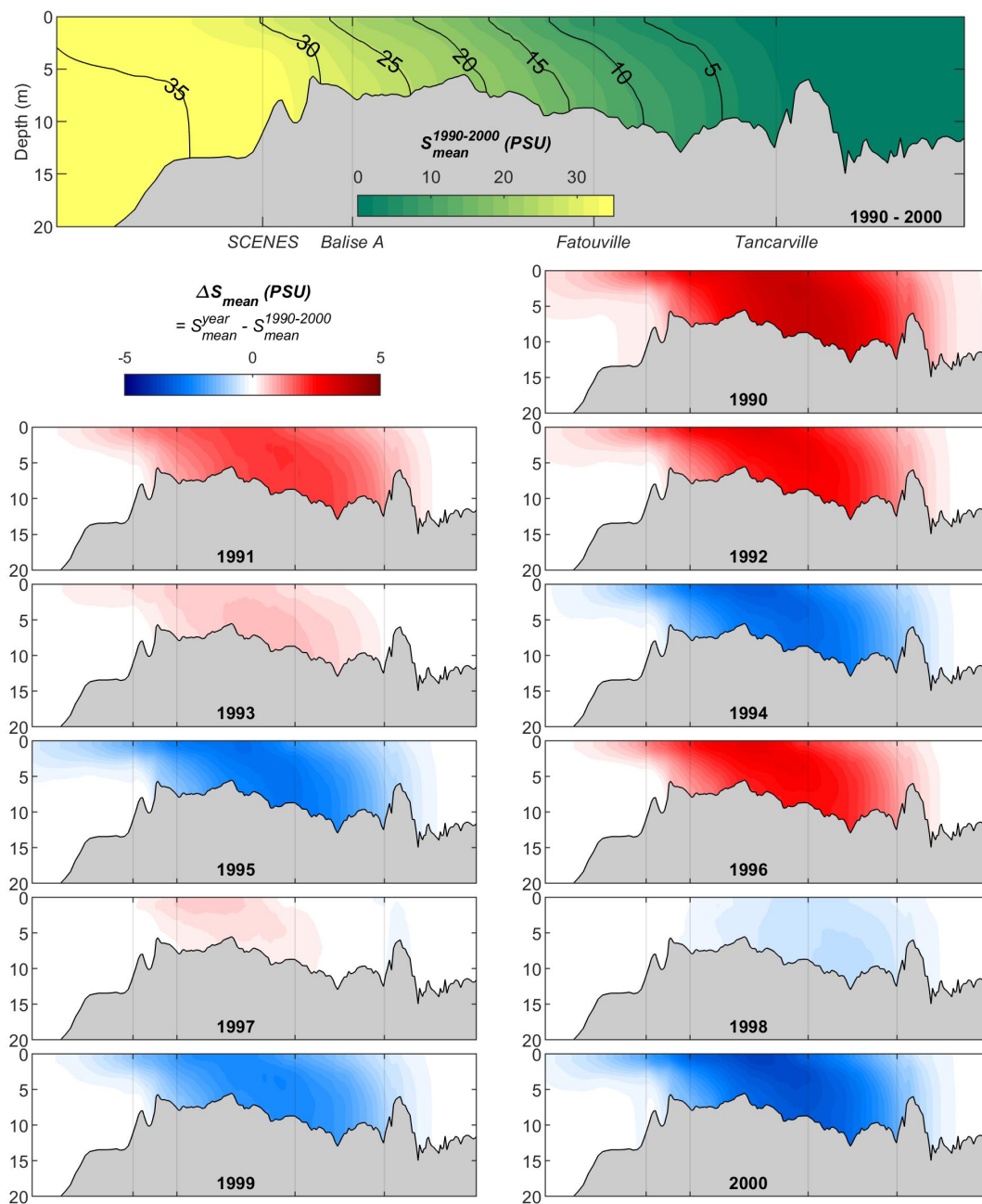


Figure 35. Anomalies annuelles de la salinité moyenne de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.



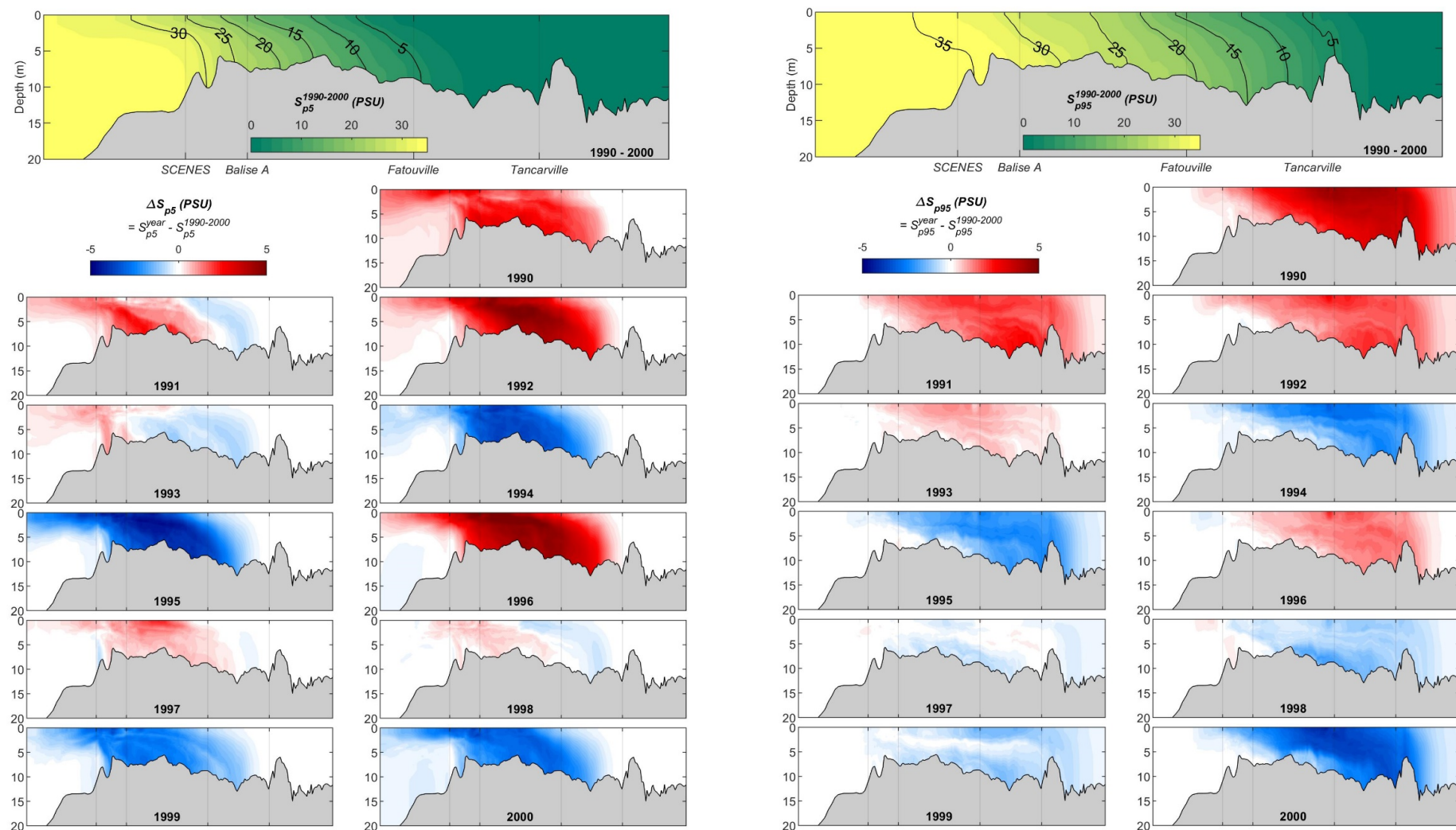


Figure 36. Anomalies annuelles de la salinité minimale (percentile 5, gauche) et maximale (percentile 95, droite) de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 1990-2000. Les panneaux supérieurs représentent la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie par rapport à la moyenne décennale.



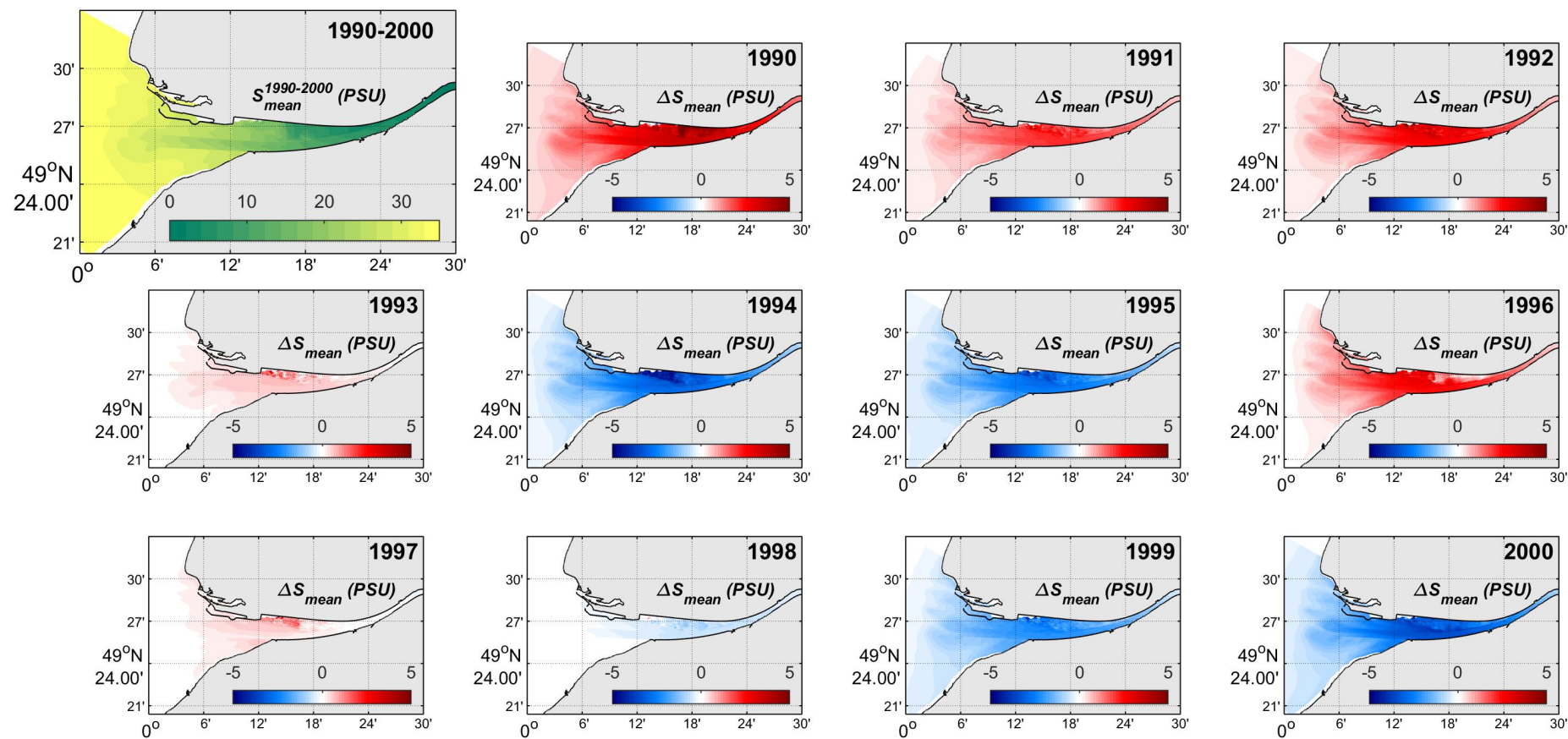


Figure 37. Anomalies annuelles de la salinité moyenne sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.



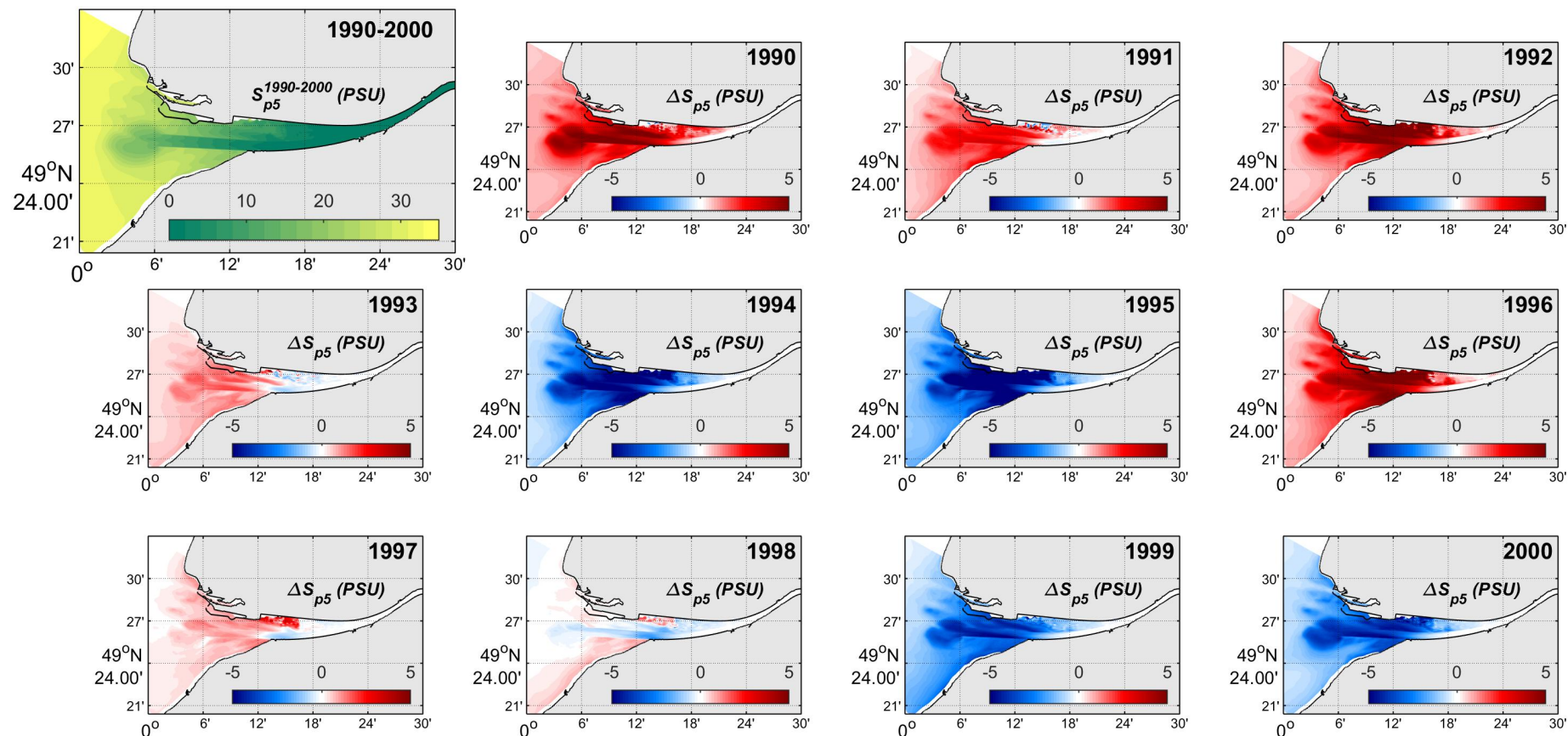


Figure 38. Anomalies annuelles de la salinité minimale (percentile 5) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.





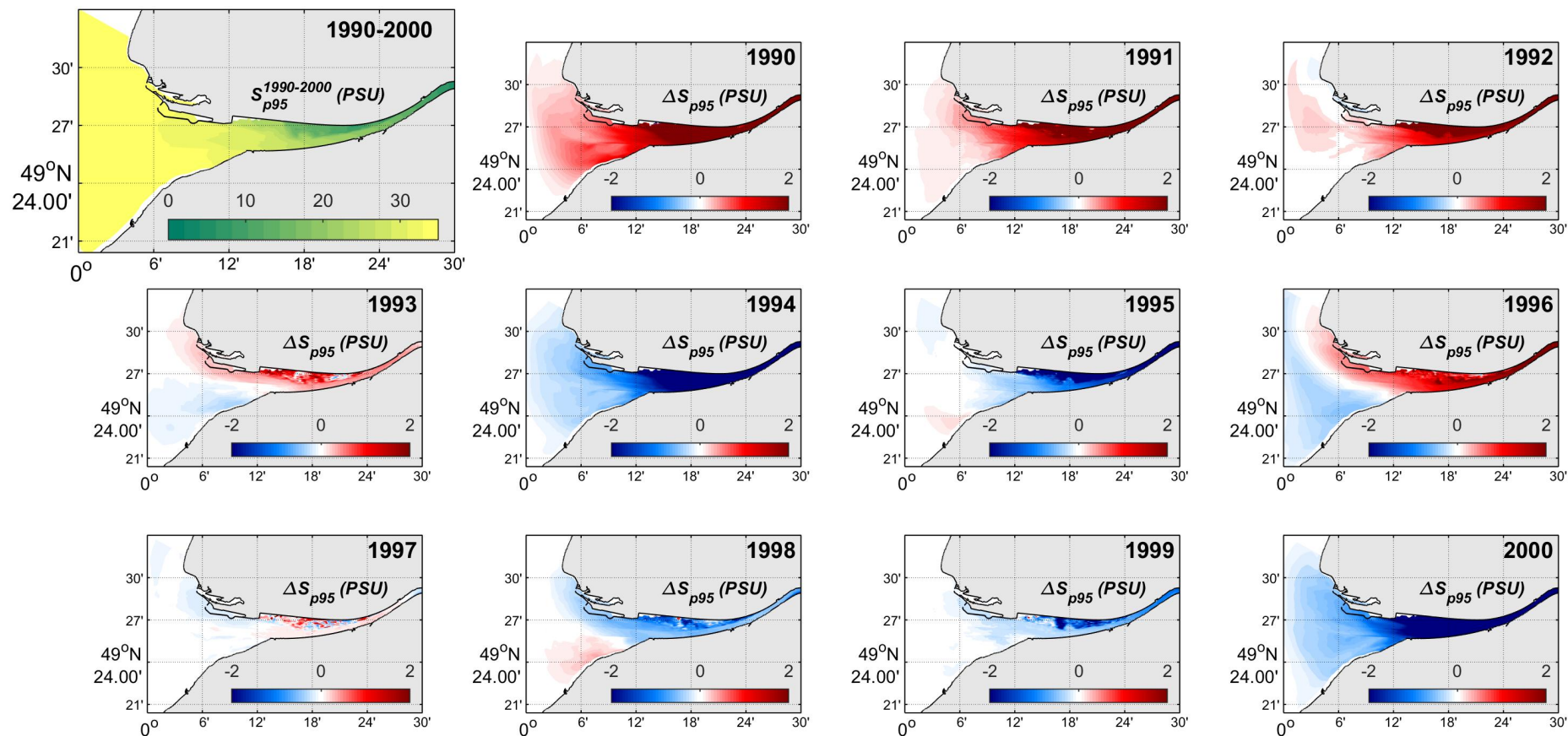


Figure 39. Anomalies annuelles de la salinité maximale (percentile 95) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.



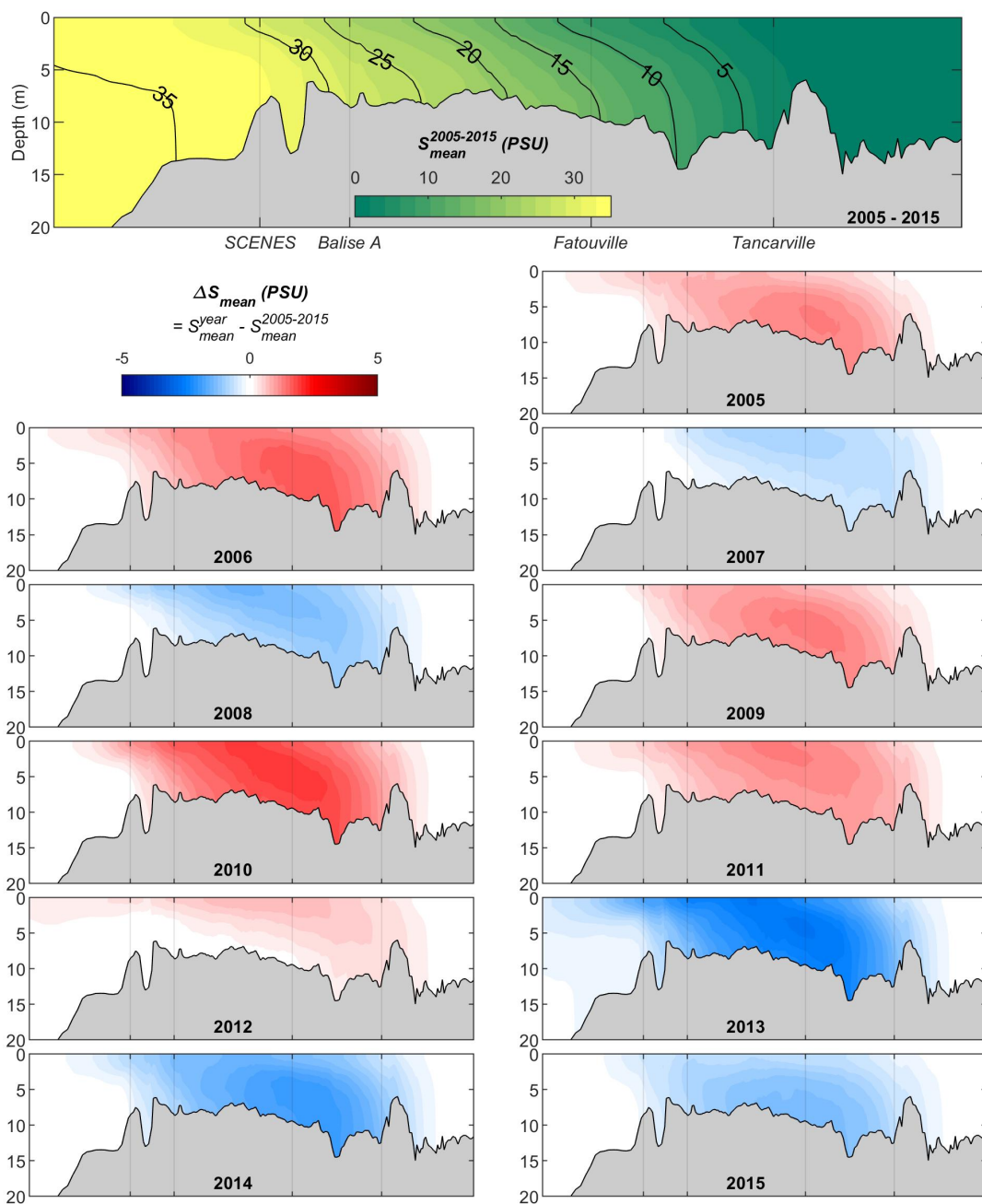


Figure 40. Anomalies annuelles de la salinité moyenne de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.

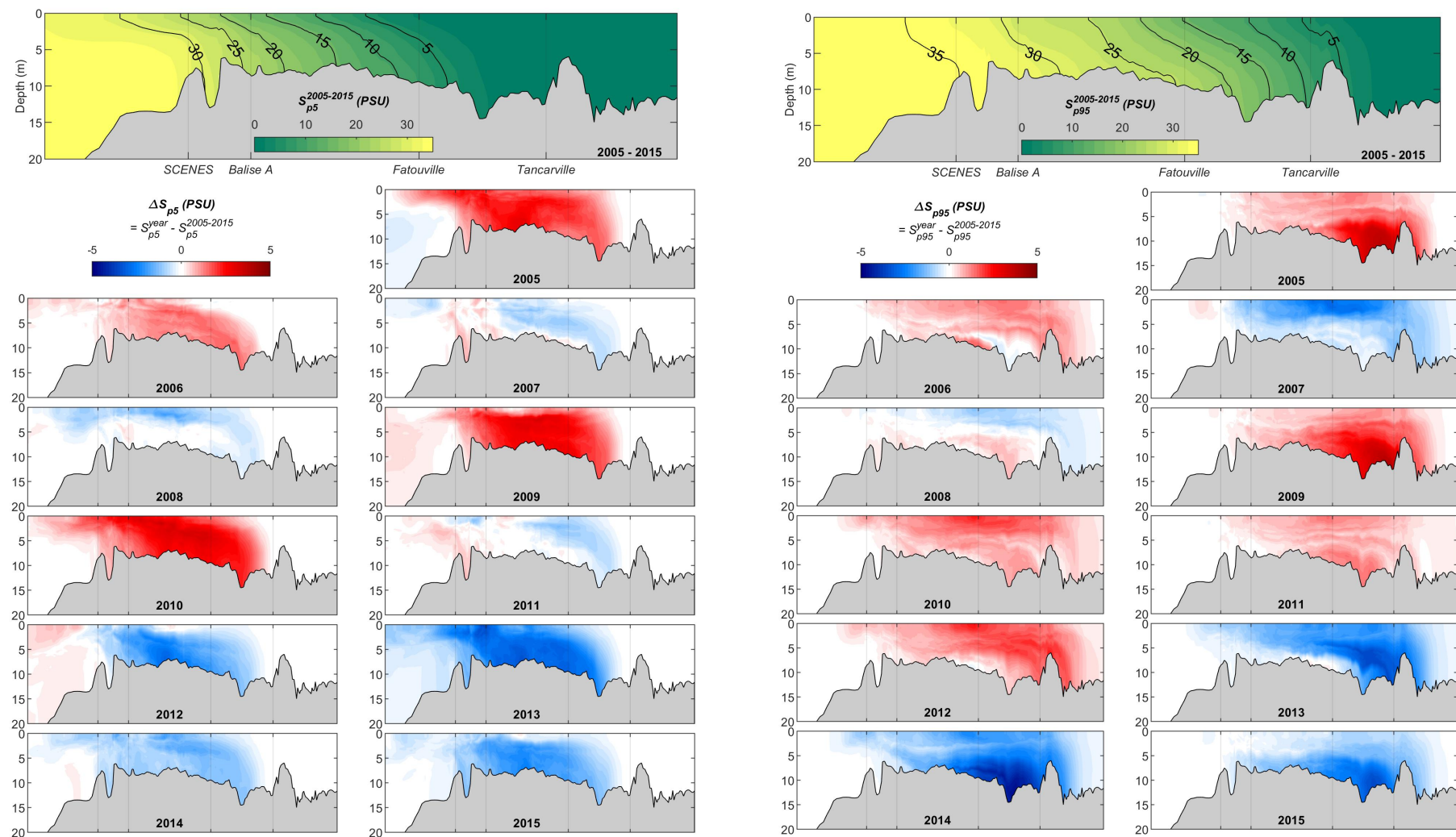


Figure 41. Anomalies annuelles de la salinité minimale (percentile 5, gauche) et maximale (percentile 95, droite) de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 2005-2015. Les panneaux supérieurs représentent la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie par rapport à la moyenne décennale.



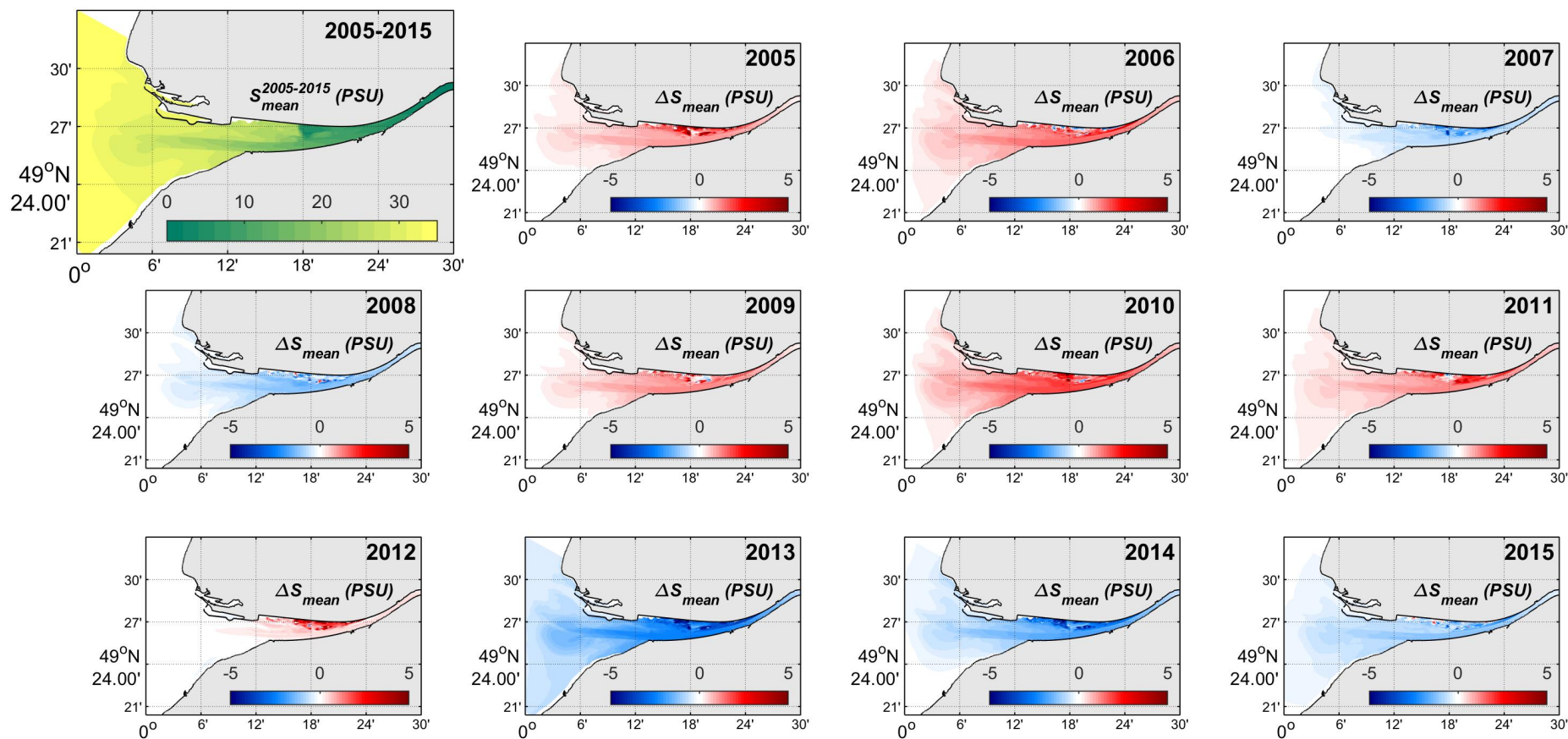


Figure 42. Anomalies annuelles de la salinité moyenne sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.



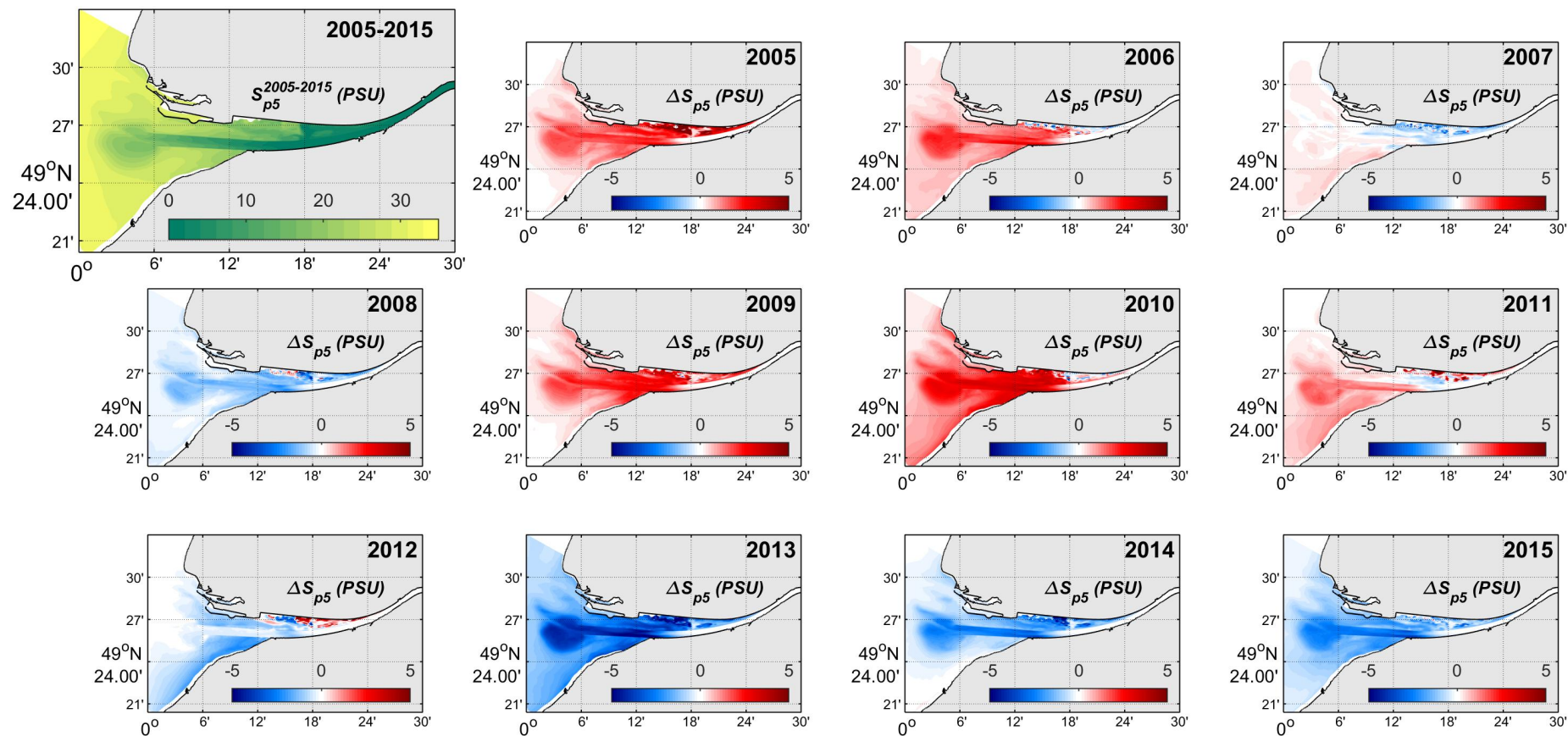


Figure 43. Anomalies annuelles de la salinité minimale (percentile 5) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.





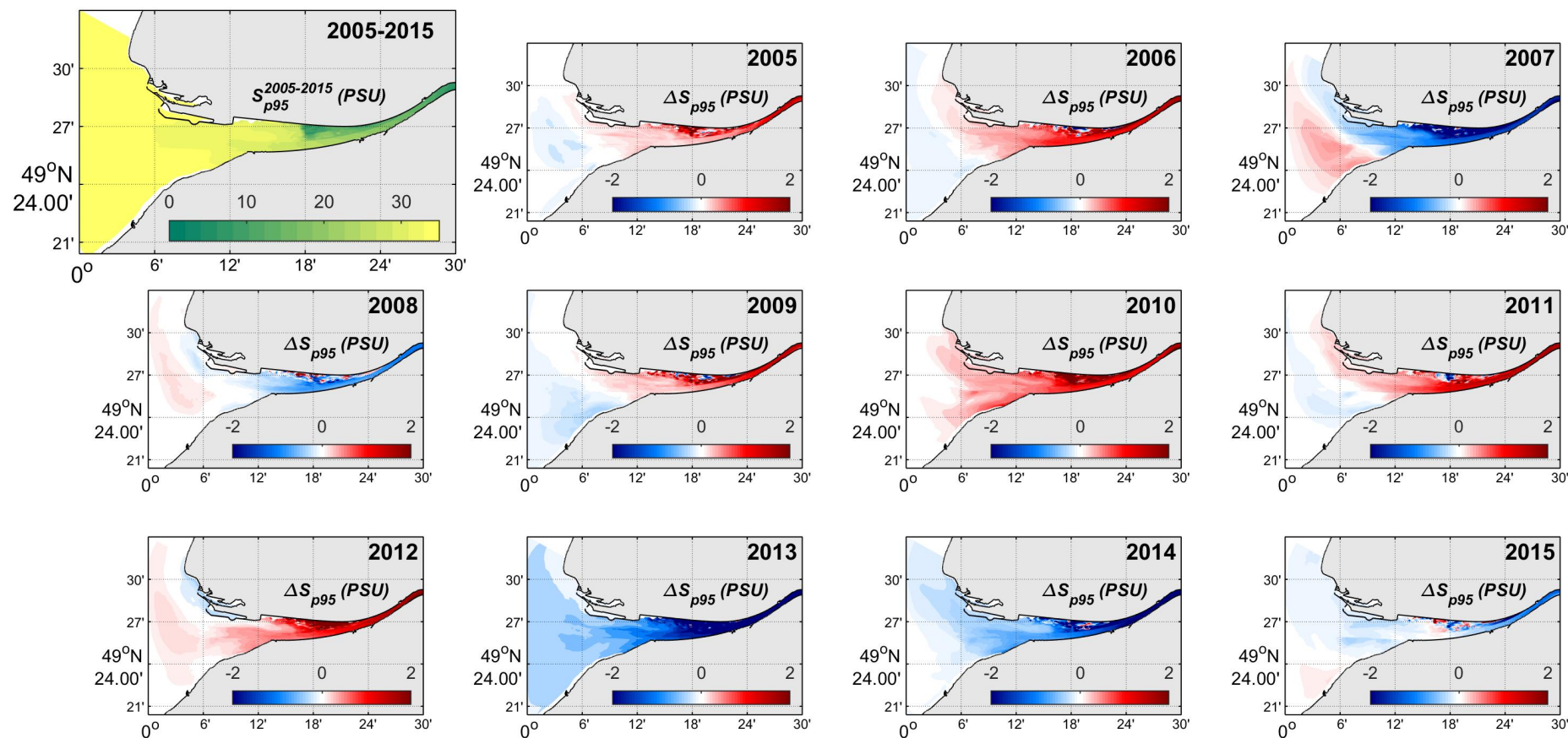


Figure 44. Anomalies annuelles de la salinité maximale (percentile 95) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.



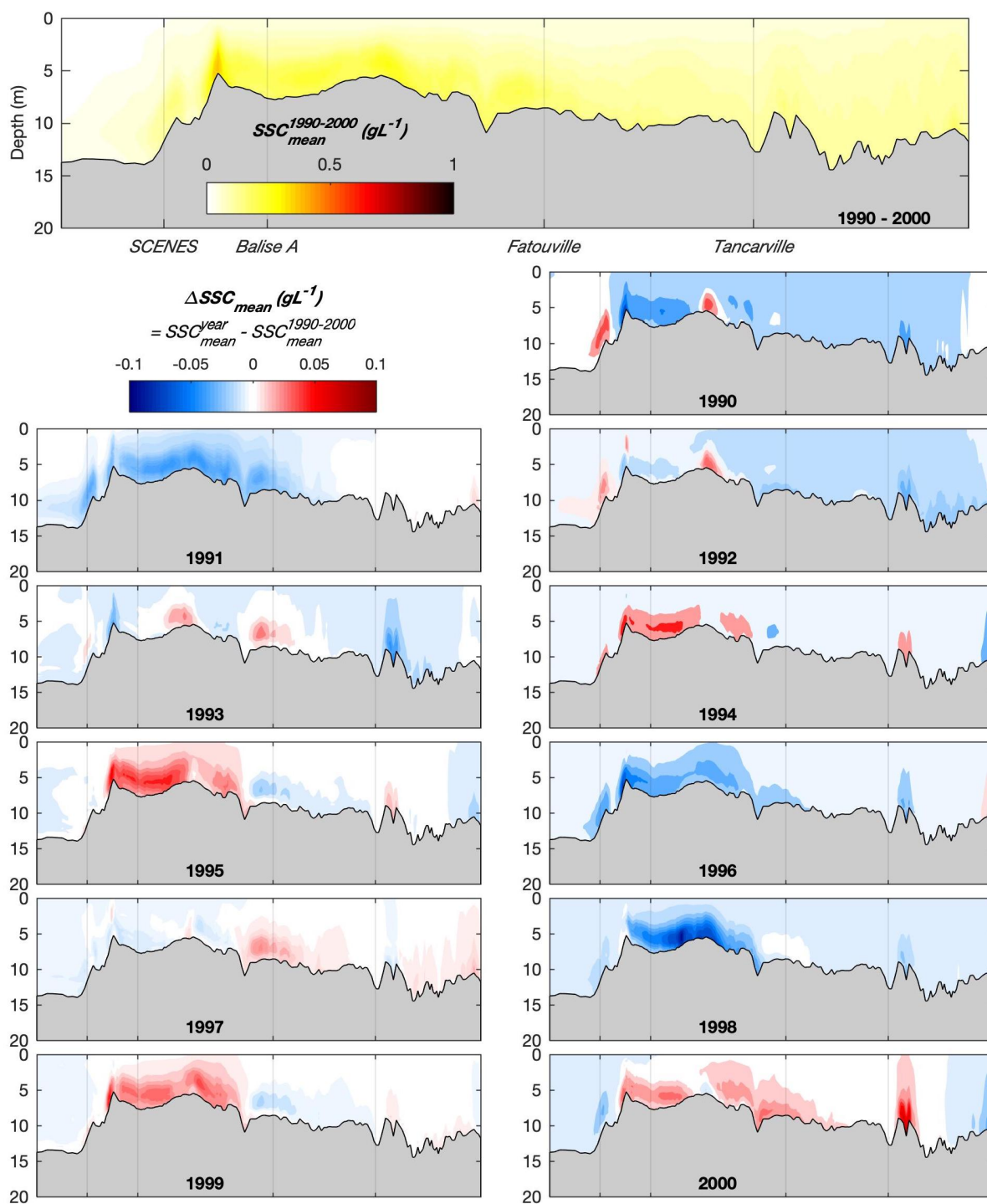


Figure 45. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension moyenne de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.

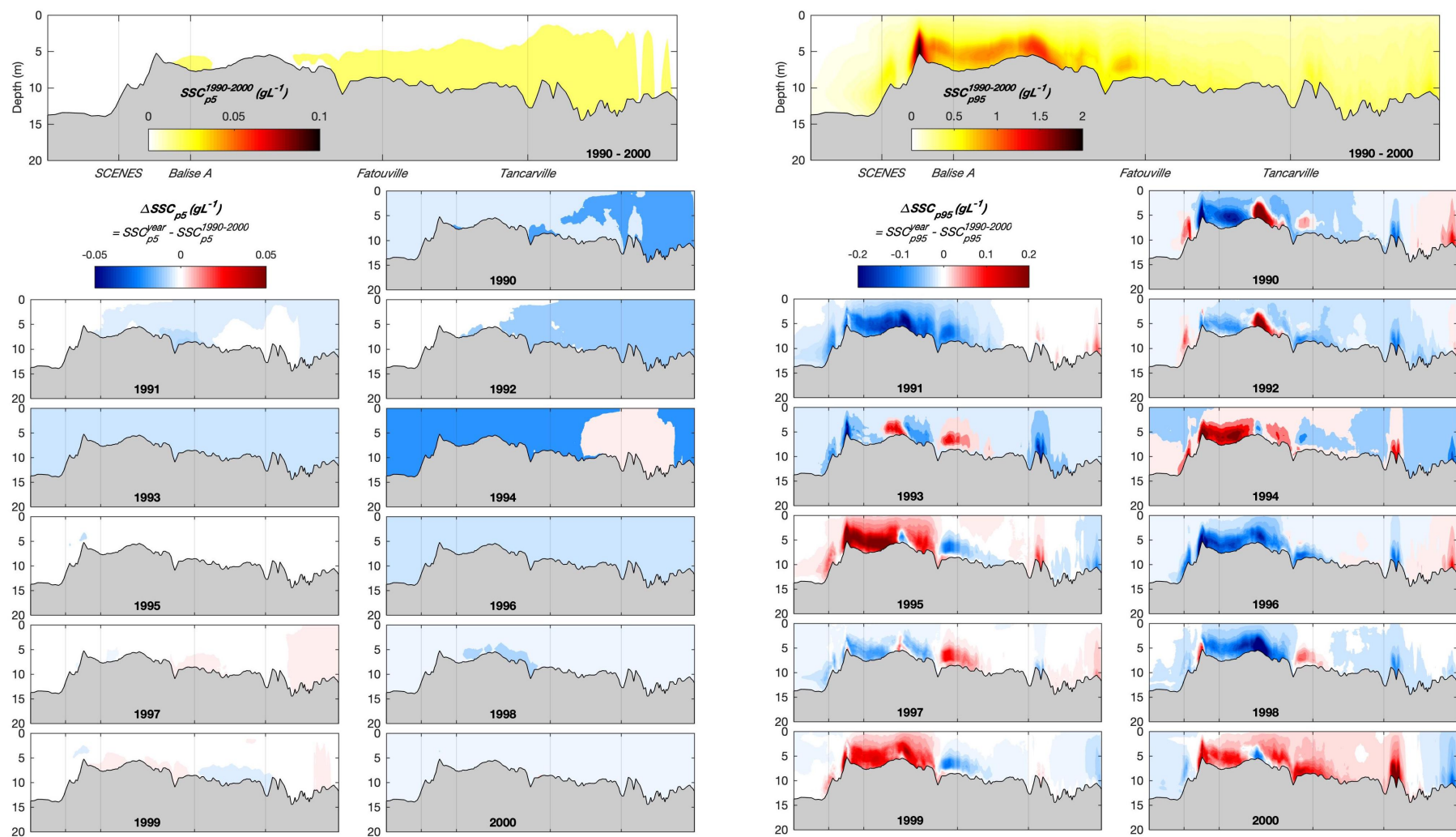


Figure 46. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension minimale (percentile 5, gauche) et maximale (percentile 95, droite) de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 1990-2000. Les panneaux supérieurs représentent la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie par rapport à la moyenne décennale.



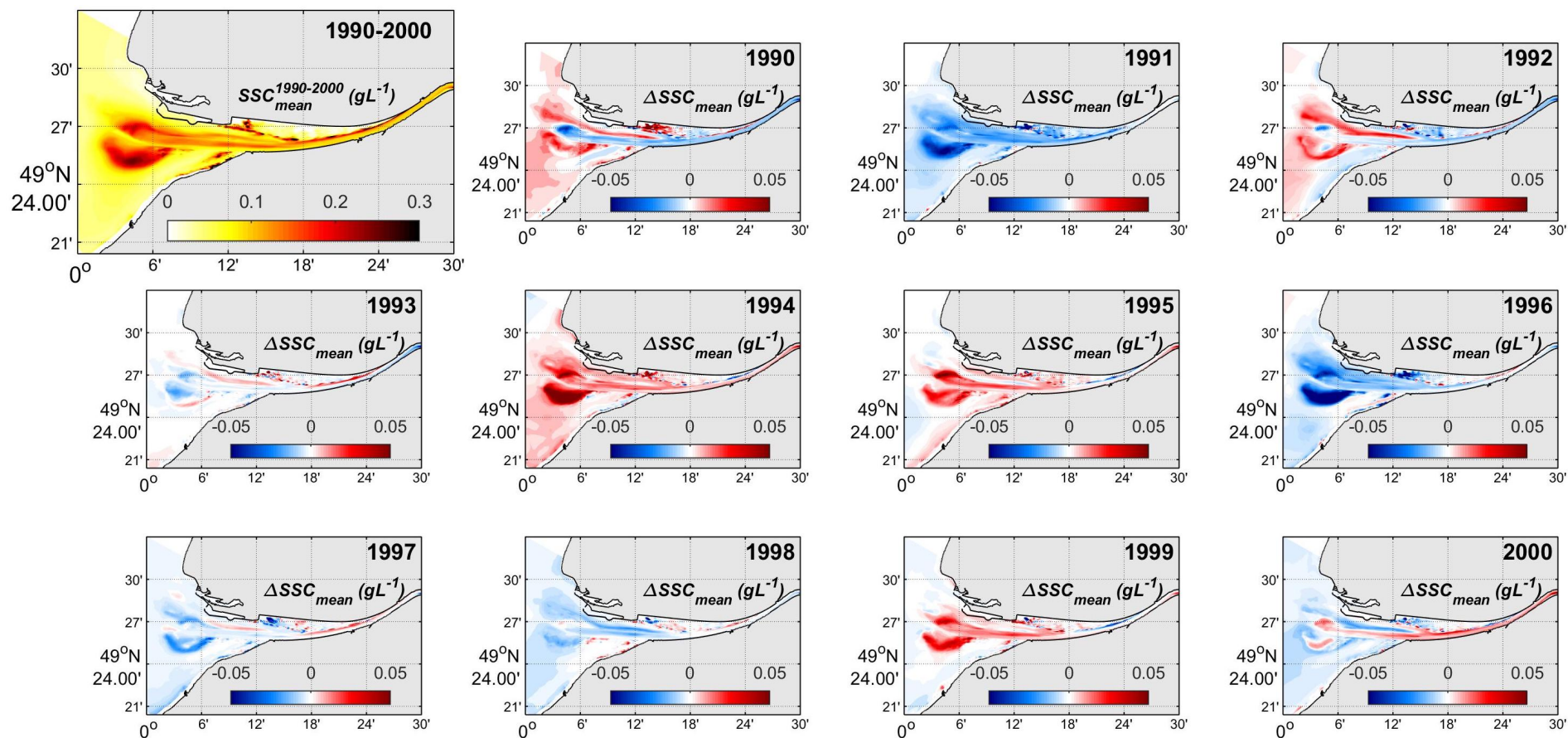


Figure 47. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension moyenne sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.



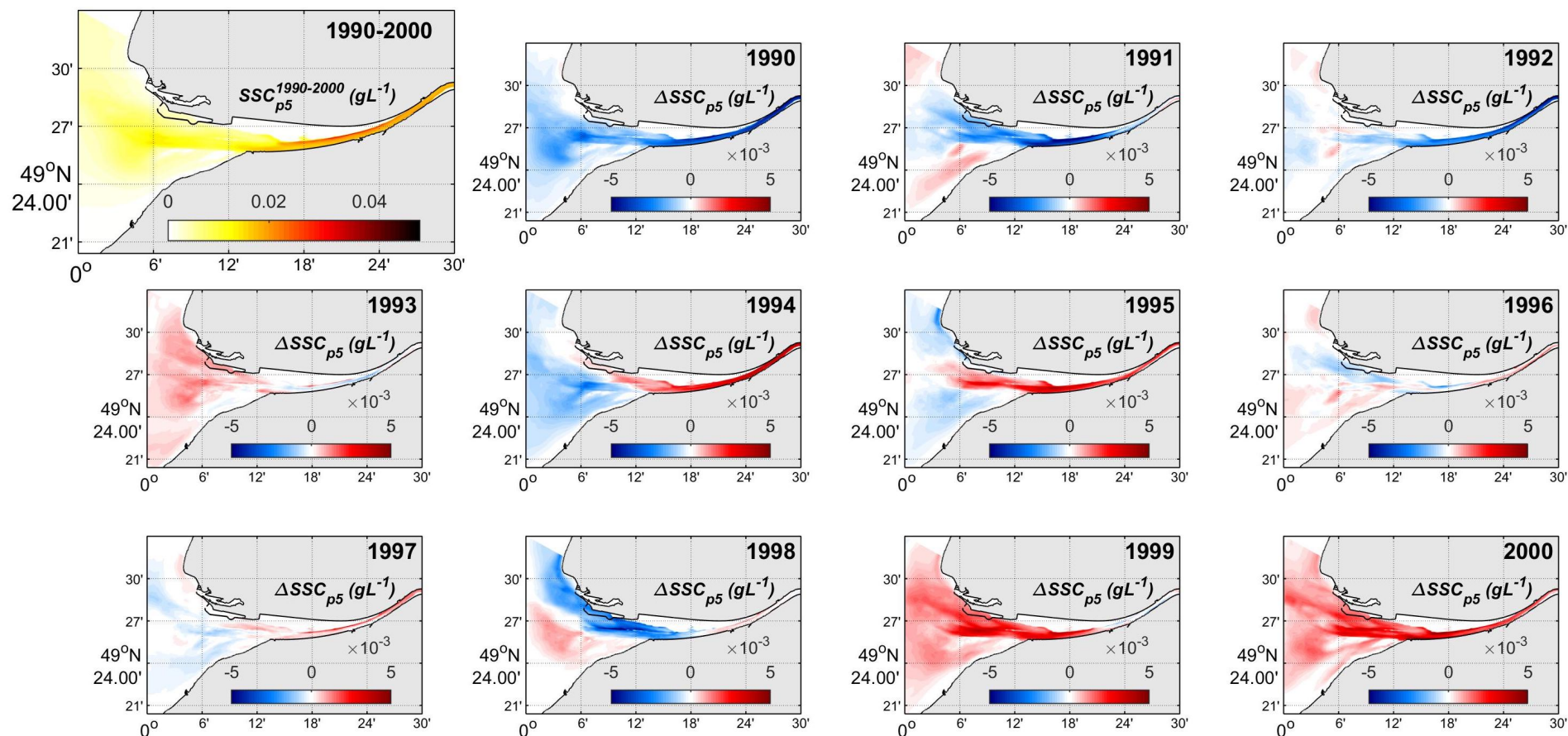


Figure 48. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension minimale (percentile 5) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.

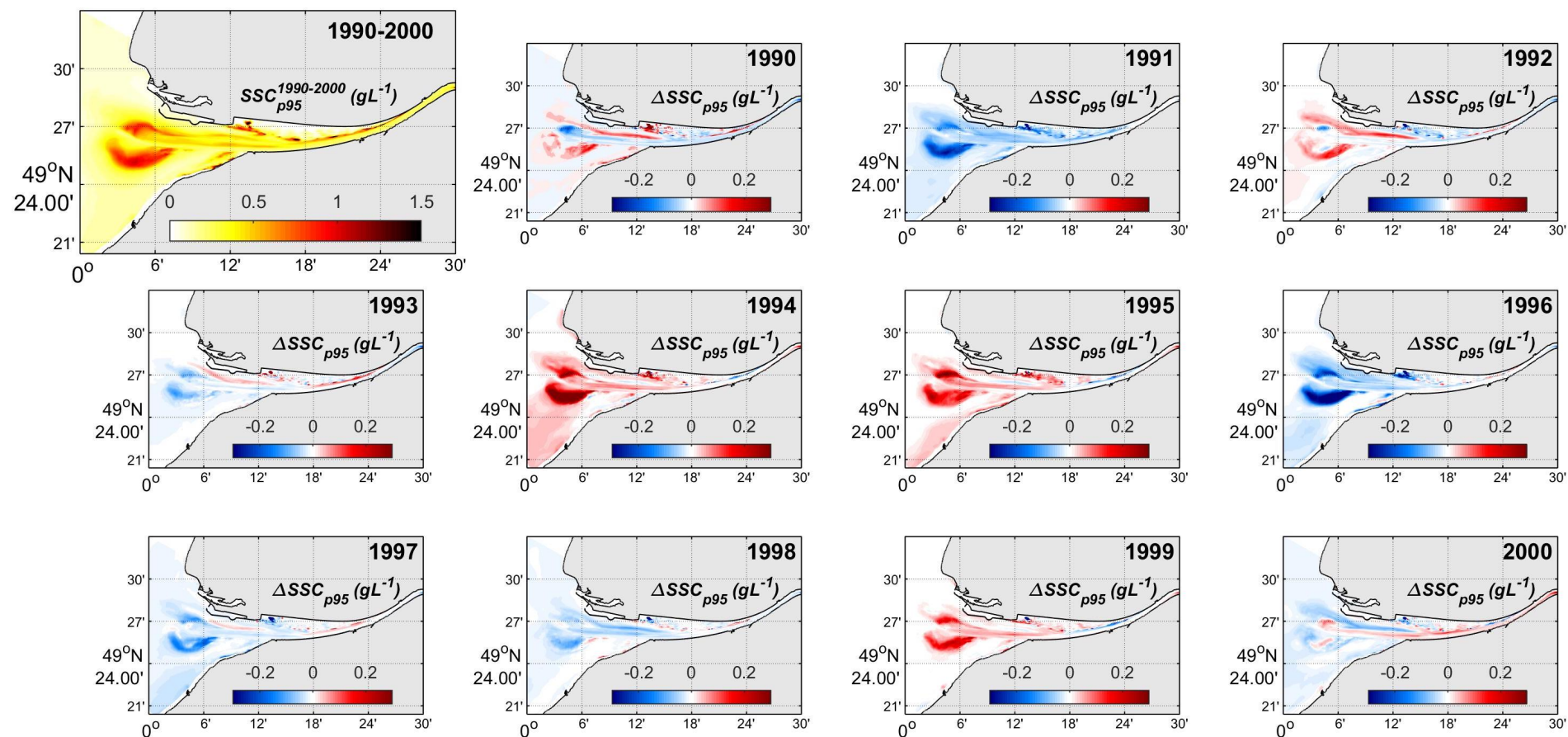


Figure 49. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension maximale (percentile 95) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.

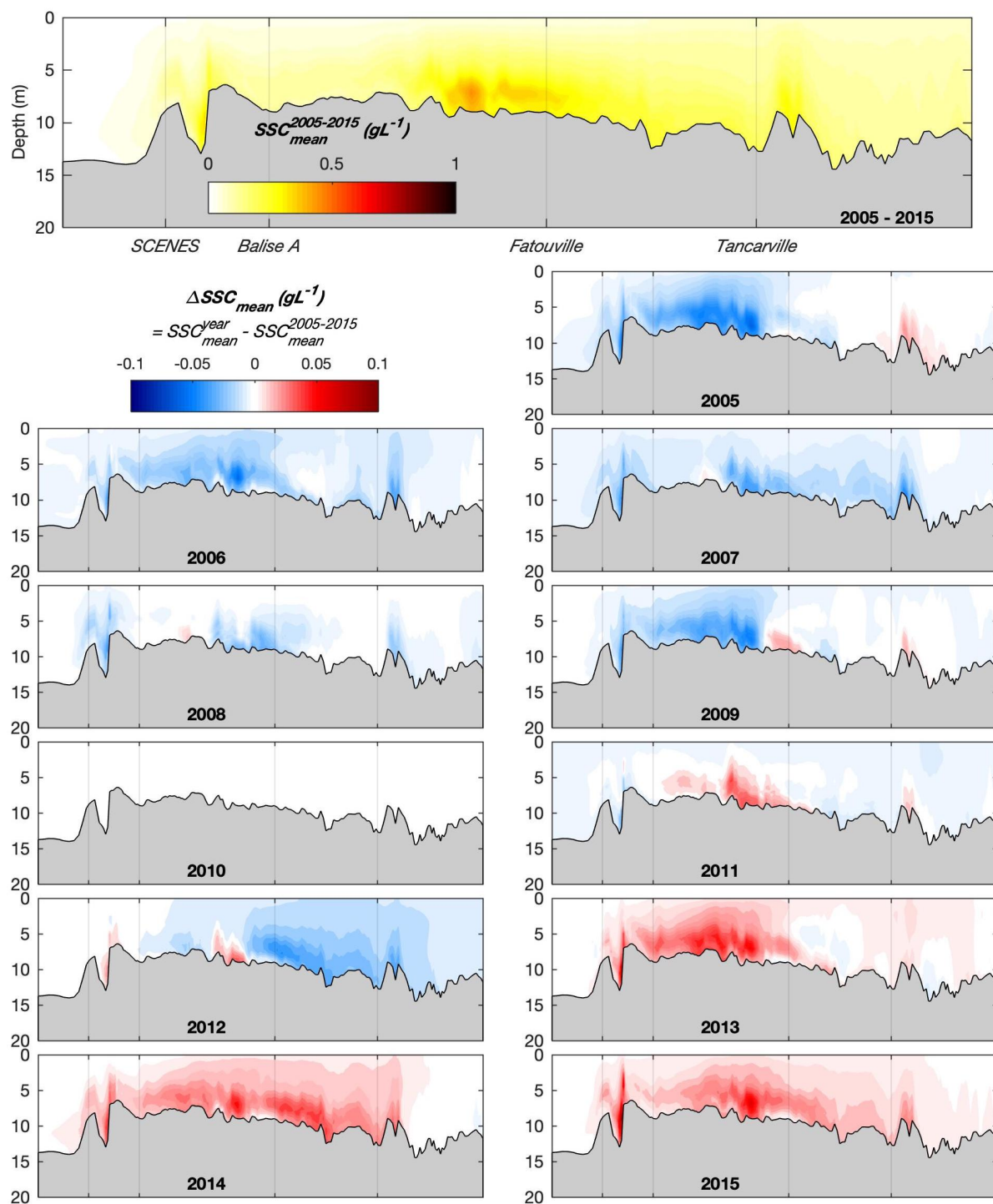


Figure 50. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension moyenne de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.



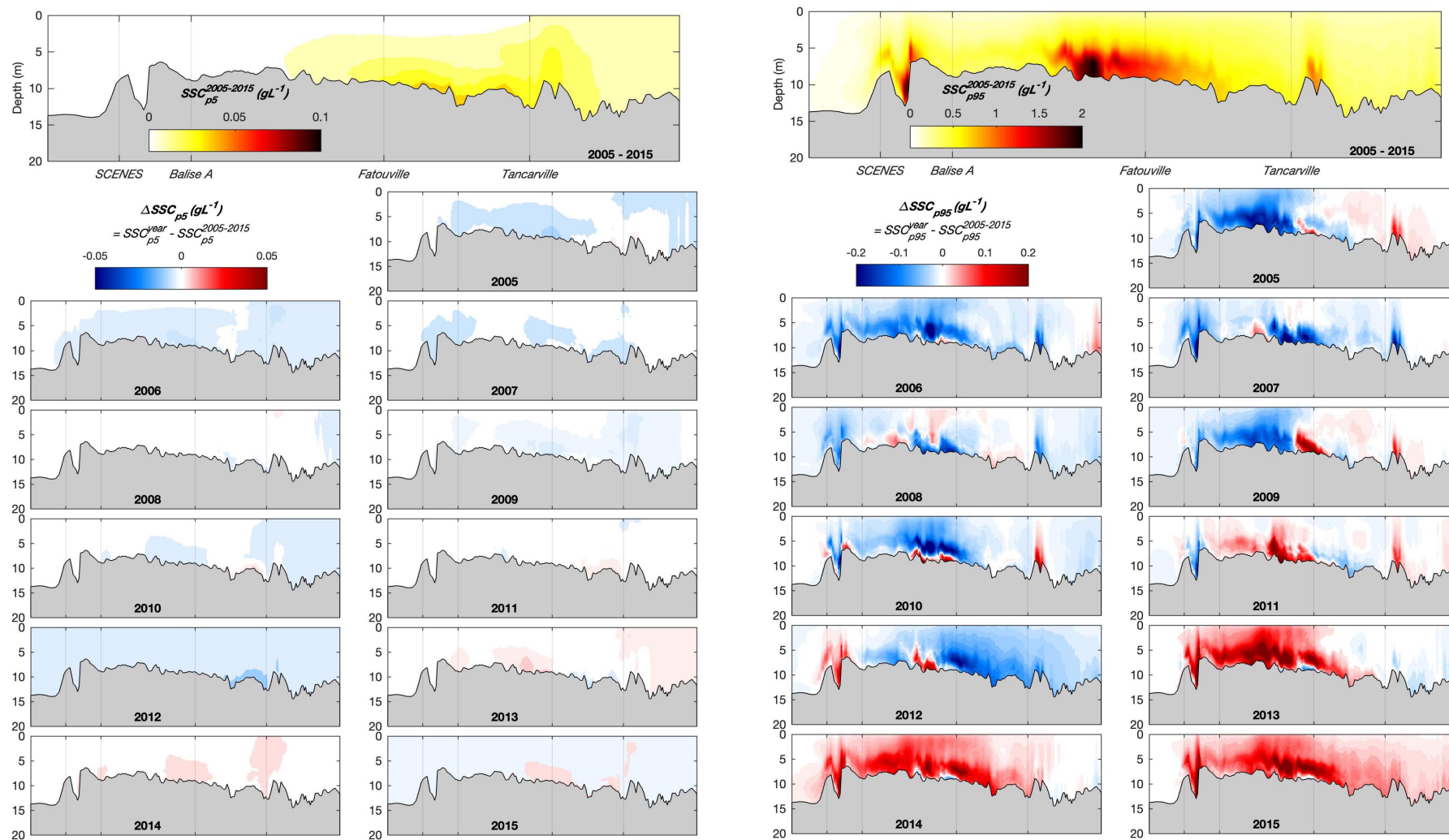


Figure 51. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension minimale (percentile 5, gauche) et maximale (percentile 95, droite) de la colonne d'eau, le long de la radiale présentée sur la Figure 18, pour la période 2005-2015. Les panneaux supérieurs représentent la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie par rapport à la moyenne décennale.





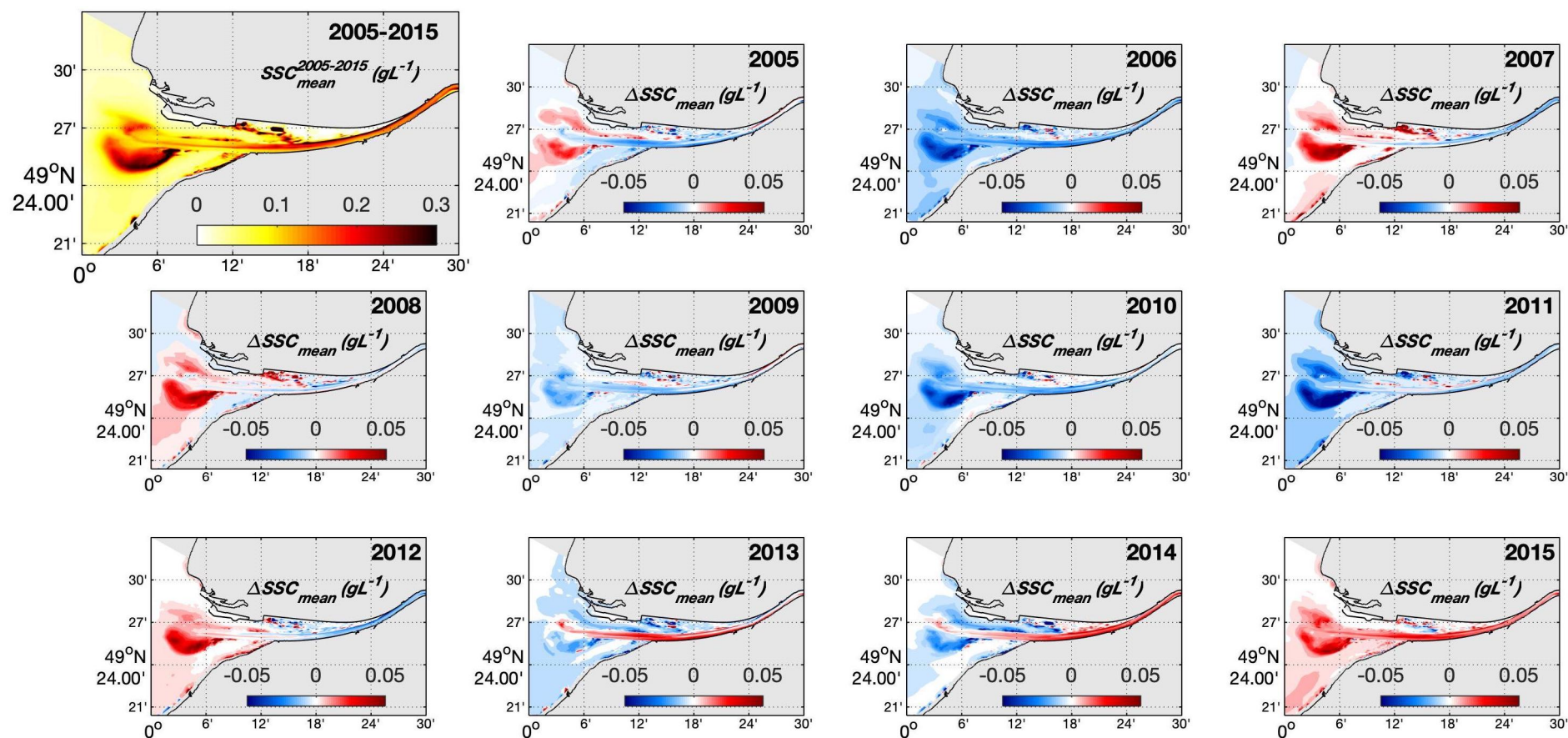


Figure 52. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension moyenne sur la colonne d'eau, pour la période 2005-2015. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.

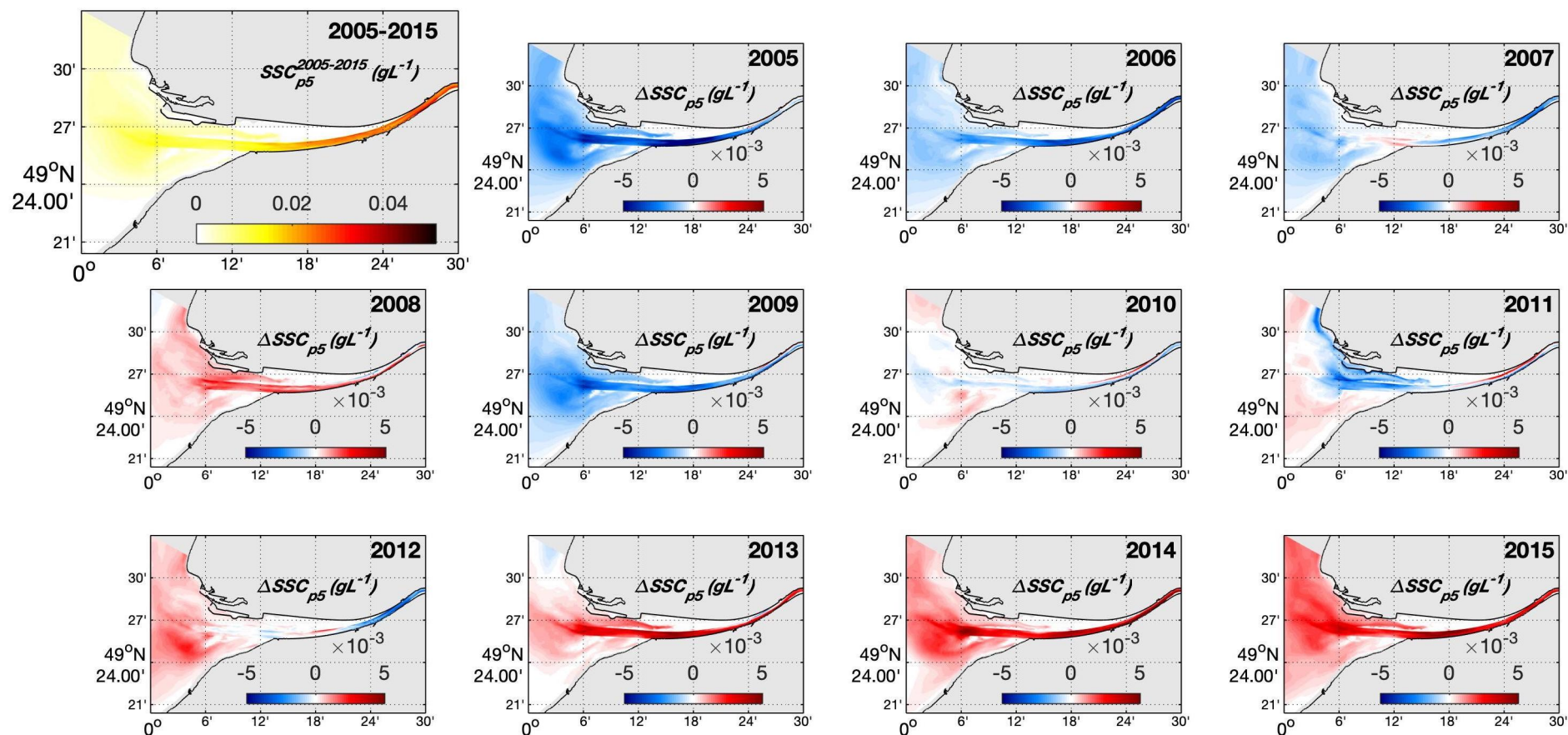


Figure 53. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension minimale (percentile 5) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.



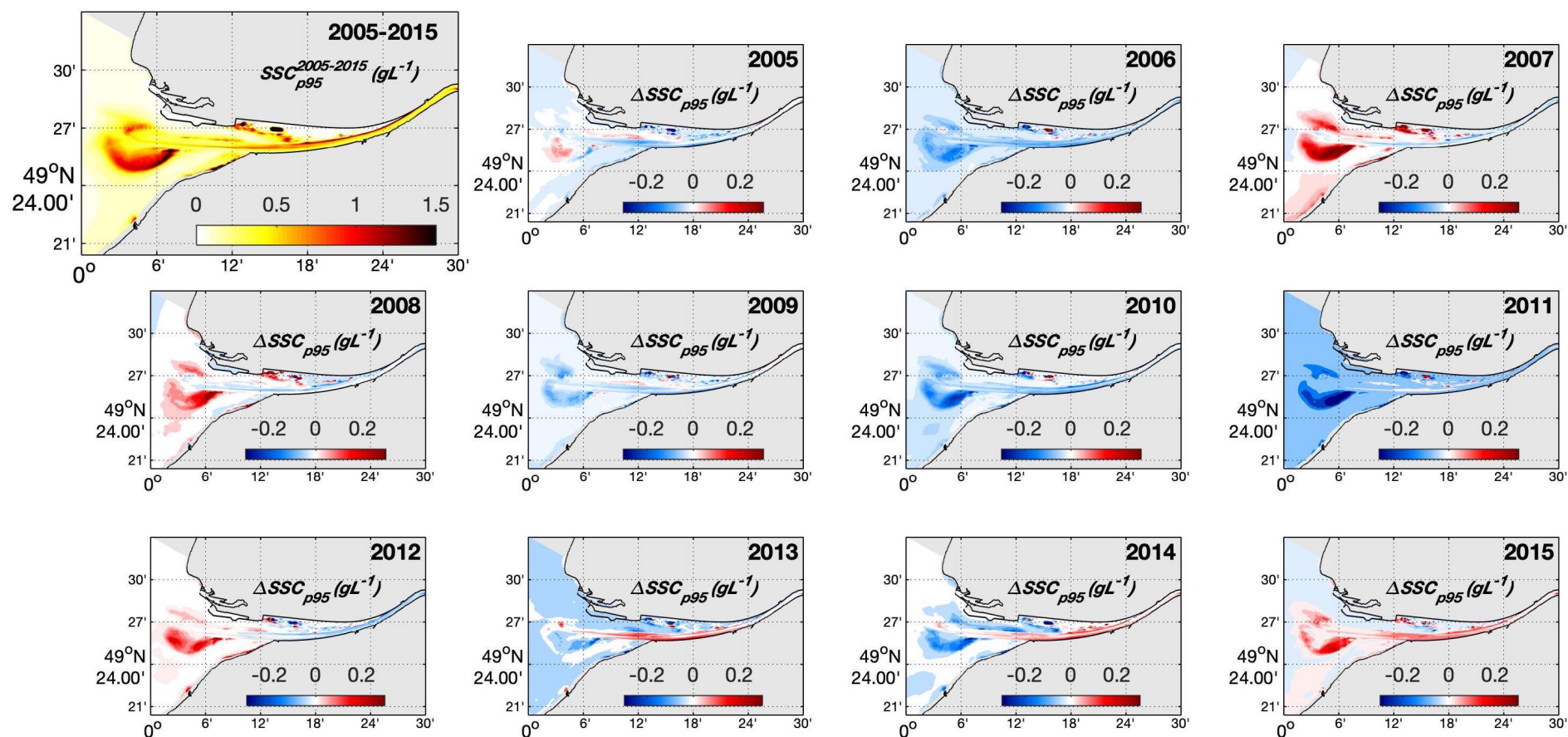


Figure 54. Anomalies annuelles de la concentration en sédiments en suspension maximale (percentile 95) sur la colonne d'eau, pour la période 1990-2000. Le panneau supérieur gauche représente la moyenne décennale, les panneaux inférieurs représentent l'anomalie annuelle par rapport à la moyenne décennale.



**POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL**

[www.seine-aval.fr](http://www.seine-aval.fr)

**CONTACT**

GIP Seine-Aval  
Hangar C - Espace des Marégraphes  
CS 41174  
76176 ROUEN Cedex 1  
**Tél : 02 35 08 37 64**  
[gipsa@seine-aval.fr](mailto:gipsa@seine-aval.fr)

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il devra être cité sous la forme suivante :

**A compléter par le GIP.**

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.  
Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval.

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

