



Pêches et Océans
Canada

Fisheries and Oceans
Canada

Sciences des écosystèmes
et des océans

Ecosystems and
Oceans Science

Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS)

Document de recherche 2026/002

Région de la capitale nationale

Évaluation des modèles portuaires de prévisions océaniques développés dans le cadre du Plan de Protection des Océans: Le Fleuve Fraser

Michael Dunphy¹, Maxim Krassovski¹, Stephanie Taylor², Hauke Blanken¹, Rachel Horwitz², Simon St-Onge Drouin³, Adam Drozdowski²

¹ Pêches et Océans Canada
Institut des sciences de la mer
9860, chemin West Saanich
Sidney (Colombie-Britannique) V8L 4B2

² Pêches et Océans Canada
Institut océanographique de Bedford
1, promenade Challenger
Dartmouth (Nouvelle-Écosse) B2Y 4A2

³ Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
850, route de la Mer
Mont-Joli (Québec) G5H 3Z4

Avant-propos

La présente série documente les fondements scientifiques des évaluations des ressources et des écosystèmes aquatiques du Canada. Elle traite des problèmes courants selon les échéanciers dictés. Les documents qu'elle contient ne doivent pas être considérés comme des énoncés définitifs sur les sujets traités, mais plutôt comme des rapports d'étape sur les études en cours.

Publié par :

Pêches et Océans Canada
Secrétariat canadien des avis scientifiques
200, rue Kent
Ottawa (Ontario) K1A 0E6

[http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/
DFO.CSAS-SCAS.MPO@dfo-mpo.gc.ca](http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/DFO.CSAS-SCAS.MPO@dfo-mpo.gc.ca)



© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre du
ministère des Pêches et des Océans, 2026

Ce rapport est publié sous la [Licence du gouvernement ouvert – Canada](#)

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-79955-1 N° cat. Fs70-5/2026-002F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Dunphy, M., Krassovski, M., Taylor, S., Blanken, H., Horwitz, R., St-Onge Drouin, S. et Drozdowski, A. 2026. Évaluation des modèles portuaires de prévisions océaniques développés dans le cadre du Plan de Protection des Océans: Le Fleuve Fraser. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2026/002. xi + 121 p.

Also available in English:

Dunphy, M., Krassovski, M., Taylor, S., Blanken, H., Horwitz, R., St-Onge Drouin, S., and Drozdowski, A. 2026. Assessment of Port Ocean Prediction System Developed Under Canada's Oceans Protection Plan: Fraser River. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2026/002. xi + 116 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	xi
1. INTRODUCTION.....	1
2. CONCEPTION DES MODÈLES PORTUAIRES.....	1
2.1. SÉLECTION DU MODÈLE.....	1
2.2. STRATÉGIE DE RÉDUCTION D'ÉCHELLE.....	2
2.3. SÉQUENCÉMENT DES SIMULATIONS.....	3
2.4. FORÇAGES DE SURFACE.....	4
2.5. SUITE D'AUTOMATISATION.....	4
2.6. ROBUSTESSE ET LIMITATIONS.....	4
3. FLEUVE FRASER.....	5
3.1. OCÉANOGRAPHIE RÉGIONALE.....	5
3.2. DOMAINE ET CONFIGURATION.....	6
3.3. INITIALISATION.....	7
3.4. CONDITIONS AUX LIMITES OUVERTES.....	7
3.5. APPORT EN EAU DOUCE.....	7
3.6. MODÈLE DES GLACES.....	7
3.7. STABILITÉ DU SYSTÈME DE MODÉLISATION.....	8
4. PARAMÈTRES D'ÉVALUATION.....	8
4.1. SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES.....	8
4.1.1. Niveau d'eau.....	9
4.1.2. Vitesse de courant.....	10
4.1.3. Propriétés de l'eau.....	13
4.1.4. Dérive.....	13
4.2. PRÉVISIONS.....	15
5. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES.....	15
5.1. NIVEAU D'EAU.....	16
5.1.1. Hauteur moyenne de la surface de la mer.....	16
5.1.2. Niveau d'eau avec marée.....	16
5.1.3. Niveau d'eau résiduel.....	18
5.1.4. Scores globaux.....	18
5.1.5. Niveau d'eau des ondes de tempête.....	19
5.2. COURANTS.....	19
5.2.1. ADCP horizontal.....	20
5.2.2. Courantomètres.....	21
5.2.3. ADCP ancrés.....	21
5.2.4. Transects d'ADCP.....	23
5.3. PROPRIÉTÉS DE L'EAU.....	24
5.3.1. Température de surface de la mer.....	24

5.3.2.	Sondes CTD ancrées	24
5.3.3.	Profils CTD	24
5.3.4.	Traversiers	25
5.4.	DÉRIVE	25
6.	RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES PRÉVISIONS	26
6.1.	NIVEAU D'EAU RÉSIDUEL	26
6.2.	ADCP HORIZONTAL	26
6.3.	TEMPÉRATURE DE SURFACE DE LA MER.....	26
7.	SOMMAIRE.....	27
8.	CONSTATATIONS PRINCIPALES.....	27
9.	REMERCIEMENTS.....	29
10.	RÉFÉRENCES CITÉES.....	30
11.	TABLEAUX	33
12.	FIGURES	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Paramètres principaux du modèle NEMO pour les configurations SSS150 et SF30.	33
Tableau 2. Données des stations de mesure du niveau d'eau utilisées pour l'évaluation et décalages utilisés pour transférer le niveau d'eau au CGVD28.	34
Tableau 3. Comparaison de la composante M2 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	35
Tableau 4. Comparaison de la composante N2 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	35
Tableau 5. Comparaison de la composante S2 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	36
Tableau 6. Comparaison de la composante K2 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	36
Tableau 7. Comparaison de la composante O1 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	37
Tableau 8. Comparaison de la composante K1 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	38
Tableau 9. Comparaison de la composante P1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	38
Tableau 10. Comparaison de la composante Q1 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	39
Tableau 11. Comparaison de la composante L2 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	39
Tableau 12. Comparaison de la composante J1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	40
Tableau 13. Comparaison de la composante NO1 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	41
Tableau 14. Comparaison de la composante OO1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	41
Tableau 15. Comparaison de la composante SO1 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	42
Tableau 16. Comparaison de la composante NU2 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	42
Tableau 17. Comparaison de la composante 2N2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	43
Tableau 18. Scores du niveau d'eau de marée pour l'année 2018.	44
Tableau 19. Scores du niveau d'eau résiduel pour l'année 2018.	44
Tableau 20. Scores du niveau d'eau total pour l'année 2018.	45
Tableau 21. Scores moyens pour le niveau d'eau résiduel pendant les ondes de tempête. N indique le nombre d'événements de tempête pour chaque station.	46

Tableau 22. Scores pour les vitesses de courant total, résiduel et de marée le long du rivage modélisée par les modèles SSS150 et SF30 par rapport aux mesures de l'ADCP horizontal installé à Woodward's Landing. Le signe négatif correspond au flot vers l'aval.	47
Tableau 23. Erreurs pour les composantes de la marée modélisées par les modèles SSS150 et SF30 par rapport aux observations de l'ADCP horizontal installé à Woodward's Landing.....	47
Tableau 24. Scores pour le courant total simulé par le SSS150 à quatre profondeurs sélectionnées lors de trois déploiements de l'ADCP.	47
Tableau 25. Scores pour le courant résiduel simulé par le SSS150 à quatre profondeurs sélectionnées lors de trois déploiements de l'ADCP.	48
Tableau 26. Scores pour le courant de marée simulé par le SSS150 à quatre profondeurs sélectionnées lors de trois déploiements de l'ADCP.	48
Tableau 27. Scores pour la température de surface de la mer enregistrée à la bouée de contrôle de la qualité de l'eau du fleuve Fraser.	49
Tableau 28. Scores pour la température et la salinité enregistrés par la sonde CTD ancrée à la station SEVIP.....	49
Tableau 29. Nombre de profils CTD pour la période de 2017 à 2021 pour les cinq sous-régions analysées.....	49
Tableau 30. Scores de l'indice de performance de Molcard et de la distance de séparation pour l'évaluation de la dérive pour les intervalles horaires (un seul disponible).	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma de séquençage de la pseudo-analyse (PA, en rouge) et des 4 prévisions de 48 h (en bleu) pour une date donnée. Les lignes pointillées grises sont espacées de six heures et les flèches orange indiquent les moments où un fichier de redémarrage est généré et utilisé pour lancer l'étape suivante. La pseudo-analyse pour demain (Aujourd'hui+1) commencera avec le même fichier de redémarrage que celui utilisé pour démarrer la prévision 00Z d'aujourd'hui, et la séquence se répétera.	50
Figure 2. Domaine du modèle montrant les grilles extérieure (SSS150) et intérieure (SF30), l'échelle de couleurs montrant la profondeur.	51
Figure 3. Vitesse en surface (m/s) dans le SPCOG-O, le SS500 et le SSS150 (du haut vers le bas) pour le fleuve Fraser.	52
Figure 4. Vitesse en surface (m/s) dans le SS500, le SSS150 et le SF30 (du haut vers le bas) pour le bas Fraser, à l'exclusion du lac Pitt.	53
Figure 5. Vitesse en surface (m/s) de SS500, de SSS150 et de SF30 (du haut vers le bas) pour le bas Fraser (agrandissement de la Figure 4).	54
Figure 6. Emplacements des cyclones toutes les 6 heures de 2010 à 2021.	55
Figure 7. Emplacement des instruments utilisés dans la présente évaluation. Les deux indicateurs de niveau d'eau superposés sont Steveston (station du SHC) et StevestonEC (station de RHC) près de l'embouchure du Fraser. Le triangle vert représente Woodward's Landing (niveau d'eau et ADCP horizontal), tandis que le marqueur bleu en dessous représente Deas Island.	56
Figure 8. Niveau d'eau moyen du modèle de 2017 à 2021.	57
Figure 9. Amplitude et phase observées et modélisées pour la composante M2 en 2018.	58
Figure 10. Amplitude et phase observées et modélisées pour la composante K1 en 2018.	59
Figure 11. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour North Arm en 2018.	60
Figure 12. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour Sand Heads en 2018.	61
Figure 13. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour Steveston en 2018.	62
Figure 14. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour StevestonEC en 2018.	63
Figure 15. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour Woodward's Landing en 2018.	64
Figure 16. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Deas Island en 2018.	65
Figure 17. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour New Westminster en 2018.	66
Figure 18. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour Port Mann en 2018.	67
Figure 19. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour Pitt River en 2018.	68
Figure 20. Spectres de puissance pour le niveau d'eau total et résiduel à Sand Heads en 2018.	69
Figure 21. Spectres de puissance pour le niveau d'eau total et résiduel à Port Mann en 2018.	70
Figure 22. Variabilité des scores du niveau d'eau au fil des ans pour le SPCOG-O (CIOPSW), le SS500, le SSS150 et le SF30. Les marqueurs de même couleur indiquent les scores pour une seule station pour des années particulières. Les marqueurs d'années consécutives sont reliés par des lignes.	71

Figure 23. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 3 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de North Arm.	72
Figure 24. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 8 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de Sand Heads.	73
Figure 25. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 7 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de Steveston.	74
Figure 26. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 7 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de StevestonEC.	75
Figure 27. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 7 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de Woodward's Landing.	76
Figure 28. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 7 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de Deas Island.	77
Figure 29. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 8 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de New Westminster.	78
Figure 30. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 6 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de Port Mann.	79
Figure 31. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 5 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de Pitt River.	80
Figure 32. Distribution du biais pour le niveau de la mer résiduel modélisé et moyenné sur toutes les stations par rapport à la pression atmosphérique minimale enregistrée pour chacune des 7 tempêtes distinctes. La tempête BCFloods est omise en raison d'un manque de données sur la pression.	81
Figure 33. Identique à la Figure 32, mais pour la CRMSE.	81
Figure 34. Emplacement des observations de l'ADCP horizontal à Woodward's Landing et diagrammes de rose de courant avec indication de l'axe principal de variance pour les données ADCP et pour les modèles SSS150 et SF30. Les orbites circulaires sur les roses indiquent la vitesse du courant en m/s.	82
Figure 35. Courant le long du rivage observé et modélisé (extrait sur 6 jours) selon les données de l'ADCP horizontal à Woodward's Landing.	83
Figure 36. Courant résiduel provenant de l'ADCP de la station FRDLS à une profondeur de 58,5 m pour les composantes orientées vers l'est (u) et vers le nord (v).	84
Figure 37. Courant résiduel provenant de l'ADCP de la station centrale du détroit de Géorgie à une profondeur de 98,06 m pour les composantes orientées vers l'est (u) et vers le nord (v). ..	85
Figure 38. Courant résiduel provenant de l'ADCP de la station est du détroit de Géorgie à une profondeur de 58,48 m pour les composantes orientées vers l'est (u) et vers le nord (v).	86
Figure 39. Vitesse et direction des courants moyens (première colonne) et corrélations vectorielles associées pour les courants totaux (deuxième colonne), de marée (troisième colonne) et résiduels (quatrième colonne) pour le déploiement de l'ADCP à la station FRDLS. La direction moyenne est mesurée dans le sens horaire à partir du nord.	87
Figure 40. Vitesse et direction des courants moyens (première colonne) et corrélations vectorielles associées pour les courants totaux (deuxième colonne), de marée (troisième colonne) et résiduels (quatrième colonne) pour le déploiement de l'ADCP à la station centrale	

du détroit de Géorgie. La direction moyenne est mesurée dans le sens horaire à partir du nord.	88
Figure 41. Vitesse et direction des courants moyens (première colonne) et corrélations vectorielles associées pour les courants totaux (deuxième colonne), de marée (troisième colonne) et résiduels (quatrième colonne) pour le déploiement de l'ADCP à la station est du détroit de Géorgie. La direction moyenne est mesurée dans le sens horaire à partir du nord. ..	89
Figure 42. Spectres rotatifs pour le courant total provenant de l'ADCP de la station FRDLS à une profondeur de 58,5 m.....	90
Figure 43. Spectres rotatifs pour le courant total provenant de l'ADCP de la station centrale du détroit de Géorgie à une profondeur de 98,1 m.....	91
Figure 44. Spectres rotatifs pour le courant total provenant de l'ADCP de la station est du détroit de Géorgie à une profondeur de 15,6 m.....	92
Figure 45. Ellipses de courant pour les composantes de marée M2 (gauche) et K1 (droite) provenant de l'ADCP de la station FRDLS.	93
Figure 46. Ellipses de courant pour les composantes de marée M2 (gauche) et K1 (droite) provenant de l'ADCP de la station centrale du détroit de Géorgie.	94
Figure 47. Ellipses de courant pour les composantes de marée M2 (gauche) et K1 (droite) provenant de l'ADCP de la station est du détroit de Géorgie.	95
Figure 48. Composantes de courant observées et modélisées perpendiculairement au transect (panneaux de gauche) et le long du transect (panneaux de droite) à la ligne FR05a. La direction positive est indiquée dans chaque panneau en degrés vrais. L'emplacement du transect est indiqué dans les panneaux supérieurs. La ligne noire dans le panneau supérieur droit indique le transect et la flèche rouge indique la direction du transect.....	96
Figure 49. Identique à la Figure 48, mais pour la ligne FR06.	97
Figure 50. Identique à la Figure 48, mais pour la ligne Mungos5.	98
Figure 51. Identique à la Figure 48, mais pour la ligne FR08.	99
Figure 52. Identique à la Figure 48, mais pour la ligne FR10.	100
Figure 53. Identique à la Figure 48, mais pour la ligne Transect8.....	101
Figure 54. Diagramme de dispersion du biais moyen par rapport à la CRMSE pour chaque transect des composantes du courant le long du rivage (panneau de gauche) et perpendiculaire au rivage (panneau de droite). La couleur indique le modèle et la forme du marqueur indique le transect (les formes du marqueur se répètent en raison d'un nombre limité de formes).....	102
Figure 55. Distribution de l'énergie cinétique intégrée pour chaque transect du courant modélisé par rapport à celle du courant observé le long du rivage (panneau gauche) et perpendiculaire au rivage (panneau droit). La couleur indique le modèle et la forme du marqueur indique le transect (les formes du marqueur se répètent en raison d'un nombre limité de formes).....	102
Figure 56. TSM observée et modélisée à la bouée de contrôle de la qualité de l'eau du fleuve Fraser.....	103
Figure 57. Température et salinité observées et modélisées pour la sonde CTD ancrée à la station SEVIP. Les séries quotidiennes sont indiquées pour le SPCOG-O (CIOPSW) et le SS500 et les séries horaires le sont pour le SSS150.	104

Figure 58. Profils CTD (points rouges) et sous-régions (délimitées par des traits noirs pleins) utilisés pour l'analyse.	105
Figure 59. Comparaison des profils CTD pour la région du sud du détroit de Géorgie.	106
Figure 60. Comparaison des profils CTD pour la région du bas Fraser.	107
Figure 61. Comparaison des profils CTD pour la région de Massey à Annacis.	108
Figure 62. Comparaison des profils CTD pour la région de Port Mann.	109
Figure 63. Comparaison des profils CTD pour la région du haut Fraser.	110
Figure 64. Diagramme de Hovmöller pour la température mesurée le long de la route Tsawwassen-Duke Point de BC Ferries. Le panneau supérieur montre la température observée, et les trois panneaux inférieurs montrent les erreurs de modèle pour le SPCOG-O, le SS500 et le SSS150, de haut en bas respectivement. Les unités sont exprimées en degrés Celsius, et l'extrémité de la route à Tsawwassen correspond au haut de chaque panneau.	111
Figure 65. Diagramme de Hovmöller pour la salinité mesurée le long de la route Tsawwassen-Duke Point de BC Ferries. Le panneau supérieur montre la salinité observée, et les trois panneaux inférieurs montrent les erreurs de modèle pour le SPCOG-O, le SS500 et le SSS150, de haut en bas respectivement. Les unités sont exprimées en psu, et l'extrémité de la route à Tsawwassen correspond au haut de chaque panneau.	112
Figure 66. Carte des trajectoires des bouées dérivantes observées pour les deux types de bouées dérivantes (OSKER et SCT) utilisés dans l'expérience.	113
Figure 67. Score instantané moyen de Molcard par rapport aux bouées dérivantes. La zone ombrée affiche $\pm$ un écart type.	114
Figure 69. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Sand Heads.	116
Figure 70. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à StevestonEC.	117
Figure 71. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Woodward's Landing.	118
Figure 72. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Pitt River.	119
Figure 73. Évaluation des prévisions pour les vitesses horizontales à l'ADCP horizontal de Woodward's Landing dans le fleuve Fraser.	120
Figure 74. Évaluation des prévisions de la température de surface de la mer à la bouée de contrôle de la qualité de l'eau du fleuve Fraser.	121

RÉSUMÉ

Le Plan de protection des océans (PPO) du Canada a été lancé en 2016 pour appuyer des initiatives visant à protéger notre environnement marin contre les pressions anthropiques. À cette fin, la sous-initiative d'amélioration de la prévision des courants de dérive et de la modélisation des zones côtières du PPO a élaboré six modèles hydrodynamiques à haute résolution à l'échelle des ports visant à améliorer la sécurité de la navigation et à assurer une intervention d'urgence opérationnelle en cas d'événements comme des déversements d'hydrocarbures en milieu marin. L'échelle des modèles a été réduite à partir des systèmes de prévision côtiers océan-glace pour les côtes est et ouest (SPCOG-E et SPCOG-O). Le forçage atmosphérique a été fourni par le Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD). La performance du modèle est évaluée par rapport aux données d'observation disponibles et comparée au modèle parent à l'aide d'une simulation rétrospective pluriannuelle. Les évaluations des prévisions de 48 heures sont effectuées sur une période de deux mois.

Le présent document fait état de l'évaluation de la performance du modèle du fleuve Fraser (SF30) et de la partie sud du modèle du sud de la mer des Salish (SSS150). Le domaine du SF30 couvre le bras sud du fleuve Fraser, de Steveston à Port Mann avec une résolution horizontale de 30 m ainsi que les parties adjacentes des bancs Sturgeon et Roberts Bank, tandis que le SSS150 couvre la partie sud de la mer des Salish et le fleuve Fraser jusqu'à Mission et au lac Pitt. Toutes les simulations de modèle ont été exécutées sans problème de stabilité, y compris lors de périodes de phénomènes météorologiques extrêmes et de défaillance des instruments en temps réel.

Les résultats montrent que les modèles à haute résolution offrent une performance semblable ou supérieure aux modèles à faible résolution dans les zones où ils se chevauchent et une performance adéquate dans les zones qui ne sont pas couvertes par les modèles à faible résolution. L'erreur CRMSE du niveau d'eau de marée varie de 5 à 9 cm, tandis que l'erreur CRMSE du niveau d'eau résiduel est constamment de 5 à 6 cm (CRMSE) avec des biais de moins de 6 cm, ce qui porte l'erreur totale de niveau d'eau à environ 10 cm.

La vitesse des courants de marée et des courants résiduels est bien saisie avec une erreur totale de 0,25 m/s par rapport aux vitesses observés à l'aide d'un ADCP horizontal à Woodward's Landing. La structure transversale du courant dans le fleuve Fraser se compare bien aux données des ADCP montés sur coque de navire, avec une légère sous-estimation de la vitesse des flux d'eau sortants.

La température de l'eau de surface dans le fleuve Fraser présente un biais froid inférieur à 0,5 °C et des erreurs de l'ordre de 1,1 °C. La distribution verticale de la température et de la salinité est bien représentée et comparable à celle du modèle de la mer des Salish à 500 m de résolution (ci-après « SS500 »).

La performance en matière de dérive est considérablement améliorée dans les modèles à haute résolution par rapport au SS500.

L'évaluation des prévisions a montré que l'erreur de niveau d'eau résiduel augmentait graduellement, comme prévu, avec l'échéance de la prévision.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la sous-initiative « Amélioration de la prévision des courants de dérive et de la modélisation près des côtes » du Plan de protection des océans (PPO) du Canada, des modèles à haute résolution ont été élaborés pour six ports canadiens et leurs approches afin de renforcer les capacités de modélisation des océans du gouvernement du Canada à l'appui, d'une part, des applications concernant la protection de l'environnement et la sécurité maritime (par exemple, prévision de la dérive pour les déversements d'hydrocarbures) et, d'autre part, de la sécurité de la navigation à l'aide d'une application hydrographique de navigation électronique. Les six ports (trois sur la côte Est et trois sur la côte Ouest) ont été choisis comme étant exposés à un risque important d'incidents environnementaux en raison du trafic dense de pétroliers et de leurs besoins complexes en matière de navigation. Des modèles ont été élaborés pour les ports de Kitimat, du bas Fraser et du port de Vancouver sur la côte Ouest, ainsi que pour les ports de Saint John, du détroit de Canso et l'estuaire du Saint-Laurent sur la côte Est.

Ces modèles peuvent produire des prévisions, ainsi que des simulations rétrospectives (prévisions *a posteriori*). Pour chaque port, une simulation rétrospective pluriannuelle est analysée pour valider le modèle par rapport aux observations des niveaux d'eau, des courants, de la température et de la salinité, ainsi qu'une expérience de dérive utilisant les bouées dérivantes disponibles. Les performances des prévisions sont évaluées sur une période de deux mois.

Le présent document a pour objectif de présenter les performances du modèle portuaire (« système de prévisions océaniques portuaire », ou SPOP) développé pour le bas du fleuve Fraser et son approche. La conception commune à tous les modèles est présentée en section 2, tandis que la section 3 décrit les éléments spécifiques à ce modèle portuaire. Après avoir décrit les paramètres d'évaluation utilisés pour évaluer tous les systèmes en section 4, les sections 5 et 6 analysent respectivement les résultats de l'évaluation de la longue simulation rétrospective et les résultats de l'évaluation des prévisions réalisés pour le modèle portuaire. Les performances du modèle portuaire sont résumées en section 7, et les constatations principales sont listées en section 8.

2. CONCEPTION DES MODÈLES PORTUAIRES

Les modèles portuaires (« systèmes de prévisions océaniques portuaires », ou SPOP) suivent une structure commune conçue pour contenir la complexité du système. Nous utilisons le même modèle de circulation générale océanique et la même version de code, la même stratégie de réduction d'échelle, les mêmes outils de prétraitement, le même produit pour les forçages de surface et la même suite d'automatisation pour les six SPOP. La définition des grilles des modèles, la configuration et le réglage des paramètres, le forçage aux limites ouvertes et les sources des apports d'eau douce diffèrent entre les SPOP.

2.1. SÉLECTION DU MODÈLE

Les travaux précurseurs d'une grande partie de l'effort de modélisation des ports dans le cadre du PPO ont été réalisés à l'aide du Modèle des volumes finis d'océanologie côtière (FVCOM) (Chen *et al.* 2003) dans le cadre du programme du système de sécurité de classe mondiale pour les navires-citernes (SSCMNC), qui a produit les prototypes des modèles pour les ports de Canso, de Kitimat et de Vancouver. Auparavant, des modèles, fondés sur les travaux de Backhaus (Backhaus 1983; 1985), ont été élaborés pour l'estuaire du Saint-Laurent (Saucier and Chassé 2000) et le golfe du Saint-Laurent (GSL) (Saucier 2003). Ces travaux ont ensuite

été suivis par la mise en œuvre par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) d'un modèle équivalent pour le GSL basé sur NEMO, le système régional de prévision marine (SRPM) du GSL. Ce système SRPM a été opérationnel de 2011 à 2021, mais il n'a pas été envisagé de reprendre aucun de ces anciens modèles dans le cadre du PPO. Les prototypes FVCOM du système de sécurité de classe mondiale pour les navires-citernes utilisaient des maillages de modèle non structurés pour résoudre les régions côtières à une échelle jusqu'à quelques dizaines de mètres ou moins, la résolution diminuant graduellement jusqu'à quelques kilomètres aux limites ouvertes pour correspondre à la grille du modèle parent. Le modèle FVCOM n'a pas d'antécédents de déploiement opérationnel au Canada, tandis que le modèle NEMO 3.6 ([Nucleus of European Modelling of the Ocean](#)) est utilisé opérationnellement par le Réseau opérationnel canadien de systèmes couplés de prévision environnementale (CONCEPTS). Au début du PPO, un exercice de comparaison entre les modèles FVCOM 4.1 et NEMO 3.6 (Nudds *et al.* 2020) a guidé le processus décisionnel pour sélectionner quel code de base utiliser pour les modèles des systèmes de prévisions océaniques portuaires. Des modèles océaniques ont été construits à partir des deux codes pour la baie de Fundy et le port de Saint John (Paquin *et al.* 2020), région choisie en raison de l'amplitude des marées et de la complexité de la circulation océanique. Étant donné que dans ce contexte la lacune la plus importante du modèle NEMO 3.6 était l'absence de la représentation du processus périodique d'inondation et d'assèchement du littoral, si le modèle NEMO 3.6 pouvait donner des résultats satisfaisants dans la baie de Fundy, il pourrait alors probablement être utilisé dans les autres régions. La correspondance des résultats des deux modèles avec les observations, ainsi que leur efficacité de calcul, leur stabilité et leur solidité respectives ont été évaluées. Tous deux se sont révélés compétents pour reproduire les données observées; ni l'un ni l'autre n'était significativement supérieur et le choix du modèle à utiliser à l'avenir reposait davantage sur les autres facteurs.

En fin de compte, il a été décidé de retenir le modèle NEMO 3.6, malgré sa grille structurée, une résolution un peu plus grossière près des côtes et une demande plus élevée en ressources informatiques, afin de faciliter l'opérationnalisation et d'harmoniser les efforts de modélisation avec ceux d'ECCC. NEMO offre d'autres avantages, comme un développement actif qui met à jour régulièrement le code et corrige les bogues, un groupe international du consortium NEMO dont les membres orientent l'élaboration du code et une communauté internationale de modélisation opérationnelle bien établie.

Ainsi, le modèle océanique utilisé pour tous les systèmes de prévisions océaniques portuaires est le code CONCEPTS : une version issue de NEMO 3.6 (Madec 2016) qui a été adaptée pour répondre aux besoins opérationnels de CONCEPTS, par exemple (Dupont *et al.* 2015).

2.2. STRATÉGIE DE RÉDUCTION D'ÉCHELLE

Les modèles portuaires sont des solutions à une échelle plus fine qui reposent sur des modèles océaniques côtiers à plus grande échelle actuellement en opération à ECCC, les systèmes côtiers de prévision océan-glace (résolution de 2 à 2,5 km) pour la côte Est du Canada (SPCOG-E; Paquin *et al.* 2021a) et pour la côte Ouest du Canada (SPCOG-O qui intègre un sous-domaine à plus haute résolution (~500 m) pour la mer des Salish; Paquin *et al.* 2021b). Les résultats de ces modèles forment les conditions aux limites de nos modèles à plus haute résolution et couvrant une plus petite superficie. Nous utilisons deux niveaux d'imbrication pour obtenir une résolution suffisamment fine à l'échelle des ports. L'imbrication est unidirectionnelle (vers la grille la plus fine), de sorte qu'aucune information n'est renvoyée dans les modèles à plus grande échelle. Les modèles sont ainsi exécutés de façon séquentielle, mais sont autrement indépendamment les uns des autres. Cette stratégie d'imbrication unidirectionnelle permet également de corriger les erreurs systématiques aux frontières ouvertes.

Nous n'utilisons pas de modèle dynamique de glace de mer, mais une fonction de NEMO appelée « ice if » (« glace si »), qui utilise les champs de glace fournis en entrée (modèle à grande échelle) et le point de congélation local pour estimer localement la présence d'un couvert de glace. Dans ce cas, la température de la surface de la mer dans le point de grille est ramenée au point de congélation local et les flux de chaleur y sont fixés à -4 Wm^{-2} (Madec 2016).

Nous n'employons pas d'assimilation de données ou de rappel spectral; toutes les simulations des modèles sont exécutées de manière libre.

Lorsqu'elles sont disponibles, les données sur les débits des rivières sont utilisées pour fournir au modèle les apports d'eau douce les plus réalistes; sinon une climatologie est utilisée. Les données des jauges de débit servent également dans certains cas pour établir les conditions aux limites pour les niveaux d'eau.

2.3. SÉQUENCEMENT DES SIMULATIONS

Les modèles portuaires fonctionnent selon trois configurations : rétrospective, pseudo-analyse et prévision. Les simulations rétrospectives sont les plus simples, utilisant les forçages du modèle à plus grande échelle et des données de jauges de débit de qualité contrôlée pour orienter le modèle. Le modèle commence dans le passé par un démarrage statique (température et salinité interpolées comme conditions initiales, océan au repos) ou dynamique (température, salinité, vitesse de courant et hauteur de la surface de la mer interpolées comme conditions initiales) et atteint un état d'équilibre par rapport à cet état initial après une période d'ajustement au forçage. Les données de sortie du modèle ne sont considérées comme utilisables qu'après cette période d'ajustement et le modèle peut alors être exécuté presque jusqu'au temps présent dans cette configuration, à condition que les données de forçage soient disponibles.

Les pseudo-analyses sont des simulations quotidiennes qui permettent de maintenir l'état du modèle proche du temps quasi réel et qui n'incluent pas de composante d'assimilation directe de données. L'état est plutôt indirectement déterminé par les données via les termes de forçage aux limites et en surface. Ces simulations sont utilisées pour initialiser la première prévision de chaque jour et peuvent utiliser des entrées différentes de celles des simulations rétrospectives en fonction des données disponibles en temps réel. La programmation des pseudo-analyses et des prévisions est choisie pour correspondre à celle des modèles parents que nous utilisons pour les forçages. Peu après 00Z, une pseudo-analyse de 24 heures permet de ramener l'état du modèle jusqu'à 00Z. Ce processus utilise des fichiers de redémarrage (donc pas de période d'ajustement nécessaire) et, lorsque c'est possible, les données de jauge de débit tirées d'un flux de données en temps quasi réel qui fait l'objet d'un contrôle de qualité limité. À la suite de la pseudo-analyse, les SPOP génèrent quatre prévisions par jour, de 48 heures chacune, qui commencent à 00Z, 06Z, 12Z et 18Z. La prévision quotidienne de 00Z commence par utiliser le fichier de redémarrage de la pseudo-analyse quotidienne et s'exécute pendant 48 heures, enregistrant un fichier de redémarrage six heures après le début de la simulation. La prévision de 06Z commence à partir de ce fichier de redémarrage, enregistrant également un fichier de redémarrage six heures plus tard, et ainsi de suite pour les prévisions de 12Z et 18Z. Un schéma de ce séquençement est présenté à la figure 1. Nous nous concentrons uniquement sur les prévisions de 00Z dans cette évaluation.

Bien que la simulation de la prévision de 00Z débute théoriquement à 00Z chaque jour, en pratique, l'initialisation de la simulation est retardée, car elle ne peut pas commencer avant que toutes les données d'entrée des modèles à plus grande échelle soient disponibles et que la pseudo-analyse soit terminée. Au moment de la rédaction du présent rapport, ce délai est

d'environ cinq heures, de sorte qu'en fin de compte, chaque prévision ne contient qu'environ 43 heures de données de sortie qui soient dans l'avenir.

2.4. FORÇAGES DE SURFACE

Les forçages de surface sont dérivés du Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD) (Milbrandt *et al.* 2016), qui est exécuté opérationnellement à ECCC et fournit des prévisions météorologiques atmosphériques quatre fois par jour à une résolution de 2,5 km. C'est le produit atmosphérique opérationnel à la plus haute résolution disponible et il est choisi pour être conforme aux forçages appliqués aux SPCOG-E/O. Pour les simulations rétrospectives et les pseudo-analyses, nous utilisons un assemblage temporel des prévisions du SHRPD, où les heures 06 à 17 des prévisions successives sont combinées au moyen d'une moyenne pondérée pour former des champs temporellement continus, suivant la même programmation que les SPCOG-E/O. Des détails supplémentaires sont fournis dans la documentation technique pour la version 1.5 du système SPCOG-O (Paquin *et al.* 2022). L'assemblage temporel n'est pas utilisé pour les prévisions.

Les forçages de surface sont appliqués au modèle NEMO à l'aide des algorithmes CORE (Large and Yeager 2004) avec les modifications apportées par ECCC pour a) lire les données d'entrée du fichier au format interne RPN et b) utiliser le niveau diagnostique le plus bas du modèle atmosphérique plutôt que les données conventionnelles de 2 m et de 10 m. Les précipitations et les variations de pression au niveau de la mer sont également appliquées à la surface du modèle.

2.5. SUITE D'AUTOMATISATION

Les simulations rétrospectives, de pseudo-analyse et de prévision sont toutes gérées à l'aide du logiciel de séquençage Maestro d'ECCC. Nous avons construit une suite Maestro qui est fondée sur les suites SPCOG-E/O d'ECCC, dans laquelle nous reprenons une partie des fonctionnalités d'ECCC pour la préparation des forçages atmosphériques et la mécanique de l'exécution du modèle NEMO, y compris la gestion des fichiers de redémarrage et des données de sortie. Nous ajoutons à cette base de référence des fonctionnalités supplémentaires pour préparer le forçage aux limites, extraire les données du flux de données en temps réel, générer le forçage hydrologique de ruissellement et préparer les fichiers d'entrée sur la concentration de glace de mer pour la fonction « ice-if ». Des stratégies de secours pour les données manquantes et des stratégies de persistance pour les prévisions utilisant les données des jauges de débit sont également mises en œuvre.

2.6. ROBUSTESSE ET LIMITATIONS

Pour qu'un modèle opérationnel soit utile, il doit être robuste et ne pas être sujet aux défaillances. Nous n'avons pas évalué les modèles de façon exhaustive à cet égard; une telle évaluation est un processus continu. Cependant, certains aspects ont été explorés :

- Lorsque des données de jauge de débit sont nécessaires comme données d'entrée au modèle, des mécanismes de secours sont mis en œuvre pour pallier aux données de jauge manquantes ou erronées. En règle générale, cela signifie que nous préparons une climatologie pour chaque jauge qui doit être valide lorsque les données de la jauge sont indisponibles. Grâce à ces climatologies préparées à l'avance et à l'utilisation d'outils appropriés pour automatiser la commutation, les modèles peuvent fonctionner malgré des données de jauge manquantes et ne subir qu'une dégradation progressive en forçant avec des données de moindre qualité plutôt que de subir une défaillance. La mesure de la gravité de la dégradation dans les scénarios de perte de données est réservée à des travaux futurs.

-
- Une longue simulation rétrospective est effectuée pour évaluer la performance du modèle. Cette longue simulation démontre que le modèle est stable pour un ensemble de conditions météorologiques et de forçages qui varient sur plusieurs années. Dans certains cas, la période rétrospective échantillonne certains événements extrêmes, ce qui aide à justifier la stabilité du modèle.
 - Des simulations quotidiennes (pseudo-analyse et quatre prévisions) ont été exécutées aux fins de démonstration sur une période d'environ un an sur la grappe de calcul générique pour la science (GCGS) au mieux de nos possibilités, afin de montrer que la suite d'automatisation peut rouler les modèles de façon routinière et de révéler des cas extrêmes qui peuvent être corrigés pour améliorer davantage la robustesse. L'objectif de rouler, au mieux de nos capacités, ces simulations pré-opérationnelles est de démontrer le fonctionnement et la stabilité du modèle numérique basé sur NEMO et de la suite d'automatisation qui les gère, ainsi que d'identifier les problèmes qui pourraient avoir un impact sur un déploiement opérationnel. Les principales sources de problèmes rencontrés empêchant les prévisions quotidiennes dans les délais prévus sont a) des temps d'arrêt, planifiés et non-prévus, du système informatique de la GCGS, et b) un retard dans la disponibilité des données de forçage qui proviennent des modèles à plus grande échelle et qui sont normalement recopiées depuis le système d'ECCC de manière périodique et automatique. Ces problèmes sont considérés comme une conséquence attendue de l'utilisation d'un système de calcul pour la recherche et seraient atténués par le recours à un système de calcul opérationnel.

Les modèles ont certaines limitations :

- Une variabilité intrinsèque est attendue dans chaque modèle, mais elle n'a pas été caractérisée.
- Le manque de capacité de représentation du processus périodique d'inondation et d'assèchement du littoral dans NEMO 3.6 nécessite un approfondissement artificiel de la bathymétrie dans les régions intertidales.

3. FLEUVE FRASER

La présente section décrit le système de prévisions océaniques portuaires à résolution de 30 m du sud du fleuve Fraser.

3.1. OCÉANOGRAPHIE RÉGIONALE

Le fleuve Fraser est la plus importante source d'eaux de ruissellement sur la côte de la Colombie-Britannique, avec un débit type à Hope (150 km de l'embouchure du fleuve) de 900 à 1 100 m³/s au cours de la période de décembre à mars et une crue nivale de mai à juillet avec un pic de débit moyen d'environ 7 000 m³/s en juin. La zone d'étude s'étend jusqu'à Mission et comprend le lac Pitt soumis aux marées et relié au fleuve Fraser par Pitt River (figure 2). En raison du mouvement actif des marées avec l'océan, un coin d'eau salée se forme dans le fleuve, qui peut s'étendre jusqu'à l'île Annacis (Thomson 1981).

L'élaboration du modèle du fleuve Fraser dans le cadre du Plan de protection des océans (PPO) vise à fournir un outil de prévision qui faciliterait la navigation et les interventions en cas d'urgence en plus des systèmes de prévision existants (p. ex., [Avadept](#)).

3.2. DOMAINE ET CONFIGURATION

La configuration de réduction d'échelle du modèle du fleuve Fraser comprend une grille extérieure et une grille intérieure, comme le montre la figure 2, nommées respectivement Sud de la mer des Salish (ci-après SSS150) et Sud du fleuve Fraser 30 (ci-après SF30). La grille du SSS150 est un raffinement de la grille mondiale tripolaire (Madec and Imbard 1996) et partage donc la même rotation de grille locale. La grille extérieure a une résolution approximative de $(dx, dy) = (129, 98)$ m et comporte trois limites ouvertes : le long de l'ouest, du côté ouest de la baie Howe jusqu'à l'extrémité nord de l'île Galiano; le long du sud, allant de la même extrémité nord de l'île Galiano jusqu'à Point Roberts; et à l'est sur le fleuve Fraser à Mission.

La grille intérieure couvre environ 30 km du bras sud du fleuve Fraser (ci-après South Arm) en aval du pont de Port Mann, où se trouvent les terminaux du port de Vancouver et où se déroule la majeure partie de la circulation des gros bateaux. Elle comprend également des parties des bancs Sturgeon et Roberts Bank adjacents à l'embouchure du fleuve. Le domaine comprend le tronçon principal avec une largeur type de 500 m et des profondeurs types de 12 à 20 m et plusieurs endroits plus profonds atteignant 25 à 30 m de profondeur. La profondeur maximale est de 32 m, à quelque 200 m en aval du pont Alex Fraser. À l'exception du prolongement du chenal du fleuve, les profondeurs sur les bancs sont petites et ont été réglées à une profondeur minimale de 4 m aux fins de la modélisation. Après la fourche à New Westminster, le chenal principal comprend plusieurs grandes îles : Annacis, Tilbury, Deas Island, Kirkland et Westham. La grille comporte des limites ouvertes de chaque côté : une limite ouverte en amont près du pont de Port Mann, une limite ouverte le long du bras nord du fleuve Fraser (ci-après North Arm) près de l'extrémité est de l'île Mitchell, et une vaste limite ouverte sur Roberts Bank qui forme la connexion océanique au SSS150. La grille interne n'est pas un raffinement de la grille d'origine et ne partage donc pas la même rotation de grille locale que le SSS150.

Nous utilisons un emboîtement à sens unique pour réduire l'échelle à partir du SSS150, dont la configuration et le forçage sont abordés dans (Dunphy *et al.* Sous presse) et par conséquent, ce document se concentre principalement sur le domaine du SF30.

La bathymétrie est constituée principalement à partir des données du Service hydrographique du Canada (SHC) qui ont été transférées au système canadien de référence altimétrique de 1928 ([CGVD28](#)) (Mitchell O'Flaherty-Sproul, comm. pers.) et combinées lorsqu'elles sont disponibles aux données de bathymétrie les plus récentes en date de mai 2020. La ligne de hautes eaux (SHC, comm. pers.) a été utilisée dans le cadre de l'ensemble de données bathymétriques (les valeurs locales de hautes eaux ont été transférées au CGVD28) et comme polygone pour le calcul du masque terrestre. Nous imposons une profondeur minimale de 4 m pour assurer la stabilité du modèle à marée basse, car le NEMO 3.6 n'a pas de formulation d'inondation et d'assèchement, ce qui a pour effet d'approfondir artificiellement les zones intertidales. La grille verticale utilise des niveaux z avec des cellules partielles et une formulation de volume variable (Lavier *et al.* 2007) de sorte que l'espacement de la grille s'étire et se comprime à mesure que le niveau d'eau monte et descend. L'espacement vertical nominal de la grille dans le SF30 est hérité du SSS150, qui à son tour hérite du SS500, une composante du système SPCOG-O v2.0.0 (Paquin *et al.* 2021b) et varie de 1 m près de la surface à 11 m en profondeur dans le SF30 et à 27 m dans le SSS150.

Le tableau 1 répertorie les paramètres de grille et les principaux paramètres de NEMO utilisés pour chaque grille.

Pour comparer la résolution des modèles, nous avons tracé la vitesse de la couche de surface pour trois niveaux d'agrandissement (figure 3, figure 4 et figure 5). À la figure 3, nous voyons que le SPCOG-O n'offre aucune représentation du fleuve Fraser et que le SS500 offre une résolution grossière jusqu'à la fourche de Pitt River environ avec une à trois cellules de grille

pour couvrir la largeur du fleuve. Par ailleurs, le SSS150 offre une représentation du fleuve jusqu'à Mission et le lac Pitt. La baie Boundary est exclue du SSS150.

La figure 4 montre la même vitesse en surface, mais sans le SPCOG-O et en ajoutant le SF30. Nous voyons ici que le SSS150 réussit à mieux saisir les détails et commence à représenter le lit du fleuve entre ses deux rives avec quatre à six cellules de grille dans les parties étroites. Avec le SF30, nous avons atteint une résolution assez élevée pour couvrir le lit du fleuve avec 15 à 20 cellules de grille entre les deux rives. La figure 5 montre un agrandissement de la figure 4. Il est à noter qu'en raison de la non-représentation du processus d'inondation et d'assèchement dans le NEMO 3.6, les replats de marée (zones intertidales) sont mal représentés dans les quatre modèles; nous visons à améliorer cette situation dans le cadre d'une prochaine révision, en incluant le processus périodique d'inondation et d'assèchement.

Enfin, nous remarquons que la résolution de ces grilles est considérablement plus élevée que celle du forçage de surface (2,5 km). Ce produit de forçage de surface de résolution relativement grossière est peu susceptible de représenter les différences entre la surface terrestre et la surface de l'eau à l'échelle du fleuve, en particulier pour le forçage éolien. Nous nous attendons à ce que le SPOP bénéficie de produits atmosphériques à plus haute résolution à mesure qu'ils deviennent disponibles.

3.3. INITIALISATION

Les conditions initiales du SF30 sont interpolées à partir des conditions du SSS150 au 24 décembre 2016 pour le démarrage dynamique du modèle, l'initialisation du SSS150 étant décrite dans (Dunphy *et al.* Sous presse). Nous permettons plusieurs jours pour l'ajustement au démarrage de SF30 et ne considérons les données de sortie du modèle qu'à partir du 1^{er} janvier 2017 aux fins d'évaluation.

3.4. CONDITIONS AUX LIMITES OUVERTES

Les conditions aux limites du SF30 sont fournies à partir des données instantanées enregistrées du SSS150 à une fréquence de mise à jour de 15 minutes. Le mode barotrope utilise une condition de type Flather (Flather 1976), et la vitesse barocline et les traceurs utilisent le schéma de relaxation du flux (Martinsen and Engedahl 1987). La raison d'être d'une fréquence d'instantanés de 15 minutes est d'atténuer l'écèlement du pic de marée qui se produit autrement avec un forçage horaire. Aucun ajustement ou décalage des marées n'est appliqué à cette connexion de modèle et il n'y a pas de discontinuité à cette limite.

3.5. APPORT EN EAU DOUCE

L'apport en eau douce est une donnée d'entrée dans le SSS150 comme décrit dans (Dunphy *et al.* Sous presse). Aucune autre source d'eau douce n'est utilisée dans le SF30.

3.6. MODÈLE DES GLACES

Le bas Fraser n'est pas connu pour geler pendant l'hiver, bien que, en de rares occasions, de la glace de rivière se forme pendant de courtes périodes. Cependant, en raison du manque de données pour valider un modèle des glaces, nous avons configuré ce modèle pour utiliser la caractéristique « ice-if » du NEMO avec une climatologie des glaces vide au lieu d'un modèle dynamique des glaces.

3.7. STABILITÉ DU SYSTÈME DE MODÉLISATION

La stabilité du SSS150 est décrite dans (Dunphy *et al.* Sous presse), où les auteurs notent une longue simulation rétrospective de cinq ans et une série de prévisions sans aucun problème de stabilité. Plusieurs événements extrêmes survenus pendant la période de simulation rétrospective, y compris une crue extrême, des périodes de gel pendant lesquelles une couverture de glace s'est formée dans le fleuve Fraser et des périodes de panne des instruments, ont fourni l'occasion de tester la réponse du système à des stress réalistes. Le système de modélisation a fonctionné comme prévu lors de ces événements extrêmes, et les simulations sont demeurées stables. Des arguments semblables s'appliquent au SF30. Comme dans le cas du SSS150, des simulations de tests de sensibilité systématiques sont réservées à des travaux futurs.

4. PARAMÈTRES D'ÉVALUATION

Les performances de chaque SPOP sont évaluées au moyen d'une simulation rétrospective pluriannuelle et d'un ensemble plus court de prévisions, où les dates prises en compte sont contraintes par la disponibilité des forçages de surface et aux limites obtenus à partir de modèles à plus grande échelle. L'évaluation de la simulation rétrospective utilise un vaste ensemble d'observations pour analyser la représentation des conditions océaniques par le modèle, y compris l'analyse des marées et la dérive modélisée, qui seraient difficiles à évaluer avec une simulation courte. Dans le même temps, l'évaluation des prévisions se concentre sur la mesure de la dégradation de la performance du modèle en fonction de l'échéance de la prévision pour un plus petit ensemble d'observations disponibles pendant la période de prévision.

Les sources de données contrôlées pour la qualité ont été privilégiées lorsque cela était possible. Nous avons effectué un contrôle de qualité supplémentaire sur certaines données selon les besoins, y compris l'inspection visuelle, le seuillage et l'élimination automatique des pics suspects pour éliminer les données douteuses.

4.1. SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES

La performance des simulations rétrospectives est évaluée par comparaison avec les données d'observation disponibles. Pour chaque observation, nous extrayons l'observation virtuelle correspondante du modèle. L'erreur est définie comme suit

$$\text{ERREUR} = \mathcal{X}_m - \mathcal{X}_o$$

où $\mathcal{X}_o$ et $\mathcal{X}_m$ sont les valeurs observées et modélisées de telle sorte qu'une valeur positive/négative indique une surestimation/sous-estimation du modèle. Pour les courants, $\mathcal{X}_o$ et $\mathcal{X}_m$ sont considérés comme des nombres complexes, la partie réelle représentant la composante de vitesse vers l'est et la partie imaginaire celle vers le nord.

Nous utilisons plusieurs indices de performance (scores) statistiques qui conservent les unités de $\mathcal{X}$, le biais, la racine de l'erreur centrée (non biaisée) quadratique moyenne (ci-après CRMSE) et la racine de l'erreur quadratique moyenne (ci-après RMSE),

$$\text{biais} = \frac{1}{N} \sum \text{ERREUR} = \frac{1}{N} \sum \mathcal{X}_m - \frac{1}{N} \sum \mathcal{X}_o = \overline{\mathcal{X}_m} - \overline{\mathcal{X}_o},$$

$$\text{CRMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (\text{ERREUR} - \text{biais})^2},$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \text{ERREUR}^2} = \sqrt{\text{biais}^2 + \text{CRMSE}^2}.$$

Nous utilisons également l'indice de performance sans unité gamma carré

$$\gamma^2 = \frac{CRMSE^2}{\Sigma(x_o - \bar{x}_o)^2},$$

qui est le rapport entre la variance de l'erreur et la variance observée, de sorte que 0 indique une concordance parfaite entre les variances du modèle et de l'observation et 1 indique que la variance de l'erreur est aussi importante que la variance du signal. Une valeur de 1 ou supérieure indique aucune capacité de prédiction.

Pour les scalaires, nous utilisons le résultat sans unité du coefficient de corrélation de Pearson de l'échantillon

$$PEARSONR = \frac{\Sigma(x_m - \bar{x}_m)(x_o - \bar{x}_o)}{\sqrt{\Sigma(x_m - \bar{x}_m)^2 \Sigma(x_o - \bar{x}_o)^2}},$$

où 0 indique qu'il n'y a aucune corrélation et 1 indique une corrélation parfaite.

Pour les vecteurs (courants), nous avons le coefficient de corrélation vectorielle (Kundu 1976; Röhrs and Christensen 2015)

$$VECTORR = \frac{\Sigma(x_m - \bar{x}_m)^* (x_o - \bar{x}_o)}{\sqrt{\Sigma(x_m - \bar{x}_m)^2 \Sigma(x_o - \bar{x}_o)^2}},$$

où l'astérisque représente une conjugaison complexe, ce qui est également implicite pour la mise au carré des nombres complexes. Cette quantité est un nombre complexe, dont la grandeur mesure la corrélation globale et l'argument mesure l'angle moyen du courant modélisé par rapport à l'observation. Ici, nous calculons l'angle comme positif en sens horaire pour respecter la convention de représenter la direction du courant comme positive dans le sens horaire à partir du Nord. Enfin, l'angle de corrélation vectorielle n'est considéré comme significatif que lorsque l'amplitude de corrélation est grande (Kundu, 1976).

4.1.1. Niveau d'eau

Les observations des niveaux d'eau du Service hydrographique du Canada (SHC) sont rapportées du zéro des cartes du SHC au système canadien de référence altimétrique de 1928 ([CGVD28](#)) en soustrayant un décalage propre à chaque station. Ces décalages sont basés sur des mesures locales à chaque station par le système mondial de navigation par satellite (GNSS). Les stations du Pacifique situées aux États-Unis sont transférées du niveau de référence américain au système CGVD28 au moyen des outils en ligne [VDatum](#) de la NOAA et de [Transformations entre les référentiels altimétriques](#) de Ressources naturelles Canada (RNC). Les stations de l'Atlantique situées aux États-Unis ont été recueillies en référence à un niveau moyen des basses eaux et converties au système CGVD28 à l'aide de surfaces de conversion fournies par le SHC. Les observations des niveaux d'eau tirées des Relevés hydrologiques du Canada (RHC) sont converties au système CGVD28 en utilisant les décalages fournis par RHC.

L'analyse harmonique des marées est effectuée à l'aide de [T TIDE](#) sur des segments d'une année avec un intervalle d'échantillonnage d'une heure. Lorsque les données sont disponibles à une fréquence plus élevée, elles sont interpolées/sous-échantillonnées à la fréquence horaire. Les observations pour lesquelles il manque plus de 10 % de données ne sont pas analysées. L'analyse harmonique des marées permet de décomposer le niveau d'eau total entre les parties dues ou non à la marée comme suit :

$$H_{total} = H_{marée} + H_{résiduel}.$$

Les composantes annuelles (SA) et semi-annuelles (SSA) sont exclues de l'analyse harmonique des marées; elles se trouvent intégrées dans la composante résiduelle. Pour les besoins actuels, cette méthode convient puisque le même processus est appliqué au modèle et aux observations et que la proportion avec laquelle les modèles ne reproduisent pas la composante SA ou SSA est exprimée dans les scores d'erreur pour la composante résiduelle. Les composantes dont le rapport signal-bruit est inférieur à 2 sont également intégrées dans la composante résiduelle. Le biais du niveau d'eau est inclus dans la composante résiduelle. Les scores sont indiqués pour les composantes totale, de marée et résiduelle. En raison d'une corrélation croisée négligeable entre le niveau d'eau avec et sans marée, nous avons une bonne approximation avec la formule

$$CRMSE_{total}^2 \cong CRMSE_{marée}^2 + CRMSE_{résiduel}^2,$$

qui montre comment ces deux erreurs contribuent au total. Les erreurs d'amplitude et de phase sont indiquées pour les composantes significatives, tout comme l'erreur de marée

$$\text{ERREUR de MARÉE} = \left[\frac{1}{2} (h_o^2 + h_m^2) - h_o h_m \cos(\phi_o - \phi_m) \right]^{\frac{1}{2}},$$

où h_o et ϕ_o sont l'amplitude et le retard de phase par rapport à Greenwich observés (indice o) pour une composante de marée donnée, tandis que h_m et ϕ_m sont l'amplitude et la phase modélisées (indice m) (Cummins and Oey 1997).

4.1.1.1. Évaluation des ondes de tempête

Pour évaluer la performance des modèles lors des tempêtes, une poignée de périodes de tempête sont sélectionnées pour chaque port. La base de données sur les cyclones de (Zhang *et al.* 2019), qui fournit les trajectoires mondiales des tempêtes de 1958 à 2021 (la figure 6 montre un zoom sur l'Amérique du Nord) guide la sélection. La base de données a été consultée pour sélectionner les tempêtes qui sont passées dans un rayon de quelques centaines de kilomètres du domaine de chaque modèle portuaire. Ceci fournit une liste complète des tempêtes survenues pendant la période de la simulation rétrospective pour chaque port. Cependant, cette liste est assez longue pour certains ports (en particulier Canso et Saint John) et les listes les plus longues sont réduites en prenant en compte la pression minimale au centre de la dépression, en examinant les marégraphes et les rapports des médias locaux sur les impacts des tempêtes. L'évaluation suit l'évaluation des niveaux d'eau résiduels de la simulation rétrospective pour ce qui est des scores de performance et des graphiques, mais se limite aux périodes de tempête.

La décomposition d'une onde de tempête en fonction de la marée se fait en appliquant une période de 40 jours autour du pic de la tempête, soit de 20 jours avant à 20 jours après. Cette méthode diffère de l'analyse typique des niveaux d'eau, qui est effectuée sur des périodes annuelles et peut donc comprendre plus de composantes harmoniques. Cependant, l'utilisation d'une fenêtre plus courte permet de mieux supprimer l'effet de la marée lors de chaque tempête, en particulier dans les régions avec des marées non stationnaires.

Il est à noter que les ondes de tempête peuvent interagir de manière non linéaire avec les marées et avoir un impact sur les niveaux d'eau, mais nous n'étudions pas ce phénomène ici.

4.1.2. Vitesse de courant

Les données de courant sont tirées des profileurs acoustiques de courant par effet Doppler acoustique (ADCP) et de quelques courantomètres installés selon l'une des quatre configurations suivantes : monté sur un mouillage de fond, monté sur une bouée (i.e., flottant), dans un flotteur remorqué par un navire ou monté horizontalement sur une structure côtière

(ADCP horizontal). Seules les composantes horizontales (est-ouest/nord-sud, u/v) des courants sont prises en compte ici. La décomposition en vitesse/direction du courant horizontal est également considérée et les directions sont calculées comme positives dans le sens horaire à partir du nord.

Les données du modèle sont extraites pour correspondre à la durée et à la localisation des données observées. Les séries chronologiques de plus de 29 jours et dont moins de 10 % des données sont manquantes sont décomposées en fonction de la marée à l'aide de T_TIDE; les données horaires sont utilisées pour cette décomposition et, lorsque des données plus fréquentes sont disponibles, elles sont d'abord sous-échantillonnées. Comme pour le niveau d'eau, les composantes annuelles (SA) et semi-annuelles (SSA) sont exclues de l'ajustement. Une valeur de 2 est utilisée pour le nombre de Rayleigh et les observations et les données du modèle sont traitées de la même façon.

Les mesures de courants sont plus bruitées, ont tendance à avoir plus de données manquantes, sont moins stationnaires et sont influencés par plus de processus non linéaires que les observations du niveau d'eau. Ces facteurs rendent le processus de décomposition en fonction de la marée moins robuste. En raison des processus non linéaires comme la friction sur le fond, une partie de l'énergie (cinétique) de la marée se propage à des fréquences adjacentes, de sorte que la décomposition en harmoniques de marée ne reflète pas toute la variabilité induite par les marées et qu'une partie de cette variabilité demeure dans les courants résiduels. Nous n'appliquons pas de filtres passe-bas ou coup-bande au signal résiduel pour réduire le bruit. Cela fournirait une série chronologique du signal résiduel dont le signal de la marée a été complètement retiré, mais une partie du signal total ne serait alors comptabilisée ni dans l'évaluation des courants résiduels, ni dans celle des courants de marée. Compte tenu de ces mises en garde, la composante de la marée peut être décrite plus précisément comme étant « la composante des courants que T_TIDE est en mesure d'ajuster ». Les courants sont évalués à l'aide d'indicateurs de performance semblables à ceux utilisés pour les niveaux d'eau, en utilisant une formulation en nombre complexe. Les composantes de la marée sont évaluées à l'aide de l'erreur elliptique (Cummins and Thupaki 2018)

$$D_u = \left[\frac{1}{2} (A_o^2 + B_o^2 + A_m^2 + B_m^2) - \cos(g_o - g_m) \cos(\theta_o - \theta_m) (A_o A_m + B_o B_m) - \sin(g_o - g_m) \sin(\theta_o - \theta_m) (A_o B_m + A_m B_o) \right]^{1/2},$$

où A et B sont respectivement le demi-grand axe et le demi-petit axe, les indices o et m correspondent aux valeurs observées et modélisées, g est la phase et θ est l'angle d'inclinaison. Pour les séries chronologiques des courants résiduels et totaux, les formulations en nombre complexe des scores énumérés au début de la section, incluant le biais, l'erreur CRMSE, l'indicateur γ^2 et la corrélation vectorielle, sont utilisées.

Il est à noter que pour les instruments à positionnement fixe, en particulier les courantomètres amarrés et les ADCP amarrés ou installés horizontalement, nous nous attendons à ce que les scores soient sensibles aux détails du modèle qui est évalué. De petites erreurs de bathymétrie peuvent modifier l'emplacement de structures déterministes (tourbillons, jets, méandres, etc.) et conduire ainsi à de grandes erreurs dans les scores d'évaluation. Parallèlement, la variabilité chaotique interne du modèle peut également affecter l'emplacement de ces structures. Une modélisation d'ensemble pourrait aider à minimiser l'effet de cette dernière, mais dépasse la portée du présent travail.

4.1.2.1. ADCPs horizontaux

Les données des ADCP horizontaux sont décomposées en composantes le long du chenal et à travers le chenal, et l'évaluation est effectuée principalement à partir des données médianes pour éviter les effets de bord. Lorsqu'une série chronologique suffisamment longue est disponible, une analyse des marées est réalisée comme pour les instruments amarrés. Quelle que soit la durée totale de la série chronologique, les données de la première semaine sont présentées afin de montrer la variabilité quotidienne du signal et la façon dont le modèle la représente. Les diagrammes de dispersion servent à illustrer la distribution de la vitesse et de la direction du courant total et les demi-grand axes des ellipses des courants de marée sont comparées dans la mesure du possible.

4.1.2.2. Courantomètres et ADCPs ancrés

Les courantomètres enregistrent le courant à une seule profondeur, de sorte que ces courants sont évalués à la profondeur propre à chaque instrument. Dans le cas des ADCPs installés sur des mouillages de fond ou des bouées, un ensemble standard de profondeurs est sélectionné pour chaque port pour évaluer les courants, en tenant compte de la bathymétrie locale et de la disponibilité des données; par souci de concision, les statistiques ne peuvent être fournies qu'à certaines profondeurs pour chaque instrument considéré. Ces niveaux sont définis soit par rapport à une surface nominale (i.e., une surface sans variation de la hauteur de la surface de la mer), soit par rapport à la surface de la mer variable dans le temps. Pour les régions où les ADCPs sont installés dans des eaux relativement profondes sans grande amplitude des marées, il suffit d'utiliser la surface nominale. Pour les régions peu profondes ou celles où l'amplitude des marées est importante, l'évaluation est effectuée par rapport à la surface de la mer variable dans le temps, en utilisant la profondeur totale observée pour traiter les observations et la surface de la mer modélisée pour traiter les courants modélisés.

Les observations sont prétraitées de manière à éliminer toute donnée erronée : les valeurs supérieures à 10 m/s sont éliminées et les données sont rééchantillonnées si nécessaire pour être espacées uniformément.

L'analyse des marées est effectuée sur toute série chronologique d'au moins 29 jours aux profondeurs où moins de 10 % des données sont manquantes. Les ellipses des courants de marée sont tracées pour les composantes de marée les plus importantes, y compris leurs profils en fonction de la profondeur. Les séries chronologiques et les histogrammes sont tracés pour les courants résiduels et totaux. L'analyse des courants totaux n'est réalisée que pour les séries chronologiques plus courtes ou les séries chronologiques avec des données manquantes. Il est à noter que s'il manque des données à des phases régulières de la marée, les résultats analysés peuvent alors être biaisés, de sorte que les séries chronologiques comportant des trous réguliers importants ne sont donc pas analysées ou présentées.

4.1.2.3. Transects d'ADCPs

Les transects d'ADCPs sont trop courts pour une analyse des marées et seuls les courants totaux sont donc pris en compte. Une décomposition est réalisée le long du transect et en travers du transect en utilisant un angle constant pour l'ensemble du transect; cela suffit puisque les transects sont habituellement courts et droits. Nous utilisons les tracés des vitesses selon la profondeur le long des transects pour l'évaluation. Les diagrammes de dispersion du biais par rapport à l'erreur CRMSE sont également présentés, les statistiques étant calculées à chaque point physique et intégrées sur le transect.

4.1.3. Propriétés de l'eau

Les profils de conductivité-température-profondeur par sonde CTD sont regroupés en sous-régions définies manuellement en fonction de la géographie de chaque domaine portuaire. Cela permet d'effectuer une évaluation globale des zones, y compris le biais et l'erreur CRMSE en fonction de la profondeur de chaque zone. Les résultats du modèle sont obtenus à partir du point le plus proche de l'emplacement des données et le plus proche de l'heure d'observation. Les profils verticaux sont interpolés aux niveaux z du modèle pour ramener toutes les données à des profondeurs uniformes.

Les mesures de la température de surface de la mer par des bouées et des sondes CTD ancrées sont évaluées en calculant le biais, l'erreur CRMSE, les indices de performance γ^2 et du coefficient de corrélation de Pearson r sur toute la période d'évaluation. Les valeurs du modèle sont interpolées linéairement aux emplacements des observations dans les dimensions horizontale et verticale. Les séries chronologiques observées et modélisées sont interpolées au plus grand intervalle de données commun.

Les thermosalinographes installés sur les traversiers sont des capteurs de température et de conductivité embarqués sur les navires. Ils fournissent une mesure de la température et de la salinité de l'eau proche de la surface en recueillant les données par le biais d'un des circuits d'eau de mer du navire. Les résultats du modèle qui seront comparés à ces données sont obtenus à partir du point le plus proche des emplacements observés à la fois horizontalement et verticalement, puis interpolés linéairement aux heures d'observation. Des diagrammes de Hovmöller des observations, des résultats du modèle et des différences, ainsi que des statistiques de base, sont utilisés pour évaluer la performance du modèle en ce qui concerne l'eau à proximité de la surface.

4.1.4. Dérive

La performance des modèles en termes de prévision des trajectoires de dérive est évaluée en comparant les trajectoires observées des bouées dérivantes de surface à des trajectoires analogues modélisées à l'aide des courants de surface prédits par les modèles portuaires combinés au forçage éolien tiré des prévisions atmosphériques nationales du SHRPD. Cette comparaison est effectuée à l'aide de l'outil d'évaluation de la dérive mis au point dans le cadre de la sous-initiative « Améliorer la prévision de la dérive et la modélisation côtière », dans la configuration OpenDrift (Soontiens and Holden 2024).

La dérive due au vent des bouées dérivantes de surface est prise en compte en calculant le coefficient de traînée du vent en fonction de la surface de résistance offerte par les bouées dérivantes (Niiler *et al.* 1995; Daniel *et al.* 2002; Röhrs *et al.* 2012; Hourston 2021; Blanken *et al.* 2021). Ce coefficient paramètre l'effet de la traînée directe du vent sur les parties de la bouée dérivante exposées au-dessus de la surface de l'eau et varie selon la géométrie de la bouée. Pour tenir compte de la dérive de Stokes due aux vagues, 1 % de la vitesse du vent est ajouté (Sutherland *et al.* 2020) au calcul de la dérive due au vent qui est appliquée dans la prévision de la trajectoire.

Cette méthode d'application de la dérive due au vent suppose que les courants qui agissent sur la partie immergée de la bouée dérivante, de même que les vents qui soufflent directement à la surface de l'océan, sont parfaitement connus. Cependant, aucune de ces hypothèses n'est vraie en réalité, puisque : 1) la représentation des courants de surface dans NEMO est limitée par les restrictions de stabilité pour la résolution verticale près de la surface et l'incertitude du modèle en général; et 2) la vitesse du vent tirée du modèle du SHRPD est également assujettie à l'incertitude du modèle et elle est fournie à 10 m, où les vents sont habituellement environ

30 % plus forts qu'à 1 m, mais peuvent être jusqu'à cinq fois plus forts selon la vitesse du vent et la stabilité atmosphérique (Smith 1988).

La représentation de la dérive de Stokes comme 1 % de la vitesse du vent constitue une autre hypothèse, car cette valeur a été calculée en comparant les trajectoires de divers types de bouées dérivantes de surface aux courants du modèle océanique du Système régional de prévision océan-glace (SRPOG) et du modèle atmosphérique du Système canadien de prévision de l'Arctique (SCPA) (Sutherland *et al.* 2020). Comme il est indiqué dans la section de discussion de (Sutherland *et al.* 2020) et les références qui s'y trouvent, cette valeur peut varier considérablement selon la combinaison du forçage océanique et atmosphérique, ce qui signifie que l'incertitude des modèles contribue beaucoup à la valeur appropriée ici. Les auteurs notent également qu'il est préférable d'inclure explicitement la dérive de Stokes fondée sur un système de prévision des vagues plutôt que d'utiliser un paramétrage reposant sur la vitesse du vent.

Le terme de la dérive due au vent utilisé ici pourrait être optimisé en le calculant pour chaque combinaison de modèles océan/atmosphère selon la procédure décrite dans (Sutherland *et al.* 2020), mais cela dépasse la portée du présent rapport. Nous nous concentrons sur l'amélioration du forçage des courants de surface pour les simulations de la dérive, sans évaluer la pertinence des prédictions du vent dans les domaines du modèle portuaire pour prévoir la dérive ou commenter l'utilité potentielle d'un système de prévision des vagues à l'échelle du port. Le paramétrage de la dérive due au vent utilisé ici vise simplement à fournir un lien déterministe cohérent entre les courants modélisés, les vents et le mouvement des divers types de dériveurs. Étant donné l'incertitude considérable associée à ce terme de la dérive due au vent, nous considérons que c'est l'évaluation des courants de surface par rapport aux observations des ADCPs et des courantomètres qui est le facteur déterminant de l'aptitude du modèle à prévoir la dérive, plutôt que l'analyse des trajectoires des bouées dérivantes observées et modélisées.

Les périodes pendant lesquelles les bouées dérivantes étaient actives dans le domaine du modèle sont identifiées et les trajectoires modélisées sont amorcées toutes les heures le long des trajectoires de dérive. Les avantages de démarrer les trajectoires de dérive de cette manière sont de réduire la sensibilité aux conditions initiales et d'augmenter le nombre de trajectoires disponibles. Cependant, cela signifie que certaines trajectoires ne sont pas indépendantes et que les erreurs peuvent donc être corrélées. Les trajectoires modélisées ont été calculées pour une période spécifiée par l'utilisateur de 24 heures ou plus, dans la mesure du possible. Toutefois, dans certaines régions, la majorité des trajectoires des dériveurs observées duraient moins de 24 heures et dans ce cas une durée plus courte a été choisie pour calculer la trajectoire modélisée.

Les trajectoires des bouées dérivantes observées ont été limitées aux zones couvertes par les cellules « mouillées » du domaine du modèle portuaire afin d'éviter de lancer virtuellement une bouée dérivante dans une zone où des observations ont pu être réalisées près du rivage, mais qui n'est pas résolue dans le domaine (cellule de terre) à cause de la précision de la résolution. En outre, pour faciliter l'interpolation des emplacements de départ pour les bouées virtuelles, les trajectoires observées ont été fractionnées lorsque les intervalles de temps entre les relevés de position dépassaient deux heures. Dans les parties restantes, les relevés de position ont été interpolés à un intervalle de temps constant allant de cinq minutes à une heure.

Pour chaque paire de trajectoires modèle – observation, deux statistiques sont calculées pour évaluer la performance du modèle. La première est la distance de séparation, D , qui est donnée par la formule

$$D(t) = |\dot{x}_o(t) - \dot{x}_m(t)|$$

où x_o et x_m sont les positions de la bouée dérivante observé et modélisé, et $||$ indique l'ampleur de la différence vectorielle, c'est-à-dire la distance, entre eux.

La deuxième est l'indice de comparaison instantané, S , d'après (Molcard *et al.* 2009), qui est donné par la formule

$$S(t) = \max\left(0, 1 - \frac{D(t)}{d_o(t)}\right)$$

où $d_o(t)$ est le déplacement observé à partir du point de départ de la paire de bouées dérivantes. La justification de la normalisation par $d_o(t)$ est d'améliorer la comparaison attribuée à la prédiction d'une trajectoire à mesure que la longueur de la trajectoire augmente, même si la distance de séparation demeure constante. Une distance de séparation de 500 m, par exemple, représente une erreur moins grave dans une trajectoire de 10 km de long que dans une trajectoire de 500 m de long. Une valeur de $S=1$ indique une prédiction parfaite.

4.2. PRÉVISIONS

Pour évaluer des prévisions, il faut exécuter un ensemble de prévisions (ici d'une durée de 48 heures, chacune commençant à 00Z) et évaluer la performance selon les prédictions indépendantes en fonction de l'échéance de la prédiction. L'évaluation des prévisions a été effectuée pour un ensemble d'environ 60 prévisions consécutives en comparant les valeurs du modèle aux données de marégraphes, aux températures de surface de la mer et aux enregistrements des ADCPs horizontaux. Pour des raisons logistiques, l'ensemble des prévisions ont été réalisées lors de l'hiver 2021/22. La performance des prévisions a été évaluée comme étant l'écart (biais et erreur CRMSE) avec les valeurs observées en fonction de l'échéance des prévisions. Les courbes de croissance des erreurs représentent l'écart moyen sur l'ensemble des prévisions évaluées. Nous incluons des intervalles de confiance à 95 % calculés au moyen d'une méthode « bootstrap ».

Pour décomposer en fonction de la marée les séries chronologiques de niveaux d'eau issues des prévisions et de la simulation rétrospective correspondante à la période des prévisions, nous soustrayons le signal de marée précalculé d'après cette simulation rétrospective couvrant la période d'évaluation des prévisions. Le signal de marée est obtenu avec un T_TIDE ajusté avec un nombre de Rayleigh aussi bas que 0,1 (surajustement) pour éliminer un maximum d'énergie aux fréquences de marée. Une telle suppression de l'énergie des marées a été appliquée pour éliminer des courbes de croissance des erreurs les résidus de marée, qui autrement domineraient la courbe.

5. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES

L'objectif ici est d'évaluer la performance de SSS150 et de SF30. Les comparaisons avec les résultats des modèles à plus grande échelle SPCOG-O et SS500 sont incluses dans la mesure du possible. Cependant, les résultats de ces modèles à plus grande échelle sont disponibles sous forme d'instantanés horaires pour le niveau de la mer, les courants barotropes, les courants de surface et de fond, et les traceurs de surface et de fond, mais sous forme de moyennes quotidiennes pour les courants et les traceurs 3D. Cette fréquence de sauvegarde plus faible des champs 3D empêche certaines comparaisons (en particulier pour les enregistrements des courantomètres).

Nous limiterons également l'évaluation au sous-ensemble sud du SSS150 couvrant une zone de la mer des Salish près du delta du fleuve Fraser, du bas Fraser, de Pitt River et du lac Pitt. Les emplacements des instruments utilisés pour la présente analyse sont indiqués à la figure 7.

Le reste du domaine couvrant la baie Howe et la baie English avec la partie adjacente de la mer des Salish et du bras Burrard est évalué dans (Dunphy *et al.* Sous presse). Notez que pour des raisons pratiques, l'acronyme anglophone CIOPS-W (ou CIOPSW) est utilisé sur certaines figures en lieu de l'acronyme francophone SPCOG-O.

La période d'évaluation rétrospective s'étend sur cinq ans, du 1^{er} janvier 2017 au 1^{er} janvier 2022. Les résultats du SSS150 et du SF30 sont enregistrés sous forme d'instantanés à intervalles horaires pour permettre des comparaisons qui utilisent l'analyse harmonique des marées.

5.1. NIVEAU D'EAU

Nous évaluons la performance relative au niveau d'eau à l'aide des stations de mesure du niveau d'eau énumérées au tableau 2. Nous avons des données sur le niveau d'eau pour notre période de simulation rétrospective pour les neuf premières stations et les composantes calculées à partir d'enregistrements d'au moins 365 jours de longueur pour quatre stations supplémentaires. La liste des stations commence à partir de la jauge de niveau d'eau de North Arm, puis selon un ordre d'ouest en est à partir de Roberts Bank pour remonter ensuite le fleuve Fraser. Un décalage de 12 cm a été ajouté au résultat du niveau d'eau de SPCOG-O et de SS500 pour les amener approximativement au niveau de référence du CGVD28.

5.1.1. Hauteur moyenne de la surface de la mer

La figure 8 présente le niveau d'eau moyen à long terme obtenu à partir de la simulation du modèle pour la période de 2017 à 2021. D'environ 0,12 m à la limite ouest (océanique), il s'élève le long du chenal jusqu'à 0,8 m à la limite supérieure (est) du domaine du SF30.

5.1.2. Niveau d'eau avec marée

Les composantes de marée sont évaluées à chaque station (tableau 2) pour 15 composantes de marée du tableau 3 au tableau 17. Nous calculons l'amplitude et la phase observées avec T_TIDE (Pawlowicz *et al.* 2002) à partir des données de niveau d'eau de 2018 pour les neuf premières stations. Les quatre dernières valeurs proviennent de données historiques fournies par le SHC.

Les amplitudes et les phases du modèle sont calculées à partir d'une série d'un an pour l'année de simulation 2018 et présentées sous forme d'erreurs d'amplitude, de phase et de marée totale par rapport aux valeurs observées. Les valeurs de 0,000 découlent de l'inclusion de seulement trois décimales dans notre analyse, mais elles ne doivent pas être considérées comme exactement nulles. Toutes les composantes de marée qui sont représentées pour une série d'un an avec le critère de Rayleigh de 1 sont incluses dans l'analyse harmonique des marées.

Les résultats du SPCOG-O sont inclus aux fins d'exhaustivité, bien que cette sous-section porte sur la représentation des marées de SSS150 et de SF30. Nous cherchons ici à démontrer que les composantes sont bien représentées et qu'elles sont comparables ou supérieures à celles du SS500 dans les stations communes. À cette fin, l'erreur de marée correspond au score le plus révélateur et recevra le plus d'attention.

Les huit premières composantes présentées, M2, N2, S2, K2, O1, K1, P1 et Q1, sont incluses dans le forçage des modèles à plus grande échelle SPCOG-O et SS500 et les ajustements à ces derniers sont cohérents. Les sept composantes restantes, L2, J1, NO1, OO1, SO1, NU2 et 2N2 ne font pas partie du forçage des limites ouvertes du SPCOG-O et du SS500. Ces composantes peuvent être faiblement introduites dans ces modèles par un autre mécanisme

(comme par génération non linéaire dans le domaine où un tel mécanisme existe) ou elles peuvent être des artefacts du processus d'ajustement. Nous les incluons dans les tableaux pour les comparer aux modèles à plus haute résolution où ces composantes sont forcées.

L'erreur de marée M2 reste principalement à moins de 7 cm pour tous les modèles et toutes les stations avec des erreurs d'amplitude à moins de 6 cm et des erreurs de phase à moins de 7° (tableau 3). Les exceptions sont le SS500 pour les stations en amont et les modèles SSS150 et SF30 pour Deas Island. Le SF30 fonctionne bien et reste à moins de 1 cm d'erreur de modèle à la meilleure performance pour chaque station. Le modèle SS500 est le meilleur pour les stations extérieures, Steveston et les quatre marégraphes historiques et Deas Island, ce qui confirme que les marées ont été rigoureusement réglées dans ce modèle pour les stations extérieures. Le SSS150 est le meilleur à North Arm, à Sand Heads, à New Westminster et à Port Mann, et le SF30 à Woodward's Landing. Le SSS150 a des amplitudes bien réglées (meilleures ou proches des meilleures de tous les modèles), mais la phase est décalée de 5 à 6° pour Steveston, ce qui produit une erreur totale plus élevée que pour le SS500.

Tous les modèles fonctionnent de la même façon pour K1 (tableau 8). L'erreur de marée pour cette composante ne dépasse pas 7 cm pour tous les modèles, à l'exception du SPCOG-O. Les erreurs d'amplitude sont de moins de 3 cm et les erreurs de phase de moins de 4°. Les autres composantes incluses dans les quatre modèles ont des distributions d'erreurs semblables.

Parmi les composantes incluses uniquement dans le SSS150 (et héritées par le SF30), L2, J1, NU2 et 2N2 sont représentées de manière adéquate par ces modèles, tandis que OO1 et SO1 comportent des erreurs de phase de 15 à 30° et NO1 des erreurs de phase de 50 à 70°. Cela suggère que le SSS150 pourrait bénéficier d'un plus grand réglage relatif aux marées dans le fleuve Fraser pour ces composantes.

Les figure 9 et figure 10 résument la progression de l'amplitude et de la phase pour M2 et K1, respectivement, des stations extérieures aux stations intérieures et montrent la correspondance entre les valeurs observées et les valeurs des modèles. Ces graphiques montrent que l'onde de marée se propage vers l'amont à la bonne vitesse (bonne correspondance de phase) dans les modèles à haute résolution avec un amortissement légèrement plus fort (légère sous-estimation de l'amplitude aux stations en amont).

Le niveau d'eau résiduel (panneaux du milieu des figure 11 à figure 19) montre que, à toutes les stations, les marées présentent un certain degré de non-stationnarité, ce qui se reflète dans un résidu de marée plus élevé pendant la crue de la deuxième moitié de mai 2018. Le niveau d'eau du fleuve est l'un des principaux facteurs qui influent sur les marées dans le fleuve, et les fluctuations du niveau d'eau durant la crue nivale sont observées jusqu'à Steveston. Cependant, les marées semblent non stationnaires, même à la station la plus éloignée, Sand Heads, où les fluctuations du niveau d'eau pendant la crue nivale sont négligeables.

Les spectres de puissance du niveau d'eau à une station extérieure (Sand Heads) et à une station située plus loin en amont (Port Mann) sont indiqués à la figure 20 et à la figure 21, respectivement. Les spectres du niveau d'eau total (panneaux supérieurs gauches) montrent que les oscillations de marée et les oscillations de basse fréquence sont prises en compte dans tous les modèles. Les panneaux inférieurs de ces figures montrent que les modèles à haute résolution présentent des erreurs plus faibles, en particulier dans les bandes de marées. Un niveau d'énergie résiduelle plus élevé dans les bandes de marée à Port Mann, par opposition à Sand Heads (panneaux supérieurs droits des figure 20 et figure 21) confirme que les marées deviennent moins stationnaires au fur et à mesure que l'on remonte le fleuve. Un outil d'analyse harmonique non stationnaire des marées, NS_TIDE (Matte *et al.* 2013), serait préférable pour analyser les marées dans le fleuve et sera envisagé à l'avenir.

Malgré les variations interannuelles du niveau d'eau, les principales composantes de marée sont stables au fil des ans, les amplitudes K1 variant à moins de 2,5 cm et les phases variant à moins de 2°, et d'encore moins pour M2 (non illustré).

5.1.3. Niveau d'eau résiduel

Les figure 11 à figure 19 montrent les comparaisons du niveau d'eau résiduel pour chaque modèle. Le SSS150 et le SF30 se suivent de près, et le SPCOG-O fait de même pour les stations les plus éloignées. L'erreur du SF30 est légèrement inférieure à celle du SSS150 pour deux stations en amont, New Westminster et Port Mann. Le SS500 diffère des trois. Pour les deux stations de Steveston, le SS500 saisit la variabilité pendant la crue nivale nettement mieux que les autres modèles. Cependant, pour toutes les autres stations, le SS500 fait bien pire, surtout pendant la crue nivale. En dehors de cette période de crue, les erreurs se situent pour la plupart à moins de 10 cm, à l'exception de Sand Heads et de Steveston (figure 12 et figure 13, respectivement), dont les erreurs correspondent aux décalages constatés ci-dessus.

5.1.4. Scores globaux

Nous présentons trois tableaux de notation qui comparent la performance de chaque modèle pour chaque station pour l'année 2018, où les entrées manquantes dans le tableau sont attribuables à des stations qui ne se situent pas dans le domaine du modèle ou à des données manquantes ou inutilisables.

Le tableau 18 montre les scores du niveau d'eau de marée pour l'année 2018 pour trois types de scores. Ici, les scores s'améliorent généralement avec l'augmentation de la résolution du modèle. Par exemple, le SF30 a une CRMSE de 5 à 6 cm au-dessus de celle des stations extérieures, augmentant graduellement pour les stations situées plus en amont et atteignant 10 cm à Port Mann. Deas Island est une exception (probablement en raison de nombreuses données manquantes), car la CRMSE est meilleure pour le SS500 que pour le SF30 (14,7 cm).

Le tableau 19 montre les scores du niveau d'eau résiduel pour l'année 2018 pour trois types de scores. Dans ce cas, le SS500 correspond le mieux aux données observées aux deux jauges de Steveston, tandis que le SSS150 et le SF30 affichent de meilleurs scores pour toutes les autres stations, le SF30 surpassant le SSS150 aux stations en amont et affichant constamment une CRMSE de 5 à 7 cm pour la plupart des stations.

Le tableau 20 résume les scores totaux du niveau d'eau pour l'année 2018 pour quatre types de scores. Le biais pour le SSS150 et le SF30 est de 1 à 3 cm, le SSS150 montrant un biais légèrement inférieur pour la plupart des stations. La station de Woodward's Landing et les stations situées plus en amont ne sont pas couvertes par le SPCOG-O et sont mal représentées dans le SS500, ce qui donne de piètres scores. Un biais anormal est observé pour Sand Heads et Steveston, ce qui suggère que la conversion de CD à CGVD28 pour Sand Heads et Steveston pourrait être décalée d'environ -8 et +12 cm, respectivement. Le score de la CRMSE indique une amélioration générale à mesure que nous augmentons la résolution. La CRMSE du SPCOG-O est de l'ordre de 15 cm, celle du SS500 est de 12 cm, et celle du SSS150 est de 10 cm, et le SF30 à haute résolution est à 8 cm pour les stations situées dans la partie inférieure du fleuve, et augmente quelque peu pour les stations en amont. Une amélioration semblable de la résolution du modèle se reflète également dans les scores γ^2 qui s'échelonnent de façon quadratique avec la CRMSE, ainsi que dans les scores de Pearson.

Pour illustrer la stabilité de ces scores au fil des ans, nous avons inclus un graphique récapitulatif à la figure 22, où chaque rangée représente un modèle différent, les panneaux de gauche montrent le biais du niveau d'eau total par rapport à la CRMSE, et les panneaux de

droite montrent la CRMSE avec marée par rapport à la CRMSE résiduelle. Chaque couleur représente une station différente, et chaque marqueur représente une année différente.

Les scores sont généralement cohérents d'une année à l'autre, les variations du biais d'une année à l'autre se situant à moins de 10 cm et les variations de la CRMSE à moins de 5 cm. Les exceptions comprennent les stations en amont pour le SS500, dont il a été question ci-dessus, et la station de Deas Island, dont les valeurs de la CRMSE sont élevées, et une variabilité d'une année à l'autre pour tous les modèles dont la cause reste à déterminer. Ici, nous remarquons seulement la qualité douteuse des données d'observation pour cette station qui montrent des écarts aléatoires par rapport au cycle saisonnier « normal » (non illustré).

5.1.5. Niveau d'eau des ondes de tempête

L'évaluation des ondes de tempête tient compte du niveau d'eau résiduel pendant des intervalles de quatre jours correspondant au passage des systèmes à basse pression atmosphérique dans la région. Les figure 23 à figure 31 montrent le niveau d'eau observé et modélisé à neuf stations où chaque panneau représente un événement de tempête pour un maximum de huit événements. La variabilité du niveau d'eau pendant les événements est bien saisie dans tous les modèles, les modèles à haute résolution ayant une meilleure performance que les modèles à plus faible résolution. Les valeurs de pointe ne montrent aucune erreur constante, sauf pour l'événement le plus fort, *BCFloods*, en novembre 2021. Le pic des ondes pour cet événement est sous-estimé de 30 cm aux stations extérieures et de 60 cm aux stations intérieures. Aucun biais systématique n'est observé dans les modèles à haute résolution. Le SS500 comporte un biais positif de 20 à 30 cm aux stations en amont, New Westminster et Port Mann, tandis que le SPCOG-O comporte un biais négatif d'environ 5 cm à Steveston et StevestonEC et ne montre aucun biais constant à Sand Heads.

Notre analyse à la section 5.1 a indiqué un décalage possible de 12 cm pour le niveau de référence de Steveston, ce qui correspond au biais négatif important de tous les modèles à la figure 25. La figure 32 et la figure 33 montrent les moyennes des stations du biais et de la CRMSE, respectivement, en fonction de la pression atmosphérique pendant la tempête, qui peuvent être utilisées comme indicateur indirect de la force de la tempête. Le biais ne montre aucune dépendance à la pression de la tempête. Il demeure entre -4 à 8 cm, les modèles à haute résolution présentant surtout un biais négatif et les modèles à faible résolution surtout un biais positif. La CRMSE a tendance à être plus élevée pour une pression plus faible dans le SSS150 et le SF30. Le biais est le plus faible en moyenne pour le SSS150, le SF30 ayant des scores très proches. Ces deux figures visent à examiner la dépendance des erreurs par rapport à la force de la tempête; cependant, comme l'établissement de la moyenne de ces erreurs est effectué pour un ensemble différent de stations pour chaque modèle, ils ne fournissent pas une comparaison cohérente des modèles.

Le tableau 21 présente les scores d'erreur pour le niveau d'eau d'onde de tempête moyenné au cours des événements de tempête. Pour toutes les stations, les scores s'améliorent avec une résolution horizontale accrue du modèle. Sand Heads, la station la plus éloignée, constitue une exception, où les scores de SSS150 sont légèrement supérieurs à ceux du SF30. Les scores sont généralement meilleurs aux stations extérieures qu'aux stations intérieures.

5.2. COURANTS

Dans cette sous-section, nous évaluons le courant à l'aide de trois types d'instruments.

5.2.1. ADCP horizontal

Des mesures du profileur de courant à effet Doppler (ADCP) horizontal sont disponibles à Woodward's Landing pour saisir les courants près de la surface tout au long du cycle des marées. L'instrument est fixé à une structure solide à une profondeur moyenne de 4 m de la surface, qui varie entre un minimum de 1,5 m et un maximum de 6 m avec la marée. Les données analysées ici ont été téléchargées au moyen du service en ligne du Système intégré de niveaux d'eau ([IWLS](#)). La période couverte par les données va du 30 mars 2021 au 31 décembre 2021. L'instrument mesure la vitesse de courant dans des intervalles de distance de 3 m. La base de données du IWLS enregistre une seule série obtenue en faisant la moyenne des intervalles 66 à 71, correspondant à la plage de distance de 199 à 217 m du transducteur de l'instrument. Les données de la plage complète des intervalles sont enregistrées en interne par l'instrument, mais nécessitent un accès physique à l'instrument pour le téléchargement manuel. Cette opération est effectuée par le personnel du SHC lors de la maintenance de l'instrument (généralement plusieurs fois par an). Ici, nous limitons notre analyse à une seule série et, par conséquent, nous n'analysons pas les données à intervalles multiples. Nous remarquons seulement que la structure perpendiculaire au chenal des courants (non illustrée) est très uniforme.

L'emplacement du milieu de la plage analysée est indiqué dans les panneaux supérieurs à la figure 34. Les panneaux inférieurs de la figure 34 présentent les diagrammes de dispersion du courant observé dans le panneau de gauche et du courant généré par les modèles SSS150 et SF30 à l'emplacement et à la profondeur des observations. Les diagrammes indiquent des courants très rectilignes, et l'analyse des composantes principales montre que 97 à 99 % de la variance se situe le long de la direction semi-majeure correspondant à la direction le long du rivage. Comme la variance le long de la direction semi-mineure est faible, nous avons choisi d'analyser uniquement le courant le long du rivage. La direction le long du rivage pour le courant observé est de 48,3 °N (Nord vrai) et, par souci de cohérence, elle a été prise comme direction le long du rivage pour décomposer les courants observés et modélisés. La direction semi-majeure des courants du modèle est de 57,0 et 54,7 °N (Nord vrai) pour le SSS150 et le SF30, respectivement. Nous faisons remarquer cette différence ici, mais nous ne la considérons pas comme importante pour la décomposition des composantes.

La qualité des données analysées est généralement adéquate; cependant, la série à intervalles multiples (non illustrée) indique une perte possible de puissance du signal au-delà d'une distance d'environ 200 m du transducteur. Par conséquent, la série du IWLS (moyenne de 199 à 217 m) présente plusieurs relevés manquants ou possiblement non fiables. Par conséquent, il serait avantageux que la plage moyenne des données déclarées par le IWLS pour cette station soit déplacée plus près du transducteur. Pour évaluer la performance du modèle à l'aide de l'ADCP horizontal de Woodward's Landing, nous examinons deux modèles, le SSS150 et le SF30, car ils représentent adéquatement le chenal du fleuve dans la zone d'observation. Les scores d'erreur pour la série de vitesse de courant du modèle sont présentés au tableau 22 et indiquent généralement une amélioration de la performance avec une résolution accrue. Le biais montre que le SF30 surestime le flux d'eau sortant en moyenne (biais négatif) de 4,8 cm/s, tandis que le SSS150 le surestime de 13,3 cm/s. Le biais des deux modèles est significativement inférieur au débit moyen observé de 79 cm/s. La CRMSE pour le courant résiduel est très similaire entre les deux modèles et est de 20 cm/s. La CRMSE avec marée est plus basse pour le modèle à plus haute résolution. Cet état est cohérent avec les erreurs de marée (tableau 23), qui sont plus basses pour le SF30 que pour le SSS150 pour toutes les composantes principales, à l'exception de P1 et K2. Les scores γ^2 et R de Pearson pour le courant résiduel sont légèrement meilleurs pour le SSS150. Le débit avec marée représente 80 % de l'énergie du débit total. Les composantes de marée les plus fortes dans les courants

sont M2 (56 cm/s) et K1 (43 cm/s). L'erreur pour le SSS150 est de 9,3 cm/s pour les deux composantes, tandis que celle pour le SF30 est de 5,3 cm/s pour M2 et de 6,8 cm/s pour K1. Les autres composantes présentent des rapports d'erreur similaires entre le SSS150 et le SF30. Pour les deux modèles, les erreurs de phase se situent principalement dans les fourchettes d'incertitude estimées pour les phases observées par la méthode bootstrap. Les erreurs d'amplitude du modèle pour M2 et K1 dépassent ces incertitudes de 5 à 10 cm/s.

Un extrait sur six jours de la vitesse du courant le long du rivage à Woodward's Landing à la figure 35 montre une nette amélioration des vitesses du courant total et du courant résiduel du SF30 à plus haute résolution par rapport au modèle SSS150. Les pics du courant marée sont saisis dans le SF30 à moins de 0,1 m/s, tandis que le SSS150 surestime les pics du flux d'eau sortant de 0,2 à 0,3 m/s. De plus, un biais du flux d'eau sortant plus fort (l'erreur reste principalement du côté négatif) pour le SSS150 est évident dans la figure.

5.2.2. Courantomètres

Aucune donnée de courantomètres disponible.

5.2.3. ADCP ancrés

Les données des ADCP ancrés sont disponibles à trois endroits (deux à la pente de Roberts Bank et un au centre du détroit de Géorgie; voir figure 7) avec des instruments orientés vers le haut montés près du fond. Aucun de ces sites n'est couvert par le SF30, et en l'absence de données de sortie 3D horaires provenant du SPCOG-O et du SS500, nous n'évaluons le SSS150 que par rapport à ces données. Pour chacun des sites, nous avons sélectionné un déploiement qui fournit des données plus fiables et couvre une plus grande plage de profondeur. Il s'agit du déploiement du 8 octobre 2016 au 7 octobre 2017 à la station de la pente basse du delta du fleuve Fraser (FRDLS) avec l'instrument à une profondeur de 141 m, du 6 décembre 2017 au 2 août 2018 à la station centrale du détroit de Géorgie (SoG central) avec l'instrument à une profondeur de 288 m, et du 1^{er} octobre 2018 au 28 août 2019 à la station est du détroit de Géorgie (SoG East) avec l'instrument à une profondeur de 157 m.

Nos calculs (non présentés) indiquent que l'énergie marémotrice comprend de 50 à 70 % de l'énergie totale du courant observé aux niveaux supérieurs. Ensuite, elle augmente jusqu'à un maximum de 80 % à 85 % à mi-profondeur et redescend à 75 % à 80 % près du fond. Pour le courant du modèle, la fraction de l'énergie de marée dans le bilan total est d'environ 5 % plus élevée que pour le courant observé.

Les séries temporelles des courants résiduels à mi-profondeur pour les trois déploiements analysés sont présentées aux figure 36, figure 37 et figure 38. La fiabilité des données observées se détériore à des profondeurs moindres. La principale variabilité est observée à des périodes de plusieurs jours. À ces fréquences, la série observée et la série du modèle concordent au cours de certains mois, mais présentent des écarts au cours d'autres mois, et ces périodes de bonne et de mauvaise correspondance varient d'une station à l'autre. Une meilleure performance du modèle pour les courants résiduels est observée près du fond, comme le montrent les panneaux de droite des figure 39, figure 40, et figure 41.

Les figure 42, figure 43 et figure 44 montrent les spectres de puissance des composantes horaires et antihoraires (spectres rotatifs) du courant total aux mêmes niveaux de profondeur moyenne. À des fréquences inférieures à la fréquence diurne, le modèle montre la meilleure concordance avec les observations à la station est du détroit de Géorgie. À la station FRDLS et à la station centrale du détroit de Géorgie, les écarts sont perceptibles, mais il n'y a pas de surestimation ou de sous-estimation consistante de l'énergie à ces fréquences. Pour les principales fréquences des marées, les marées diurnes sont légèrement surestimées et les

marées semi-diurnes sont légèrement sous-estimées à la FRDLS. Une légère sous-estimation de la composante horaire et une légère surestimation de la composante antihoraire sont observées à la station centrale du détroit de Géorgie. À la station est du détroit de Géorgie, les niveaux d'énergie de marée sont proches de ceux observés. À la station centrale et à la station est du détroit de Géorgie, le niveau d'énergie de fond observé est élevé aux fréquences élevées, peut-être en raison du bruit des instruments.

Des trois stations analysées, les courants d'inertie sont observés uniquement à la station centrale du détroit de Géorgie. Ils sont d'un à deux ordres de grandeur plus faibles que les principaux courants de marée. Le modèle semble sous-estimer l'énergie d'inertie.

Les spectres d'erreur (panneaux inférieurs des figure 42, figure 43 et figure 44) indiquent que les erreurs sont concentrées principalement à des fréquences majeures de marée et à des fréquences correspondant à des périodes de 12 à 20 jours. À la station FRDLS et à la station est du détroit de Géorgie, les courants de marée sont plus forts qu'à la station centrale du détroit de Géorgie et les erreurs de marée du modèle associé sont plus élevées.

La structure verticale des courants de marée pour les composantes M2 et K1 est assez bien représentée aux trois stations (figure 45, figure 46 et figure 47). La meilleure correspondance se trouve à la station centrale du détroit de Géorgie (figure 46). Ici, les écarts pour les axes des ellipses semi-majeurs et semi-mineurs de M2 et K1 restent principalement à 0,02 m/s et la direction et la phase des ellipses à moins de 5°. Des écarts un peu plus importants sont observés à la station est du détroit de Géorgie (figure 47) et en particulier à la station FRDLS (figure 45). Le fond en pente et la proximité de l'embouchure du fleuve Fraser sont probablement les facteurs qui donnent des difficultés aux modèles à ces deux endroits.

Les tableau 24, tableau 25 et tableau 26 synthétisent les scores d'erreur de modèle pour les courants totaux, de marée et résiduels, respectivement. Les scores sont présentés pour quatre niveaux de profondeur sélectionnés répartis entre la profondeur la plus élevée ayant des données fiables et la profondeur la plus basse. Le biais pour les composantes orientées vers l'est et vers le nord est de 0,09 m/s et a tendance à être plus élevé à des niveaux moins profonds. L'erreur RMSE pour le courant total aux trois stations est de 0,17 à 0,26 m/s aux niveaux supérieurs et se réduit à 0,11 à 0,15 m/s près du fond. L'erreur RMSE pour le courant résiduel est universellement de 0,01 à 0,02 m/s inférieure à celle du courant total. L'erreur RMSE du courant avec marée est comparable au courant résiduel, mais elle est plus élevée à des niveaux profonds à la station FRDLS et à des niveaux peu profonds à la station centrale du détroit de Géorgie. Les corrélations vectorielles entre le modèle et le courant observé pour le courant résiduel se situent principalement entre 0,20 et 0,40 et l'écart directionnel se situe principalement à moins de 10° avec des valeurs inférieures et un plus grand écart directionnel pour les profondeurs moyennes à la station centrale du détroit de Géorgie. Pour le courant total, la corrélation est significativement plus élevée (autour de 0,80 à 0,85) en raison de l'inclusion du courant de marée fortement corrélé. La direction du courant avec marée est bien saisie à la station centrale du détroit de Géorgie et à la station est du détroit de Géorgie, mais présente un biais horaire de 12 à 17° à la station FRDLS, ce qui est également évident à la figure 39 et à la figure 45. Les scores de γ^2 sont bons pour la composante de marée ($<0,1$), mais mauvais (généralement >1) pour la composante résiduelle, bien que les valeurs pour la vitesse totale indiquent un score de performance modeste ($0,25 < \gamma^2 < 0,75$). Nous nous attendons à ce que le bruit des instruments ainsi que toute composante non stationnaire des vitesses de marée soient pris en compte dans notre estimation du courant résiduel, ce qui contribuerait à de mauvais scores de γ^2 . Un traitement plus poussé pour mieux séparer la composante résiduelle (ou infratidal) peut améliorer le score, mais dépasse le cadre de ce rapport.

5.2.4. Transects d'ADCP

Nous limitons l'analyse des ADCP montés sur coque de navire à deux modèles qui résolvent adéquatement le fleuve Fraser, le SSS150 et le SF30. Les transects des ADCP montés sur coque de navire dans les zones couvertes par ces deux domaines de modèle sont disponibles à partir de quatre relevés de données menés en février 2019 (deux sections), en mars 2021 (cinq sections), en juillet 2021 (trois sections) et en octobre 2021 (46 sections). Les sections du relevé exhaustif d'octobre 2021 sont réparties sur un certain nombre de lignes standard, dont bon nombre sont échantillonnées de multiples fois. Les mesures sont effectuées avec l'ADCP orienté vers le bas à partir d'un navire qui se déplace lentement. Malgré la faible vitesse du navire, les données peuvent être sujettes à un niveau de bruit élevé selon les paramètres de l'instrument. Dans de tels cas, nous lissons les données pour supprimer la variabilité à des périodes inférieures à 10 s puisque cette bande est dominée par le bruit. L'intervalle temporel de 10 s correspond à une distance horizontale de 10 à 20 m avec la vitesse type du navire pendant l'échantillonnage. Après ce lissage, le niveau de bruit est réduit à environ 0,1 m/s.

Nous analysons ici la vitesse décomposée en travers du transect et le long du transect. Étant donné que toutes les lignes de transect traversent le chenal de la rivière, les directions transversale au transect et le long du transect correspondent étroitement aux directions le long du rivage et transversale au rivage. Le signe de la vitesse dans les graphiques examinés ci-dessous dépend de l'orientation du transect, mais pour tous les transects, le courant le long du rivage est dirigé vers l'aval.

Les figures 48 à figure 53 montrent les transects sélectionnés où le courant présente un certain degré de variabilité spatiale. Les vitesses typiques le long du rivage sont comprises entre 0,5 et 2 m/s. Les vitesses perpendiculaires au rivage sont beaucoup plus basses et restent habituellement inférieures à 0,25 m/s, mais peuvent atteindre 1 m/s (p. ex. figure 53), là où des îles ou des hauts-fonds détournent le courant. La structure transversale du courant peut être uniforme, mais le plus souvent est concentrée dans un jet d'environ 150 m de large. À la verticale, le courant est en grande partie uniforme. À environ 5 m du fond et à 100 m de la paroi latérale, le frottement des couches limites ralentit le courant.

Dans la plupart des transects (figure 49 à figure 53) la structure du courant dans le SF30 est mieux reflétée que dans le SSS150, ce qui indique l'avantage de la résolution horizontale accrue. Cependant, les vitesses du courant dans le jet sont souvent sous-estimées dans le SF30. Une ligne où la structure de courant du modèle diffère de celle observée est la FR05a (figure 48). Ici, le jet est déplacé vers le milieu du chenal dans le SF30, tandis que les données d'observation montrent le jet plus près de la rive nord du fleuve. La FR05a est située près de l'emplacement de l'ADCP horizontal de Woodward's Landing et indique donc que cette non-concordance de la position du jet est probablement une cause de la surestimation du flux d'eau sortant de 4,8 cm/s dans le SF30. Au contraire, une surestimation du flux d'eau sortant de 13,3 cm/s à l'ADCP horizontal de Woodward's Landing dans le SSS150 est attribuable à la vitesse globale plus élevée du modèle. Il convient également de noter que la FR05a a été échantillonnée 18 fois tout au long du relevé, tandis que cinq autres lignes ont été échantillonnées de cinq à huit fois, et les huit lignes restantes ont été échantillonnées une fois chacune, ce qui a biaisé les statistiques globales vers la FR05a.

La figure 54 montre un diagramme de distribution du biais par rapport au CRMSE pour SSS150 et SF30 et la figure 55 présente un diagramme de l'énergie cinétique du courant observée par rapport à celle du modèle. La composante le long du rivage est bien reflétée dans les deux modèles, le SSS150 surestimant légèrement l'énergie du courant et le SF30 la sous-estimant légèrement. Bien que basses, les vitesses transversales sont mieux reflétées dans le SF30 que dans le SSS150.

5.3. PROPRIÉTÉS DE L'EAU

5.3.1. Température de surface de la mer

Le domaine du fleuve Fraser contient une bouée ancrée mesurant la température de surface de la mer (TSM), la bouée de contrôle de la qualité de l'eau du fleuve Fraser, déployée à environ 13 km en amont de Steveston, près de la rive nord du bras sud (voir figure 7). Cet emplacement est couvert par les domaines de SS500, de SSS150 et de SF30. Les données couvrent toute la période d'évaluation rétrospective. Étant donné que la climatologie mensuelle définit l'état des conditions aux limites de température en amont dans le fleuve Fraser dans les trois modèles (directement dans les SS500 et SSS150 et par l'entremise du SSS150 dans le SF30), ceux-ci présentent tous une variabilité très semblable et leurs erreurs sont donc également semblables. L'amplitude et la synchronisation du cycle saisonnier sont bien saisies, mais les variations interannuelles et la variabilité synoptique sont absentes du modèle, ce qui entraîne des erreurs de 1 à 2 °C. La figure 56 montre le biais lié au froid de décembre à février pour toutes les années entre 2017 et 2021 et le biais lié au froid en juillet et en août pour toutes les années sauf 2020. Selon l'analyse ci-dessus, le passage de la climatologie à la température en temps réel du fleuve Fraser dans les conditions aux limites correspondantes pour le SS500 et le SSS150 peut réduire considérablement l'erreur de température. Par ailleurs, en l'absence de données en temps réel, la mise à jour de la climatologie avec plus de poids appliqué aux dernières années peut potentiellement réduire les erreurs de température. Le tableau 27 permet de confirmer que les scores d'erreur de température pour tous les modèles sont très semblables, le biais passant de -0,60 à -0,37 °C pour un modèle de résolution grossière à fine.

5.3.2. Sondes CTD ancrées

Quatre séries sont disponibles pour des endroits près du nœud de l'est du détroit de Géorgie d'*Ocean Networks Canada* ([ONC](#)). Nous analysons ici l'un d'eux qui a une meilleure couverture des données (SEVIP à la figure 7). La sonde est située près du fond, à la limite extérieure de Roberts Bank, au large de la sortie du bras sud du fleuve Fraser, à 165 m de profondeur. L'emplacement est hors de la couverture du SF30, mais est couvert par les trois autres modèles. La température est également bien saisie par les trois modèles avec un biais chaud de +0,4 °C (tableau 28), qui est légèrement plus prononcé au cours de la première moitié de l'année et a tendance à diminuer vers les deux dernières années de la période d'analyse (figure 57). Tous les autres scores sont semblables parmi les trois modèles. La salinité est bien saisie par le SS500 et le SSS150 avec un biais moyen salé de +0,05 psu qui, comme le biais lié à la température, diminue en 2020 et en 2021. Cependant, le SPCOG-O montre un biais salé considérablement plus élevé de +0,8 psu. Le SS500 affiche des scores légèrement supérieurs à ceux du SSS150. Nous remarquons toutefois que les scores du SPCOG-O et le SS500 sont fondés sur les données de sortie quotidiennes, tandis que ceux du SSS150 sont fondés sur les données de sortie horaires, ce qui exclut la comparaison directe.

5.3.3. Profils CTD

Nous évaluons la performance du modèle par rapport à la température et à la salinité mesurées par les profils CTD dans cinq sous-régions indiquées à la figure 58. La quantité de données pour chaque sous-région est indiquée dans le tableau 29. Le fleuve Fraser est échantillonné beaucoup moins (7 à 27 profils par sous-région) que le détroit de Géorgie (588 profils). En raison du nombre limité de profils dans le fleuve Fraser, nous avons analysé l'ensemble de la période de simulation rétrospective quinquennale de 2017 à 2021. Les graphiques récapitulatifs par région (figure 59 à figure 63) montrent le biais moyen comme une fonction de la profondeur dans une courbe pleine, et la zone ombrée indique une plage délimitée par plus et moins la

CRMSE (écart type de l'erreur). Noter que l'axe vertical sur les graphiques est une échelle logarithmique en pression.

Dans le sud du détroit de Géorgie (non couvert par le SF30), la température et la salinité sont mieux reflétées dans le SS500 et le SSS150 que dans le SPCOG-O (figure 59). Le SS500 et le SSS150 comportent un biais chaud de +0,5 °C dans les 20 m supérieurs. Le SPCOG-O est en moyenne -0,8 °C plus froid dans les 5 m supérieurs et +1 °C plus chaud entre 10 et 20 m. Tous les modèles ont un biais chaud de +0,5 °C en dessous de 200 m. Pour la salinité, le SS500 et le SSS150 sont significativement meilleurs dans les 5 m supérieurs et en dessous de 20 m, où ils n'ont presque pas de biais et une faible CRMSE. Près de la surface, le SS500 et le SSS150 ont un biais de moindre salinité de -1 à -1,8 psu, tandis que le SPCOG-O est plus salé de +3,8 psu.

Les autres sous-régions ont une distribution des erreurs beaucoup plus uniforme avec la profondeur pour tous les modèles. La figure 60 indique un biais de -0,5 °C pour le SS500, un biais de -0,6 °C pour le SF30 et un biais de -0,7 °C pour le SSS150. Pour la salinité, le SS500 a un biais faible variant entre +0,3 psu près de la surface et -0,2 psu près du fond, tandis que le SSS150 a un biais salé de +1 psu et le SF30 de +2 psu.

Dans la sous-région de Massey à Annacis (figure 61), les trois modèles affichent des performances très similaires avec un biais froid de -0,5 à -0,7 °C et presque aucun biais de salinité, sauf le SF30 très près du fond, où il est plus salé que les observations de +0,8 psu indiquant une surestimation de l'étendue de la langue salée dans la couche de fond.

Une image similaire est observée pour la sous-région de Port Mann (figure 62), qui est couverte uniquement par le SSS150 et le SF30. Les deux modèles montrent le même léger biais de température froide que dans la sous-région de Massey à Annacis et un léger biais de moindre salinité de -0,04 psu. La distribution des erreurs se répète dans la sous-région du haut Fraser, qui est couverte uniquement par le modèle SSS150 (figure 63).

5.3.4. Traversiers

Les figure 64 et figure 65 montrent des graphiques Hovmöller de la température et de la salinité mesurées à partir d'un système thermosalinographe sur la route du traversier Tsawwassen-Duke Point de BC Ferries. Pour ce qui est de la température, nous constatons que le SPCOG-O a un fort biais froid en été et un léger biais chaud en hiver. Le SS500 et le SSS150 ont le même niveau de performance, tous deux montrant un plus petit biais froid près de l'extrémité de la route à Tsawwassen et un petit biais chaud lorsque nous nous approchons de la limite du domaine du SSS150. Dans le même temps pour la salinité, le SPCOG-O présente un fort biais salé toute l'année et le SS500 s'améliore considérablement à cet égard. Le SSS150 réussit à améliorer le biais en salinité du SS500 près de l'extrémité de la route à Tsawwassen, mais présente un niveau de performance similaire loin de celle-ci. Cela est peut-être dû à une meilleure représentation du panache du Fraser. Nous nous attendons à ce que le modèle SSS150 se comporte de la même façon que le SS500 près de ses frontières ouest et sud en raison de l'utilisation des données de température et de salinité du SS500 comme conditions à ces limites ouvertes.

5.4. DÉRIVE

L'expérience d'évaluation de la dérive a utilisé 23 trajectoires de bouées dérivantes, 18 de type SCT et 5 de type OSKER (pour plus de détails sur les types de bouées dérivantes, voir Hourston 2021) qui ont été déployées dans le fleuve Fraser pendant les relevés de données du PPO. Les trajectoires des bouées dérivantes sont montrées à la figure 66. Les bouées dérivantes ont un temps de déplacement court dans le fleuve Fraser et permettent un temps maximum de simulation de dérive de deux heures. L'indice de performance de Molcard (figure

67 et tableau 30) augmente avec la résolution du modèle, le SSS150 et le SF30 ayant des scores très similaires entre 0,3 et 0,4, qui se dégradent légèrement avec le temps. L'indice de performance du SS500 est moitié moindre que celui des modèles à haute résolution. Les résultats en termes de distance de séparation (figure 68 et tableau 30) sont consistants avec ceux de l'indice de performance de Molcard. Les distances sont considérablement plus faibles pour le SSS150 et le SF30, augmentant de 400 m après 0,5 heure de simulation à 1 000 m après 1,5 heure. Les distances de séparation pour le SS500 sont presque deux fois plus grandes.

6. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES PRÉVISIONS

La période d'évaluation des prévisions va du 3 décembre 2021 au 26 janvier 2022, où nous effectuons des prévisions sur 48 heures à partir de 00Z chaque jour, pour un total de 55 prévisions. Pour évaluer la performance des prévisions, nous montrons des courbes de biais et des courbes de la CRMSE, les zones ombrées indiquant les intervalles de confiance bootstrap à 95 %. Nous remarquons que cette période ne couvre pas la période de crue printanière tardive.

6.1. NIVEAU D'EAU RÉSIDUEL

L'évaluation des prévisions pour quatre stations de mesure du niveau d'eau est présentée de la figure 69 à la figure 72. Tous les modèles se comportent de façon semblable en ce qui concerne la CRMSE, les modèles à haute résolution ayant des scores légèrement meilleurs. La CRMSE varie entre 4 et 6 cm pour la plupart des stations. À Pitt River, où la qualité des données d'observation pose sans doute problème, la CRMSE fluctue autour de 10 cm. Le biais est raisonnablement faible pour le modèle SS500 et les modèles à haute résolution et varie de +1 cm à Sand Heads, dans le détroit de Géorgie, à -2 à -4 cm aux stations dans la rivière. Pour le SPCOG-O, le biais fluctue autour de 0 à Sand Heads et autour de -8 cm à StevestonEC. Il n'y a pas de changement significatif du biais en fonction de l'échéance de la prévision, alors qu'il y a une augmentation de la CRMSE en fonction de l'échéance de la prévision et qu'elle est marginalement significative sur le plan statistique. Cette augmentation de l'ordre de 1 cm de la CRMSE au cours des 48 heures de prévision est conforme qualitativement à la dégradation attendue des prévisions avec l'allongement de l'échéance. La performance des quatre modèles est semblable, comme nous nous y attendions, étant donné que a) les modèles à plus petite échelle héritent du niveau d'eau résiduel des modèles à plus grande échelle par le forçage des limites ouvertes, et b) nous utilisons le même forçage de la pression atmosphérique à la surface pour les quatre modèles, ce qui donne le même effet barométrique inverse.

6.2. ADCP HORIZONTAL

La figure 73 montre l'évaluation des prévisions de l'ADCP horizontal à Woodward's Landing, où nous tenons compte du courant le long du rivage. Le retrait de l'effet de marée des séries de prévisions pour les séries de l'ADCP horizontal n'est pas mis en œuvre dans l'outil d'analyse au moment de la rédaction; par conséquent, le panneau des biais montre un signal diurne fort pour les deux modèles, ce qui résulte des écarts dans les marées qui dominent la série. Par ailleurs, sur le panneau de la CRMSE, nous voyons également un signal diurne dans la courbe du SF30 et aucune tendance significative de croissance des erreurs.

6.3. TEMPÉRATURE DE SURFACE DE LA MER

L'évaluation des prévisions de température de surface de la mer est présentée à la figure 74 pour la bouée de contrôle de la qualité de l'eau du fleuve Fraser. Le SPCOG-O est exclu de

cette analyse, car son domaine ne représente pas le fleuve Fraser. À partir du panneau supérieur droit, un biais froid de -1,5 à -1,7 °C se trouve dans les trois modèles, le SS500 montrant un biais légèrement plus important que les modèles à haute résolution. Ces biais globaux concordent avec le biais froid de la TSM pouvant atteindre -2 °C au cours des trois derniers mois de 2021 (figure 56). Si l'évaluation des prévisions était réalisée sur l'ensemble de la période de 2017 à 2021, le biais devrait se situer entre -0,4 et -0,6 °C, comme le montre le tableau 27. Toutefois, l'accent est mis ici sur la performance de la prévision, et pour les trois modèles, nous ne voyons pas de tendance au réchauffement ou au refroidissement en fonction de l'échéance de la prévision qui soit statistiquement significative. Par ailleurs, le panneau inférieur gauche montre une légère diminution (de 0,10 à 0,15 °C) de la CRMSE en fonction de l'échéance de la prévision pour les trois modèles. Toutefois, cette diminution se situe dans les limites de confiance pour la CRMSE.

7. SOMMAIRE

Les modèles à haute résolution SSS150 et SF30 ont été déployés, utilisés et évalués avec succès en fonction des données d'observation et ont montré une performance adéquate. Ces modèles couvrent le fleuve Fraser de Steveston à Mission (SSS150) et de Steveston à Port Mann (SF30), qui n'est pas couvert ou est mal représenté par les modèles à plus grande échelle.

Les modèles à haute résolution surpassent les modèles parents pour la représentation des marées en raison du remplacement des marées à la frontière entre le SS500 et le SSS150 et de l'ajustement connexe. Nous avons atteint un niveau d'erreur de 5 cm de la CRMSE pour la composante avec marée, qui est comparable à celui de la composante résiduelle. Les efforts visant à réduire davantage l'erreur de marée approchent du point de perte de performance marginale en ce qui concerne l'erreur totale de niveau d'eau; l'élimination complète de l'erreur de marée ne ferait que réduire la CRMSE du niveau d'eau total à 5 cm.

Par ailleurs, les lacunes sont héritées des modèles à plus grande échelle pour certaines variables. La variabilité du niveau d'eau résiduel est semblable à celle du modèle parent.

L'accroissement de la résolution du modèle améliore la représentation des vitesses de courant, ce qui est confirmé par une comparaison avec les ADCP horizontaux et les ADCP montés sur coque de navire. De plus, une légère sous-estimation de la vitesse du flux d'eau sortant est observée dans les modèles. Les modèles à plus haute résolution ont une meilleure performance dans l'évaluation de la dérive.

Les biais de température et de salinité dans la zone du panache du fleuve Fraser sont semblables à ceux des modèles à plus grande échelle, car ils ne peuvent pas s'accroître en raison du forçage aux limites (la température et la salinité imposées du modèle parent représentent un fort rappel).

L'évaluation des prévisions a révélé une augmentation graduelle de l'erreur des modèles telle qu'attendue, mais aucune modification du biais des modèles avec l'échéance de la prévision.

8. CONSTATATIONS PRINCIPALES

- Les modèles à haute résolution permettent de représenter des zones qui ne sont pas couvertes par le modèle opérationnel actuel basé sur NEMO : du bas Fraser jusqu'à Port Mann à une résolution de 30 m et de Port Mann jusqu'à Mission et au lac Pitt à une résolution de 150 m.

-
- Le modèle SF30 à haute résolution offre soit une meilleure performance que les modèles à plus faible résolution, soit une performance comparable dans les zones où les modèles se chevauchent et une performance adéquate dans les zones qui ne sont pas couvertes par les modèles à faible résolution.
 - Le modèle SF30 a simulé une période historique de cinq ans (2017 à 2021) sans échec de simulation, qui comprenait un événement de crue record en novembre 2021.
 - Les mesures de secours automatisées pour les données de niveau d'eau à Mission ont permis de poursuivre avec succès la simulation malgré une défaillance de la jauge à la fin de 2021.
 - L'erreur de niveau d'eau avec marée varie de 5 à 9 cm (CRMSE).
 - Dans les modèles, la marée se propage dans le fleuve Fraser avec une vitesse et une amplitude correctes.
 - L'erreur de niveau d'eau résiduel est toujours de 5 à 6 cm (CRMSE).
 - Les biais du niveau d'eau sont inférieurs à 6 cm.
 - L'erreur pour le niveau d'eau total est de l'ordre de 10 cm.
 - Les erreurs des niveaux d'eau de la marée et résiduel sont comparables, et les deux devront être améliorées pour améliorer la CRMSE du niveau d'eau total.
 - Les courants de marée et les courants résiduels sont bien saisis avec une erreur totale de 0,25 m/s par rapport aux courants mesurés par l'ADCP horizontal à Woodward's Landing.
 - La structure transversale du courant dans le fleuve Fraser se compare bien aux données des ADCP montés sur coque de navire, avec une légère sous-estimation des vitesses de flux d'eau sortant.
 - Les courants de marée sont adéquatement représentés à la pente de Roberts Bank et au centre du détroit de Géorgie. La direction du courant de marée à l'entrée du bras principal du fleuve Fraser est biaisée dans le sens horaire de 12 à 17°. Le courant résiduel à ces endroits montre un score de performance modeste et un score moindre à mi-profondeur au centre du détroit de Géorgie.
 - La température des eaux de surface dans le fleuve Fraser a un biais froid inférieur à -0,5 °C et des erreurs de 1,1 °C. Le modèle pourrait bénéficier de l'utilisation de la température en temps réel plutôt que de la climatologie pour les conditions aux limites dans le fleuve Fraser.
 - La distribution verticale de la température et de la salinité est bien représentée et égale à celle du SS500.
 - Les données le long de la trajectoire des traversiers indiquent que le SSS150 a une performance comparable à celle du SS500 pour ce qui est de la température et qu'il a une performance un peu meilleure près de la gare maritime de Tsawwassen pour ce qui est de la salinité en y réduisant un biais négatif.
 - La performance en matière de dérive est considérablement améliorée dans les modèles à haute résolution par rapport au SS500.
 - L'évaluation des prévisions montre que l'erreur de niveau d'eau résiduel a augmenté graduellement avec l'échéance de prévision, comme prévu.

9. REMERCIEMENTS

Nous remercions nos collègues d'ECCC, Jean-Philippe Paquin, Greg Smith, Fred Dupont et Oleksandr (Sasha) Huziy pour leurs conseils et leurs idées lors de l'élaboration et de l'évaluation des modèles, Pascal Matte pour ses conseils lors de la création du modèle NS TIDE, ainsi que Sarah MacDermid et Ji Lei pour avoir mis à notre disposition leur expertise du logiciel maestro. Nous remercions Mitchell O'Flaherty-Sproul pour son aide avec les données bathymétriques, ainsi que Marlene Jeffries, Pete Wills et leurs collègues du SHC pour avoir fourni des données sur les marées, la bathymétrie et les relevés de données. Merci à Nancy Soontiens et à Jennifer Holden pour l'outil de prévision de la dérive et leur aide pour le faire fonctionner. Nous remercions également Roy Hourston d'avoir facilité la mesure de la dérive et d'avoir recueilli des données de relevés. Nos remerciements vont aussi à Ocean Networks Canada pour avoir fourni des données d'ADCP et de sondes CTD ancrées, à Ian Darke de Services publics et Approvisionnement Canada pour avoir fourni des données de transect d'ADCP du fleuve Fraser, à Jesse Montgomery de Metro Vancouver pour les données de débit de la rivière Capilano, à Patrick Lilley, de Kerr Wood Leidal, pour les données de débit des rivières à North Vancouver, et à l'équipe de waterproperties.ca, pour leur conservation minutieuse des données. Nous remercions de plus Charles Hannah, Jon Chamberlain, Denis Lefavre et Youyu Lu pour leurs conseils et recommandations. Enfin, nous remercions Denis Lefavre, Joël Chassé, Nancy Soontiens, Yvonnick Le Clainche, Ji Lei, Justine McMillan, Isabelle Gaboury et Phil MacAulay pour leurs commentaires en cours de rédaction.

10. RÉFÉRENCES CITÉES

- Backhaus, Jan O. 1983. "A Semi-Implicit Scheme for the Shallow Water Equations for Application to Shelf Sea Modelling." *Continental Shelf Research* 2 (4): 243–54. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(82\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0278-4343(82)90020-6).
- . 1985. "A Three-Dimensional Model for the Simulation of Shelf Sea Dynamics." *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* 38 (4): 165–87. <https://doi.org/10.1007/BF02328975>.
- Blanken, Hauke, Caterina Valeo, Charles Hannah, Usman T. Khan, and Tamás Juhász. 2021. "A Fuzzy-Based Framework for Assessing Uncertainty in Drift Prediction Using Observed Currents and Winds." *Frontiers in Marine Science* 8 (November): 618094. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.618094>.
- Chen, Changsheng, Hedong Liu, and Robert C. Beardsley. 2003. "An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20 (1): 159–86. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<0159:AUGFVT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<0159:AUGFVT>2.0.CO;2).
- Cummins, Patrick F., and Lie-Yauw Oey. 1997. "Simulation of Barotropic and Baroclinic Tides off Northern British Columbia." *Journal of Physical Oceanography* 27 (5): 762–81. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<0762:SOBAPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<0762:SOBAPT>2.0.CO;2).
- Cummins, Patrick F., and Pramod Thupaki. 2018. "A Note on Evaluating Model Tidal Currents against Observations." *Continental Shelf Research* 152 (January): 35–37. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.10.007>.
- Daniel, Pierre, Gwénaële Jan, Fanch Cabioc'h, Yves Landau, and Erwann Loiseau. 2002. "Drift Modeling of Cargo Containers." *Spill Science & Technology Bulletin* 7 (5–6): 279–88. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00075-0).
- Dunphy, M., M. Krassovski, S. Taylor, H. Blanken, R. Horwitz, S. St-Onge Drouin et A. Drozdowski. Sous presse. Évaluation du système de prévisions océaniques portuaires élaboré dans le cadre du Plan de protection des océans du Canada - Port de Vancouver. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech.
- Dupont, F., S. Higginson, R. Bourdallé-Badie, Y. Lu, F. Roy, G. C. Smith, J.-F. Lemieux, G. Garric, and F. Davidson. 2015. "A High-Resolution Ocean and Sea-Ice Modelling System for the Arctic and North Atlantic Oceans." *Geoscientific Model Development* 8 (5): 1577–94. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1577-2015>.
- Flather, R.A. 1976. "A Tidal Model of the Northwest European Continental Shelf" 6 (10): 141–64.
- Hourston, Roy A.S. 2021. *Surface Ocean Circulation Tracking Drifter Data from the Northeastern Pacific and Western Arctic Oceans, 2014-2020*. Sidney, B.C.: Fisheries and Oceans Canada = Pêches et Océans Canada.
- Kundu, Pijush K. 1976. "Ekman Veering Observed near the Ocean Bottom." *Journal of Physical Oceanography* 6 (2): 238–42. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1976\)006<0238:EVONTO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1976)006<0238:EVONTO>2.0.CO;2).
- Large, William George, and Stephen G. Yeager. 2004. "Diurnal to Decadal Global Forcing for Ocean and Sea-Ice Models: The Data Sets and Flux Climatologies." NCAR Technical Note NCAR/TN-460+STR. Boulder, CO: Climate and Global Dynamics Division: National Center for Atmospheric Research.

-
- Levier, B., A.-M. Tréguier, G. Madec, and V. Garnier. 2007. "Free Surface and Variable Volume in the Nemo Code." MERSEA IP report WP09-CNRS-STR-03-1A.
- Madec, Gurvan. 2016. *NEMO Ocean Engine*. Note Du Pole de Modelisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace 27. NEMO European Consortium.
- Madec, Gurvan, and Maurice Imbard. 1996. "A Global Ocean Mesh to Overcome the North Pole Singularity." *Climate Dynamics* 12 (6): 381–88. <https://doi.org/10.1007/BF00211684>.
- Martinsen, Eivind A., and Harald Engedahl. 1987. "Implementation and Testing of a Lateral Boundary Scheme as an Open Boundary Condition in a Barotropic Ocean Model." *Coastal Engineering* 11 (5–6): 603–27. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(87\)90028-7](https://doi.org/10.1016/0378-3839(87)90028-7).
- Milbrandt, Jason A., Stéphane Bélair, Manon Faucher, Marcel Vallée, Marco L. Carrera, and Anna Glazer. 2016. "The Pan-Canadian High Resolution (2.5 Km) Deterministic Prediction System." *Weather and Forecasting* 31 (6): 1791–1816. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0035.1>.
- Molcard, A., P.M. Poulain, P. Forget, A. Griffa, Y. Barbin, J. Gaggelli, J.C. De Maistre, and M. Rixen. 2009. "Comparison between VHF Radar Observations and Data from Drifter Clusters in the Gulf of La Spezia (Mediterranean Sea)." *Journal of Marine Systems* 78 (November): S79–89. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.01.012>.
- Niiler, Pearn P., Andrew S. Sybrandy, Kenong Bi, Pierre M. Poulain, and David Bitterman. 1995. "Measurements of the Water-Following Capability of Holey-Sock and TRISTAR Drifters." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 42 (11–12): 1951–64. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00076-3).
- Nudds, Shannon, Youyu Lu, Simon Higginson, Susan P. Haigh, Jean-Philippe Paquin, Mitchell O'Flaherty-Sproul, Stephanie Taylor, et al. 2020. "Evaluation of Structured and Unstructured Models for Application in Operational Ocean Forecasting in Nearshore Waters." *Journal of Marine Science and Engineering* 8 (7): 484. <https://doi.org/10.3390/jmse8070484>.
- Paquin, Jean-Philippe, Youyu Lu, Stephanie Taylor, Hauke Blanken, Guillaume Marcotte, Xianmin Hu, Li Zhai, et al. 2020. "High-Resolution Modelling of a Coastal Harbour in the Presence of Strong Tides and Significant River Runoff." *Ocean Dynamics* 70 (3): 365–85. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01334-7>.
- Paquin, Jean-Philippe, François Roy, Gregory C. Smith, Frédéric Dupont, Yukie Hata, Oleksandr Huizy, Yosvany Martinez, Hauke Blanken, Jennifer Holden, and Nancy Soontiens. 2021a. "Coastal Ice Ocean Prediction System for the East Coast of Canada (CIOPS-E) Update from Version 1.5.0 to 2.0.0." Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction Tech. Note. https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoe/product_guide/docs/tech_notes/technote_ciops-east-200_e.pdf.
- Paquin, Jean-Philippe, Gregory C. Smith, Frédéric Dupont, Sarah MacDermid, Yukie Hata, Oleksandr Huizy, Ji Lei, et al. 2021b. "Coastal Ice Ocean Prediction System for the West Coast of Canada (CIOPS-W) Update from Version 1.5.0 to 2.0.0." Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction Tech. Note. https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoe/product_guide/docs/tech_notes/technote_ciops-west-200_e.pdf.
-

-
- Paquin, Jean-Phillipe, Gregory C. Smith, Francois Roy, Frederic Dupont, Sarah MacDermid, Ji Lei, Youyu Lu, Stephanie Taylor, Hauke Blanken, and Li Zhai. 2022. "Coastal Ice Ocean Prediction System for the West Coast of Canada (CIOPS-W): System Description for Versions 1.0.0 and 1.5.0." Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction Tech Note.
https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoe/product_guide/docs/tech_notes/technote_ciops-west-100_e.pdf.
- Pawlowicz, Rich, Bob Beardsley, and Steve Lentz. 2002. "Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB Using T_TIDE." *Computers & Geosciences* 28 (8): 929–37. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4).
- Röhrs, Johannes, and Kai H. Christensen. 2015. "Drift in the Uppermost Part of the Ocean." *Geophysical Research Letters* 42 (23). <https://doi.org/10.1002/2015GL066733>.
- Röhrs, Johannes, Kai Håkon Christensen, Lars Robert Hole, Göran Broström, Magnus Drivdal, and Svein Sundby. 2012. "Observation-Based Evaluation of Surface Wave Effects on Currents and Trajectory Forecasts." *Ocean Dynamics* 62 (10–12): 1519–33. <https://doi.org/10.1007/s10236-012-0576-y>.
- Saucier, François J. 2003. "Modeling the Formation and Circulation Processes of Water Masses and Sea Ice in the Gulf of St. Lawrence, Canada." *Journal of Geophysical Research* 108 (C8): 3269. <https://doi.org/10.1029/2000JC000686>.
- Saucier, François J., and Joël Chassé. 2000. "Tidal Circulation and Buoyancy Effects in the St. Lawrence Estuary." *Atmosphere-Ocean* 38 (4): 505–56. <https://doi.org/10.1080/07055900.2000.9649658>.
- Smith, Stuart D. 1988. "Coefficients for Sea Surface Wind Stress, Heat Flux, and Wind Profiles as a Function of Wind Speed and Temperature." *Journal of Geophysical Research* 93 (C12): 15467. <https://doi.org/10.1029/JC093iC12p15467>.
- Soontiens, Nancy, and Jennifer Holden J. 2024. "A framework for evaluation and characterization of drift prediction in the marine environment." Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 383: ix + 45 p. <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/41252287.pdf>.
- Sutherland, Graig, Nancy Soontiens, Fraser Davidson, Gregory C. Smith, Natacha Bernier, Hauke Blanken, Douglas Schillinger, et al. 2020. "Evaluating the Leeway Coefficient of Ocean Drifters Using Operational Marine Environmental Prediction Systems." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 37 (11): 1943–54. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0013.1>.
- Zhang, Minghong, William Perrie, and Zhenxia Long. 2019. "Springtime North Pacific Oscillation and Summer Sea Ice in the Beaufort Sea." *Climate Dynamics* 53 (1–2): 671–86. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04627-1>.

11. TABLEAUX

Tableau 1. Paramètres principaux du modèle NEMO pour les configurations SSS150 et SF30.

Paramètre	Grille externe (SSS150)	Grille interne (SF30)
Dimensions de la grille, NX x NY x NZ	710 x 826 x 39	1190 x 419 x 24
Résolution horizontale, ΔX x ΔY	Environ 129 x 98 m	30 x 30 m
Résolution verticale	1 m de la surface, 26 m du fond	1 m de la surface, 11 m du fond
Pas de temps (barocline/barotrope)	20 s/1 s	4 s/0,8 s
Fréquence de mise à jour des limites ouvertes	1 h (O, S), 30 min (E)	15 minutes
Décalage de la hauteur de la surface de la mer pour les conditions aux limites ouvertes	-12 cm (O, S), 0 cm (E)	0 cm
Composantes de marée forcées	M2, S2, N2, K1, O1, Q1, K2, P1, L2, 2N2, NU2, J1, M1, OO1, SO1	Hérité du SSS150
Équation d'état	EOS-80	EOS-80
Surface libre	Volume variable	Volume variable
Pénétration de la lumière	Deux bandes	Deux bandes
Condition des limites latérales	Glissement partiel (shlat=0.5)	Glissement partiel (shlat=0.5)
Advection de mouvement	Forme vectorielle, 10 sous-étapes pour l'advection verticale	Forme vectorielle, 8 sous-étapes pour l'advection verticale
Diffusion latérale de mouvement	Laplacien horizontal et méthode Smagorinsky	Méthode Smagorinsky, laplacien horizontal et bilaplacien horizontal
Advection de traceur	Dissipation de la variance totale, 10 sous-étapes pour l'advection verticale	Dissipation de la variance totale, 8 sous-étapes pour l'advection verticale
Diffusion latérale du traceur	Laplacien isoneutre et méthode Smagorinsky	Laplacien isoneutre et méthode Smagorinsky
Diffusion verticale	k- ϵ (GLS)	k- ϵ (GLS)
Frottement sur le fond	Quadratique, variation spatiale	couche log

Tableau 2. Données des stations de mesure du niveau d'eau utilisées pour l'évaluation et décalages utilisés pour transférer le niveau d'eau au CGVD28.

Nom de la station	ID de la station	Données disponibles	Décalage (m)
North Arm	08MH032	Niveau d'eau	-2,603
Sand Heads	07594	Niveau d'eau	2,986
Steveston	07607	Niveau d'eau	2,098
StevestonEC	08MH028	Niveau d'eau	-2,700
Woodward's Landing	07610	Niveau d'eau	1,831
Deas Island	08MH053	Niveau d'eau	0,000
New Westminster	07654	Niveau d'eau	1,433
Port Mann	08MH126	Niveau d'eau	-2,603
Pitt River	08MH035	Niveau d'eau	-2,603
Dionisio Point	07535	Composantes	—
Canoe Pass	07603	Composantes	—
Roberts Bank	07592	Composantes	—
Tsawwassen	07590	Composantes	—

Tableau 3. Comparaison de la composante M2 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,850 ± 0,013	46,2 ± 0,7	—	-0,116	+0,017	—	—	+9,6	-3,7	—	—	0,124	0,041	—
Sand Heads	0,887 ± 0,004	30,6 ± 0,2	+0,026	-0,003	+0,003	—	+4,5	+0,5	-0,8	—	0,053	0,006	0,009	—
Steveston	0,865 ± 0,006	37,2 ± 0,4	+0,056	-0,040	+0,011	+0,024	-2,6	+0,3	-5,5	-2,8	0,049	0,028	0,059	0,035
StevestonEC	0,865 ± 0,007	37,0 ± 0,5	+0,043	-0,021	+0,020	+0,023	-3,2	-1,5	-6,3	-2,5	0,046	0,022	0,070	0,032
Woodward's Landing	0,823 ± 0,012	44,1 ± 0,8	—	-0,070	-0,030	-0,013	—	+5,5	-3,8	-3,5	—	0,073	0,044	0,036
Deas Island	0,730 ± 0,011	50,5 ± 0,9	—	+0,023	+0,063	+0,083	—	-0,9	-10,2	-10,2	—	0,018	0,106	0,113
New Westminster	0,636 ± 0,020	60,9 ± 1,6	—	-0,074	-0,054	-0,066	—	+14,0	-1,3	-1,7	—	0,116	0,039	0,049
Port Mann	0,528 ± 0,020	71,6 ± 2,3	—	-0,084	-0,057	-0,099	—	+18,7	-0,2	+0,4	—	0,126	0,040	0,070
Pitt River	0,368 ± 0,018	86,5 ± 2,7	—	—	-0,082	—	—	—	+5,4	—	—	—	0,062	—
Dionisio Point	0,882	32,02	+0,016	-0,016	-0,015	—	+5,1	+0,1	-0,8	—	0,058	0,011	0,014	—
Canoe Pass	0,819	42,16	+0,046	-0,034	+0,036	+0,037	-9,5	-1,4	-8,9	-8,4	0,104	0,028	0,095	0,091
Roberts Bank	0,807	27,71	+0,025	+0,012	+0,011	—	+5,4	+0,5	-1,3	—	0,057	0,010	0,015	—
Tsawwassen	0,809	27,33	+0,010	+0,004	-0,002	—	+5,8	+0,7	-0,9	—	0,058	0,007	0,009	—

Tableau 4. Comparaison de la composante N2 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,170 ± 0,014	19,8 ± 3,4	—	-0,028	+0,011	—	—	+14,0	-5,2	—	—	0,033	0,014	—
Sand Heads	0,188 ± 0,004	2,3 ± 1,2	0,000	-0,002	+0,004	—	+4,5	+2,5	-1,1	—	0,010	0,006	0,004	—
Steveston	0,180 ± 0,006	9,1 ± 2,1	+0,009	-0,013	+0,009	+0,010	-2,8	+3,3	-5,9	-2,5	0,009	0,012	0,015	0,009
StevestonEC	0,180 ± 0,007	8,8 ± 2,4	+0,006	-0,008	+0,011	+0,010	-3,4	+1,3	-6,5	-2,3	0,009	0,006	0,017	0,009
Woodward's Landing	0,168 ± 0,011	15,9 ± 4,4	—	-0,022	0,000	+0,002	—	+10,4	-4,2	-4,1	—	0,026	0,009	0,009
Deas Island	0,149 ± 0,010	21,9 ± 4,1	—	-0,004	+0,018	+0,021	—	+4,5	-10,1	-10,3	—	0,009	0,023	0,025
New Westminster	0,126 ± 0,017	32,3 ± 9,3	—	-0,018	-0,003	-0,009	—	+21,3	-2,3	-2,2	—	0,033	0,004	0,007
Port Mann	0,103 ± 0,021	42,2 ± 11,0	—	-0,016	-0,004	-0,014	—	+26,9	-1,9	-0,8	—	0,033	0,004	0,010
Pitt River	0,069 ± 0,019	54,1 ± 15,8	—	—	-0,009	—	—	—	+5,7	—	—	—	0,008	—

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
Dionisio Point	0,184	4,69	0,000	-0,003	+0,003	—	+4,6	+1,8	-1,6	—	0,010	0,005	0,004	—
Canoe Pass	0,164	15,06	+0,013	-0,011	+0,014	+0,013	-10,7	+2,2	-10,2	-9,5	0,024	0,009	0,024	0,022
Roberts Bank	0,173	358,11	-0,002	-0,002	+0,003	—	+5,9	+3,2	-1,0	—	0,013	0,007	0,003	—
Tsawwassen	0,173	359,32	-0,004	-0,004	-0,001	—	+4,7	+1,7	-2,1	—	0,010	0,004	0,005	—

Tableau 5. Comparaison de la composante S2 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,201 ± 0,008	78,7 ± 5,2	—	-0,033	+0,012	—	—	+17,7	-4,1	—	—	0,046	0,013	—
Sand Heads	0,226 ± 0,004	58,8 ± 1,0	+0,010	-0,001	+0,001	—	+6,1	+1,8	-0,1	—	0,019	0,005	0,001	—
Steveston	0,215 ± 0,007	66,6 ± 1,7	+0,022	-0,014	+0,007	+0,008	-2,3	+4,2	-5,6	-1,2	0,017	0,015	0,016	0,007
StevestonEC	0,215 ± 0,007	66,4 ± 1,7	+0,019	-0,008	+0,010	+0,008	-2,9	+1,6	-6,2	-1,0	0,016	0,007	0,018	0,007
Woodward's Landing	0,199 ± 0,013	74,0 ± 3,4	—	-0,026	-0,004	-0,003	—	+13,7	-2,9	-2,0	—	0,037	0,008	0,005
Deas Island	0,176 ± 0,011	80,3 ± 3,5	—	-0,004	+0,019	+0,021	—	+7,5	-9,2	-8,5	—	0,016	0,025	0,025
New Westminster	0,146 ± 0,020	92,8 ± 7,4	—	-0,024	-0,008	-0,015	—	+24,4	-0,3	0,0	—	0,043	0,006	0,011
Port Mann	0,121 ± 0,021	105,1 ± 10,1	—	-0,024	-0,010	-0,022	—	+28,8	+0,8	+1,9	—	0,042	0,007	0,016
Pitt River	0,087 ± 0,020	120,3 ± 14,1	—	—	-0,019	—	—	—	+6,1	—	—	—	0,015	—
Dionisio Point	0,220	60,29	+0,012	0,000	+0,001	—	+6,9	+1,9	+0,7	—	0,021	0,005	0,002	—
Canoe Pass	0,201	73,22	+0,021	-0,011	+0,012	+0,011	-10,5	+3,4	-9,1	-8,0	0,031	0,011	0,025	0,022
Roberts Bank	0,200	55,58	+0,014	+0,005	+0,006	—	+6,9	+1,9	-0,3	—	0,020	0,006	0,004	—
Tsawwassen	0,199	55,24	+0,011	+0,004	+0,003	—	+7,4	+1,8	-0,2	—	0,020	0,005	0,002	—

Tableau 6. Comparaison de la composante K2 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,077 ± 0,015	57,1 ± 11,8	—	+0,026	-0,010	—	—	-11,0	-4,7	—	—	0,022	0,008	—
Sand Heads	0,062 ± 0,005	62,5 ± 4,6	+0,006	+0,004	+0,002	—	+3,5	-6,2	+0,5	—	0,005	0,005	0,001	—
Steveston	0,066 ± 0,008	61,6 ± 6,7	+0,003	+0,017	-0,008	-0,001	+3,7	-18,8	+1,0	-4,9	0,004	0,021	0,005	0,004

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
StevestonEC	0,066 ± 0,008	61,5 ± 6,9	+0,003	+0,015	-0,004	-0,001	+4,0	-16,2	+0,1	-4,6	0,004	0,018	0,003	0,004
Woodward's Landing	0,072 ± 0,014	66,3 ± 11,3	—	+0,023	-0,009	-0,002	—	-20,0	-10,8	-10,1	—	0,026	0,011	0,009
Deas Island	0,062 ± 0,014	72,9 ± 11,8	—	+0,033	+0,002	+0,009	—	-26,7	-17,7	-16,7	—	0,034	0,014	0,015
New Westminster	0,071 ± 0,023	71,7 ± 18,4	—	+0,021	-0,009	-0,005	—	-8,4	-8,5	-9,5	—	0,017	0,009	0,009
Port Mann	0,065 ± 0,025	76,7 ± 21,7	—	+0,018	-0,007	-0,011	—	+0,5	-12,3	-10,6	—	0,013	0,011	0,011
Pitt River	0,049 ± 0,024	82,4 ± 31,3	—	—	-0,013	—	—	—	-2,3	—	—	—	0,009	—
Dionisio Point	0,060	63,32	+0,008	+0,003	+0,001	—	+3,7	-5,8	+0,2	—	0,007	0,005	0,001	—
Canoe Pass	0,071	55,40	-0,005	+0,020	-0,004	-0,002	+8,7	-13,0	-1,6	-2,9	0,008	0,019	0,003	0,003
Roberts Bank	0,060	57,91	+0,005	+0,002	+0,001	—	+5,6	-5,3	-1,4	—	0,005	0,004	0,001	—
Tsawwassen	0,057	57,68	+0,008	+0,005	+0,002	—	+5,9	-5,5	-1,7	—	0,007	0,005	0,002	—

Tableau 7. Comparaison de la composante O1 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,407 ± 0,012	271,7 ± 1,6	—	-0,059	+0,007	—	—	+7,6	-1,2	—	—	0,054	0,008	—
Sand Heads	0,481 ± 0,008	264,2 ± 1,0	-0,029	-0,002	-0,002	—	+12,8	+3,0	+0,1	—	0,076	0,018	0,001	—
Steveston	0,456 ± 0,010	267,9 ± 1,3	-0,002	-0,027	+0,013	+0,014	+8,7	+2,2	-1,0	-0,6	0,049	0,022	0,011	0,010
StevestonEC	0,455 ± 0,010	267,9 ± 1,3	-0,001	-0,010	+0,015	+0,014	+8,7	+1,7	-2,1	-0,6	0,048	0,012	0,016	0,011
Woodward's Landing	0,425 ± 0,015	271,3 ± 1,9	—	-0,046	-0,015	-0,010	—	+4,0	-0,6	-1,0	—	0,038	0,011	0,008
Deas Island	0,391 ± 0,015	275,9 ± 2,1	—	-0,013	+0,018	+0,026	—	-0,6	-5,2	-5,7	—	0,009	0,029	0,034
New Westminster	0,326 ± 0,022	277,6 ± 3,4	—	-0,064	-0,024	-0,031	—	+5,3	+0,8	+0,4	—	0,049	0,017	0,022
Port Mann	0,277 ± 0,023	281,6 ± 4,7	—	-0,075	-0,034	-0,042	—	+4,0	-0,5	+1,8	—	0,054	0,024	0,030
Pitt River	0,203 ± 0,021	288,5 ± 6,6	—	—	-0,028	—	—	—	+7,9	—	—	—	0,027	—
Dionisio Point	0,481	264,16	-0,031	-0,002	0,000	—	+13,7	+3,2	+1,0	—	0,081	0,019	0,006	—
Canoe Pass	0,410	269,07	+0,041	-0,001	+0,043	+0,040	+7,2	+2,6	-2,1	-2,5	0,048	0,013	0,033	0,031
Roberts Bank	0,457	262,45	-0,009	+0,019	+0,018	—	+13,6	+3,3	+0,3	—	0,076	0,024	0,013	—
Tsawwassen	0,466	262,02	-0,017	+0,014	+0,014	—	+13,2	+2,7	-0,5	—	0,075	0,018	0,010	—

Tableau 8. Comparaison de la composante K1 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,774 ± 0,012	295,5 ± 0,9	—	-0,060	+0,014	—	—	+6,5	-1,8	—	—	0,073	0,020	—
Sand Heads	0,862 ± 0,008	286,7 ± 0,5	-0,027	+0,006	+0,002	—	+11,2	+0,2	-0,5	—	0,118	0,005	0,005	—
Steveston	0,824 ± 0,010	290,4 ± 0,7	+0,014	-0,019	+0,015	+0,026	+6,9	+0,6	-2,5	-1,4	0,072	0,015	0,028	0,023
StevestonEC	0,822 ± 0,010	290,3 ± 0,7	+0,010	+0,001	+0,022	+0,028	+6,8	-0,4	-3,2	-1,3	0,070	0,004	0,037	0,024
Woodward's Landing	0,775 ± 0,014	294,2 ± 0,9	—	-0,039	-0,019	-0,009	—	+3,8	-0,9	-1,1	—	0,045	0,016	0,012
Deas Island	0,712 ± 0,013	299,1 ± 1,1	—	+0,024	+0,045	+0,057	—	-1,1	-5,8	-6,1	—	0,019	0,061	0,069
New Westminster	0,620 ± 0,020	305,9 ± 1,9	—	-0,052	-0,033	-0,046	—	+7,5	+1,4	+1,5	—	0,066	0,025	0,034
Port Mann	0,538 ± 0,025	313,8 ± 2,5	—	-0,064	-0,038	-0,065	—	+8,3	+2,0	+4,2	—	0,069	0,030	0,053
Pitt River	0,412 ± 0,019	327,3 ± 3,0	—	—	-0,036	—	—	—	+8,0	—	—	—	0,047	—
Dionisio Point	0,861	287,05	-0,034	+0,001	-0,003	—	+12,0	+0,7	+0,2	—	0,127	0,007	0,003	—
Canoe Pass	0,769	291,79	+0,053	+0,006	+0,054	+0,055	+5,3	+1,5	-2,9	-2,7	0,064	0,015	0,048	0,047
Roberts Bank	0,823	284,77	-0,008	+0,026	+0,020	—	+12,1	+0,9	+0,0	—	0,123	0,021	0,014	—
Tsawwassen	0,830	285,00	-0,021	+0,015	+0,007	—	+11,0	-0,3	-1,1	—	0,112	0,011	0,012	—

Tableau 9. Comparaison de la composante P1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,227 ± 0,012	292,5 ± 2,8	—	-0,026	0,000	—	—	+4,7	-1,1	—	—	0,022	0,003	—
Sand Heads	0,272 ± 0,007	285,2 ± 1,6	-0,018	+0,001	-0,011	—	+12,1	-0,6	-0,3	—	0,041	0,002	0,008	—
Steveston	0,253 ± 0,010	287,7 ± 2,2	+0,002	-0,011	+0,001	+0,002	+9,2	-0,3	-0,9	+0,1	0,029	0,008	0,003	0,002
StevestonEC	0,253 ± 0,009	287,7 ± 2,1	+0,001	-0,001	+0,004	+0,003	+8,8	-1,1	-1,8	+0,1	0,028	0,004	0,006	0,002
Woodward's Landing	0,225 ± 0,013	290,6 ± 3,4	—	-0,027	-0,007	-0,009	—	+2,2	+0,5	-1,0	—	0,020	0,005	0,007
Deas Island	0,207 ± 0,012	295,0 ± 3,3	—	-0,009	+0,012	+0,011	—	-2,2	-3,9	-5,6	—	0,008	0,013	0,016
New Westminster	0,160 ± 0,017	299,2 ± 6,5	—	-0,026	-0,006	-0,017	—	+5,7	+1,0	+0,9	—	0,021	0,005	0,012
Port Mann	0,130 ± 0,021	305,5 ± 9,5	—	-0,025	-0,011	-0,020	—	+7,3	+1,3	+3,7	—	0,021	0,008	0,015
Pitt River	0,085 ± 0,017	318,7 ± 11,6	—	—	-0,004	—	—	—	+8,0	—	—	—	0,009	—
Dionisio Point	0,263	284,81	-0,013	+0,005	-0,006	—	+13,0	-0,4	+0,1	—	0,042	0,004	0,004	—

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
Canoe Pass	0,220	291,12	+0,030	+0,005	+0,023	+0,022	+4,2	-1,9	-4,4	-4,4	0,025	0,006	0,021	0,020
Roberts Bank	0,261	283,03	-0,018	+0,001	-0,012	—	+12,9	-0,0	-0,1	—	0,042	0,001	0,008	—
Tsawwassen	0,258	282,26	-0,010	+0,012	+0,001	—	+13,4	+0,1	+0,1	—	0,042	0,008	0,001	—

Tableau 10. Comparaison de la composante Q1 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,057 ± 0,013	270,1 ± 12,2	—	-0,004	+0,004	—	—	+20,7	+3,1	—	—	0,014	0,004	—
Sand Heads	0,078 ± 0,009	254,6 à 6,4	-0,004	-0,002	-0,001	—	+20,1	+5,5	+6,6	—	0,019	0,005	0,006	—
Steveston	0,070 ± 0,010	260,2 à 8,1	+0,004	-0,007	+0,005	+0,004	+14,1	+8,3	+3,4	+5,9	0,013	0,008	0,005	0,006
StevestonEC	0,070 ± 0,011	260,3 à 8,3	+0,003	-0,003	+0,006	+0,004	+13,6	+6,4	+2,3	+5,7	0,012	0,006	0,004	0,006
Woodward's Landing	0,062 ± 0,014	264,4 ± 13,0	—	-0,009	-0,001	-0,001	—	+16,4	+6,2	+6,0	—	0,013	0,005	0,005
Deas Island	0,059 ± 0,015	269,5 ± 14,7	—	-0,006	+0,002	+0,002	—	+11,5	+1,2	+0,9	—	0,009	0,002	0,002
New Westminster	0,040 ± 0,019	272,6 ± 29,0	—	-0,003	-0,004	-0,006	—	+31,1	+9,0	+10,7	—	0,015	0,005	0,006
Port Mann	0,029 ± 0,022	276,4 ± 47,2	—	0,000	-0,007	-0,007	—	+39,7	+11,9	+14,2	—	0,014	0,006	0,007
Pitt River	0,012 ± 0,019	282,2 ± 104,5	—	—	0,000	—	—	—	+33,1	—	—	—	0,005	—
Dionisio Point	0,077	257,19	-0,001	+0,001	+0,001	—	+18,6	+3,8	+4,6	—	0,017	0,004	0,004	—
Canoe Pass	0,059	266,16	+0,019	+0,004	+0,015	+0,013	+7,3	+5,9	+0,7	+1,1	0,015	0,005	0,010	0,009
Roberts Bank	0,074	256,29	+0,001	+0,003	+0,003	—	+16,8	+3,1	+3,9	—	0,015	0,004	0,004	—
Tsawwassen	0,075	256,36	+0,001	+0,005	+0,007	—	+15,3	+0,0	-0,4	—	0,014	0,004	0,005	—

Tableau 11. Comparaison de la composante L2 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,037 ± 0,009	62,2 ± 18,9	—	-0,013	0,000	—	—	-6,0	-10,2	—	—	0,010	0,005	—
Sand Heads	0,026 ± 0,003	57,4 ± 7,9	-0,016	-0,019	+0,004	—	+37,9	-41,8	-10,4	—	0,014	0,015	0,005	—
Steveston	0,028 ± 0,006	60,5 ± 11,4	-0,018	-0,015	+0,003	+0,005	+32,4	-37,4	-14,0	-16,4	0,014	0,014	0,005	0,007
StevestonEC	0,028 ± 0,005	60,6 ± 12,3	-0,018	-0,016	+0,003	+0,005	+31,2	-42,2	-14,7	-16,5	0,014	0,015	0,006	0,007

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
Woodward's Landing	0,029 ± 0,010	68,0 ± 19,5	—	-0,010	+0,003	+0,004	—	-10,8	-14,6	-16,3	—	0,007	0,006	0,007
Deas Island	0,024 ± 0,010	77,5 ± 21,0	—	-0,005	+0,007	+0,009	—	-20,2	-24,1	-26,0	—	0,006	0,010	0,011
New Westminster	0,026 ± 0,014	86,5 ± 36,6	—	-0,008	-0,003	-0,001	—	+5,5	-13,3	-11,5	—	0,006	0,005	0,004
Port Mann	0,022 ± 0,016	98,0 ± 42,8	—	-0,008	-0,004	-0,004	—	+19,1	-11,0	-10,4	—	0,007	0,004	0,004
Pitt River	0,016 ± 0,016	105,9 ± 58,8	—	—	-0,007	—	—	—	+8,9	—	—	—	0,005	—
Dionisio Point	0,026	67,96	-0,016	-0,020	+0,003	—	+35,3	-50,2	-18,6	—	0,013	0,016	0,007	—
Canoe Pass	0,030	61,83	-0,020	-0,011	+0,004	+0,005	+19,0	-35,7	-18,6	-19,8	0,014	0,013	0,008	0,009
Roberts Bank	0,025	58,12	-0,015	-0,017	+0,003	—	+27,6	-35,7	-16,0	—	0,012	0,013	0,006	—
Tsawwassen	0,027	59,71	-0,010	-0,014	+0,011	—	+23,4	-31,4	-17,2	—	0,009	0,012	0,010	—

Tableau 12. Comparaison de la composante J1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,033 ± 0,012	329,1 ± 19,6	—	-0,007	+0,003	—	—	+136,9	+6,6	—	—	0,039	0,004	—
Sand Heads	0,048 ± 0,008	314,0 ± 11,3	-0,018	-0,038	-0,002	—	+138,7	+130,5	+8,7	—	0,052	0,039	0,005	—
Steveston	0,043 ± 0,010	319,6 ± 13,8	-0,012	-0,026	+0,002	+0,002	+131,1	+135,8	+5,0	+10,0	0,047	0,039	0,003	0,006
StevestonEC	0,043 ± 0,010	319,6 ± 12,9	-0,013	-0,027	+0,003	+0,002	+130,5	+130,8	+5,2	+10,0	0,047	0,038	0,003	0,006
Woodward's Landing	0,037 ± 0,012	321,3 ± 20,0	—	-0,017	-0,001	-0,001	—	+145,9	+9,0	+9,8	—	0,039	0,004	0,005
Deas Island	0,035 ± 0,013	318,9 ± 21,2	—	-0,014	+0,001	+0,001	—	+148,4	+11,6	+12,2	—	0,038	0,005	0,005
New Westminster	0,026 ± 0,019	334,7 ± 45,6	—	-0,007	-0,001	-0,003	—	+146,7	+6,9	+10,0	—	0,030	0,002	0,004
Port Mann	0,021 ± 0,020	344,4 ± 58,4	—	-0,006	-0,001	-0,003	—	+150,1	+4,3	+8,7	—	0,025	0,001	0,003
Pitt River	0,017 ± 0,017	10,9 ± 70,8	—	—	-0,004	—	—	—	-5,1	—	—	—	0,003	—
Dionisio Point	0,050	323,68	-0,020	-0,041	-0,006	—	+132,5	+130,9	-1,0	—	0,053	0,040	0,004	—
Canoe Pass	0,032	334,00	+0,002	-0,008	+0,012	+0,013	+111,0	+108,7	-1,3	+0,6	0,038	0,032	0,009	0,009
Roberts Bank	0,041	315,42	-0,008	-0,028	+0,003	—	+136,6	+128,3	+8,2	—	0,048	0,035	0,005	—
Tsawwassen	0,046	327,01	-0,014	-0,034	-0,001	—	+129,3	+129,9	-0,2	—	0,050	0,039	0,001	—

Tableau 13. Comparaison de la composante NO1 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,042 ± 0,023	9,9 ± 37,6	—	+0,076	-0,005	—	—	+78,8	+52,9	—	—	0,083	0,025	—
Sand Heads	0,059 ± 0,018	330,0 ± 16,4	+0,023	+0,018	-0,033	—	+108,1	+112,7	+64,6	—	0,081	0,081	0,038	—
Steveston	0,051 ± 0,020	337,4 ± 22,4	+0,033	+0,043	-0,027	-0,019	+99,6	+109,5	+54,8	+62,9	0,075	0,086	0,030	0,033
StevestonEC	0,051 ± 0,022	337,9 ± 24,5	+0,032	+0,042	-0,023	-0,019	+99,1	+107,8	+53,0	+62,6	0,074	0,084	0,029	0,033
Woodward's Landing	0,040 ± 0,024	349,8 ± 41,4	—	+0,067	-0,013	-0,011	—	+100,4	+71,2	+75,3	—	0,085	0,028	0,030
Deas Island	0,037 ± 0,027	349,1 ± 39,3	—	+0,069	-0,010	-0,009	—	+101,1	+72,2	+76,3	—	0,084	0,027	0,029
New Westminster	0,027 ± 0,036	29,8 ± 86,8	—	+0,075	+0,003	+0,006	—	+66,4	+60,7	+63,0	—	0,067	0,020	0,022
Port Mann	0,024 ± 0,039	54,2 ± 101,5	—	+0,066	+0,006	+0,007	—	+46,0	+48,3	+50,7	—	0,053	0,016	0,017
Pitt River	0,021 ± 0,034	110,8 ± 120,0	—	—	+0,009	—	—	—	+15,5	—	—	—	0,008	—
Dionisio Point	0,019	281,92	+0,053	+0,051	-0,003	—	+160,3	+166,9	+116,2	—	0,064	0,063	0,022	—
Canoe Pass	0,015	350,77	+0,091	+0,103	+0,078	+0,082	+19,4	+26,4	-21,2	-20,0	0,065	0,074	0,056	0,058
Roberts Bank	0,052	293,63	+0,057	+0,037	+0,026	—	+93,2	+94,3	+30,1	—	0,087	0,076	0,030	—
Tsawwassen	0,032	305,45	-0,009	-0,017	-0,002	—	+84,3	+116,6	-29,0	—	0,026	0,029	0,011	—

Tableau 14. Comparaison de la composante OO1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,043 ± 0,019	344,4 ± 26,6	—	-0,031	+0,009	—	—	+103,7	+21,9	—	—	0,033	0,014	—
Sand Heads	0,042 ± 0,015	336,5 ± 18,3	-0,026	-0,030	+0,014	—	+106,5	+105,1	+26,6	—	0,035	0,033	0,018	—
Steveston	0,043 ± 0,016	340,7 ± 22,4	-0,026	-0,037	+0,013	+0,012	+100,8	+90,0	+24,3	+24,6	0,034	0,031	0,017	0,017
StevestonEC	0,043 ± 0,016	341,0 ± 24,4	-0,026	-0,036	+0,012	+0,012	+99,0	+83,0	+25,4	+24,3	0,034	0,030	0,017	0,017
Woodward's Landing	0,043 ± 0,022	346,3 ± 29,2	—	-0,032	+0,009	+0,011	—	+88,0	+19,5	+18,2	—	0,031	0,013	0,013
Deas Island	0,035 ± 0,022	351,4 ± 38,8	—	-0,024	+0,016	+0,018	—	+82,8	+14,4	+13,1	—	0,025	0,014	0,015
New Westminster	0,034 ± 0,032	3,5 ± 55,9	—	-0,018	+0,005	+0,005	—	+97,7	+17,2	+16,8	—	0,028	0,008	0,008
Port Mann	0,031 ± 0,033	13,6 ± 78,6	—	-0,015	+0,002	+0,001	—	+100,2	+19,3	+19,9	—	0,026	0,008	0,008
Pitt River	0,024 ± 0,029	33,2 ± 78,0	—	—	0,000	—	—	—	+30,2	—	—	—	0,009	—
Dionisio Point	0,043	332,29	-0,028	-0,031	+0,014	—	+109,2	+100,8	+33,2	—	0,035	0,033	0,022	—

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
Canoe Pass	0,034	343,49	-0,016	-0,022	+0,022	+0,024	+81,6	+55,2	+5,6	+5,4	0,026	0,021	0,016	0,017
Roberts Bank	0,036	335,44	-0,018	-0,022	+0,026	—	+87,9	+79,6	+18,2	—	0,028	0,025	0,021	—
Tsawwassen	0,028	327,70	-0,021	-0,025	+0,011	—	+78,3	+78,0	+19,4	—	0,020	0,020	0,011	—

Tableau 15. Comparaison de la composante SO1 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,031 ± 0,010	80,7 ± 19,4	—	+0,009	-0,011	—	—	+27,8	-19,5	—	—	0,014	0,010	—
Sand Heads	0,024 ± 0,007	46,6 ± 17,0	+0,016	-0,004	-0,005	—	+55,2	+40,2	-24,2	—	0,023	0,011	0,007	—
Steveston	0,025 ± 0,008	59,2 ± 18,8	+0,015	+0,003	-0,007	-0,004	+41,5	+37,5	-34,9	-26,0	0,019	0,012	0,010	0,008
StevestonEC	0,025 ± 0,009	59,3 ± 19,2	+0,015	+0,002	-0,006	-0,004	+41,1	+34,6	-35,6	-26,1	0,019	0,011	0,010	0,008
Woodward Landing	0,025 ± 0,012	73,5 ± 28,1	—	+0,013	-0,009	-0,007	—	+31,5	-21,1	-15,7	—	0,015	0,008	0,006
Deas Island	0,021 ± 0,011	76,3 ± 31,3	—	+0,017	-0,005	-0,003	—	+28,8	-23,5	-18,3	—	0,016	0,007	0,005
New Westminster	0,024 ± 0,016	105,3 ± 39,2	—	+0,013	-0,010	-0,009	—	+20,6	-4,1	-1,3	—	0,012	0,007	0,006
Port Mann	0,022 ± 0,019	118,4 ± 51,1	—	+0,009	-0,010	-0,009	—	+20,8	+9,2	+9,4	—	0,009	0,007	0,007
Pitt River	0,018 ± 0,016	146,3 ± 51,8	—	—	-0,006	—	—	—	+17,0	—	—	—	0,005	—
Dionisio Point	0,033	56,98	+0,008	-0,013	-0,016	—	+47,8	+36,7	-25,7	—	0,022	0,015	0,013	—
Canoe Pass	0,032	79,72	+0,006	-0,003	-0,017	-0,017	+24,7	+24,4	-36,4	-32,3	0,011	0,009	0,016	0,015
Roberts Bank	0,026	48,37	+0,011	-0,008	-0,011	—	+54,9	+42,3	-32,6	—	0,022	0,012	0,011	—
Tsawwassen	0,032	48,49	+0,017	-0,003	-0,005	—	+55,5	+45,5	-0,8	—	0,028	0,017	0,004	—

Tableau 16. Comparaison de la composante NU2 pour les marégraphes actifs de l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,035 ± 0,014	28,3 ± 14,4	—	-0,029	+0,002	—	—	-50,3	-2,7	—	—	0,022	0,002	—
Sand Heads	0,036 ± 0,004	11,3 ± 5,7	-0,034	-0,036	+0,002	—	+70,4	+7,6	+0,7	—	0,025	0,025	0,001	—
Steveston	0,035 ± 0,006	18,4 ± 10,6	-0,033	-0,034	+0,002	+0,002	+57,9	+16,4	-5,0	-1,7	0,024	0,024	0,003	0,002
StevestonEC	0,035 ± 0,007	18,3 ± 11,0	-0,033	-0,035	+0,002	+0,002	+57,7	-1,8	-6,4	-1,6	0,024	0,024	0,003	0,002

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
Woodward's Landing	0,033 ± 0,012	29,1 ± 19,0	—	-0,029	+0,002	+0,001	—	-8,4	-5,3	-3,6	—	0,021	0,002	0,002
Deas Island	0,030 ± 0,009	37,2 ± 19,7	—	-0,026	+0,005	+0,004	—	-17,6	-13,3	-12,0	—	0,019	0,006	0,006
New Westminster	0,025 ± 0,018	50,8 ± 39,6	—	-0,021	0,000	0,000	—	-34,3	-4,3	-5,4	—	0,016	0,001	0,002
Port Mann	0,021 ± 0,019	65,4 ± 60,7	—	-0,018	0,000	-0,002	—	-25,3	-3,3	-4,5	—	0,013	0,001	0,002
Pitt River	0,014 ± 0,017	97,3 ± 77,6	—	—	0,000	—	—	—	-10,4	—	—	—	0,002	—
Dionisio Point	0,037	10,24	-0,034	-0,036	0,000	—	+77,1	+12,0	+3,3	—	0,026	0,026	0,002	—
Canoe Pass	0,034	20,68	-0,032	-0,033	+0,002	+0,002	+59,7	-48,2	-2,9	-3,3	0,023	0,023	0,002	0,002
Roberts Bank	0,031	8,62	-0,029	-0,030	+0,004	—	+62,4	+28,0	+1,2	—	0,021	0,021	0,003	—
Tsawwassen	0,033	7,99	-0,031	-0,032	+0,001	—	+72,4	+57,0	+3,1	—	0,023	0,023	0,002	—

Tableau 17. Comparaison de la composante 2N2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2018 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observée			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	0,015 ± 0,011	329,3 ± 39,9	—	-0,005	-0,003	—	—	-112,5	-15,8	—	—	0,014	0,004	—
Sand Heads	0,026 ± 0,003	329,3 à 7,7	-0,020	-0,018	-0,006	—	-53,3	-19,6	-8,0	—	0,016	0,013	0,005	—
Steveston	0,022 ± 0,006	329,8 ± 16,0	-0,016	-0,015	-0,004	-0,008	-62,7	-105,3	-4,0	-5,0	0,014	0,017	0,003	0,006
StevestonEC	0,022 ± 0,006	329,7 ± 15,8	-0,016	-0,016	-0,005	-0,008	-60,1	-95,7	-4,8	-4,9	0,014	0,016	0,004	0,006
Woodward's Landing	0,019 ± 0,010	330,1 ± 33,5	—	-0,013	-0,005	-0,005	—	-101,8	-12,9	-19,8	—	0,015	0,005	0,005
Deas Island	0,019 ± 0,010	342,9 ± 29,5	—	-0,013	-0,005	-0,005	—	-114,2	-25,8	-33,3	—	0,015	0,006	0,007
New Westminster	0,011 ± 0,015	334,3 ± 95,8	—	-0,009	-0,003	-0,002	—	-119,4	-30,7	-27,9	—	0,008	0,004	0,004
Port Mann	0,007 ± 0,015	342,8 ± 136,0	—	-0,004	-0,003	-0,003	—	+174,7	-30,6	-26,6	—	0,007	0,003	0,003
Pitt River	0,003 ± 0,012	13,3 ± 185,9	—	—	0,000	—	—	—	-34,3	—	—	—	0,001	—
Dionisio Point	0,028	336,73	-0,023	-0,021	-0,009	—	-62,3	-15,1	-10,4	—	0,018	0,015	0,007	—
Canoe Pass	0,016	327,44	-0,009	-0,006	-0,008	-0,009	-106,8	-173,6	-7,3	-2,8	0,013	0,018	0,006	0,006
Roberts Bank	0,022	321,59	-0,017	-0,018	-0,009	—	-87,5	-39,5	-2,7	—	0,016	0,014	0,006	—
Tsawwassen	0,018	321,36	-0,015	-0,014	-0,006	—	+168,0	+109,7	+21,7	—	0,016	0,015	0,006	—

Tableau 18. Scores du niveau d'eau de marée pour l'année 2018.

Nom de la station	CRMSE (m)				χ^2				Pearson			
	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	—	0,206	0,070	—	—	0,054	0,006	—	—	0,976	0,997	—
Sand Heads	0,177	0,079	0,040	—	0,034	0,007	0,002	—	0,983	0,997	0,999	—
Steveston	0,135	0,107	0,083	0,061	0,021	0,013	0,008	0,004	0,991	0,994	0,996	0,998
StevestonEC	0,131	0,092	0,095	0,060	0,020	0,010	0,011	0,004	0,991	0,995	0,995	0,998
Woodward's Landing	—	0,156	0,065	0,059	—	0,032	0,005	0,005	—	0,986	0,998	0,998
Deas Island	—	0,118	0,137	0,146	—	0,022	0,030	0,034	—	0,990	0,988	0,988
New Westminster	—	0,181	0,069	0,075	—	0,070	0,010	0,012	—	0,966	0,997	0,998
Port Mann	—	0,183	0,063	0,099	—	0,100	0,012	0,029	—	0,953	0,998	0,997
Pitt River	—	—	0,091	—	—	—	0,046	—	—	—	0,987	—

Tableau 19. Scores du niveau d'eau résiduel pour l'année 2018.

Nom de la station	CRMSE (m)				χ^2				Pearson			
	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	—	0,115	0,066	—	—	0,529	0,171	—	—	0,841	0,912	—
Sand Heads	0,052	0,048	0,049	—	0,148	0,126	0,132	—	0,923	0,935	0,932	—
Steveston	0,075	0,059	0,060	0,062	0,298	0,181	0,193	0,201	0,841	0,910	0,898	0,894
StevestonEC	0,078	0,055	0,067	0,064	0,320	0,159	0,236	0,219	0,829	0,918	0,874	0,884
Woodward's Landing	—	0,136	0,064	0,056	—	0,652	0,147	0,111	—	0,844	0,927	0,944
Deas Island	—	0,195	0,111	0,110	—	1,173	0,381	0,371	—	0,616	0,787	0,794
New Westminster	—	0,350	0,076	0,057	—	1,254	0,059	0,033	—	0,928	0,978	0,984
Port Mann	—	0,545	0,079	0,072	—	1,668	0,035	0,029	—	0,931	0,987	0,986
Pitt River	—	—	0,105	—	—	—	0,047	—	—	—	0,978	—

Tableau 20. Scores du niveau d'eau total pour l'année 2018.

Nom de la station	Biais (m)				CRMSE (m)			
	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	—	0,025	-0,054	—	—	0,235	0,093	—
Sand Heads	0,061	0,069	0,067	—	0,184	0,092	0,063	—
Steveston	-0,153	-0,061	-0,087	-0,113	0,153	0,120	0,103	0,085
StevestonEC	-0,052	0,014	-0,006	-0,008	0,151	0,106	0,116	0,086
Woodward's Landing	—	0,060	0,006	-0,013	—	0,204	0,090	0,077
Deas Island	—	0,064	0,011	-0,013	—	0,227	0,176	0,183
New Westminster	—	0,318	0,034	0,059	—	0,393	0,093	0,088
Port Mann	—	0,503	-0,002	0,035	—	0,575	0,101	0,122
Pitt River	—	—	0,004	—	—	—	0,138	—
	χ^2				Pearson			
	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	—	0,068	0,011	—	—	0,967	0,995	—
Sand Heads	0,036	0,009	0,004	—	0,982	0,996	0,998	—
Steveston	0,027	0,016	0,012	0,008	0,988	0,992	0,994	0,996
StevestonEC	0,026	0,013	0,015	0,008	0,988	0,994	0,993	0,996
Woodward's Landing	—	0,052	0,010	0,007	—	0,974	0,995	0,996
Deas Island	—	0,079	0,047	0,051	—	0,964	0,980	0,980
New Westminster	—	0,274	0,015	0,014	—	0,894	0,995	0,996
Port Mann	—	0,643	0,020	0,029	—	0,851	0,994	0,991
Pitt River	—	—	0,046	—	—	—	0,982	—

Tableau 21. Scores moyens pour le niveau d'eau résiduel pendant les ondes de tempête. N indique le nombre d'événements de tempête pour chaque station.

Station	N	Score											
		CRMSE (m)				γ^2				R de Pearson			
		SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30	SPCOG-O	SS500	SSS150	SF30
North Arm	4	—	0,046	0,033	—	—	0,403	0,213	—	—	0,813	0,895	—
Sand Heads	8	0,033	0,031	0,031	—	0,168	0,152	0,150	—	0,920	0,928	0,930	—
Steveston	8	0,035	0,036	0,033	0,032	0,145	0,198	0,135	0,128	0,931	0,901	0,936	0,940
StevestonEC	7	0,035	0,036	0,033	0,032	0,183	0,227	0,163	0,160	0,913	0,888	0,921	0,923
Woodward's Landing	7	—	0,045	0,039	0,036	—	0,294	0,157	0,137	—	0,861	0,932	0,939
Deas Island	7	—	0,057	0,054	0,051	—	0,530	0,366	0,342	—	0,766	0,836	0,845
New Westminster	8	—	0,064	0,057	0,054	—	0,455	0,287	0,262	—	0,805	0,905	0,916
Port Mann	7	—	0,082	0,081	0,077	—	0,598	0,258	0,245	—	0,763	0,915	0,925
Pitt River	7	—	—	0,099	—	—	—	0,386	—	—	—	0,918	—

Tableau 22. Scores pour les vitesses de courant total, résiduel et de marée le long du rivage modélisée par les modèles SSS150 et SF30 par rapport aux mesures de l'ADCP horizontal installé à Woodward's Landing. Le signe négatif correspond au flot vers l'aval.

Composante du courant	Part de la variance	Moyenne (m/s) observée	Biais (m/s)		CRMSE (m/s)		γ^2		R de Pearson	
			SSS150	SF30	SSS150	SF30	SSS150	SF30	SSS150	SF30
Total	1	-0,793	-0,133	-0,048	0,261	0,244	0,149	0,131	0,945	0,941
Résiduel	0,203	—	-0,150	-0,067	0,203	0,206	0,446	0,459	0,777	0,753
De marée	0,797	—	0,017	0,019	0,169	0,131	0,078	0,047	0,984	0,984

Tableau 23. Erreurs pour les composantes de la marée modélisées par les modèles SSS150 et SF30 par rapport aux observations de l'ADCP horizontal installé à Woodward's Landing.

Composante	Observée		Erreur d'amplitude (m/s)		Erreur de phase (degré)		Erreur de marée (m/s)	
	Amplitude (m/s)	Phase (degré)	SSS150	SF30	SSS150	SF30	SSS150	SF30
M2	0,559 ± 0,023	18,4 ± 2,7	+0,131	+0,075	+1,44	-0,46	0,093	0,053
N2	0,121 ± 0,023	352,8 à 11,7	+0,016	+0,010	-1,62	-2,58	0,012	0,008
S2	0,152 ± 0,024	42,5 ± 8,9	+0,015	-0,003	+9,90	+6,97	0,022	0,013
O1	0,217 ± 0,024	207,5 ± 6,4	+0,063	+0,049	+10,29	+2,65	0,055	0,036
K1	0,432 ± 0,028	250,1 ± 3,7	+0,128	+0,097	+3,28	+0,58	0,093	0,068
P1	0,147 ± 0,029	274,0 à 11,1	-0,014	-0,032	-6,74	-13,73	0,015	0,031
Q1	0,033 ± 0,026	219,3 à 48,4	+0,006	-0,001	+4,96	-6,12	0,005	0,003
K2	0,078 ± 0,020	10,6 à 12,7	0	+0,005	+15,80	+16,43	0,015	0,017

Tableau 24. Scores pour le courant total simulé par le SSS150 à quatre profondeurs sélectionnées lors de trois déploiements de l'ADCP.

Station	Profondeur (m)	Biais u (m/s)	Biais v (m/s)	RMSE (m/s)	γ^2	Amplitude de corrélation vectorielle	Angle de corrélation vectorielle (degré)
Pente inférieure du delta du fleuve Fraser	40,0	-0,03	0,07	0,19	0,45	0,80	-11,5
	58,5	-0,02	0,08	0,17	0,41	0,83	-13,6
	98,1	0,00	0,09	0,18	0,45	0,83	-10,4
	141,1	0,02	0,05	0,15	0,42	0,85	-17,6
Centre du détroit de Géorgie	68,8	0,03	-0,05	0,17	0,65	0,65	-3,3
	121,9	0,02	-0,02	0,14	0,50	0,74	0,0
	199,6	0,01	-0,01	0,12	0,36	0,83	-4,0
	288,8	0,02	-0,02	0,11	0,27	0,87	-3,4
Est du détroit de Géorgie	11,6	0,04	-0,03	0,26	0,75	0,61	-5,6
	44,5	-0,01	0,02	0,16	0,30	0,85	-2,9
	98,1	-0,01	0,03	0,14	0,25	0,89	-3,5
	157,6	0,05	-0,02	0,15	0,29	0,86	-7,7

Tableau 25. Scores pour le courant résiduel simulé par le SSS150 à quatre profondeurs sélectionnées lors de trois déploiements de l'ADCP.

Station	Profondeur (m)	RMSE (m/s)	γ^2	Amplitude de corrélation vectorielle	Angle de corrélation vectorielle (degré)
Pente inférieure du delta du fleuve Fraser	40,0	0,17	1,10	0,33	7,7
	58,5	0,16	1,30	0,28	0,5
	98,1	0,16	1,27	0,27	-5,0
	141,1	0,12	1,17	0,34	-12,3
Centre du détroit de Géorgie	68,8	0,15	1,25	0,14	21,2
	121,9	0,12	1,46	0,08	57,2
	199,6	0,10	1,39	0,04	10,7
	288,8	0,09	0,83	0,45	-9,8
Est du détroit de Géorgie	11,6	0,25	1,34	0,17	-16,3
	44,5	0,15	1,19	0,30	11,9
	98,1	0,12	1,19	0,32	8,3
	157,6	0,13	0,89	0,44	-6,9

Tableau 26. Scores pour le courant de marée simulé par le SSS150 à quatre profondeurs sélectionnées lors de trois déploiements de l'ADCP.

Station	Profondeur (m)	RMSE (m/s)	γ^2
Pente inférieure du delta du fleuve Fraser	40,0	0,17	0,09
	58,5	0,15	0,08
	98,1	0,20	0,09
	141,1	0,21	0,09
Centre du détroit de Géorgie	68,8	0,27	0,08
	121,9	0,17	0,07
	199,6	0,10	0,06
	288,8	0,10	0,05
Est du détroit de Géorgie	11,6	0,19	0,09
	44,5	0,06	0,06
	98,1	0,10	0,08
	157,6	0,13	0,08

Tableau 27. Scores pour la température de surface de la mer enregistrée à la bouée de contrôle de la qualité de l'eau du fleuve Fraser.

Score	SS500	SSS150	SF30
Biais (degré C)	-0,602	-0,446	-0,370
CRMSE (degré C)	1,111	1,107	1,097
γ^2	0,038	0,038	0,037
R de Pearson	0,981	0,981	0,981

Tableau 28. Scores pour la température et la salinité enregistrés par la sonde CTD ancrée à la station SEVIP.

Score	Température			Salinité		
	SPCOG-O	SS500	SSS150	SPCOG-O	SS500	SSS150
Biais (degré C psu)	0,385	0,389	0,388	0,818	0,049	0,051
CRMSE (degré C psu)	0,374	0,311	0,363	0,171	0,168	0,204
γ^2	0,348	0,241	0,299	0,335	0,324	0,407
R de Pearson	0,807	0,882	0,859	0,839	0,822	0,781

Tableau 29. Nombre de profils CTD pour la période de 2017 à 2021 pour les cinq sous-régions analysées.

Région	Nombre de profils
Sud du détroit de Géorgie	588
Bas Fraser	7
Massey à Annacis	20
Port Mann	11
Haut Fraser	27

Tableau 30. Scores de l'indice de performance de Molcard et de la distance de séparation pour l'évaluation de la dérive pour les intervalles horaires (un seul disponible).

Heure	Indice de performance de Molcard			Distance de séparation (km)		
	SS500	SSS150	SF30	SS500	SSS150	SF30
1	0,2	0,35	0,36	1,25	0,65	0,67

12. FIGURES

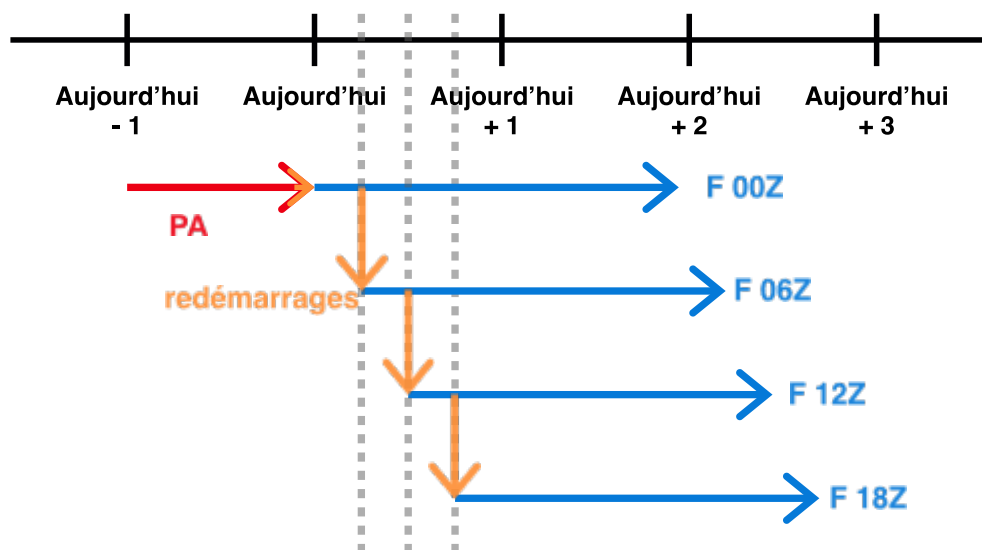


Figure 1. Schéma de séquençage de la pseudo-analyse (PA, en rouge) et des 4 prévisions de 48 h (en bleu) pour une date donnée. Les lignes pointillées grises sont espacées de six heures et les flèches orange indiquent les moments où un fichier de redémarrage est généré et utilisé pour lancer l'étape suivante. La pseudo-analyse pour demain (Aujourd'hui+1) commencera avec le même fichier de redémarrage que celui utilisé pour démarrer la prévision 00Z d'aujourd'hui, et la séquence se répétera.

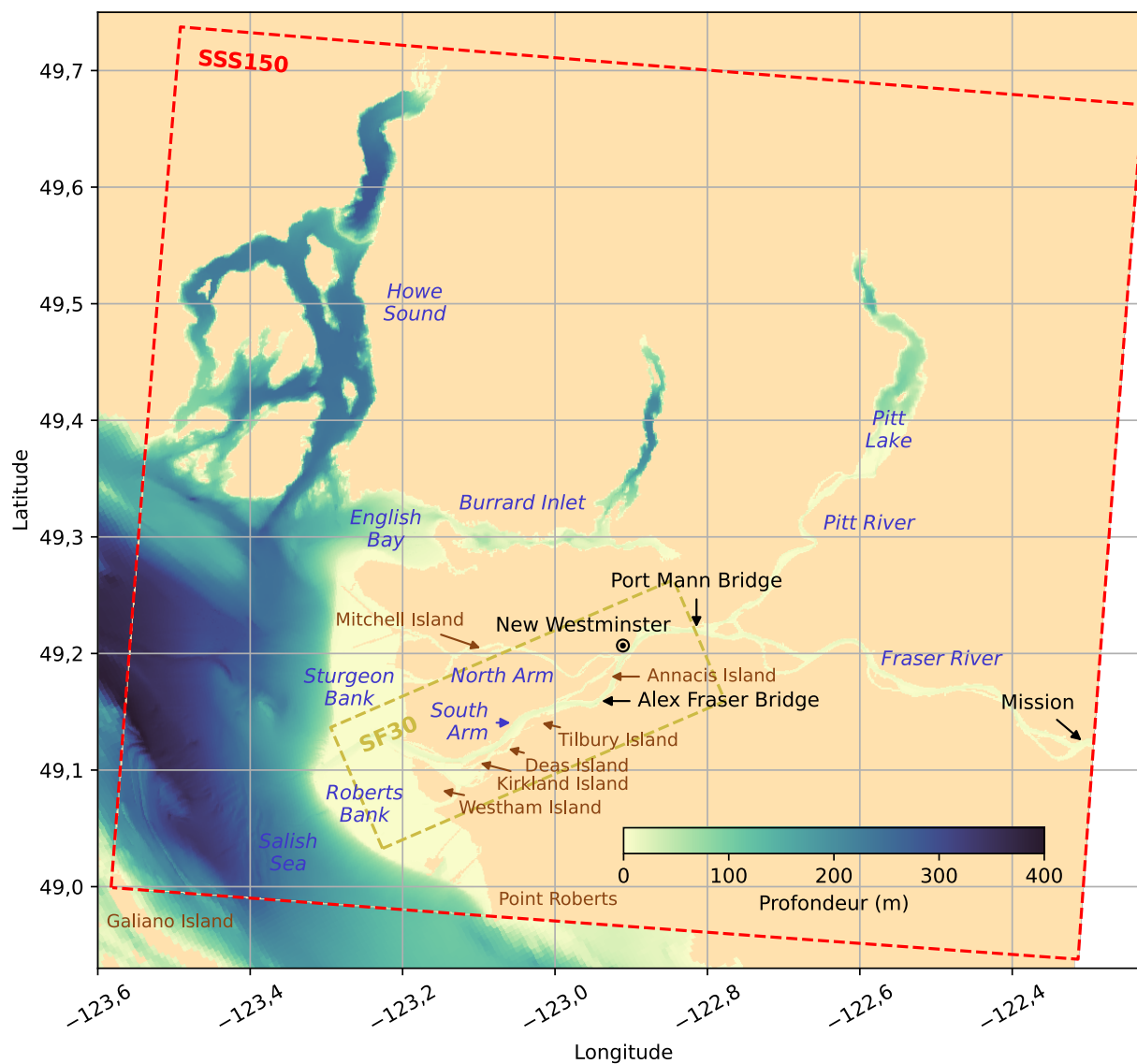


Figure 2. Domaine du modèle montrant les grilles extérieure (SSS150) et intérieure (SF30), l'échelle de couleurs montrant la profondeur.

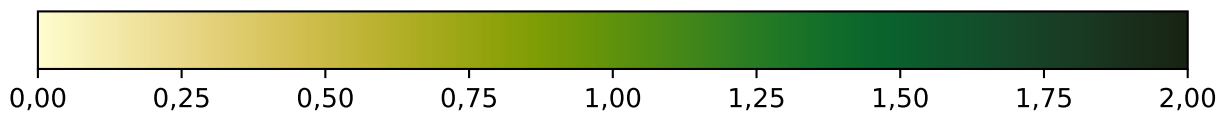
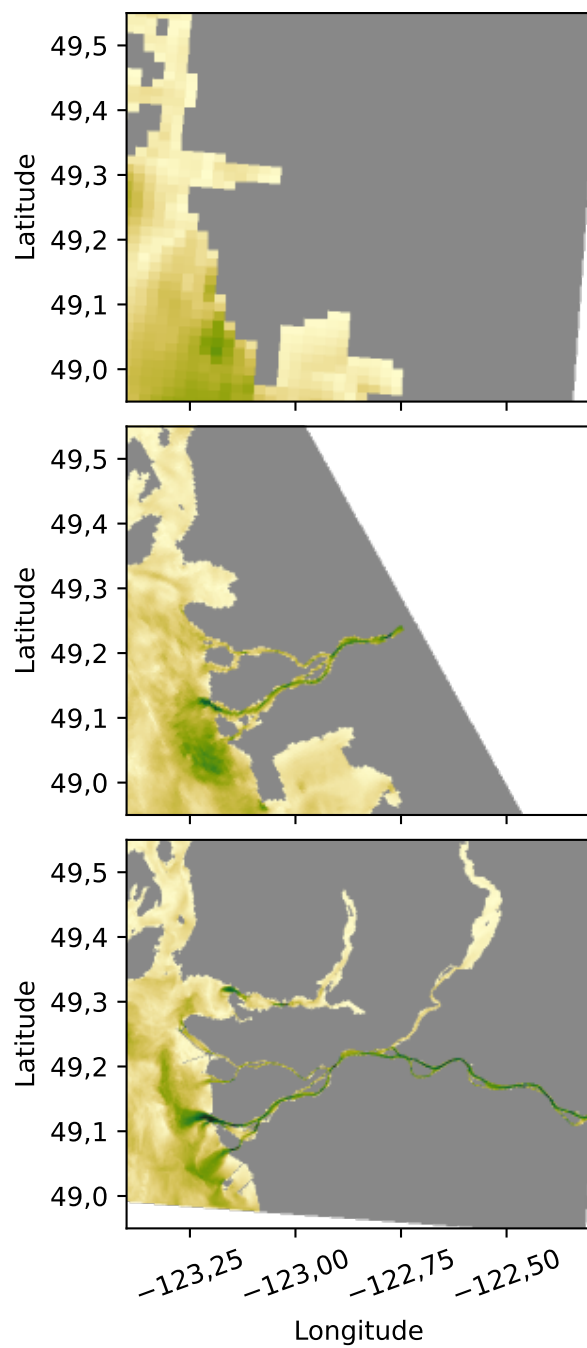


Figure 3. Vitesse en surface (m/s) dans le SPCOG-O, le SS500 et le SSS150 (du haut vers le bas) pour le fleuve Fraser.

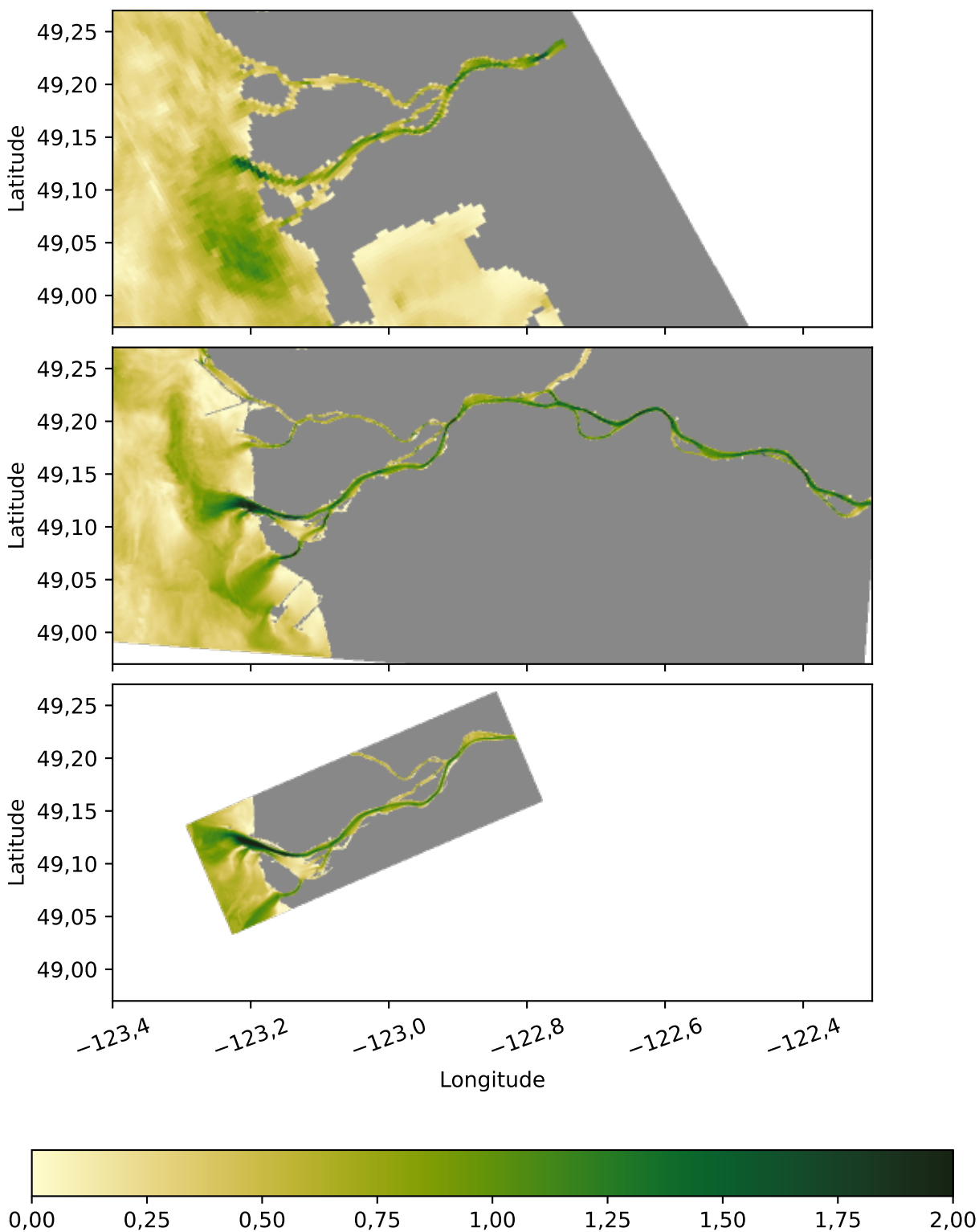


Figure 4. Vitesse en surface (m/s) dans le SS500, le SSS150 et le SF30 (du haut vers le bas) pour le bas Fraser, à l'exclusion du lac Pitt.

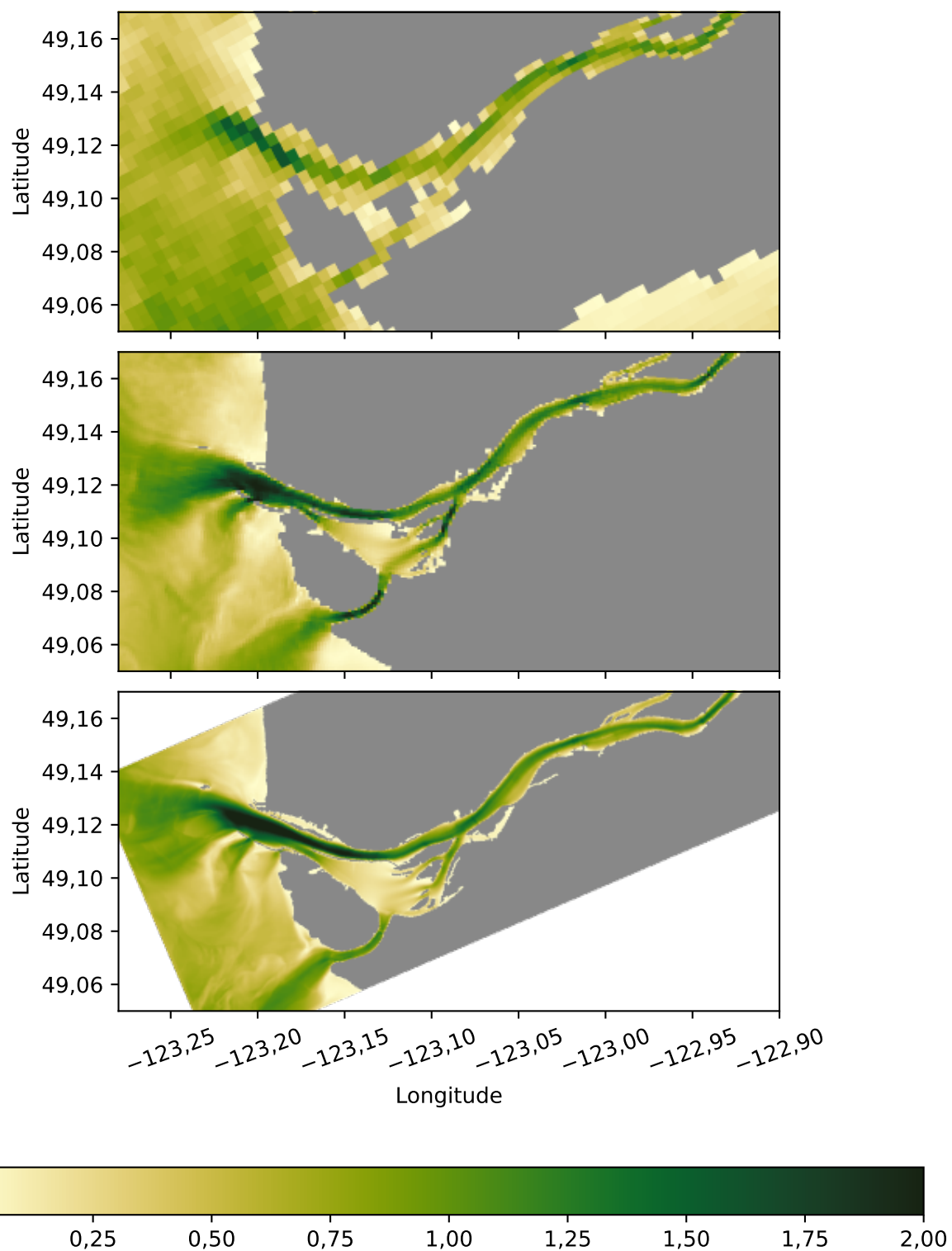


Figure 5. Vitesse en surface (m/s) de SS500, de SSS150 et de SF30 (du haut vers le bas) pour le bas Fraser (agrandissement de la Figure 4).

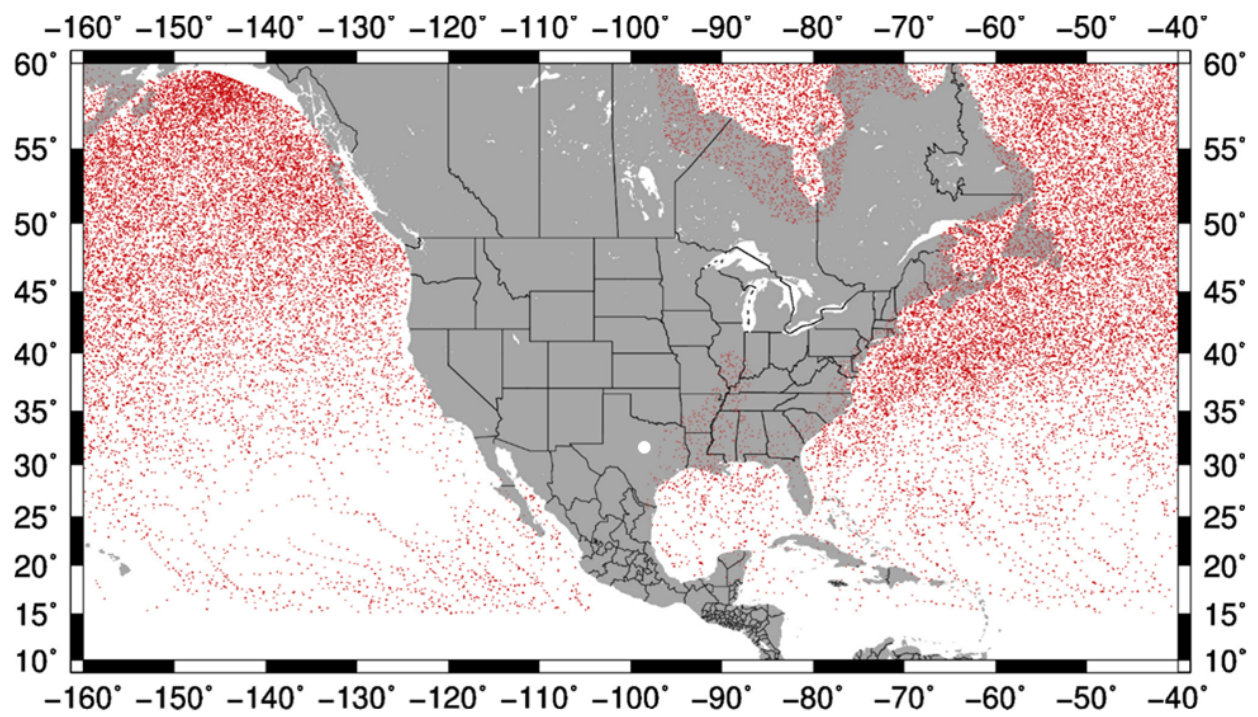


Figure 6. Emplacements des cyclones toutes les 6 heures de 2010 à 2021.

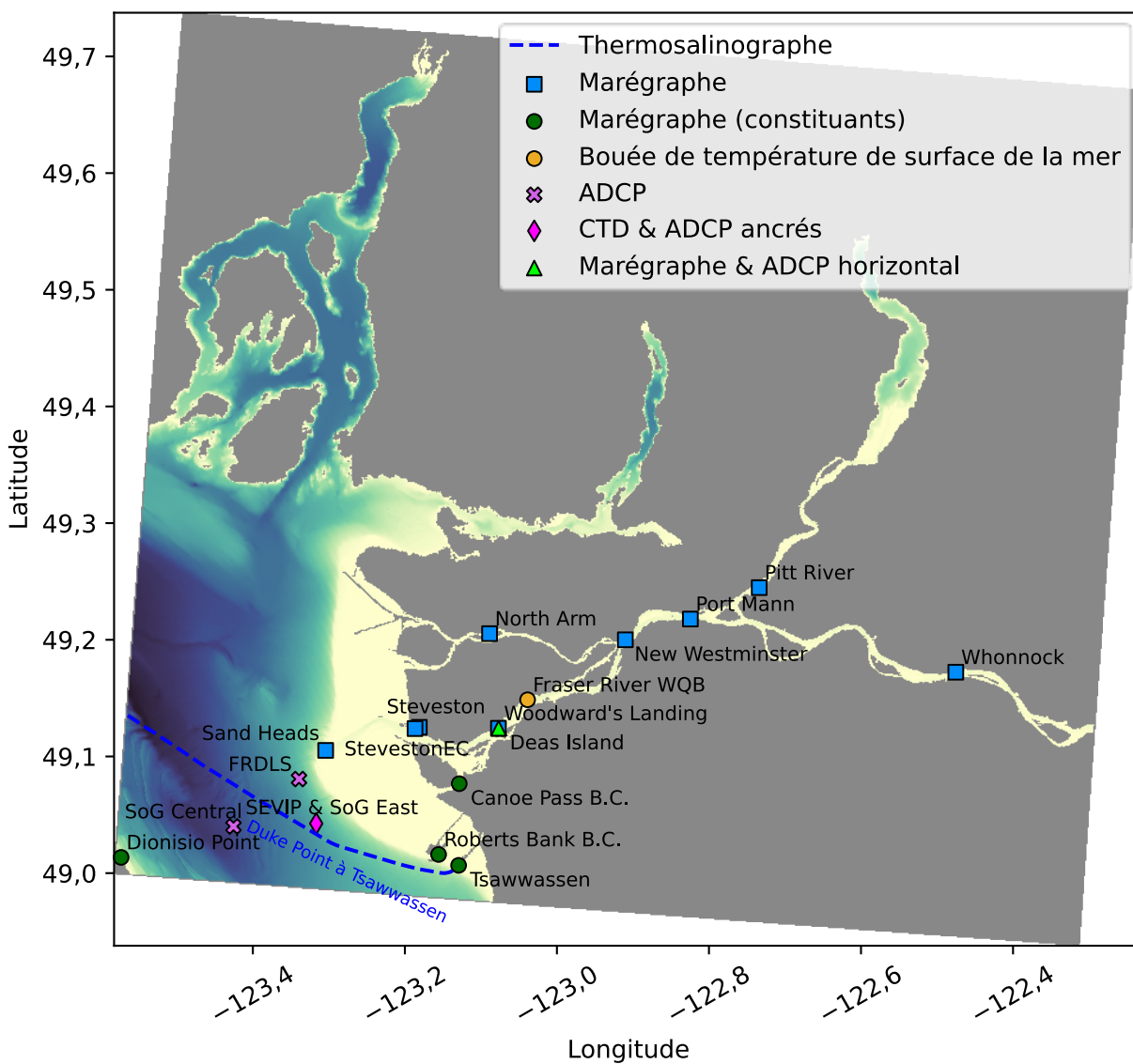


Figure 7. Emplacement des instruments utilisés dans la présente évaluation. Les deux indicateurs de niveau d'eau superposés sont Steveston (station du SHC) et StevestonEC (station de RHC) près de l'embouchure du Fraser. Le triangle vert représente Woodward's Landing (niveau d'eau et ADCP horizontal), tandis que le marqueur bleu en dessous représente Deas Island.

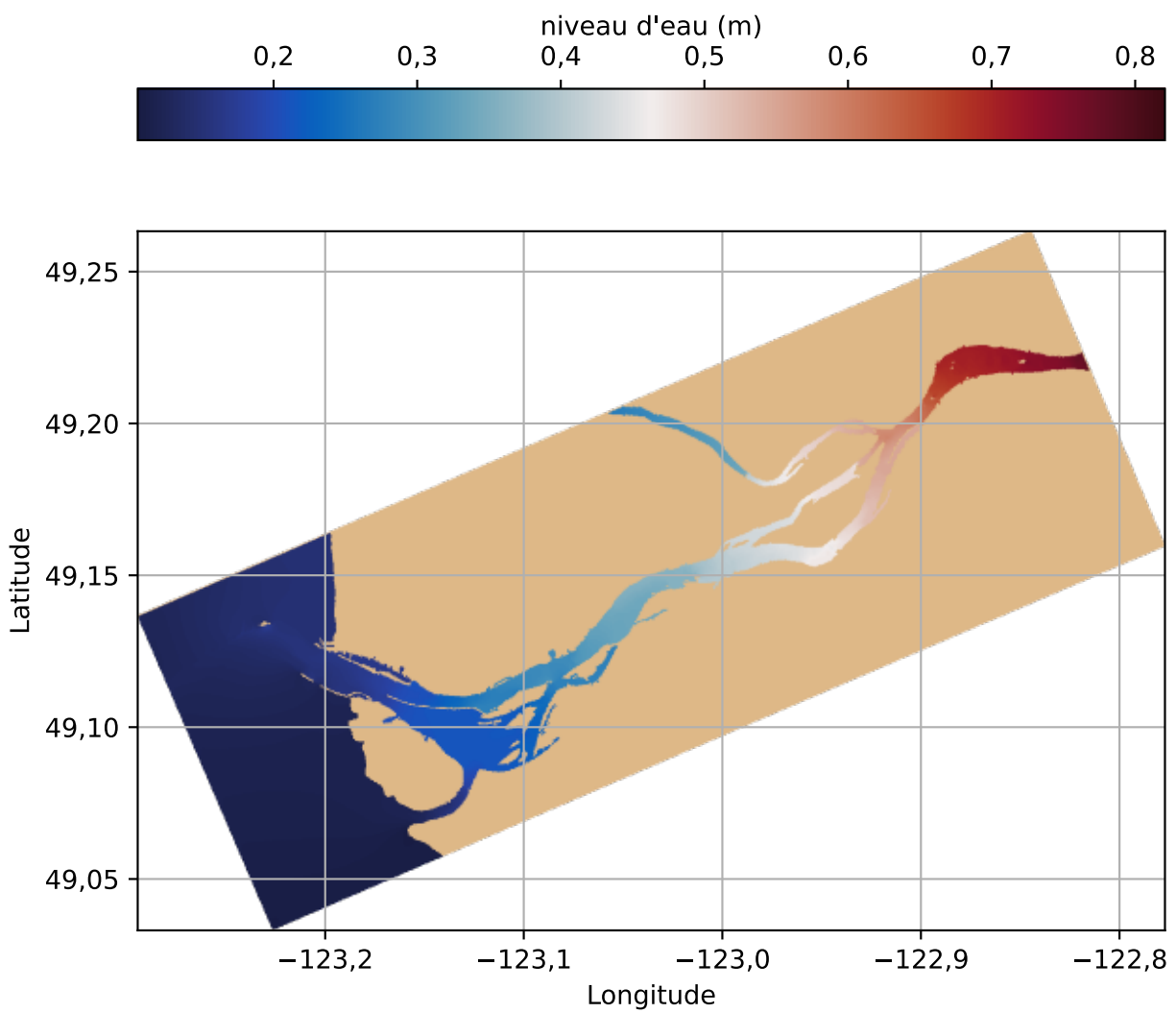


Figure 8. Niveau d'eau moyen du modèle de 2017 à 2021.

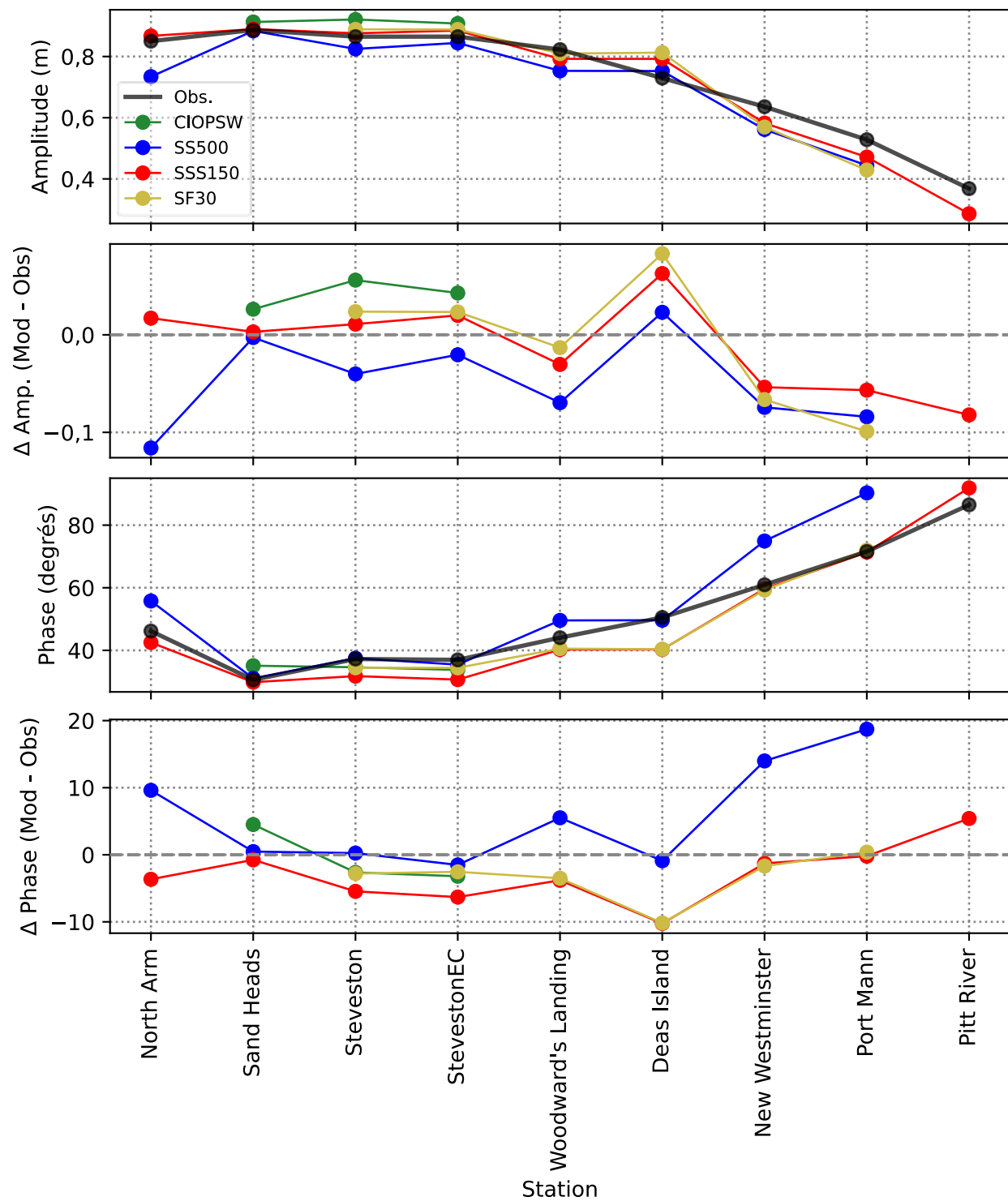


Figure 9. Amplitude et phase observées et modélisées pour la composante M2 en 2018.

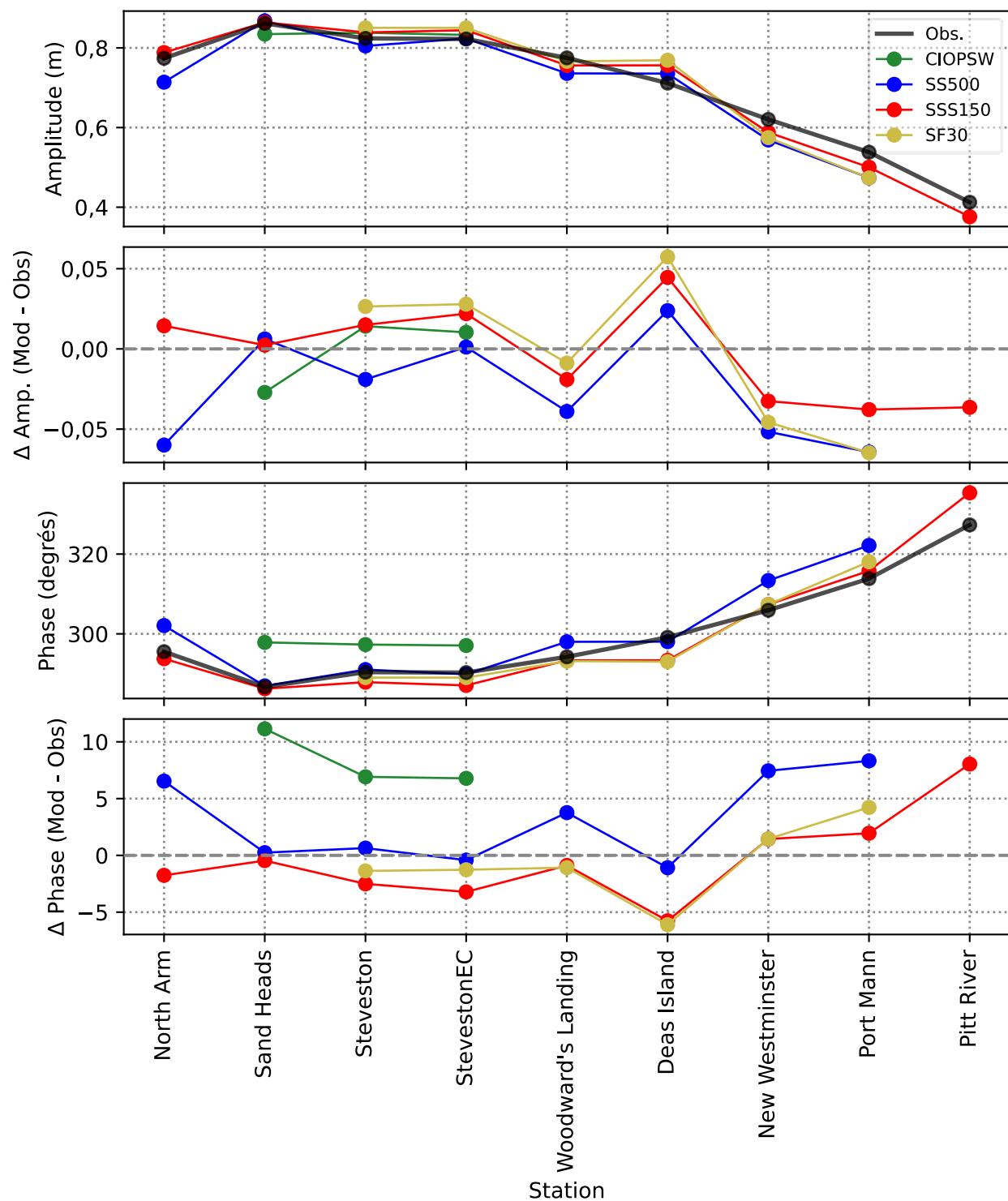


Figure 10. Amplitude et phase observées et modélisées pour la composante K1 en 2018.

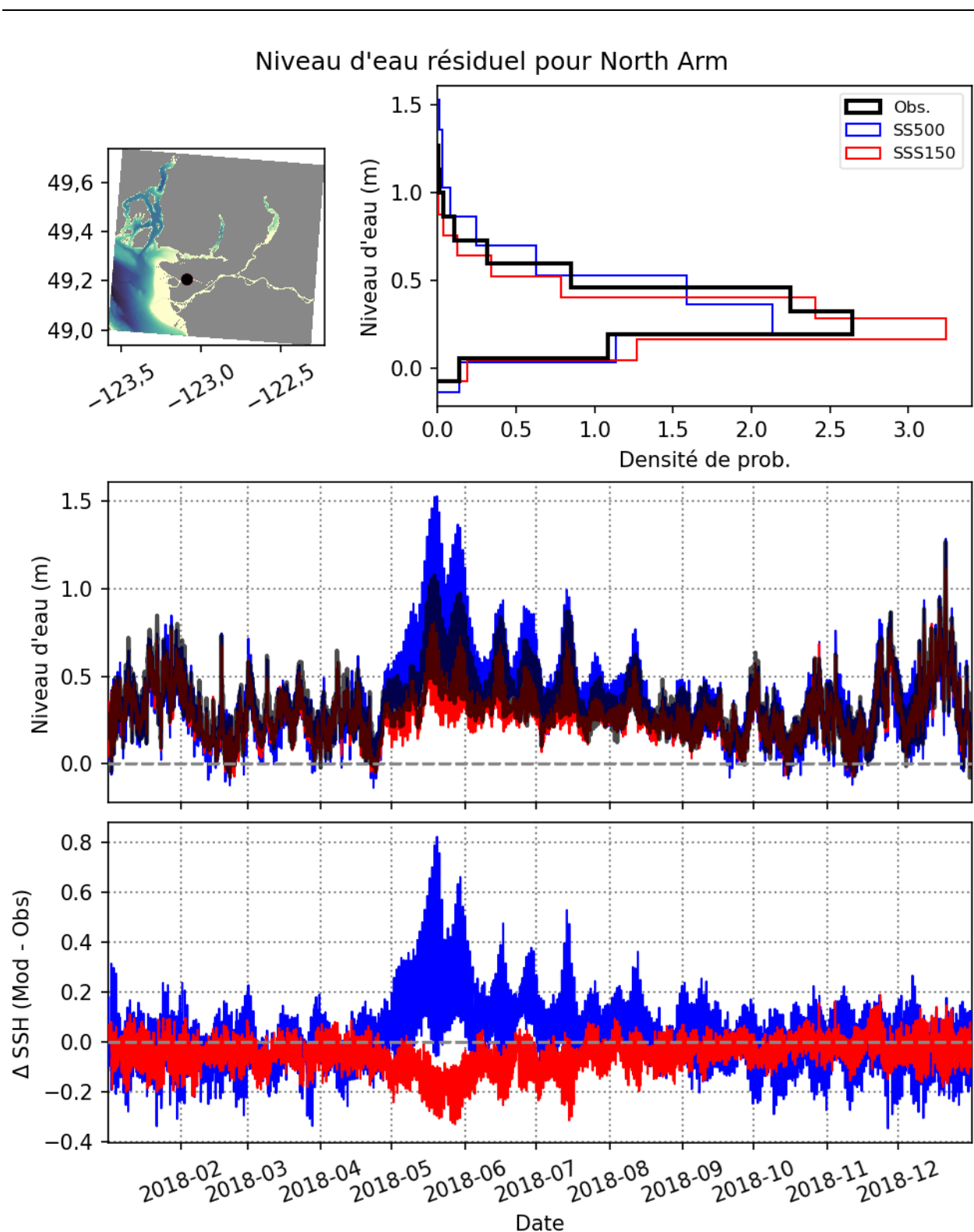


Figure 11. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour North Arm en 2018.

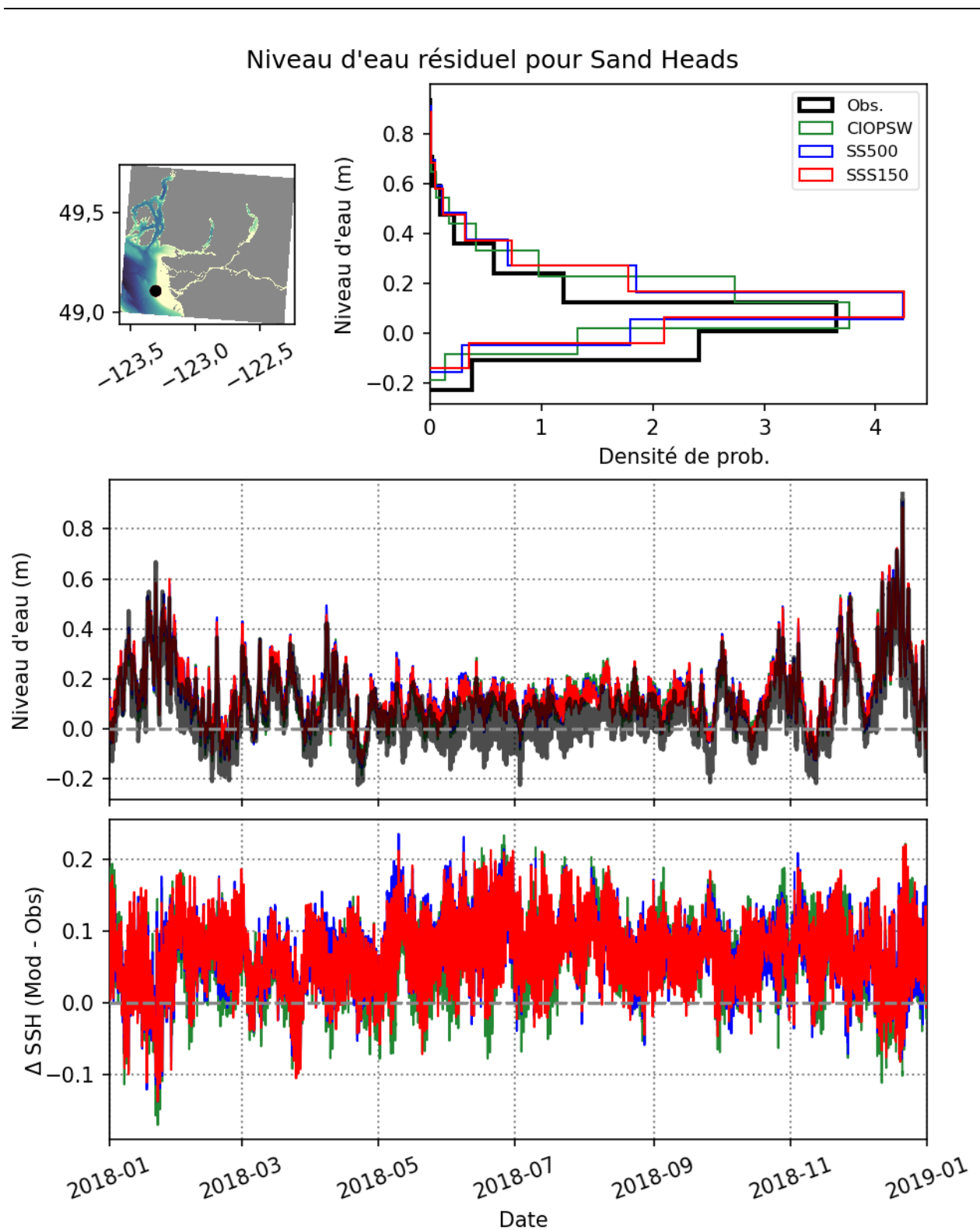


Figure 12. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour Sand Heads en 2018.

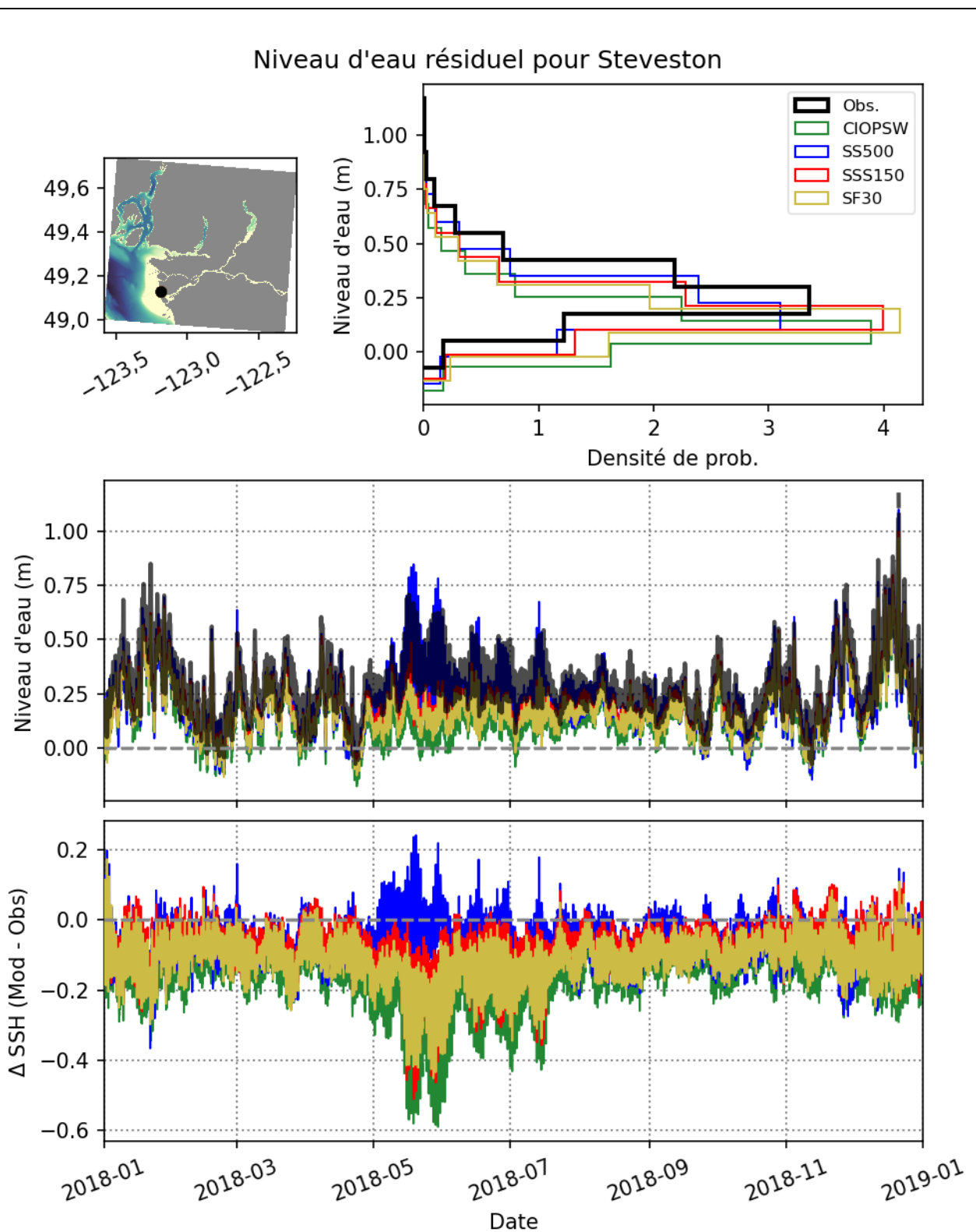


Figure 13. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour Steveston en 2018.

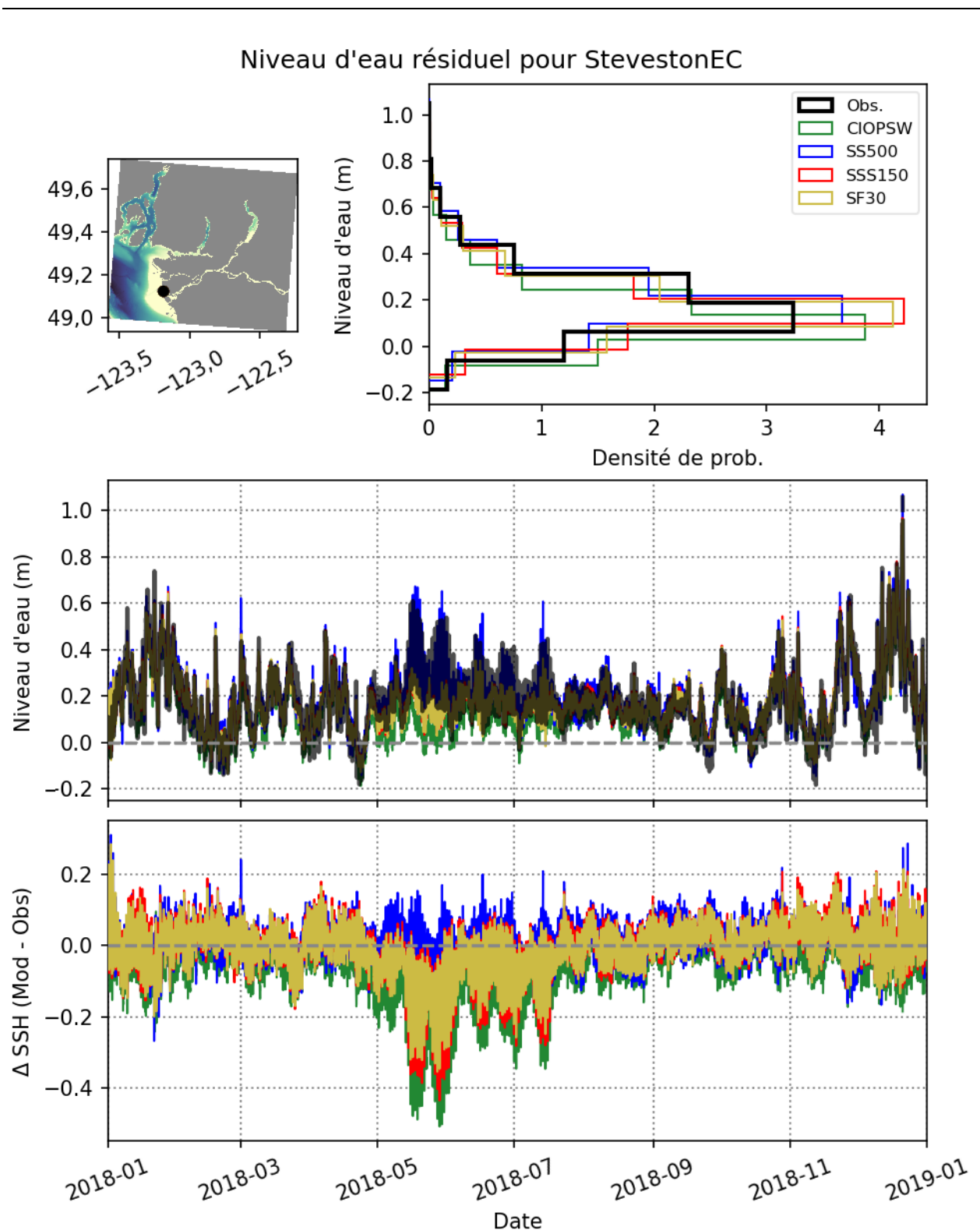


Figure 14. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour StevestonEC en 2018.

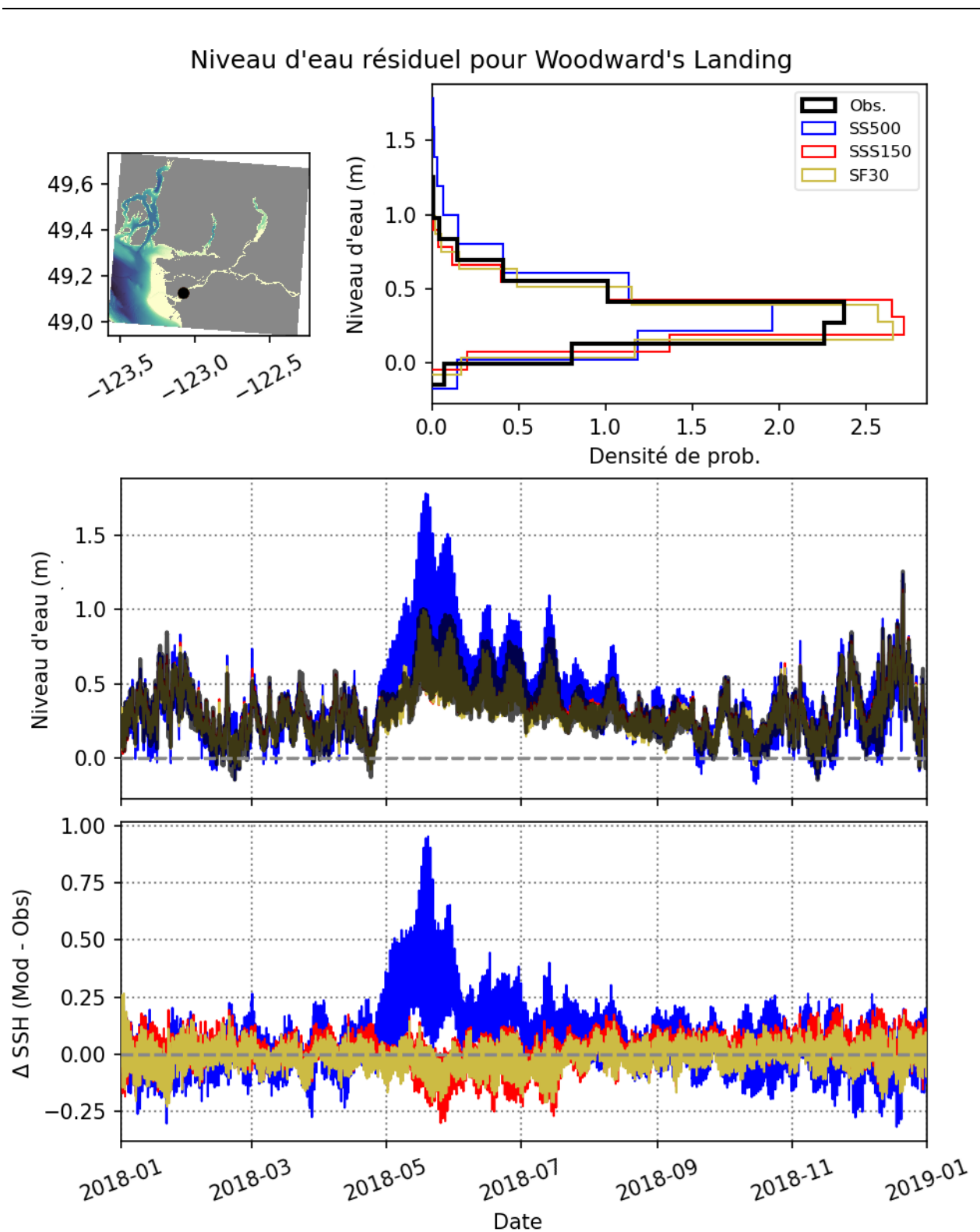


Figure 15. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour Woodward's Landing en 2018.

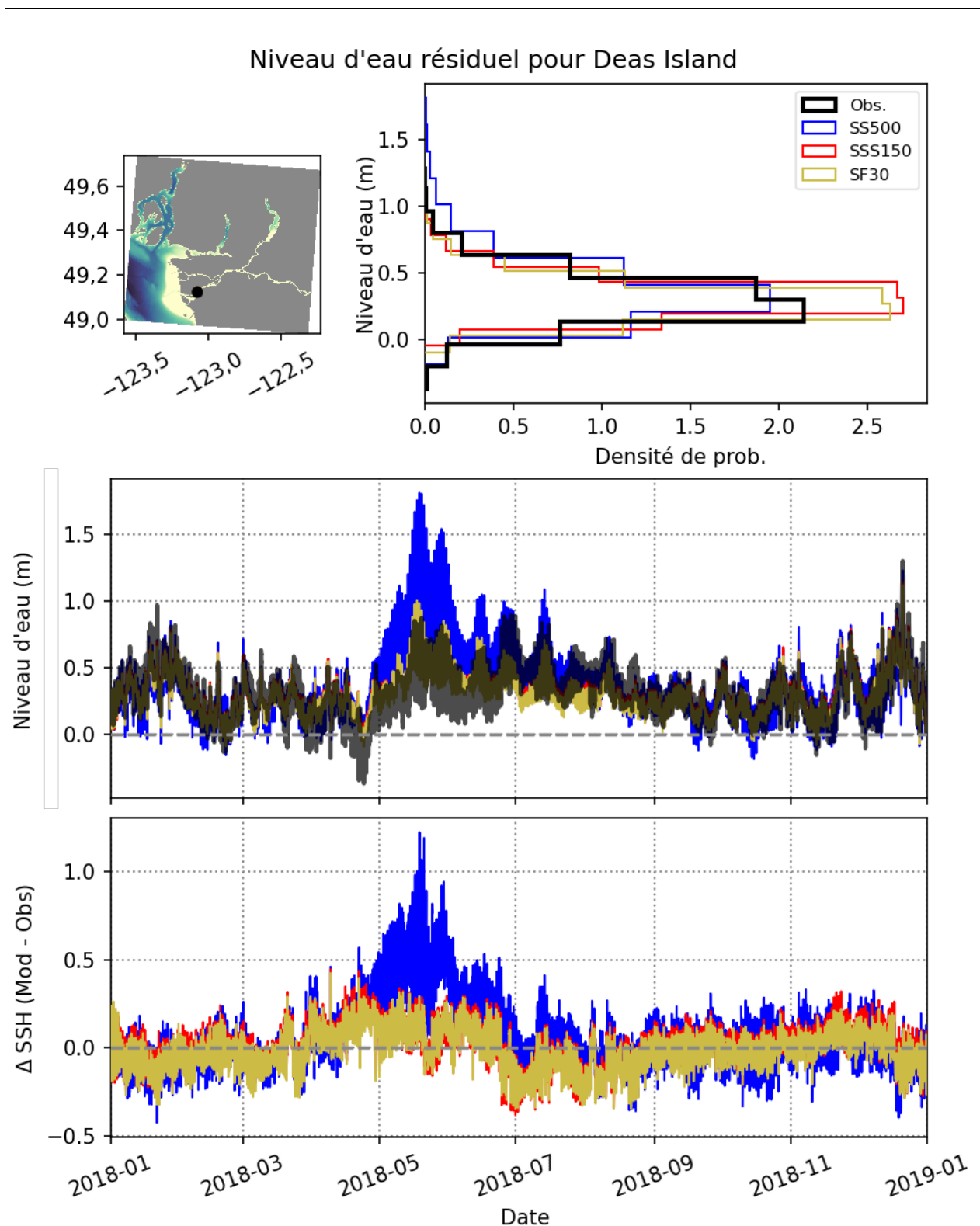


Figure 16. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Deas Island en 2018.

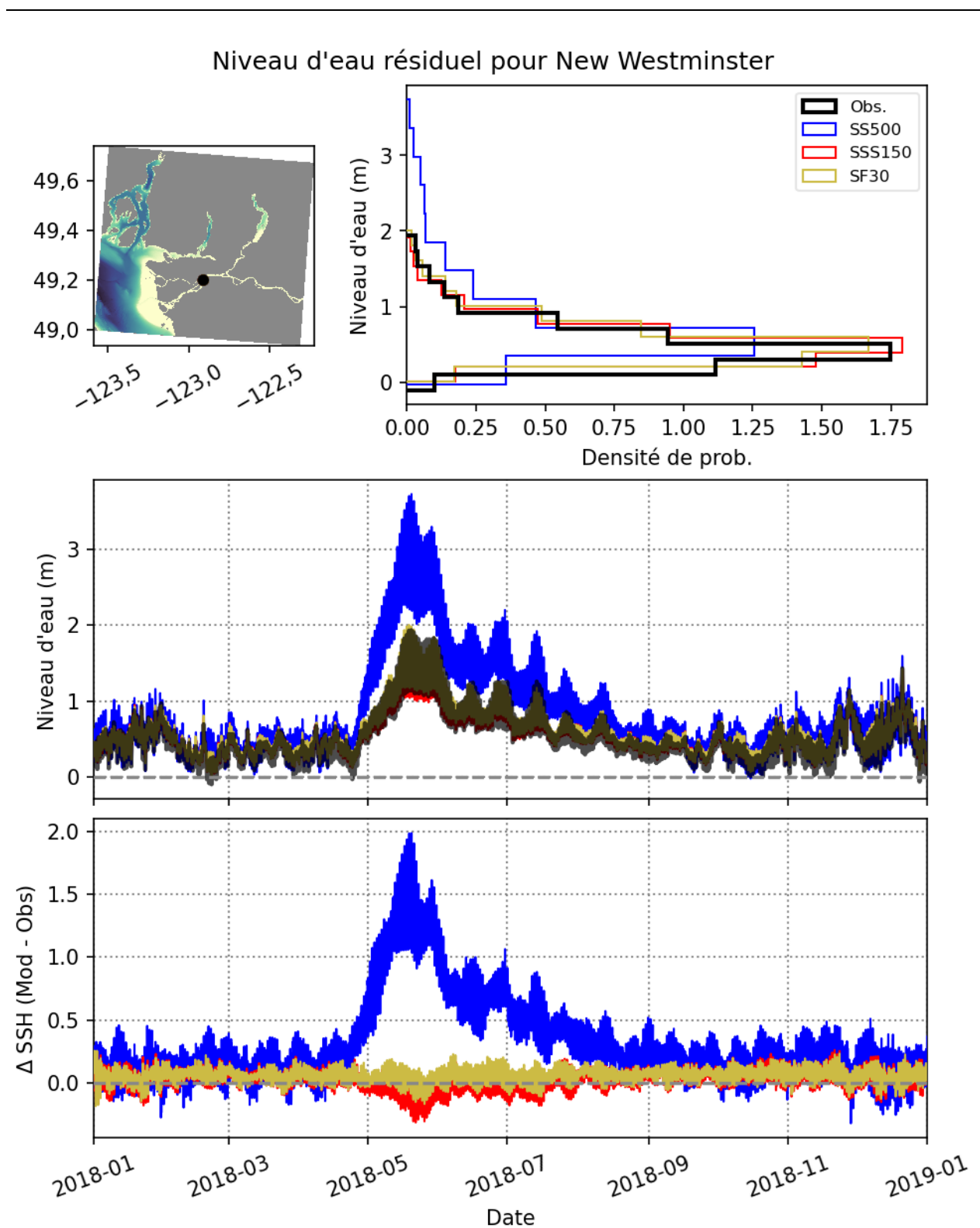


Figure 17. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour New Westminster en 2018.

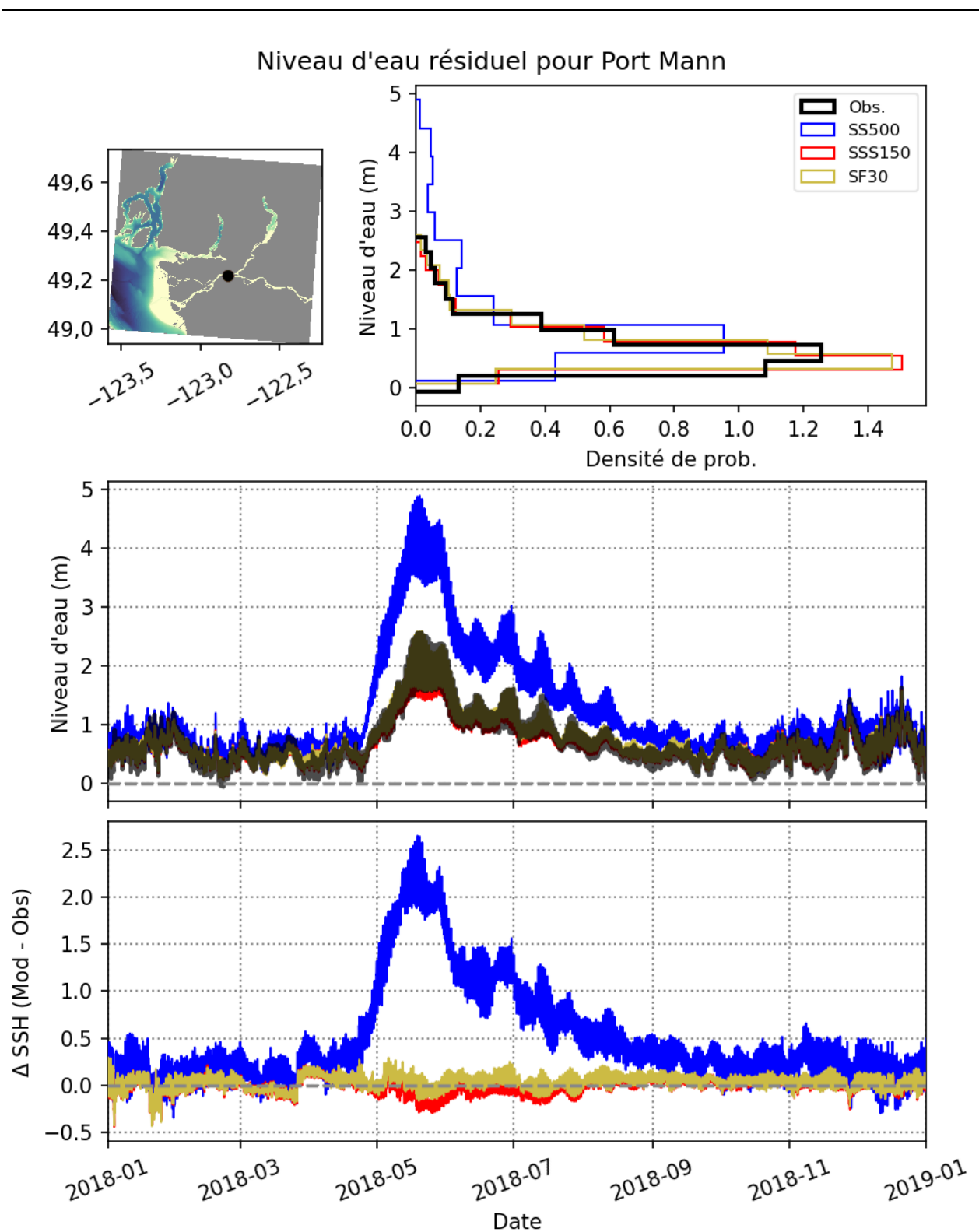


Figure 18. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour Port Mann en 2018.

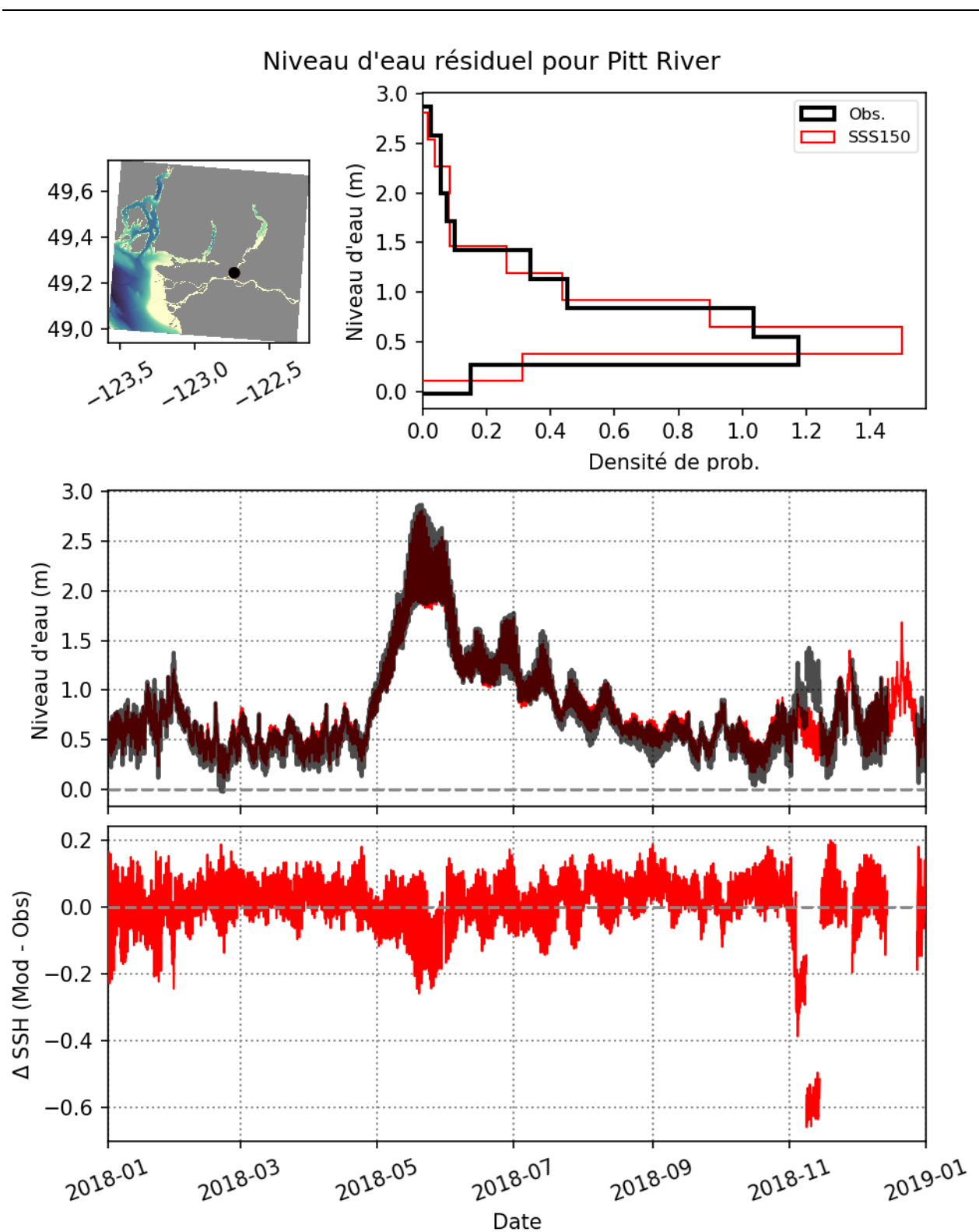


Figure 19. Comparaison des niveaux d'eau résiduels pour Pitt River en 2018.

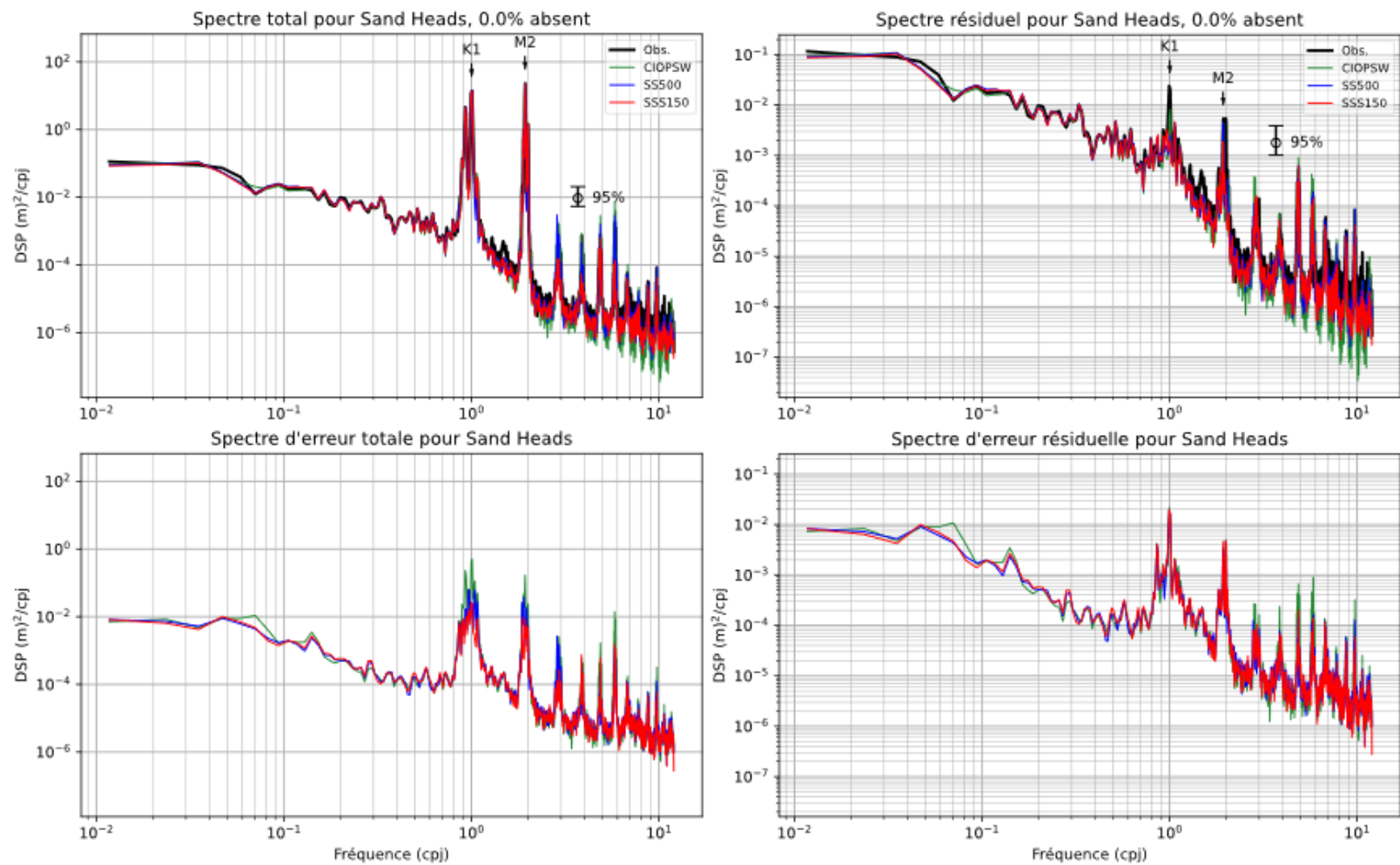


Figure 20. Spectres de puissance pour le niveau d'eau total et résiduel à Sand Heads en 2018.

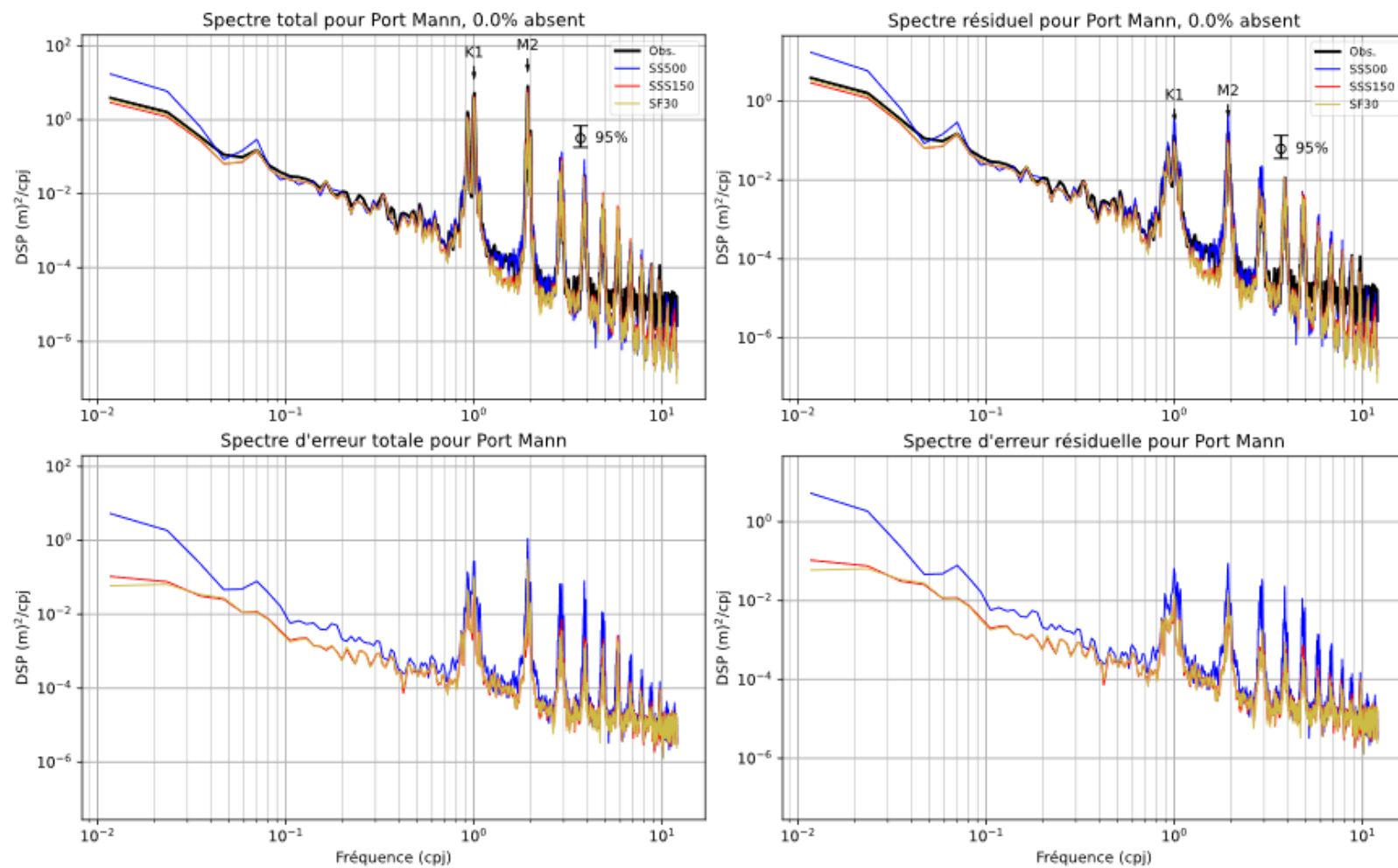


Figure 21. Spectres de puissance pour le niveau d'eau total et résiduel à Port Mann en 2018.

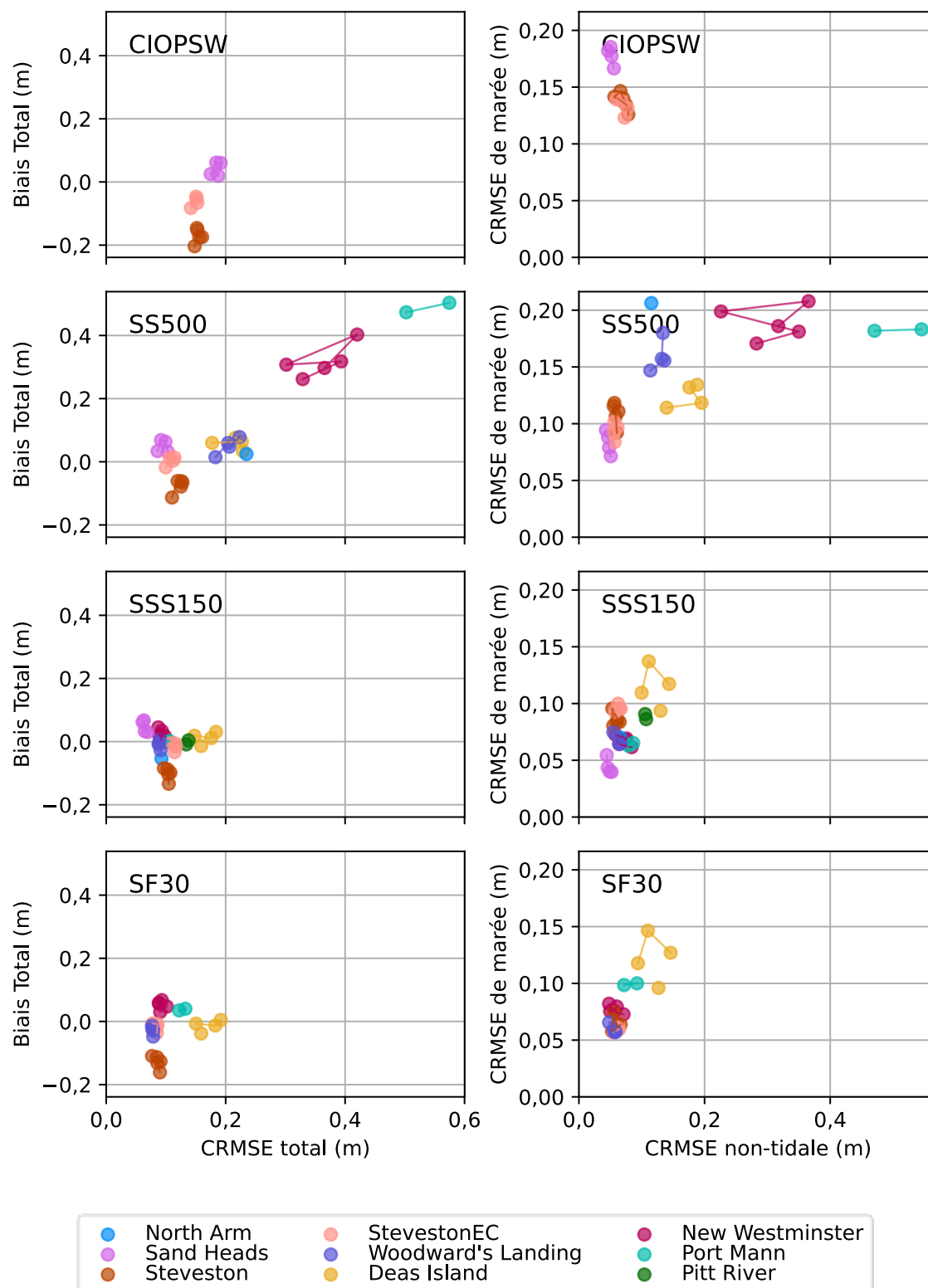


Figure 22. Variabilité des scores du niveau d'eau au fil des ans pour le SPCOG-O (CIOPSW), le SS500, le SSS150 et le SF30. Les marqueurs de même couleur indiquent les scores pour une seule station pour des années particulières. Les marqueurs d'années consécutives sont reliés par des lignes.

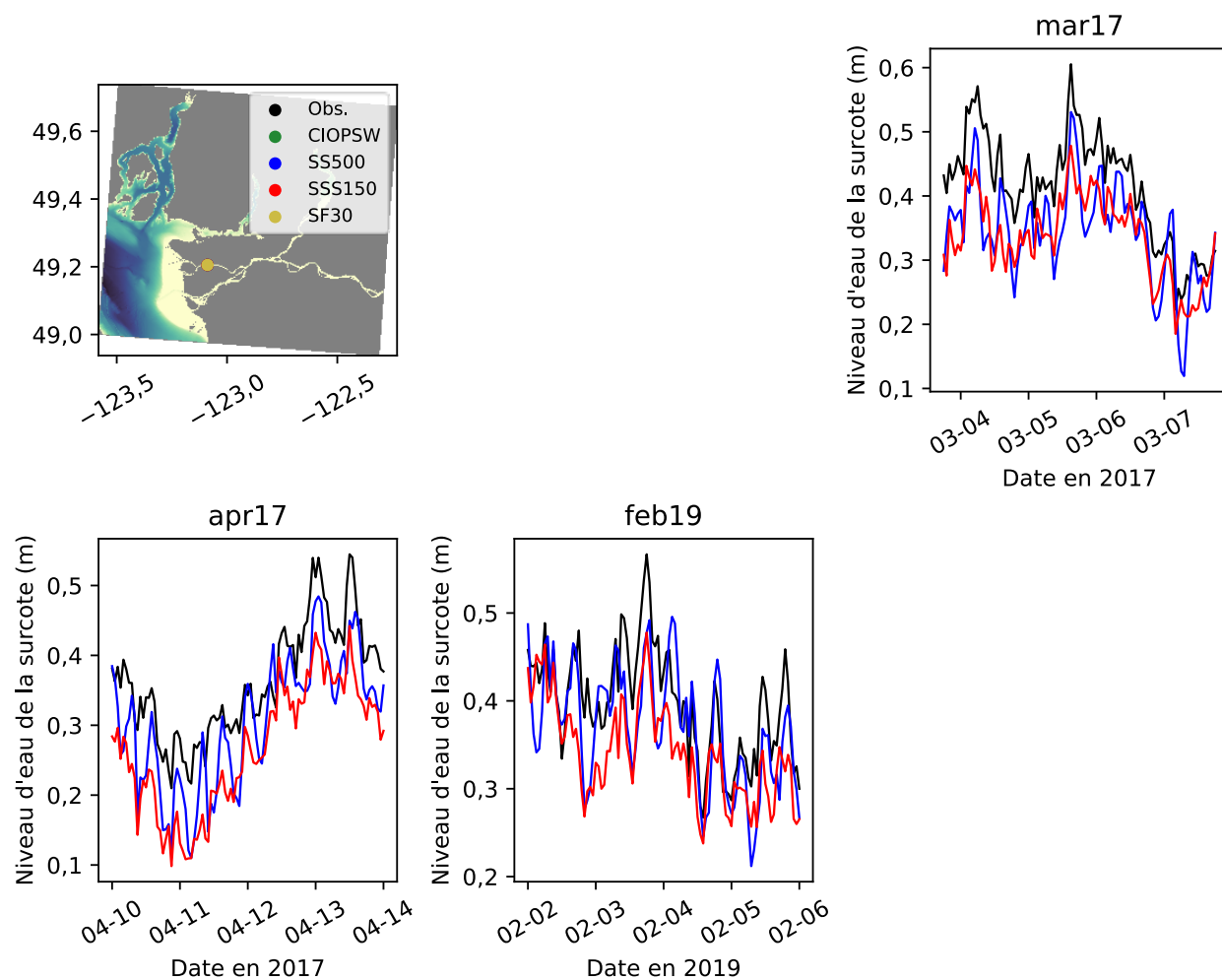


Figure 23. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 3 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de North Arm.

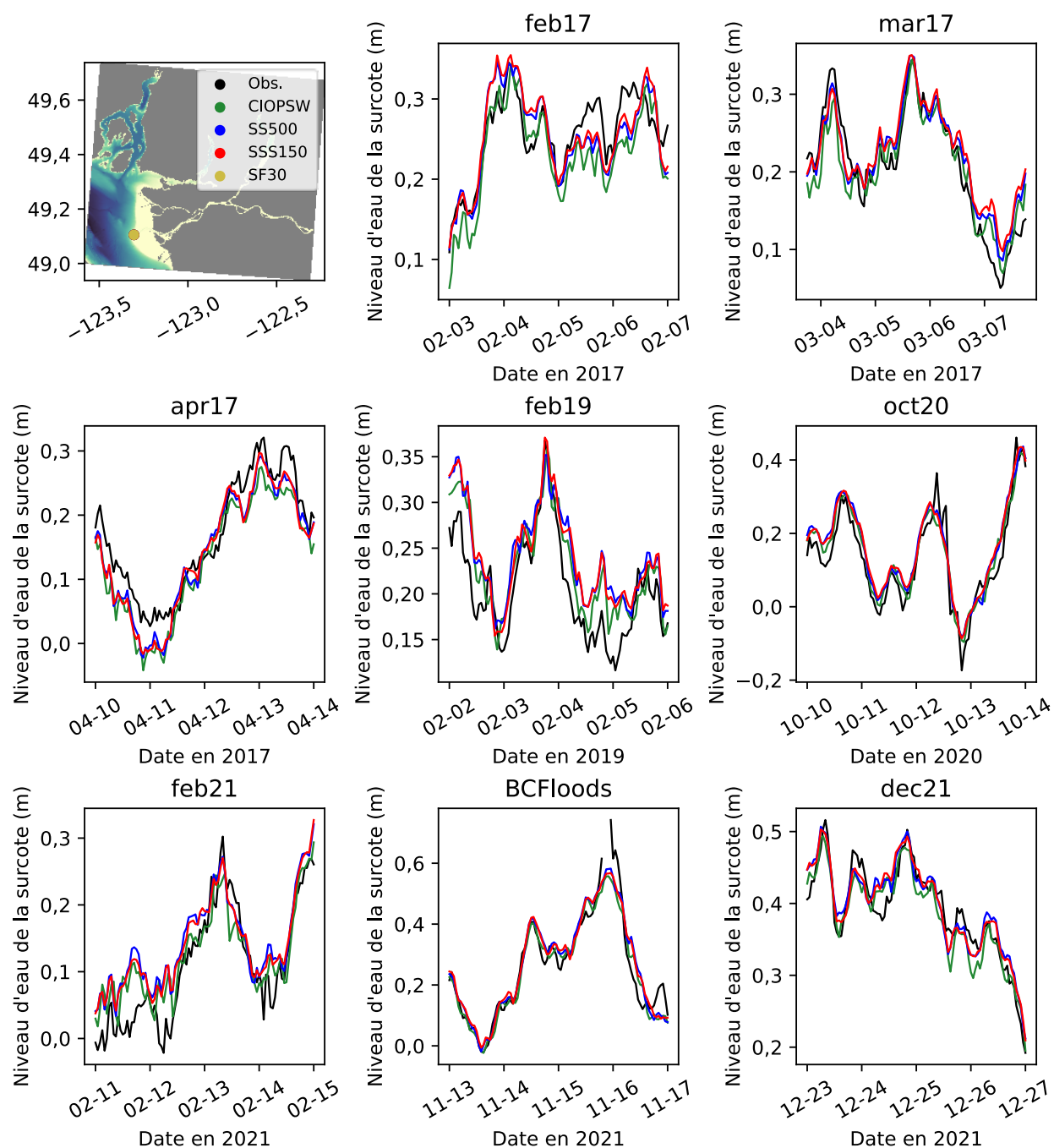


Figure 24. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 8 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de Sand Heads.

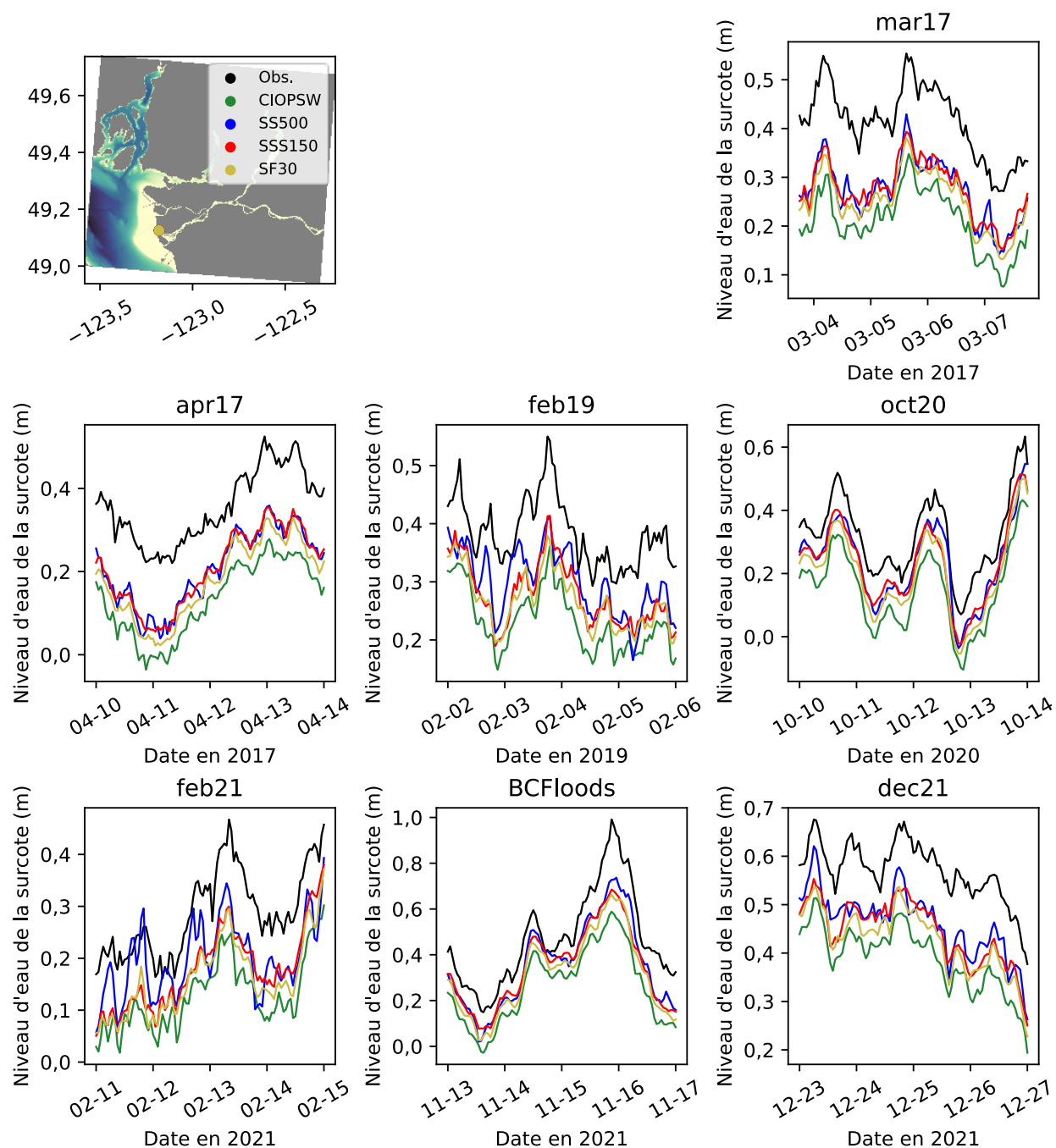


Figure 25. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 7 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de Steveston.

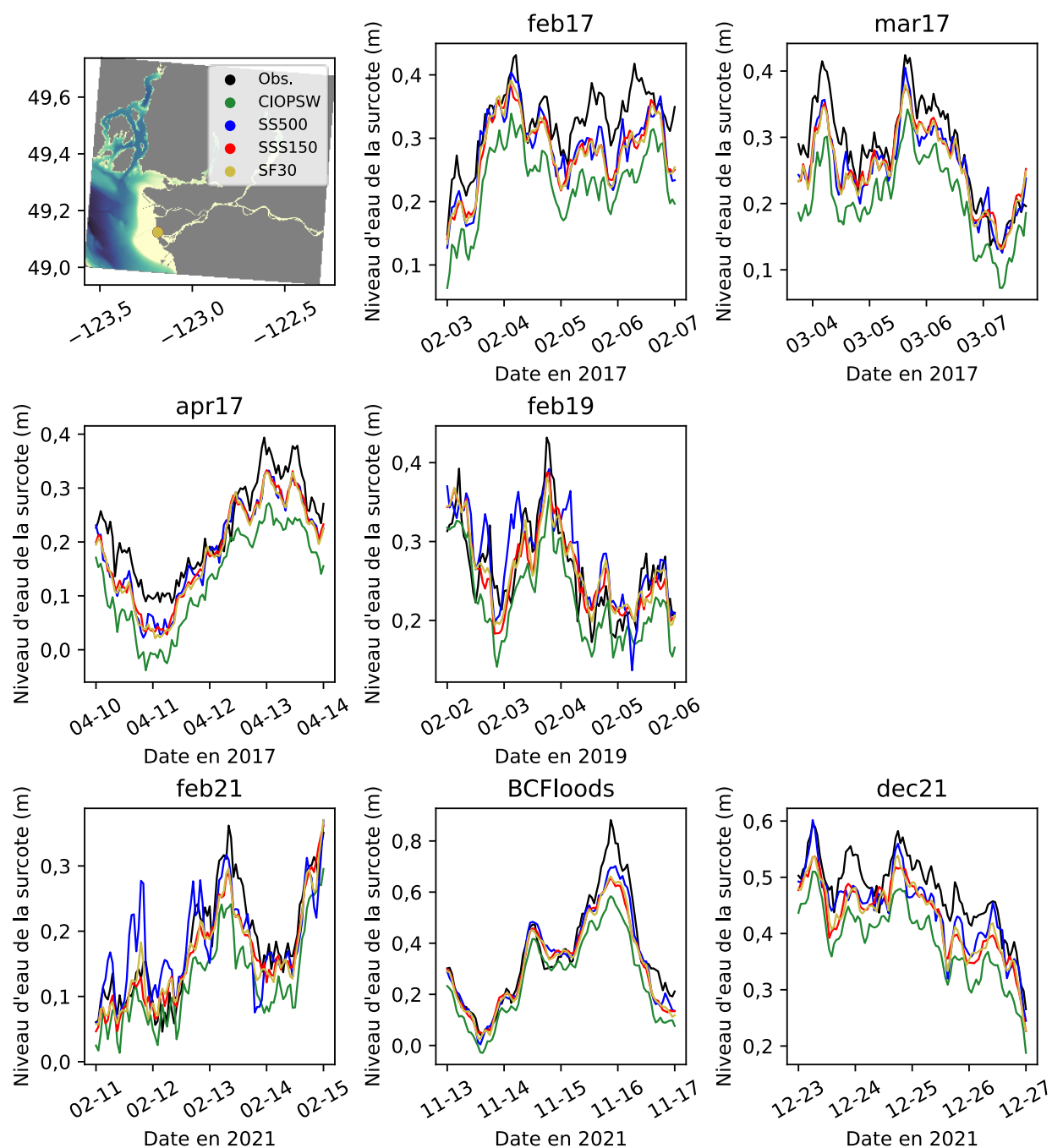


Figure 26. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 7 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de StevestonEC.

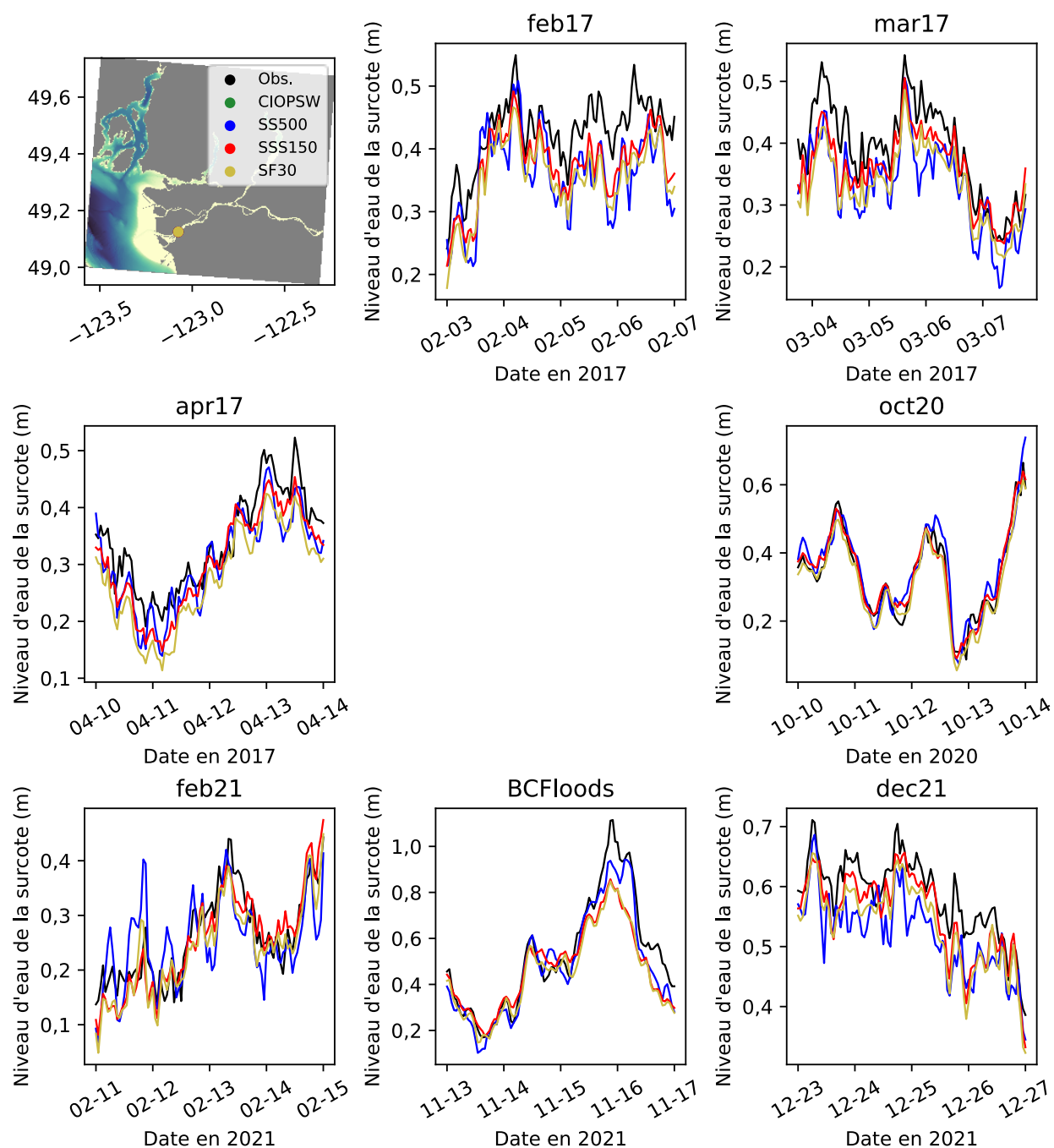


Figure 27. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 7 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de Woodward's Landing.

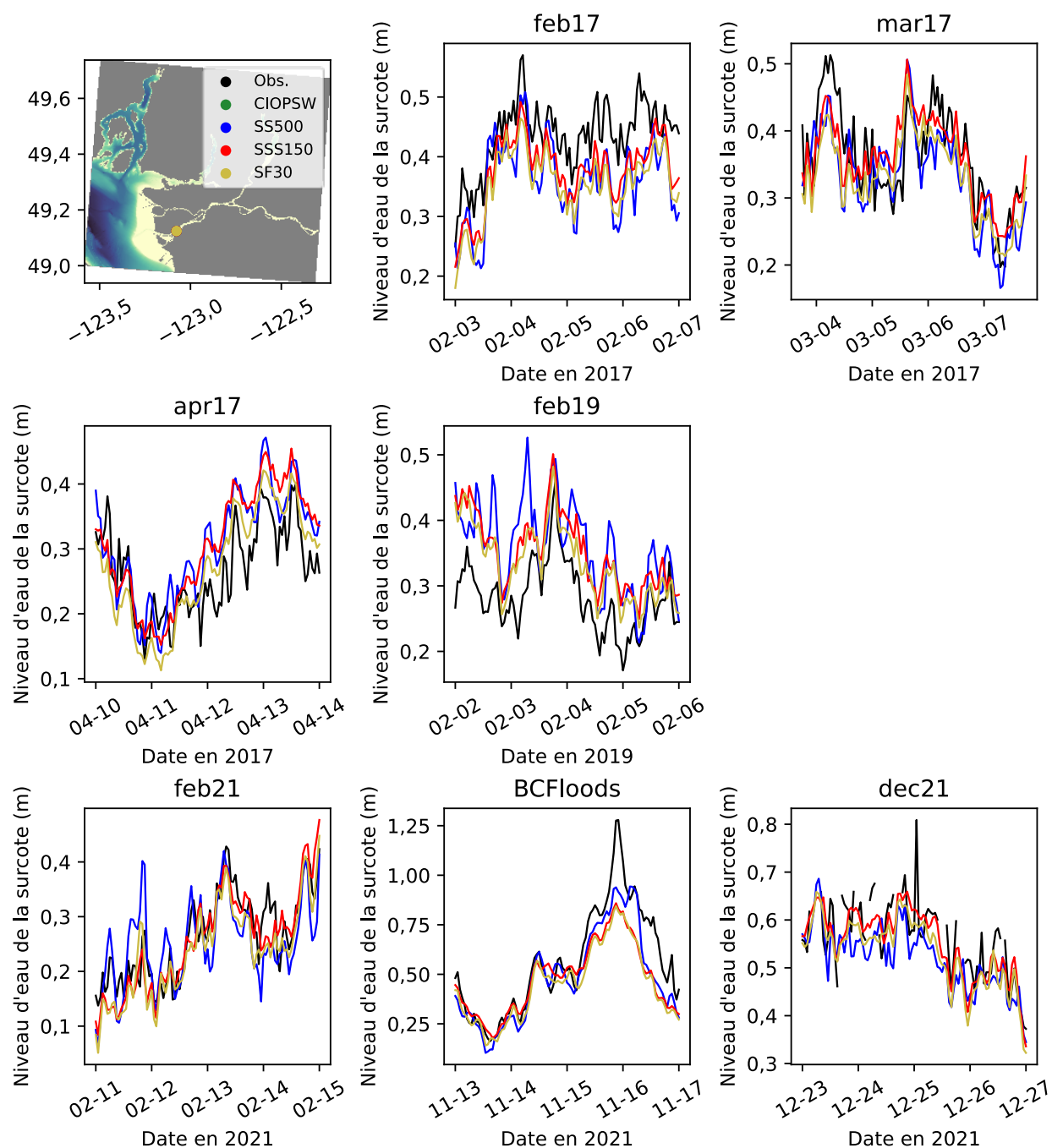


Figure 28. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 7 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de Deas Island.

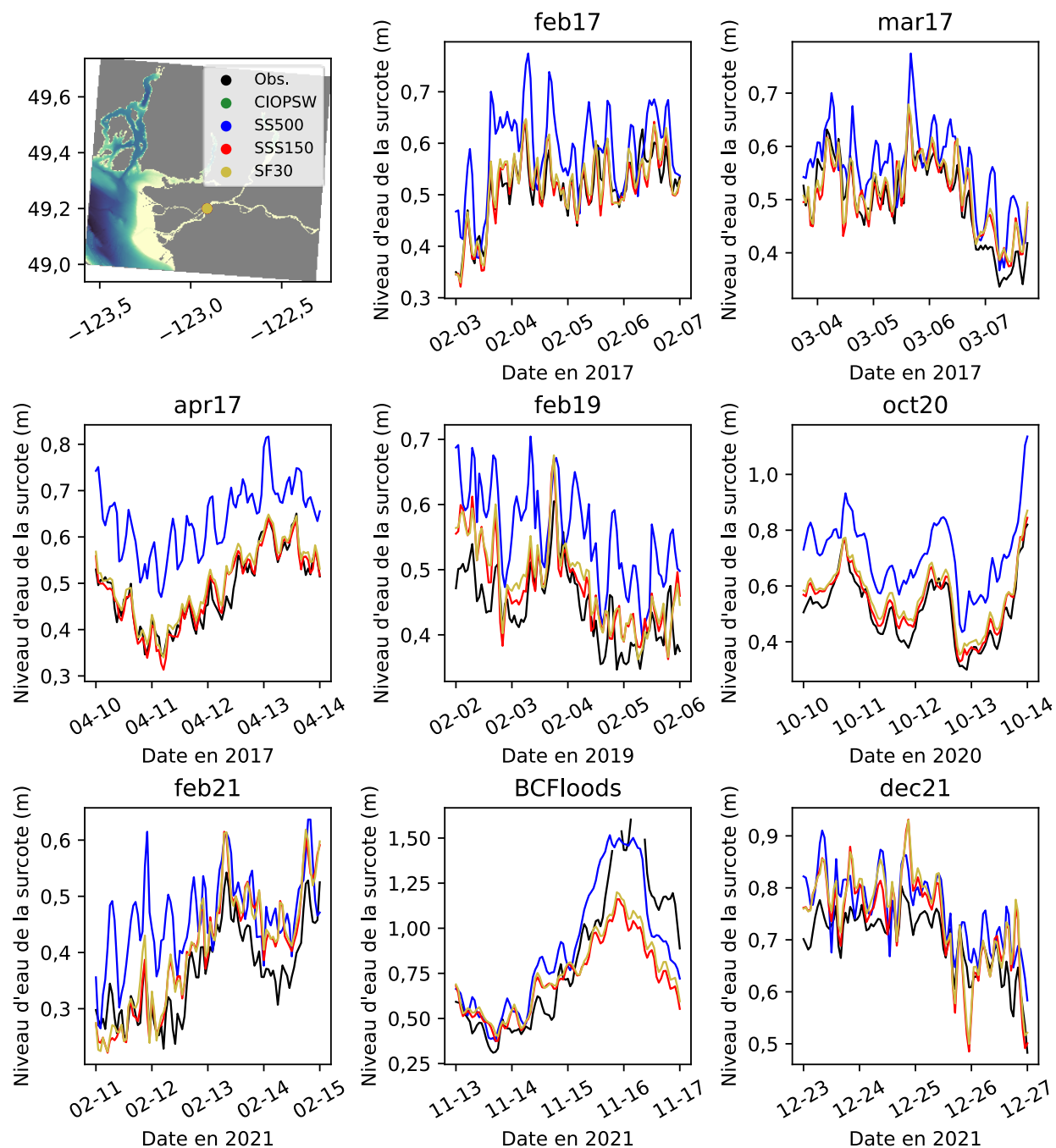


Figure 29. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 8 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de New Westminster.

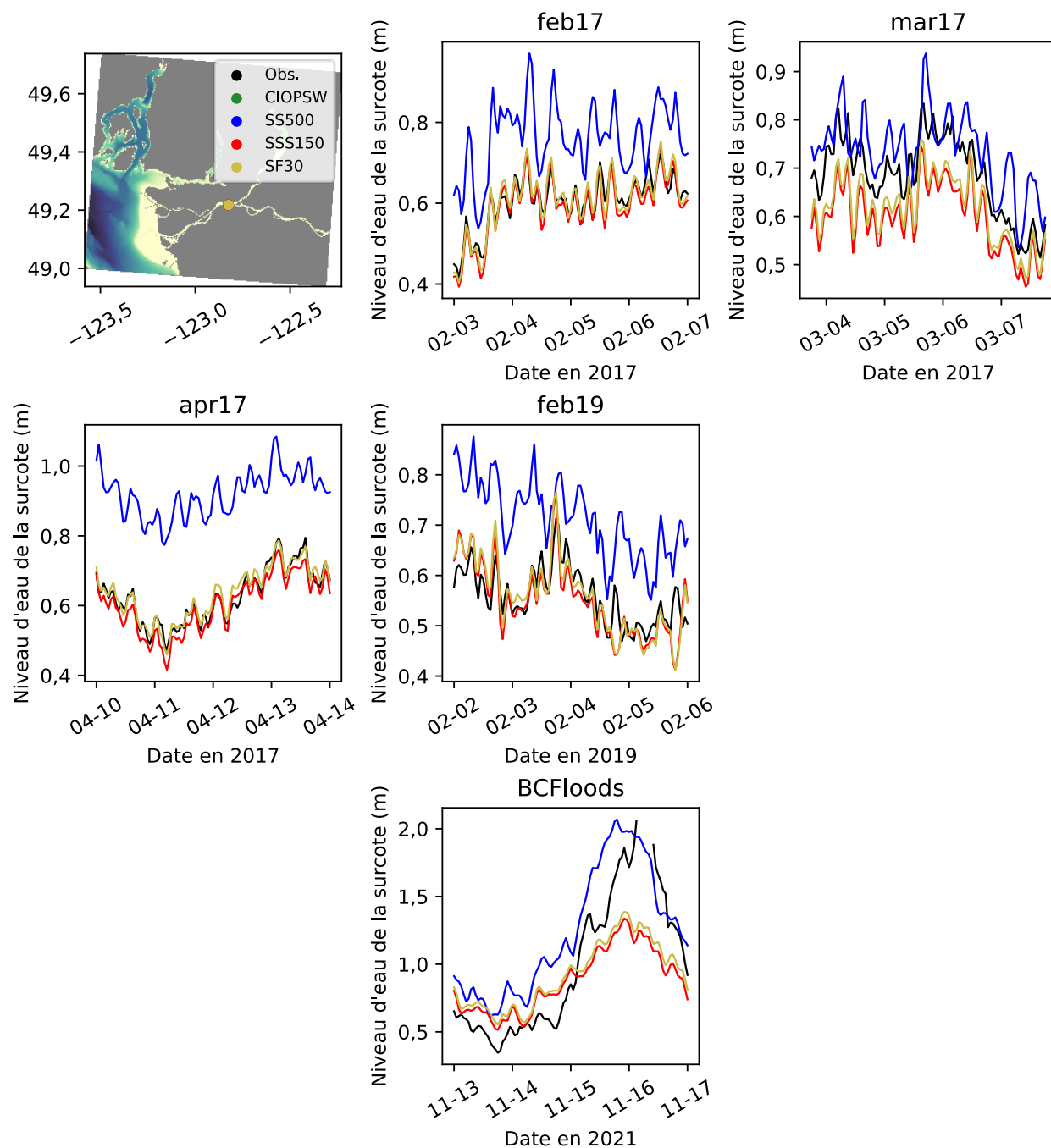


Figure 30. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 6 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de Port Mann.

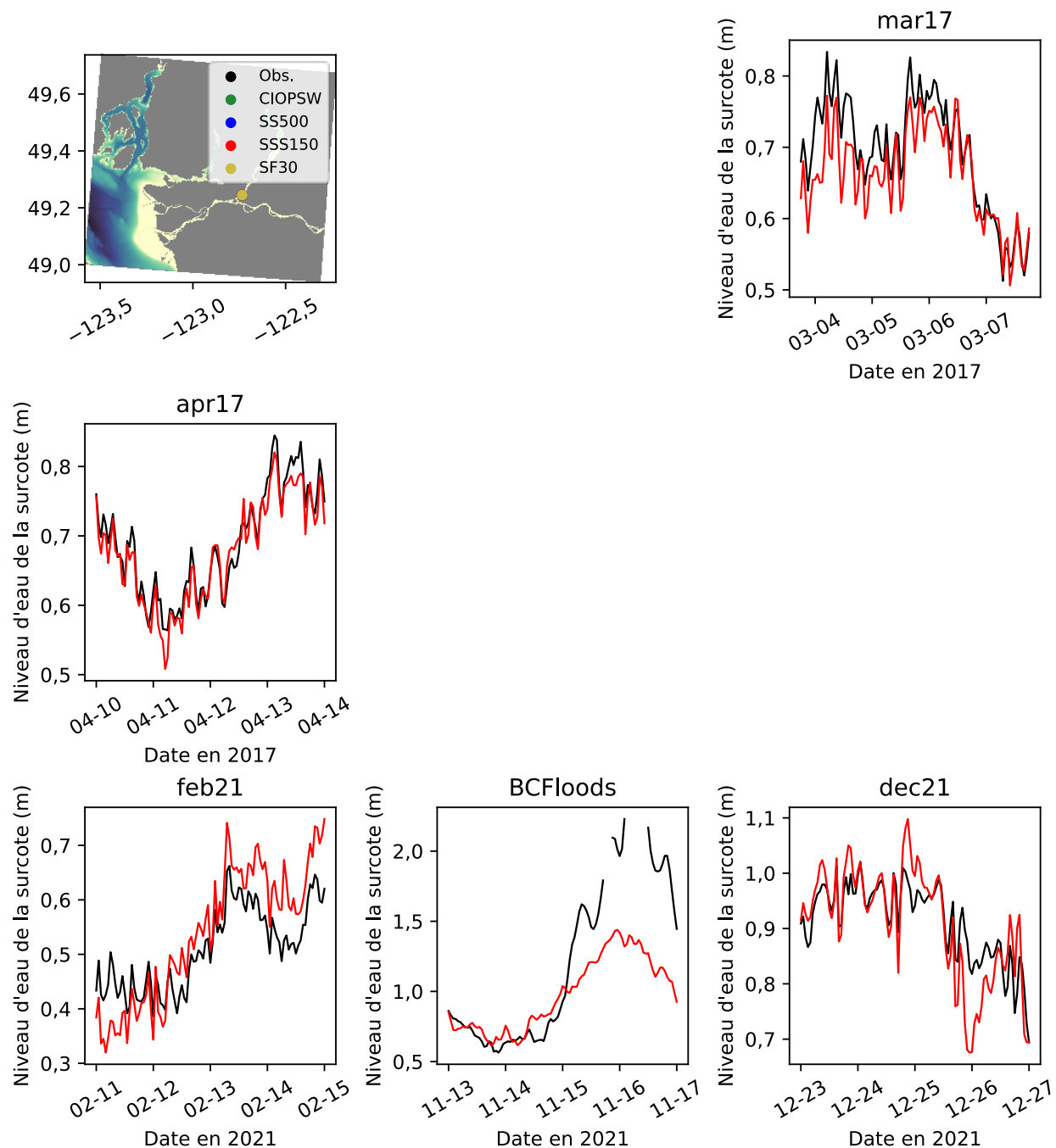


Figure 31. Niveau de la mer résiduel observé et modélisé au cours de 5 tempêtes distinctes enregistrées au marégraphe de Pitt River.

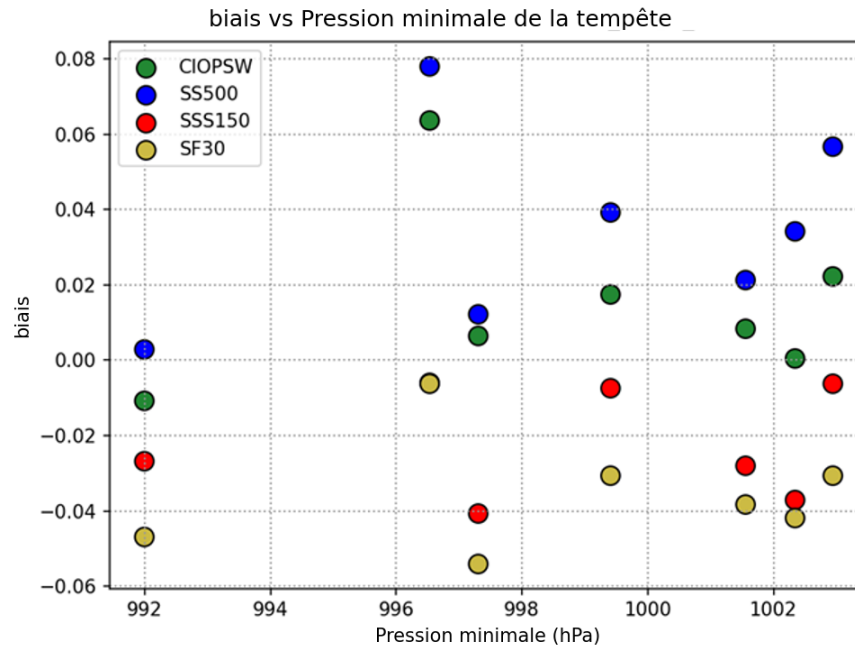


Figure 32. Distribution du biais pour le niveau de la mer résiduel modélisé et moyenné sur toutes les stations par rapport à la pression atmosphérique minimale enregistrée pour chacune des 7 tempêtes distinctes. La tempête BCFloods est omise en raison d'un manque de données sur la pression.

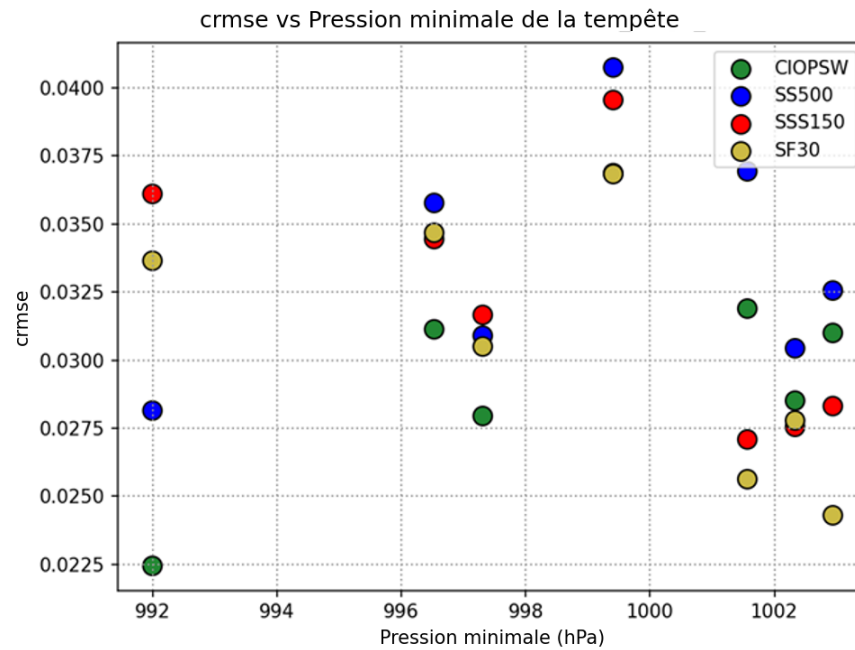
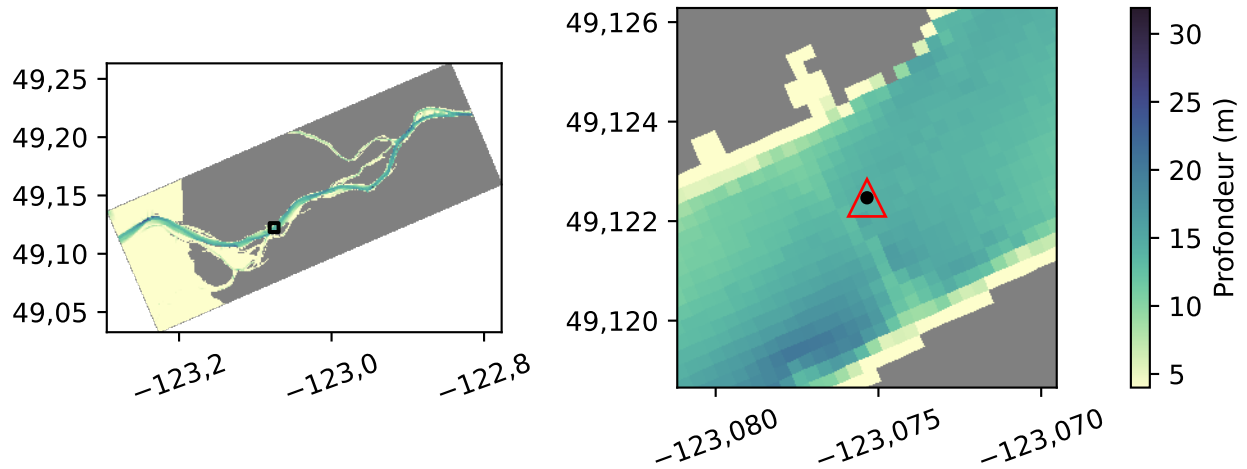
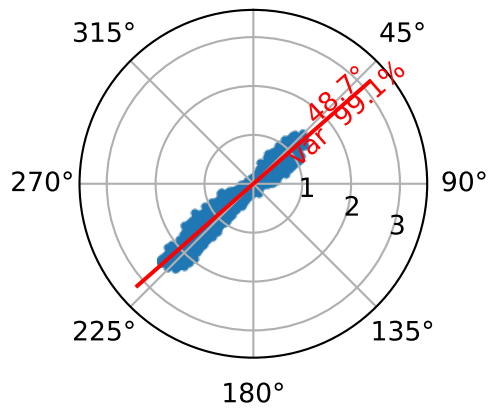


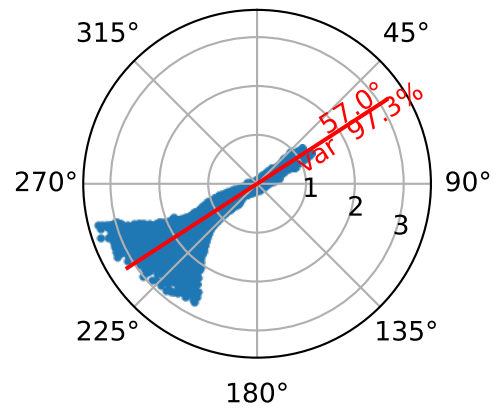
Figure 33. Identique à la Figure 32, mais pour la CRMSE.



Woodwards_Landing_iwls intervalle 0
0°



SSS150 intervalle 0
0°



SF30 intervalle 0
0°

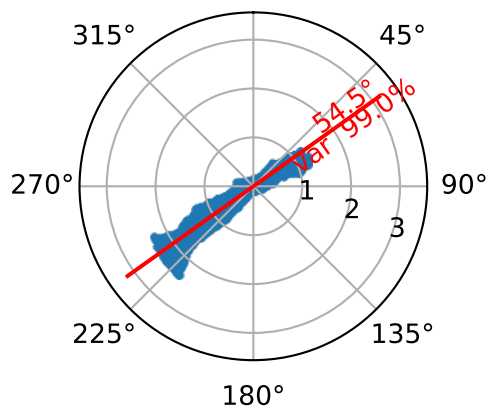


Figure 34. Emplacement des observations de l'ADCP horizontal à Woodward's Landing et diagrammes de rose de courant avec indication de l'axe principal de variance pour les données ADCP et pour les modèles SSS150 et SF30. Les orbites circulaires sur les roses indiquent la vitesse du courant en m/s.

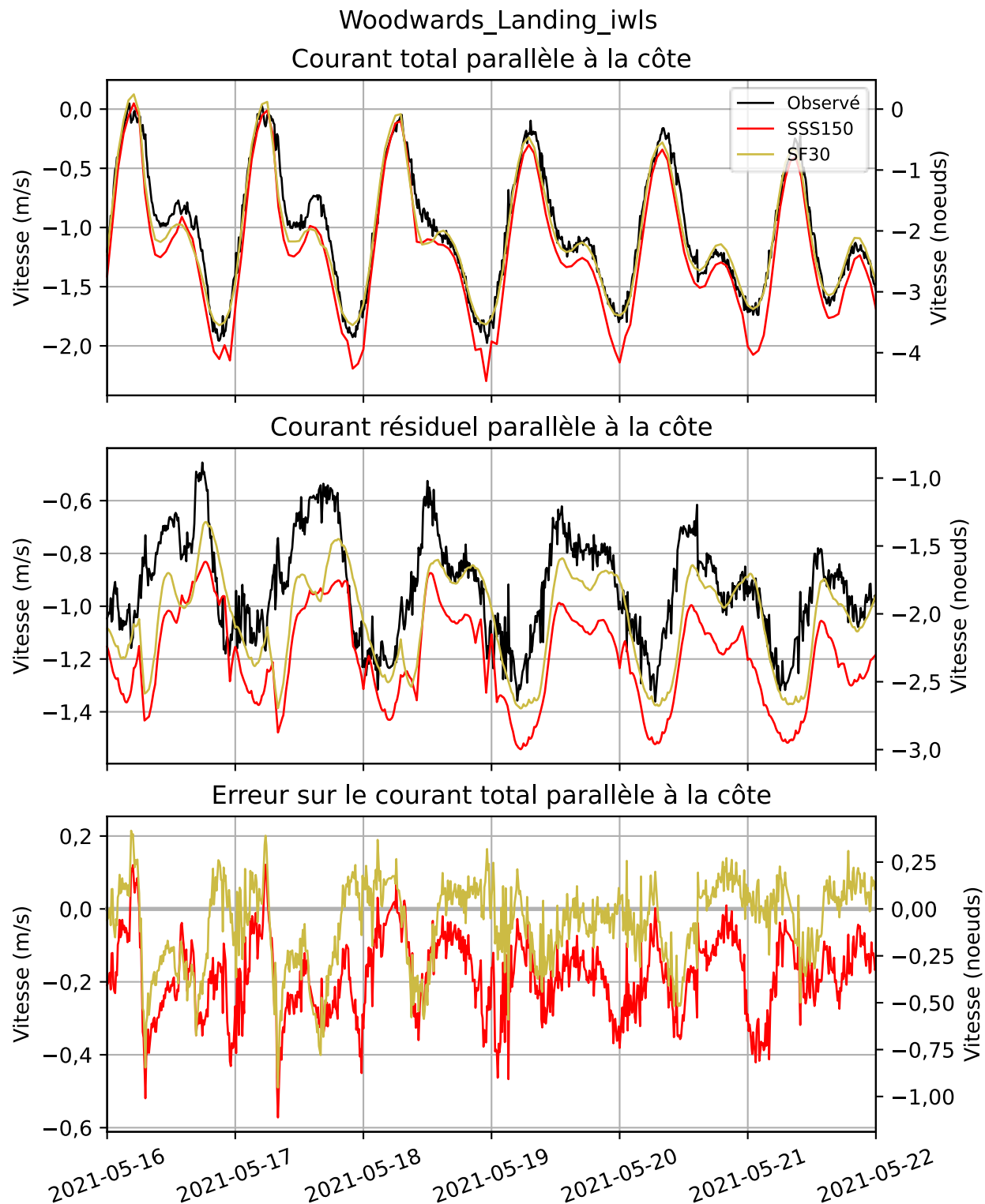


Figure 35. Courant le long du rivage observé et modélisé (extrait sur 6 jours) selon les données de l'ADCP horizontal à Woodward's Landing.

Courants Résiduels pour FraserRiverDeltaLowerSlope 141m à 58.48 m

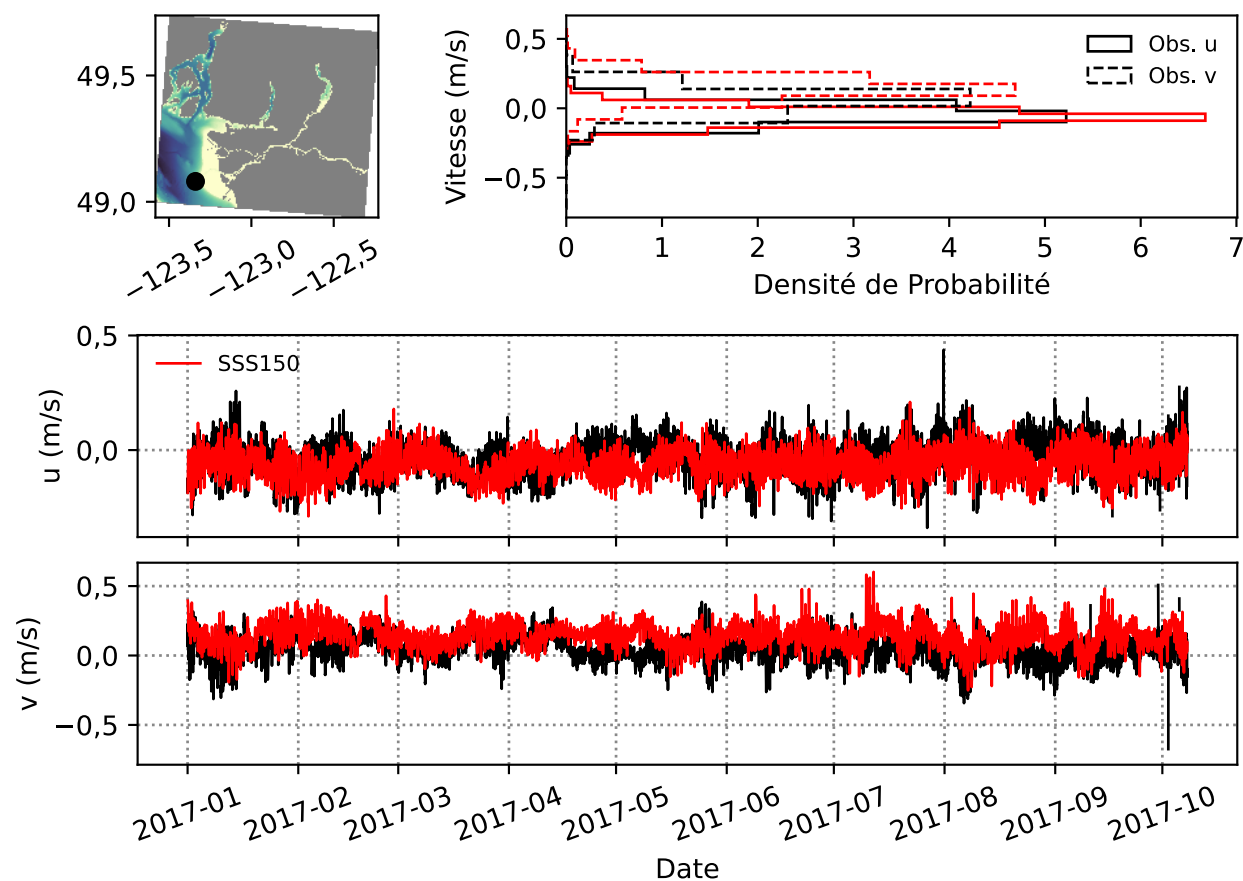


Figure 36. Courant résiduel provenant de l'ADCP de la station FRDLS à une profondeur de 58,5 m pour les composantes orientées vers l'est (u) et vers le nord (v).

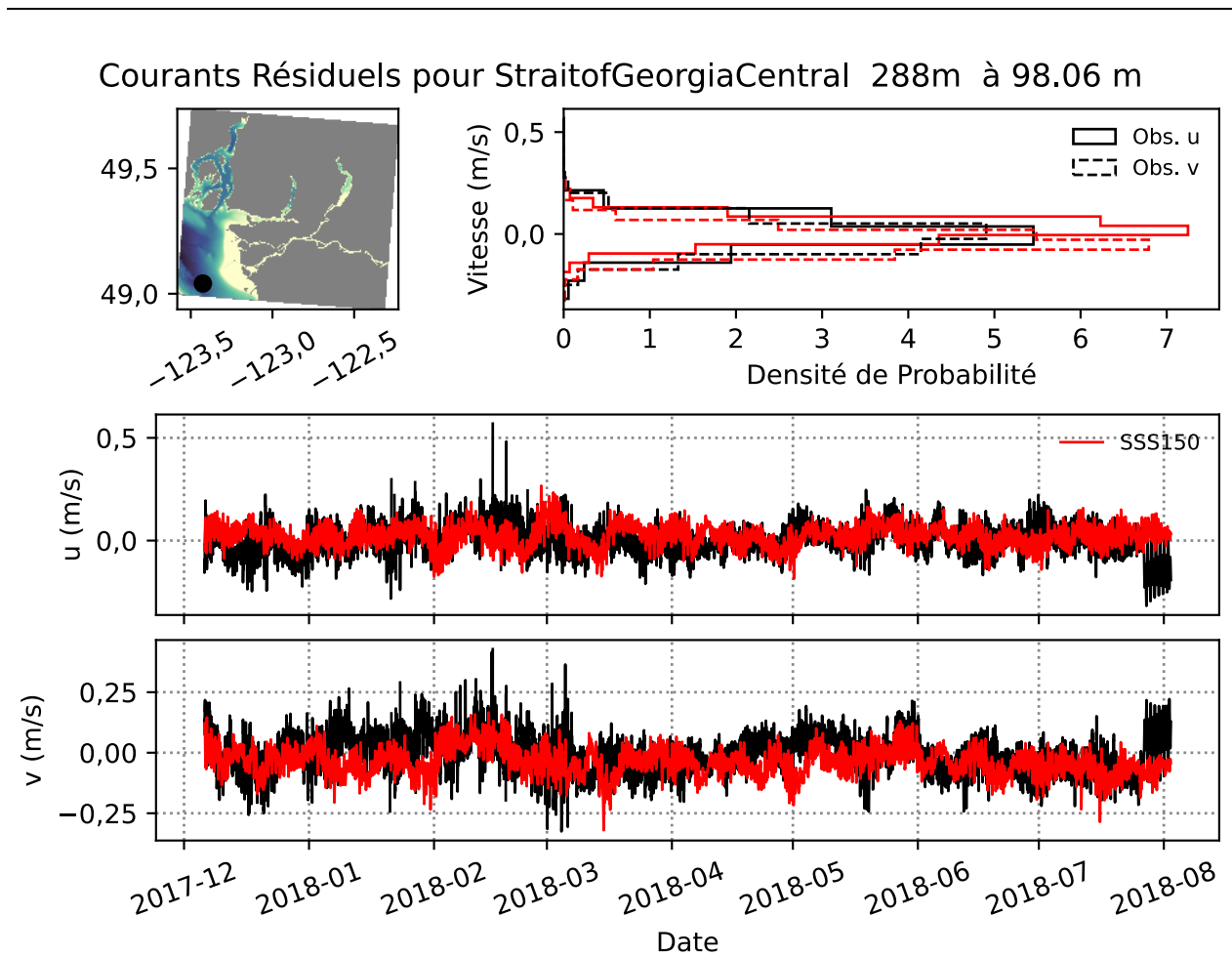


Figure 37. Courant résiduel provenant de l'ADCP de la station centrale du détroit de Géorgie à une profondeur de 98,06 m pour les composantes orientées vers l'est (u) et vers le nord (v).

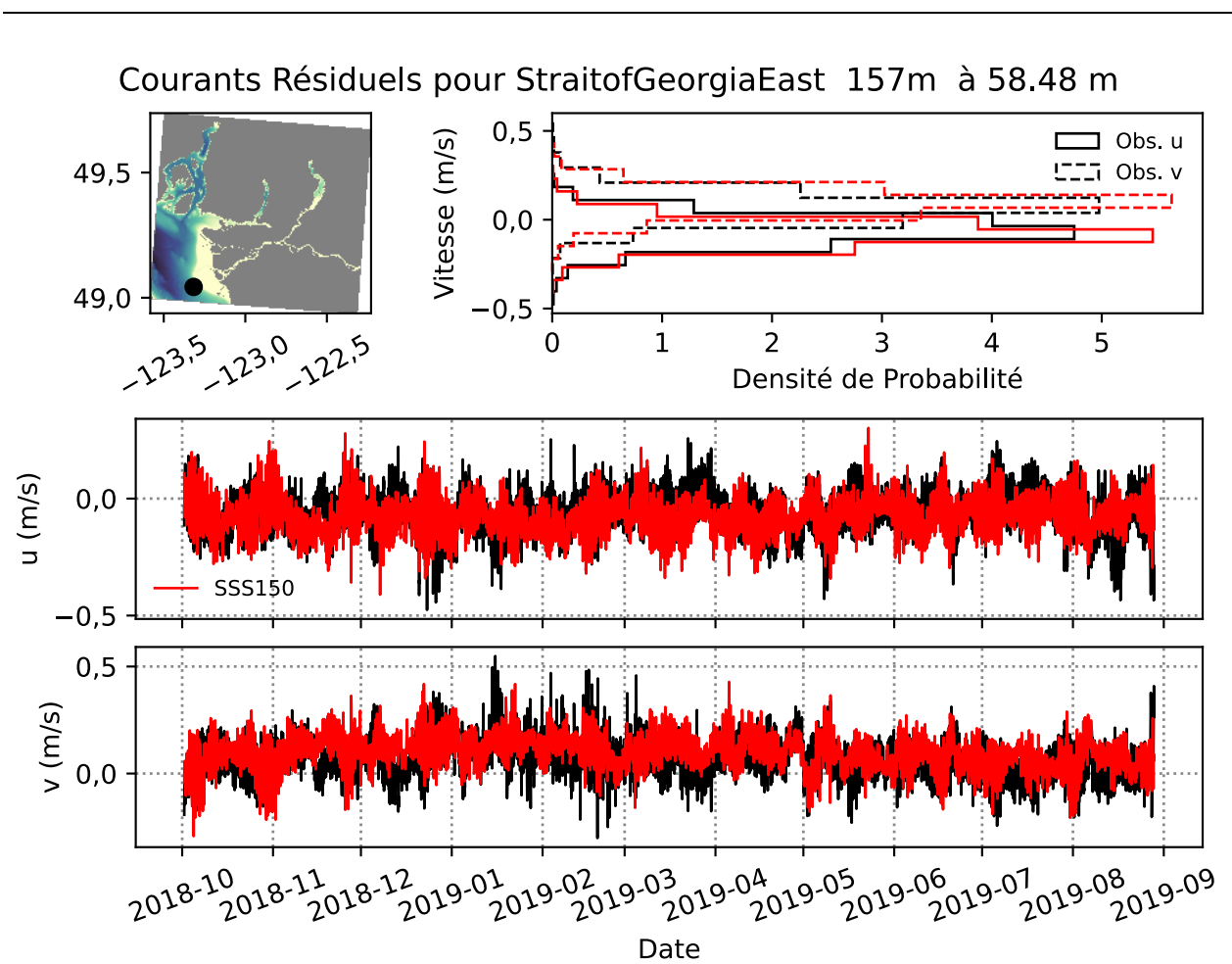


Figure 38. Courant résiduel provenant de l'ADCP de la station est du détroit de Géorgie à une profondeur de 58,48 m pour les composantes orientées vers l'est (u) et vers le nord (v).

Moyennes verticales et corrélations pour FraserRiverDeltaLowerSlope 141m

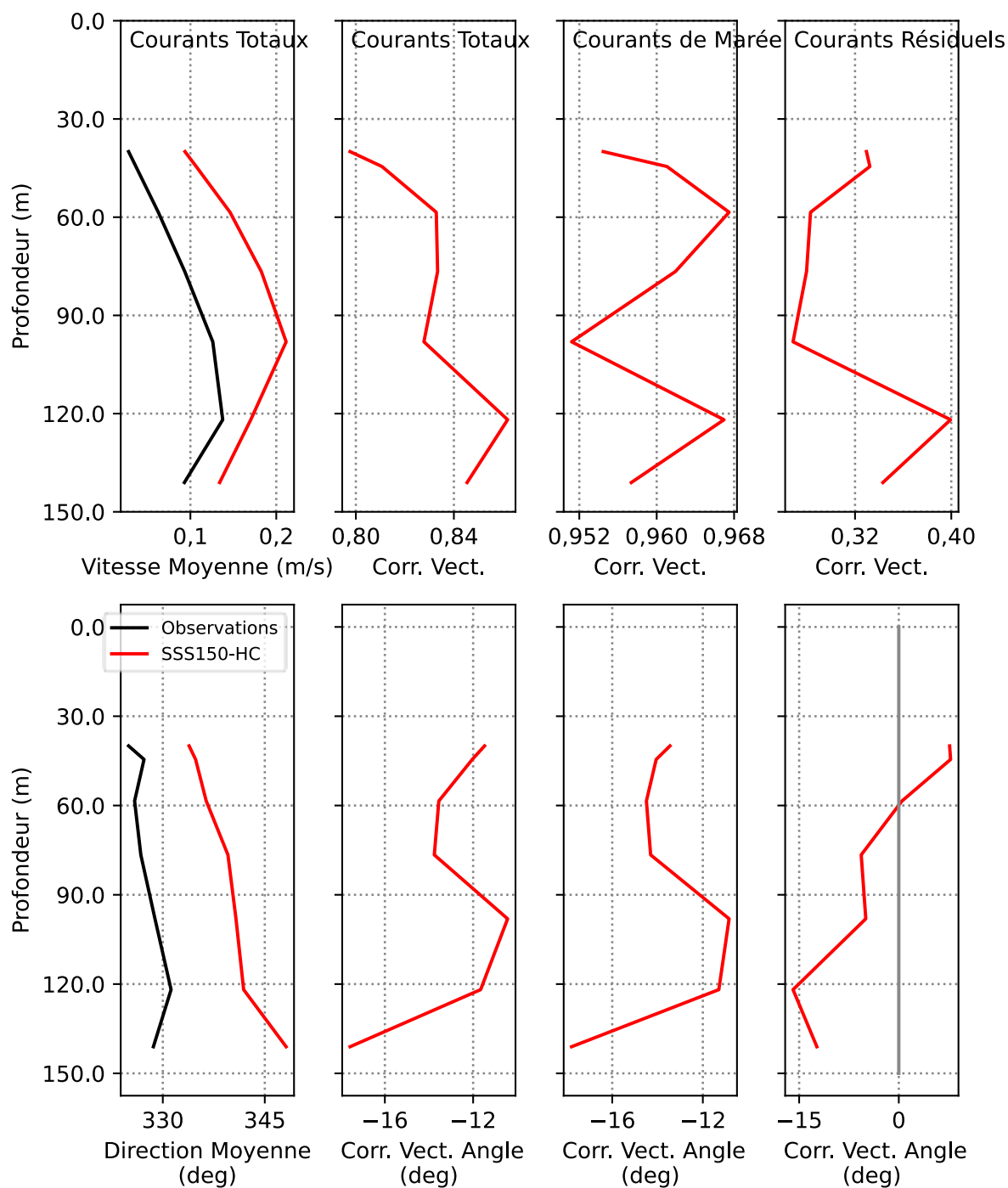


Figure 39. Vitesse et direction des courants moyens (première colonne) et corrélations vectorielles associées pour les courants totaux (deuxième colonne), de marée (troisième colonne) et résiduels (quatrième colonne) pour le déploiement de l'ADCP à la station FRDLS. La direction moyenne est mesurée dans le sens horaire à partir du nord.

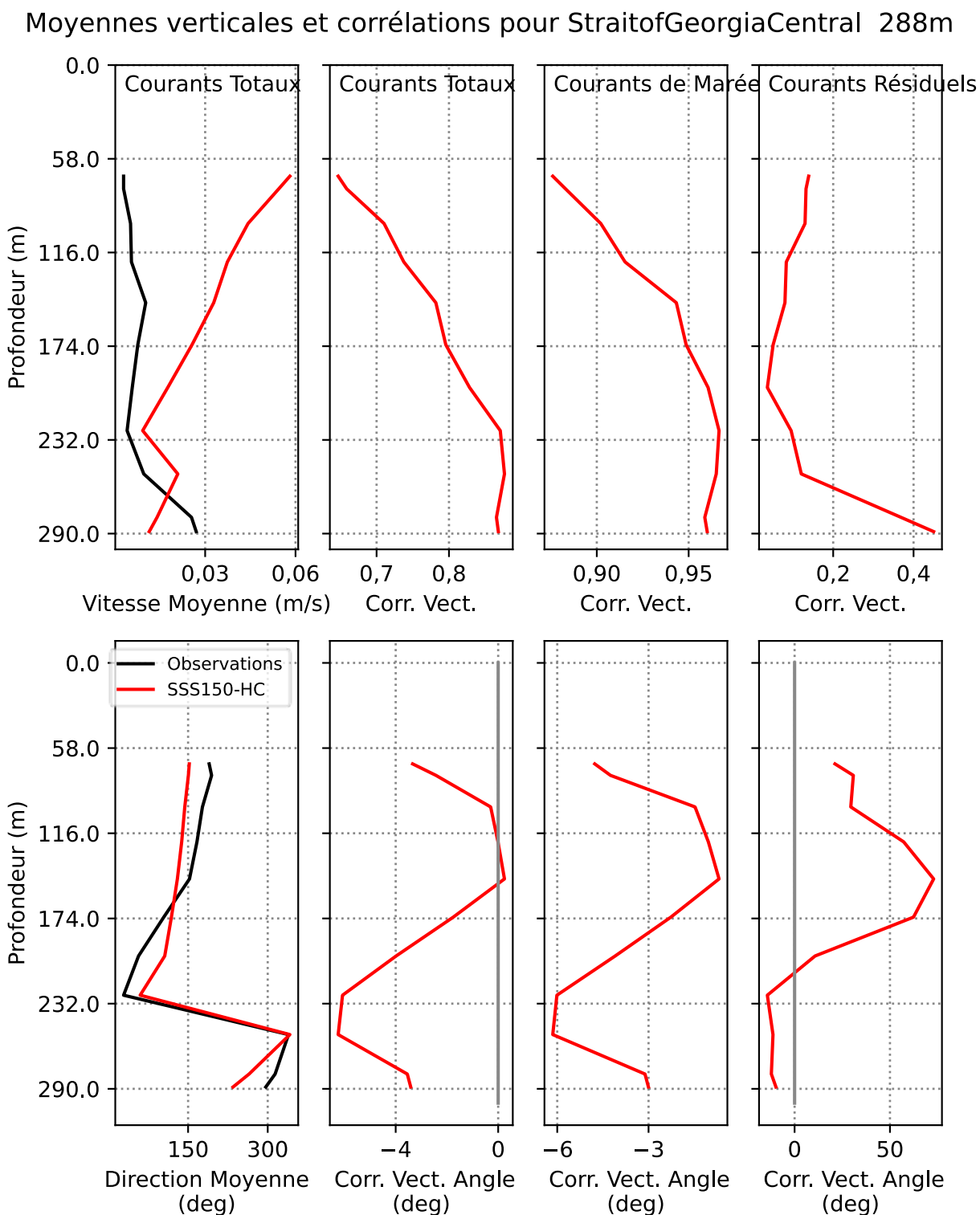


Figure 40. Vitesse et direction des courants moyens (première colonne) et corrélations vectorielles associées pour les courants totaux (deuxième colonne), de marée (troisième colonne) et résiduels (quatrième colonne) pour le déploiement de l'ADCP à la station centrale du détroit de Géorgie. La direction moyenne est mesurée dans le sens horaire à partir du nord.

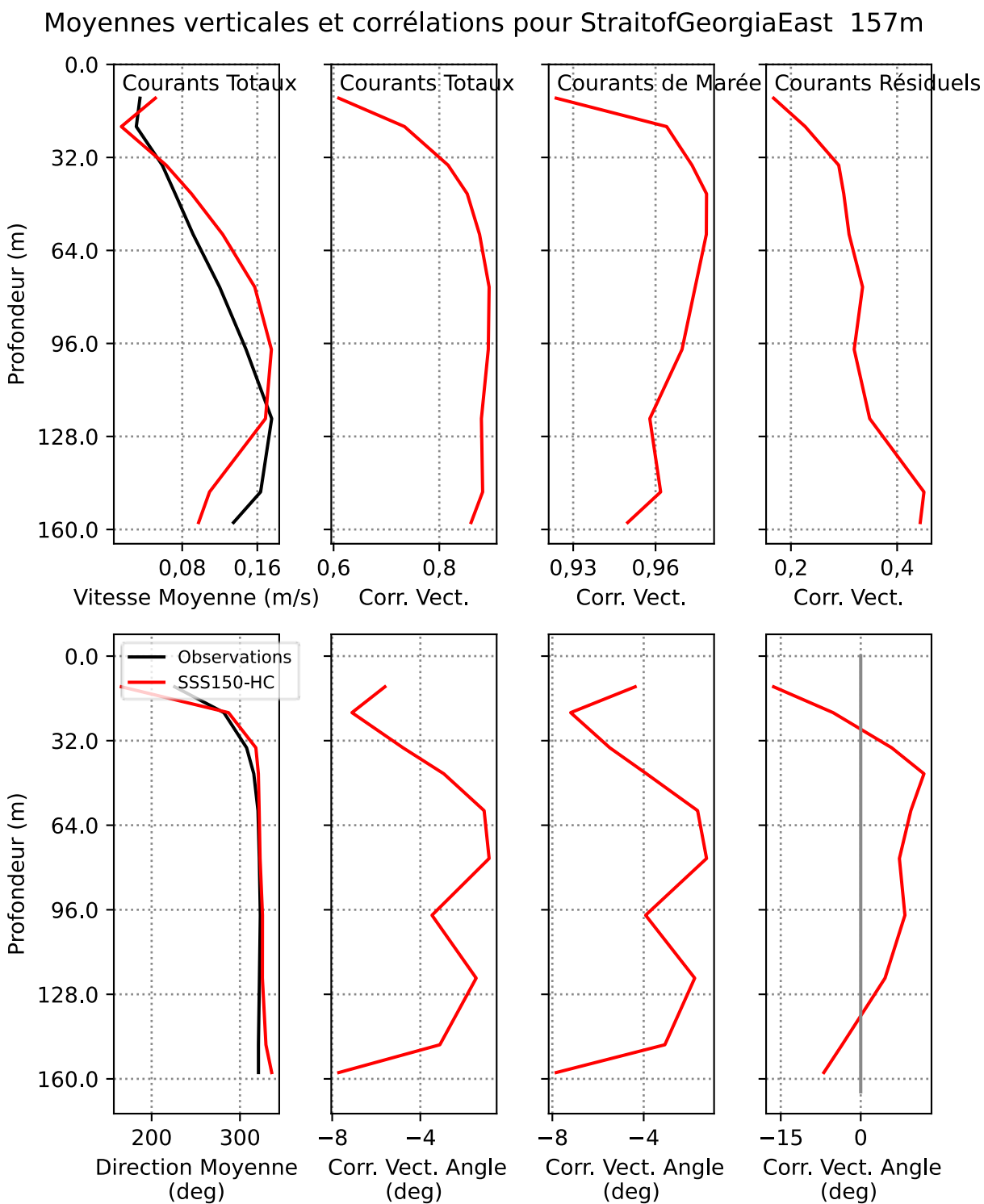


Figure 41. Vitesse et direction des courants moyens (première colonne) et corrélations vectorielles associées pour les courants totaux (deuxième colonne), de marée (troisième colonne) et résiduels (quatrième colonne) pour le déploiement de l'ADCP à la station est du détroit de Géorgie. La direction moyenne est mesurée dans le sens horaire à partir du nord.

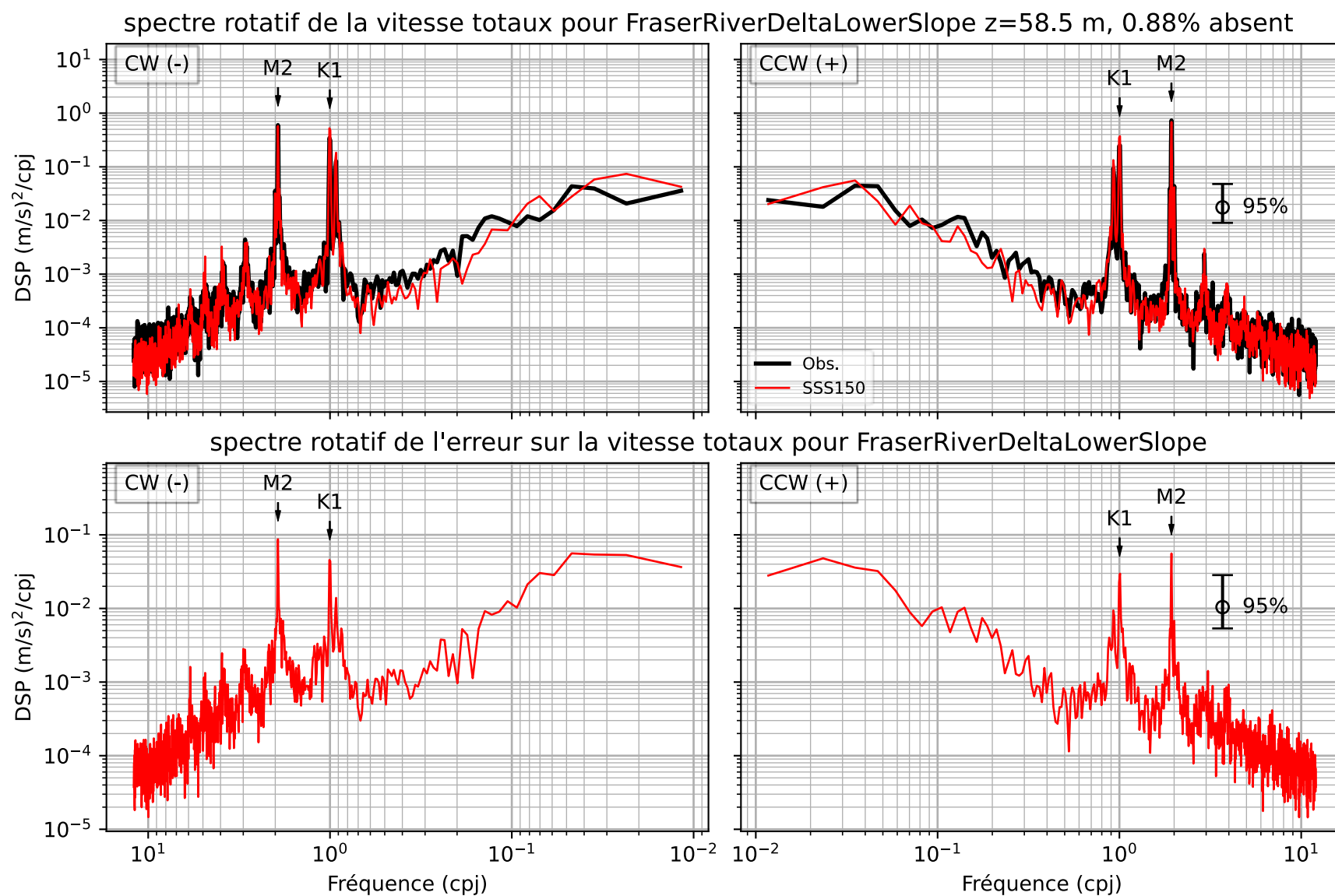


Figure 42. Spectres rotatifs pour le courant total provenant de l'ADCP de la station FRDLS à une profondeur de 58,5 m.

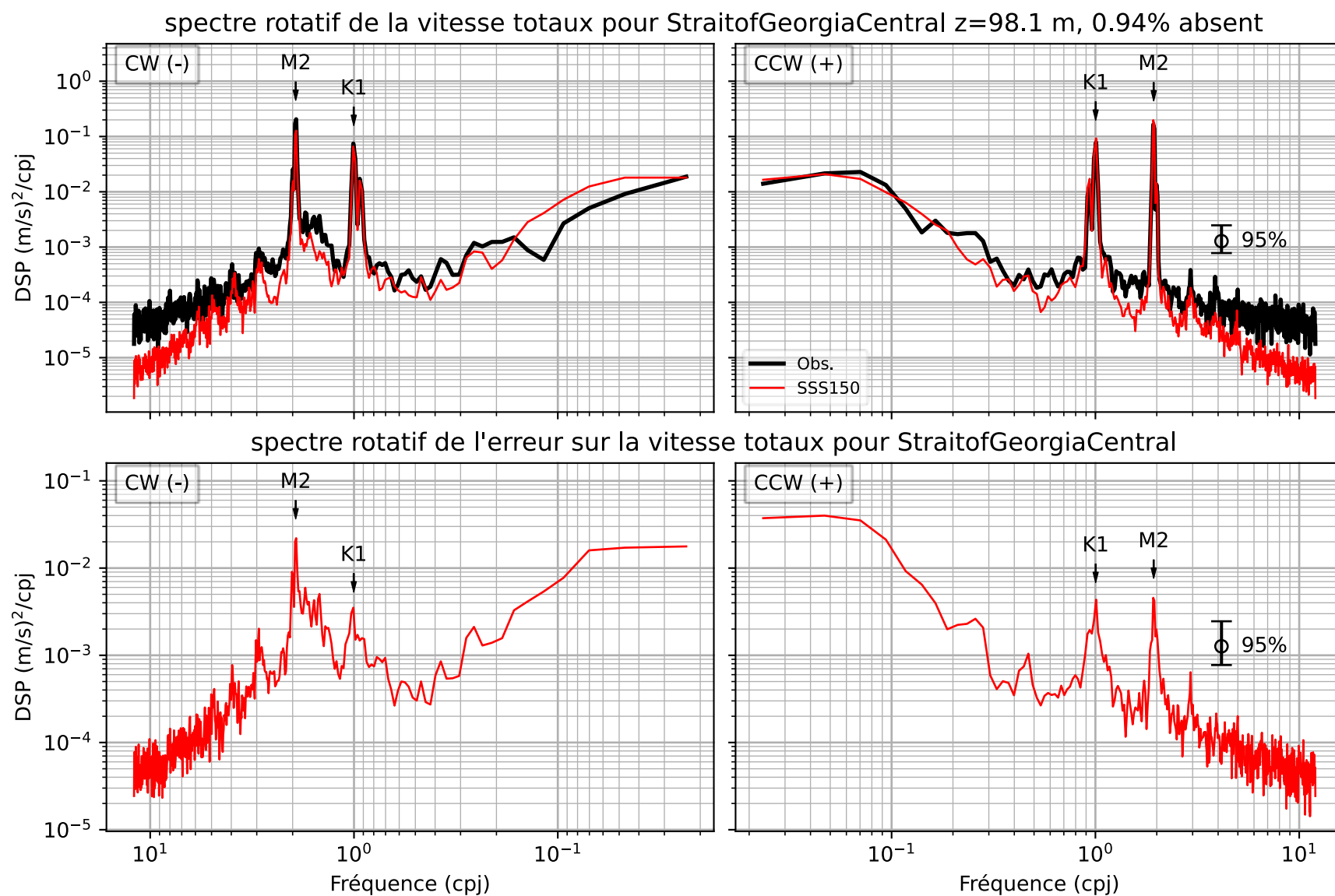


Figure 43. Spectres rotatifs pour le courant total provenant de l'ADCP de la station centrale du détroit de Géorgie à une profondeur de 98,1 m.

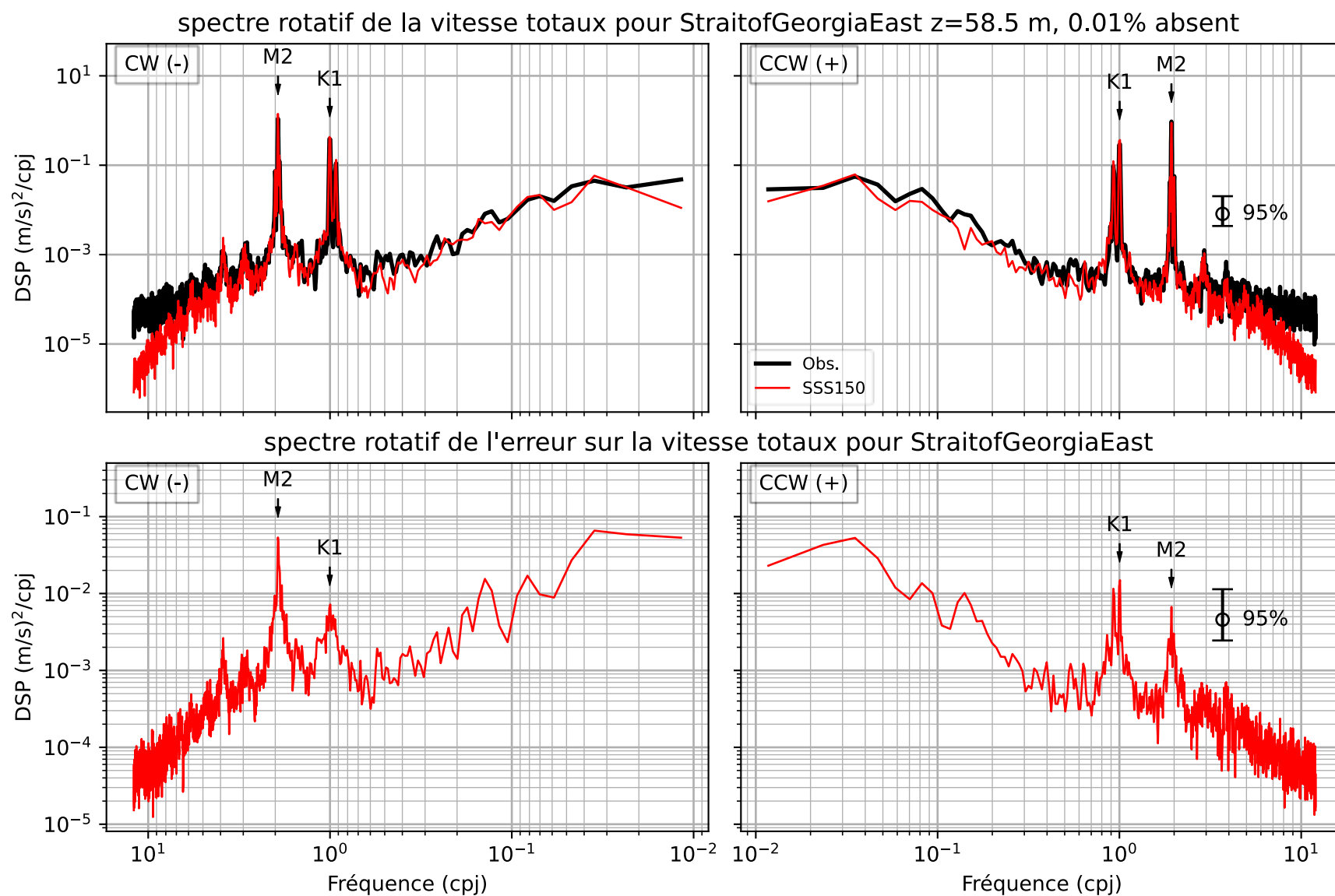


Figure 44. Spectres rotatifs pour le courant total provenant de l'ADCP de la station est du détroit de Géorgie à une profondeur de 15,6 m.

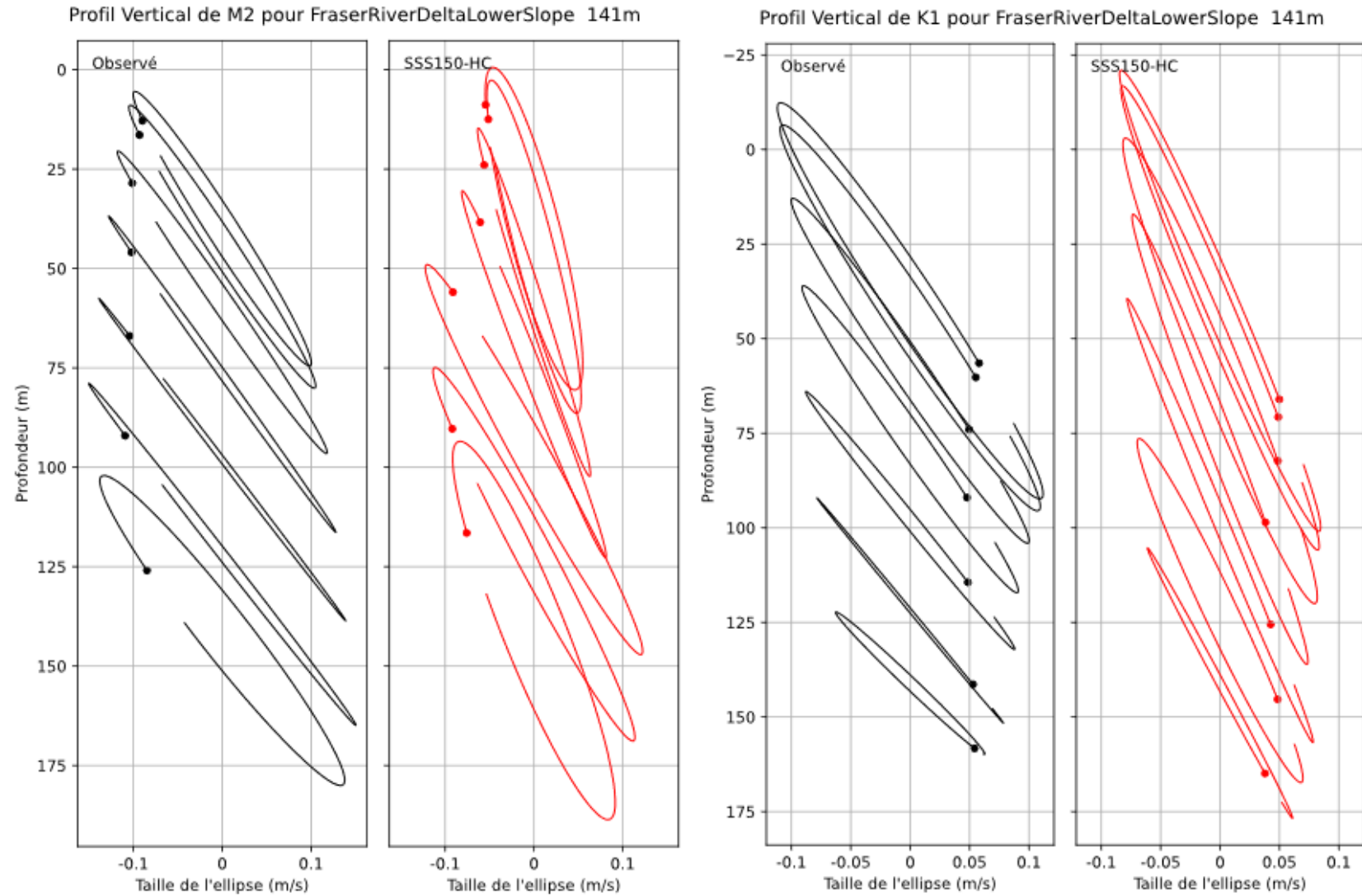


Figure 45. Ellipses de courant pour les composantes de marée M2 (gauche) et K1 (droite) provenant de l'ADCP de la station FRDLS.

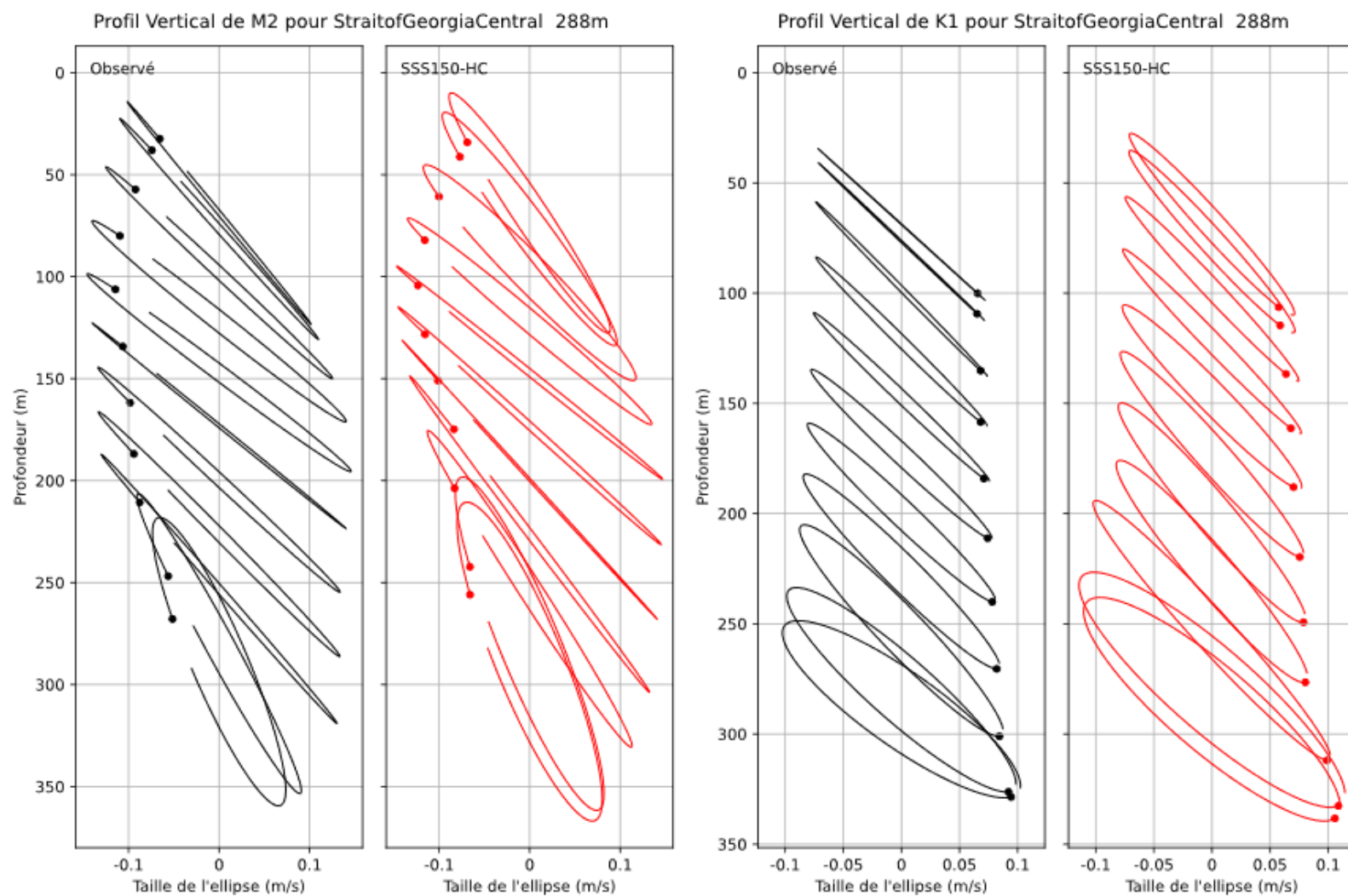


Figure 46. Ellipses de courant pour les composantes de marée M2 (gauche) et K1 (droite) provenant de l'ADCP de la station centrale du détroit de Géorgie.

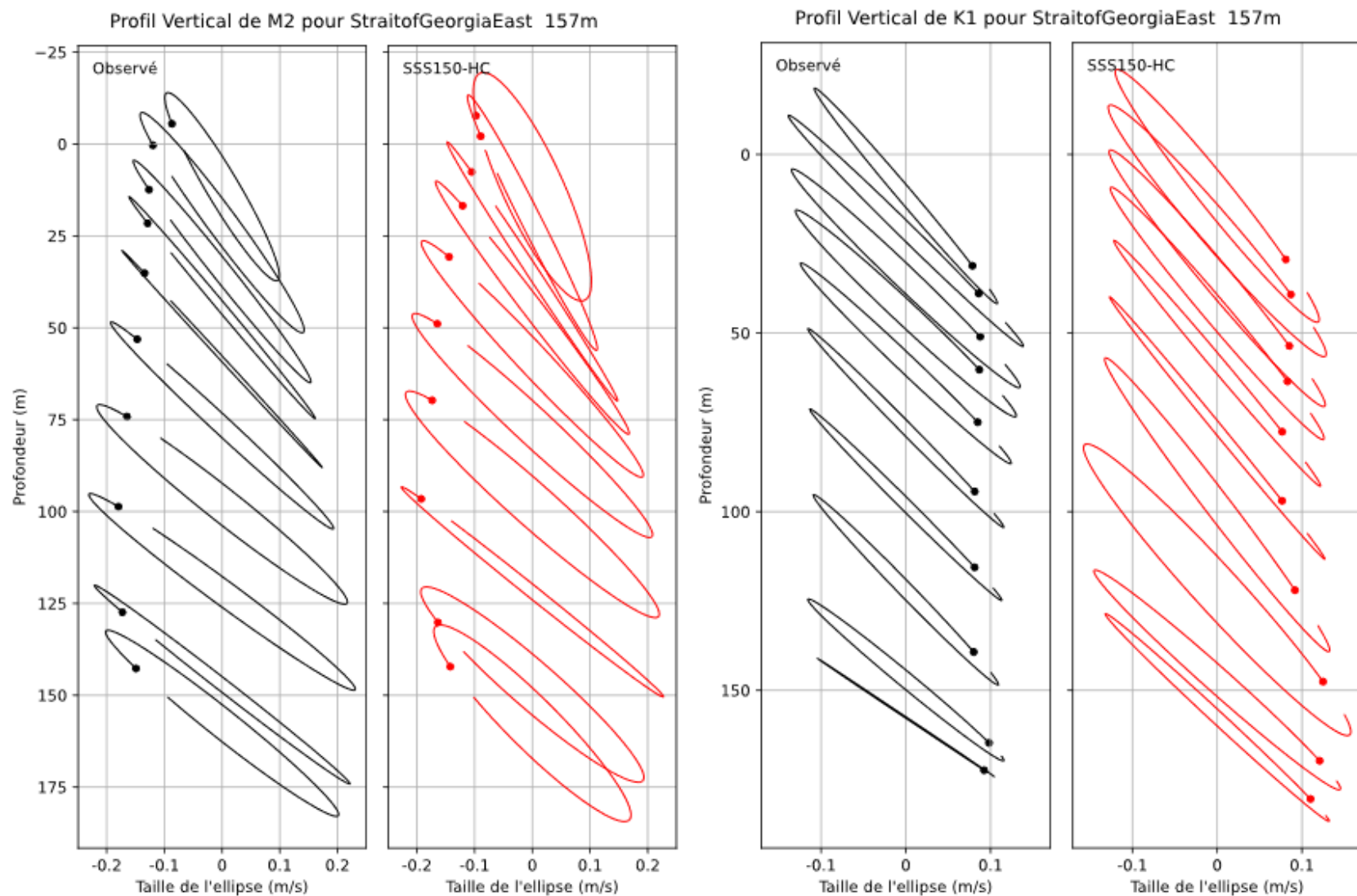


Figure 47. Ellipses de courant pour les composantes de marée M2 (gauche) et K1 (droite) provenant de l'ADCP de la station est du détroit de Géorgie.

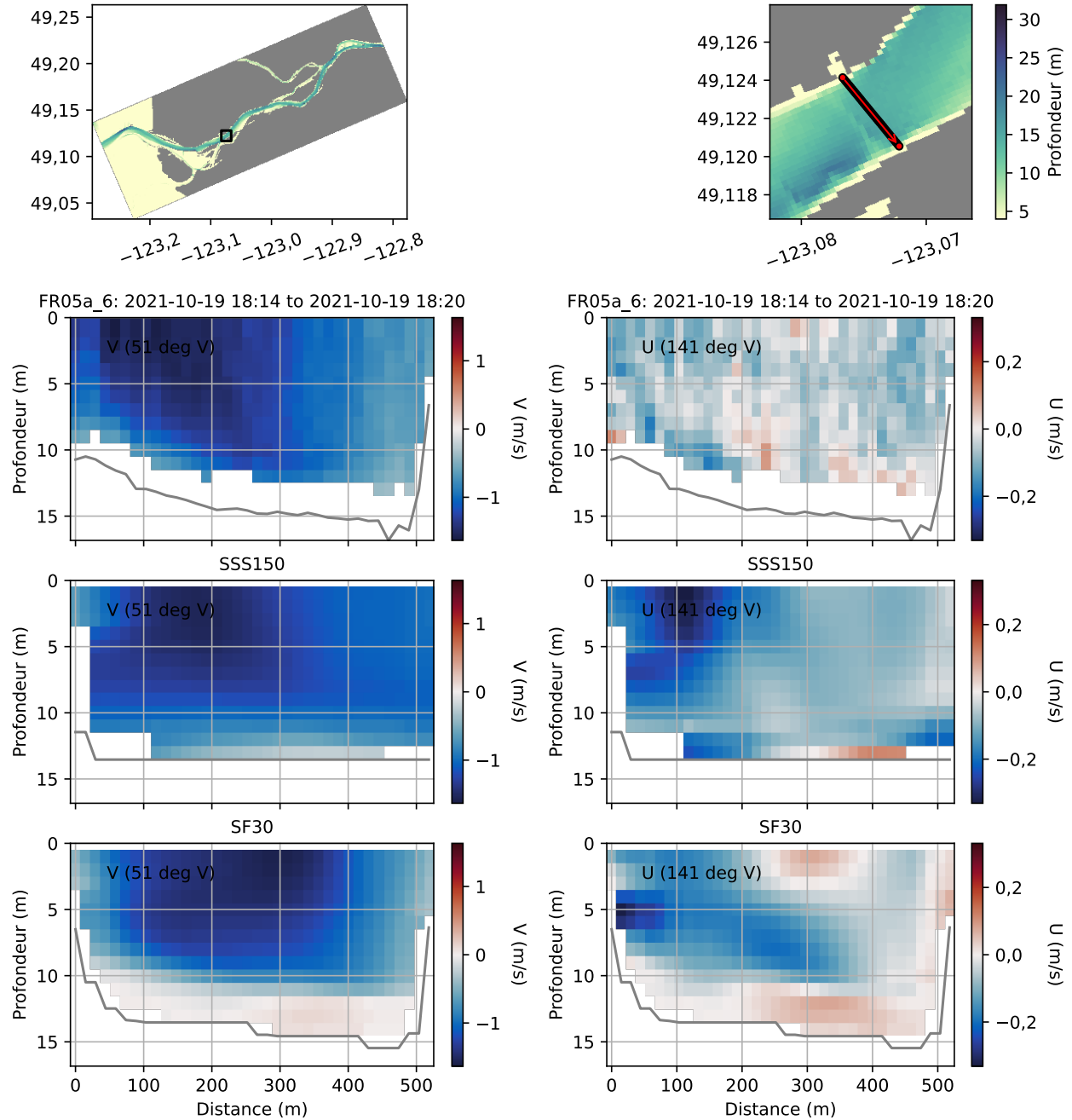


Figure 48. Composantes de courant observées et modélisées perpendiculairement au transect (panneaux de gauche) et le long du transect (panneaux de droite) à la ligne FR05a. La direction positive est indiquée dans chaque panneau en degrés vrais. L'emplacement du transect est indiqué dans les panneaux supérieurs. La ligne noire dans le panneau supérieur droit indique le transect et la flèche rouge indique la direction du transect.

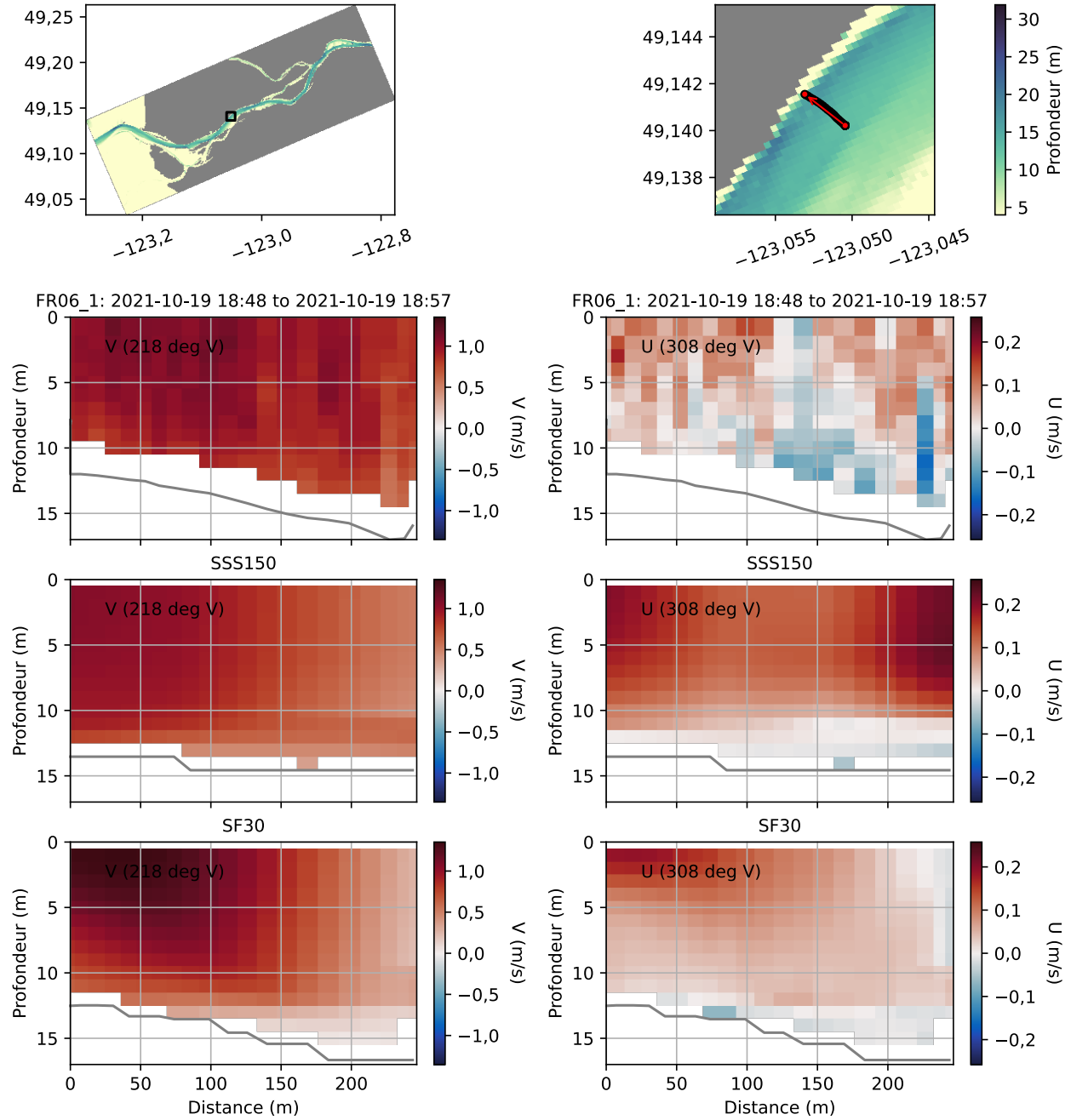


Figure 49. Identique à la Figure 48, mais pour la ligne FR06.

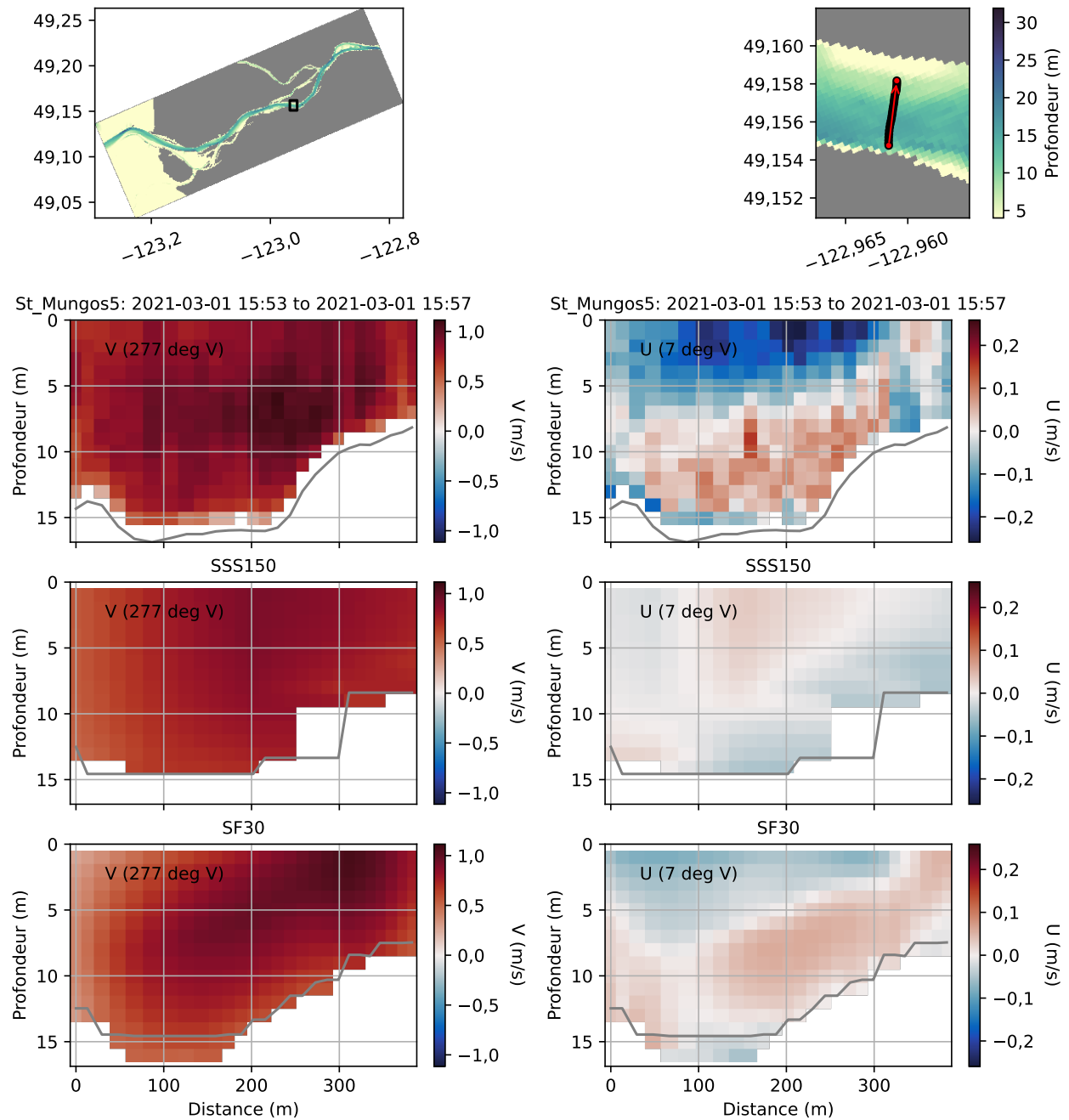


Figure 50. Identique à la Figure 48, mais pour la ligne Mungos5.

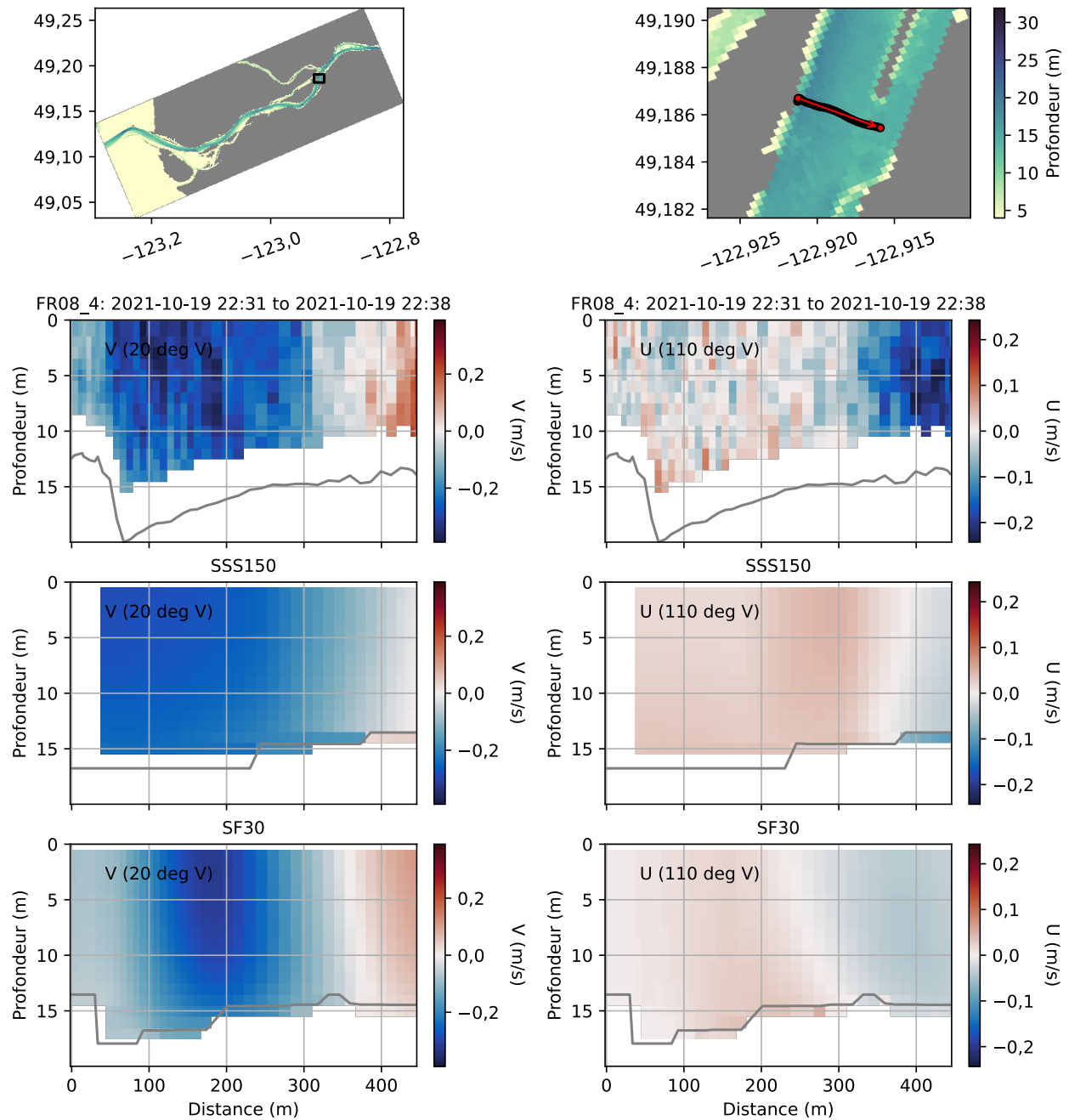


Figure 51. Identique à la Figure 48, mais pour la ligne FR08.

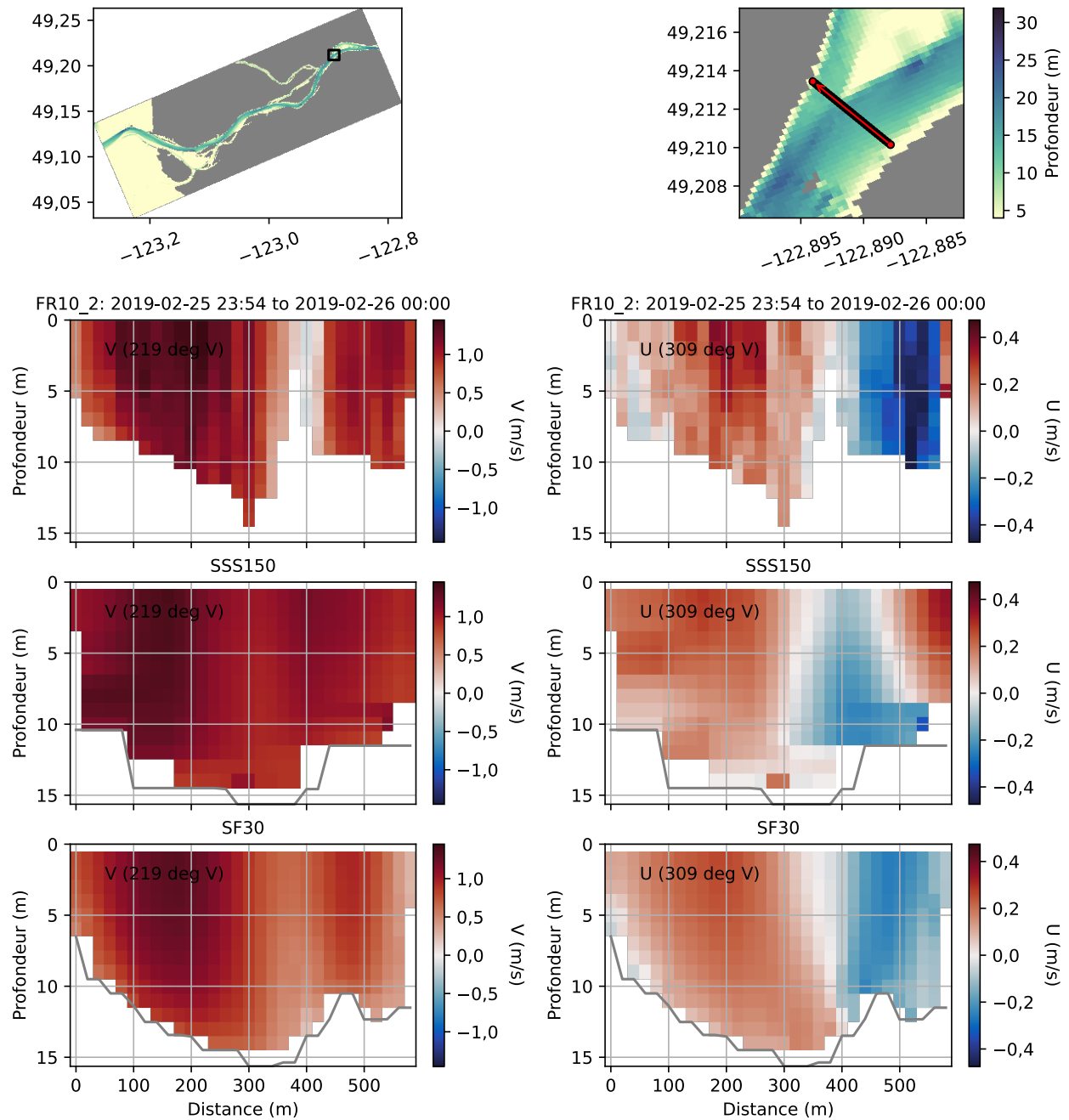


Figure 52. Identique à la Figure 48, mais pour la ligne FR10.

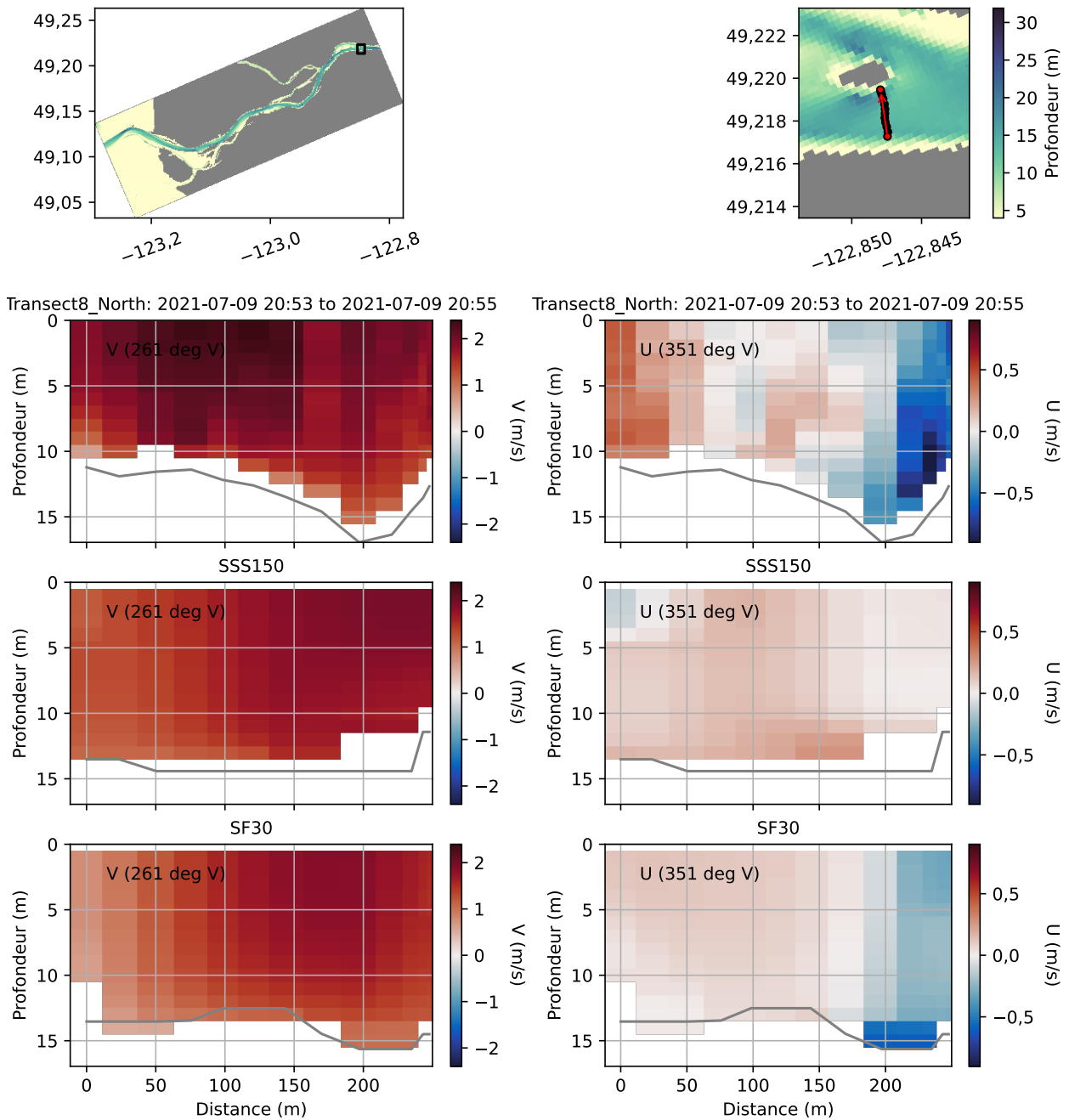


Figure 53. Identique à la Figure 48, mais pour la ligne Transect8.

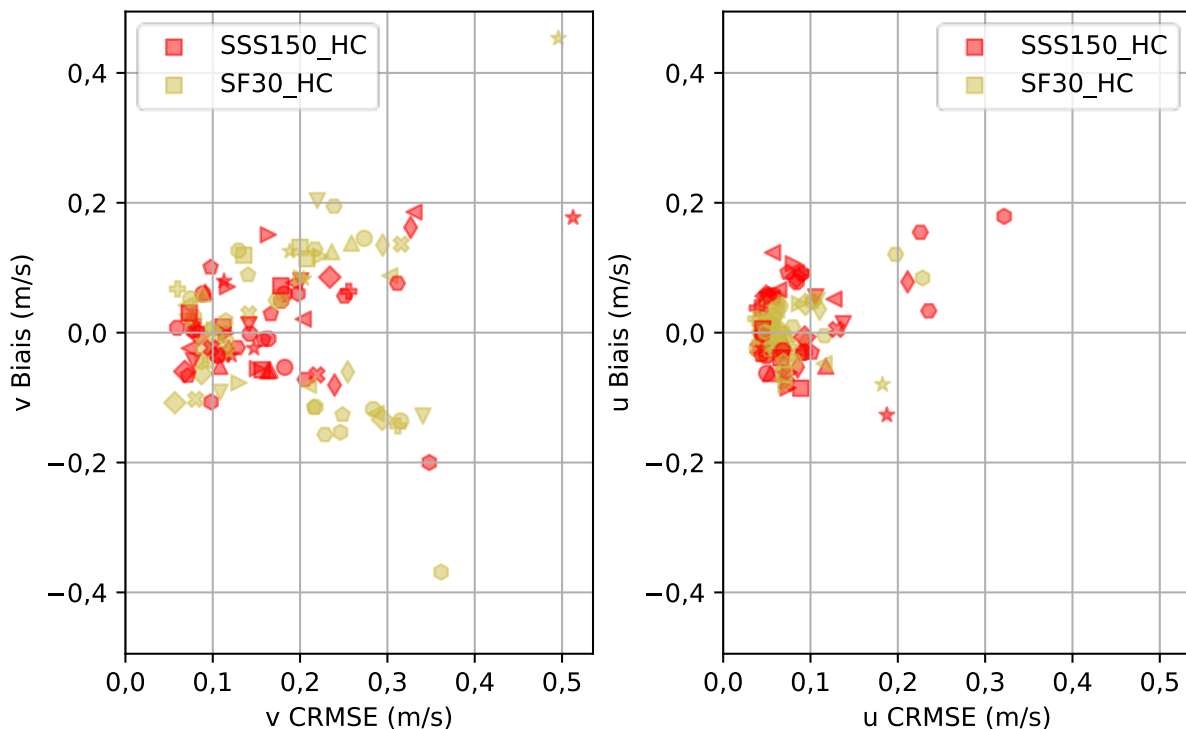


Figure 54. Diagramme de dispersion du biais moyen par rapport à la CRMSE pour chaque transect des composantes du courant le long du rivage (panneau de gauche) et perpendiculaire au rivage (panneau de droite). La couleur indique le modèle et la forme du marqueur indique le transect (les formes du marqueur se répètent en raison d'un nombre limité de formes).

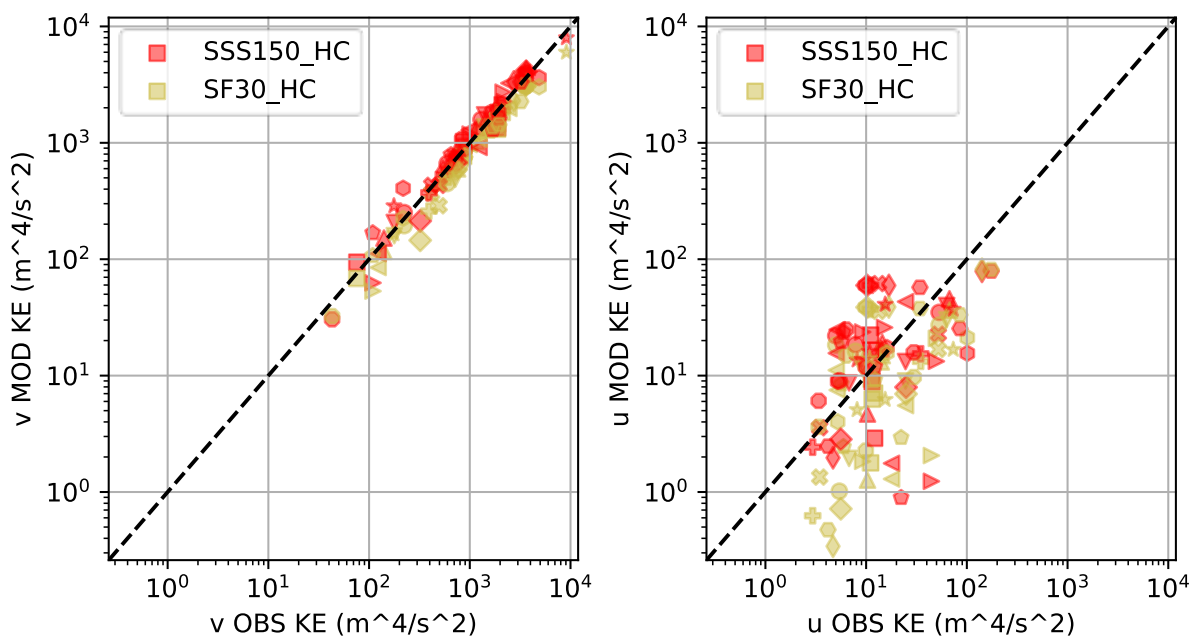


Figure 55. Distribution de l'énergie cinétique intégrée pour chaque transect du courant modélisé par rapport à celle du courant observé le long du rivage (panneau gauche) et perpendiculaire au rivage (panneau droit). La couleur indique le modèle et la forme du marqueur indique le transect (les formes du marqueur se répètent en raison d'un nombre limité de formes).

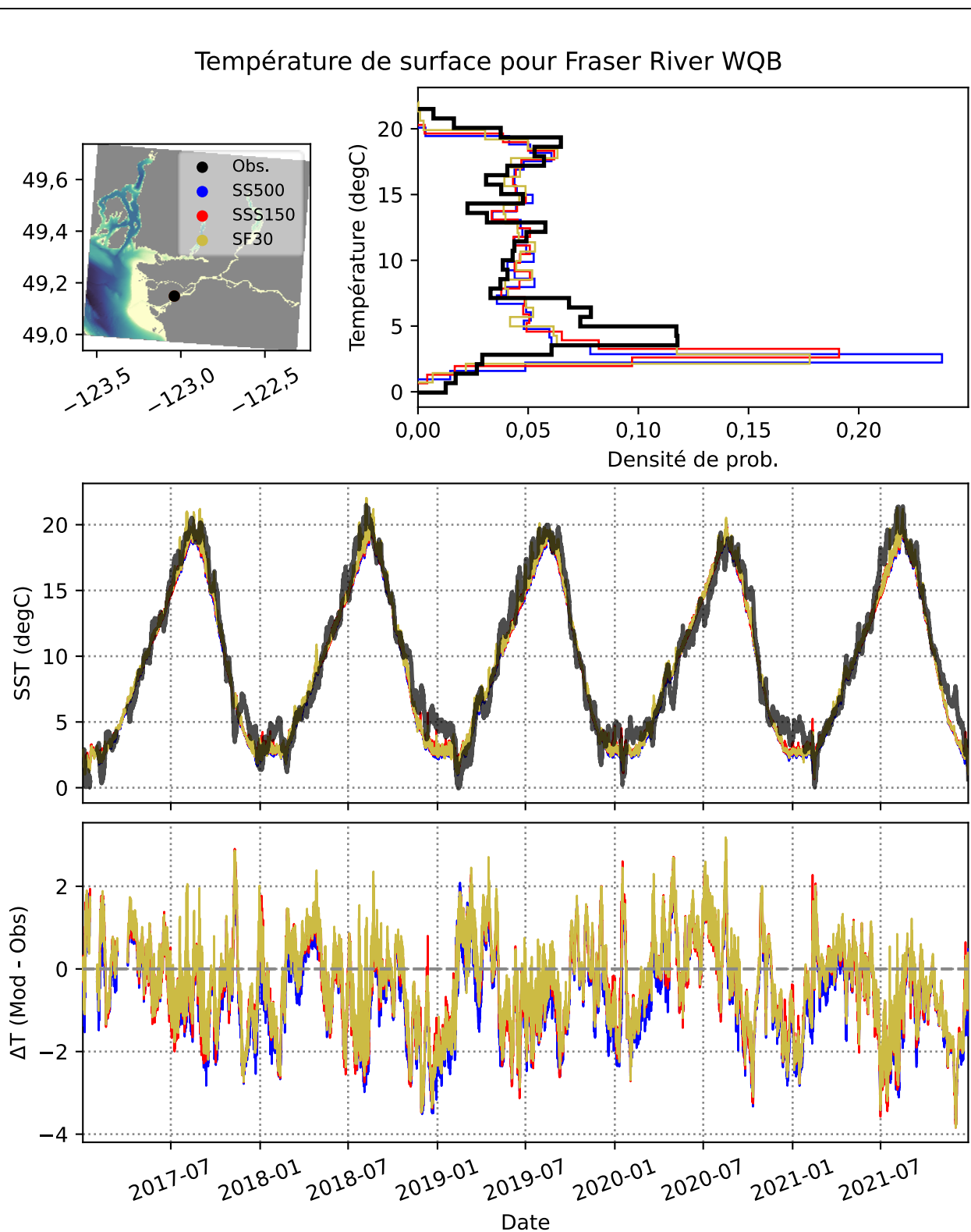


Figure 56. TSM observée et modélisée à la bouée de contrôle de la qualité de l'eau du fleuve Fraser.

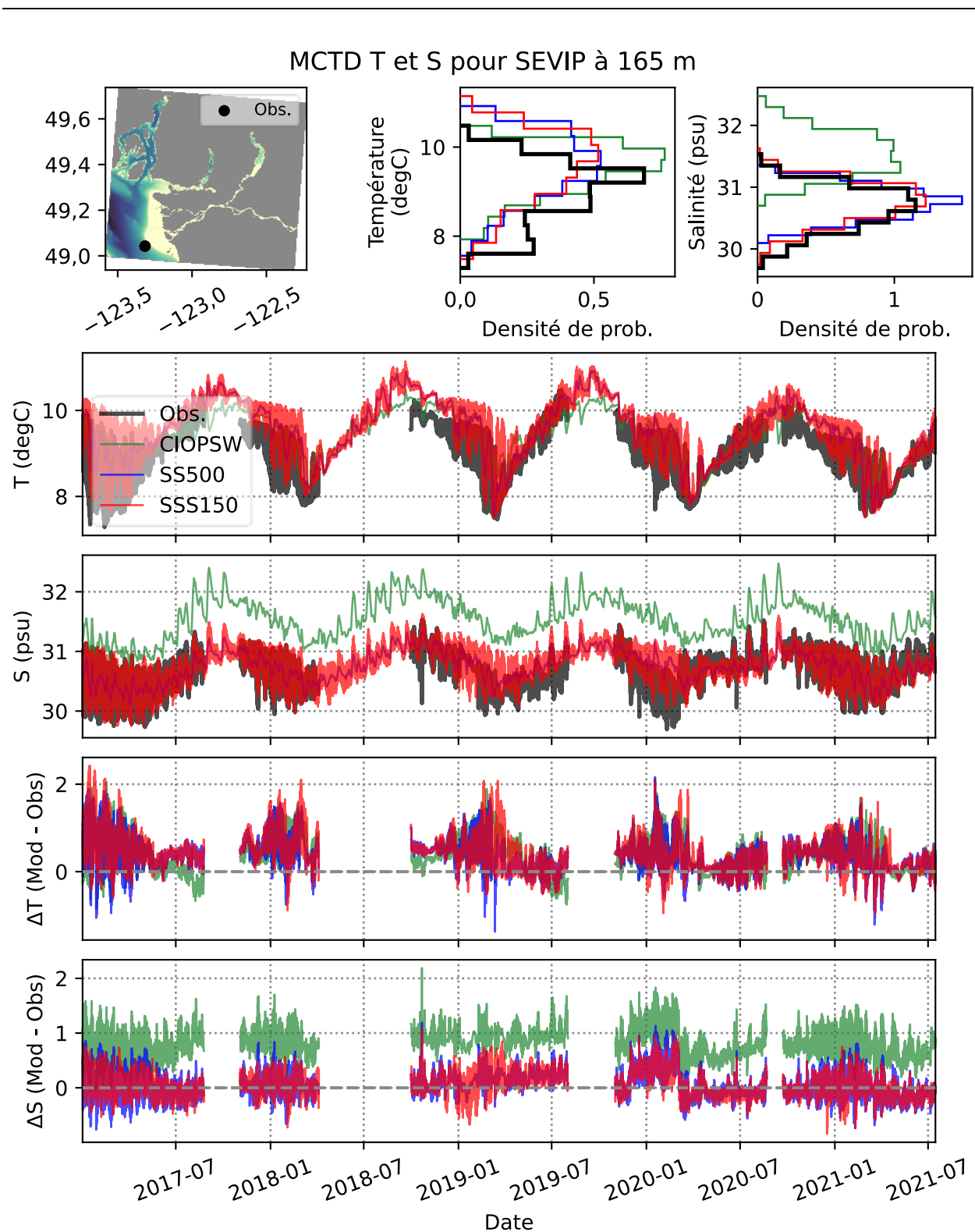


Figure 57. Température et salinité observées et modélisées pour la sonde CTD ancrée à la station SEVIP. Les séries quotidiennes sont indiquées pour le SPCOG-O (CIOPSW) et le SS500 et les séries horaires le sont pour le SSS150.

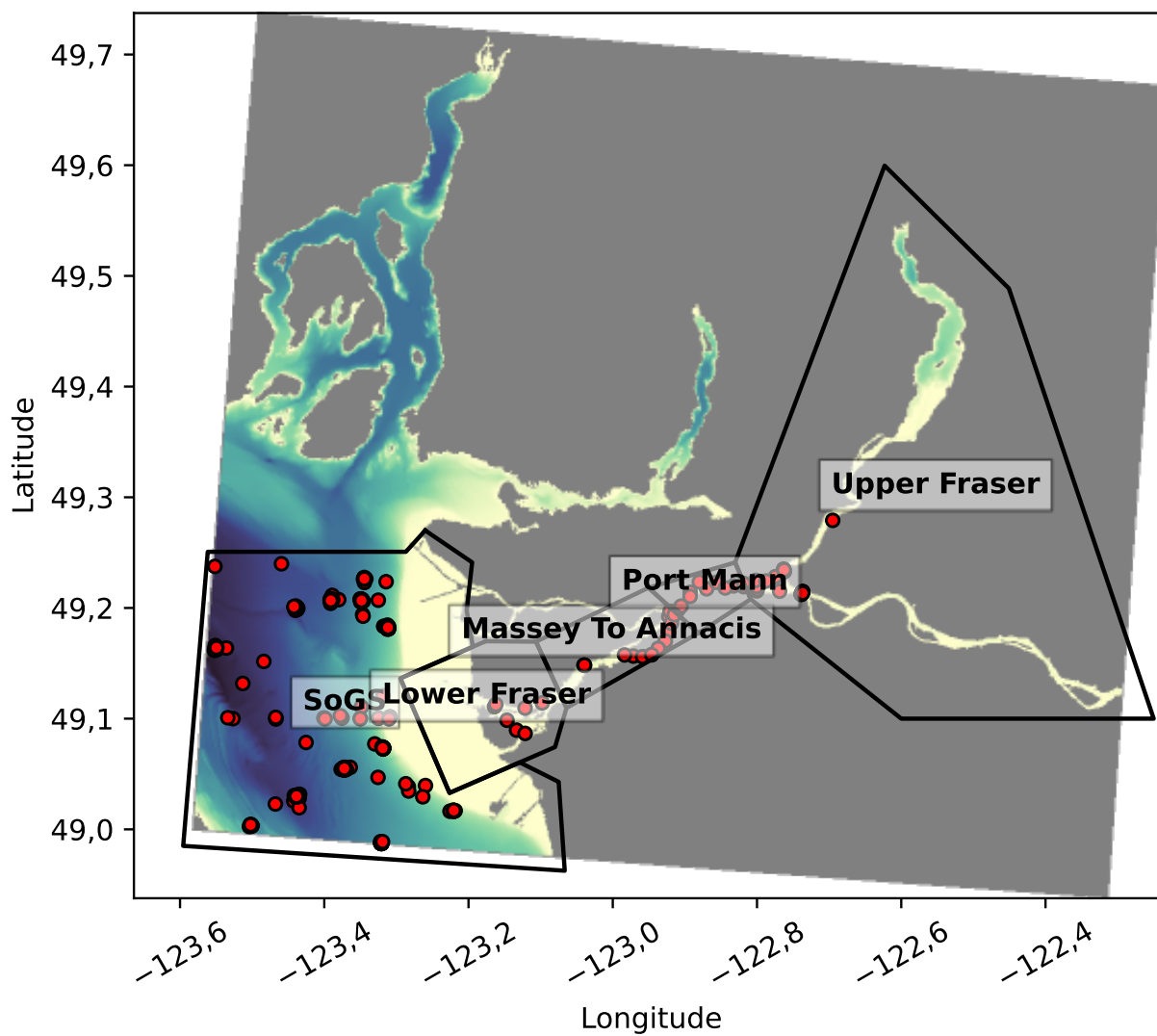


Figure 58. Profils CTD (points rouges) et sous-régions (délimitées par des traits noirs pleins) utilisés pour l'analyse.

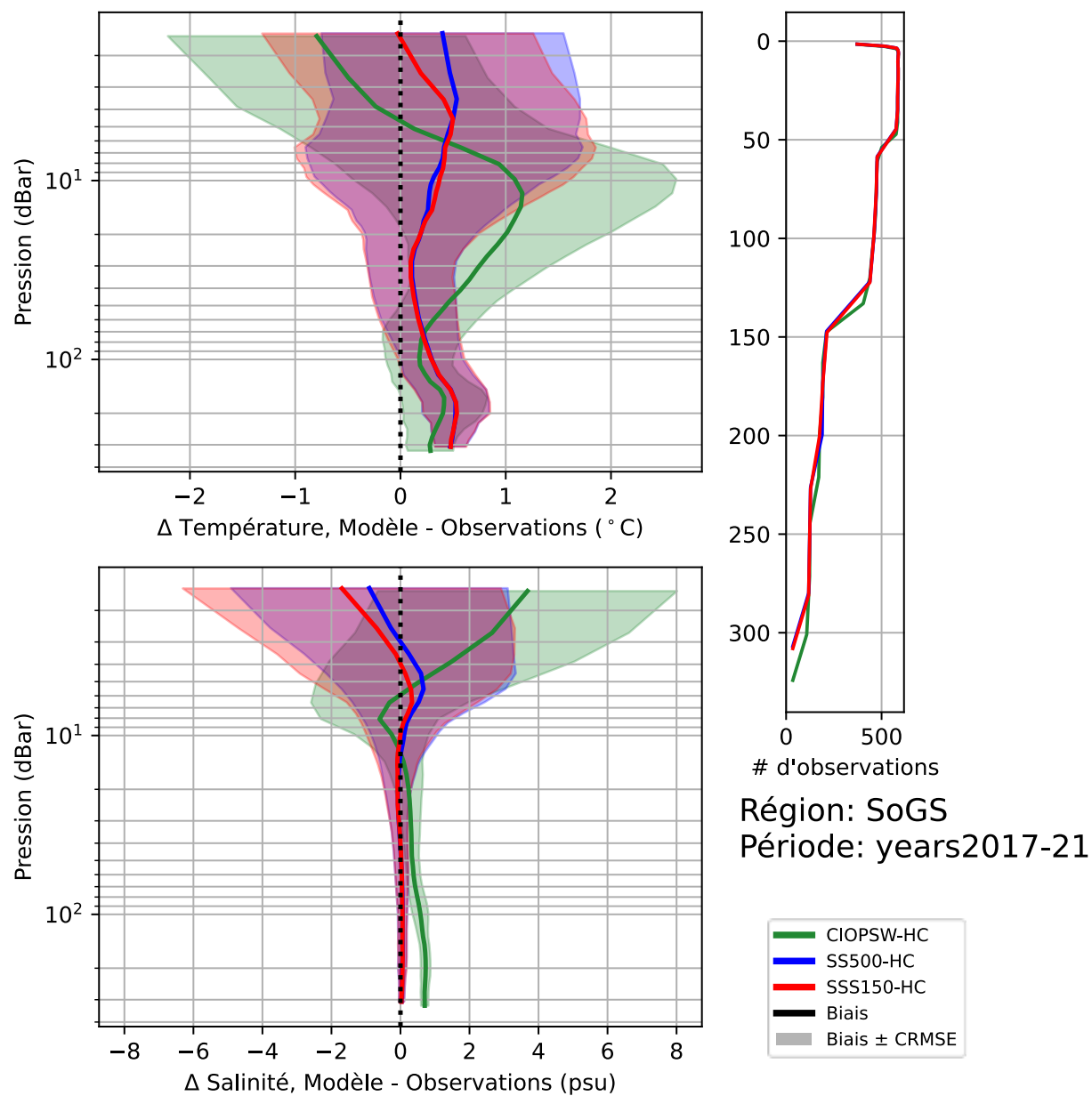


Figure 59. Comparaison des profils CTD pour la région du sud du détroit de Géorgie.

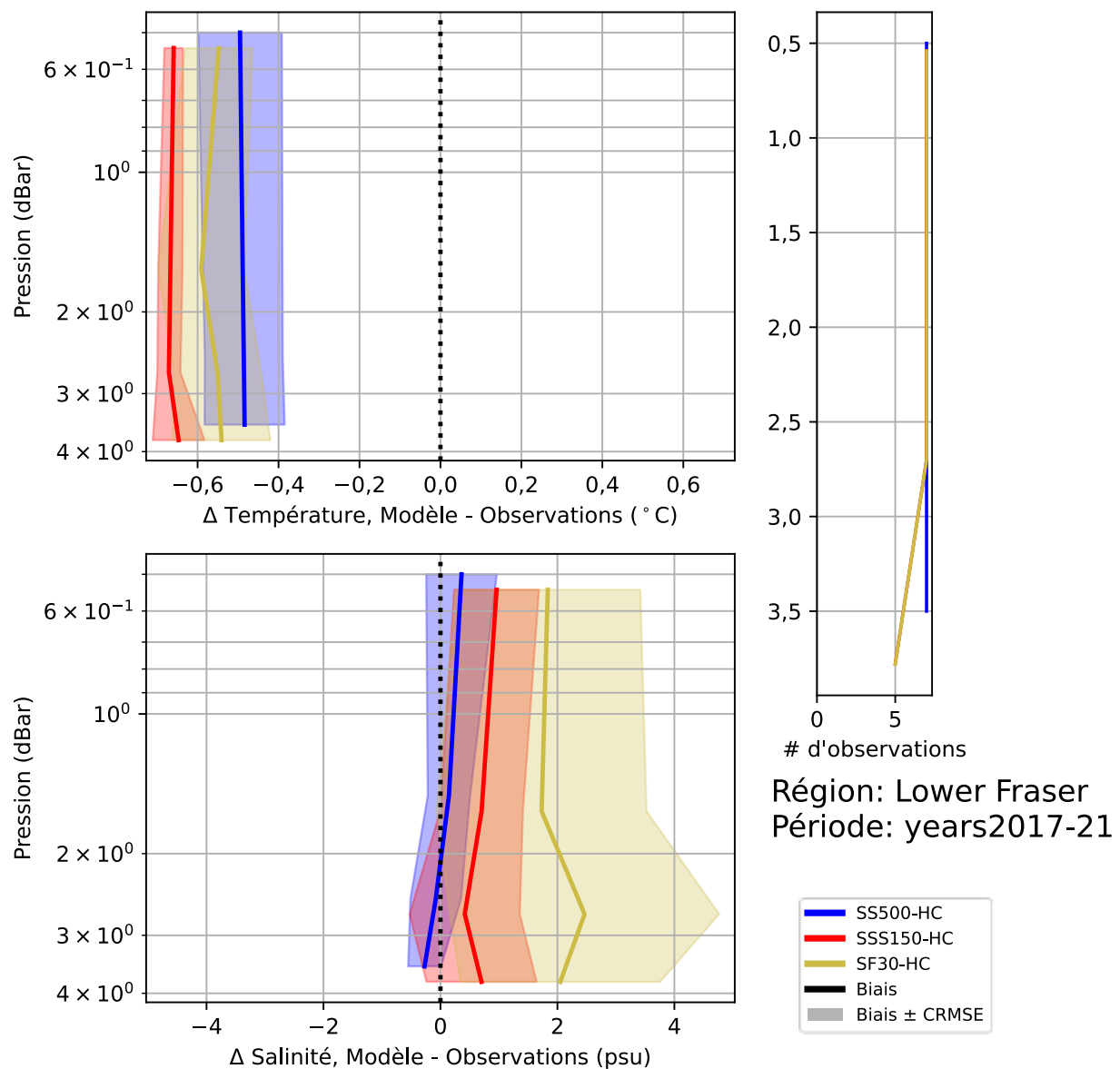


Figure 60. Comparaison des profils CTD pour la région du bas Fraser.

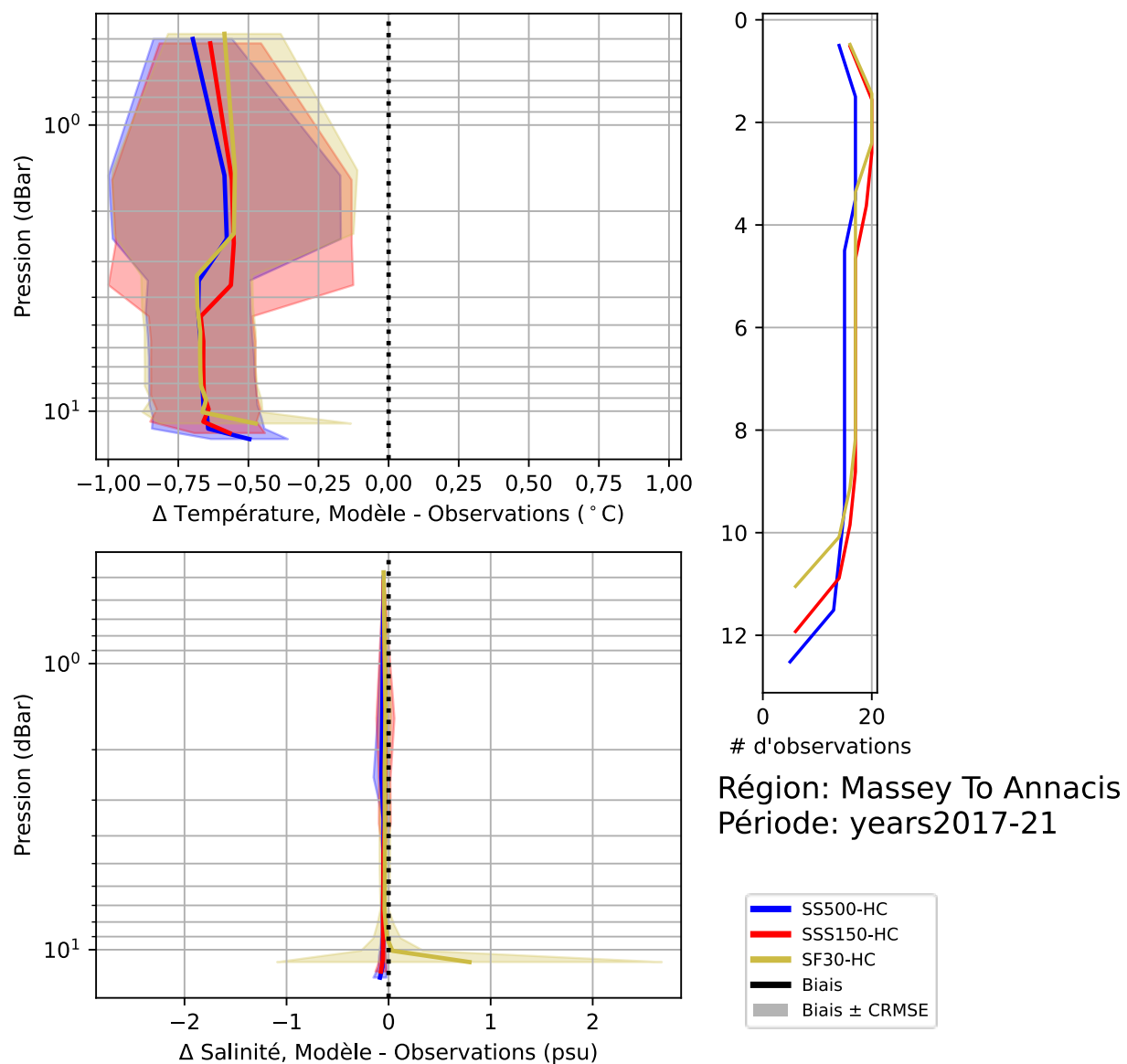


Figure 61. Comparaison des profils CTD pour la région de Massey à Annacis.

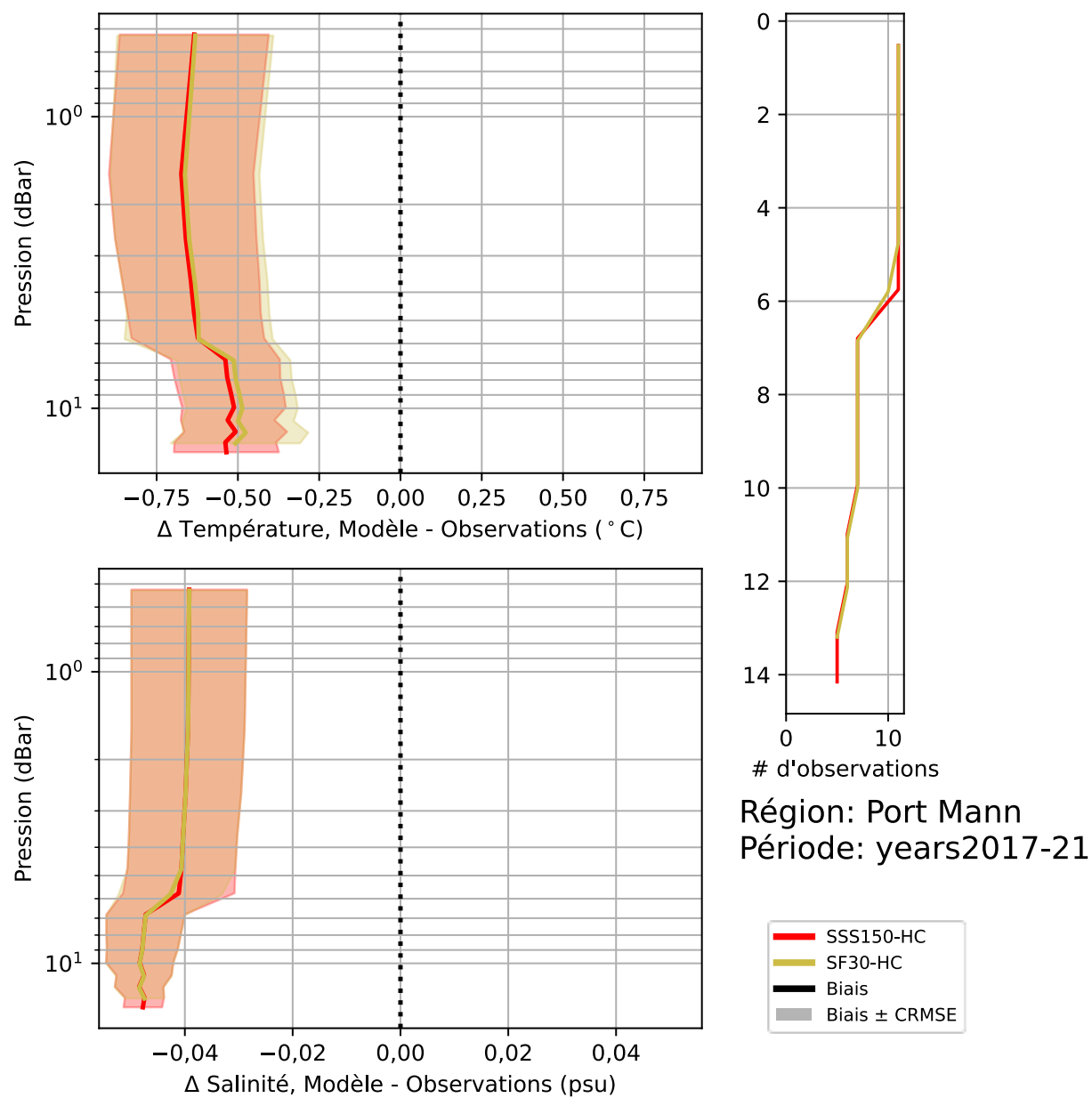


Figure 62. Comparaison des profils CTD pour la région de Port Mann.

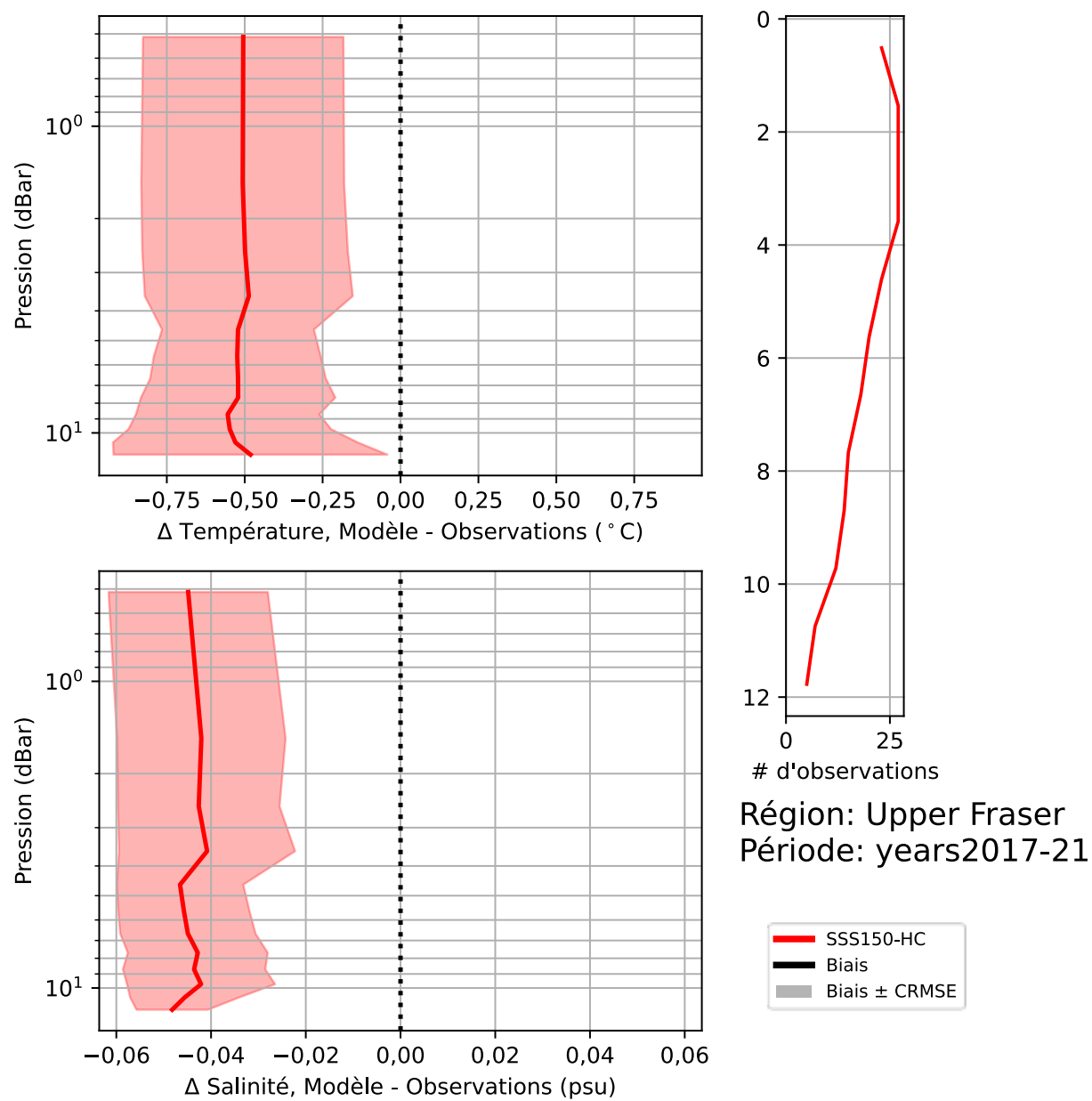


Figure 63. Comparaison des profils CTD pour la région du haut Fraser.

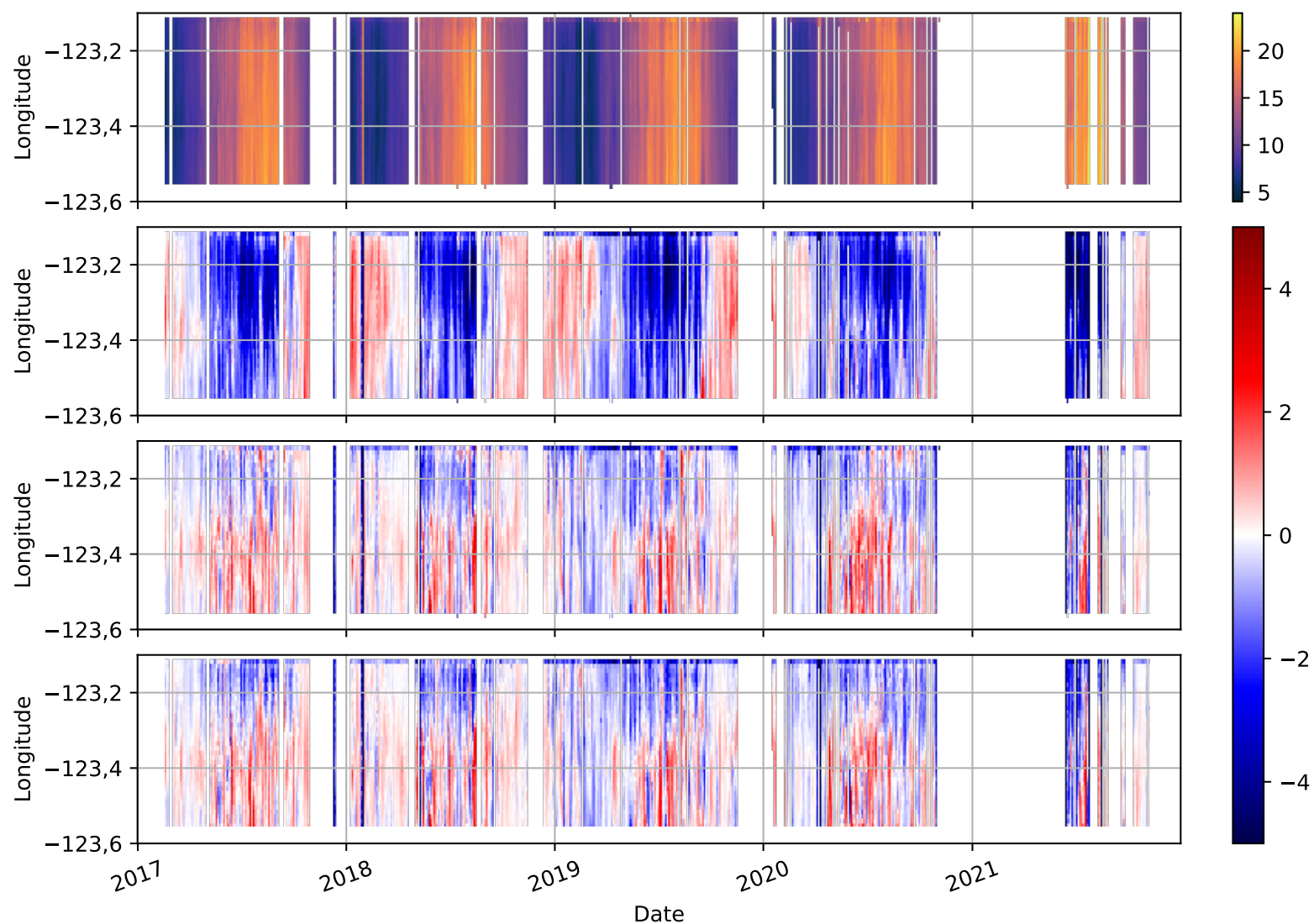


Figure 64. Diagramme de Hovmöller pour la température mesurée le long de la route Tsawwassen-Duke Point de BC Ferries. Le panneau supérieur montre la température observée, et les trois panneaux inférieurs montrent les erreurs de modèle pour le SPCOG-O, le SS500 et le SSS150, de haut en bas respectivement. Les unités sont exprimées en degrés Celsius, et l'extrémité de la route à Tsawwassen correspond au haut de chaque panneau.

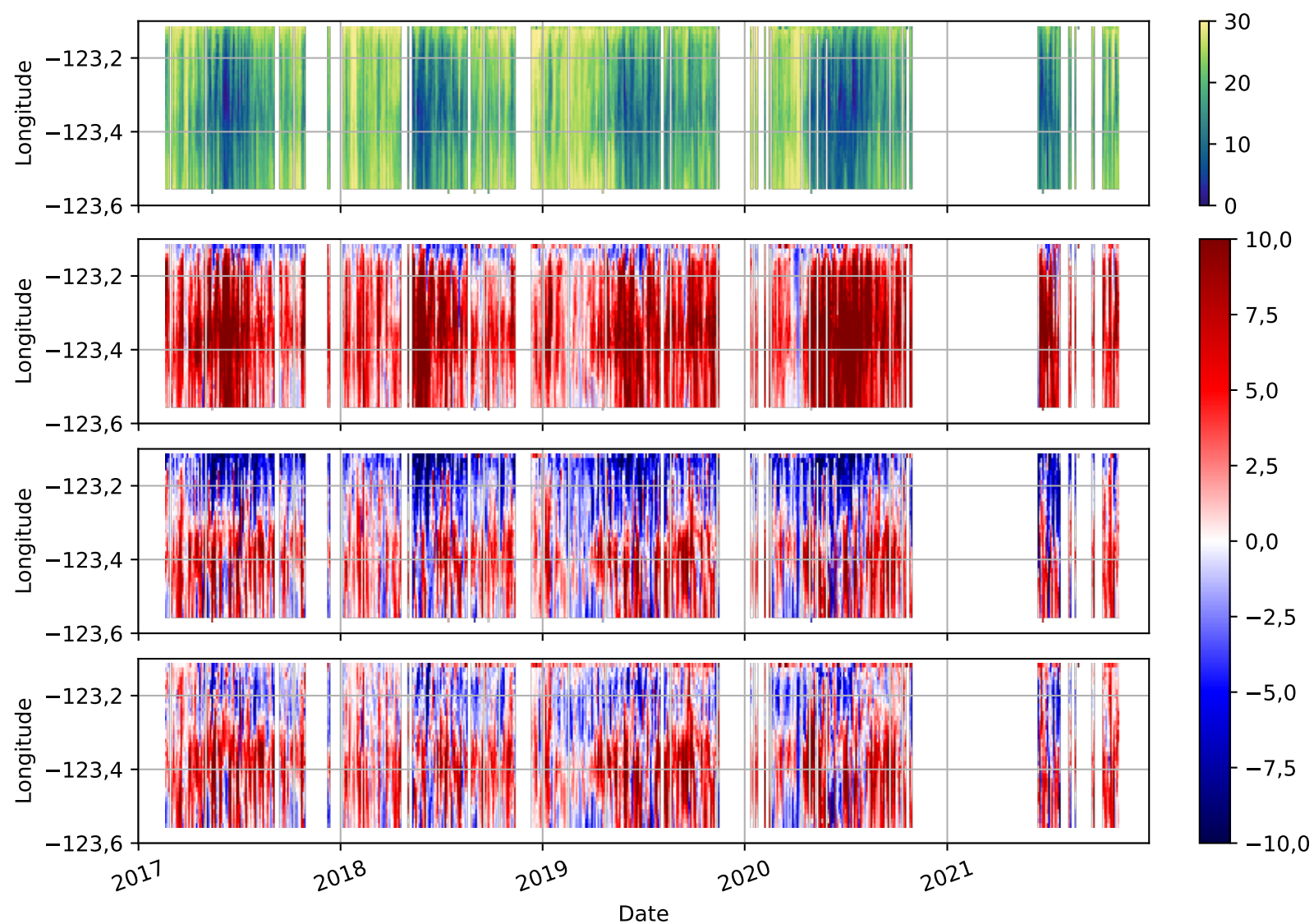


Figure 65. Diagramme de Hovmöller pour la salinité mesurée le long de la route Tsawwassen-Duke Point de BC Ferries. Le panneau supérieur montre la salinité observée, et les trois panneaux inférieurs montrent les erreurs de modèle pour le SPCOG-O, le SS500 et le SSS150, de haut en bas respectivement. Les unités sont exprimées en psu, et l'extrémité de la route à Tsawwassen correspond au haut de chaque panneau.

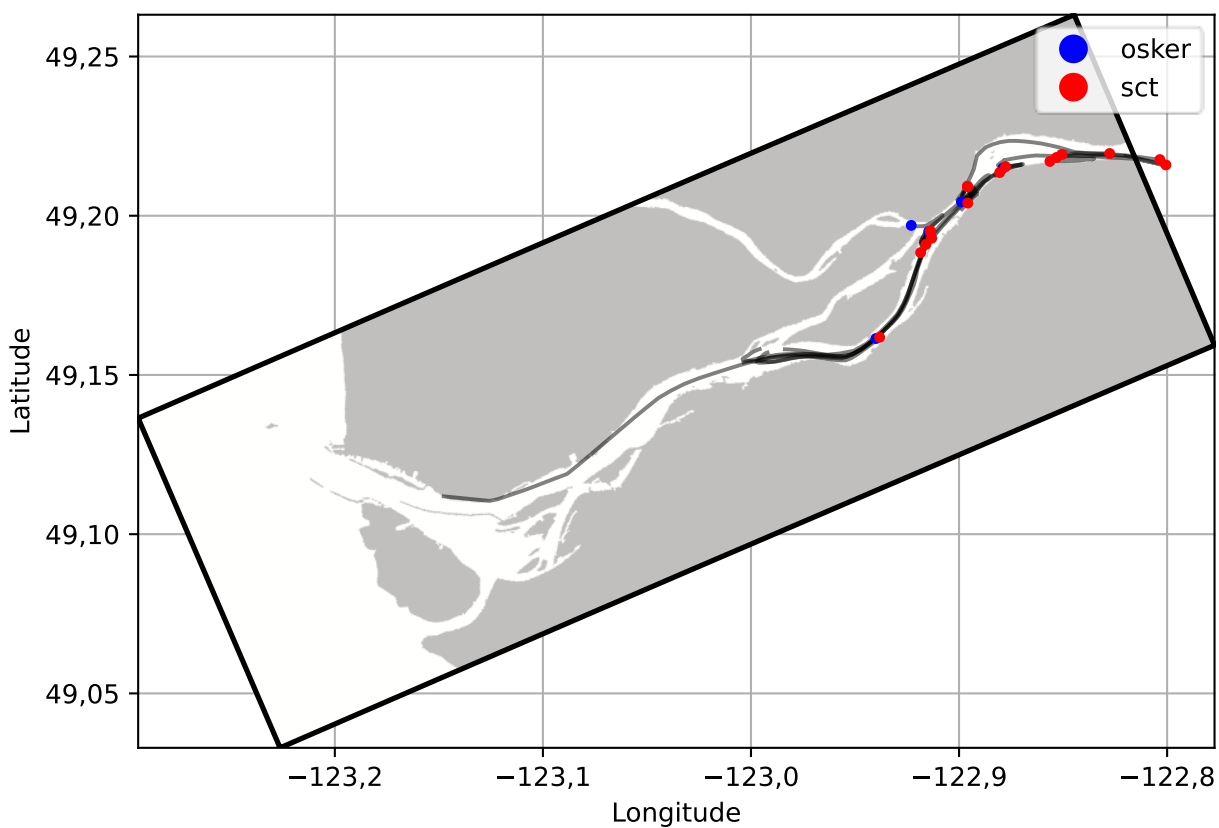


Figure 66. Carte des trajectoires des bouées dérivantes observées pour les deux types de bouées dérivantes (OSKER et SCT) utilisés dans l'expérience.

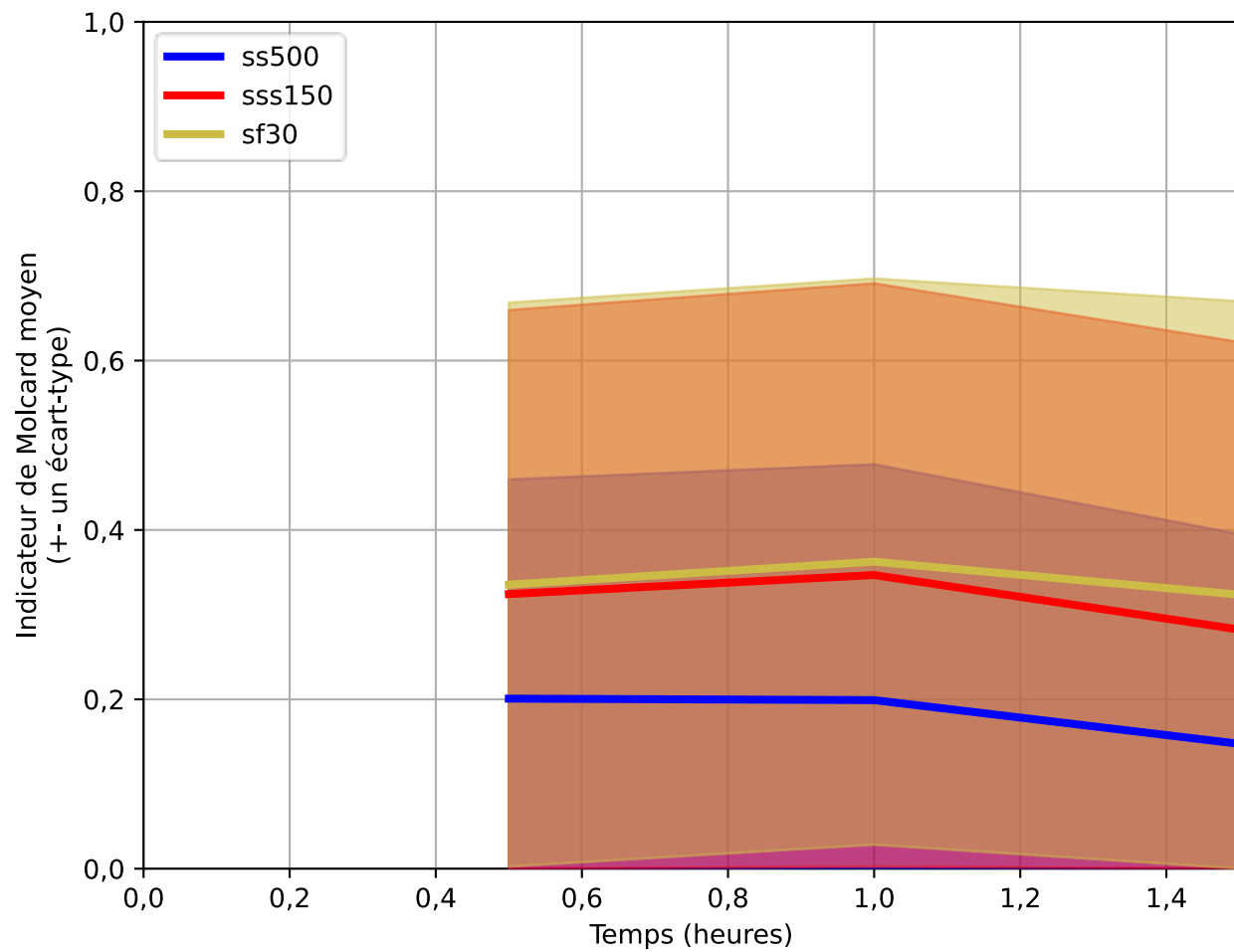


Figure 67. Score instantané moyen de Molcard par rapport aux bouées dérivantes. La zone ombrée affiche $\pm$ un écart type.

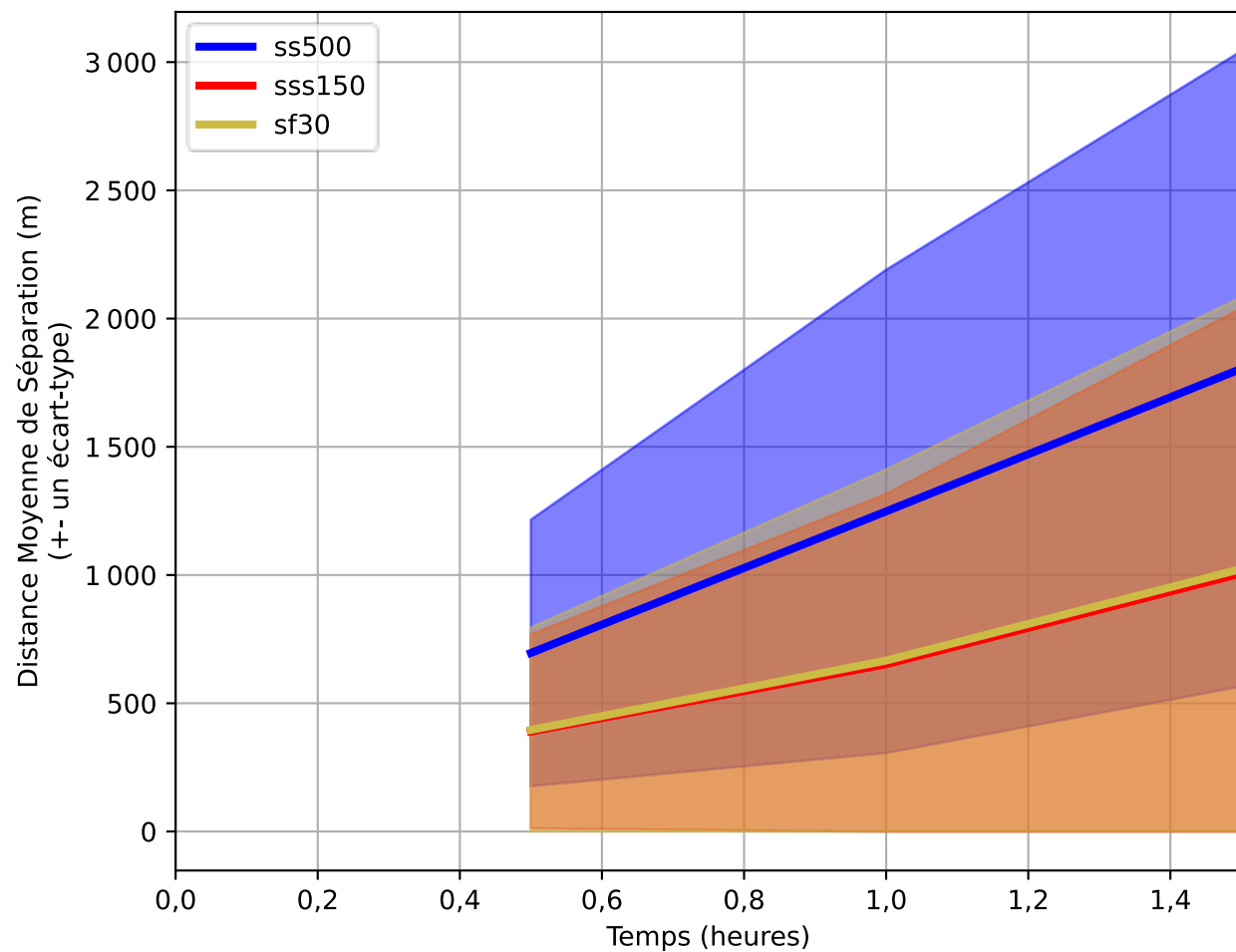


Figure 68. Distance moyenne de séparation par rapport aux bouées dérivantes. La zone ombrée affiche $\pm$ un écart type.

BIAIS, CRMSE pour Sand Heads sur la période forecast_eval

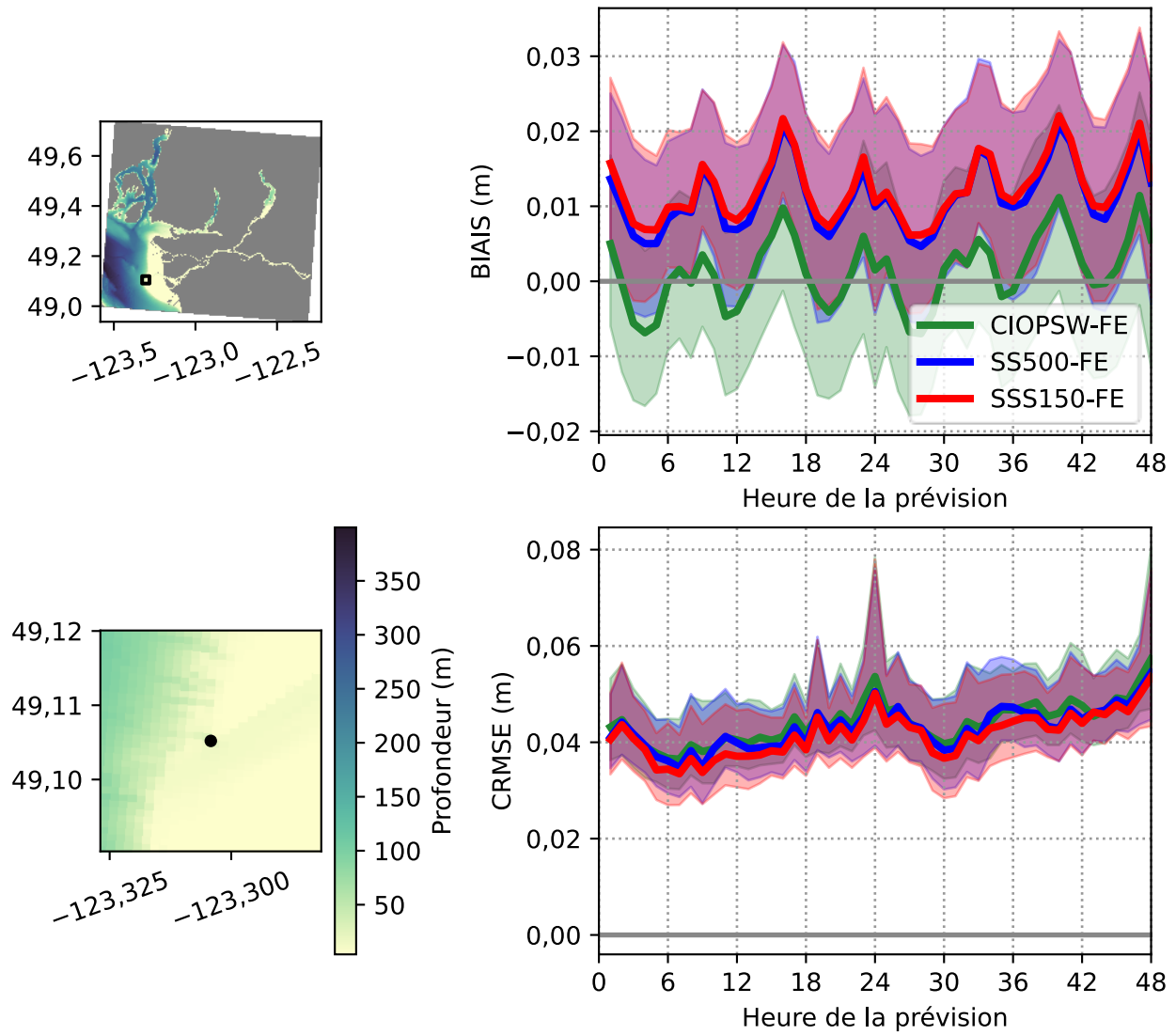


Figure 69. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Sand Heads.

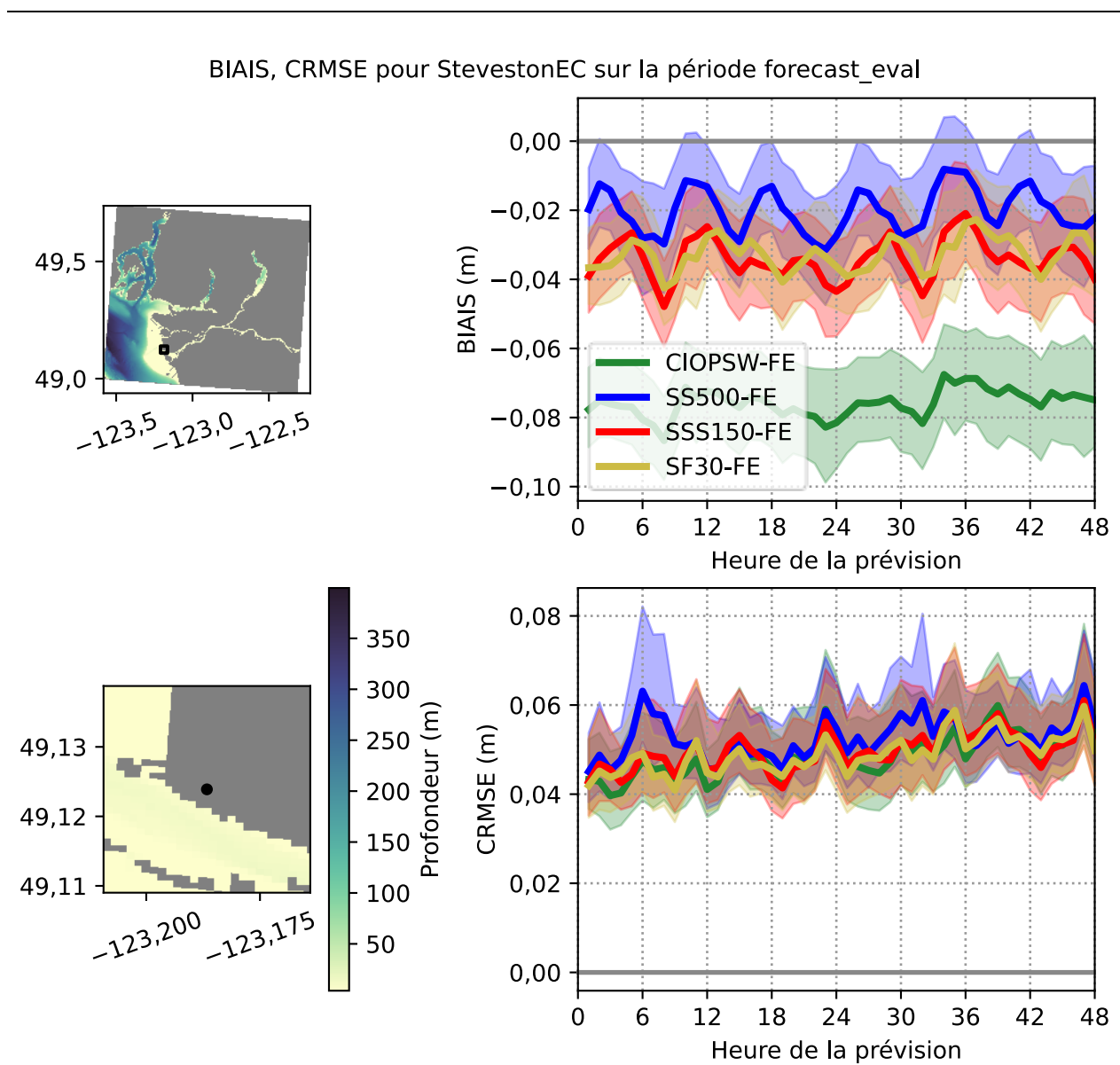


Figure 70. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à StevestonEC.

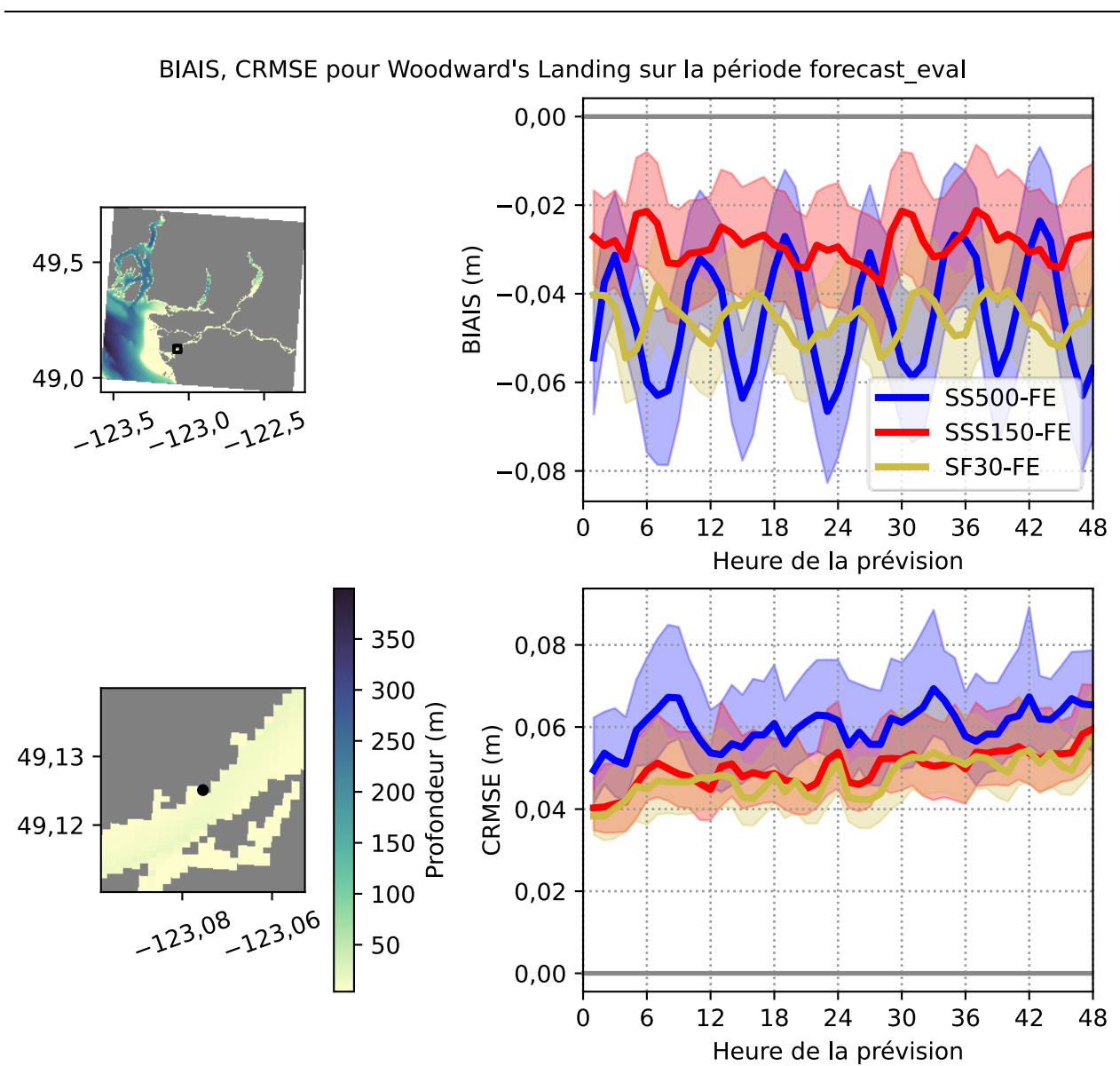


Figure 71. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Woodward's Landing.

BIAIS, CRMSE pour Pitt River sur la période forecast_eval

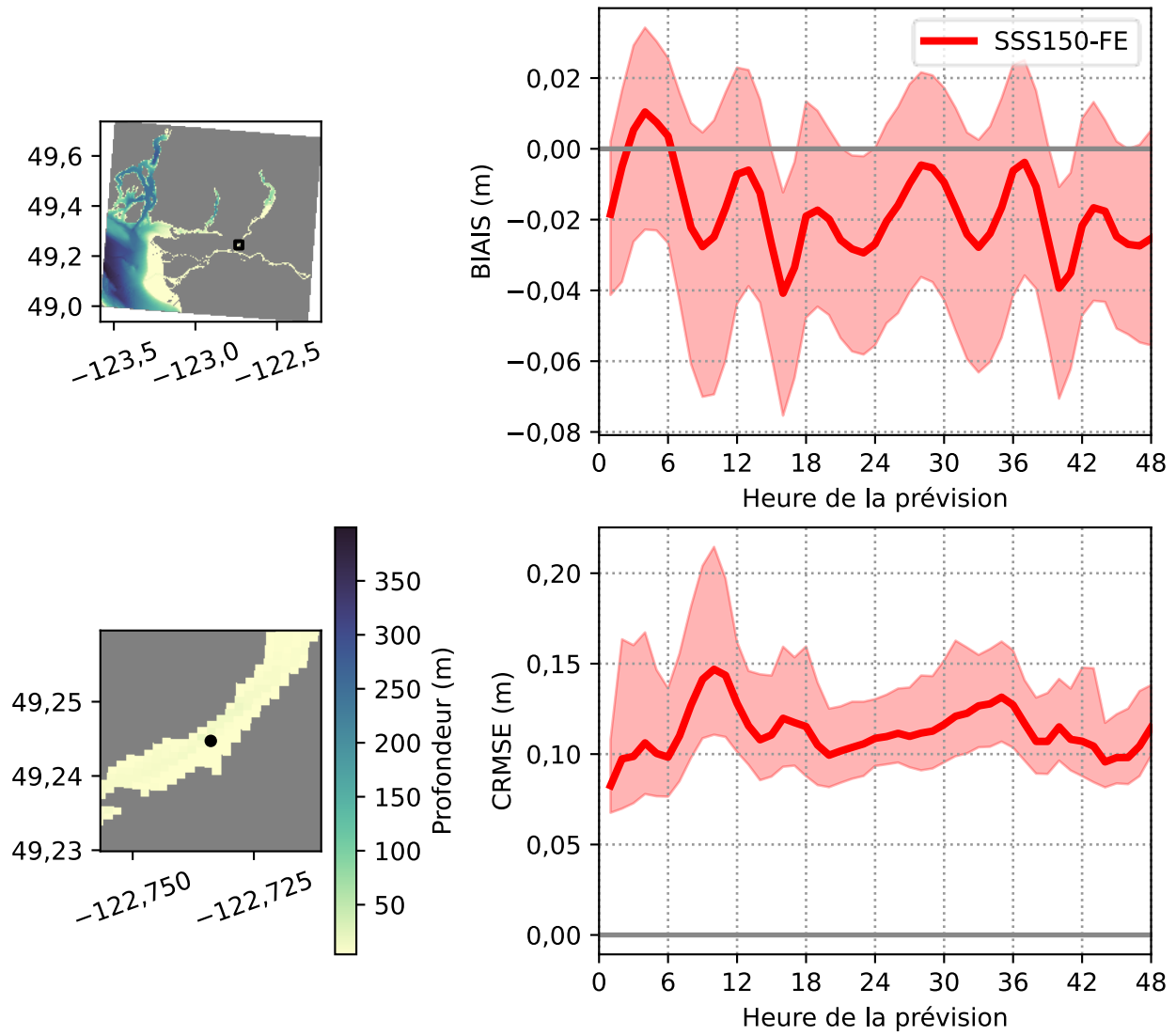


Figure 72. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Pitt River.

BIAIS, CRMSE pour Woodward's Landing sur la période forecast_eval

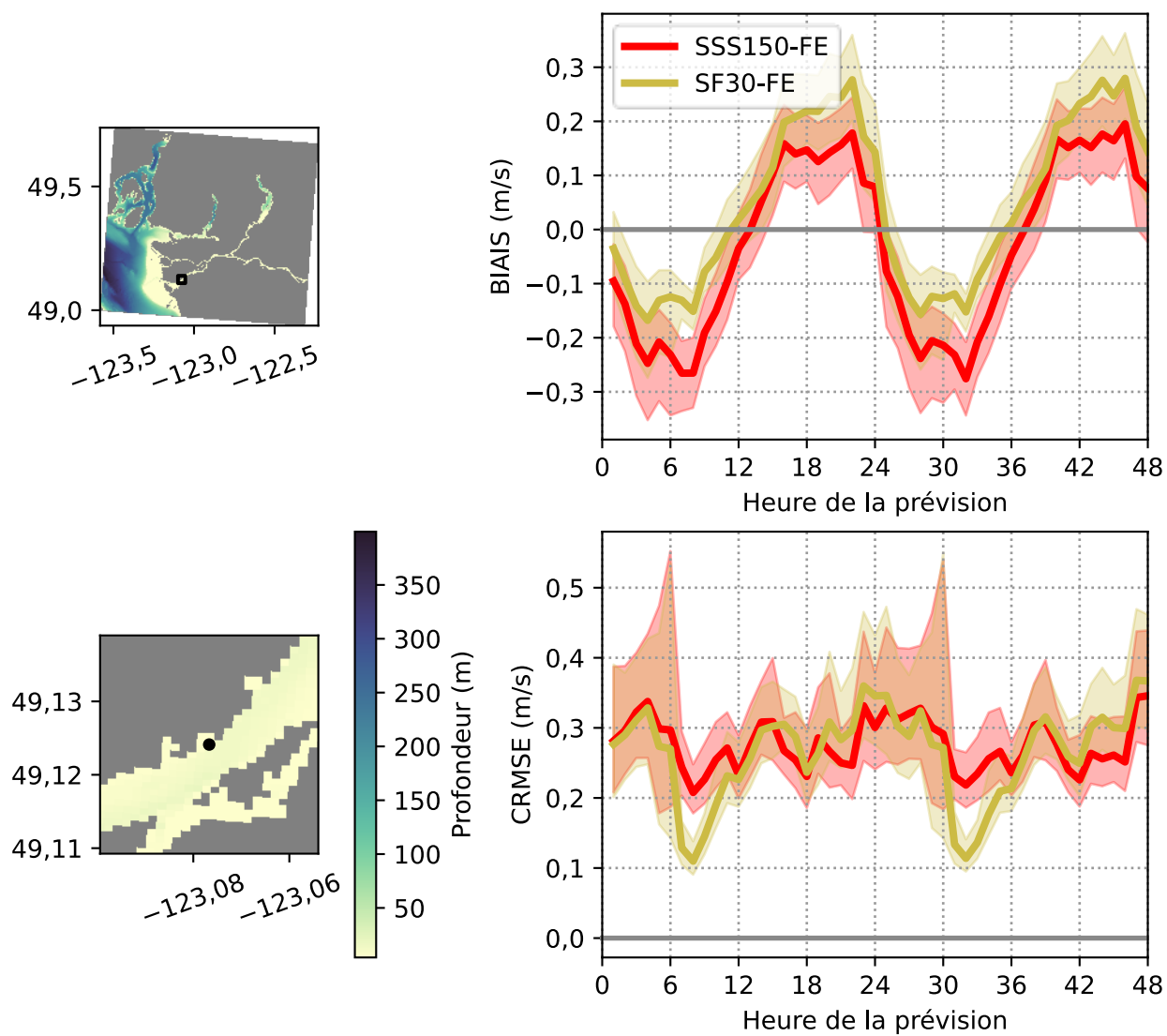


Figure 73. Évaluation des prévisions pour les vitesses horizontales à l'ADCP horizontal de Woodward's Landing dans le fleuve Fraser.

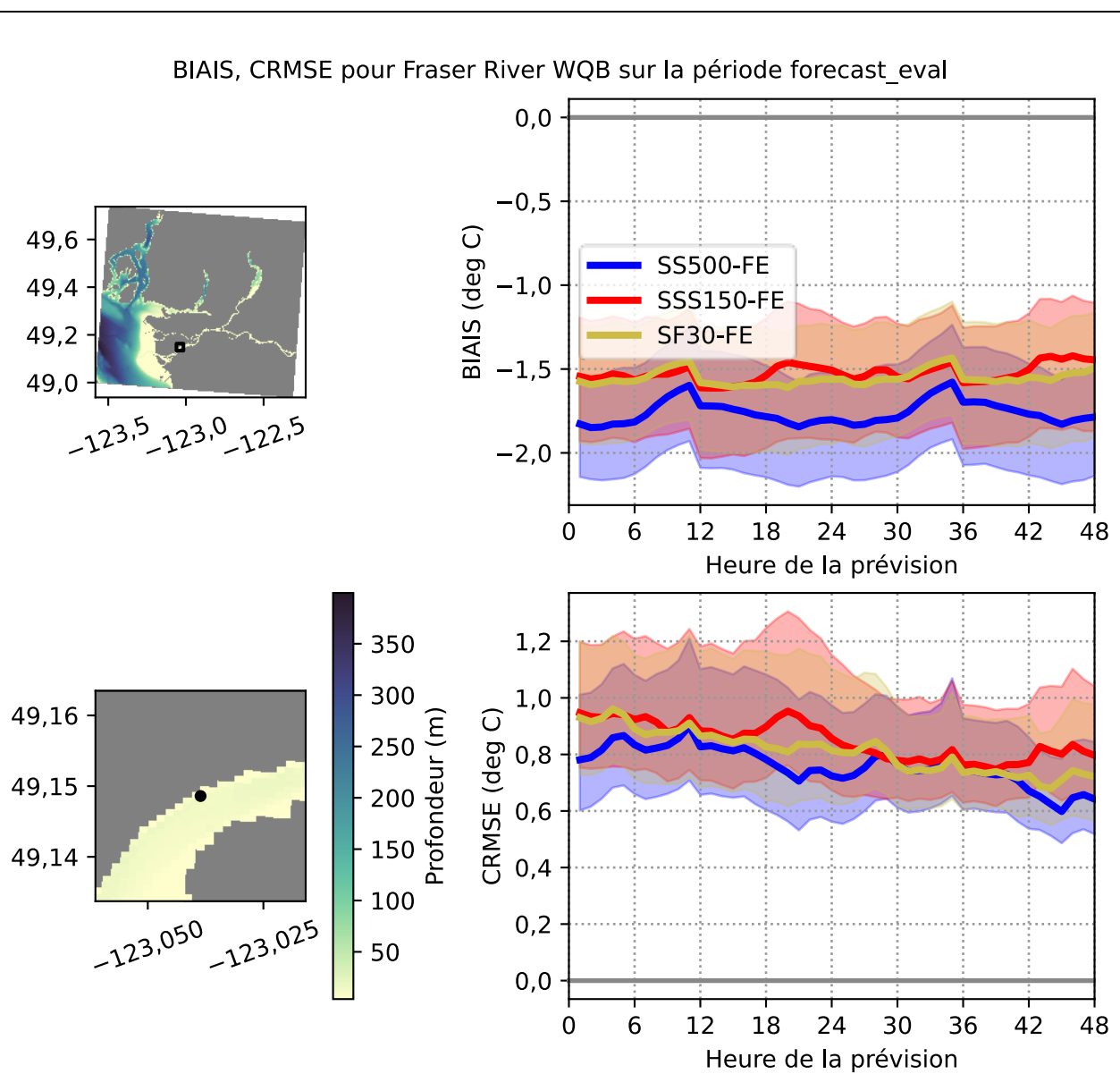


Figure 74. Évaluation des prévisions de la température de surface de la mer à la bouée de contrôle de la qualité de l'eau du fleuve Fraser.