



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 2026/001

Région de la capitale nationale

Évaluation du système de prévisions océaniques portuaires élaboré dans le cadre du Plan de protection des océans du Canada - port de Vancouver

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 978-0-660-79953-7 N° cat. Fs70-5/2026-001F-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 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. 2026/001. xi + 134 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: Vancouver Harbour. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2026/001. xi + 128 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. PORT DE VANCOUVER.....	5
3.1. OCÉANOGRAPHIE RÉGIONALE.....	5
3.2. DOMAINE ET CONFIGURATION.....	6
3.3. INITIALISATION.....	7
3.4. FORÇAGE DES LIMITES OUVERTES.....	7
3.4.1. Modèle de marée non stationnaire.....	9
3.5. APPORT EN EAU DOUCE.....	9
3.6. MODÈLE DES GLACES.....	10
3.7. STABILITÉ DU SYSTÈME DE MODÉLISATION.....	10
4. PARAMÈTRES D'ÉVALUATION.....	11
4.1. SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES.....	11
4.1.1. Niveau d'eau.....	12
4.1.2. Vitesse de courant.....	14
4.1.3. Propriétés de l'eau.....	16
4.1.4. Dérive.....	16
4.2. PRÉVISIONS.....	18
5. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES.....	18
5.1. NIVEAU D'EAU.....	19
5.1.1. Hauteur moyenne de la surface de la mer.....	19
5.1.2. Niveau d'eau avec marée.....	19
5.1.3. Niveau d'eau résiduel.....	20
5.1.4. Scores globaux.....	21
5.1.5. Niveau d'eau des ondes de tempête.....	22
5.2. COURANTS.....	22
5.2.1. ADCP horizontaux.....	22
5.2.2. Courantomètres.....	24
5.2.3. ADCP ancrés.....	24
5.2.4. Transects d'ADCP.....	26
5.3. PROPRIÉTÉS DE L'EAU.....	27
5.3.1. Température de surface de la mer.....	27

5.3.2.	Sondes CTD ancrées	27
5.3.3.	Profils CTD	27
5.3.4.	Traversiers	28
5.4.	DÉRIVE	28
6.	RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES PRÉVISIONS	29
6.1.	NIVEAU D'EAU RÉSIDUEL	29
6.2.	ADCP HORIZONTAL	29
6.3.	TEMPÉRATURE DE SURFACE DE LA MER.....	30
7.	SOMMAIRE.....	30
8.	CONSTATATIONS PRINCIPALES.....	31
9.	REMERCIEMENTS.....	32
10.	RÉFÉRENCES CITÉES.....	33
11.	TABLEAUX	37
12.	FIGURES	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Paramètres principaux pour les configurations des modèles NEMO, SSS150 et VH20.	37
Tableau 2. Résumé des données pour la frontière ouverte à Mission du modèle non stationnaire NS_TIDE.	38
Tableau 3. Sources des apports d'eau douce utilisées pour le domaine du SSS150 (liste complète) et le domaine du VH20 (cinq premières entrées).	39
Tableau 4. Données des stations de mesure du niveau d'eau utilisées pour l'évaluation et décalages utilisés pour transférer le niveau d'eau au référentiel CGVD28.	40
Tableau 5. Comparaison de la composante M2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	41
Tableau 6. Comparaison de la composante N2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	41
Tableau 7. Comparaison de la composante S2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	42
Tableau 8. Comparaison de la composante O1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	42
Tableau 9. Comparaison de la composante K1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	43
Tableau 10. Comparaison de la composante K2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	43
Tableau 11. Comparaison de la composante P1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	44
Tableau 12. Comparaison de la composante Q1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	44
Tableau 13. Comparaison de la composante L2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	45
Tableau 14. Comparaison de la composante J1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	45
Tableau 15. Comparaison de la composante NO1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	46
Tableau 16. Comparaison de la composante OO1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	46
Tableau 17. Comparaison de la composante SO1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	47
Tableau 18. Comparaison de la composante NU2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	47
Tableau 19. Comparaison de la composante 2N2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).	48
Tableau 20. Scores du niveau d'eau avec marée pour l'année 2020.	48
Tableau 21. Scores du niveau d'eau résiduel pour l'année 2020.	49

Tableau 22. Scores du niveau d'eau total pour l'année 2020.	49
Tableau 23. Tempêtes prises en compte pour l'analyse des ondes de tempête.	50
Tableau 24. Scores pour les ondes de tempête pour chaque station, calculés en moyenne sur le nombre de tempêtes indiqué dans la colonne N.	50
Tableau 25. Périodes utilisées pour analyser les données de l'ADCP horizontal installé dans Second Narrows.	51
Tableau 26. Scores totaux, résiduels (sans marée) et tidaux (marée) pour cinq périodes pour le courant le long du rivage enregistré par l'ADCP horizontal installé dans Second Narrows.	52
Tableau 27. Composantes de marée analysées sur cinq périodes pour le courant le long du rivage enregistré par l'ADCP horizontal installé dans Second Narrows.	53
Tableau 28. Scores pour le courant total enregistré à quatre profondeurs sélectionnées lors de deux déploiements de l'ADCP.	54
Tableau 29. Scores pour le courant résiduel enregistré à quatre profondeurs sélectionnées lors de deux déploiements de l'ADCP.	54
Tableau 30. Scores pour le courant de marée enregistré à quatre profondeurs sélectionnées lors de deux déploiements de l'ADCP.	55
Tableau 31. Scores pour la température de surface de la mer pour la baie des Anglais (bouée 46304).	55
Tableau 32. Scores pour la température et la salinité enregistrées par la sonde CTD de la plateforme d'instruments installée dans la baie Burrard lors de deux déploiements.	55
Tableau 33. Nombre de profils CTD par région.	55
Tableau 34. Scores de l'indice de performance de Molcard et de la distance de séparation pour l'évaluation de la dérive.	56

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.	57
Figure 2. Domaine du modèle montrant la grille externe du SSS150 (ligne pointillée rouge) et la grille interne du VH20 (ligne pointillée jaune foncé).	58
Figure 3. Vitesse de surface (m/s) du SPCOG-O, du SS500 et du SSS150 pour le bras de mer Burrard.	59
Figure 4. Vitesse de surface (m/s) du SSS150 et du VH20 pour le port de Vancouver.	60
Figure 5. Vitesse de surface (m/s) du SSS150 et du VH20 pour le port de Vancouver (agrandissement sur la zone de First Narrows et Second Narrows).	61
Figure 6. Emplacements des cyclones toutes les 6 heures de 2010 à 2021.	62
Figure 7. Emplacement des deux ADCP et de l'ADCP horizontal utilisés dans l'évaluation.	62
Figure 8. Emplacement des huit marégraphes, des trois enregistrements des composantes du niveau d'eau, de la bouée de mesure de la température de surface de la mer et de la sonde CTD ancrée utilisés pour cette évaluation.	63
Figure 9. Sous-régions utilisées pour l'analyse des profils CTD : 1) baie Howe, 2) baie des Anglais, 3) port de Vancouver, 4) port de Vancouver-Est, 5) Port Moody et 6) Indian Arm.	64
Figure 10. Niveau d'eau moyen pour le domaine externe du SSS150, calculé sur la période de la simulation rétrospective de cinq ans de 2017 à 2021.	65
Figure 11. Niveau d'eau moyen pour le domaine interne du VH20, calculé sur la période de la simulation rétrospective de cinq ans de 2017 à 2021.	66
Figure 12. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Darrell Bay en 2020.	67
Figure 13. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Point Atkinson en 2020.	68
Figure 14. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Sandy Cove en 2020.	69
Figure 15. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Kitsilano en 2020.	70
Figure 16. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Ambleside en 2020.	71
Figure 17. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Vancouver en 2020.	72
Figure 18. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Port Moody en 2020.	73
Figure 19. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Indian Arm Head en 2020.	74
Figure 20. Résumé de la stabilité temporelle des scores du niveau d'eau pour chaque modèle évalué (rangées); les panneaux de gauche indiquent le biais et la CRMSE du niveau d'eau total et les panneaux de droite montrent la CRMSE avec marée et sans marée; chaque couleur représente une station différente et chaque marqueur une année différente.	75
Figure 21. Spectres totaux du niveau d'eau (en haut) et spectres d'erreur (en bas) pour la station de Sandy Cove en 2018.	76

Figure 22. Spectres totaux du niveau d'eau (en haut) et spectres d'erreur (en bas) pour la station du port de Vancouver en 2019.	77
Figure 23. Analyse des ondes de tempête pour la station de mesure du niveau d'eau de Darrell Bay.	78
Figure 24. Analyse des ondes de tempête à la station de mesure du niveau d'eau de Sandy Cove.	79
Figure 25. Analyse des ondes de tempête pour la station de mesure du niveau d'eau du port de Vancouver.	80
Figure 26. Analyse des ondes de tempête à la station de mesure du niveau d'eau de Port Moody.	81
Figure 27. Analyse des ondes de tempête pour la station de mesure du niveau d'eau de Indian Arm.	82
Figure 28. Emplacement des observations et diagrammes de dispersion avec les principaux axes de variance pour l'ADCP horizontal à Second Narrows. Les lignes de grille circulaires indiquent la vitesse en m/s. La plage de dates indiquée ici va du 13 juin 2020 au 1 ^{er} mai 2021 (322 jours).	83
Figure 29. Période d'échantillonnage en juin 2020 comparant le modèle et les données pour le courant le long du rivage à l'ADCP horizontal de Second Narrows, montrant le courant total (en haut), le courant résiduel (au milieu) et l'erreur de courant totale (en bas).	84
Figure 30. Courants résiduels à l'ADCP de la station BUW02 à une profondeur de 21,9 m.	85
Figure 31. Courants résiduels à la station d'ADCP BUW02 à une profondeur de 40,4 m.	86
Figure 32. Courants moyens (première colonne) et corrélations vectorielles pour les courants totaux (deuxième colonne), de marée (troisième colonne) et résiduels (quatrième colonne) pour le déploiement de l'ADCP à la station BUW02. La direction moyenne est mesurée dans le sens horaire à partir du nord.	87
Figure 33. Spectres rotatifs pour le courant total provenant de l'ADCP de la station BUW02 à une profondeur de 21,9 m.	88
Figure 34. Spectres rotatifs pour le courant total provenant de l'ADCP de la station BUW02 à une profondeur de 40,4 m.	89
Figure 35. Ellipses de courant pour M2 provenant de l'ADCP de la station BUW02.	90
Figure 36. Ellipses de courant pour S2 provenant de l'ADCP de la station BUW02.	91
Figure 37. Ellipses de courant pour N2 provenant de l'ADCP de la station BUW02.	92
Figure 38. Ellipses de courant pour K1 provenant de l'ADCP de la station BUW02.	93
Figure 39. Ellipses de courant pour O1 provenant de l'ADCP de la station BUW02.	94
Figure 40. Ellipses de courant pour Q1 provenant de l'ADCP de la station BUW02.	95
Figure 41. Courants résiduels à l'ADCP de la station BIIP à une profondeur de 15,95 m.	96
Figure 42. Courants résiduels à l'ADCP de la station BIIP à une profondeur de 36,95 m.	97
Figure 43. Spectres rotatifs pour le courant total provenant de l'ADCP de la station de la baie Burrard à une profondeur de 15,9 m.	98

Figure 44. Spectres rotatifs pour le courant total à partir de la station ADCP de la baie Burrard à une profondeur proche du fond de 36,9 m.....	99
Figure 45. Courants moyens (première colonne) et corrélations vectorielles pour les courants totaux (deuxième colonne), de marée (troisième colonne) et résiduels (quatrième colonne) pour le déploiement de l'ADCP de la baie Burrard.	100
Figure 46. Ellipses de courant pour M2 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.	101
Figure 47. Ellipses de courant pour S2 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.....	102
Figure 48. Ellipses de courant pour N2 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.	103
Figure 49. Ellipses de courant pour K1 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.....	104
Figure 50. Ellipses de courant pour O1 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.	105
Figure 51. Ellipses de courant pour Q1 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.	106
Figure 52. Ellipses de courant pour K2 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.....	107
Figure 53. Ellipses de courant pour P1 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.....	108
Figure 54. Composantes de courant observées et modélisées perpendiculairement au transect (panneaux de gauche) et le long du transect (panneaux de droite) pour un transect ADCP (EB-03_1) relevé près de First Narrows dans la baie des Anglais. La direction positive est indiquée dans chaque panneau en degrés vrais (deg V). 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.	109
Figure 55. Identique à la Figure 54, mais pour un transect ADCP (FN-01_1) relevé à travers First Narrows.....	110
Figure 56. Identique à la Figure 54, mais pour un transect ADCP (VH-02_2) relevé à travers le port de Vancouver.....	111
Figure 57. Identique à la Figure 54, mais pour un transect ADCP (SN-01_3) relevé près de Second Narrows.	112
Figure 58. Identique à la Figure 54, mais pour un transect ADCP (IA-01_6) relevé à l'est de Second Narrows.	113
Figure 59. Diagramme de dispersion du biais moyen par rapport à la CRMSE pour chaque transect pour le courant normal au transect (à gauche) et le courant le long du transect (à droite). Chaque marqueur représente un transect (les formes du marqueur se répètent en raison d'un nombre limité de formes) et sa couleur indique le modèle.....	114
Figure 60. Comparaison de l'énergie cinétique (par unité de densité, par unité de distance) pour la composante du courant normal au transect (à gauche) et la composante du courant le long du transect (à droite). Chaque marqueur représente un transect (les formes du marqueur se répètent en raison d'un nombre limité de formes) et sa couleur indique le modèle.....	114
Figure 61. Température de surface de la mer à l'entrée de la baie des Anglais (bouée 46304).	115
Figure 62. Température et salinité observées et modélisées pour la sonde CTD ancrée de la plateforme d'instruments de la baie Burrard (déploiement en mars 2019) à une profondeur de 37 m.	116

Figure 63. Température et salinité observées et modélisées pour la sonde CTD ancrée de la plateforme d'instruments de la baie Burrard (déploiement en octobre 2020) à une profondeur de 37 m.	117
Figure 64. Comparaison des profils CTD pour la région de la baie Howe.	118
Figure 65. Comparaison des profils CTD pour la région de la baie des Anglais.	119
Figure 66. Comparaison des profils CTD pour la région du port de Vancouver.	120
Figure 67. Comparaison des profils CTD pour la région du port de Vancouver-Est.	121
Figure 68. Comparaison des profils CTD pour la région de Port Moody.	122
Figure 69. Comparaison des profils CTD pour la région de Indian Arm.	123
Figure 70. Trajectoires de dérive pour les deux types de bouées dérivantes (OSKER et SCT) utilisées pour l'évaluation de la dérive.	124
Figure 71. Indice de performance de Molcard en fonction du temps dans l'expérience de dérive. La zone ombrée affiche $\pm$ un écart type.	124
Figure 72. Distance de séparation en fonction du temps dans l'expérience de dérive. La zone ombrée affiche $\pm$ un écart type.	125
Figure 73. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Point Atkinson.	126
Figure 74. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Sandy Cove.	127
Figure 75. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Kitsilano.	128
Figure 76. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Ambleside.	129
Figure 77. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel dans le port de Vancouver.	130
Figure 78. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Port Moody.	131
Figure 79. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Indian Arm Head.	132
Figure 80. Évaluation des prévisions pour les courants le long du rivage à l'ADCP horizontal situé à Second Narrows dans le port de Vancouver.	133
Figure 81. Évaluation des prévisions de la température de surface de la mer à l'entrée de la baie des Anglais (bouée 46304 d'ECCC).	134

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 d'origine à l'aide d'une simulation rétrospective pluriannuelle. Les évaluations des prévisions sur 48 heures ont été effectuées sur une période de deux mois.

Le présent document présente l'évaluation de la performance du modèle du port de Vancouver (VH20) et du modèle du sud de la mer des Salish (SSS150) dans sa partie nord. Le domaine du VH20 couvre la baie des Anglais jusqu'à Port Moody et est imbriqué dans le domaine du SSS150, qui couvre la baie Burrard et la partie sud de la mer des Salish ainsi que le fleuve Fraser jusqu'à Mission et au lac Pitt.

Les résultats montrent que les modèles à haute résolution offrent une performance semblable ou supérieure à celle des modèles à plus grande échelle dans les zones où ils se chevauchent et une performance adéquate dans les zones qui ne sont pas couvertes par les modèles à plus grande échelle. Pour la plupart des stations de mesure du niveau d'eau, l'erreur de niveau d'eau avec marée est de 5 à 6 cm (erreur quadratique moyenne corrigée [CRMSE]) et l'erreur de niveau d'eau résiduel (sans marée) est de 4 à 5 cm, ce qui porte l'erreur totale de niveau d'eau à environ 7 cm (CRMSE), à une exception près de 9 cm (CRMSE).

À Second Narrows, les deux modèles indiquent un flux d'eau sortant moyen de l'ordre de 14 cm/s et la CRMSE totale pour le courant le long du rivage varie de 16,3 à 27,0 cm/s. La température de l'eau de surface près de la baie des Anglais présente un biais froid d'environ 0,7 °C et une CRMSE modélisée de 1 °C. Les profils de température et de salinité dans la baie Howe et la baie des Anglais surpassent ceux du modèle de la mer des Salish à 500 m de résolution nominale (SS500) et ce niveau de performance est maintenu dans le reste de la baie Burrard.

L'évaluation de la dérive indique que le VH20 surpasse légèrement le SSS150, bien que de grandes incertitudes limitent la capacité de contraindre la performance. L'évaluation des prévisions a montré que l'erreur de niveau d'eau résiduel augmentait graduellement, comme prévu, avec l'échéance des prévisions.

Tous les modèles ont été exécutés sans problème de stabilité, y compris lors de périodes de phénomènes météorologiques extrêmes et de défaillance des instruments en temps réel.

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 port de Vancouver et son approche. La conception commune à tous les modèles est présentée en section 2, tandis que la section 3 décrit les éléments spécifiques au modèle du port de Vancouver. 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 port de Vancouver. Les performances du SPOP du port de Vancouver 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 (SS500) ; 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 dans 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 a été réalisée 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. PORT DE VANCOUVER

La présente section décrit le système de prévisions océaniques portuaires à résolution de 20 m du port de Vancouver.

3.1. OCÉANOGRAPHIE RÉGIONALE

La zone d'intérêt est le bras de mer Burrard (ou baie Burrard), un fjord des basses-terres continentales de la Colombie-Britannique situé entre les montagnes de la rive nord et la péninsule Burrard au sud. Le fjord commence dans l'espace entre Point Atkinson et la pointe Grey et progresse vers l'est à travers le First Narrows pour atteindre le port de Vancouver. De là, il continue vers l'est en traversant le Second Narrows, puis se sépare en deux bras pour devenir Moody Arm vers l'est et Indian Arm vers le nord. La profondeur est relativement faible dans l'ensemble, sauf dans Indian Arm, où elle atteint 220 m. Des seuils se trouvent à First Narrows et Second Narrows, ainsi qu'à l'entrée de Indian Arm.

La circulation dans le bras de mer Burrard est principalement estuarienne, l'eau plus douce s'écoulant vers l'aval près de la surface et l'eau plus salée en profondeur s'écoulant vers l'amont depuis le détroit de Géorgie. La majeure partie de l'eau douce provient des rivières

Capilano et Seymour et du ruisseau Lynn dans le port de Vancouver, ainsi que de Indian River et de la centrale électrique Buntzen dans Indian Arm; le reste arrive de petits affluents et des précipitations directes. De forts courants de marée à First Narrows et Second Narrows produisent un mélange turbulent important. Indian Arm est connu pour ses renouvellements occasionnels d'eau douce (de Young and Pond 1988).

À l'extérieur de la baie Burrard, se trouvent la baie Howe au nord-ouest et l'embouchure du fleuve Fraser au sud⁵. Le fleuve Fraser est la plus importante source d'eau douce dans le détroit de Géorgie et produit un important panache d'eau souvent turbide. Les deux bras nord et sud du fleuve Fraser, dont les embouchures sont orientées est-ouest, se séparent à New Westminster, où environ 80 % de l'écoulement passent par le bras sud. Le fleuve se divise de nouveau amont à l'île Douglas, et l'embranchement de la rivière Pitt s'étend vers le nord jusqu'au lac Pitt, un grand lac soumis aux marées.

3.2. DOMAINE ET CONFIGURATION

La configuration de réduction d'échelle du modèle du port de Vancouver comprend une grille extérieure et intérieure (figure 2). La grille extérieure correspond au modèle du sud de la mer des Salish 150 (ci-après SSS150) et a une résolution approximative de $(dx, dy) = (129, 98)$ m. Elle comporte trois limites ouvertes : à l'ouest, du côté ouest de la baie Howe jusqu'à l'extrémité nord de l'île Galiano; au sud, en partant 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 correspond au modèle du port de Vancouver 20 (ci-après VH20) et a une résolution approximative de $(dx, dy) = (26, 19)$ m. Elle commence par une limite ouverte ouest à l'embouchure de la baie des Anglais et couvre tout le port de Vancouver, et se termine par une limite ouverte nord à l'embouchure de Indian Arm. Ces deux grilles sont des raffinements de la grille du SPCOG-O, un raffinement de la grille mondiale tripolaire (Madec and Imbard 1996) et partagent donc la même rotation de grille locale. La représentation du First Narrows occupe environ 7 et 35 cellules des grilles SSS150 et VH20, respectivement, et celle du Second Narrows, environ 3 et 12 cellules des grilles SSS150 et VH20, respectivement.

La bathymétrie est constituée à partir des données du Service hydrographique du Canada (SHC) qui ont été transférées au CGVD28 (Mitchell O'Flaherty-Sproul, comm. pers.) et combinées, lorsqu'elles sont disponibles, avec les 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 pour le calcul du masque terrestre. Nous imposons une profondeur minimale de 4 m pour assurer la stabilité du modèle à marée basse, car NEMO 3.6 n'a pas de formulation du processus périodique 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 reproduit l'élévation de la surface de la mer à mesure que le niveau d'eau monte et descend. L'espacement vertical nominal de la grille est hérité du modèle de la mer de Salish à 500 m de résolution nominale (ci-après SS500), une composante du SPCOG-O version 2 (Paquin *et al.* 2021b) et varie de 1 m près de la surface à 27 m en profondeur.

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

Pour contraster la résolution des modèles, nous avons tracé la vitesse de la couche de surface pour trois niveaux d'agrandissement sur les figure 3, figure 4 et figure 5. À la figure 3, nous voyons que le SPCOG-O et le SS500 n'offrent aucune représentation de la majorité du bras de mer Burrard et de jet de marée à la sortie du First Narrows, alors que le SSS150 englobe les

deux. La figure 4 illustre le SSS150 et le VH20 pour les zones communes, où nous voyons des jets de marée qui sont beaucoup plus définis dans le modèle à haute résolution. La figure 5 présente un agrandissement de la figure 4.

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

3.3. INITIALISATION

La simulation rétrospective du SSS150 commence le 23 décembre 2016, et nous désignons les neuf premiers jours de la simulation comme période d'ajustement initial. Nous considérons donc les données de sortie du SSS150 à partir du 1^{er} janvier 2017 aux fins d'évaluation. Les conditions initiales du modèle VH20 sont interpolées à partir des conditions du SSS150 le 24 décembre 2016, un jour après le début de la période d'ajustement initial du SSS150. De même, nous évaluons les données de sortie du VH20 à partir du 1^{er} janvier 2017.

La source principale des conditions initiales pour le SSS150 est le modèle de forçage SS500, où la température, la salinité, la hauteur de la surface de la mer et les vitesses tirées d'une simulation rétrospective du SS500 sont interpolées dans le domaine du SSS150. Au besoin, nous utilisons une extrapolation horizontale de type inondation près des côtes et une extrapolation verticale près du fond pour assurer l'initialisation de tous les points de la grille.

Le modèle SS500 ne représente qu'une partie du bras de mer Burrard : le domaine se termine à l'extérieur du First Narrows. Pour initialiser la zone à l'est du First Narrows, nous utilisons la température et la salinité interpolées spatialement et temporellement à partir d'une climatologie actualisée (Foreman *et al.* 2008), nous extrapolons la hauteur de la surface de la mer à partir de la limite du SS500 dans la baie des Anglais jusqu'à Indian Arm Head et nous diminuons la vitesse à zéro dans le First Narrows. De même, le modèle SS500 ne représente pas le fleuve Fraser en amont du pont de Port Mann. Nous extrapolons ici les conditions du SS500 à partir des environs du pont de Port Mann (température presque uniforme et salinité presque nulle) jusqu'à la rivière Pitt, au lac Pitt et au bras principal jusqu'à Mission. L'extrapolation d'eau douce dans le lac Pitt est considérée comme raisonnable puisque le lac est connu pour être composé d'eau douce. Cependant, l'extrapolation de la température dans le lac Pitt établit une valeur presque uniforme dans tout le lac – ce qui n'est probablement pas réaliste. Bien que nous nous attendions à un ajustement initial de la température vers un état plus réaliste au fil de l'avancement de la simulation rétrospective, nous n'avons pas de données d'observation dans le lac Pitt pour le confirmer. Le rôle du lac Pitt dans le modèle est de permettre à une partie de l'énergie de marée qui atteint la fourche de l'île Douglas de se propager régulièrement de façon dynamique et, par conséquent, de ne pas devoir avoir une limite ouverte sur la rivière Pitt en aval du lac.

Bien que ces extrapolations de la hauteur de la surface de la mer et de la vitesse soient des estimations brutes des conditions initiales dans ces zones, elles sont continuées dans l'espace et adéquates pour un démarrage dynamique de la simulation rétrospective du SSS150 et disparaissent après quelques cycles de simulation des marées.

3.4. FORÇAGE DES LIMITES OUVERTES

Les limites ouvertes ouest et sud du SSS150 sont forcées à l'aide des données de sortie instantanées du SS500 et mises à jour toutes les heures. La vitesse barocline et les conditions

à la limite du traceur utilisent directement les données instantanées horaires avec la condition à la limite de relaxation de flux (Martinsen and Engedahl 1987). La condition barotrope à la limite ouverte est de type Flather (Flather 1976), où nous utilisons la composante résiduelle du SS500 et l'augmentons avec les 15 composantes de marée répertoriées dans le tableau 1. Pour trouver la composante résiduelle du SS500, nous analysons les marées du SS500 sur cinq périodes d'un an (de 2017 à 2021) et utilisons la moyenne des cinq périodes d'analyse pour synthétiser le signal de marée barotrope et le soustraire du SS500 lors de la génération du forçage des limites. Des corrections nodales sont appliquées à chaque heure.

Les huit premières composantes énumérées dans le tableau 1 sont tirées d'une analyse harmonique des marées d'une seule année du SS500. Nous commençons par l'analyse pour forcer les marées à la limite du SSS150 et nous effectuons une simulation sur un an. L'analyse de la simulation sur un an révèle les asymétries d'amplitude et de phase aux stations du domaine, et nous ajustons le forçage des limites pour réduire les asymétries systématiques. Les sept autres composantes mineures de marée sont estimées aux limites du modèle par inférence. L'inférence est approximative et nous recourons encore une fois à une simulation sur un an pour trouver les asymétries et ajuster les limites en conséquence. Ce processus permet de réduire les erreurs de niveau d'eau (voir section 5). La disponibilité de la base de données sur les marées de l'atlas [FES2022](#) à la fin de 2022 offre l'occasion de revoir le forçage des marées dans une prochaine révision.

La limite ouverte est du SSS150 à Mission utilise une condition limite de hauteur de la surface de la mer forcée par les données sur le niveau d'eau du marégraphe de Mission (08MF024) avec une condition d'absence de gradient pour la vitesse barotrope et de zéro pour la vitesse barocline. Mission est située en amont de la limite du coin salé; la salinité est donc réglée à zéro et la température spécifiée en utilisant la climatologie de (Allen and Wolfe 2013). La mise à jour des limites a lieu toutes les 30 minutes.

Lorsqu'on contraint uniquement le niveau d'eau à la limite de Mission, la physique interne du modèle détermine implicitement le débit. Le contrôle dominant ici est le frottement sur le fond dans le Fraser, et il faut le régler pour qu'il corresponde au niveau d'eau aux stations en aval de Mission et au débit. Un effort de réglage a été déployé pour obtenir un champ de frottement sur le fond spatialement variable qui réduit au minimum ces erreurs.

L'analyse des simulations effectuées pendant le processus d'élaboration a révélé que le biais de la hauteur de la surface de la mer dans les modèles de forçage, le SPCOG-O et le SS500, est de l'ordre de 12 cm par rapport au système canadien de référence altimétrique de 1928 ([CGVD28](#)) dans le sud de la mer des Salish. Parallèlement, les données du marégraphe à Mission pour le forçage de la limite est se trouvent dans le système de référence CGVD28. Pour éviter d'imposer une erreur systématique de l'ordre de 12 cm dans la pente hydraulique le long du bas Fraser, il faut relever la limite de Mission ou abaisser les limites ouest et sud. Ici, nous choisissons cette dernière option et appliquons un décalage de -12 cm à la hauteur de la surface de la mer résiduelle dans le SS500 aux limites ouvertes ouest et sud. Ce décalage de -12 cm est une estimation de la différence entre le géoïde dans le CGVD28 et le système EGM-DIR-R4 utilisé par le SPCOG-O/SS500; cette estimation sera révisée dans des travaux futurs.

Les conditions aux limites du VH20 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 et la vitesse barocline et les traceurs utilisent le schéma de relaxation du flux. La raison d'être d'une fréquence 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 donc pas de discontinuité à cette limite.

NEMO interpole tout le forçage des limites ouvertes de façon linéaire dans le temps entre les mises à jour pendant la simulation afin d'éviter de transmettre des discontinuités aux limites ouvertes.

3.4.1. Modèle de marée non stationnaire

Les simulations rétrospectives et par pseudo-analyse couvrent des périodes passées, de sorte que les données en temps quasi réel du marégraphe à la station de Mission sont disponibles, et nous utilisons ces données directement pour la condition de la hauteur de la surface de la mer à Mission pour le SSS150. Nous avons besoin d'une prévision ou d'une solution de rechange pour remplacer les données pour les prévisions et les périodes où les données de Mission ne sont pas disponibles ou utilisables. Le niveau d'eau à Mission est un niveau mixte de marée fluviale : les marées ne sont pas stationnaires en raison de l'importante variation saisonnière du débit du fleuve. Pour construire un modèle de prévision pour cette marée non stationnaire, nous utilisons le progiciel d'analyse NS_TIDE (Matte *et al.* 2013). Le modèle non stationnaire pour le niveau d'eau à Mission est élaboré à l'aide du progiciel en mode d'analyse, puis utilisé pour synthétiser les estimations du niveau d'eau en mode de prévision, à peu près de la même façon que lorsqu'on utilise T_TIDE (Pawlowicz *et al.* 2002). Pour l'analyse, l'outil prend comme données d'entrée une série chronologique du marégraphe d'intérêt, un marnage diurne en aval et une série chronologique pour un ou plusieurs prédictors, et il utilise une procédure d'ajustement pour arriver à un modèle et à un décalage optimal pour chaque prédictor. Comme données d'entrée, la phase de prévision utilise le modèle, le marnage diurne en aval et les séries chronologiques des prédictors avec des décalages pour calculer le niveau d'eau au marégraphe d'intérêt. Ici, le marégraphe d'intérêt est celui de Mission. Nous avons choisi le marégraphe de Steveston pour produire le marnage diurne et le niveau d'eau résiduel comme prédictors et le marégraphe de Hope pour fournir le débit et le niveau d'eau comme prédictors supplémentaires. Nous avons calculé le modèle à l'aide des données de 2014, et le modèle est en mesure de reproduire le marégraphe de Mission avec une RMSE de 0,21 m sur une période historique. Ce niveau d'erreur est jugé adéquat à cette fin, mais nous pourrions revoir ce modèle pour les révisions futures du SSS150.

Bien que ce modèle convienne comme prévision ou solution de rechange pour le marégraphe de Mission et que l'entrée du marnage diurne soit déterministe, il dépend de deux marégraphes en temps quasi réel comme prédictors. Nous avons également besoin d'une prévision ou d'une solution de rechange pour les prévisions et l'indisponibilité des données. Le tableau 2 énumère ces prédictors, leurs décalages, la solution de rechange utilisée pour chacun et l'échelle de temps de transition que nous utilisons pour passer des dernières données valides à la solution de rechange. Cette échelle de temps de transition est destinée à éviter les permutations discontinues entre les données et la solution de rechange.

Un contrôle de la qualité de ces sources de données est également nécessaire afin d'atténuer l'incidence des mauvaises données, car les flux de données en temps quasi réel ne font pas l'objet d'un contrôle de la qualité manuel. Nous utilisons une invalidation automatisée fondée sur un seuil pour rejeter les données erronées et les remplacer par les données de rechange. La fourniture de données de rechange permet au modèle de continuer à fonctionner lorsque les flux de données ne sont pas disponibles, moyennant une dégradation modeste de la qualité de la simulation dans le fleuve Fraser.

3.5. APPORT EN EAU DOUCE

Bien que le fleuve Fraser soit la source d'eau douce la plus importante dans le domaine du SSS150, plusieurs autres rivières se déversent également dans la région. Le tableau 3 répertorie les neuf qui sont configurées; les données de cinq d'entre elles sont disponibles en

tant que flux de données en temps quasi réel et celles des quatre autres sous forme de climatologie mensuelle. Nous avons calculé une climatologie mensuelle pour chacune des cinq sources en temps quasi réel pour les utiliser comme solution de rechange si l'un des flux de données en temps réel n'est pas disponible. Le contrôle de la qualité fondé sur un seuil est mis en œuvre pour rejeter les mauvaises données et les remplacer par les données climatologiques de rechange sur une échelle de transition de cinq jours. Ces sources de débit sont entrées dans le modèle sous forme de moyennes quotidiennes et mises à jour une fois par jour. La température de l'eau pour toutes les sources d'eau douce suit une climatologie (Allen and Wolfe 2013).

Le ruissellement prévu pour ces entrées est estimé en faisant persister l'anomalie du ruissellement (différence par rapport à la climatologie) au moment des dernières bonnes données pour la période de prévision. Une conséquence de cette approche est que nous pouvons parfois sous-estimer ou surestimer le débit. Par exemple, si les données les plus récentes sur le ruissellement tirées d'un marégraphe s'arrêtent juste avant un important ruissellement, notre méthode maintiendra la faible valeur du ruissellement pour la durée de la prévision, ce qui pourrait introduire un biais positif de salinité près de la surface à proximité de l'embouchure de la rivière pendant la période de prévision. De même, si les données du marégraphe se terminent au pic d'un important ruissellement, cette valeur persistera pendant la période de prévision alors que le ruissellement diminue, et pourrait entraîner un biais négatif de salinité près de la surface. Cependant, comme la pseudo-analyse quotidienne est exécutée avec les dernières données réelles du marégraphe, nous n'accumulons pas ces erreurs en raison de la stratégie de persistance. Un modèle hydrologique qui calcule les débits à partir des prévisions atmosphériques pourrait améliorer cette situation.

3.6. MODÈLE DES GLACES

La glace de mer ne se forme pas dans le bras de mer Burrard et la baie Howe. Cependant, de la glace de rivière peut se former dans le fleuve Fraser pendant de courtes périodes, par exemple pendant des coups de froid en hiver. Nous n'avons pas de mesures de cette glace de rivière qui pourraient servir à valider un modèle des glaces. C'est pourquoi nous choisissons de configurer la fonction « ice-if » de NEMO avec une climatologie des glaces vide plutôt qu'un modèle dynamique des glaces.

3.7. STABILITÉ DU SYSTÈME DE MODÉLISATION

Le modèle démarre dynamiquement, comme décrit précédemment, et simule la période rétrospective de cinq ans et un ensemble de 55 prévisions sans échec de la simulation. Bien que cela ne soit pas définitif, cela prouve que le modèle numérique est stable, sous réserve des conditions de forçage vécues au cours de cette période d'évaluation, notamment plusieurs événements inhabituels :

- En novembre 2021, les basses-terres continentales de la Colombie-Britannique ont connu de graves inondations provoquées par un système de rivière atmosphérique qui s'est traduit par d'importantes précipitations en peu de temps et des vents violents qui ont fait échouer une barge sur la plage près de la baie des Anglais. Les niveaux de débit du Fraser sont restés bien au-delà de la norme pour l'automne pendant plusieurs jours. Même si le débit maximal était comparable ou inférieur à la crue nivale annuelle, l'augmentation et la baisse rapides étaient inhabituelles. Les modèles SSS150 et VH20 sont demeurés stables tout au long de la période de vents violents et de débit inhabituel.
- En décembre 2021, les basses-terres continentales de la Colombie-Britannique ont connu une vague de froid suffisamment marquée pour que de la glace de rivière se forme dans le

bas Fraser. Les médias ont rapporté la présence de glace de rivière près de Maple Ridge et de blocs de glace en aval près du pont Patullo et de New Westminster. Bien que l'absence d'un modèle dynamique des glaces n'ait pas permis de simuler cette glace, le substitut « ice-if » a maintenu la température de la rivière au-dessus du point de congélation et le modèle est demeuré stable.

- La vague de froid de décembre 2021 a également entraîné la mise hors service du marégraphe de Mission pendant plusieurs semaines. Pendant ce temps, les données de rechange des données manquantes du marégraphe ont été activées et le modèle a fonctionné sans défaillance.

Le système d'automatisation (« port_models Maestro suite ») qui séquence les exécutions quotidiennes de la pseudo-analyse et des prévisions a été exploité par la grappe de calcul générique pour la science (GCGS) pendant un an (de mai 2021 à avril 2022) pour les grilles du SSS150 et du VH20 (c.-à-d. le système de prévisions océaniques portuaires du port de Vancouver). En mars 2022, le SHC a assumé cette responsabilité et a exploité le système pendant plus d'un an.

Les simulations de stress systématiques, y compris, mais sans s'y limiter, l'application d'un forçage exagéré pour sonder les limites de stabilité, n'ont pas été effectuées au moment de la rédaction du présent rapport et sont réservés 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

$$\gamma^2 = \frac{\text{CRMSE}^2}{\Sigma(\mathcal{X}_o - \overline{\mathcal{X}_o})^2},$$

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

$$\text{PEARSONR} = \frac{\Sigma(\mathcal{X}_m - \overline{\mathcal{X}_m})(\mathcal{X}_o - \overline{\mathcal{X}_o})}{\sqrt{\Sigma(\mathcal{X}_m - \overline{\mathcal{X}_m})^2 \Sigma(\mathcal{X}_o - \overline{\mathcal{X}_o})^2}},$$

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)

$$\text{VECTORR} = \frac{\Sigma(\mathcal{X}_m - \overline{\mathcal{X}_m})^* (\mathcal{X}_o - \overline{\mathcal{X}_o})}{\sqrt{\Sigma(\mathcal{X}_m - \overline{\mathcal{X}_m})^2 \Sigma(\mathcal{X}_o - \overline{\mathcal{X}_o})^2}},$$

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 des 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 RMSE, 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 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

$$D(t) = |x_o(t) - x_m(t)|$$

où x_o et x_m sont les positions dde 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 RMSE) 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

Il s'agit ici d'évaluer la performance des modèles SSS150 et VH20, et d'inclure dans la mesure du possible des comparaisons avec les résultats des modèles à plus grande échelle SPCOG-O et SS500. 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, ainsi que sous forme de moyennes quotidiennes pour les courants et les traceurs 3D. Notez que pour des raisons pratiques,

l'acronyme anglophone CIOPS-W 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 VH20 sont enregistrés sous forme d'instantanés à fréquence de cliché horaire pour permettre des comparaisons utilisant l'analyse harmonique des marées. Les figure 7, figure 8 et figure 9 illustrent l'emplacement des données d'observation utilisées pour évaluer la performance des modèles.

Nous limitons l'évaluation au sous-ensemble nord-ouest du SSS150 couvrant une partie de la mer des Salish près de l'entrée de la baie Howe et de la baie des Anglais, la baie Howe et le bras de mer Burrard. Le reste du domaine couvrant le bas Fraser et la rivière Pitt est évalué dans un document semblable consacré au système de prévisions océaniques portuaires à résolution de 30 m du sud du fleuve Fraser (Dunphy *et al.* Sous presse) afin d'éviter les chevauchements.

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 dans le tableau 4, pour lesquelles nous avons des données sur le niveau d'eau pour notre période de simulation rétrospective pour les huit premières stations et les composantes calculées à partir d'enregistrements d'au moins 365 jours de longueur pour trois stations supplémentaires. La liste des stations commence depuis l'extérieur du bras de mer Burrard et progresse vers l'est, puis vers le nord, comme indiqué à la figure 8.

5.1.1. Hauteur moyenne de la surface de la mer

Les figure 10 et figure 11 illustrent le niveau d'eau moyen sur cinq ans (de 2017 à 2021 inclusivement) pour les grilles du SSS150 et du VH20, respectivement. Dans la grille du SSS150, nous voyons que la pente hydraulique le long du bas Fraser domine l'étendue. Parallèlement, dans le VH20, nous voyons des dépressions du niveau moyen de l'eau au First et au Second Narrows.

5.1.2. Niveau d'eau avec marée

Les composantes de marée sont évaluées à chaque station dans le tableau 4 et pour 15 composantes de marée, du tableau 5 au tableau 19. Nous calculons l'amplitude et la phase observées avec T_TIDE à partir des données sur le niveau d'eau de 2020 pour les huit premières stations et nous incluons les incertitudes fournies par T_TIDE. Les valeurs des trois dernières stations proviennent de données historiques fournies par le SHC. Les amplitudes et les phases du modèle sont calculées à partir de l'année de simulation 2020 et présentées sous forme d'erreurs d'amplitude, de phase et de marée par rapport aux valeurs observées. Les valeurs de 0,000 ou de 0,0 découlent seulement de l'inclusion de trois décimales ou bien une seule dans notre analyse et ne doivent pas être considérées comme exactement nulles, mais comme étant arrondies à zéro.

Les résultats du SPCOG-O sont inclus aux fins d'exhaustivité, bien que cette sous-section porte sur la représentation des marées du SSS150 et du VH20. 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. L'erreur de marée correspond au score le plus révélateur et recevra le plus d'attention, tandis que les erreurs d'amplitude et de phase sont incluses pour montrer comment chacune contribue à l'erreur de marée.

Les huit premières composantes présentées (M2, S2, N2, K1, O1, Q1, K2 et P1) sont incluses dans le forçage des modèles à plus grande échelle SPCOG-O et SS500 et les ajustements aux quatre modèles sont cohérents. Les sept composantes restantes (L2, 2N2, NU2, J1, NO1, OO1, SO1) ne font pas partie du forçage des limites ouvertes des modèles SPCOG-O et SS500, mais elles peuvent être introduites par un autre mécanisme dans ces modèles (y compris, mais sans s'y limiter, par génération non linéaire dans le domaine où une telle voie existe). Nous les incluons dans les tableaux parce que certaines semblent nettement en décalage de phase par rapport aux ajustements des observations, ce qui mène à des erreurs de marée non négligeables, ainsi que pour démontrer que leur inclusion dans le forçage des modèles à plus haute résolution est une amélioration systématique. Il convient de noter que les résultats pour NO1 sont inclus tels qu'indiqués par T_TIDE, bien que cette composante soit forcée en tant que M1 (Schureman 1958, p. 41). M1 et NO1 sont considérées comme interchangeables aux fins actuelles parce que nous analysons des enregistrements sur un an. De plus amples détails sont disponibles dans (Woodworth 2019).

En commençant dans le tableau 5 pour M2, la plus grande composante dans la région, nous voyons que le modèle de forçage SS500 fonctionne bien, laissant peu de place à l'amélioration à une résolution plus élevée. Le SSS150 donne une légère amélioration dans ce domaine, éliminant quelques mm d'erreur de marée à la plupart des stations. Le VH20 fonctionne de la même façon que le SSS150, sauf à Port Moody, où nous trouvons une erreur de phase de 2,56 degrés. Pour N2, l'indice de comparaison est comparable entre le SS500 et le SSS150 avec une amplitude légèrement meilleure mais des phases légèrement dégradées pour le SSS150, de sorte que l'erreur de marée change peu. Pour S2, nous avons une légère amélioration de l'amplitude et de la phase qui produit une légère amélioration de l'erreur de marée. Pour O1, nous avons une légère dégradation de l'amplitude d'environ 2 mm, mais une amélioration d'environ 1,5 degré dans la phase, conduisant à une amélioration d'environ 0,5 cm de l'erreur de marée. Pour K1, l'indice de comparaison est comparable entre le SS500, le SSS150 et le VH20. Pour K2, l'erreur dans le SSS150 et le VH20 est environ la moitié de celle dans le SS500 en raison d'un ajustement de phase. Pour P1 et Q1, l'indice de comparaison est de nouveau comparable entre les trois modèles à plus haute résolution.

Parallèlement, il n'en va pas de même pour les sept composantes supplémentaires. Ces composantes sont généralement petites et leur amplitude varie d'environ 2 à 5 cm dans la région. Pour L2, J1, NO1, OO1, NU2 et 2N2, nous trouvons ces composantes sous-représentées en amplitude et avec de grandes erreurs de phase dans le SPCOG-O et le SS500. Simultanément, dans le SSS150 et le VH20, nous constatons une meilleure représentation de l'amplitude et de la phase avec des erreurs de marée beaucoup plus petites. Enfin, la composante SO1 est anormale car elle est surreprésentée en amplitude dans le SPCOG-O et le SS500, mais avec une erreur de phase importante, de sorte que le SSS150 et le VH20 produisent à nouveau de plus petites erreurs de marée.

Chacune de ces sept composantes supplémentaires améliore considérablement l'erreur de marée pour les modèles à plus grande échelle, ce qui contribue à la réduction globale de la CRMSE du niveau d'eau signalée précédemment. Cependant, les tableaux montrent que les erreurs d'amplitude et de phase demeurent supérieures aux incertitudes observées pour certaines de ces composantes supplémentaires dans les modèles à plus haute résolution. D'autres efforts de réglage relatif aux marées pourraient permettre de réduire ces erreurs.

5.1.3. Niveau d'eau résiduel

Les figure 12 à figure 19 montrent les comparaisons du niveau d'eau résiduel pour chaque modèle. Pour les stations les plus éloignées, nous constatons que les quatre modèles

fonctionnent de la même façon. Pour les stations intérieures, nous voyons que le SSS150 et le VH20 fonctionnent également de la même façon, ce qui est prévisible.

5.1.4. Scores globaux

Nous assemblons ici des tableaux qui comparent la performance de chaque modèle pour chaque station pour l'année 2020; les entrées manquantes dans le tableau sont attribuables à des stations qui ne sont pas situées dans le domaine des modèles ou à des données manquantes ou inutilisables. Le niveau d'eau dans le SPCOG-O et le SS500 est réduit de 12 cm pour cette analyse, de sorte que notre analyse est fondée sur le même système de référence GCVD28.

Le tableau 20 montre les scores du niveau d'eau avec marée pour l'année 2020. Les scores affichent des différences importantes entre les modèles. La CRMSE est de l'ordre de 20 cm dans le SPCOG-O, est divisée par deux à 9,5 cm dans le SS500 et est divisée presque par deux de nouveau à 5,5 cm dans le SSS150 et le VH20. Les scores sont semblables d'une station à l'autre, ce qui indique que les marées sont représentées avec une qualité semblable dans la baie Howe et le bras de mer Burrard. L'amélioration du SS500 par rapport au SPCOG-O dépasse la portée actuelle et est abordée dans (Paquin *et al.* 2021b). L'amélioration entre le SS500 et le SSS150 est attribuée au réglage de la marée appliqué aux huit composantes principales dérivées de SS500, ainsi qu'à la procédure d'inférence et de réglage utilisée pour développer le forçage pour les sept composantes supplémentaires.

Le tableau 21 indique les scores du niveau d'eau résiduel pour l'année 2020. Ici, nous constatons peu de variation entre les modèles, les scores de la CRMSE allant de 4 à 5 cm, sauf pour le fond de Indian Arm, dont la CRMSE est de 7 cm. Cette similitude entre les modèles est prévisible puisqu'une grande partie du niveau d'eau résiduel est héritée des modèles à plus grande échelle et que le même forçage de surface est appliqué à chaque modèle. Les signaux du niveau d'eau résiduel générés localement (p. ex. seiches) pourraient contribuer à cette erreur, mais ne sont pas examinés ici.

Le tableau 22 récapitule les scores totaux du niveau d'eau pour 2020. Mis à part une station anormale (Darrell Bay) présentant un biais important de 17,9 cm, le biais varie de 2,1 à 10,6 cm. Le score de la CRMSE est nettement amélioré à mesure que nous augmentons la résolution. La CRMSE est de l'ordre de 20 cm pour le SPCOG-O, de 10 cm pour le SS500 et de 7 cm pour les modèles à haute résolution SSS150 et VH20. Cette amélioration se reflète également dans le score γ^2 qui s'échelonne de façon quadratique avec la CRMSE et le score de Pearson.

Pour illustrer la stabilité des scores entre le tableau 20 et le tableau 22 au fil des ans, nous avons inclus un graphique récapitulatif à la figure 20, 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 une année différente.

En ce qui concerne le biais, nous constatons une certaine variabilité d'une année à l'autre de l'ordre de 10 cm selon la station, ce qui peut s'expliquer par la variabilité interannuelle des données qui ne sont pas saisies par le modèle ou qui peuvent être un artéfact de données incomplètes. Pour la CRMSE totale, nous observons un décalage vers des erreurs plus faibles pour les modèles à plus grande résolution et une variabilité de 1 à 3 cm d'une année à l'autre. Parallèlement, pour la CRMSE avec marée, l'erreur diminue à mesure que nous descendons dans la colonne et les scores sont stables pour chaque modèle avec une variation de l'ordre de

1 à 3 cm entre les années. La CRMSE résiduelle est également stable avec environ 2 cm de variabilité d'une année à l'autre.

Enfin, nous montrons le spectre du niveau d'eau pour Sandy Cove en 2018 et pour le port de Vancouver en 2019 sur la figure 21 et la figure 22, respectivement. Le niveau d'eau est bien représenté aux deux stations et, sur le graphique de Sandy Cove, nous pouvons voir la représentation améliorée des marées dans les modèles à plus haute résolution SSS150 et VH20, tandis qu'au port de Vancouver, nous confirmons que la performance des deux modèles est semblable pour le niveau d'eau.

5.1.5. Niveau d'eau des ondes de tempête

L'évaluation des ondes de tempête est effectuée sur huit tempêtes sélectionnées dans la base de données des tempêtes et répertoriées dans le tableau 23. Les résultats étant semblables d'une station à l'autre, nous ne présentons que cinq stations de la figure 23 à la figure 27. Le plus grand décalage du biais est observé à Darrell Bay, et les trois modèles qui couvrent la région ont une performance semblable; la performance est également comparable entre les quatre modèles à Sandy Cove. Au port de Vancouver et à Port Moody, nous constatons encore une fois une performance semblable entre les deux modèles actifs, le SSS150 et le VH20. Enfin, au fond de Indian Arm, nous n'avons des données que pour cinq des huit tempêtes et la comparaison de ces panneaux à ceux de Port Moody révèle une performance semblable, bien que le biais plus important dans Indian Arm soit évident.

La moyenne des scores correspondants pour les tempêtes, présentée dans le tableau 24, indique également que la performance relative aux ondes de tempête est semblable d'un modèle à l'autre. La similitude entre les modèles est prévisible, comme nous l'avons vu précédemment; le niveau d'eau des ondes de tempête est en grande partie hérité de la hiérarchie des modèles et le même forçage de surface est appliqué à chaque modèle. Il est à noter que les scores de la CRMSE sont plus faibles que ceux indiqués dans le tableau 21 (ordre de 3 cm par rapport à 4 ou 5 cm), ce qui est attribué à la stratégie de « surajustement » utilisée pour découpler le niveau de l'eau de la marée sur des périodes plus courtes centrées sur chaque tempête.

5.2. COURANTS

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

5.2.1. ADCP horizontaux

Le profileur de courant à effet Doppler (ADCP) horizontal exploité par Port Metro Vancouver fournit des mesures du courant près de la surface à Second Narrows. Le dispositif est monté sur la semelle du pont ferroviaire de Second Narrows à une profondeur de 7,34 m sous le niveau moyen de la mer et dirigé vers le nord vrai. Il est configuré pour mesurer le courant dans 65 intervalles à une résolution de 2 m, le premier commençant à 4,1 m du transducteur. Nous calculons la moyenne des intervalles 6 à 60, correspondant à la plage de 110 m entre 14,1 et 124,1 m du transducteur, avant de la diffuser sur le système d'identification automatique (SIA) pour les navires. Ce flux de données est enregistré à l'aide d'un récepteur du SIA, gracieuseté d'Ocean Networks Canada. Les données disponibles s'étendent du 21 novembre 2017 au 1^{er} février 2022, mais il y a plusieurs lacunes dans les données. Nous analysons ces données sur cinq périodes choisies pour éviter les écarts importants (de 131 à 322 jours) qui sont énumérés dans le tableau 25. Il existe également un ensemble de composantes, utilisées pour la prévision des courants à Second Narrows et fournies par le SHC (Marlene Jeffries, comm. pers.). Ces composantes ont été construites à l'aide d'un ensemble de données antérieur (du

21 juin 2011 au 20 juin 2012), et nous remarquons certaines différences dans la préparation des données (la moyenne était calculée sur la plage de 80 m entre 20 et 100 m) et dans le post-traitement (les composantes ont été augmentées de 7 % de sorte que les vitesses moyennes prévues correspondent aux vitesses moyennes observées).

La figure 28 montre l'emplacement de l'instrument, ainsi qu'un diagramme de dispersion pour la période la plus longue (« year2020b ») qui révèle que le débit est presque rectiligne (diagramme de dispersion supérieur gauche) avec >99 % de la variance expliquée par l'axe principal de la variance. C'est pourquoi nous nous concentrerons sur cette composante, qui correspond au courant le long du rivage où le positif est à peu près vers l'est en direction de Port Moody. Les diagrammes de dispersion correspondants pour le SSS150, le VH20 et les courants synthétisés à partir du fichier de composantes sont également indiqués sur la figure 28.

La figure 29 présente un échantillon de six jours comparant les données, les résultats des modèles et le courant reconstitué d'après les composantes de marée. Le panneau du haut montre le courant total le long du rivage. Nous voyons que le SSS150 correspond généralement aux pics des extrêmes du courant ou qu'il les sous-représente, que le VH20 correspond à ces pics ou qu'il les sur-représente, et que le courant reconstitué correspond aux pics ou qu'il les sur-représente également, mais davantage que le VH20 lorsqu'il le fait. Le panneau du milieu montre le courant résiduel, qui affiche des valeurs négatives (flux d'eau sortant) la plupart du temps pour les modèles et les observations, ainsi que les similitudes entre la variation du courant résiduel des modèles et des observations. Enfin, le panneau du bas illustre l'erreur de courant total; les courbes d'erreur du SSS150 sont dominées par les sous-estimations, le courant d'après les composantes est dominé par les surestimations et les erreurs du modèle VH20 se situent en grande partie entre ces extrêmes.

Pour quantifier cette performance, le tableau 26 présente les scores pour le débit total le long du rivage et ses composantes avec et sans marée, pour les deux modèles et la synthèse à partir des composantes. Pour le débit total, le biais est inférieur à 7 mm/s pour le SSS150 et légèrement supérieur, entre 1,5 et 3,1 cm/s pour le VH20 où, pour référence, le flux d'eau sortant moyen observé est de 12,9 à 14,4 cm/s. Les données montrent donc que nous reflétons le flux d'eau sortant estuarien d'environ 14 cm/s, qui est assez constant pour toutes les périodes analysées, bien qu'il soit sous-estimé par le modèle à la résolution la plus haute. La synthèse à partir des composantes affiche un biais négatif de 4,2 à 7,5 cm/s, qui correspond à une surestimation du flux d'eau sortant près de la surface (19,8 cm/s dans le fichier de composantes), et nous remarquons que l'ensemble de données sur les composantes est fondé sur la période précédente de juin 2011 à juin 2012 où le flux d'eau sortant près de la surface était peut-être plus élevé.

Parallèlement, la CRMSE du courant total est de 21,3 à 25,7 cm/s dans le modèle SSS150, de 16,3 à 27 cm/s dans le VH20 et de 20,5 à 31,6 cm/s pour la synthèse des composantes si nous considérons qu'elle représente les courants complets. La CRMSE du VH20 est importante pour la première période (year2018a), mais beaucoup plus petite pour les quatre autres périodes, ce qui indique que le VH20 est plus habile à saisir la variabilité totale (ce qui correspond au panneau du bas de la figure 29). Cette performance se reflète dans les scores γ^2 et de Pearson pour les quatre dernières périodes. Nous ne savons pas pourquoi la performance est mauvaise pour la période year2018a.

Les scores pour le courant résiduel sont comparables entre le SSS150 et le VH20. L'indice de comparaison ici est modeste, γ^2 variant de 0,26 à 0,86 d'une période à l'autre, ce qui indique que nous saisissons une partie de la variabilité résiduelle et que, par conséquent, nous dépassons une prédiction fondée uniquement sur les composantes (qui donnerait $\gamma^2=1$).

Enfin, pour ce qui est du courant de marée, à l'exception de la période year2018a, le VH20 surpasse le SSS150, qui surpasse la prévision fondée sur les composantes. Ici, les scores γ^2 sont d'environ 0,01 pour le VH20, indiquant que nous reflétons bien le signal de marée.

Le tableau 27 présente l'analyse harmonique des marées pour huit composantes principales au cours des cinq mêmes périodes. L'amplitude des composantes varie ici considérablement d'une période à l'autre. À M2, nous notons une différence de 15 cm/s entre les périodes les plus fortes et les plus faibles, soit une variabilité d'environ 11 %. De même, à N2 et à S2, nous avons une variabilité de 20 à 25 % des amplitudes. Au moment de la rédaction du présent rapport, la source de cette variabilité n'est pas claire. sait qu'une variabilité ou non-stationnarité interannuelle dans les marées existe dans d'autres contextes (rivières à marées, marées internes, etc.) et c'est peut-être le cas ici, bien que des problèmes de données puissent également en être responsables.

Malgré le manque de clarté sur la variabilité des valeurs observées des composantes de marées, la comparaison des modèles demeure utile. Si nous nous intéressons uniquement à M2 de la seconde à la cinquième période, nous constatons une sous-représentation constante de l'amplitude d'environ 20 cm/s dans le SSS150 qui se transforme en une surreprésentation d'environ 5 cm/s dans le VH20, mais avec des erreurs de phase similaires pour chacun, et cela se reflète dans l'erreur de marée comme une réduction d'environ 2,5 fois. Ce schéma se reproduit pour les composantes N2, S2, O1, K1, P1 et Q1 – les sous-représentations des amplitudes dans le SSS150 sont considérablement améliorées dans le VH20 avec des phases similaires qui produisent des réductions de l'erreur de marée de l'ordre de 1,5 à 3 fois. Enfin, à K2, les différences entre les modèles n'améliorent pas l'erreur de marée.

5.2.2. Courantomètres

Aucun enregistrement de courantomètre n'est disponible.

5.2.3. ADCP ancrés

Les données des ADCP sont disponibles à deux endroits dans le bras de mer Burrard (voir la figure 7), et nous sélectionnons un déploiement de chaque : BUW02 (du 1er janvier 2017 au 14 juin 2017) et BIIP (du 4 avril 2019 au 3 avril 2020). Les tableau 28, tableau 29 et tableau 30 présentent les scores de courants totaux, de courants résiduels et de courants de marée, respectivement, et nous examinerons chaque station à tour de rôle.

Pour la station BUW02, les figure 30 et figure 31 illustrent les courants résiduels à mi-profondeur (21,9 m) et près du fond (40,4 m), respectivement. À mi-profondeur, la composante est du modèle (u) affiche une faible moyenne positive, tandis que les observations montrent une moyenne négative (vers l'ouest). Pour les deux composantes, les modèles ne reflètent pas autant de variabilité que celle relevée dans les observations et l'histogramme montre un pic centré sur de petits courants. À 40,4 m, la moyenne observée dans la composante est plus petite et mieux reflétée dans le modèle. Les niveaux de variabilité, comme le montrent les histogrammes, sont meilleurs dans le VH20 que dans le SSS150.

La figure 32 représente le profil vertical de la vitesse et de la direction moyennes des courants (première colonne), ainsi que l'amplitude et l'angle de corrélation vectorielle pour les courants totaux, les courants avec marée et les courants résiduels (colonnes 2 à 4). Les courants moyens ne correspondent pas bien, le débit moyen observé se déplaçant vers l'ouest de 20 à environ 35 m de profondeur, où il tourne dans le sens antihoraire de 35 à 40 m de profondeur. Les modèles, quant à eux, présentent tous deux un débit moyen vers l'est et cette différence se reflète dans les scores de biais avec des décalages importants de l'ordre de 20 cm/s.

La performance de la corrélation vectorielle varie entre 0,6 et 0,75 et est similaire pour les courants totaux et de marée en raison d'une contribution importante du courant de marée au total. Pour l'ampleur de la corrélation vectorielle, le SSS150 surpasse en performance le VH20 de 20 à 35 m de profondeur, puis le VH20 surpasse en performance le SSS150 en dessous de cette profondeur. Parallèlement, l'angle de corrélation vectorielle chute d'environ 20 degrés dans le SSS150 à une valeur entre 5 et 10 degrés dans le VH20. Enfin, le courant résiduel est mal reproduit dans l'ampleur de la corrélation vectorielle avec des valeurs allant d'environ 0,05 à 0,25. Comme l'angle de corrélation vectorielle n'est significatif qu'à de grandes corrélations, nous ne trouvons pas le tracé de l'angle de corrélation vectorielle convaincant. Les tableaux des scores comprennent des échantillons de ces courbes de corrélation vectorielle à quatre profondeurs sélectionnées pour les courants totaux et résiduels, ainsi que les scores de la RMSE et de γ^2 à titre de corroboration. Pour le courant total, nous avons un γ^2 de l'ordre de 0,5 à 0,7 indiquant une concordance modeste; pour les autres, les scores de γ^2 sont d'environ 1 à 1,5, dénotant une mauvaise concordance. La concordance modeste du courant total se reflète également dans le γ^2 compris entre 0,4 et 0,68 du courant de marée.

Les figure 33 et figure 34 présentent les spectres rotatifs pour les niveaux de profondeur de 21,9 et 40,4 m, respectivement. À 21,9 m, le SSS150 a une performance semblable à celle du VH20 à des fréquences plus basses et les deux modèles sous-représentent les signaux plus rapides qu'environ 6 cycles par jour; cette sous-représentation est plus accentuée dans le SSS150 que dans le VH20. À 40,4 m, le SSS150 est nettement moins performant que le VH20 à toutes les fréquences. Aux deux niveaux, les spectres sont aplatis à des fréquences plus élevées, ce qui peut être dû à un niveau élevé de marées non linéaires dans la région. Aucun pic marqué d'inertie n'apparaît à l'un ou l'autre des niveaux, ce qui montre que les oscillations inertielles ne sont pas importantes dans le bras de mer Burrard.

Les figure 35 à figure 40 illustrent les ellipses de marée en fonction de la profondeur pour six composantes principales (M2, S2, N2, K1, O1 et Q1) qui ont été représentées en fonction de la longueur de l'enregistrement. Ici, nous constatons qu'aucun des deux modèles ne saisit complètement les ellipses, mais que le VH20 offre une amélioration générale par rapport au SSS150. Pour chaque composante, nous pouvons voir que l'inclinaison du VH20 correspond mieux aux observations et que la réduction systématique de la taille de l'ellipse avec la profondeur dans le SSS150 est moins prononcée ou absente dans le VH20. Nous en concluons donc que le VH20 représente mieux les courants de marée à la station BUW02.

Pour la station BIIP, les figure 41 et figure 42 illustrent les courants résiduels à 15,95 m et à 36,95 m, respectivement. À la station de niveau supérieur, la performance est semblable entre les deux modèles, les niveaux de variabilité étant raisonnablement saisis par chaque modèle. Au niveau inférieur, le SSS150 présente une variabilité plus faible que le VH20.

Les figure 43 et figure 44 présentent les spectres rotatifs pour les niveaux de profondeur de 15,95 et 36,95 m, respectivement. Au niveau supérieur, nous observons une meilleure performance du VH20 que du SSS150 à presque toutes les fréquences, et en particulier aux fréquences de marée. Au niveau inférieur, le SSS150 sous-représente nettement toutes les fréquences.

La figure 45 illustre les profils des courants moyens et de corrélation vectorielle. Le courant moyen est raisonnablement bien reflété dans les deux modèles, et le VH20 fonctionne mieux près du bas de l'enregistrement. La corrélation du courant total est élevée pour les deux modèles (0,6 près de la surface, atteignant environ 0,85 en profondeur), le VH20 présentant un angle plus petit. Le courant de marée est excellent avec une corrélation vectorielle d'environ 0,94 à 0,98, le VH20 se situant à l'extrémité supérieure de cette plage pour la majeure partie de la profondeur. Cependant, les courants résiduels sont mal représentés, avec une corrélation

d'environ 0,09 et 0,38, bien que le VH20 soit constamment meilleur que le SSS150. Les tableaux des scores reflètent cette évaluation. Le γ^2 pour le courant total varie de 0,42 à 0,72; le γ^2 pour le courant résiduel est de l'ordre de 1. En ce qui concerne le courant de marée, pour les trois niveaux de profondeur supérieurs choisis, nous voyons γ^2 s'améliorer de 0,07-0,16 à 0,03-0,06 à mesure que nous passons du SSS150 au VH20, et de 0,65 à 0,12 pour le niveau le plus profond.

Les figure 46 à figure 53 illustrent les ellipses de marée pour huit composantes principales. Ici, la représentation des ellipses s'améliore lorsque nous passons du SSS150 au VH20. Une caractéristique constante de ces graphiques est la réduction de la taille des ellipses dans le SSS150 près du fond, qui n'est pas présente dans le VH20. De façon générale, l'amélioration des ellipses correspond à celle de γ^2 observée dans les tableaux des scores.

La différence de performance en profondeur entre les deux modèles peut s'expliquer par des différences de résolution qui favoriseraient le modèle VH20, des différences de frottement sur le fond ou d'autres facteurs, et cette étude est réservée à des travaux futurs.

5.2.4. Transects d'ADCP

Pendant les levés effectués par le PPO dans le bras de mer Burrard, 289 transects de courant ont été recueillis à l'aide d'un ADCP monté sur la coque d'un navire. Cinq exemples sont donnés de la figure 54 à la figure 58, d'ouest en est, ainsi que les vitesses du modèle correspondantes, avec la vitesse normale au transect indiquée à gauche et la vitesse le long du transect, à droite. La concordance entre les modèles et les mesures varie considérablement entre les transects et à l'intérieur des zones de chaque transect. Le premier transect dans la baie des Anglais montre un jet normal près de la surface (5 à 10 m) près de l'extrémité de First Narrows dans les deux modèles, qui n'est pas visible dans le panneau d'observation. Ce transect dure 41 minutes et la fréquence de cliché horaire du modèle pourrait être à l'origine de la mauvaise comparaison. Simultanément, la comparaison entre le transect à travers de First Narrows (figure 55) se compare bien à la vitesse normale et à la vitesse le long du transect, le VH20 saisissant plus de détails.

Le quatrième transect à l'ouest de Second Narrows révèle une différence marquée entre le SSS150 et le VH20 en ce qui concerne la représentation du jet normal au centre. Dans ce cas, le jet mesure environ 150 m de largeur (ce qui correspond approximativement à la largeur du chenal de navigation), contrastant avec la résolution du modèle SSS150 d'environ 96 m le long du transect; le SSS150 n'a plus qu'une ou deux cellules de grille pour représenter le courant, ce qu'il a du mal à faire. Pour sa part, le VH20 a une résolution d'environ 19 m et est capable de représenter marginalement le jet, bien qu'il semble élargi (lissé) par rapport aux mesures. Malgré la mauvaise résolution du SSS150 pour représenter la forme de ce jet, il reflète le transport grâce à la bonne performance des marées, et nous interprétons le résultat du SSS150 comme une version bien lissée du jet avec des valeurs de vitesse plus faibles. Cela correspond à l'analyse de l'ADCP horizontal à la section 5.2.1 ci-dessus, qui a montré des courants et des composantes plus faibles dans le SSS150 par rapport au VH20. Cette comparaison indique qu'une résolution supérieure à 20 m est nécessaire pour bien représenter le Second Narrows.

La figure 59 est un diagramme cible avec un marqueur par transect indiquant le biais et la CRMSE, et la figure 60 compare une mesure de l'énergie cinétique entre les résultats du modèle et les vitesses observées. Sur les deux graphiques, nous ne voyons pas d'amélioration claire de la résolution du modèle pour tous les transects. La variabilité non contrainte pourrait jouer ici un rôle démesuré dans la dégradation des comparaisons. Il est plausible que d'autres ajustements du modèle (réglage, résolution) donneraient une meilleure représentation ici. Une étude plus approfondie de l'ensemble de données des transects des ADCP est justifiée.

5.3. PROPRIÉTÉS DE L'EAU

5.3.1. Température de surface de la mer

Le domaine extérieur contient une bouée météorologique installée dans le cadre du PPO en 2019 près de l'entrée de la baie des Anglais (voir la figure 8). La figure 61 montre la comparaison du modèle pour la température de surface de la mer enregistrée de la fin de 2019 à la fin de 2021. Les trois modèles reflètent le cycle saisonnier général, et les modèles SS500 et SSS150 se suivent de près. Le SPCOG-O est biaisé en faveur du froid en été, le SS500 et le SSS150 en hiver. Les scores correspondants dans le tableau 31 montrent que le biais est d'environ $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ et que la variabilité est mieux exprimée sous la forme d'une CRMSE plus petite dans les modèles à plus haute résolution (environ $1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Le SSS150 et le SS500 utilisent la même température du forçage de surface et de l'écoulement d'eau douce, de sorte que l'on s'attend à des performances similaires.

5.3.2. Sondes CTD ancrées

Une sonde CTD ancrée a été déployée en 2019 dans le bras de mer Burrard (voir la figure 8) dans le cadre d'un effort conjoint entre Ocean Networks Canada et la Première Nation Tsleil-Waututh. La profondeur d'installation est de 37 m, et deux enregistrements de déploiement sont disponibles; des comparaisons sont présentées à la figure 62 et à la figure 63 et les scores correspondants sont présentés dans le tableau 32.

Pour la température, le SSS150 et le VH20 se suivent de près et capturent un cycle saisonnier. La température hivernale est la mieux représentée, mais la température estivale est biaisée en faveur de la chaleur, les événements de réchauffement étant surreprésentés. Ces observations sont cohérentes entre les deux enregistrements de déploiement et également confirmées par des scores similaires dans le tableau des scores avec des biais positifs d'environ $+0,3$ et $+0,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour les deux enregistrements. Le score de la CRMSE varie de 0,29 à 0,34 $^{\circ}\text{C}$ et est légèrement amélioré dans le modèle VH20.

Pour ce qui est de la salinité, les modèles ne se suivent pas aussi étroitement; le SSS150 présente un biais en faveur de l'eau douce et surreprésente les événements d'adoucissement, alors que le VH20 présente un léger biais positif. Les tendances sont qualitativement cohérentes entre les deux enregistrements de déploiement. Le tableau des scores indique un biais de $-0,36$ à $-0,20$ psu pour le SSS150 et de $+0,08$ à $+0,27$ pour le VH20, avec des scores de la CRMSE comparables entre les modèles, allant de 0,29 à 0,38 psu.

5.3.3. Profils CTD

Nous évaluons la température et la salinité mesurées par les profils CTD dans six sous-régions représentées à la figure 9; le nombre de profils par région est indiqué dans le tableau 33. La quantité de données ici est limitée, de sorte que nous analysons l'ensemble de la période de cinq ans de 2017 à 2021. Les graphiques récapitulatifs par région montrent le biais moyen comme une fonction de la profondeur dans une courbe pleine, et la zone ombrée indique une page 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.

En commençant par la région de la baie Howe, qui comprend une partie du détroit de Géorgie près de l'entrée de la baie Howe, nous résumons les comparaisons à la figure 64. Pour la température, le SPCOG-O a un biais d'environ $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ près de la surface et un biais de $+1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ à une profondeur de 8 à 12 m, qui chute à moins de $+0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ près du fond. Pour leur part, le SS500 et le SSS150 se suivent de près, avec un biais constant d'environ $+0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, sauf près de la surface où le SSS125 présente un biais négligeable. En ce qui concerne la salinité près de la

surface, le SPCOG-O est biaisé en faveur de la salinité d'environ +3 psu, tandis que le SS500 et le SSS150 sont biaisés en faveur de l'eau douce d'environ -4 psu, le SSS150 surpassant légèrement le SS500. En profondeur, le SPCOG-O est biaisé vers une salinité plus élevée d'environ +0,5 psu, mais le SSS500 et le SSS150 présentent un biais négligeable.

Les tendances dans la baie des Anglais (figure 65) sont semblables à celles de la région de la baie Howe. Le SPCOG-O est biaisé en faveur du froid (-0,75 °C) et d'un gain de salinité (+1,5 psu) près de la surface; à une profondeur de 8 à 10 m, il devient biaisé en faveur d'un gain de chaleur (+1,5 °C) et d'une perte de salinité (-2,5 psu) et en profondeur, il présente de petits biais en faveur d'un gain de chaleur et de salinité. Parallèlement, le SS500 est biaisé en faveur de gain de chaleur (+0,5 °C) et de perte de salinité (-7 psu) à la surface, et ces biais tombent avec la profondeur. Le SSS150 donne de meilleurs résultats ici, le biais commençant à environ -0,25 °C à la surface et atteignant +0,25 °C en profondeur et s'améliorant d'environ -4 psu à la surface à négligeable en profondeur. Enfin, le VH20 suit le SSS150 de très près dans cette région.

Dans la région du port de Vancouver, illustrée à la figure 66, la température est similaire dans le SSS150 et le VH20, avec un biais négligeable à la surface et une augmentation de +0,25 °C en profondeur. Pour la salinité, le SSS150 est biaisé en faveur de l'eau douce à la surface (-2 psu) et de façon négligeable en profondeur, surpassant le VH20 qui est biaisé en faveur de l'eau douce à la surface (-3,5 psu) et de gain de salinité en profondeur (+0,5 psu).

La figure 67 récapitule la région est du port de Vancouver. Pour la température, nous trouvons un biais d'environ +1 °C à la surface pour les deux modèles et un biais presque négligeable en profondeur, et pour la salinité, nous voyons que le SSS150 est systématiquement biaisé en faveur de perte (environ -0,5 à -1 psu) tout en surpassant encore une fois le VH20, qui est biaisé en faveur de perte à la surface (environ -3 psu) et de gain de salinité en profondeur (+1 psu).

La région de Port Moody illustrée à la figure 68 présente peu de profils, mais nous ne trouvons presque aucun biais de température dans le SSS150 et des biais variant entre +0,25 à +1,2 °C dans le VH20. Pour la salinité, le SSS150 affiche un biais en faveur de perte entre -0,25 et -1 psu et le VH20, un biais en faveur de perte de -0,75 à -2,5 psu en fonction de la profondeur.

Enfin, à la figure 69, nous examinons la région de Indian Arm où seul le SSS150 est actif, et nous avons un biais de +/- 0,5 °C en fonction de la profondeur et un biais de salinité douce de -1 à -0,5 psu.

5.3.4. Traversiers

Aucun traversier équipé d'instruments n'est disponible.

5.4. DÉRIVE

Nous avons mené une expérience d'évaluation de la dérive avec 28 bouées dérivantes, 2 de type SCT et 26 de type OSKER (pour plus de détails sur les types de bouées dérivantes, voir dans Hourston (2021), qui ont été déployées dans le port de Vancouver pendant les levés du PPO. La figure 70 montre les trajectoires de dérive dans le domaine du VH20. Les trajectoires de dérive sont courtes, ce qui limite l'échelle de temps de l'évaluation de l'indice de performance de la dérive. La performance du SSS150 et du VH20 est résumé par l'indice de Molcard à la figure 71 et par le score de la distance de séparation à la figure 72; les scores échantillonnés à chaque heure sont présentés dans le tableau 34.

Les deux modèles donnent des scores semblables pour ce qui est de l'indice de Molcard et des signes d'amélioration apparaissent nettement dans le modèle VH20 après environ trois heures, bien que l'écart type réduise la différence entre les modèles. Cette amélioration marginale se reflète également dans le score de la distance de séparation; ce score augmente plus lentement dans le modèle VH20 que dans le SSS150 et les marges d'écart type sont plus étroites. En bref, nous avons ici peu de preuves que la performance du VH20 surpasse celle du SSS150 pour la dérive.

En plus des mises en garde abordées à la section 4.4, nous remarquons que le nombre de bouées dérivantes est faible et que les marges d'écart type sont grandes. Ensemble, ces aspects exposent une grande incertitude dans ces résultats, qui devrait être considérée comme un premier examen de la performance en matière de dérive. D'autres travaux sont nécessaires pour limiter l'indice de comparaison du système combiné SSS150/VH20+SHRPD+OpenDrift dans les prévisions de dérive.

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. Nous présentons les courbes de biais et de la CRMSE, les zones ombrées indiquant les intervalles de confiance bootstrap à 95 %. Nous soulignons que cette période ne couvre pas la période de crue nivale printanière tardive.

6.1. NIVEAU D'EAU RÉSIDUEL

L'évaluation des prévisions pour sept stations de mesure du niveau d'eau est présentée de la figure 73 à la figure 79. La station de Darrell Bay est exclue de cette évaluation en raison de la mauvaise qualité des données pendant la période d'évaluation des prévisions. Pour toutes les stations, 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 marginalement significative sur le plan statistique de la CRMSE en fonction de l'échéance de la prévision. Cette augmentation correspond à 1 cm de la CRMSE sur les 48 heures de prévision et est conforme sur le plan qualitatif à l'attente que les prévisions se dégradent graduellement avec l'échéance de la prévision. La performance des quatre modèles est semblable à cet égard, et prévisible puisque a) les modèles à plus petite échelle héritent en grande partie 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 80 montre l'évaluation des prévisions pour l'ADCP horizontal à Second Narrows, où nous tenons compte uniquement du courant le long du rivage (pas de découplage du signal de marée). Le panneau des biais révèle un signal non monotone statistiquement significatif pour le SSS150 et le VH20, qui est plus petit dans ce dernier. La période semble diurne, et c'est pourquoi nous l'attribuons à l'erreur de marée dans les composantes diurnes. La taille réduite de ce signal dans le modèle VH20 permet cette attribution à l'erreur de marée, car nous avons constaté une amélioration de la performance avec marée dans le modèle VH20 lors de l'évaluation rétrospective précédente. Parallèlement, sur le panneau de la CRMSE, nous trouvons également un signal diurne dans la courbe du SSS150 qui ne se retrouve pas dans la courbe du VH20, dénotant encore une fois une meilleure performance à une résolution plus

élevée, et les deux courbes n'affichent pas de tendance statistiquement significative de croissance de l'erreur avec l'échéance la prévision.

6.3. TEMPÉRATURE DE SURFACE DE LA MER

L'évaluation des prévisions de la température de surface de la mer est présentée à la figure 81 pour la bouée de la baie des Anglais. À partir du panneau supérieur droit, nous observons un décalage entre le SPCOG-O (qui a un léger biais positif) et le SS500 et le SSS150 (qui ont un biais négatif plus important). Ces biais globaux sont conformes à l'évaluation rétrospective présentée à la figure 61. Toutefois, l'accent est mis ici sur la performance prévue et, dans les trois modèles, nous ne voyons pas de tendance au réchauffement ou au refroidissement statistiquement significative en fonction de l'échéance de la prévision. Nous voyons un petit signal diurne dans les modèles à plus haute résolution, qui est légèrement moins prononcé dans le VH20 que dans le SSS150, mais dans les deux cas, il n'est pas statistiquement significatif. Par ailleurs, le panneau inférieur gauche ne montre aucune augmentation de la CRMSE en fonction de l'échéance de la prévision pour les trois modèles.

7. SOMMAIRE

Des modèles océaniques à haute résolution fondés sur NEMO ont été construits pour la région du sud de la mer des Salish, le bras de mer Burrard, le bas Fraser et le lac Pitt à une résolution de 150 m et pour le port de Vancouver à une résolution de 20 m. Ces modèles sont configurés pour s'exécuter avec une suite d'automatisation qui facilite les pseudo-analyses quotidiennes et un ensemble de quatre prévisions sur 48 heures qui sont mises à jour toutes les 6 heures, en fonction des données de sortie des modèles à plus grande échelle SS500 et SHRPD qui sont opérés à ECCC.

La performance des modèles a été évaluée au moyen d'une simulation rétrospective sur cinq ans et d'un ensemble de 55 prévisions. En ce qui concerne le niveau d'eau de marée, les modèles SSS150 et VH20 obtiennent une CRMSE de 5 à 6 cm dans la région de la baie Howe et de la baie Burrard, un résultat qui se compare favorablement aux modèles à plus grande échelle dont la CRMSE est d'environ 9,5 et 20 cm pour le SS500 et le SPCOG-O, respectivement. Cette amélioration est attribuée au réglage de huit composantes de marée qui sont communes au modèle de forçage d'origine et à l'inclusion de sept composantes mineures supplémentaires.

Pour le niveau de l'eau résiduel, les quatre modèles évalués obtiennent une CRMSE type de 4 à 5 cm, à une exception près à 7 cm, les nombres exacts étant sensibles aux choix des paramètres de découplage du signal de marée. Cette similitude de la performance sans marée entre les modèles est largement attribuable à l'héritage du niveau d'eau résiduel résultant de la hiérarchie d'imbrication et à l'utilisation du même forçage de surface. Les signaux résiduels générés localement qui ne sont pas hérités, comme les ondes de seiche, n'ont pas été étudiés ici.

Le biais du niveau d'eau varie entre 2 et 18 cm selon la station, bien que ces biais puissent être atténués lors du post-traitement. La CRMSE du niveau d'eau total est de 6 à 7 cm, à une exception près de 9 cm, et nous attribuons cette erreur aux contributions à peu près égales des erreurs associées aux composantes avec et sans marée.

Le modèle SSS150 présente une résolution adéquate pour représenter la géométrie principale de la zone et y propager les signaux de niveau d'eau. La grille interne du VH20 hérite de cette compétence en matière de niveau d'eau et ne contribue pas plus à l'amélioration de la performance relative au niveau d'eau.

Pour sa part, le modèle SSS150 est marginalement capable de représenter les courants aux endroits observés dans le port de Vancouver. Les courants sont sous-estimés par rapport aux mesures de l'ADCP horizontal de Second Narrows et les ellipses de marée à deux stations d'ADCP sont sous-représentées en profondeur. Le modèle VH20 améliore considérablement les résultats ici : la mesure de l'ADCP horizontal est moins sous-représentée et les ellipses de courant de marée sont mieux représentées en profondeur. Des améliorations sont également visibles pour certaines mesures des transects d'ADCP, en particulier près de Second Narrows, bien que cela montre qu'une résolution supérieure à 20 m est nécessaire pour représenter complètement les courants de Second Narrows.

La température de surface de la mer est évaluée à un endroit près de l'entrée de la baie des Anglais, et nous trouvons des biais en faveur du froid dans le modèle à haute résolution en hiver, qui peuvent être hérités du modèle d'origine SS500. Le biais global est d'environ -0,7 °C et la CRMSE, d'environ 1 °C.

Une sonde CTD ancrée dans le port de Vancouver à 37 m de profondeur montre que le cycle saisonnier de la température est capturé avec un biais chaud de +0,16 à +0,3 °C en été pour les modèles SSS150 et VH20, tandis que la CRMSE est d'environ 0,3 °C pour les deux modèles. Parallèlement, la salinité est biaisée en faveur d'une perte de -0,2 à -0,36 psu dans le SSS150 et d'un gain de +0,08 à +0,27 psu dans le VH20 avec une CRMSE d'environ 0,34 psu.

L'évaluation par rapport aux profils CTD indique que la performance est meilleure dans les modèles SSS150 et VH20 dans les régions qui chevauchent les modèles à plus grande échelle SS500 et SPCOG-O. Dans le port de Vancouver et jusqu'à Port Moody, le SSS150 affiche une performance aussi bonne ou meilleure que le VH20, ce qui indique que d'autres efforts de réglage pourraient améliorer le VH20.

L'évaluation de la dérive effectuée dans le domaine du modèle VH20 donne de faibles preuves que le modèle VH20 surpasse le modèle SSS150, bien que le petit nombre de bouées dérivantes utilisées et un certain nombre d'autres préoccupations limitent la capacité de contraindre la performance de la dérive.

L'évaluation des prévisions pour le niveau d'eau ne révèle aucune tendance du biais et fait apparaître une petite tendance dans la CRMSE en fonction de l'échéance de la prévision, qui est légèrement statistiquement significative à une CRMSE d'environ 1 cm sur la période de prévision de 48 heures. Aucune tendance statistiquement significative du biais ou de la CRMSE n'est détectée pour les courants prévus à l'ADCP horizontal de Second Narrows, ni pour la mesure de la température de surface de la mer à l'entrée de la baie des Anglais.

8. CONSTATATIONS PRINCIPALES

- Les modèles à haute résolution représentent les zones qui ne sont couvertes par aucun modèle opérationnel actuel fondé sur NEMO : le bras de mer Burrard au-delà de First Narrows, le bas Fraser de l'île Douglas jusqu'à Mission et la rivière Pitt et le lac Pitt à une résolution de 150 m, et le port de Vancouver de la baie des Anglais au bras Port Moody à une résolution de 20 m.
- Les modèles SSS150 et VH20 ont simulé sans échec une période historique de cinq ans (de 2017 à 2021) qui comprenait un événement d'inondation 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 du marégraphe à la fin de 2021.

-
- La CRMSE du niveau d'eau avec marée est de 5 à 6 cm dans la région de la baie Howe et de la baie Burrard, soit environ la moitié de celle du modèle SS500 d'origine.
 - La performance du niveau d'eau résiduel est comparable entre les modèles à haute résolution et les modèles de forçage à résolution plus grossière dans les zones communes et est attribuée principalement au fait d'avoir hérité ces signaux des modèles à plus grande échelle.
 - Les courants sont marginalement représentés dans le modèle SSS150, mais ils le sont nettement mieux dans le modèle VH20, tels que mesurés à Second Narrows et à deux stations d'ADCP. Une résolution supérieure à 20 m peut être nécessaire pour représenter complètement les jets qui se forment dans les Narrows.
 - Le biais de température de surface de la mer est d'environ 0,7 °C à l'entrée de la baie des Anglais avec une CRMSE de 1 cm.
 - Les cycles saisonniers de la température et de la salinité enregistrés par une sonde CTD ancrée à 37 m de profondeur dans le bras de mer Burrard sont capturés par les modèles à haute résolution, avec des biais absolus inférieurs à 0,3 °C / 0,27 psu et une CRMSE de 0,3 °C / 0,34 psu.
 - Les profils CTD révèlent que les modèles à haute résolution égalent ou surpassent les modèles à plus grande échelle dans les zones où ils se chevauchent comme la baie Howe et la baie des Anglais, et que ce niveau de performance est maintenu ou dépassé dans le reste du bras de mer Burrard.
 - L'évaluation de la dérive indique que le VH20 surpasse légèrement le SSS150 sur le plan l'évaluation de l'indice de performance de la dérive, bien que de grandes incertitudes limitent la capacité de contraindre la performance.
 - L'évaluation des prévisions révèle une augmentation légèrement statistiquement significative de la CRMSE pour le niveau d'eau résiduel en fonction de l'échéance de la prévision.
 - L'évaluation des prévisions ne constate aucune augmentation statistiquement significative de la CRMSE pour les vitesses horizontales ou la température de surface de la mer, chacune étant mesurée à un endroit.

9. REMERCIEMENTS

Nous remercions nos collègues d'ECCC, Jean-Philippe Paquin, Greg Smith, Fred Dupont et Oleksandr (Sasha) Huziy de leurs conseils et de leurs idées pour élaborer et évaluer les modèles, Pascal Matte de ses conseils pour élaborer le modèle NS TIDE et Sarah MacDermid et Ji Lei de leur expertise pour utiliser la suite Maestro. Nous remercions Mitchell O'Flaherty-Sproul de son aide avec les données bathymétriques. Nous remercions Marlene Jeffries, Pete Wills et leurs collègues du SHC, qui ont fourni les données sur les marées, les données bathymétriques et les données sur les levés. Merci à Nancy Soontiens et à Jennifer Holden pour leur outil de prévision de la dérive et leur aide pour l'utiliser. Nous remercions également Roy Hourston, qui a facilité la mesure de la dérive et recueilli des données sur les levés. Nous remercions également Jesse Montgomery de Metro Vancouver pour les données sur le débit de la rivière Capilano, Patrick Lilley de Kerr Wood Leidal pour les données sur le débit des rivières à North Vancouver, Ocean Networks Canada pour l'enregistrement du flux de données des SIA à l'ADCP horizontal de Second Narrows, et l'équipe de waterproperties.ca pour sa 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 pendant la rédaction.

10. RÉFÉRENCES CITÉES

- Allen, Susan E., and M.A. Wolfe. 2013. "Hindcast of the Timing of the Spring Phytoplankton Bloom in the Strait of Georgia, 1968–2010." *Progress in Oceanography* 115 (August): 6–13. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.05.026>.
- 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., Krassovski, M., Taylor, S., Blanken, H., Horwitz, R., St-Onge Drouin, S. et Drozdowski, A. Sous presse. 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.
- Dupont, Frédéric, Simon Higginson, Romain Bourdallé-Badie, Youyu Lu, François Roy, Gregory C. Smith, Jean-François Lemieux, Gilles Garric, and Fraser 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. <https://doi.org/10.1080/07055900.1987.9649262>
- Foreman, M. G. G., W. R. Crawford, J. Y. Cherniawsky, and J. Galbraith. 2008. "Dynamic Ocean Topography for the Northeast Pacific and Its Continental Margins." *Geophysical Research Letters* 35 (22): L22606. <https://doi.org/10.1029/2008GL035152>.

-
- 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, Bruno, Anne-Marie Tréguier, Gurvan Madec, and Valérie 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).
- Matte, Pascal, David A. Jay, and Edward D. Zaron. 2013. "Adaptation of Classical Tidal Harmonic Analysis to Nonstationary Tides, with Application to River Tides." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 30 (3): 569–89. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00016.1>.
- 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>.
- Morrison, J., M. G. G. Foreman, and D. Masson. 2012. "A Method for Estimating Monthly Freshwater Discharge Affecting British Columbia Coastal Waters." *Atmosphere-Ocean* 50 (1): 1–8. <https://doi.org/10.1080/07055900.2011.637667>.
- 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, Sarah MacDermid, Yukie Hata, Oleksandr Huizy, Ji Lei, Yosvany Martinez, Hauke Blanken, Jennifer Holden, Nancy Soontiens. 2021a. "Coastal Ice Ocean Prediction System for the East Coast of Canada (CIOPS-E): Update from version 1.50 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. 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. 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>.
- Schureman, Paul. 1958. "Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides. [Revised 1940 Edition Reprinted 1958 with Corrections, Reprinted 2001]." 317pp. <https://doi.org/10.25607/OBP-155>.
- 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>.
- Woodworth, Philip L. 2019. "The Global Distribution of the M1 Ocean Tide." *Ocean Science* 15 (2): 431–42. <https://doi.org/10.5194/os-15-431-2019>.
- de Young, Brad, and Stephen Pond. 1988. "The Deepwater Exchange Cycle in Indian Arm, British Columbia." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 26 (3): 285–308. [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(88\)90066-2](https://doi.org/10.1016/0272-7714(88)90066-2).
- 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 pour les configurations des modèles NEMO, SSS150 et VH20.

Paramètre	Grille externe (SSS150)	Grille interne (VH20)
Dimensions de la grille, NX x NY x NZ	710 x 826 x 39	1239 x 439 x 28
Résolution horizontale, ΔX x ΔY	Environ 129 x 98 m	Environ 26 x 20 m
Résolution verticale	1 m de la surface, 26 m du fond	1 m de la surface, 24 m du fond
Pas de temps (barocline/ barotrope)	20 s / 1 s	2 s/0,3333 s
Fréquence de mise à jour des limites ouvertes	1 h (O, S), 30 min (E)	15 min
Décalage de la hauteur de la surface de la mer aux conditions aux limites ouvertes	-12 cm (O, S), 0 cm (E)	0 cm
Source des composantes de marées	Mer des Salish 500 et inférence	Directement à partir du SSS150
Composantes de marée forcées	M2, S2, N2, K1, O1, Q1, K2, P1, L2, 2N2, NU2, J1, M1, OO1, SO1	s.o.
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 iso-neutre et méthode Smagorinsky	Laplacien iso-neutre et méthode Smagorinsky
Diffusion verticale	k- ϵ (GLS)	k- ϵ (GLS)
Frottement sur le fond	Quadratique, variation spatiale	Couche log

Tableau 2. Résumé des données pour la frontière ouverte à Mission du modèle non stationnaire NS_TIDE.

Station	Données utilisées	Décalage	Recharge/prédiction	Temps de transition jusqu'à la solution de recharge
Steveston 07607	Marnage diurne	—	—	—
Steveston 07607	Niveau d'eau résiduel	0	Zéro	5 jours
Hope 08MF005	Niveau d'eau	10,5 h	Climatologie hebdomadaire calculée de 1912 à 2019	30 jours
Hope 08MF005	Débit	10,5 h	Climatologie hebdomadaire calculée de 1912 à 2019	30 jours
Mission 08MF024	Niveau d'eau	—	Calculée à partir du modèle de marée non stationnaire pour Mission	5 jours

Tableau 3. Sources des apports d'eau douce utilisées pour le domaine du SSS150 (liste complète) et le domaine du VH20 (cinq premières entrées).

Source	Données en temps réel	Climatologie	Moyenne climatologique (m ³ /s)
Capilano River	Metro Vancouver	Calculée à partir des données de 2019 à 2021	11,7
Mosquito Creek	North Vancouver par KWL	Calculée à partir des données de 2019 à 2021	0,5
Lynn Creek	North Vancouver par KWL	Calculée à partir des données de 2019 à 2021	6,7
Seymour River	North Vancouver par KWL	Calculée à partir des données de 2019 à 2021	14,5
Gallant Creek	North Vancouver par KWL	Calculée à partir des données de 2019 à 2021	0,1
Squamish River	—	Valeurs climatologiques tirées de (Morrison, Foreman, and Masson 2012), telles qu'utilisées dans le modèle de la mer des Salish 500	514,3
Buntzen Powerhouse 2	—	Valeur annuelle moyenne tirée de de Young and Pond (1988)	23,0
Indian River	—	Calculée à l'aide des données historiques de la station 08GA005; la moyenne annuelle correspond à l'estimation de 12 m ³ /s dans de Young and Pond (1988)	11,8
Pitt River	—	Calculée à partir des données historiques de la station 08MH017	53,5

Tableau 4. Données des stations de mesure du niveau d'eau utilisées pour l'évaluation et décalages utilisés pour transférer le niveau d'eau au référentiel CGVD28.

Nom de la station	ID de la station	Données disponibles	Décalage (m)
Darrell Bay	07808	Niveau d'eau	3,190
Point Atkinson	07795	Niveau d'eau	3,062
Sandy Cove	07786	Niveau d'eau	3,069
Kitsilano	07707	Niveau d'eau	3,046
Ambleside	07780	Niveau d'eau	3,054
Vancouver	07735	Niveau d'eau	2,9965
Port Moody	07755	Niveau d'eau	3,123
Indian Arm Head	07774	Niveau d'eau	3,051
Gibsons	07820	Composantes	—
Squamish	07811	Composantes	—
Second Narrows	07745	Composantes	—

Tableau 5. Comparaison de la composante M2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,933 ± 0,002	31,5 ± 0,1	+0,034	-0,005	-0,001	—	+5,0	+0,3	-0,2	—	0,064	0,005	0,003	—
Point Atkinson	0,916 ± 0,002	30,8 ± 0,1	+0,021	-0,003	-0,004	—	+5,4	+0,5	+0,2	—	0,064	0,006	0,003	—
Sandy Cove	0,919 ± 0,002	30,9 ± 0,1	+0,019	-0,004	-0,003	-0,003	+5,4	+0,3	+0,1	-0,3	0,063	0,005	0,002	0,004
Kitsilano	0,929 ± 0,002	30,9 ± 0,2	+0,010	-0,011	-0,007	-0,007	+5,0	+0,1	+0,0	-0,6	0,058	0,008	0,005	0,009
Ambleside	0,930 ± 0,002	31,6 ± 0,2	+0,007	-0,013	-0,007	-0,009	+4,6	-0,5	-0,8	-1,2	0,053	0,011	0,010	0,015
Vancouver	0,938 ± 0,002	36,2 ± 0,1	—	—	+0,002	-0,001	—	—	-0,4	+0,0	—	—	0,004	0,001
Port Moody	0,969 ± 0,003	46,6 ± 0,2	—	—	+0,014	+0,006	—	—	+0,2	+2,6	—	—	0,010	0,031
Indian Arm Head	0,972 ± 0,003	47,0 ± 0,1	—	—	+0,011	—	—	—	+0,7	—	—	—	0,012	—
Gibsons	0,948	30,1	+0,005	-0,027	-0,017	—	+6,5	+1,6	+1,0	—	0,076	0,026	0,017	—
Squamish	0,942	31,2	+0,025	-0,011	-0,003	—	+5,4	+0,6	-0,0	—	0,065	0,010	0,002	—
Second Narrows	0,958	40,0	—	—	+0,005	-0,005	—	—	-2,5	+0,3	—	—	0,030	0,005

Tableau 6. Comparaison de la composante N2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,200 ± 0,002	4,0 ± 0,6	-0,001	-0,007	-0,002	—	+3,8	+0,9	-2,1	—	0,009	0,006	0,005	—
Point Atkinson	0,197 ± 0,002	3,3 ± 0,6	-0,004	-0,007	-0,003	—	+4,1	+1,1	-1,9	—	0,010	0,006	0,005	—
Sandy Cove	0,197 ± 0,002	3,4 ± 0,6	-0,004	-0,007	-0,003	-0,002	+4,0	+1,0	-2,0	-2,4	0,010	0,006	0,005	0,006
Kitsilano	0,199 ± 0,002	3,2 ± 0,8	-0,006	-0,009	-0,003	-0,003	+3,9	+0,9	-1,7	-2,3	0,010	0,006	0,004	0,006
Ambleside	0,200 ± 0,002	3,9 ± 0,7	-0,008	-0,010	-0,004	-0,004	+3,5	+0,5	-2,4	-2,8	0,010	0,007	0,007	0,008
Vancouver	0,198 ± 0,002	9,6 ± 0,5	—	—	-0,002	-0,002	—	—	-2,2	-1,7	—	—	0,005	0,004
Port Moody	0,200 ± 0,002	22,1 ± 0,8	—	—	+0,002	0,000	—	—	-1,0	+1,6	—	—	0,003	0,004
Indian Arm Head	0,200 ± 0,003	22,9 ± 0,8	—	—	+0,002	—	—	—	-0,9	—	—	—	0,002	—
Gibsons	0,199	358,4	-0,002	-0,006	+0,001	—	+9,5	+6,5	+3,3	—	0,023	0,016	0,008	—
Squamish	0,194	3,9	+0,003	-0,002	+0,004	—	+4,3	+1,4	-1,9	—	0,010	0,004	0,006	—
Second Narrows	0,199	14,0	—	—	0,000	-0,004	—	—	-4,6	-1,4	—	—	0,011	0,004

Tableau 7. Comparaison de la composante S2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,240 ± 0,002	59,8 ± 0,5	+0,011	-0,004	-0,004	—	+6,8	+2,1	+1,0	—	0,022	0,007	0,004	—
Point Atkinson	0,236 ± 0,002	59,2 ± 0,6	+0,007	-0,004	-0,003	—	+7,2	+2,0	+1,2	—	0,022	0,006	0,004	—
Sandy Cove	0,236 ± 0,002	59,1 ± 0,5	+0,007	-0,004	-0,002	-0,002	+7,3	+2,1	+1,2	+0,7	0,022	0,007	0,004	0,003
Kitsilano	0,238 ± 0,003	58,9 ± 0,6	+0,005	-0,005	-0,004	-0,004	+7,1	+1,9	+1,1	+0,3	0,022	0,007	0,004	0,003
Ambleside	0,239 ± 0,002	60,0 ± 0,6	+0,004	-0,006	-0,004	-0,004	+6,3	+1,0	-0,2	-0,6	0,019	0,005	0,003	0,003
Vancouver	0,238 ± 0,002	66,0 ± 0,4	—	—	-0,002	-0,003	—	—	+0,6	+1,1	—	—	0,002	0,004
Port Moody	0,241 ± 0,003	79,6 ± 0,5	—	—	+0,003	+0,001	—	—	+1,9	+4,7	—	—	0,006	0,014
Indian Arm Head	0,241 ± 0,003	80,3 ± 0,7	—	—	+0,001	—	—	—	+2,3	—	—	—	0,007	—
Gibsons	0,238	59,1	+0,010	-0,004	-0,002	—	+7,5	+2,5	+1,4	—	0,024	0,008	0,004	—
Squamish	0,232	60,1	+0,018	+0,004	+0,006	—	+6,1	+1,6	+0,5	—	0,022	0,006	0,004	—
Second Narrows	0,236	70,5	—	—	+0,005	+0,001	—	—	-1,9	+2,0	—	—	0,007	0,006

Tableau 8. Comparaison de la composante O1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,484 ± 0,006	264,0 ± 0,6	-0,018	+0,017	+0,020	—	+12,9	+2,4	-0,5	—	0,076	0,019	0,015	—
Point Atkinson	0,479 ± 0,005	263,6 ± 0,6	-0,014	+0,012	+0,014	—	+13,4	+2,5	-0,2	—	0,078	0,017	0,010	—
Sandy Cove	0,479 ± 0,006	264,0 ± 0,6	-0,014	+0,013	+0,015	+0,015	+13,0	+2,1	-0,6	-0,9	0,076	0,015	0,011	0,012
Kitsilano	0,482 ± 0,006	264,0 ± 0,6	-0,015	+0,010	+0,015	+0,015	+12,9	+2,2	-0,4	-0,9	0,076	0,015	0,011	0,012
Ambleside	0,480 ± 0,007	264,3 ± 0,6	-0,014	+0,012	+0,016	+0,015	+12,7	+1,9	-0,9	-1,2	0,075	0,014	0,013	0,013
Vancouver	0,475 ± 0,006	266,5 ± 0,6	—	—	+0,017	+0,016	—	—	-0,2	-0,1	—	—	0,012	0,011
Port Moody	0,476 ± 0,005	273,2 ± 0,6	—	—	+0,016	+0,016	—	—	-0,7	+0,6	—	—	0,012	0,012
Indian Arm Head	0,476 ± 0,005	273,4 ± 0,7	—	—	+0,019	—	—	—	-0,4	—	—	—	0,013	—
Gibsons	0,483	262,2	-0,022	+0,008	+0,010	—	+13,9	+2,7	-0,4	—	0,082	0,017	0,007	—
Squamish	0,493	264,3	-0,034	-0,002	-0,002	—	+13,1	+2,7	-0,1	—	0,081	0,016	0,002	—
Second Narrows	0,512	270,1	—	—	-0,011	-0,002	—	—	-1,5	+0,8	—	—	0,012	0,005

Tableau 9. Comparaison de la composante K1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,871 ± 0,005	286,4 ± 0,4	-0,028	+0,011	+0,006	—	+11,8	+0,7	+0,1	—	0,126	0,011	0,004	—
Point Atkinson	0,860 ± 0,005	286,3 ± 0,3	-0,019	+0,007	+0,004	—	+11,9	+0,2	-0,1	—	0,125	0,006	0,003	—
Sandy Cove	0,861 ± 0,006	286,3 ± 0,4	-0,019	+0,006	+0,005	+0,004	+11,9	+0,2	-0,1	-0,4	0,125	0,005	0,004	0,005
Kitsilano	0,866 ± 0,006	286,2 ± 0,4	-0,021	+0,001	+0,002	+0,001	+11,9	+0,3	-0,1	-0,5	0,126	0,003	0,002	0,006
Ambleside	0,865 ± 0,006	286,6 ± 0,4	-0,022	+0,001	+0,002	+0,002	+11,6	-0,1	-0,6	-0,8	0,123	0,001	0,006	0,009
Vancouver	0,860 ± 0,005	289,2 ± 0,3	—	—	+0,006	+0,006	—	—	-0,3	-0,1	—	—	0,005	0,004
Port Moody	0,864 ± 0,005	295,6 ± 0,4	—	—	+0,009	+0,008	—	—	-0,2	+1,1	—	—	0,007	0,013
Indian Arm Head	0,866 ± 0,005	295,8 ± 0,3	—	—	+0,009	—	—	—	+0,0	—	—	—	0,006	—
Gibsons	0,872	285,2	-0,031	+0,002	-0,002	—	+12,7	+1,3	+0,6	—	0,136	0,014	0,006	—
Squamish	0,875	286,8	-0,029	+0,010	+0,007	—	+11,9	+0,8	+0,1	—	0,128	0,011	0,005	—
Second Narrows	0,893	292,1	—	—	-0,009	-0,005	—	—	-1,3	+0,6	—	—	0,016	0,007

Tableau 10. Comparaison de la composante K2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,066 ± 0,002	62,6 ± 1,9	+0,008	+0,002	+0,001	—	+5,5	-6,0	+0,7	—	0,008	0,005	0,001	—
Point Atkinson	0,066 ± 0,002	60,9 ± 2,2	+0,006	+0,002	-0,002	—	+6,6	-4,5	+2,1	—	0,007	0,004	0,002	—
Sandy Cove	0,065 ± 0,002	61,6 ± 1,8	+0,006	+0,002	-0,001	-0,001	+6,0	-5,0	+1,7	+1,1	0,007	0,004	0,002	0,001
Kitsilano	0,065 ± 0,003	61,1 ± 2,5	+0,007	+0,002	-0,002	-0,001	+5,8	-4,6	+1,2	+1,2	0,007	0,004	0,001	0,001
Ambleside	0,066 ± 0,002	60,9 ± 2,0	+0,006	+0,001	-0,001	-0,001	+6,2	-4,0	+2,0	+1,4	0,007	0,003	0,002	0,002
Vancouver	0,067 ± 0,002	63,6 ± 1,4	—	—	0,000	-0,001	—	—	+0,1	+0,6	—	—	0,000	0,001
Port Moody	0,072 ± 0,002	65,1 ± 1,8	—	—	+0,001	0,000	—	—	-1,7	+0,4	—	—	0,002	0,000
Indian Arm Head	0,074 ± 0,003	64,4 ± 2,1	—	—	+0,001	—	—	—	-1,1	—	—	—	0,001	—
Gibsons	0,066	60,3	+0,005	+0,001	-0,001	—	+6,9	-4,2	+2,0	—	0,007	0,003	0,002	—
Squamish	0,063	67,0	+0,009	+0,006	+0,005	—	+0,5	-11,1	-4,7	—	0,007	0,010	0,005	—
Second Narrows	0,077	63,9	—	—	-0,004	-0,001	—	—	-1,2	+0,2	—	—	0,003	0,001

Tableau 11. Comparaison de la composante P1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (m)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,278 ± 0,005	285,1 ± 1,0	-0,021	+0,003	-0,007	—	+12,4	-1,3	-1,0	—	0,043	0,005	0,006	—
Point Atkinson	0,275 ± 0,005	285,6 ± 1,0	-0,019	+0,001	-0,008	—	+12,0	-1,7	-1,2	—	0,042	0,006	0,007	—
Sandy Cove	0,275 ± 0,006	285,3 ± 1,2	-0,020	+0,001	-0,008	-0,008	+12,3	-1,4	-1,0	-1,2	0,043	0,005	0,007	0,007
Kitsilano	0,277 ± 0,006	284,9 ± 1,2	-0,020	-0,002	-0,010	-0,010	+12,7	-1,2	-0,7	-1,1	0,044	0,004	0,007	0,008
Ambleside	0,277 ± 0,006	285,9 ± 1,4	-0,021	-0,002	-0,010	-0,010	+11,9	-2,1	-1,7	-1,9	0,042	0,007	0,009	0,010
Vancouver	0,273 ± 0,005	289,0 ± 1,1	—	—	-0,007	-0,008	—	—	-1,4	-1,1	—	—	0,007	0,007
Port Moody	0,274 ± 0,006	296,3 ± 1,2	—	—	-0,007	-0,007	—	—	-1,0	+0,2	—	—	0,006	0,005
Indian Arm Head	0,276 ± 0,006	296,0 ± 1,2	—	—	-0,007	—	—	—	-0,2	—	—	—	0,005	—
Gibsons	0,274	286,4	-0,021	0,000	-0,008	—	+11,0	-2,4	-2,2	—	0,039	0,008	0,009	—
Squamish	0,272	284,1	-0,020	+0,001	-0,012	—	+14,8	+1,4	+1,9	—	0,050	0,005	0,011	—
Second Narrows	0,281	292,5	—	—	-0,022	-0,021	—	—	-1,5	+0,6	—	—	0,016	0,015

Tableau 12. Comparaison de la composante Q1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,076 ± 0,005	255,8 ± 3,7	-0,001	+0,005	+0,006	—	+17,1	+0,7	+0,1	—	0,016	0,003	0,004	—
Point Atkinson	0,076 ± 0,005	255,8 ± 3,8	-0,002	+0,002	+0,003	—	+17,2	+1,3	+1,2	—	0,016	0,002	0,003	—
Sandy Cove	0,077 ± 0,005	256,4 ± 3,9	-0,002	+0,002	+0,003	+0,003	+16,6	+0,7	+0,7	+0,2	0,016	0,001	0,002	0,002
Kitsilano	0,078 ± 0,006	255,5 ± 4,3	-0,003	+0,001	+0,003	+0,002	+17,5	+1,2	+1,1	+0,5	0,017	0,002	0,002	0,002
Ambleside	0,077 ± 0,007	256,3 ± 4,2	-0,003	+0,002	+0,003	+0,003	+16,8	+0,8	+0,4	+0,1	0,016	0,001	0,002	0,002
Vancouver	0,076 ± 0,006	260,6 ± 3,7	—	—	+0,004	+0,004	—	—	+0,9	+1,1	—	—	0,003	0,003
Port Moody	0,078 ± 0,006	269,6 ± 4,0	—	—	+0,004	+0,004	—	—	+1,1	+2,5	—	—	0,003	0,004
Indian Arm Head	0,078 ± 0,005	269,9 ± 4,1	—	—	+0,003	—	—	—	+1,5	—	—	—	0,003	—
Gibsons	0,079	256,7	+0,001	+0,007	+0,010	—	+14,5	-1,0	-1,0	—	0,014	0,005	0,007	—
Squamish	0,074	255,5	+0,005	+0,008	+0,008	—	+19,7	+7,0	+7,9	—	0,019	0,009	0,009	—
Second Narrows	0,092	263,3	—	—	-0,007	-0,005	—	—	+5,1	+7,4	—	—	0,007	0,009

Tableau 13. Comparaison de la composante L2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,030 ± 0,003	61,0 ± 6,4	-0,012	-0,020	+0,006	—	+21,4	-24,9	-10,1	—	0,011	0,015	0,006	—
Point Atkinson	0,029 ± 0,002	61,1 ± 6,6	-0,013	-0,019	+0,004	—	+21,5	-30,7	-11,3	—	0,011	0,015	0,005	—
Sandy Cove	0,029 ± 0,003	60,7 ± 5,5	-0,013	-0,019	+0,005	+0,005	+21,9	-30,2	-10,6	-11,5	0,011	0,015	0,006	0,006
Kitsilano	0,031 ± 0,004	59,0 ± 7,0	-0,015	-0,020	+0,003	+0,003	+20,6	-34,5	-11,5	-12,2	0,012	0,016	0,005	0,005
Ambleside	0,032 ± 0,003	60,5 ± 5,8	-0,016	-0,021	+0,003	+0,003	+20,7	-31,0	-12,0	-12,3	0,013	0,017	0,005	0,005
Vancouver	0,034 ± 0,003	54,8 ± 4,7	—	—	+0,006	+0,006	—	—	-7,0	-8,4	—	—	0,006	0,006
Port Moody	0,041 ± 0,004	48,0 ± 4,2	—	—	+0,013	+0,013	—	—	-3,2	-2,5	—	—	0,009	0,009
Indian Arm Head	0,041 ± 0,004	46,6 ± 5,2	—	—	+0,013	—	—	—	-1,9	—	—	—	0,010	—
Gibsons	0,025	66,8	-0,013	-0,016	+0,009	—	+6,8	-53,1	-22,7	—	0,009	0,015	0,010	—
Squamish	0,027	70,9	-0,016	-0,018	+0,007	—	+12,6	-55,0	-24,1	—	0,012	0,016	0,010	—
Second Narrows	0,031	47,9	—	—	+0,008	+0,009	—	—	+0,1	-0,5	—	—	0,006	0,006

Tableau 14. Comparaison de la composante J1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,047 ± 0,005	328,4 ± 6,5	-0,011	-0,032	-0,003	—	+131,6	+135,5	+1,4	—	0,054	0,041	0,002	—
Point Atkinson	0,047 ± 0,005	328,4 ± 6,3	-0,012	-0,032	-0,003	—	+132,1	+128,7	+1,0	—	0,054	0,041	0,002	—
Sandy Cove	0,048 ± 0,006	327,4 ± 6,3	-0,012	-0,033	-0,003	-0,003	+133,1	+129,0	+2,1	+2,0	0,054	0,041	0,002	0,002
Kitsilano	0,049 ± 0,005	327,9 ± 6,7	-0,013	-0,034	-0,003	-0,003	+132,9	+127,8	+2,3	+1,7	0,055	0,042	0,002	0,002
Ambleside	0,047 ± 0,006	328,8 ± 8,0	-0,011	-0,032	-0,002	-0,002	+131,9	+126,6	+1,1	+0,7	0,054	0,041	0,002	0,002
Vancouver	0,047 ± 0,005	336,1 ± 6,0	—	—	-0,002	-0,002	—	—	+0,5	+1,4	—	—	0,002	0,002
Port Moody	0,050 ± 0,006	350,2 ± 7,4	—	—	-0,002	-0,002	—	—	+3,5	+5,5	—	—	0,003	0,004
Indian Arm Head	0,052 ± 0,005	351,0 ± 6,5	—	—	-0,003	—	—	—	+3,5	—	—	—	0,003	—
Gibsons	0,054	324,2	-0,018	-0,039	-0,002	—	+127,5	+115,0	+5,9	—	0,057	0,043	0,004	—
Squamish	0,053	315,8	-0,013	-0,033	-0,010	—	+137,3	+130,5	+16,1	—	0,062	0,048	0,012	—
Second Narrows	0,060	345,1	—	—	-0,016	-0,016	—	—	-6,6	-2,4	—	—	0,012	0,011

Tableau 15. Comparaison de la composante NO1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,039 ± 0,004	294,8 ± 5,6	-0,020	-0,029	+0,001	—	+85,1	+147,7	-25,0	—	0,030	0,034	0,012	—
Point Atkinson	0,037 ± 0,004	293,0 ± 5,3	-0,017	-0,026	+0,002	—	+87,6	+143,1	-22,2	—	0,029	0,033	0,010	—
Sandy Cove	0,038 ± 0,004	295,1 ± 6,0	-0,018	-0,027	+0,001	+0,001	+85,5	+140,2	-24,1	-24,5	0,029	0,033	0,011	0,012
Kitsilano	0,038 ± 0,004	295,7 ± 5,9	-0,018	-0,028	+0,002	+0,002	+84,5	+134,8	-23,8	-24,3	0,029	0,032	0,011	0,012
Ambleside	0,039 ± 0,004	295,3 ± 7,1	-0,019	-0,028	+0,001	+0,001	+85,0	+136,9	-23,2	-23,5	0,030	0,033	0,011	0,011
Vancouver	0,038 ± 0,004	298,7 ± 5,2	—	—	+0,002	+0,002	—	—	-22,6	-22,0	—	—	0,011	0,011
Port Moody	0,042 ± 0,004	308,6 ± 5,1	—	—	+0,001	+0,001	—	—	-22,0	-20,2	—	—	0,011	0,011
Indian Arm Head	0,042 ± 0,004	309,0 ± 5,0	—	—	+0,001	—	—	—	-21,6	—	—	—	0,011	—
Gibsons	0,023	301,3	+0,010	-0,007	+0,023	—	+64,8	+78,9	-18,0	—	0,022	0,018	0,017	—
Squamish	0,027	261,0	+0,059	+0,037	+0,058	—	+97,9	+93,4	+41,1	—	0,066	0,050	0,048	—
Second Narrows	0,048	301,5	—	—	+0,045	+0,049	—	—	+3,6	+7,1	—	—	0,032	0,035

Tableau 16. Comparaison de la composante OO1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,034 ± 0,005	337,1 ± 7,2	-0,029	-0,033	+0,006	—	+59,7	+59,4	+9,4	—	0,023	0,024	0,006	—
Point Atkinson	0,035 ± 0,004	335,7 ± 7,3	-0,029	-0,034	+0,005	—	+64,0	+55,5	+8,9	—	0,023	0,024	0,006	—
Sandy Cove	0,034 ± 0,005	335,2 ± 7,0	-0,028	-0,033	+0,006	+0,006	+64,4	+67,0	+9,4	+9,2	0,023	0,024	0,006	0,006
Kitsilano	0,033 ± 0,005	335,5 ± 8,2	-0,028	-0,032	+0,007	+0,007	+63,2	+91,1	+9,5	+8,9	0,022	0,023	0,007	0,006
Ambleside	0,033 ± 0,005	336,3 ± 8,9	-0,027	-0,032	+0,007	+0,007	+62,5	+92,8	+8,5	+8,2	0,022	0,023	0,006	0,006
Vancouver	0,035 ± 0,004	341,1 ± 6,9	—	—	+0,006	+0,006	—	—	+6,9	+7,5	—	—	0,005	0,005
Port Moody	0,035 ± 0,005	348,9 ± 8,0	—	—	+0,007	+0,007	—	—	+7,3	+8,7	—	—	0,006	0,006
Indian Arm Head	0,035 ± 0,005	348,3 ± 7,2	—	—	+0,007	—	—	—	+8,2	—	—	—	0,006	—
Gibsons	0,039	331,2	-0,030	-0,034	+0,008	—	+62,7	+47,4	+11,1	—	0,025	0,025	0,008	—
Squamish	0,030	313,2	-0,013	-0,019	+0,030	—	+99,7	+89,2	+30,7	—	0,027	0,023	0,026	—
Second Narrows	0,037	333,8	—	—	+0,024	+0,025	—	—	+11,9	+13,1	—	—	0,018	0,019

Tableau 17. Comparaison de la composante SO1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,028 ± 0,006	46,8 ± 10,5	+0,024	+0,001	-0,002	—	+59,5	+49,8	+5,5	—	0,032	0,017	0,002	—
Point Atkinson	0,028 ± 0,005	45,8 ± 11,3	+0,024	+0,002	-0,002	—	+60,6	+49,7	+6,4	—	0,032	0,017	0,002	—
Sandy Cove	0,027 ± 0,006	43,4 ± 10,9	+0,025	+0,003	-0,001	-0,001	+62,9	+52,0	+8,6	+7,8	0,033	0,018	0,003	0,003
Kitsilano	0,027 ± 0,006	43,1 ± 14,6	+0,025	+0,003	+0,001	0,000	+63,1	+51,7	+8,8	+8,8	0,033	0,018	0,003	0,003
Ambleside	0,027 ± 0,007	46,6 ± 13,5	+0,025	+0,003	0,000	0,000	+59,7	+48,5	+6,1	+5,7	0,032	0,017	0,002	0,002
Vancouver	0,032 ± 0,005	52,8 ± 9,8	—	—	-0,001	-0,001	—	—	+4,6	+5,0	—	—	0,002	0,002
Port Moody	0,043 ± 0,007	58,4 ± 7,8	—	—	0,000	+0,001	—	—	+4,7	+6,0	—	—	0,003	0,003
Indian Arm Head	0,045 ± 0,006	59,1 ± 6,5	—	—	-0,001	—	—	—	+4,4	—	—	—	0,003	—
Gibsons	0,027	40,2	+0,030	+0,008	+0,006	—	+68,4	+59,6	+19,0	—	0,038	0,022	0,008	—
Squamish	0,030	40,4	+0,009	-0,013	-0,016	—	+64,8	+51,1	-22,9	—	0,027	0,017	0,013	—
Second Narrows	0,041	47,7	—	—	-0,022	-0,019	—	—	-17,2	-12,8	—	—	0,016	0,014

Tableau 18. Comparaison de la composante NU2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude (m)				Erreur de phase (degré)				Erreur de marée (m)			
Nom de la station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,040 ± 0,002	11,1 ± 3,1	-0,037	-0,038	+0,001	—	+53,7	+43,8	+3,2	—	0,027	0,027	0,002	—
Point Atkinson	0,039 ± 0,003	9,8 ± 2,9	-0,036	-0,037	0,000	—	+52,2	+53,5	+5,4	—	0,026	0,027	0,003	—
Sandy Cove	0,039 ± 0,002	10,3 ± 3,3	-0,036	-0,037	0,000	0,000	+51,4	+54,4	+5,5	+5,1	0,027	0,027	0,003	0,002
Kitsilano	0,039 ± 0,003	11,0 ± 3,9	-0,036	-0,035	+0,002	+0,002	+40,3	+44,7	+5,2	+4,8	0,026	0,026	0,003	0,003
Ambleside	0,039 ± 0,003	11,0 ± 3,6	-0,035	-0,035	+0,002	+0,002	+42,5	+47,2	+5,7	+5,2	0,026	0,026	0,003	0,003
Vancouver	0,040 ± 0,002	16,5 ± 2,7	—	—	+0,001	+0,001	—	—	+3,2	+3,9	—	—	0,002	0,002
Port Moody	0,041 ± 0,002	26,8 ± 3,4	—	—	+0,002	+0,002	—	—	+2,9	+5,1	—	—	0,002	0,003
Indian Arm Head	0,042 ± 0,003	24,6 ± 3,8	—	—	+0,001	—	—	—	+4,9	—	—	—	0,003	—
Gibsons	0,038	8,0	-0,036	-0,036	+0,003	—	+64,3	+23,2	+6,1	—	0,027	0,026	0,003	—
Squamish	0,040	10,7	-0,038	-0,040	0,000	—	+59,2	+0,1	+2,3	—	0,028	0,028	0,001	—
Second Narrows	0,040	19,5	—	—	+0,002	+0,002	—	—	+0,8	+3,1	—	—	0,002	0,002

Tableau 19. Comparaison de la composante 2N2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2020 (partie supérieure) et les marégraphes historiques (partie inférieure).

Observation			Erreur d'amplitude				Erreur de phase				Erreur de marée			
Nom de la station	Amplitude	Phase	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,018 ± 0,002	340,3 ± 7,0	-0,009	-0,006	-0,004	—	+123,4	+97,6	+32,0	—	0,017	0,017	0,007	—
Point Atkinson	0,019 ± 0,002	337,3 ± 5,8	-0,010	-0,006	-0,005	—	+124,7	+98,4	+37,3	—	0,018	0,017	0,008	—
Sandy Cove	0,018 ± 0,002	338,4 ± 6,8	-0,009	-0,005	-0,004	-0,004	+123,7	+97,9	+37,2	+36,0	0,017	0,016	0,008	0,007
Kitsilano	0,016 ± 0,003	340,8 ± 9,5	-0,007	-0,004	-0,003	-0,002	+120,1	+96,5	+35,8	+36,6	0,016	0,015	0,007	0,007
Ambleside	0,017 ± 0,002	338,6 ± 8,8	-0,008	-0,004	-0,003	-0,003	+122,9	+99,1	+38,9	+37,2	0,016	0,016	0,008	0,007
Vancouver	0,020 ± 0,002	343,8 ± 5,6	—	—	-0,004	-0,004	—	—	+29,8	+31,9	—	—	0,007	0,007
Port Moody	0,024 ± 0,002	352,9 ± 6,6	—	—	-0,003	-0,003	—	—	+20,6	+23,5	—	—	0,006	0,007
Indian Arm Head	0,025 ± 0,002	352,7 ± 5,6	—	—	-0,004	—	—	—	+22,0	—	—	—	0,007	—
Gibsons	0,032	316,3	-0,020	-0,021	-0,027	—	-159,7	+179,0	+26,1	—	0,031	0,030	0,020	—
Squamish	0,029	334,2	-0,022	-0,026	-0,018	—	-120,3	-110,6	-16,9	—	0,024	0,022	0,013	—
Second Narrows	0,020	357,6	—	—	-0,011	-0,012	—	—	-26,3	-19,2	—	—	0,009	0,009

Tableau 20. Scores du niveau d'eau avec marée pour l'année 2020.

Nom de la station	CRMSE (m)				γ^2				Pearson			
	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,199	0,096	0,051	—	0,038	0,009	0,002	—	0,981	0,996	0,999	—
Point Atkinson	0,201	0,094	0,052	—	0,040	0,009	0,003	—	0,980	0,996	0,999	—
Sandy Cove	0,198	0,094	0,052	0,053	0,039	0,009	0,003	0,003	0,981	0,996	0,999	0,999
Kitsilano	0,199	0,094	0,053	0,054	0,038	0,009	0,003	0,003	0,981	0,996	0,999	0,999
Ambleside	0,194	0,094	0,054	0,056	0,036	0,008	0,003	0,003	0,982	0,996	0,999	0,998
Vancouver	—	—	0,053	0,052	—	—	0,003	0,003	—	—	0,999	0,999
Port Moody	—	—	0,056	0,065	—	—	0,003	0,004	—	—	0,999	0,998
Indian Arm Head	—	—	0,058	—	—	—	0,003	—	—	—	0,999	—

Tableau 21. Scores du niveau d'eau résiduel pour l'année 2020.

Nom de la station	CRMSE (m)				γ^2				Pearson			
	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,052	0,050	0,049	—	0,150	0,140	0,136	—	0,926	0,934	0,936	—
Point Atkinson	0,044	0,040	0,042	—	0,112	0,094	0,100	—	0,944	0,954	0,952	—
Sandy Cove	0,043	0,040	0,041	0,041	0,115	0,100	0,104	0,106	0,943	0,951	0,950	0,949
Kitsilano	0,046	0,043	0,044	0,044	0,134	0,116	0,125	0,124	0,934	0,943	0,940	0,940
Ambleside	0,045	0,042	0,043	0,043	0,130	0,114	0,117	0,117	0,935	0,943	0,943	0,942
Vancouver	—	—	0,042	0,042	—	—	0,102	0,103	—	—	0,950	0,950
Port Moody	—	—	0,044	0,045	—	—	0,116	0,117	—	—	0,944	0,943
Indian Arm Head	—	—	0,070	—	—	—	0,202	—	—	—	0,893	—

Tableau 22. Scores du niveau d'eau total pour l'année 2020.

Nom de la station	Biais (m)				CRMSE (m)			
	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,153	0,178	0,179	—	0,206	0,107	0,071	—
Point Atkinson	0,066	0,081	0,078	—	0,205	0,101	0,063	—
Sandy Cove	0,068	0,082	0,078	0,081	0,203	0,101	0,063	0,064
Kitsilano	0,018	0,033	0,032	0,034	0,203	0,102	0,067	0,068
Ambleside	0,027	0,043	0,039	0,042	0,199	0,102	0,067	0,069
Vancouver	—	—	0,021	0,024	—	—	0,064	0,063
Port Moody	—	—	0,046	0,049	—	—	0,069	0,078
Indian Arm Head	—	—	0,106	—	—	—	0,090	—
Nom de la station	γ^2				Pearson			
	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	0,040	0,011	0,005	—	0,980	0,995	0,998	—
Point Atkinson	0,040	0,010	0,004	—	0,980	0,995	0,998	—
Sandy Cove	0,040	0,010	0,004	0,004	0,980	0,995	0,998	0,998
Kitsilano	0,039	0,010	0,004	0,004	0,980	0,995	0,998	0,998
Ambleside	0,037	0,010	0,004	0,004	0,981	0,995	0,998	0,998

Nom de la station	Biais (m)				CRMSE (m)			
	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Vancouver	—	—	0,004	0,004	—	—	0,998	0,998
Port Moody	—	—	0,004	0,006	—	—	0,998	0,997
Indian Arm Head	—	—	0,007	—	—	—	0,996	—

Tableau 23. Tempêtes prises en compte pour l'analyse des ondes de tempête.

Nom de la tempête	Date de l'apogée
feb17	2017-02-05 à 00 h 00
mar17	2017-03-05 à 18 h 00
apr17	2017-04-12 à 12 h 00
feb19	2019-02-04 à 00 h 00
oct20	2020-10-12 à 00 h 00
feb21	2021-02-13 à 12 h 00
BCFloods	2021-11-15 à 00 h 00
dec21	2021-12-25 à 00 h 00

Tableau 24. Scores pour les ondes de tempête pour chaque station, calculés en moyenne sur le nombre de tempêtes indiqué dans la colonne N.

Station	N	CRMSE (m)				γ^2				Pearson			
		SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20	SPCOG-O	SS500	SSS150	VH20
Darrell Bay	5	0,049	0,043	0,042	—	0,293	0,283	0,276	—	0,879	0,894	0,894	—
Point Atkinson	8	0,032	0,030	0,031	—	0,189	0,172	0,174	—	0,911	0,923	0,923	—
Sandy Cove	8	0,032	0,030	0,030	0,031	0,181	0,158	0,164	0,167	0,914	0,926	0,924	0,923
Kitsilano	7	0,034	0,031	0,030	0,031	0,173	0,146	0,144	0,150	0,929	0,934	0,934	0,932
Ambleside	5	0,034	0,032	0,033	0,033	0,160	0,131	0,141	0,144	0,919	0,936	0,933	0,931
Vancouver	8	—	—	0,029	0,029	—	—	0,143	0,143	—	—	0,933	0,933
Port Moody	5	—	—	0,033	0,033	—	—	0,131	0,130	—	—	0,935	0,936
Indian Arm Head	5	—	—	0,037	—	—	—	0,142	—	—	—	0,930	—

Tableau 25. Périodes utilisées pour analyser les données de l'ADCP horizontal installé dans Second Narrows.

Période	Début	Fin	Durée (jours)
year2018a	13 mars 2018	16 septembre 2018	187
year2019a	12 août 2019	21 décembre 2019	131
year2020a	7 janvier 2020	4 juin 2020	149
year2020b	13 juin 2020	1 ^{er} mai 2021	322
year2021b	20 juillet 2021	1 ^{er} janvier 2022	165

Tableau 26. Scores totaux, résiduels (sans marée) et tidaux (marée) pour cinq périodes pour le courant le long du rivage enregistré par l'ADCP horizontal installé dans Second Narrows.

	Période	Moyenne (m/s)	Biais (m/s)			CRMSE (m/s)			χ^2			Pearson		
			SSS150	VH20	Comp.	SSS150	VH20	Comp.	SSS150	VH20	Comp.	SSS150	VH20	Comp.
Courant total	year2018a	-0,129	-0,001	0,015	-0,075	0,244	0,270	0,316	0,045	0,055	0,075	0,980	0,979	0,981
	year2019a	-0,139	0,004	0,022	-0,046	0,213	0,163	0,208	0,031	0,018	0,030	0,993	0,992	0,990
	year2020a	-0,144	0,007	0,031	-0,044	0,257	0,164	0,205	0,041	0,017	0,026	0,993	0,992	0,991
	year2020b	-0,137	0,005	0,021	-0,050	0,245	0,192	0,229	0,040	0,025	0,035	0,989	0,988	0,988
	year2021b	-0,137	0,006	0,025	-0,042	0,253	0,188	0,211	0,042	0,023	0,029	0,990	0,989	0,988
Courant résiduel (sans marée)	year2018a	—	—	—	—	0,189	0,193	—	0,827	0,858	—	0,423	0,427	—
	year2019a	—	—	—	—	0,113	0,112	—	0,262	0,261	—	0,869	0,862	—
	year2020a	—	—	—	—	0,121	0,120	—	0,273	0,270	—	0,859	0,857	—
	year2020b	—	—	—	—	0,146	0,147	—	0,699	0,705	—	0,550	0,569	—
	year2021b	—	—	—	—	0,148	0,145	—	0,327	0,316	—	0,830	0,828	—
Courant de marée (tidal)	year2018a	—	—	—	—	0,154	0,189	0,257	0,019	0,028	0,051	0,993	0,992	0,994
	year2019a	—	—	—	—	0,181	0,118	0,235	0,023	0,010	0,039	0,997	0,996	0,988
	year2020a	—	—	—	—	0,227	0,111	0,230	0,033	0,008	0,034	0,997	0,996	0,989
	year2020b	—	—	—	—	0,197	0,124	0,154	0,026	0,010	0,016	0,997	0,995	0,997
	year2021b	—	—	—	—	0,204	0,118	0,234	0,029	0,010	0,037	0,997	0,995	0,986

Tableau 27. Composantes de marée analysées sur cinq périodes pour le courant le long du rivage enregistré par l'ADCP horizontal installé dans Second Narrows.

Comp.	Période	Observation		Erreur d'amplitude (m/s)		Erreur de phase (degré)		Erreur de marée (m/s)	
		Amplitude	Phase	SSS150	VH20	SSS150	VH20	SSS150	VH20
M2	year2018a	1,321	319,3	-0,102	+0,151	-2,7	-3,4	0,083	0,122
	year2019a	1,421	319,5	-0,182	+0,061	-2,4	-3,3	0,134	0,073
	year2020a	1,470	319,1	-0,239	-0,009	-2,0	-2,9	0,173	0,053
	year2020b	1,427	319,0	-0,194	+0,054	-1,9	-2,6	0,140	0,061
	year2021b	1,448	319,6	-0,208	+0,045	-2,7	-3,5	0,154	0,072
N2	year2018a	0,255	297,0	+0,006	+0,047	-3,4	-4,8	0,012	0,037
	year2019a	0,311	291,2	-0,045	-0,004	-3,2	-4,0	0,034	0,016
	year2020a	0,329	295,9	-0,055	-0,018	-3,7	-3,6	0,041	0,019
	year2020b	0,300	297,3	-0,043	-0,008	-6,1	-7,4	0,037	0,028
	year2021b	0,295	300,8	-0,035	+0,001	-5,4	-6,8	0,031	0,025
S2	year2018a	0,338	352,8	-0,009	+0,031	-0,4	-1,3	0,007	0,022
	year2019a	0,398	346,0	-0,054	-0,004	+3,1	+0,8	0,041	0,005
	year2020a	0,414	354,7	-0,064	-0,023	-2,1	-3,1	0,046	0,022
	year2020b	0,379	350,0	-0,051	-0,011	+1,9	+0,8	0,037	0,009
	year2021b	0,398	348,4	-0,066	-0,020	+2,9	+1,5	0,049	0,016
O1	year2018a	0,321	195,5	-0,031	+0,031	+1,9	-3,9	0,023	0,027
	year2019a	0,332	192,9	-0,046	+0,018	+1,5	-4,0	0,033	0,021
	year2020a	0,355	191,4	-0,062	-0,002	+2,2	-3,1	0,044	0,013
	year2020b	0,349	194,5	-0,052	+0,005	-1,6	-7,4	0,037	0,032
	year2021b	0,345	193,2	-0,064	-0,002	-0,3	-6,7	0,045	0,028
K1	year2018a	0,623	210,9	-0,052	+0,053	-1,2	-2,6	0,038	0,043
	year2019a	0,613	205,4	-0,089	+0,002	-0,2	-1,8	0,063	0,014
	year2020a	0,650	210,7	-0,114	-0,020	-0,3	-2,3	0,081	0,023
	year2020b	0,669	210,3	-0,104	-0,001	-0,8	-2,5	0,074	0,021
	year2021b	0,654	208,3	-0,105	-0,002	-0,6	-2,2	0,074	0,018
P1	year2018a	0,203	226,2	-0,037	0,000	-16,3	-17,9	0,045	0,045
	year2020b	0,211	213,8	-0,043	-0,010	-2,6	-5,1	0,031	0,015
Q1	year2018a	0,054	197,5	+0,001	+0,007	+5,2	-2,3	0,004	0,005
	year2019a	0,063	182,6	-0,007	-0,003	+7,4	-3,3	0,007	0,003
	year2020a	0,064	198,1	-0,011	-0,005	+5,4	-3,5	0,009	0,005
	year2020b	0,066	189,6	-0,008	-0,001	+8,6	-2,5	0,008	0,002
	year2021b	0,068	193,6	-0,008	+0,001	+6,7	-3,5	0,008	0,003
K2	year2018a	0,082	359,8	-0,004	+0,012	-16,5	-22,7	0,016	0,026
	year2020b	0,090	346,8	-0,010	+0,010	-3,1	-6,3	0,008	0,010

Tableau 28. Scores pour le courant total enregistré à quatre profondeurs sélectionnées lors de deux 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 (degrés)	
		SSS150	VH20	SSS150	VH20	SSS150	VH20	SSS150	VH20	SSS150	VH20	SSS150	VH20
BUW02	24,9	0,29	0,25	0,01	0,01	0,49	0,46	0,55	0,51	0,72	0,70	20,0	3,5
	29,9	0,26	0,22	0,02	0,03	0,45	0,42	0,57	0,53	0,72	0,69	20,1	6,2
	34,9	0,18	0,15	0,04	0,03	0,43	0,39	0,66	0,58	0,67	0,66	17,9	8,0
	39,9	0,08	0,05	0,05	0,05	0,40	0,37	0,73	0,61	0,61	0,64	19,3	10,4
BIIP	10,0	0,00	0,00	0,02	0,00	0,24	0,23	0,44	0,38	0,80	0,80	9,6	-0,8
	15,0	0,05	0,04	-0,01	-0,03	0,23	0,21	0,42	0,33	0,82	0,83	9,5	1,2
	25,0	0,01	0,01	-0,02	0,00	0,19	0,19	0,23	0,23	0,88	0,88	-2,4	2,9
	35,0	-0,18	-0,09	0,03	0,03	0,36	0,22	0,72	0,29	0,83	0,86	-40,7	-3,5

Tableau 29. Scores pour le courant résiduel enregistré à quatre profondeurs sélectionnées lors de deux déploiements de l'ADCP.

Station	Profondeur (m)	RMSE (m/s)		γ^2		Amplitude de corrélation vectorielle		Angle de corrélation vectorielle (degré)	
		SSS150	VH20	SSS150	VH20	SSS150	VH20	SSS150	VH20
BUW02	24,9	0,36	0,33	1,41	1,53	0,09	0,08	3,2	-10,2
	29,9	0,31	0,29	1,19	1,50	0,19	0,20	12,1	0,7
	34,9	0,24	0,25	1,02	1,50	0,22	0,24	14,0	-0,5
	39,9	0,20	0,21	0,99	1,29	0,20	0,26	16,4	1,1
BIIP	10,0	0,22	0,22	1,08	1,07	0,25	0,33	29,6	-0,3
	15,0	0,20	0,20	1,10	1,08	0,19	0,31	25,0	4,8
	25,0	0,16	0,16	1,08	1,06	0,27	0,33	-1,0	5,6
	35,0	0,25	0,19	0,96	0,91	0,24	0,34	-31,5	3,8

Tableau 30. Scores pour le courant de marée enregistré à quatre profondeurs sélectionnées lors de deux déploiements de l'ADCP.

Station	Profondeur (m)	RMSE (m/s)		γ^2	
		SSS150	VH20	SSS150	VH20
BUW02	24,9	0,34	0,32	0,45	0,39
	29,9	0,33	0,30	0,49	0,41
	34,9	0,35	0,30	0,61	0,43
	39,9	0,35	0,29	0,68	0,47
BIUP	10,0	0,10	0,05	0,12	0,03
	15,0	0,12	0,06	0,16	0,04
	25,0	0,09	0,09	0,07	0,06
	35,0	0,26	0,11	0,65	0,12

Tableau 31. Scores pour la température de surface de la mer pour la baie des Anglais (bouée 46304).

Nom de la station	Score	SPCOG-O	SS500	SSS150
Baie English (46304)	Biais (degré C)	-0,59	-0,52	-0,68
	CRMSE (degré C)	1,60	1,05	0,98
	γ^2	0,13	0,06	0,05
	Pearson	0,95	0,98	0,98

Tableau 32. Scores pour la température et la salinité enregistrées par la sonde CTD de la plateforme d'instruments installée dans la baie Burrard lors de deux déploiements.

Nom de la station	Score	Température		Salinité	
		SSS150	VH20	SSS150	VH20
BIIP, 2019-03	Biais	0,32	0,29	-0,36	0,08
	CRMSE	0,34	0,29	0,33	0,29
	γ^2	0,09	0,06	0,62	0,50
	Pearson	0,98	0,98	0,72	0,73
BIIP, 2020-10	Biais	0,16	0,17	-0,20	0,27
	CRMSE	0,31	0,27	0,38	0,36
	γ^2	0,07	0,05	0,65	0,61
	Pearson	0,99	0,98	0,68	0,66

Tableau 33. Nombre de profils CTD par région.

Région	Nombre de profils
Baie Howe	381
Baie English	196
Port de Vancouver	181
Port de Vancouver-Est	64
Port Moody	14
Indian Arm	112

Tableau 34. Scores de l'indice de performance de Molcard et de la distance de séparation pour l'évaluation de la dérive.

Heure	Indice de performance de Molcard		Distance de séparation (km)	
	SSS150	VH20	SSS150	VH20
1	0,22	0,20	0,74	0,73
2	0,21	0,22	1,59	1,46
3	0,21	0,24	2,20	1,95
4	0,20	0,23	2,95	2,50
5	0,19	0,24	3,53	2,91

12. FIGURES

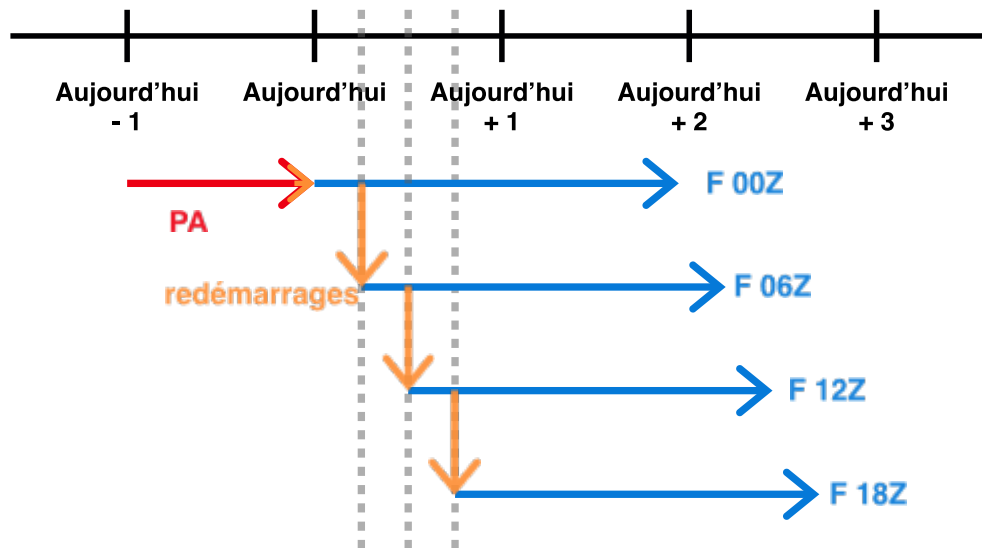


Figure 1. Schéma de séquençage de la pseudo-analyse (PA, en rouge) et des 4 prévisions de 48 h (en bleu) pour une date donnée. Les lignes pointillées grises sont espacées de six heures et les flèches orange indiquent les moments où un fichier de redémarrage est généré et utilisé pour lancer l'étape suivante. 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.

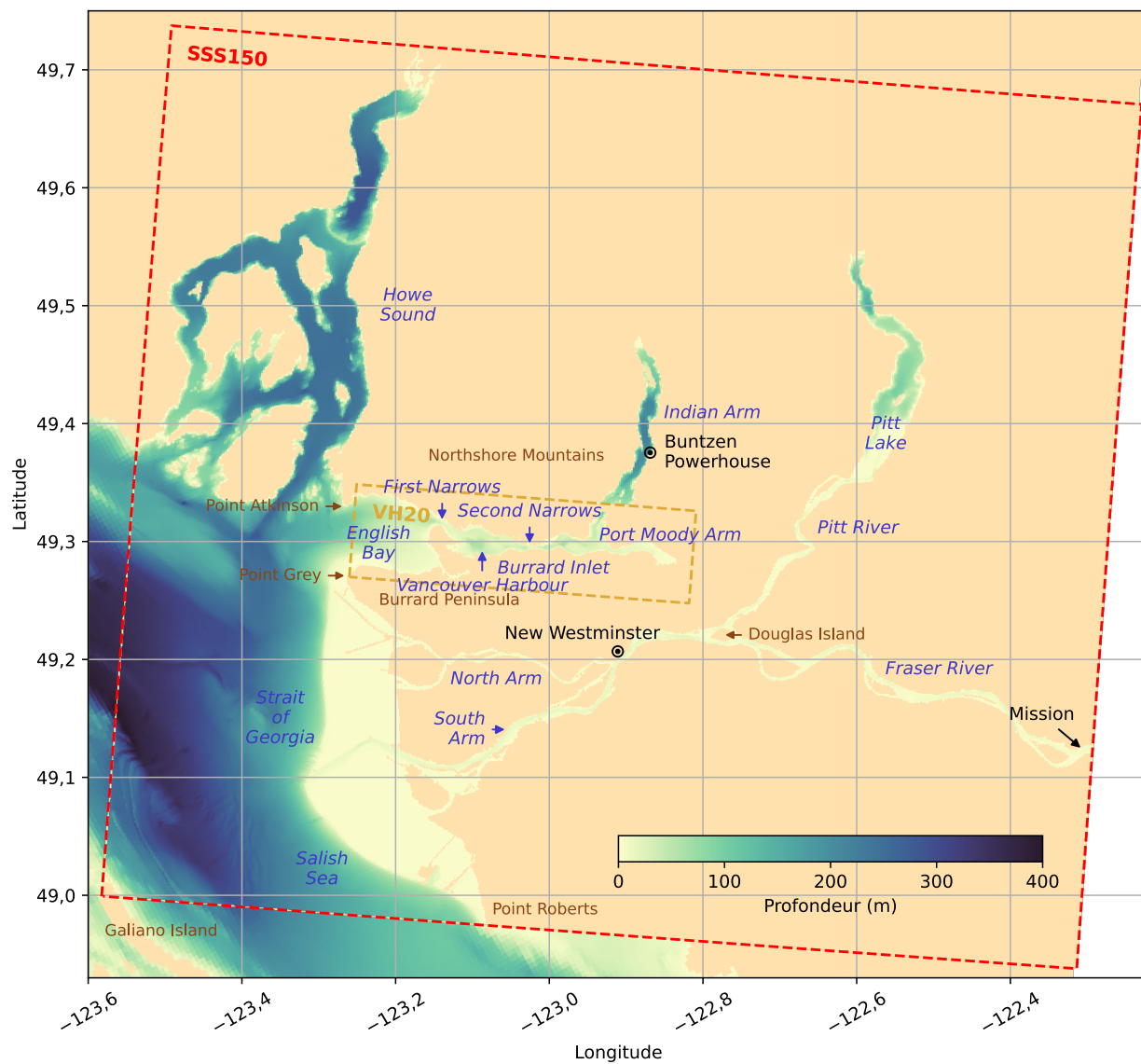


Figure 2. Domaine du modèle montrant la grille externe du SSS150 (ligne pointillée rouge) et la grille interne du VH20 (ligne pointillée jaune foncé).

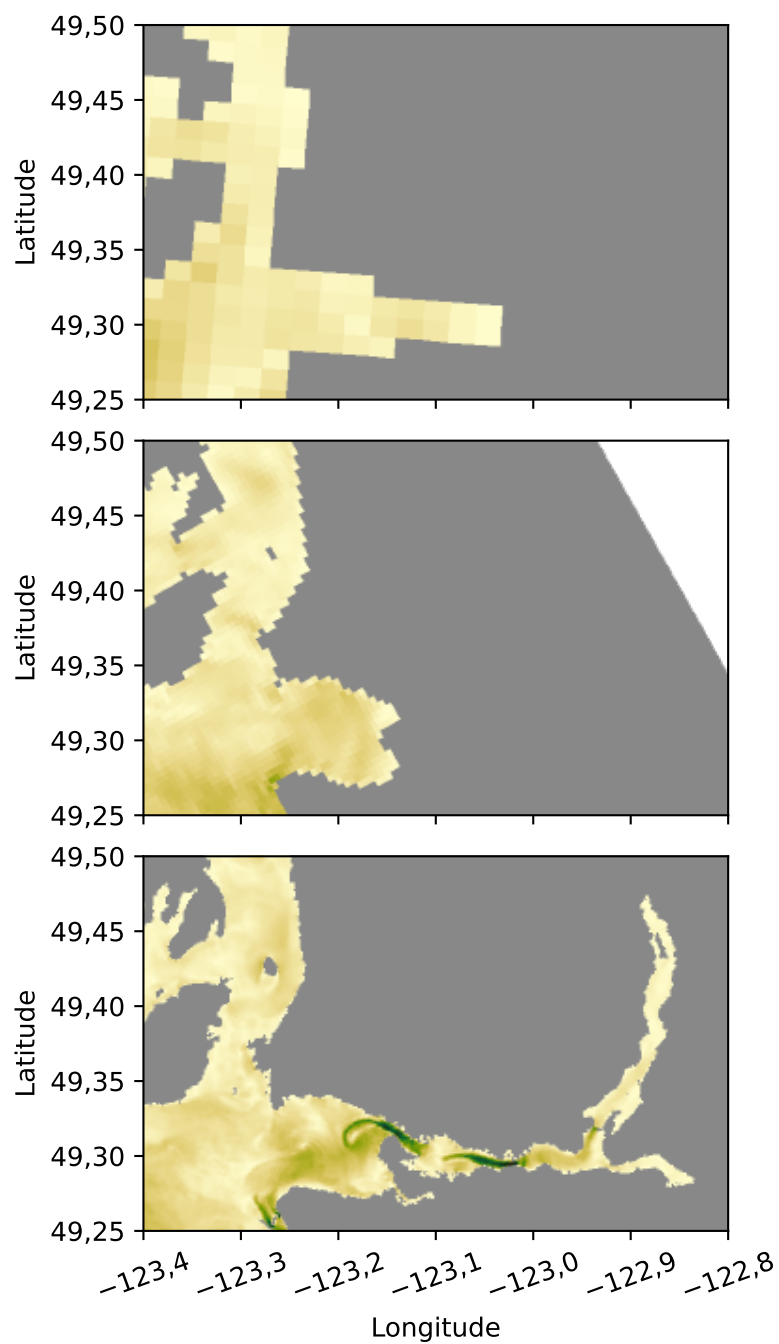


Figure 3. Vitesse de surface (m/s) du SPCOG-O, du SS500 et du SSS150 pour le bras de mer Burrard.

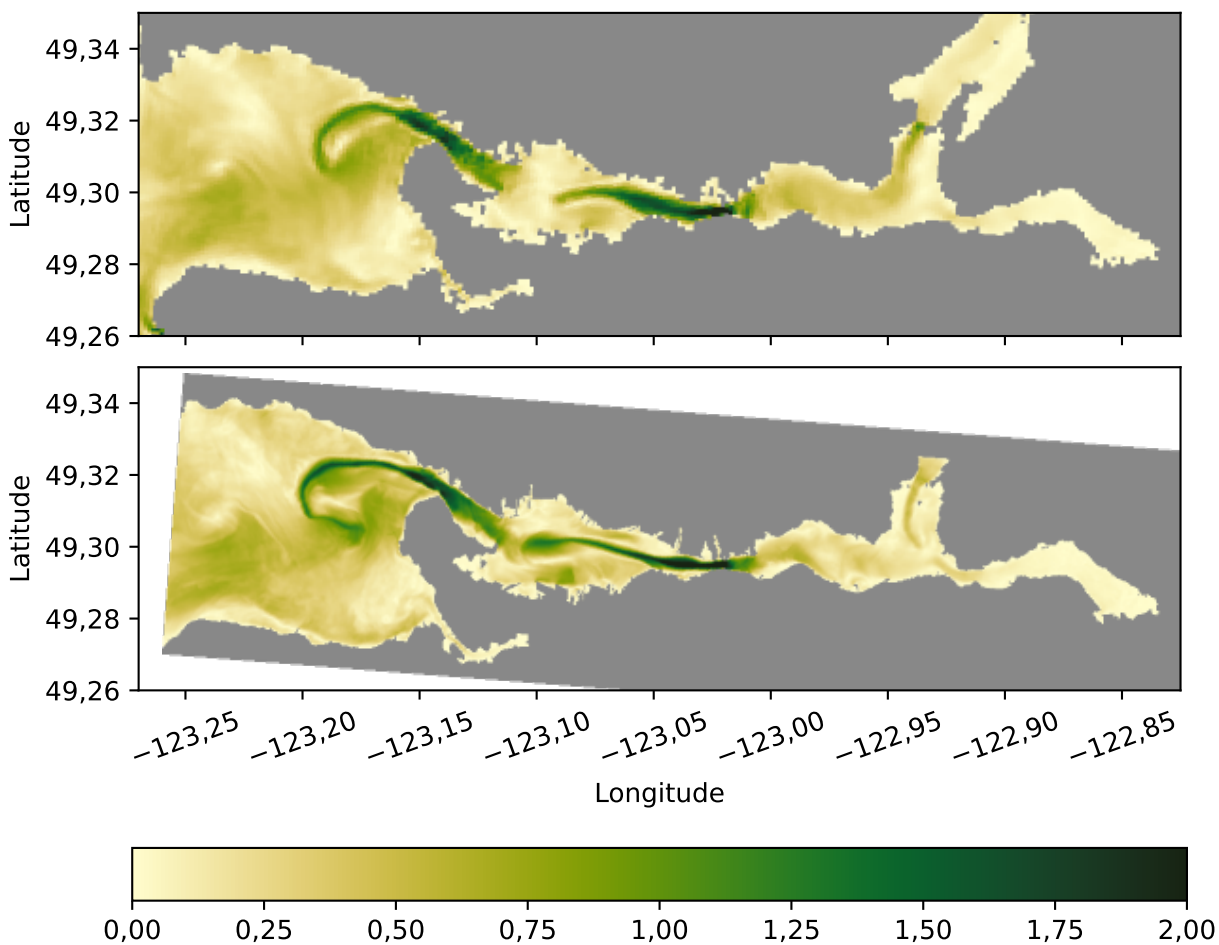


Figure 4. Vitesse de surface (m/s) du SSS150 et du VH20 pour le port de Vancouver.

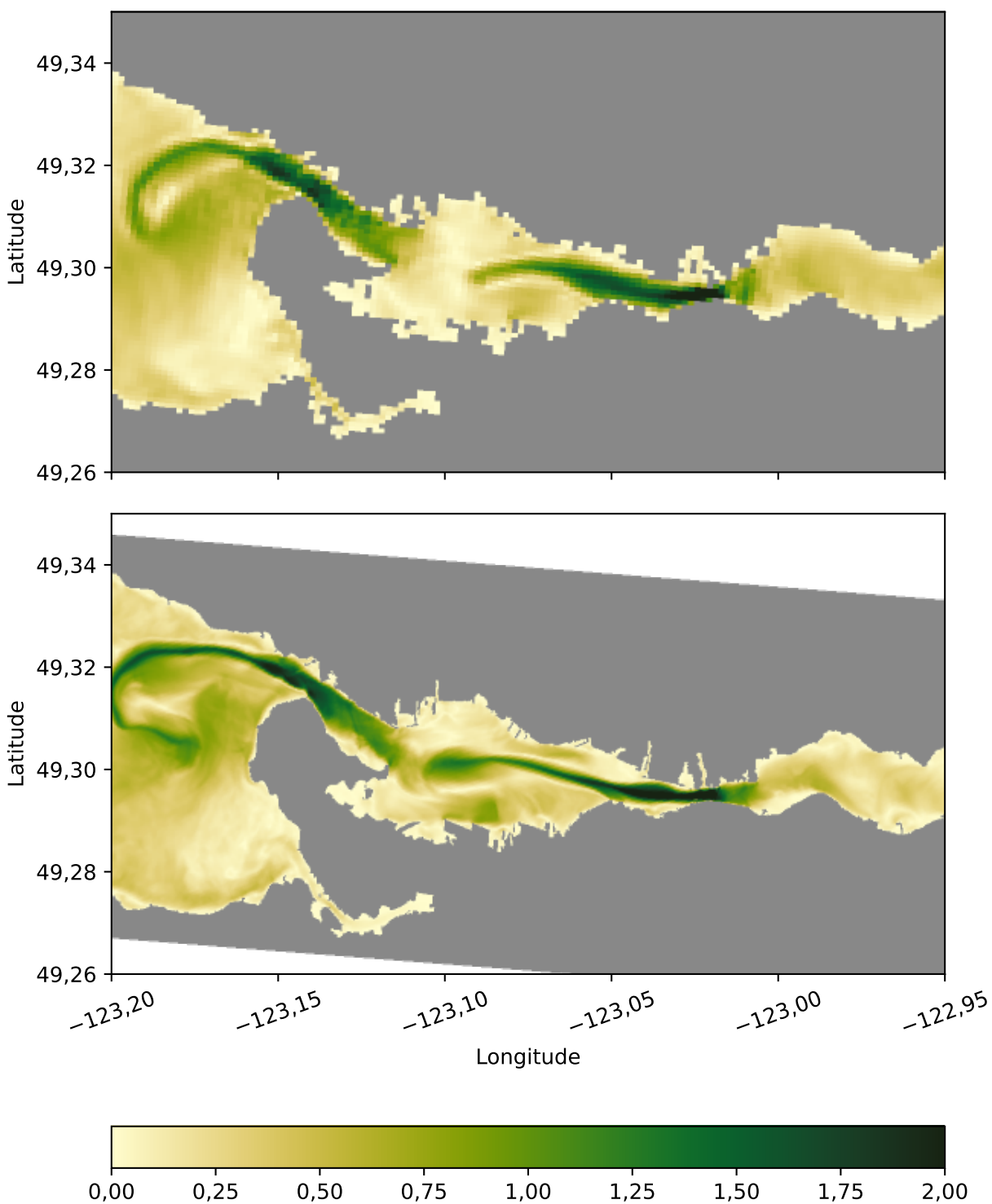


Figure 5. Vitesse de surface (m/s) du SSS150 et du VH20 pour le port de Vancouver (agrandissement sur la zone de First Narrows et Second Narrows).

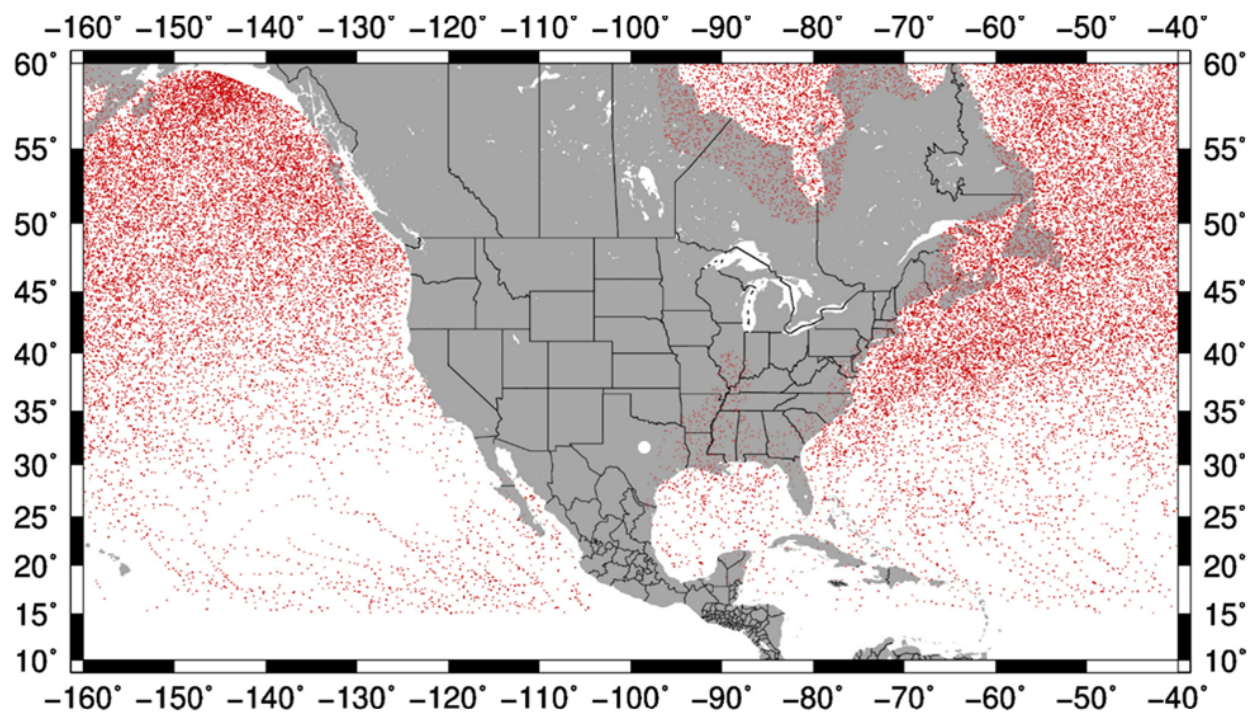


Figure 6. Emplacements des cyclones toutes les 6 heures de 2010 à 2021.

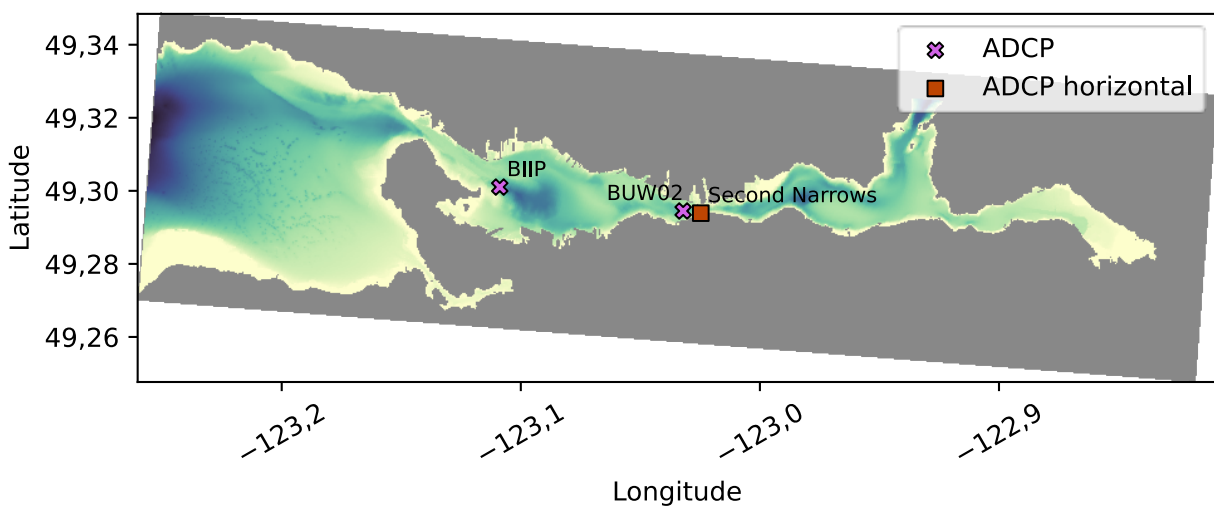


Figure 7. Emplacement des deux ADCP et de l'ADCP horizontal utilisés dans l'évaluation.

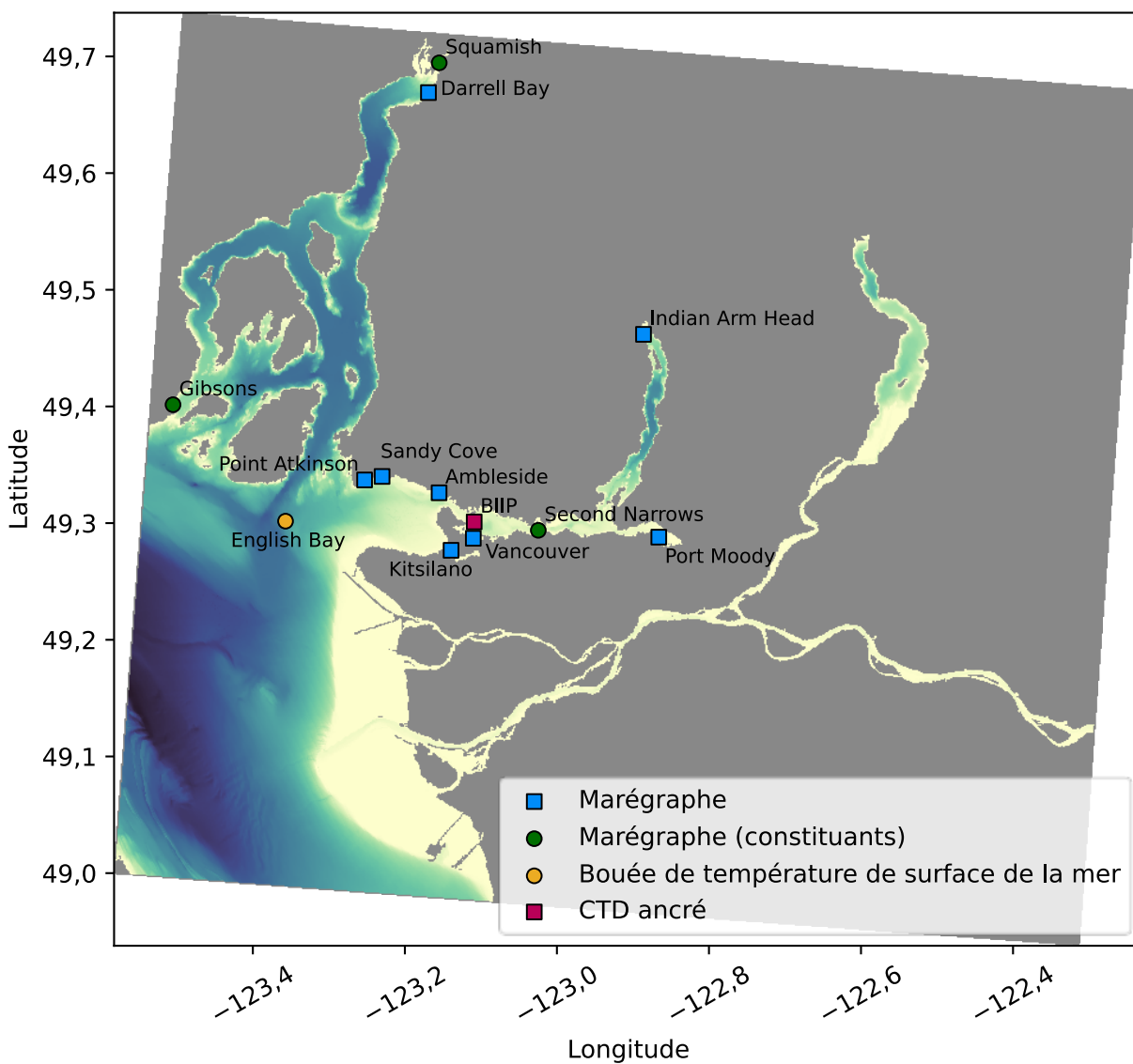


Figure 8. Emplacement des huit marégraphes, des trois enregistrements des composantes du niveau d'eau, de la bouée de mesure de la température de surface de la mer et de la sonde CTD ancrée utilisés pour cette évaluation.

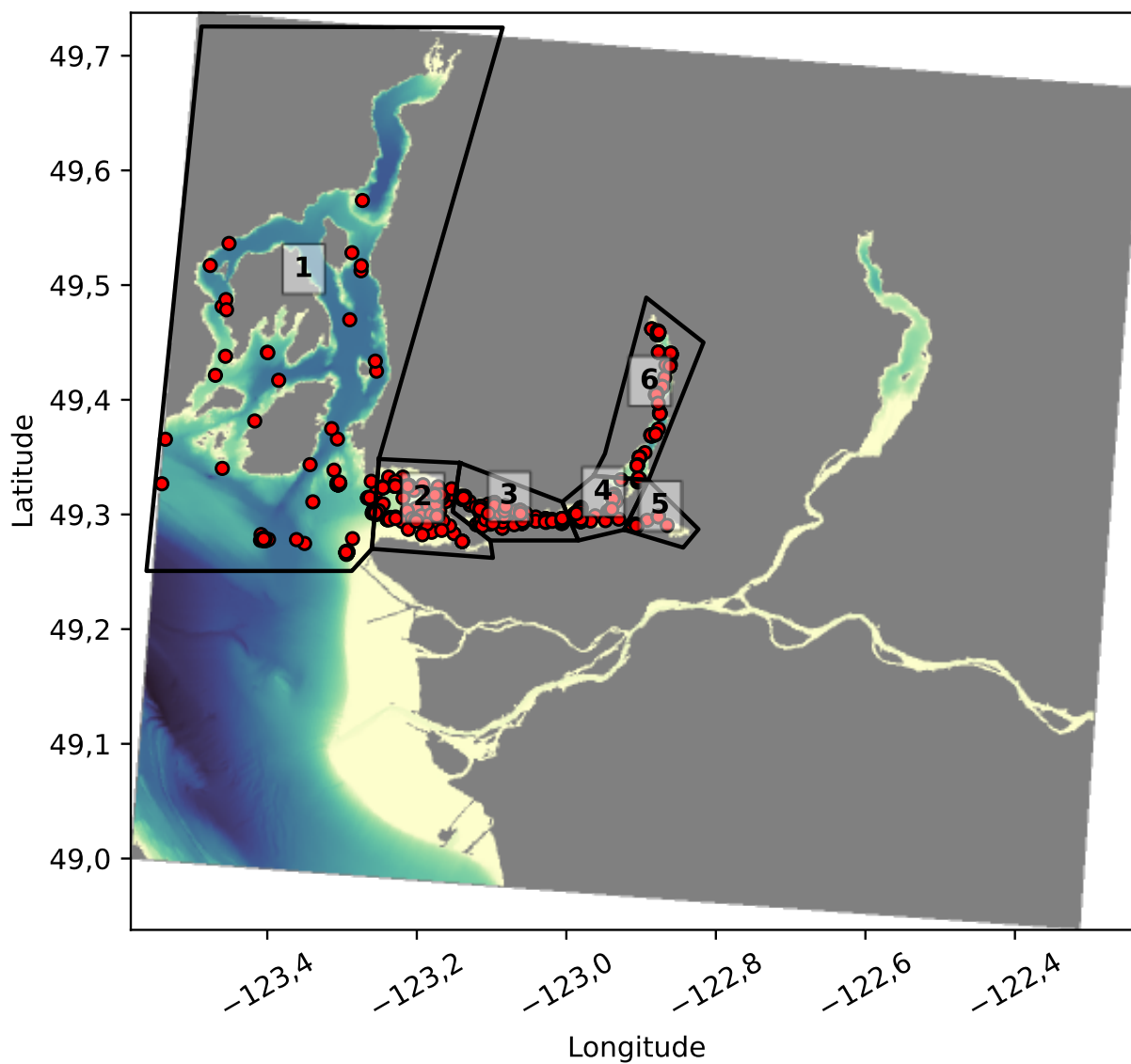


Figure 9. Sous-régions utilisées pour l'analyse des profils CTD : 1) baie Howe, 2) baie des Anglais, 3) port de Vancouver, 4) port de Vancouver-Est, 5) Port Moody et 6) Indian Arm.

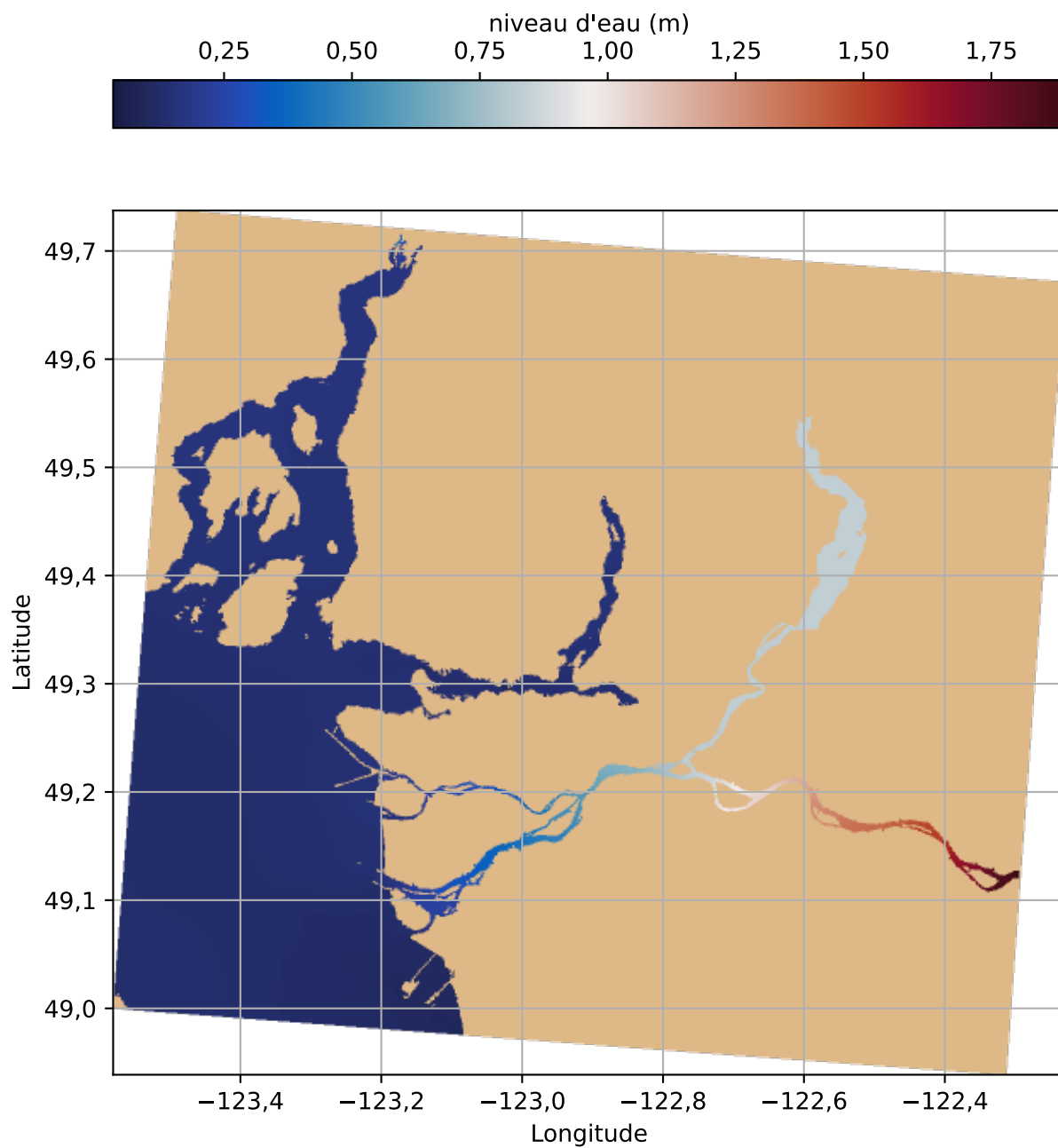


Figure 10. Niveau d'eau moyen pour le domaine externe du SSS150, calculé sur la période de la simulation rétrospective de cinq ans de 2017 à 2021.

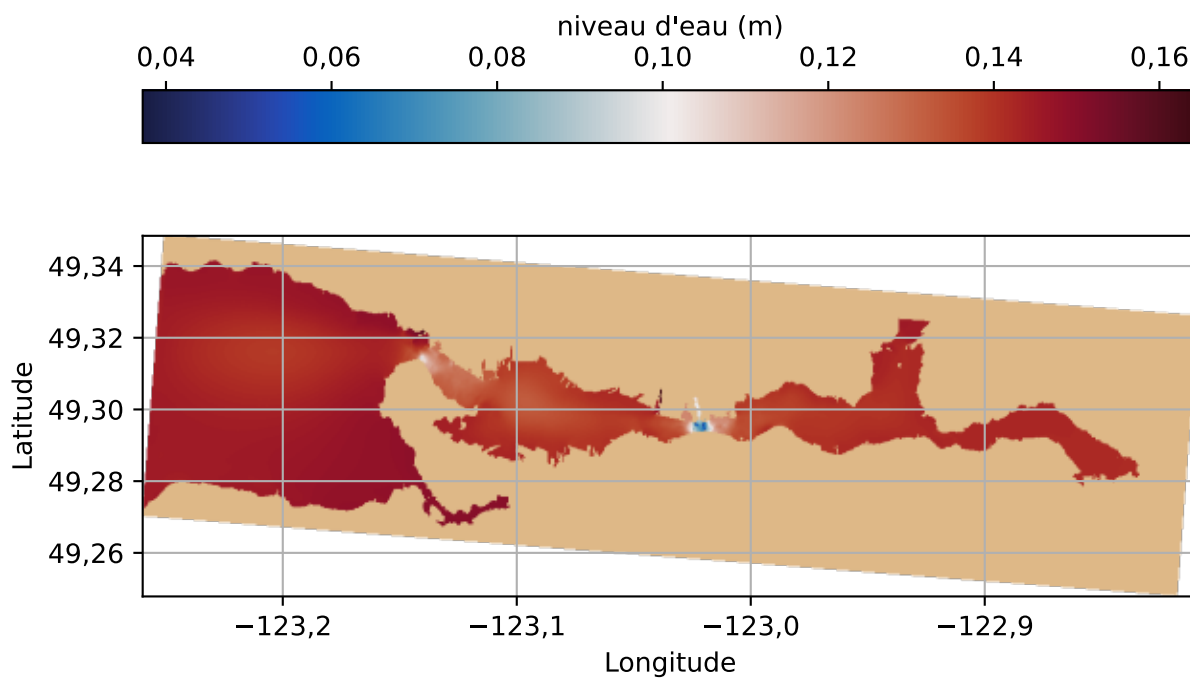


Figure 11. Niveau d'eau moyen pour le domaine interne du VH20, calculé sur la période de la simulation rétrospective de cinq ans de 2017 à 2021.

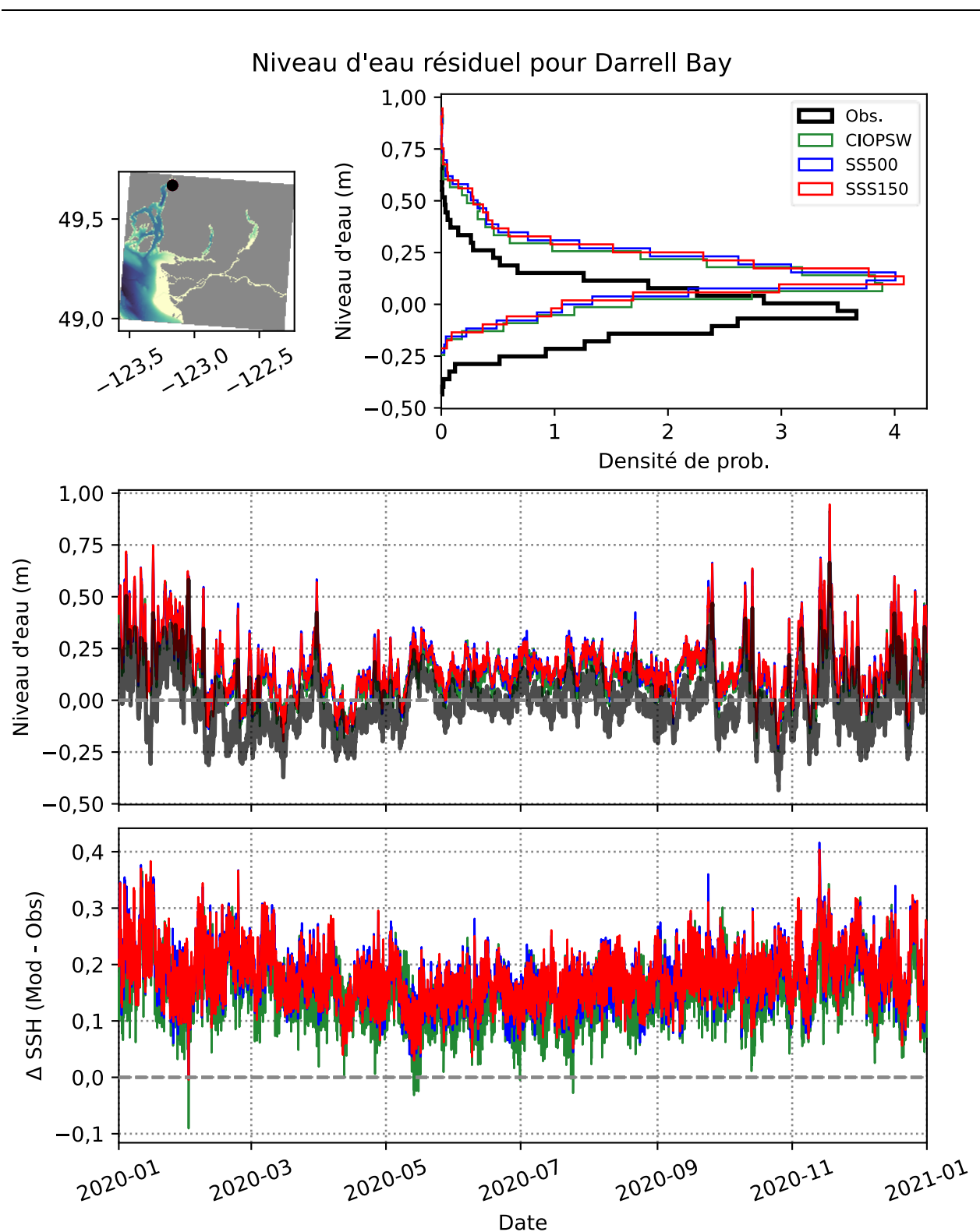


Figure 12. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Darrell Bay en 2020.

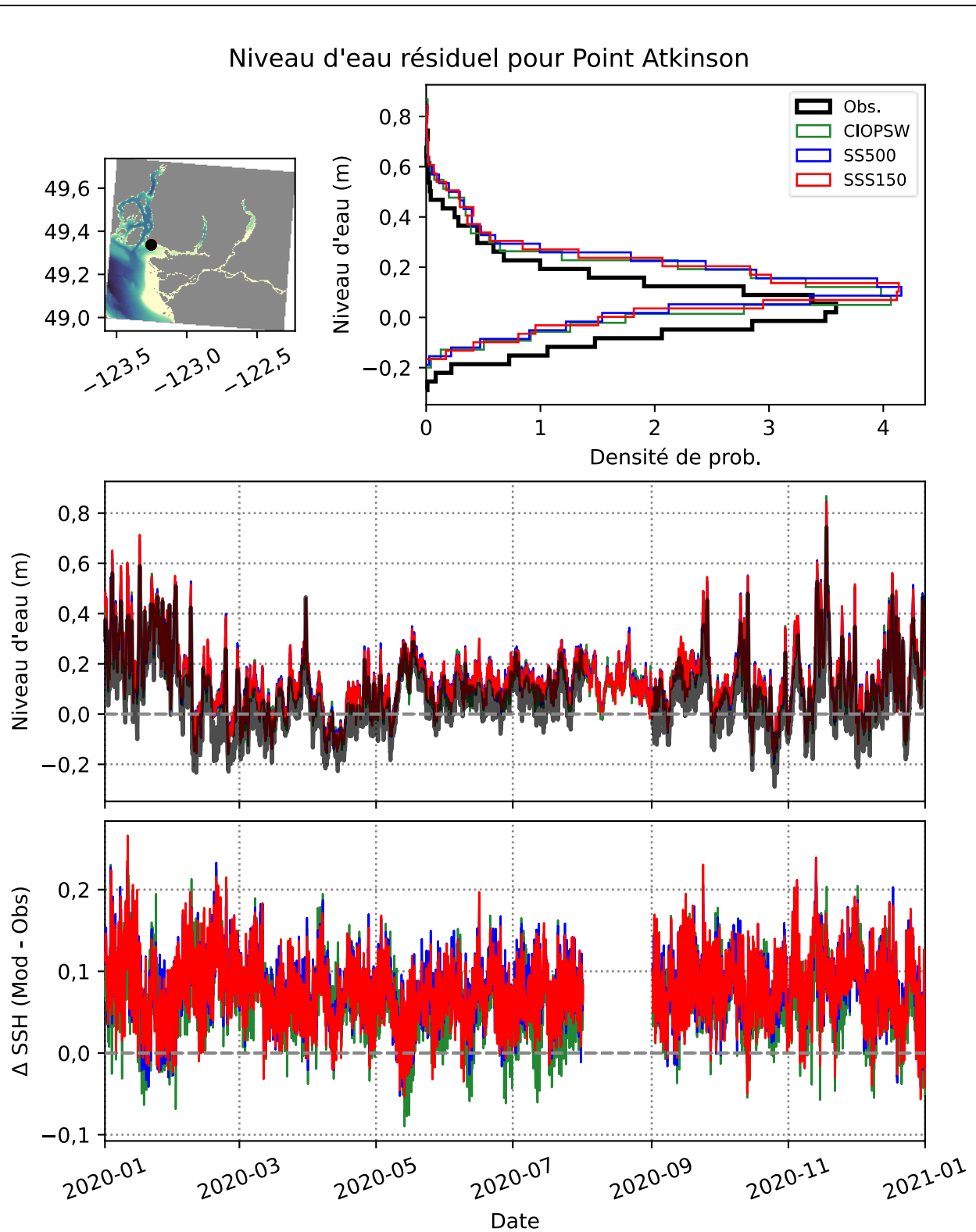


Figure 13. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Point Atkinson en 2020.

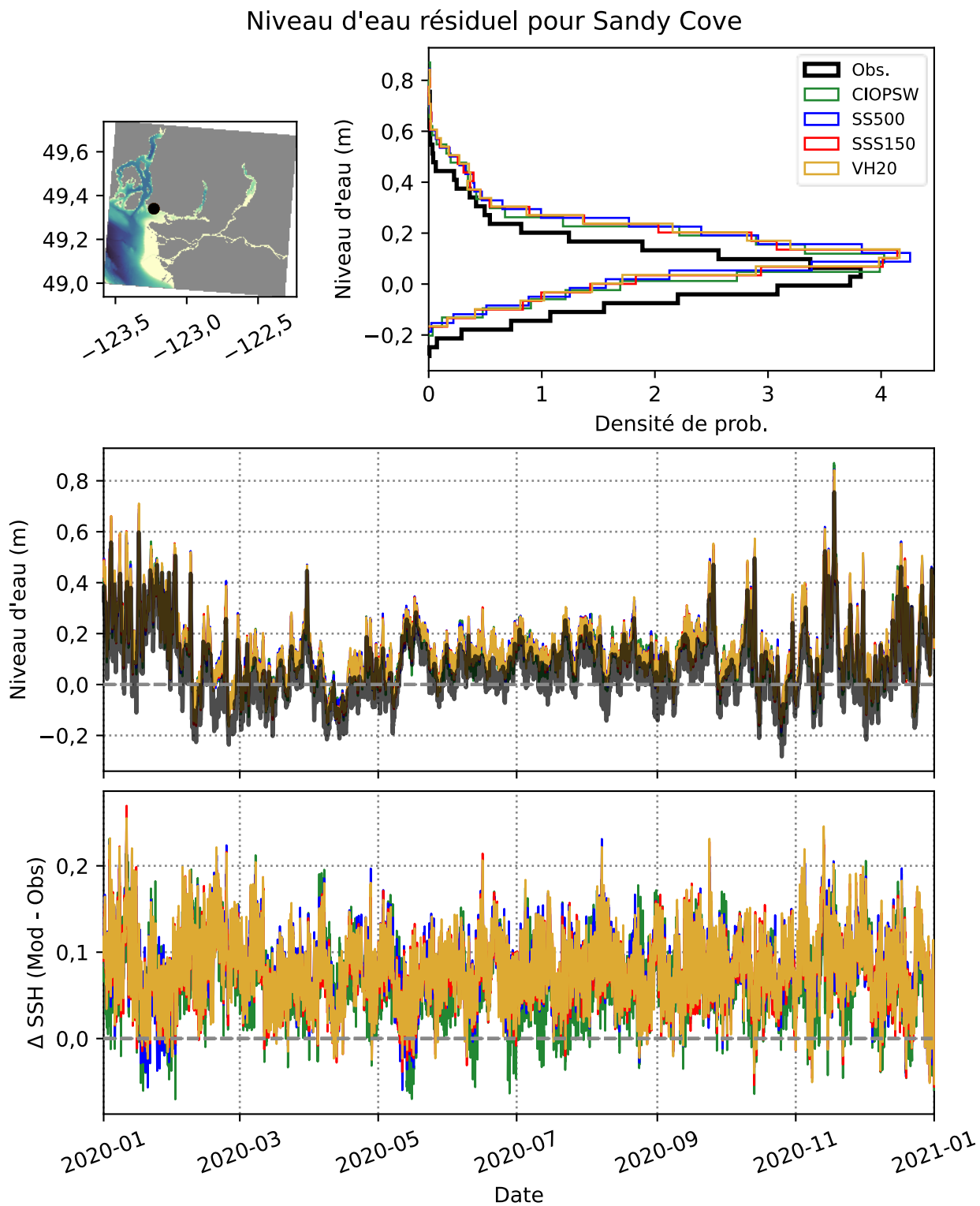


Figure 14. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Sandy Cove en 2020.

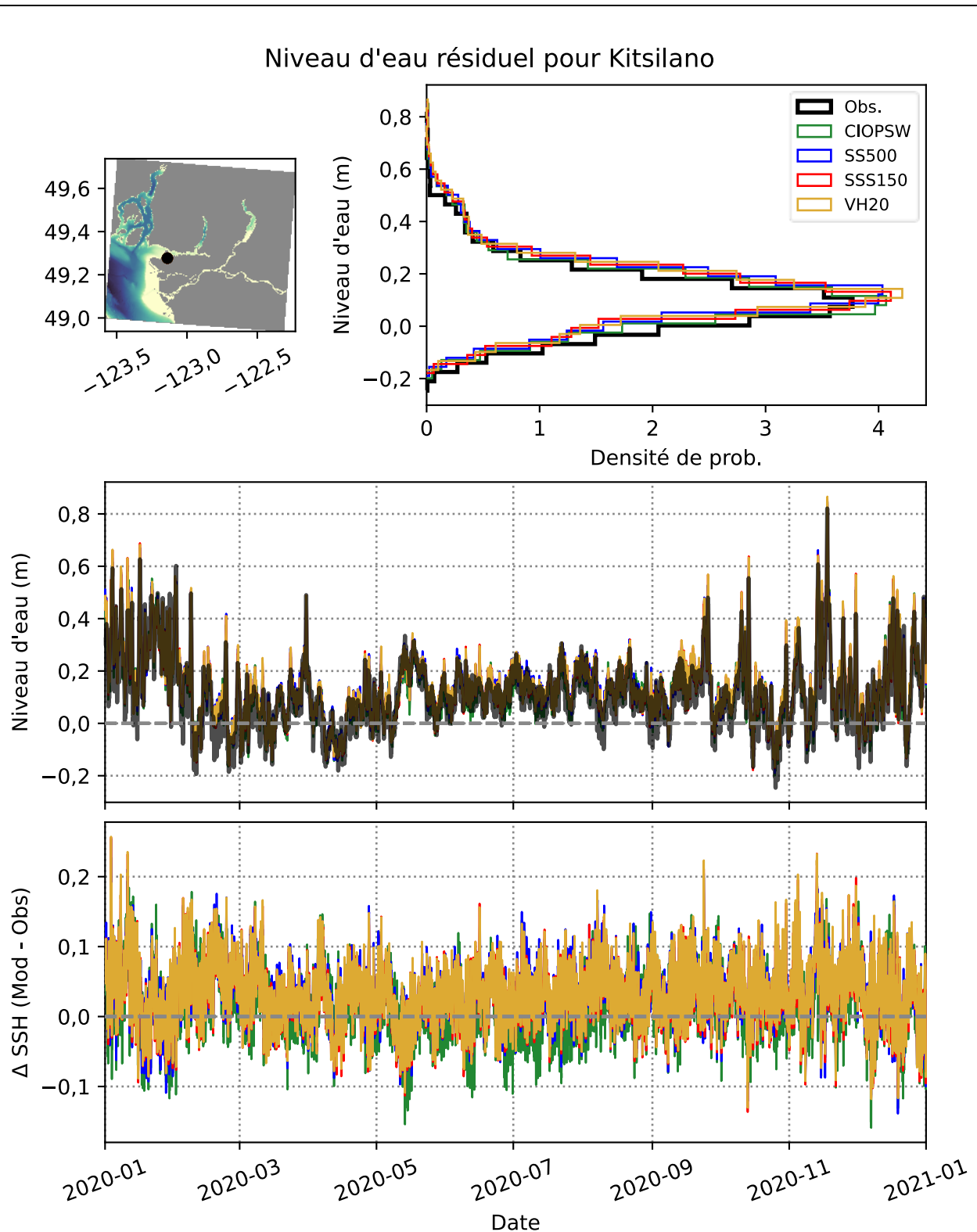


Figure 15. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Kitsilano en 2020.

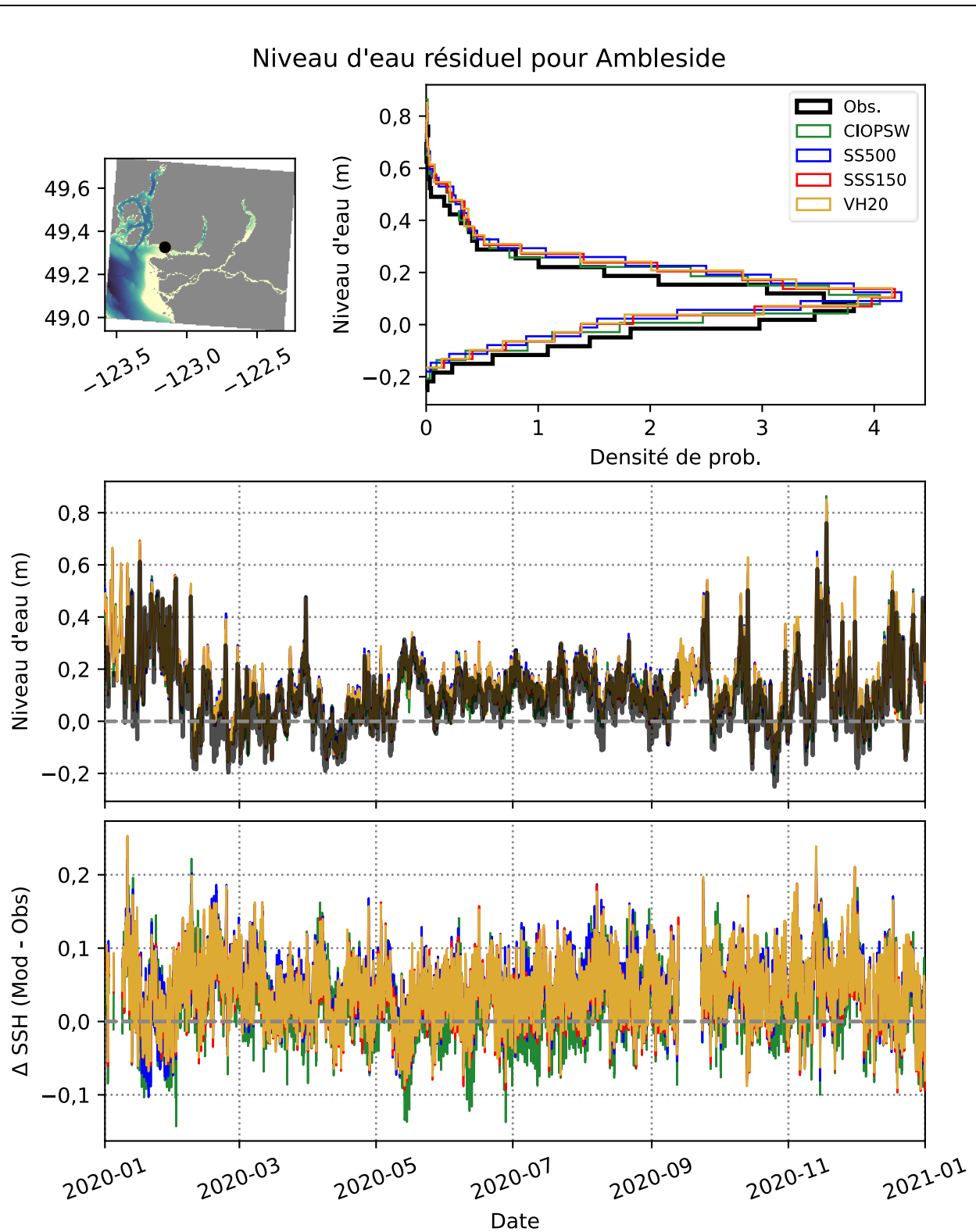


Figure 16. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Ambleside en 2020.

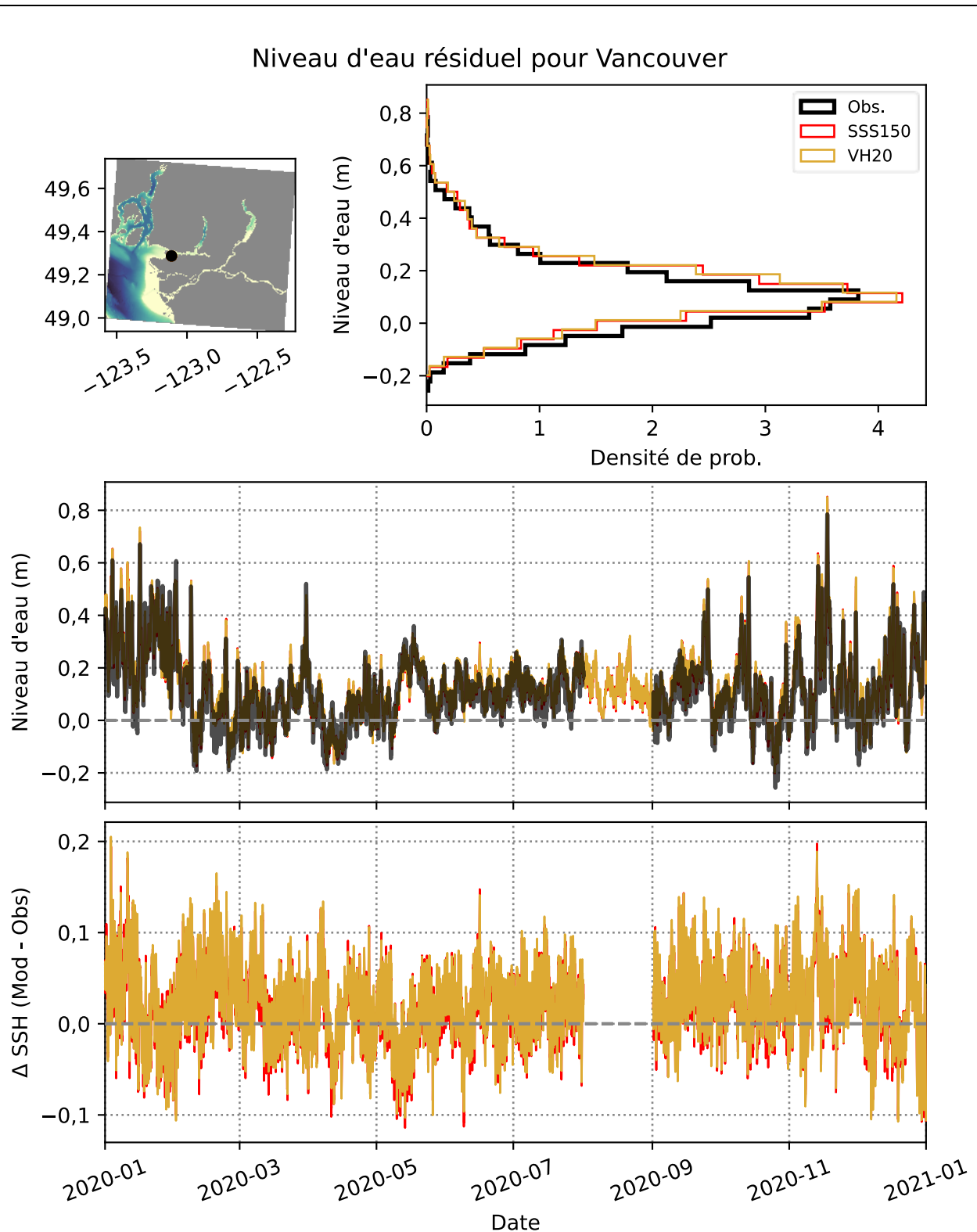


Figure 17. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Vancouver en 2020.

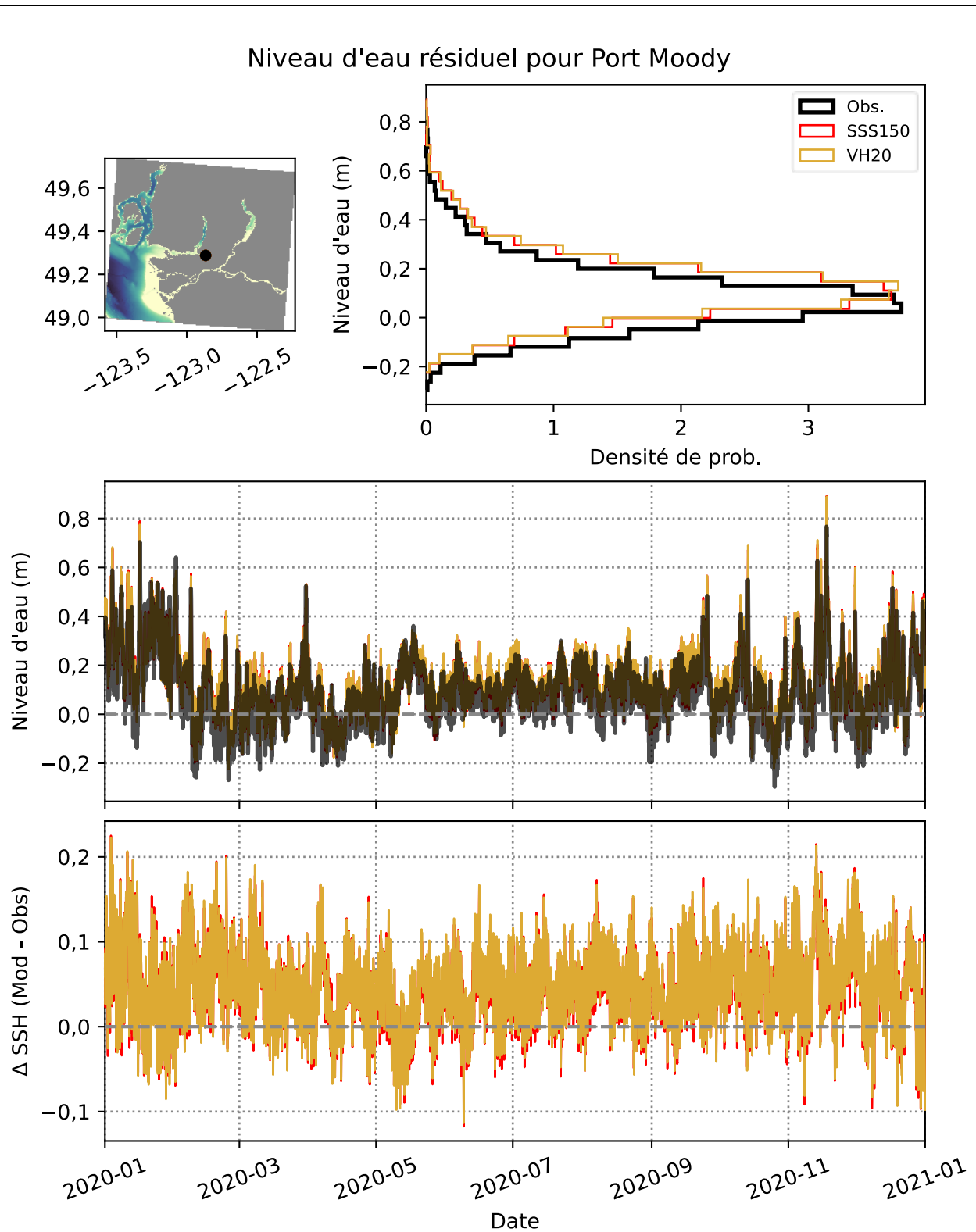


Figure 18. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Port Moody en 2020.

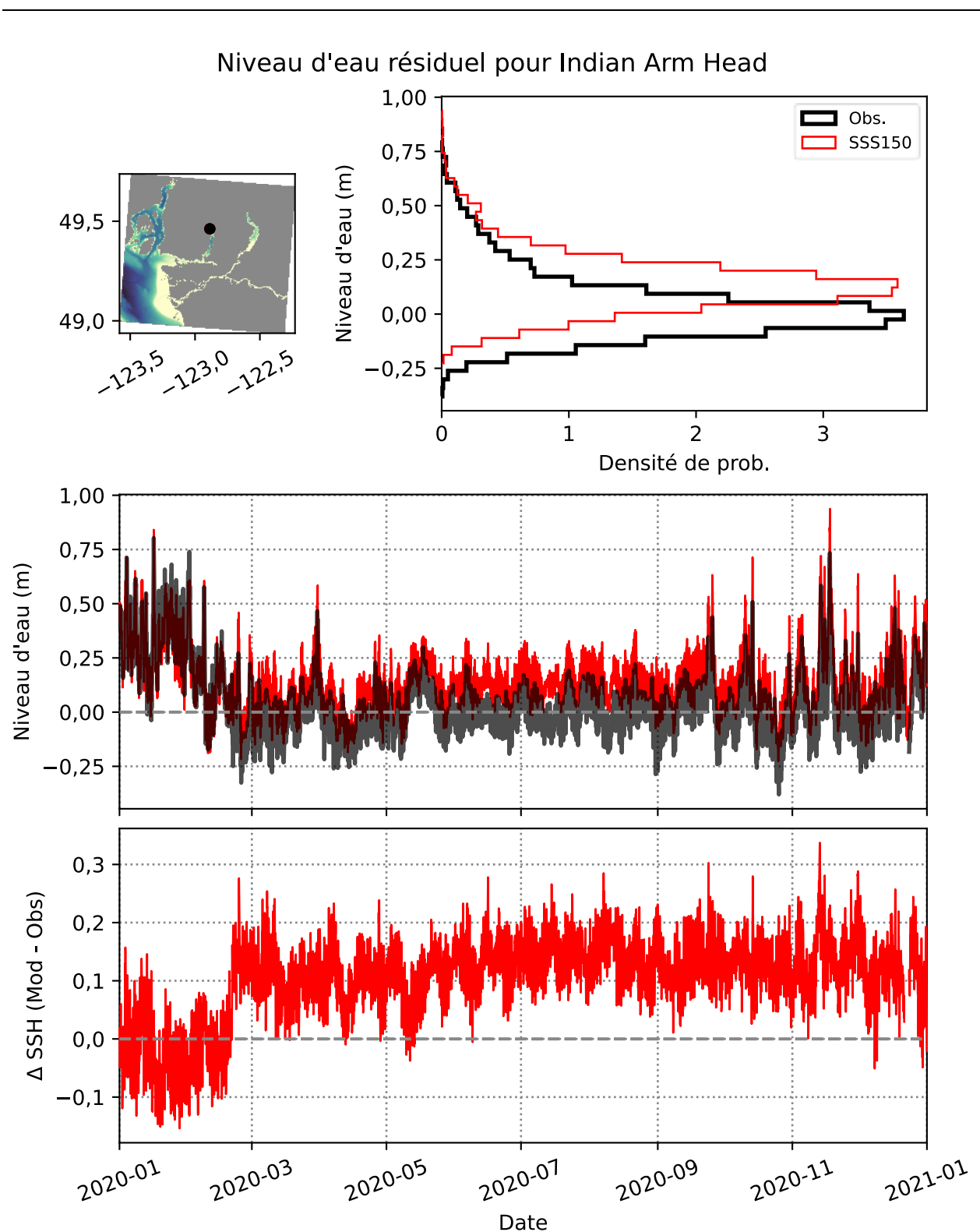


Figure 19. Comparaison des niveaux d'eau résiduel pour Indian Arm Head en 2020.

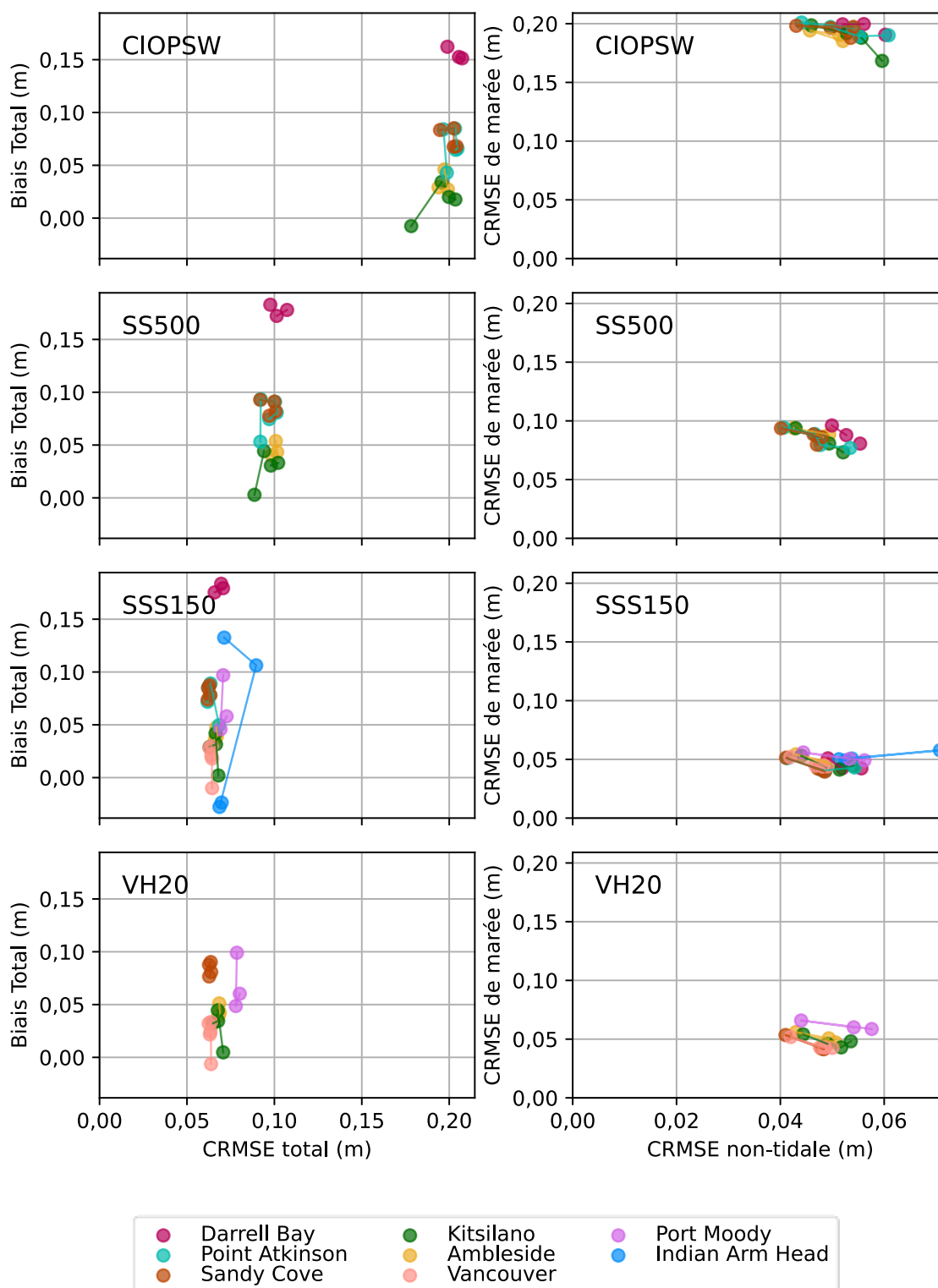


Figure 20. Résumé de la stabilité temporelle des scores du niveau d'eau pour chaque modèle évalué (rangées); les panneaux de gauche indiquent le biais et la CRMSE du niveau d'eau total et les panneaux de droite montrent la CRMSE avec marée et sans marée; chaque couleur représente une station différente et chaque marqueur une année différente.

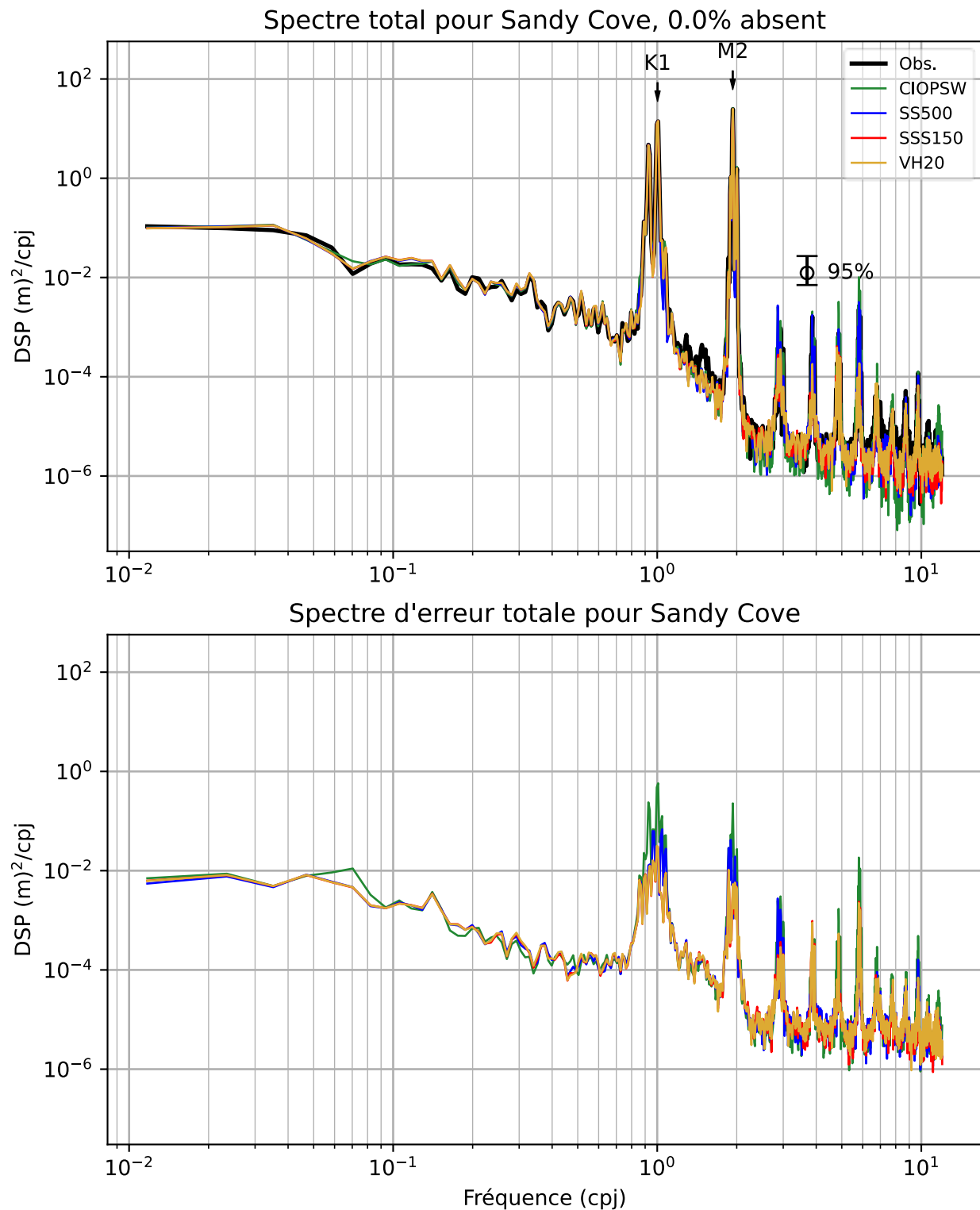


Figure 21. Spectres totaux du niveau d'eau (en haut) et spectres d'erreur (en bas) pour la station de Sandy Cove en 2018.

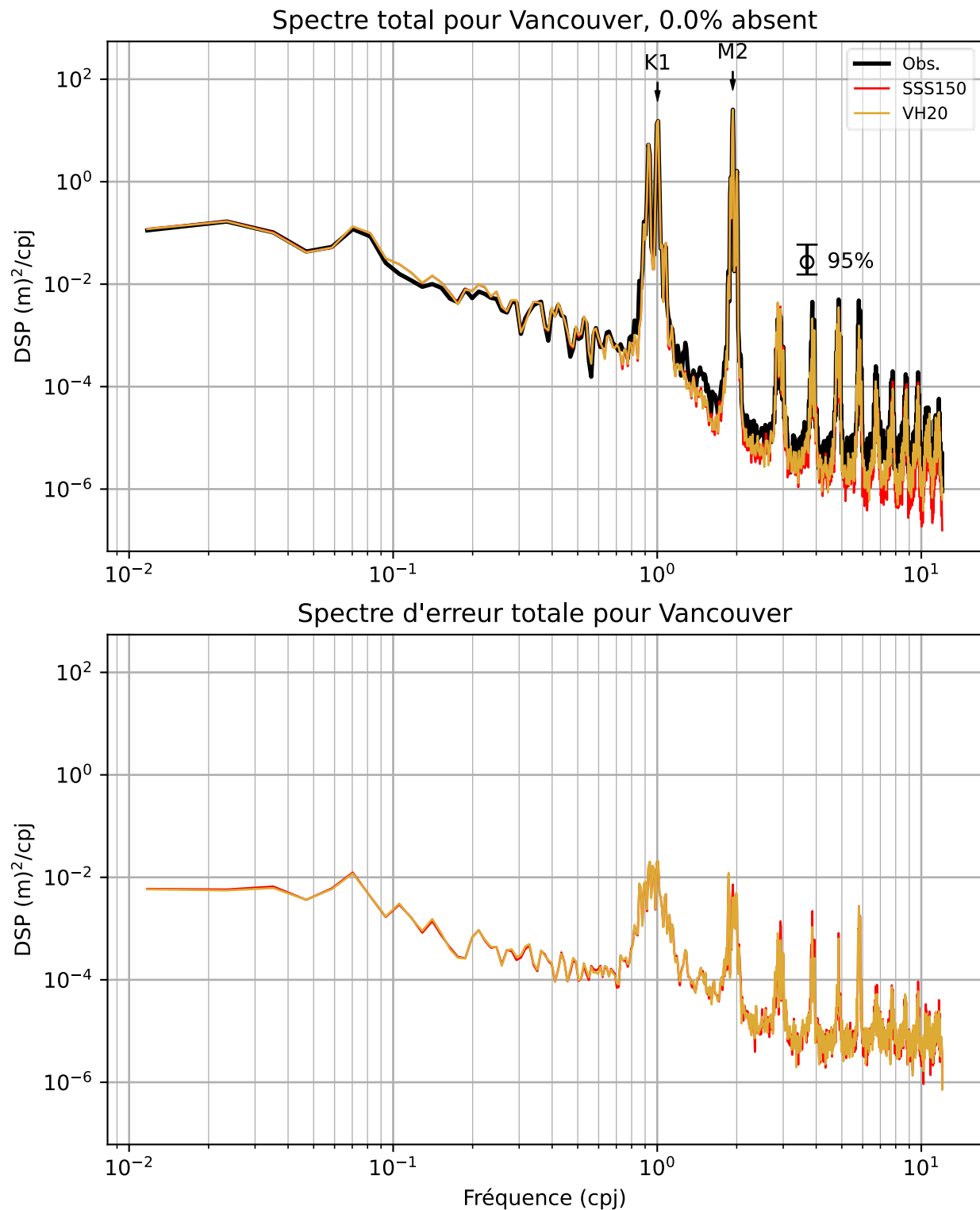


Figure 22. Spectres totaux du niveau d'eau (en haut) et spectres d'erreur (en bas) pour la station du port de Vancouver en 2019.

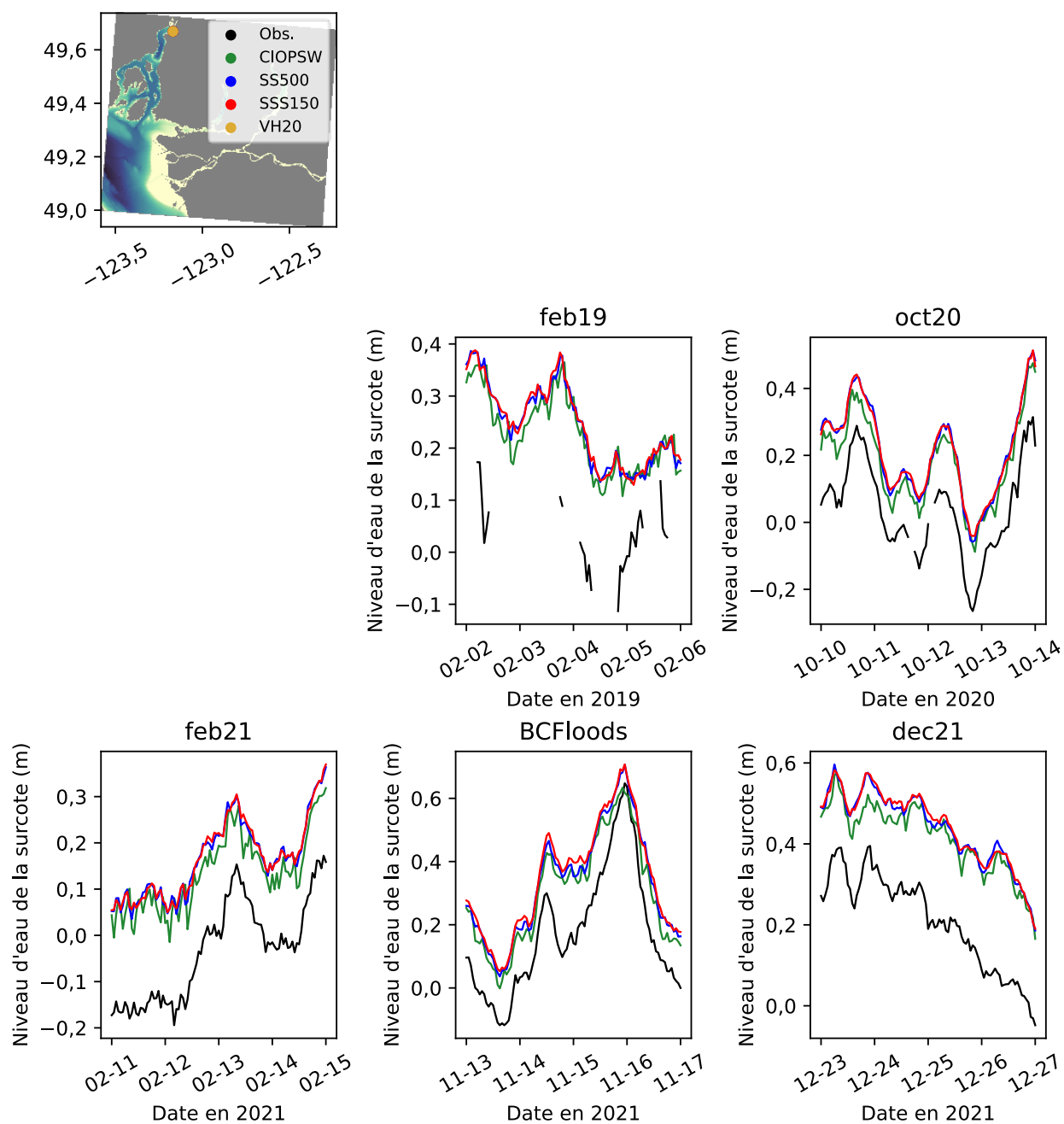


Figure 23. Analyse des ondes de tempête pour la station de mesure du niveau d'eau de Darrell Bay.

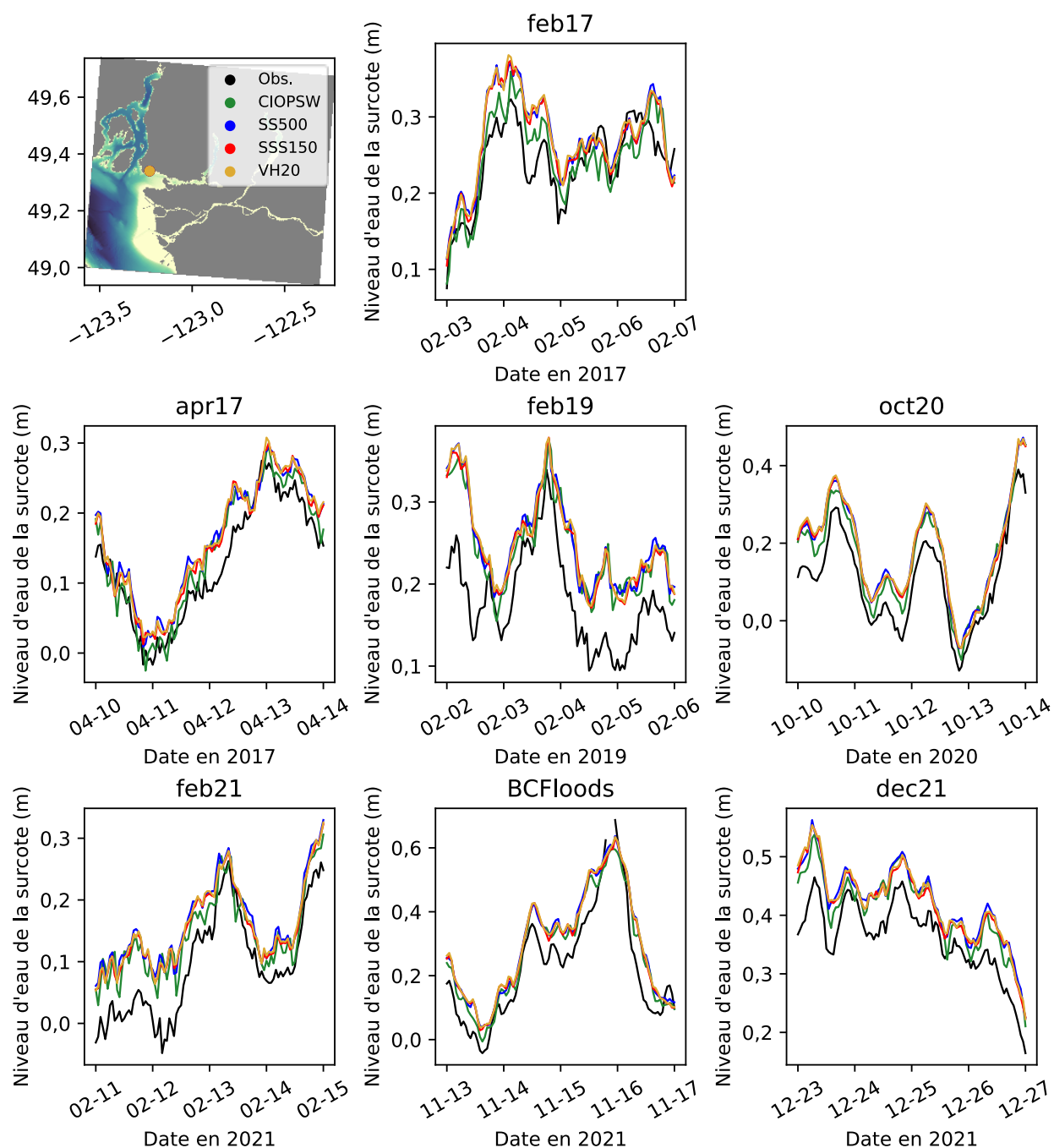


Figure 24. Analyse des ondes de tempête à la station de mesure du niveau d'eau de Sandy Cove.

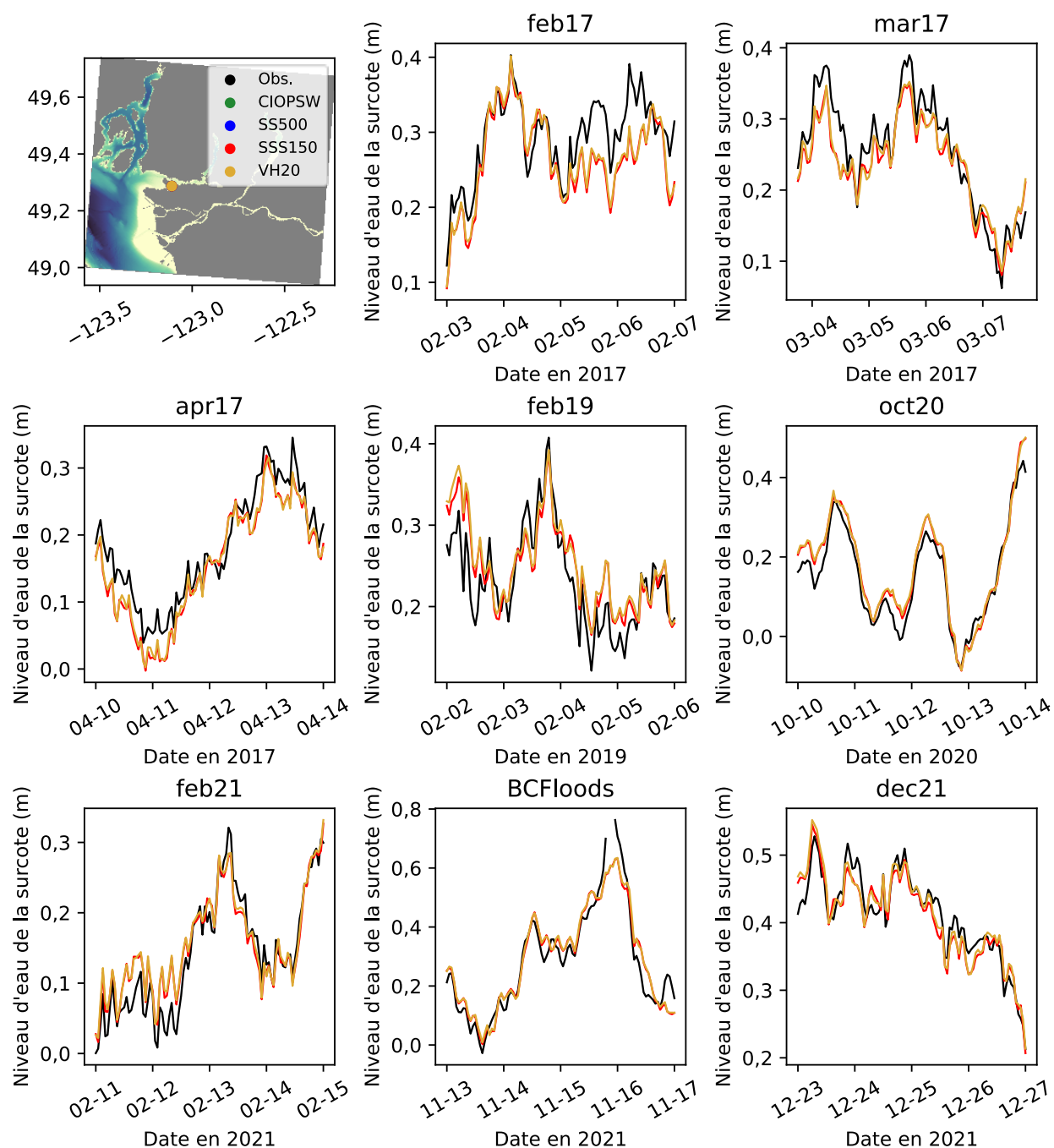


Figure 25. Analyse des ondes de tempête pour la station de mesure du niveau d'eau du port de Vancouver.

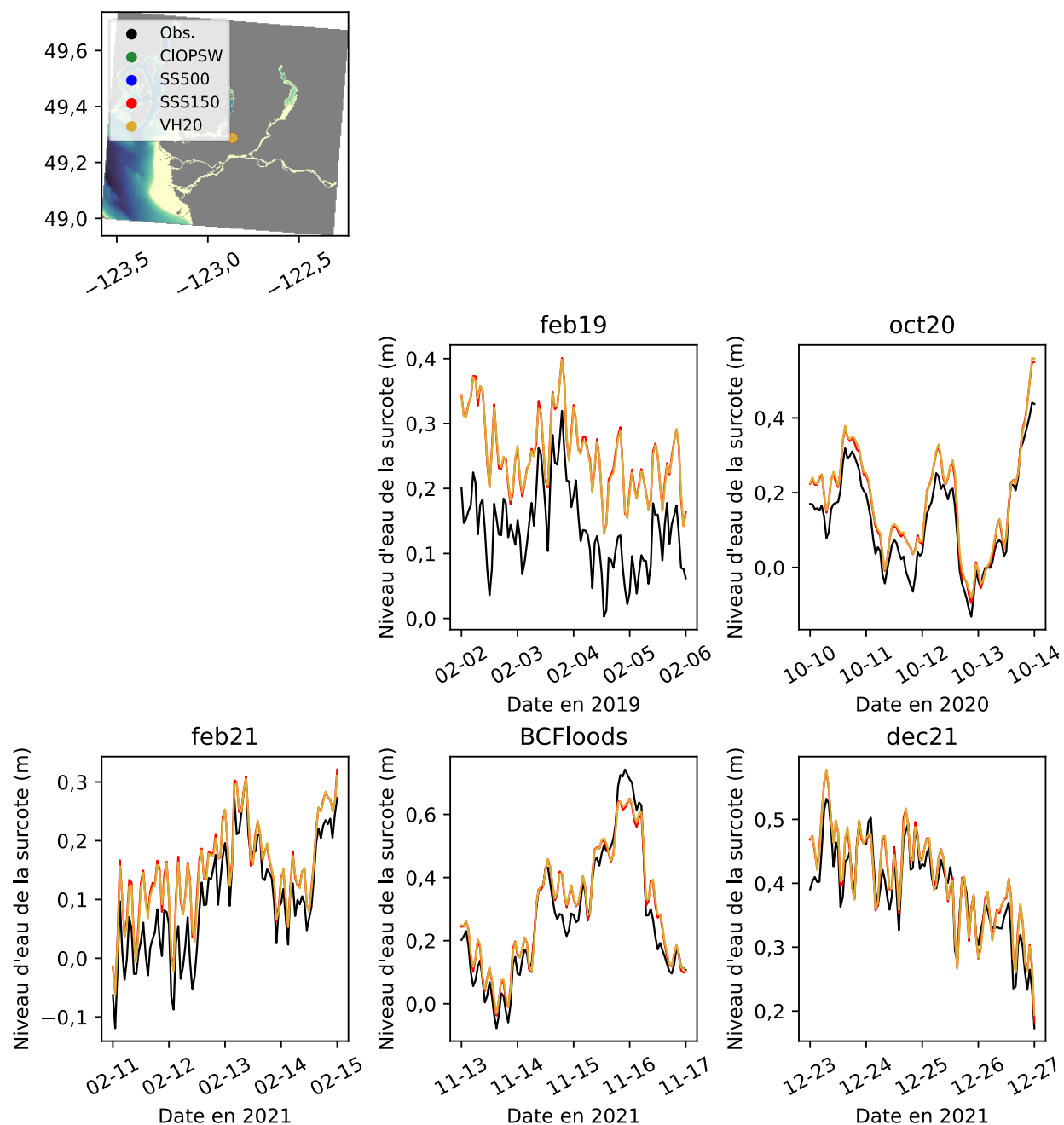


Figure 26. Analyse des ondes de tempête à la station de mesure du niveau d'eau de Port Moody.

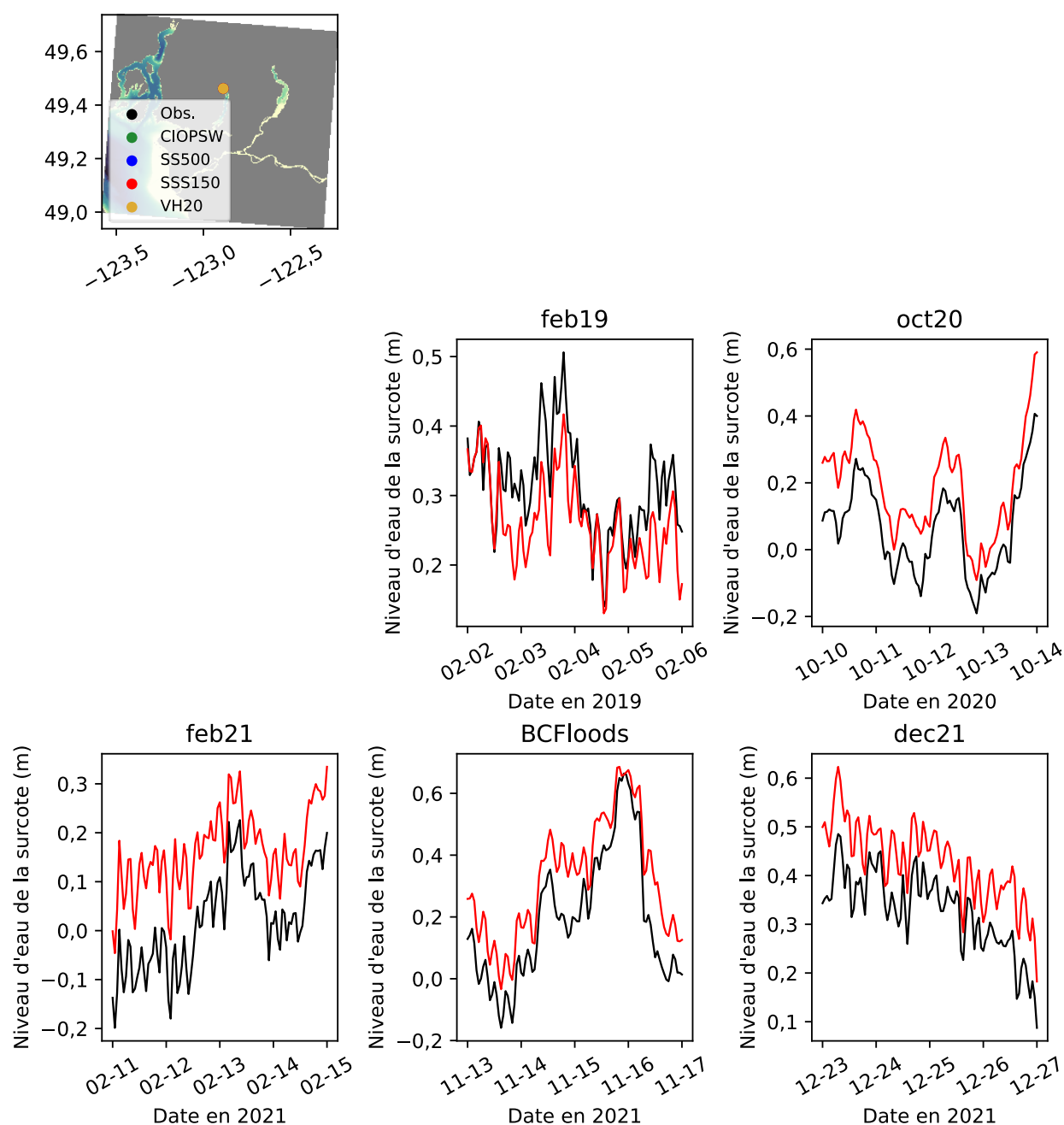


Figure 27. Analyse des ondes de tempête pour la station de mesure du niveau d'eau de Indian Arm.

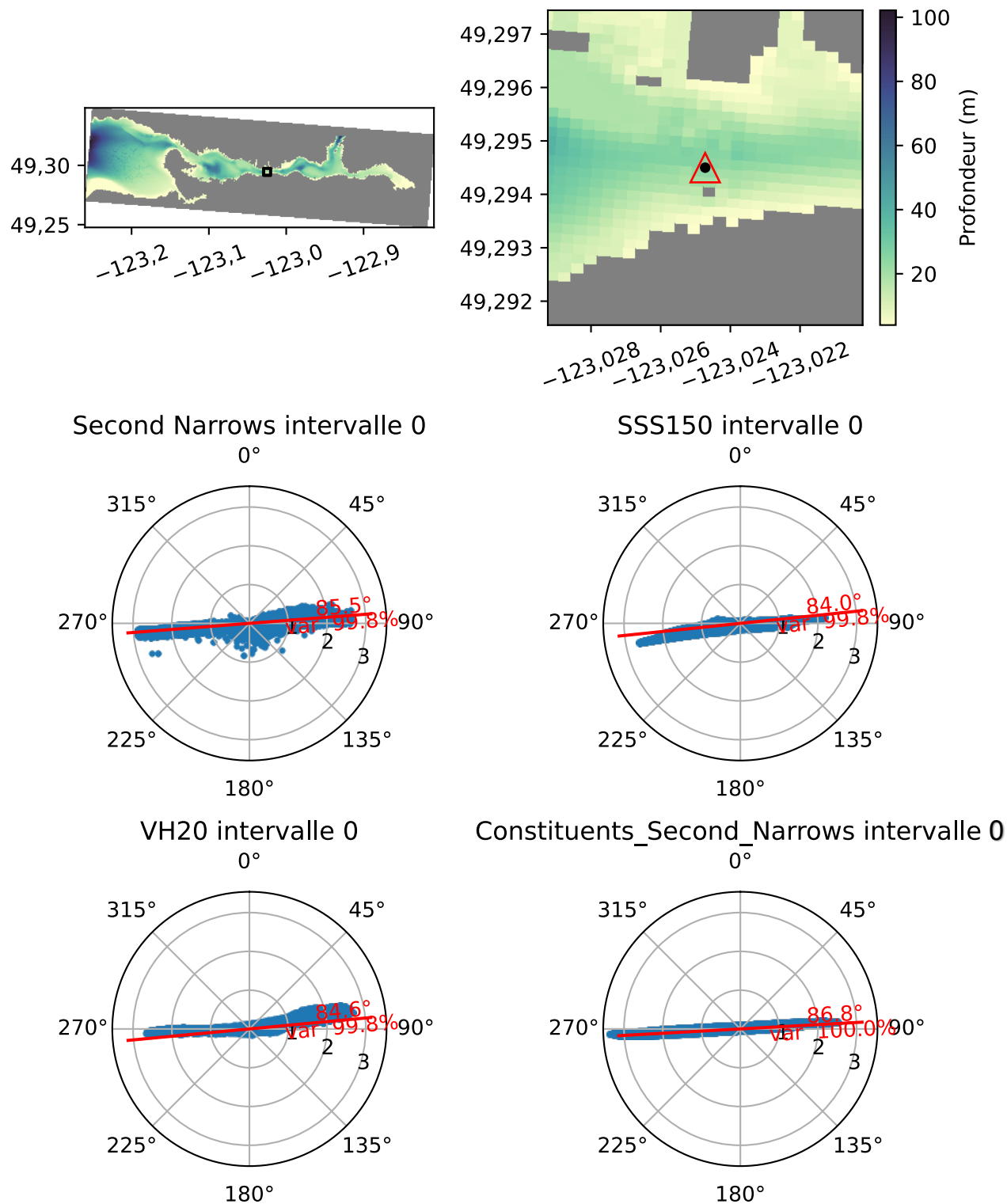


Figure 28. Emplacement des observations et diagrammes de dispersion avec les principaux axes de variance pour l'ADCP horizontal à Second Narrows. Les lignes de grille circulaires indiquent la vitesse en m/s. La plage de dates indiquée ici va du 13 juin 2020 au 1^{er} mai 2021 (322 jours).

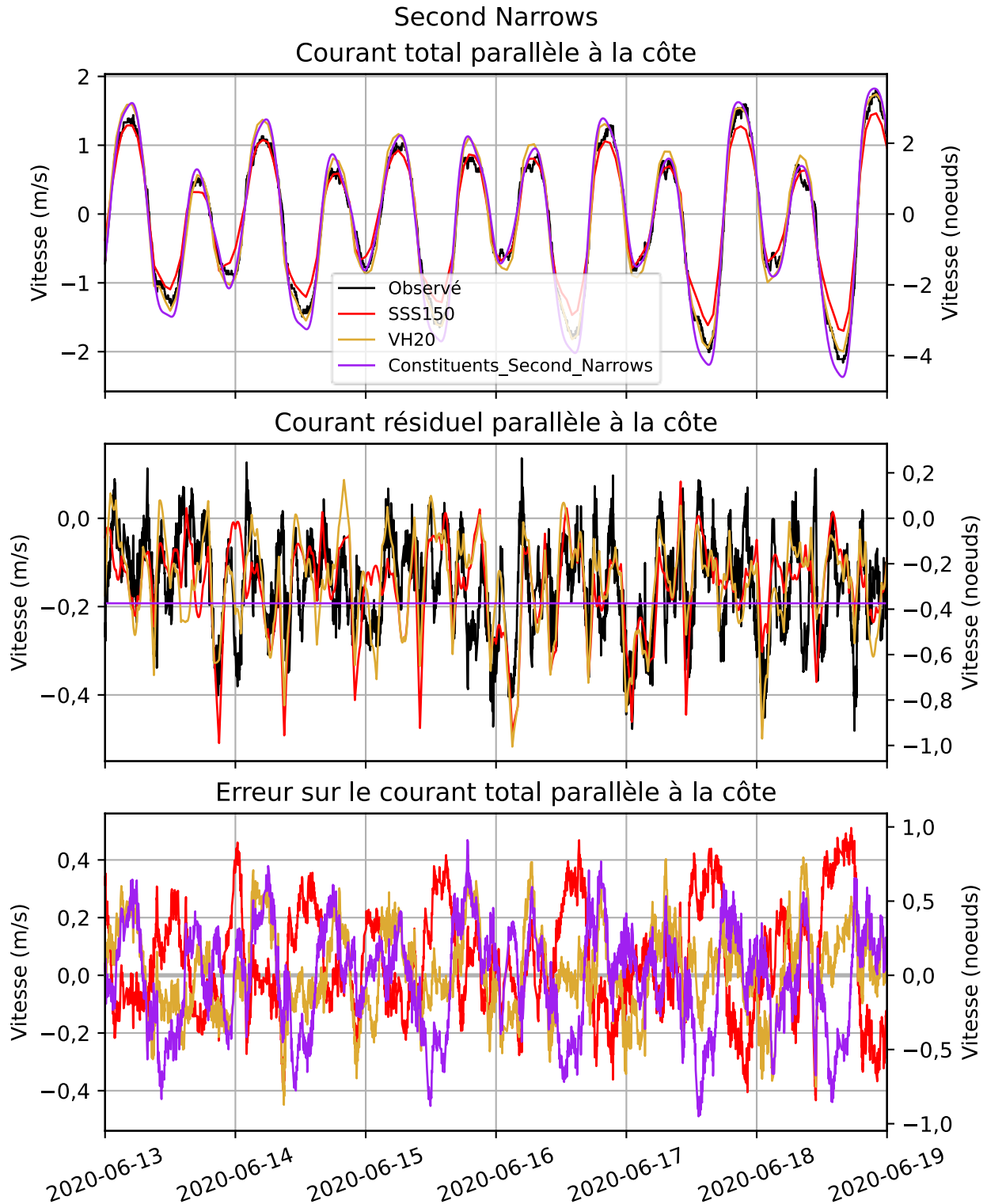


Figure 29. Période d'échantillonnage en juin 2020 comparant le modèle et les données pour le courant le long du rivage à l'ADCP horizontal de Second Narrows, montrant le courant total (en haut), le courant résiduel (au milieu) et l'erreur de courant totale (en bas).

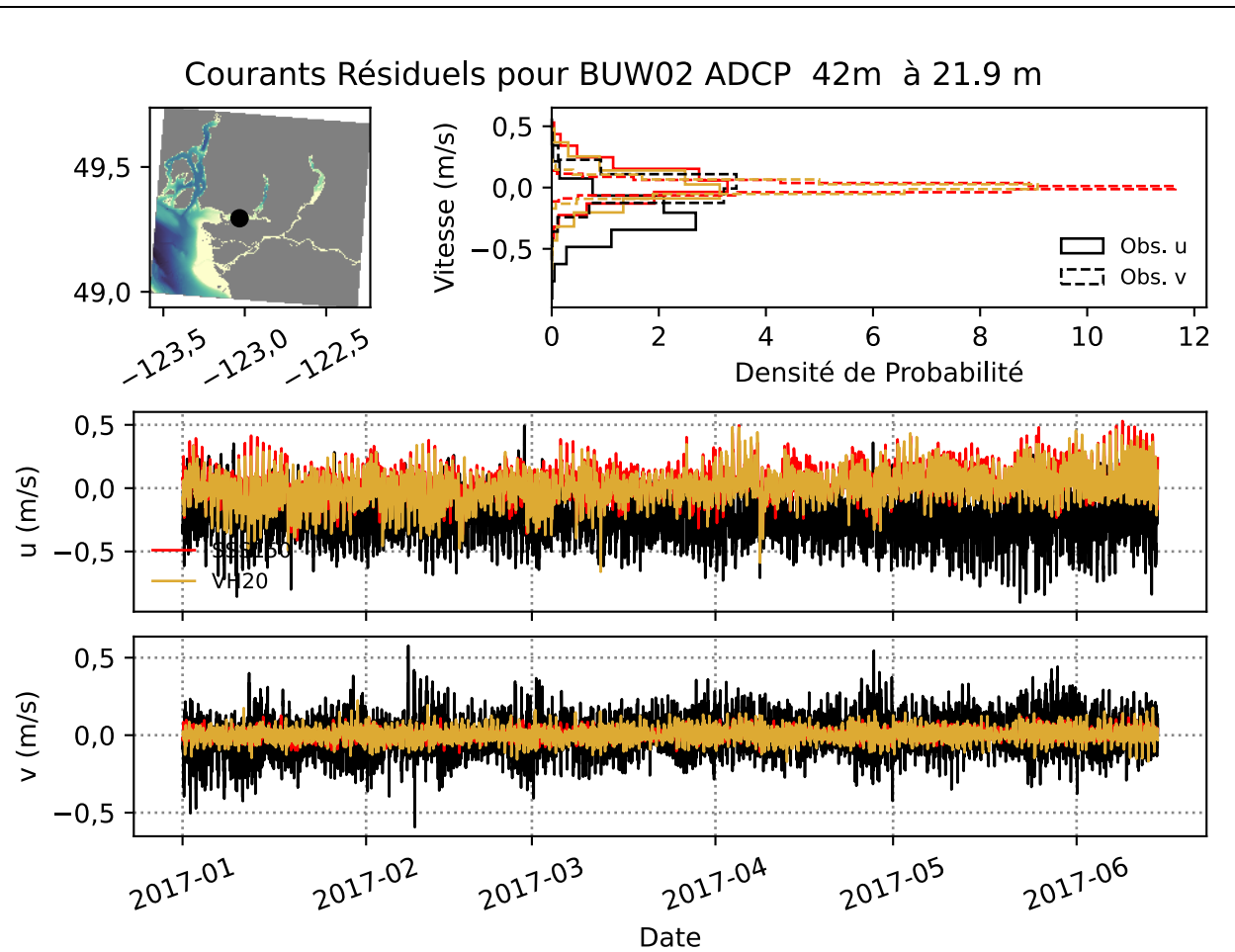


Figure 30. Courants résiduels à l'ADCP de la station BUW02 à une profondeur de 21,9 m.

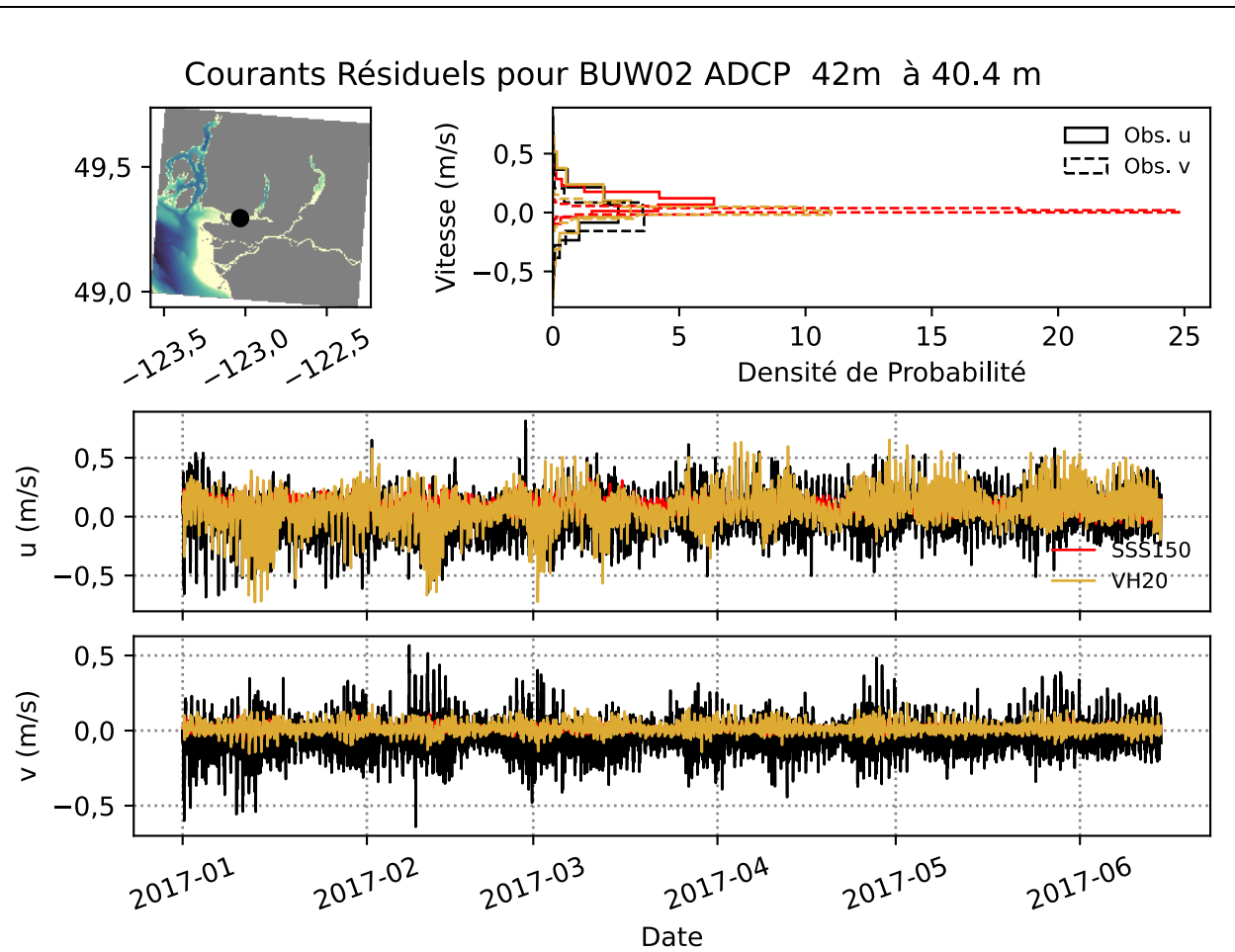


Figure 31. Courants résiduels à la station d'ADCP BUW02 à une profondeur de 40,4 m.

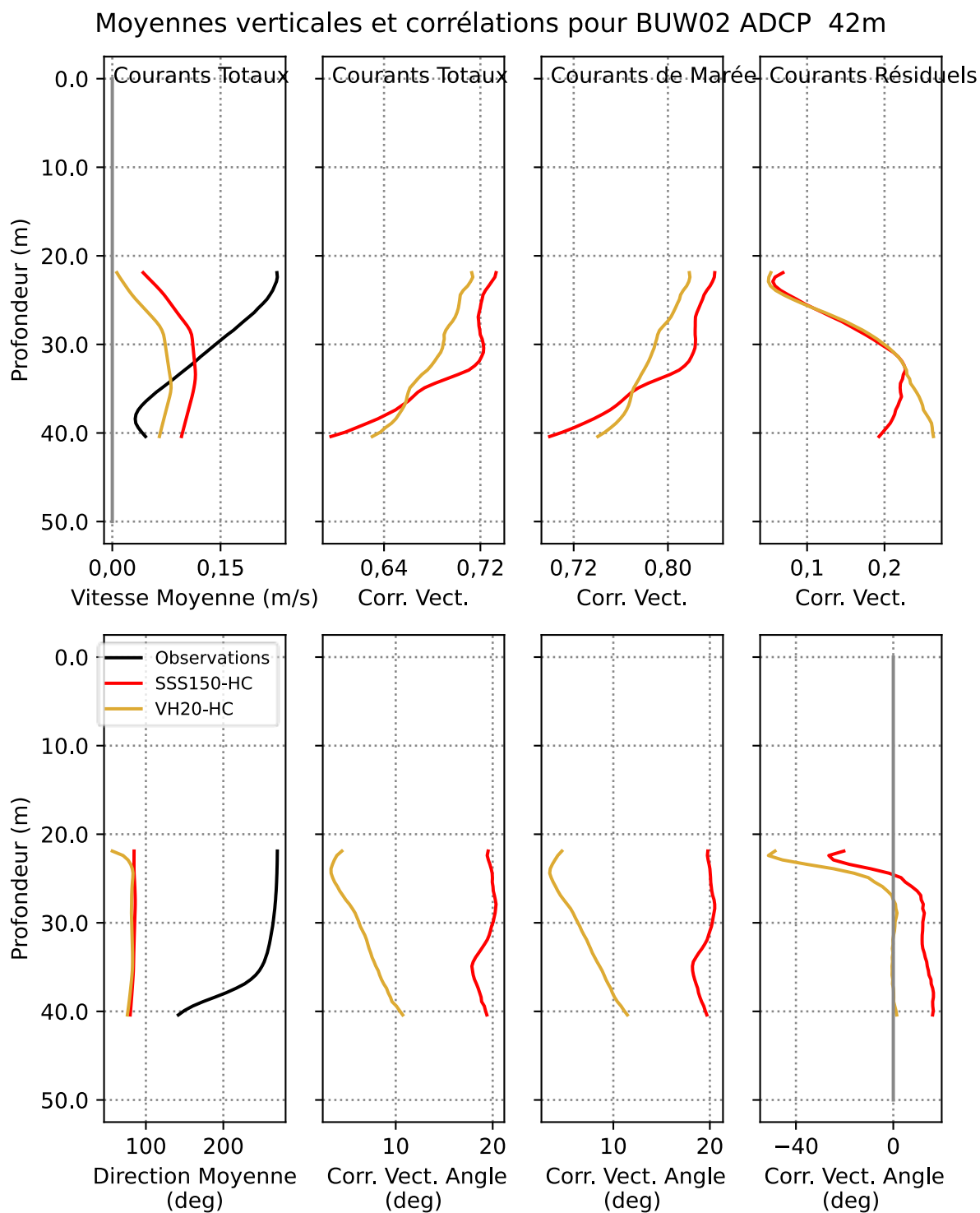


Figure 32. Courants moyens (première colonne) et corrélations vectorielles pour les courants totaux (deuxième colonne), de marée (troisième colonne) et résiduels (quatrième colonne) pour le déploiement de l'ADCP à la station BUW02. La direction moyenne est mesurée dans le sens horaire à partir du nord.

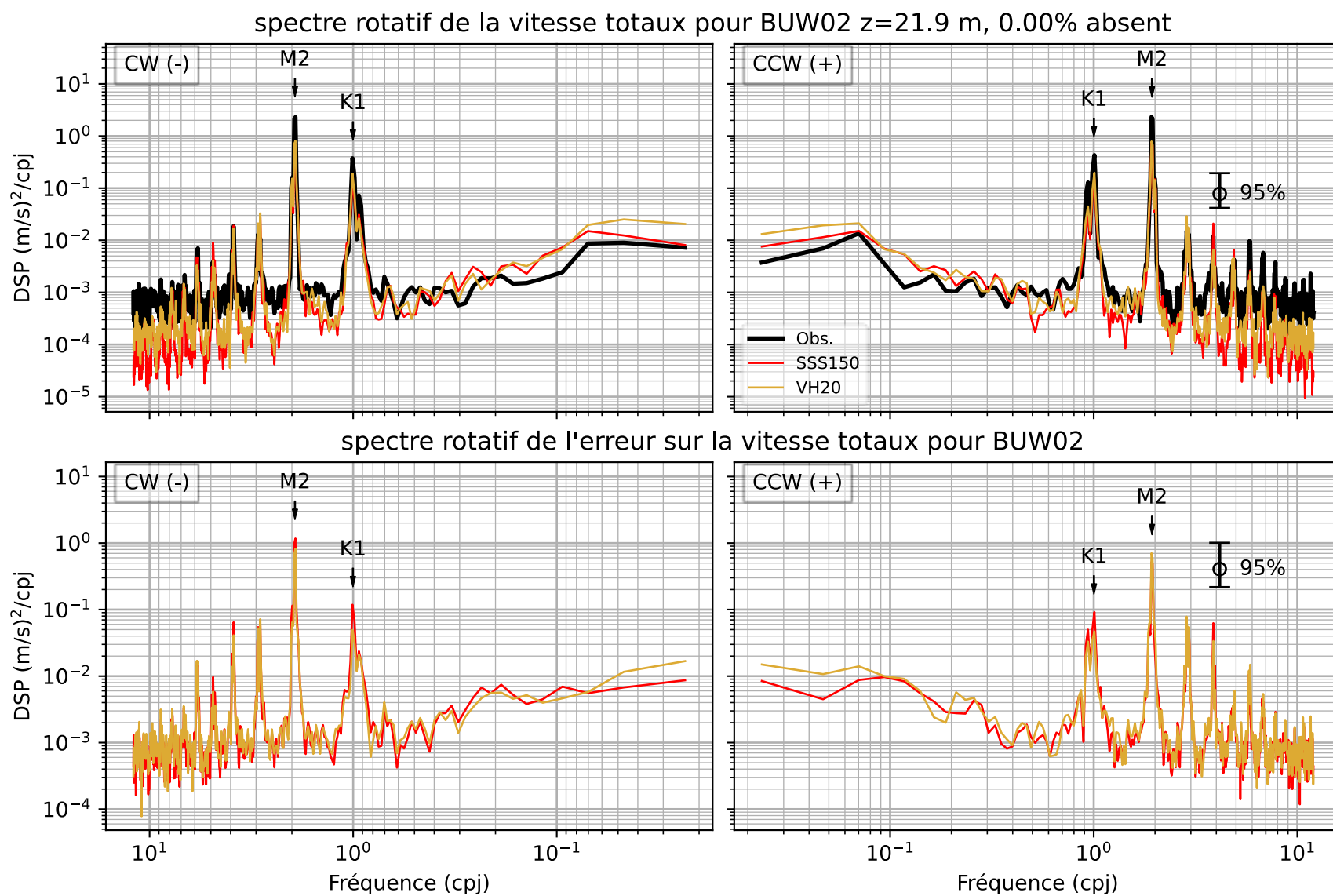


Figure 33. Spectres rotatifs pour le courant total provenant de l'ADCP de la station BUW02 à une profondeur de 21,9 m.

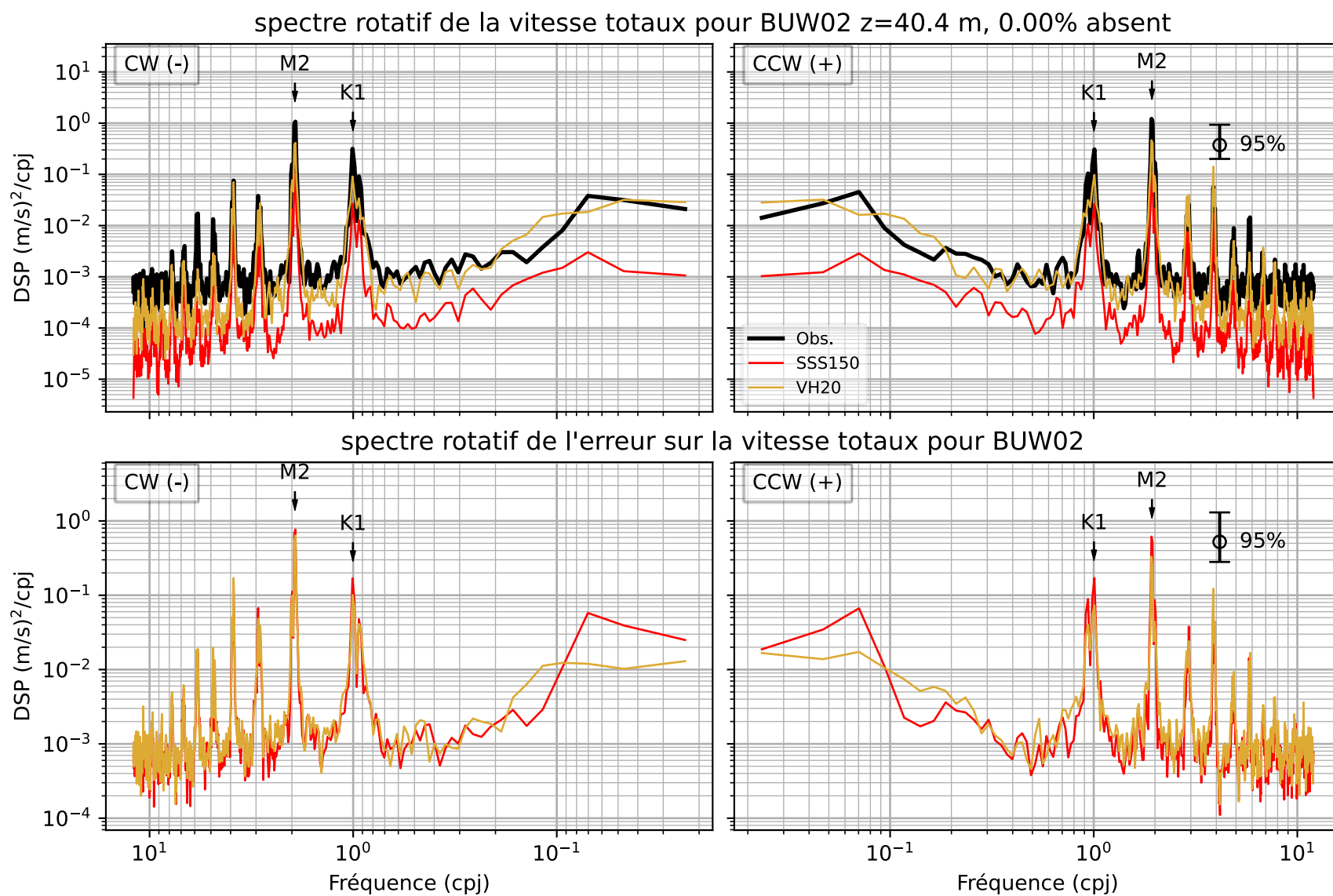


Figure 34. Spectres rotatifs pour le courant total provenant de l'ADCP de la station BUW02 à une profondeur de 40,4 m.

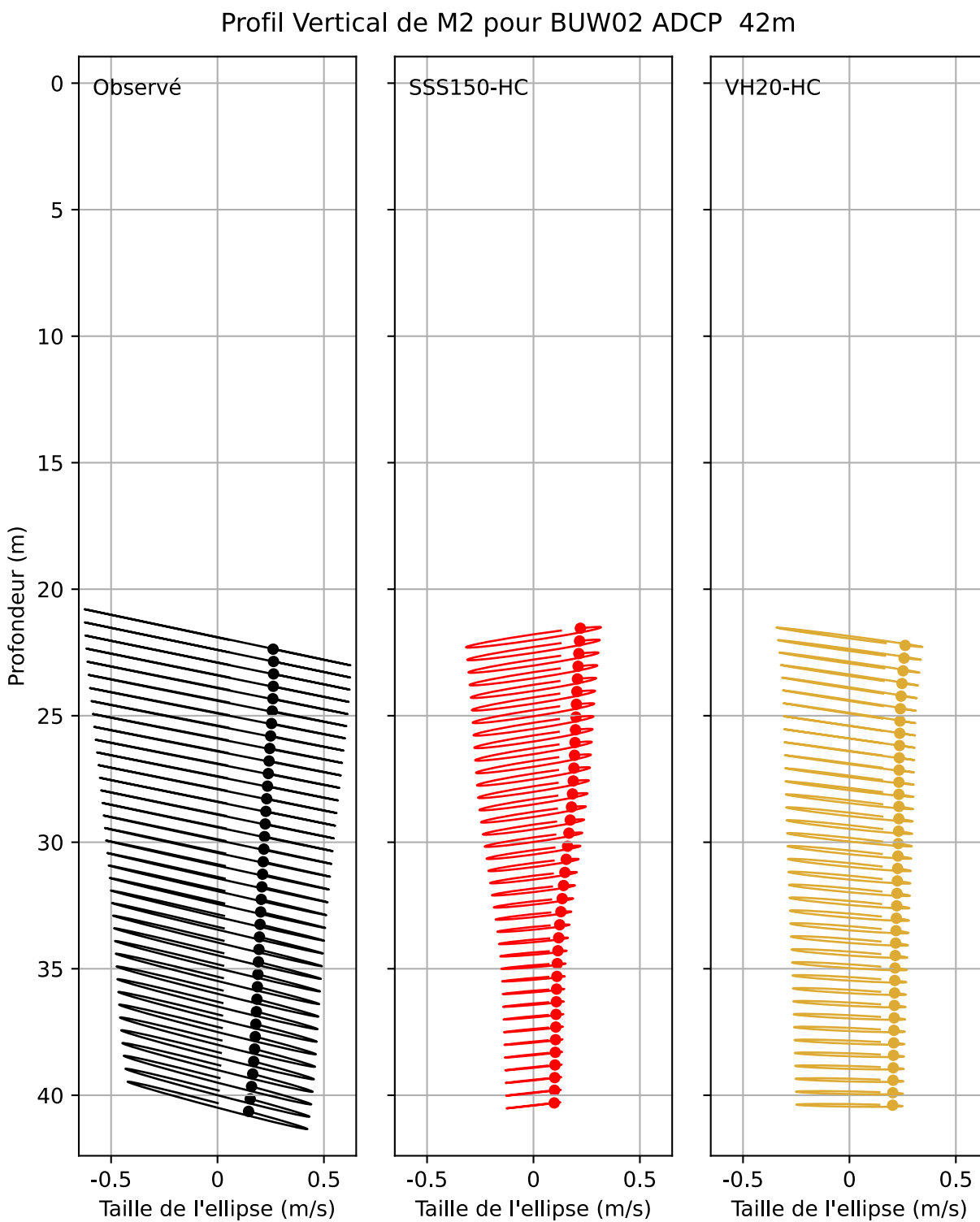


Figure 35. Ellipses de courant pour M2 provenant de l'ADCP de la station BUW02.

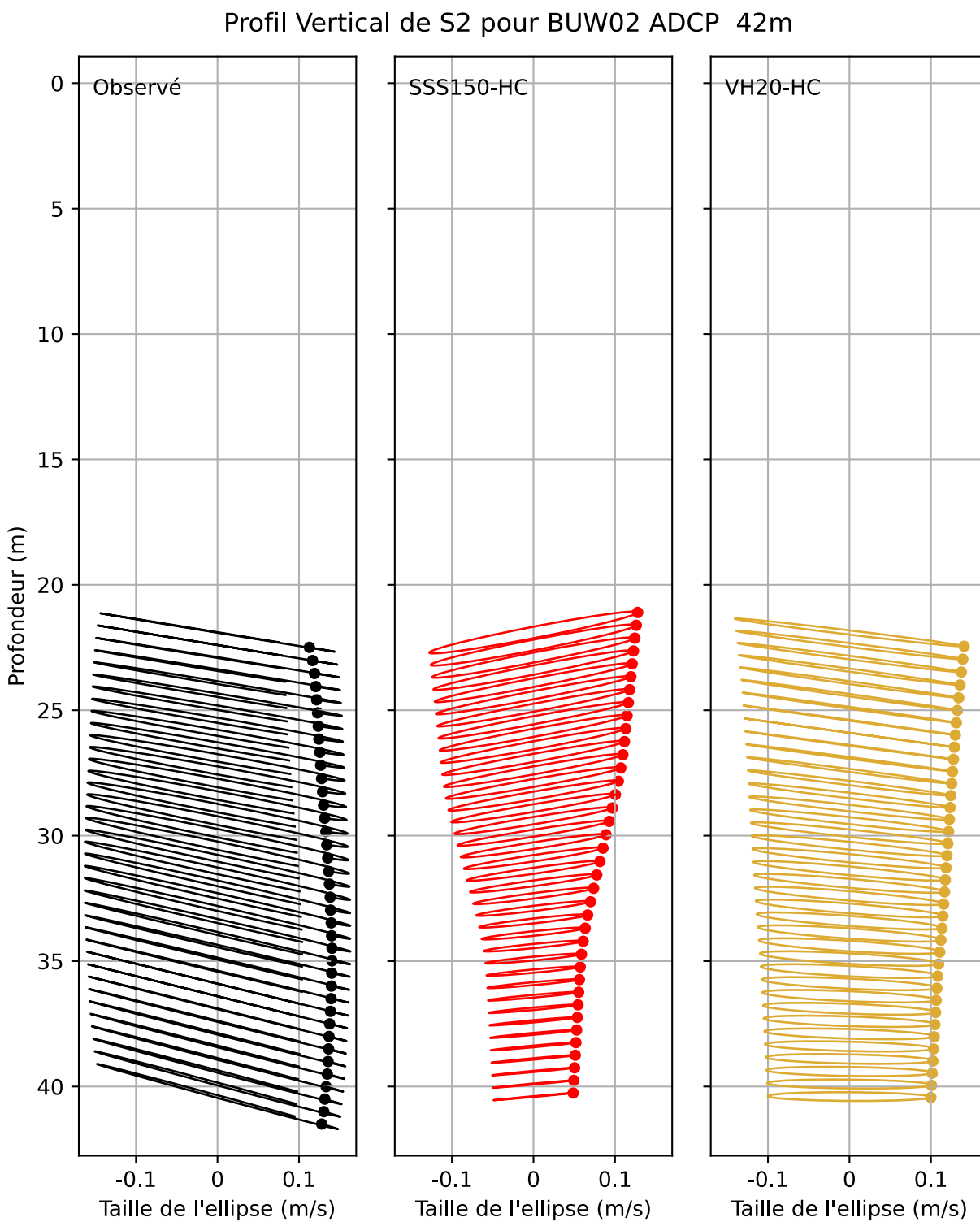


Figure 36. Ellipses de courant pour S2 provenant de l'ADCP de la station BUW02.

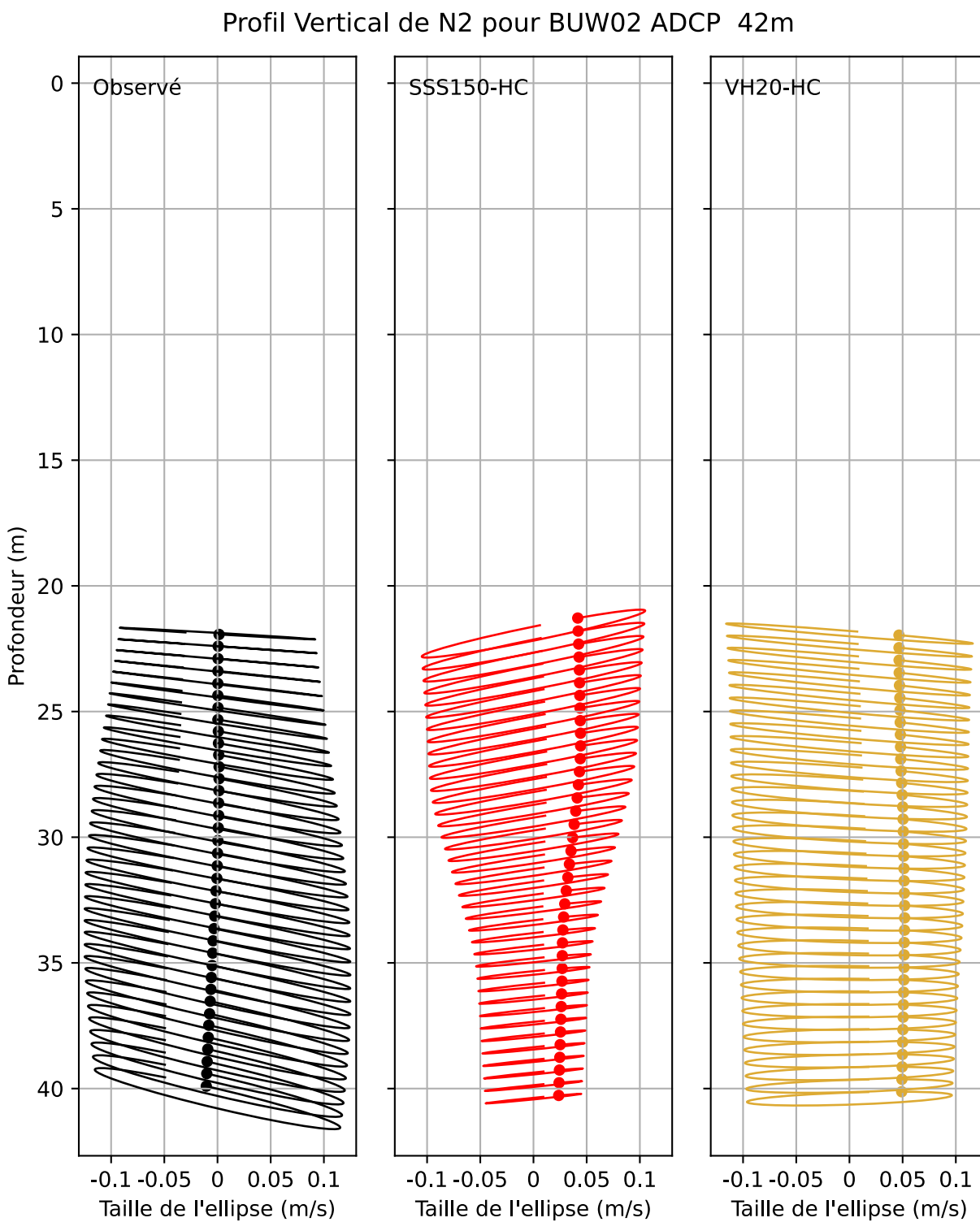


Figure 37. Ellipses de courant pour N2 provenant de l'ADCP de la station BUW02.

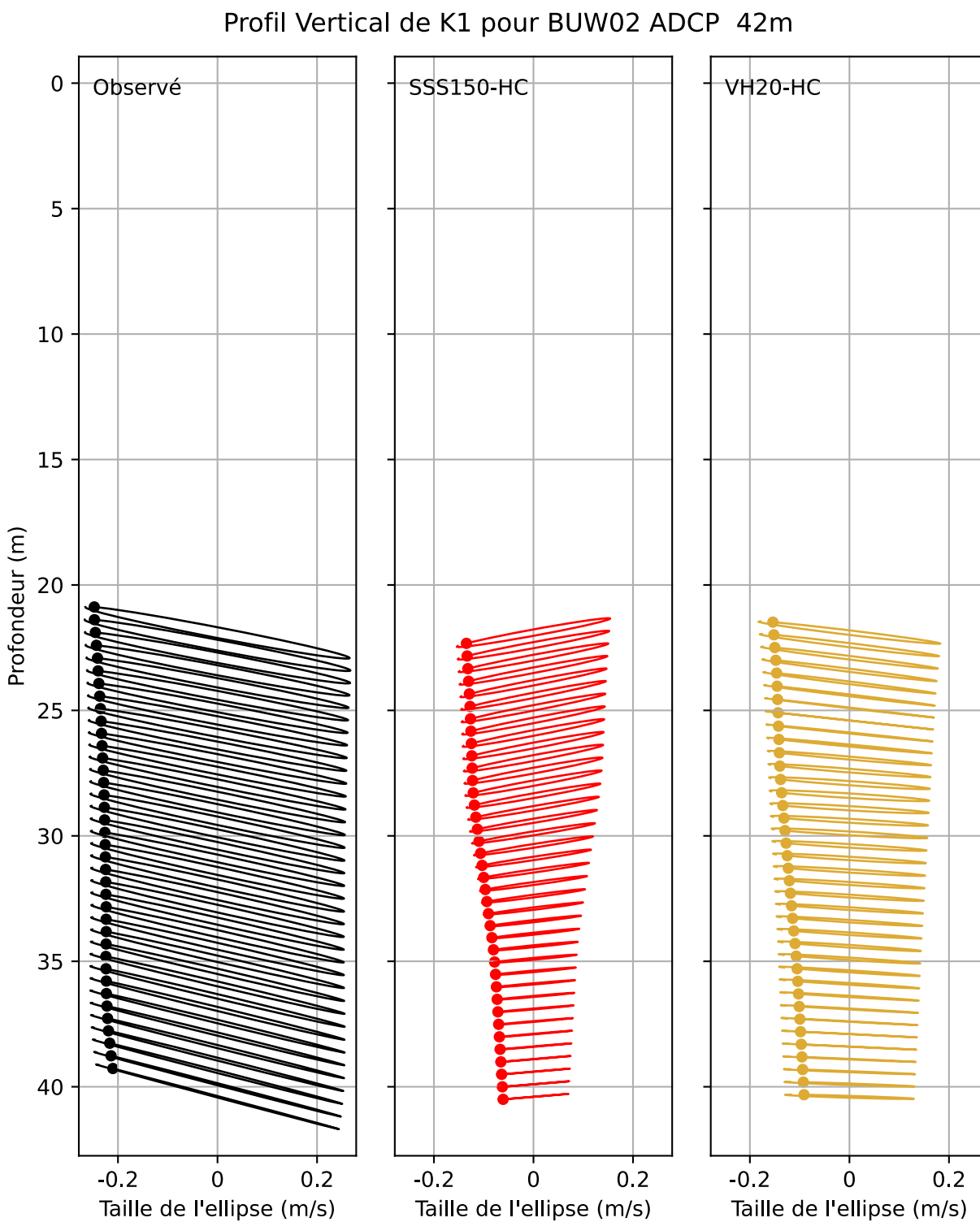


Figure 38. Ellipses de courant pour K1 provenant de l'ADCP de la station BUW02.

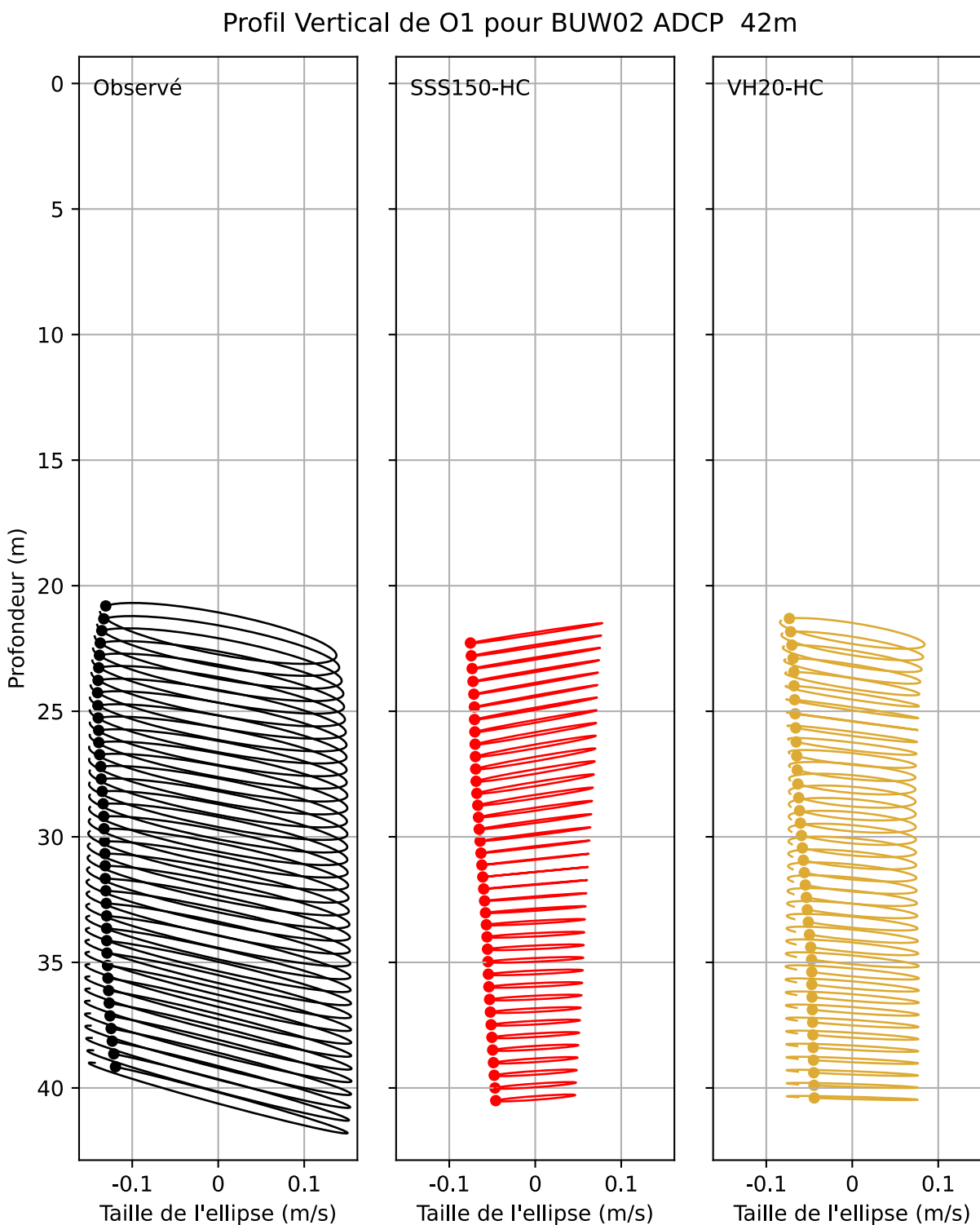


Figure 39. Ellipses de courant pour O1 provenant de l'ADCP de la station BUW02.

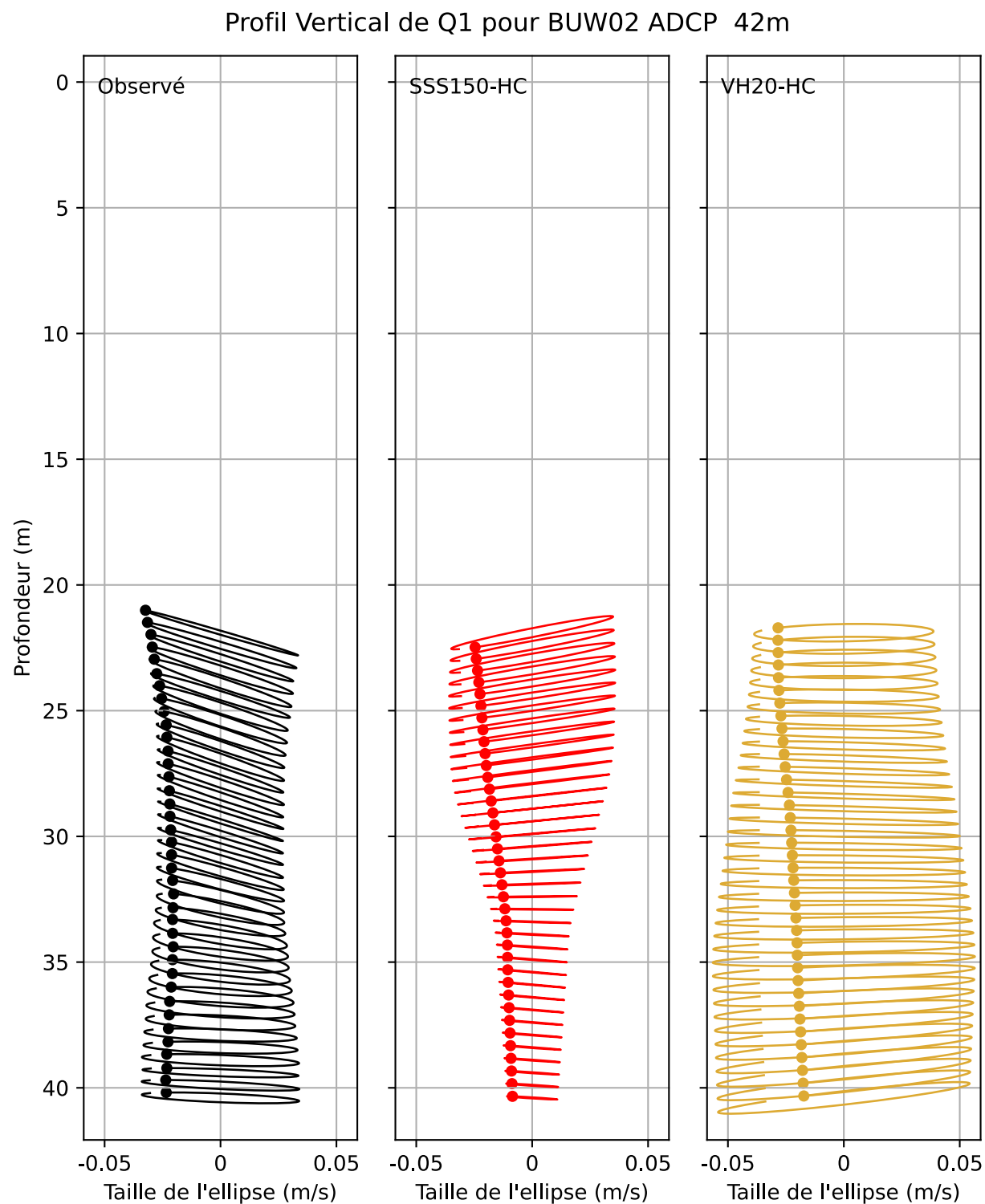


Figure 40. Ellipses de courant pour Q1 provenant de l'ADCP de la station BUW02.

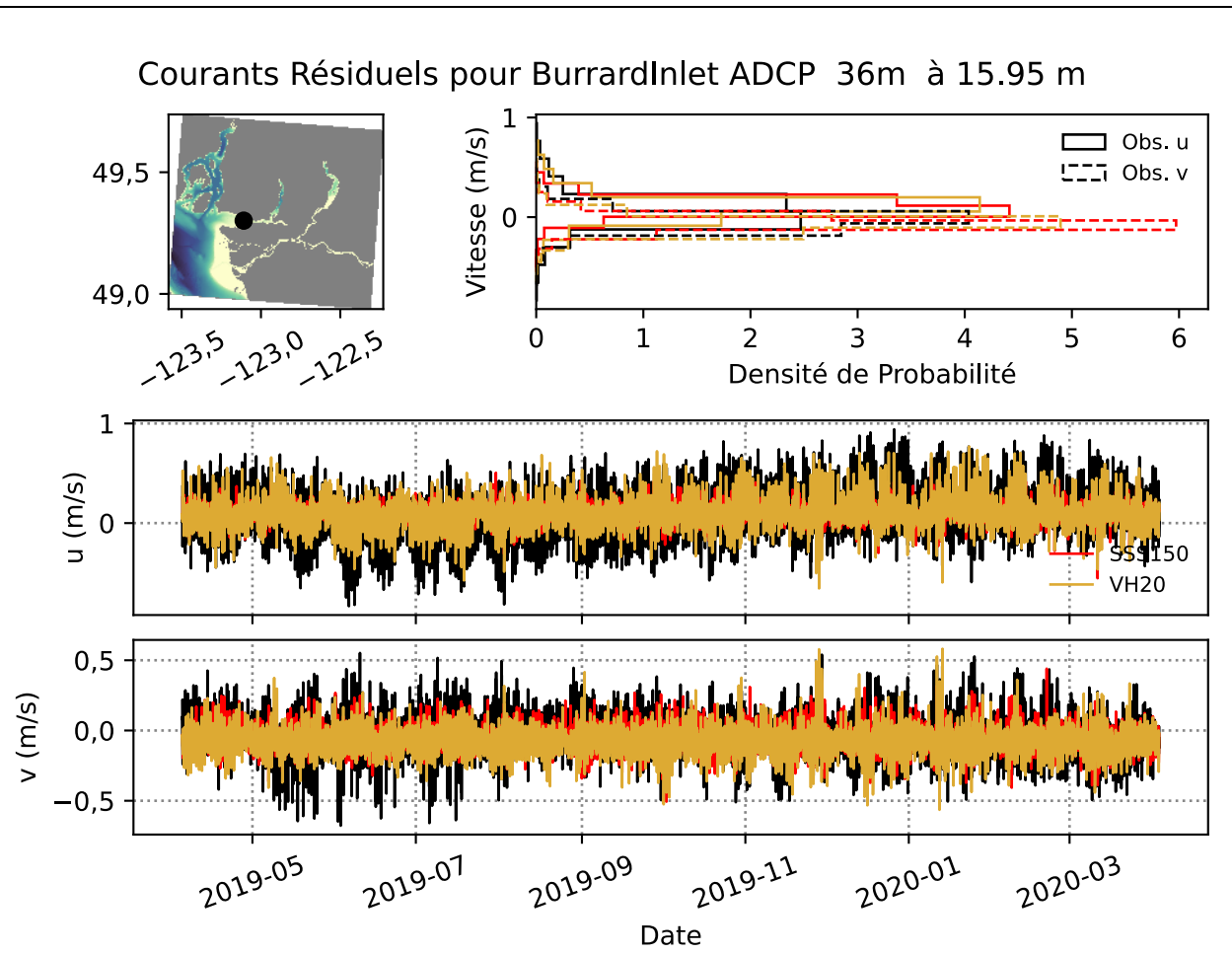


Figure 41. Courants résiduels à l'ADCP de la station BIIP à une profondeur de 15,95 m.

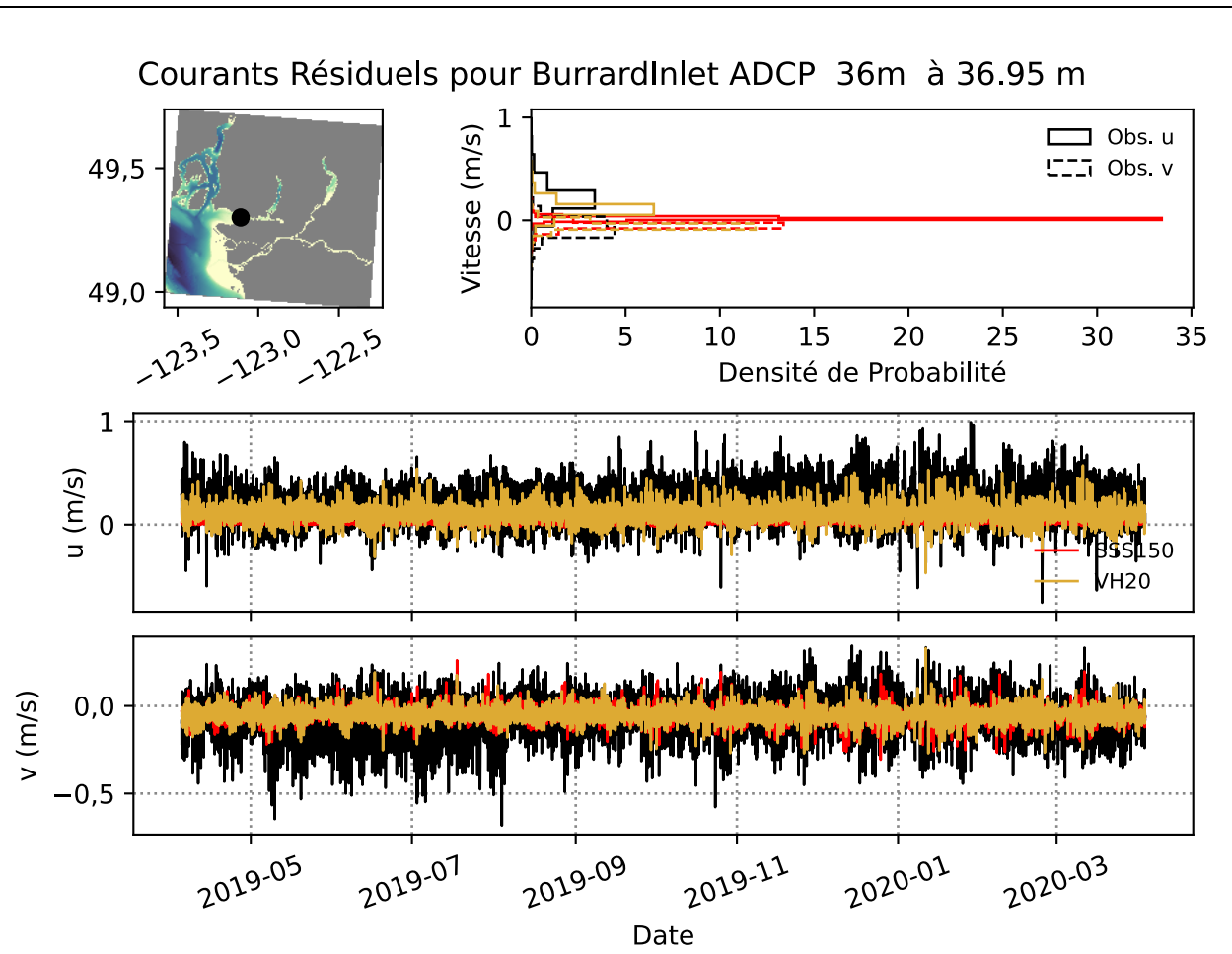


Figure 42. Courants résiduels à l'ADCP de la station BIIP à une profondeur de 36,95 m.

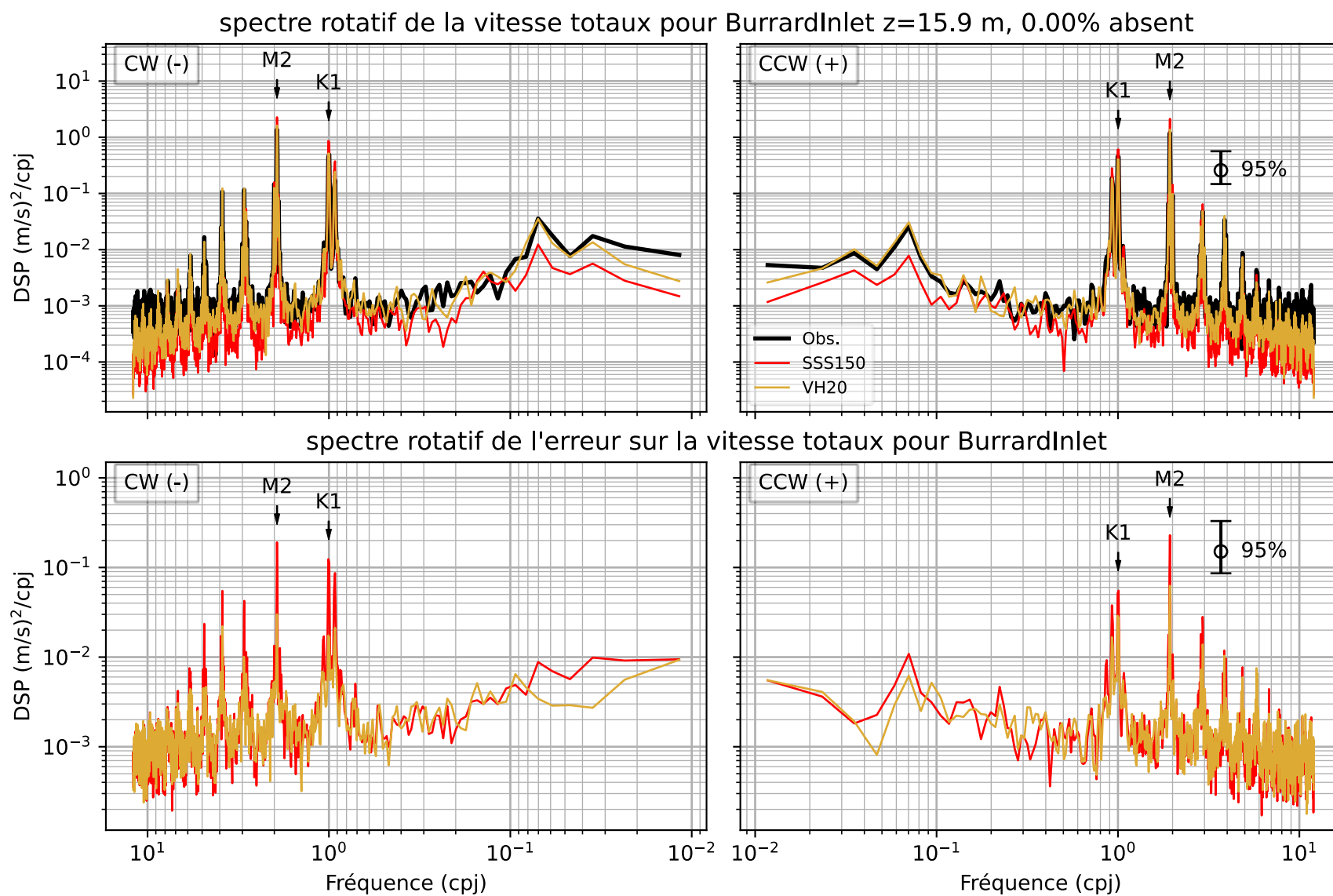


Figure 43. Spectres rotatifs pour le courant total provenant de l'ADCP de la station de la baie Burrard à une profondeur de 15,9 m.

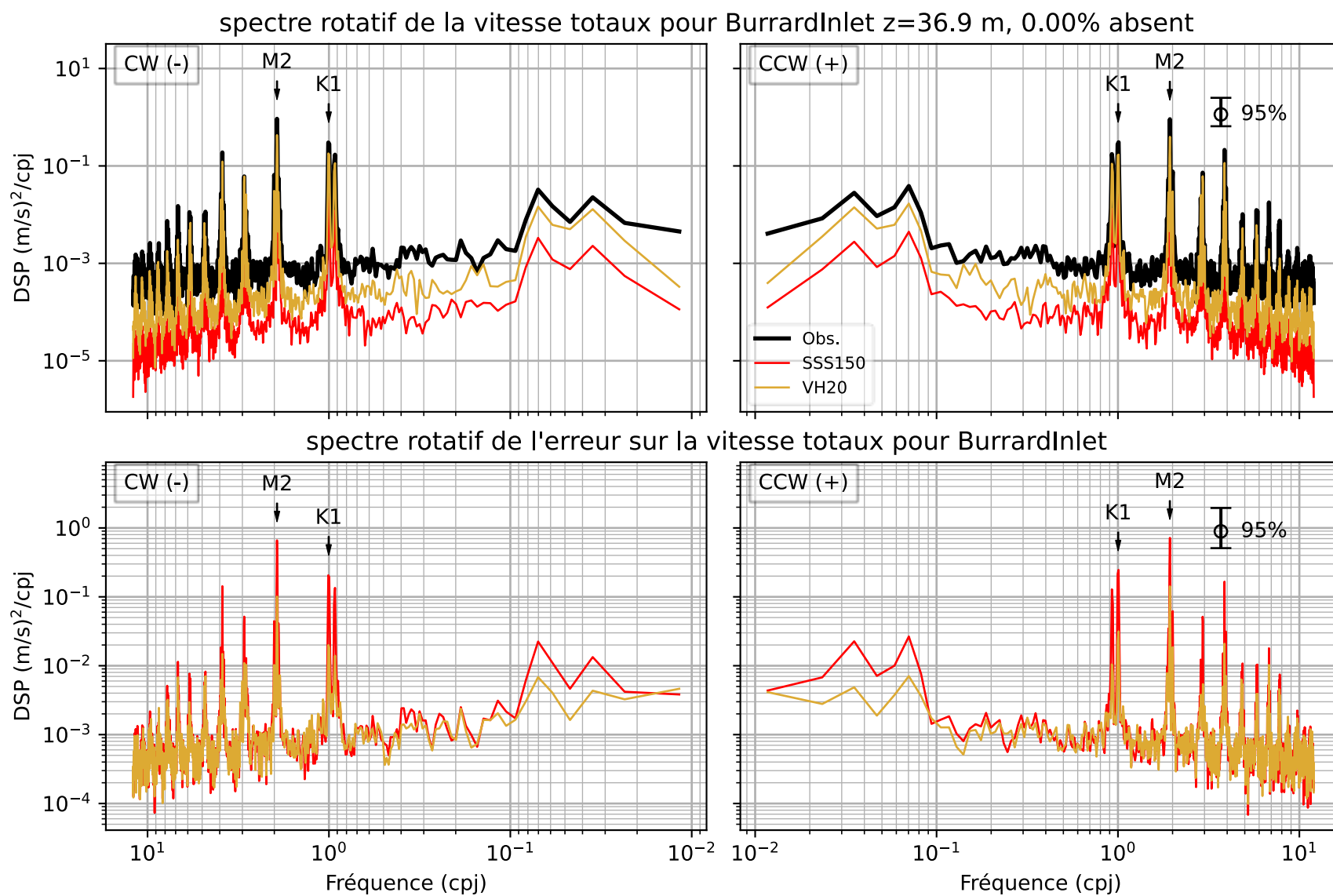


Figure 44. Spectres rotatifs pour le courant total à partir de la station ADCP de la baie Burrard à une profondeur proche du fond de 36,9 m.

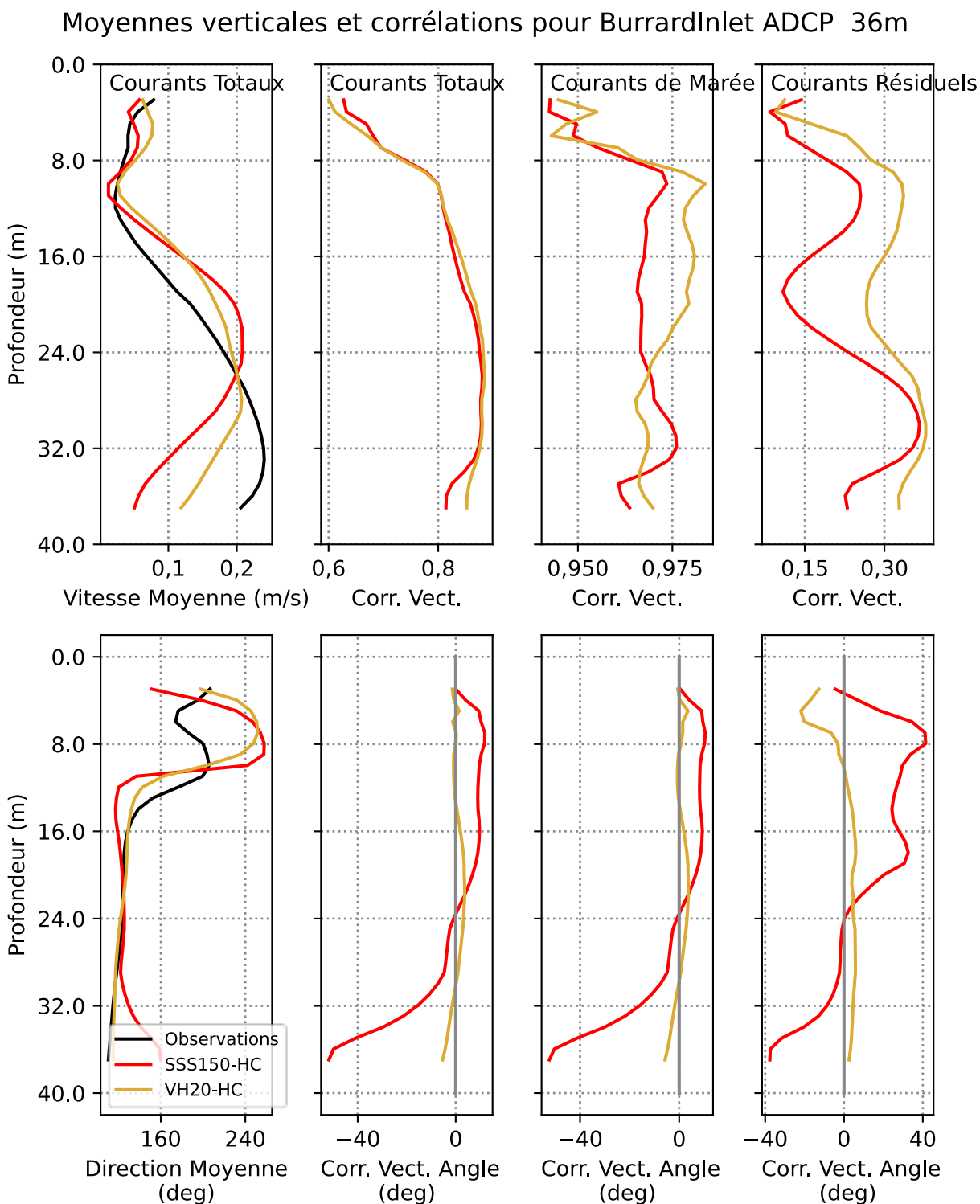


Figure 45. Courants moyens (première colonne) et corrélations vectorielles pour les courants totaux (deuxième colonne), de marée (troisième colonne) et résiduels (quatrième colonne) pour le déploiement de l'ADCP de la baie Burrard.

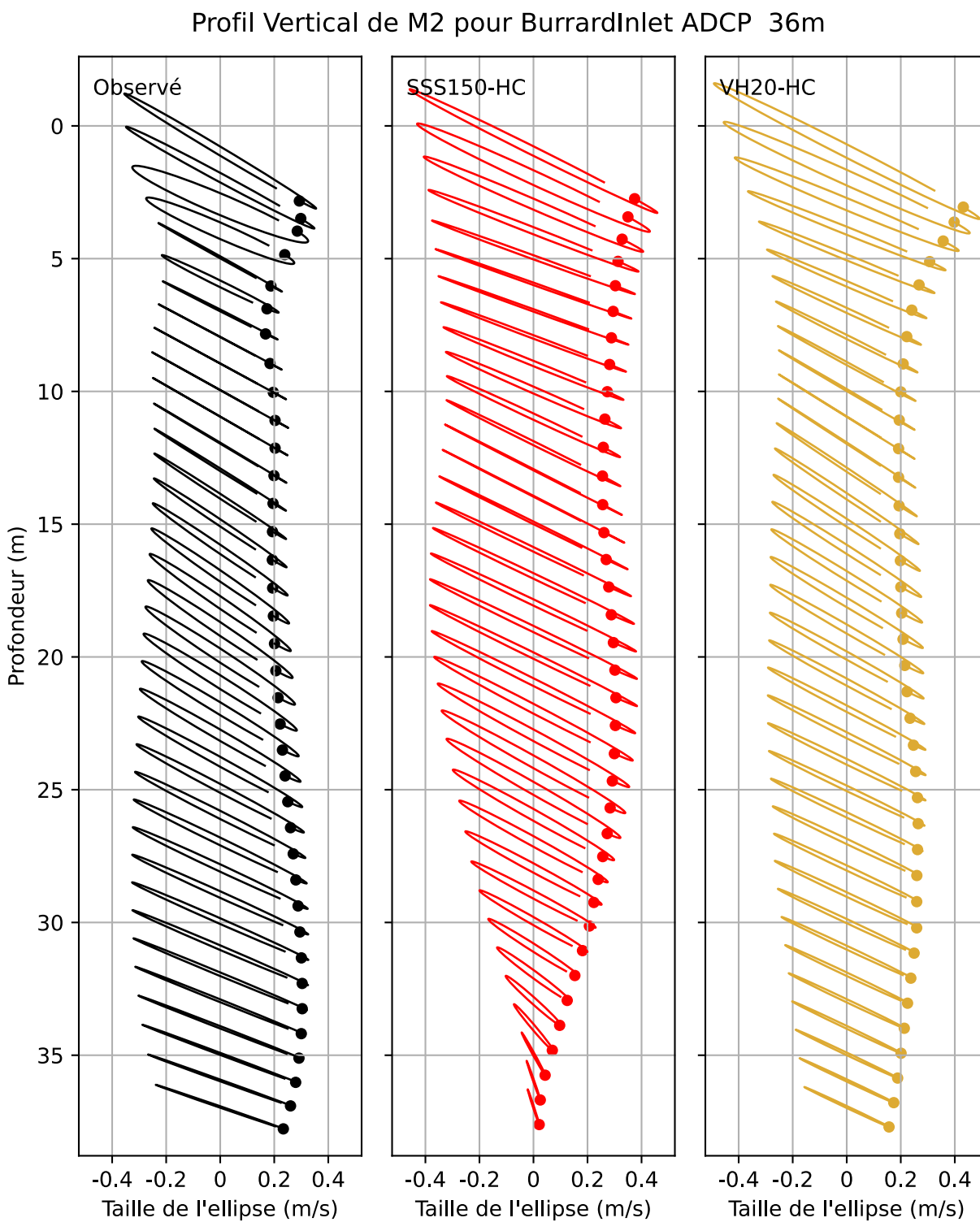


Figure 46. Ellipses de courant pour M2 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.

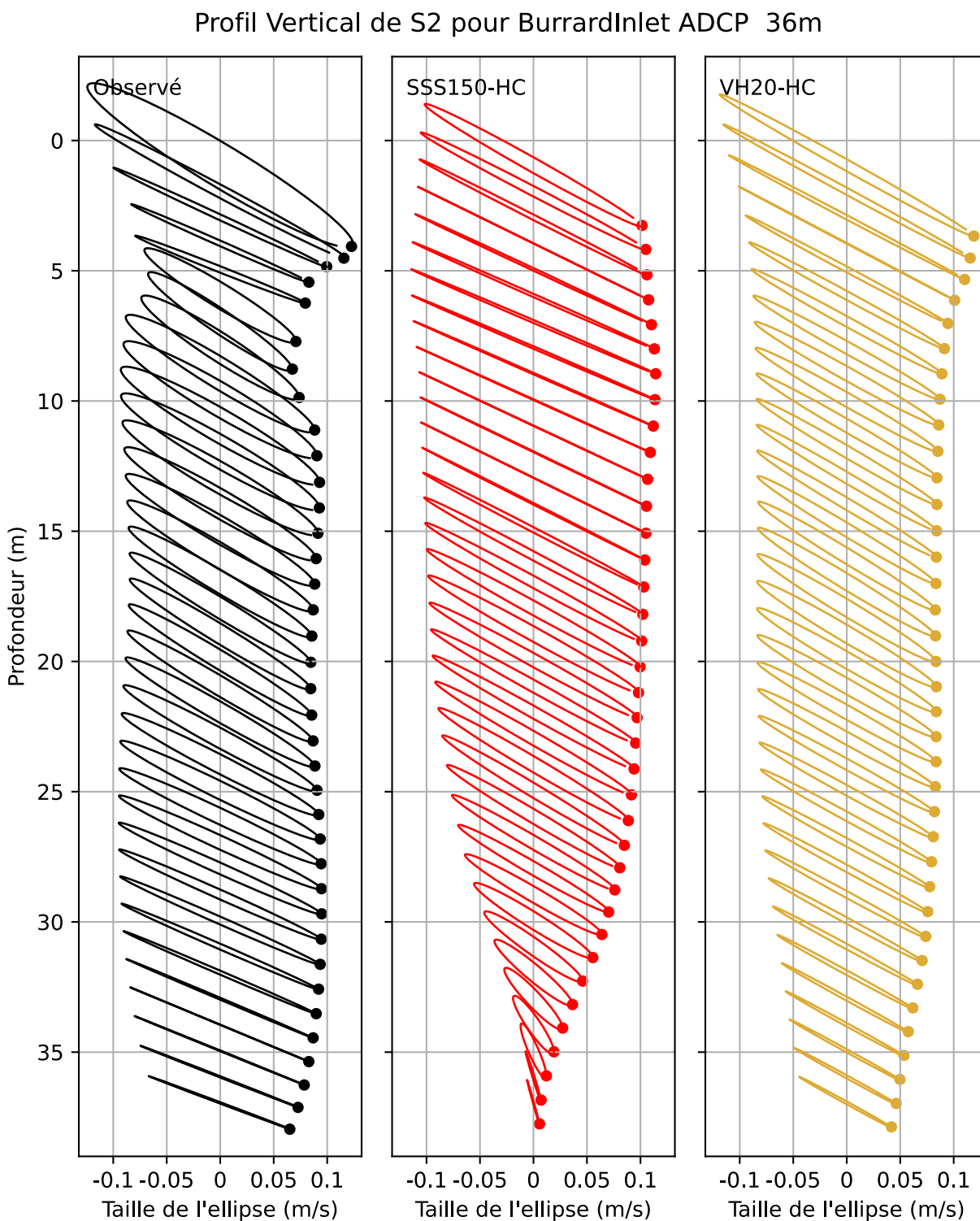


Figure 47. Ellipses de courant pour S2 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.

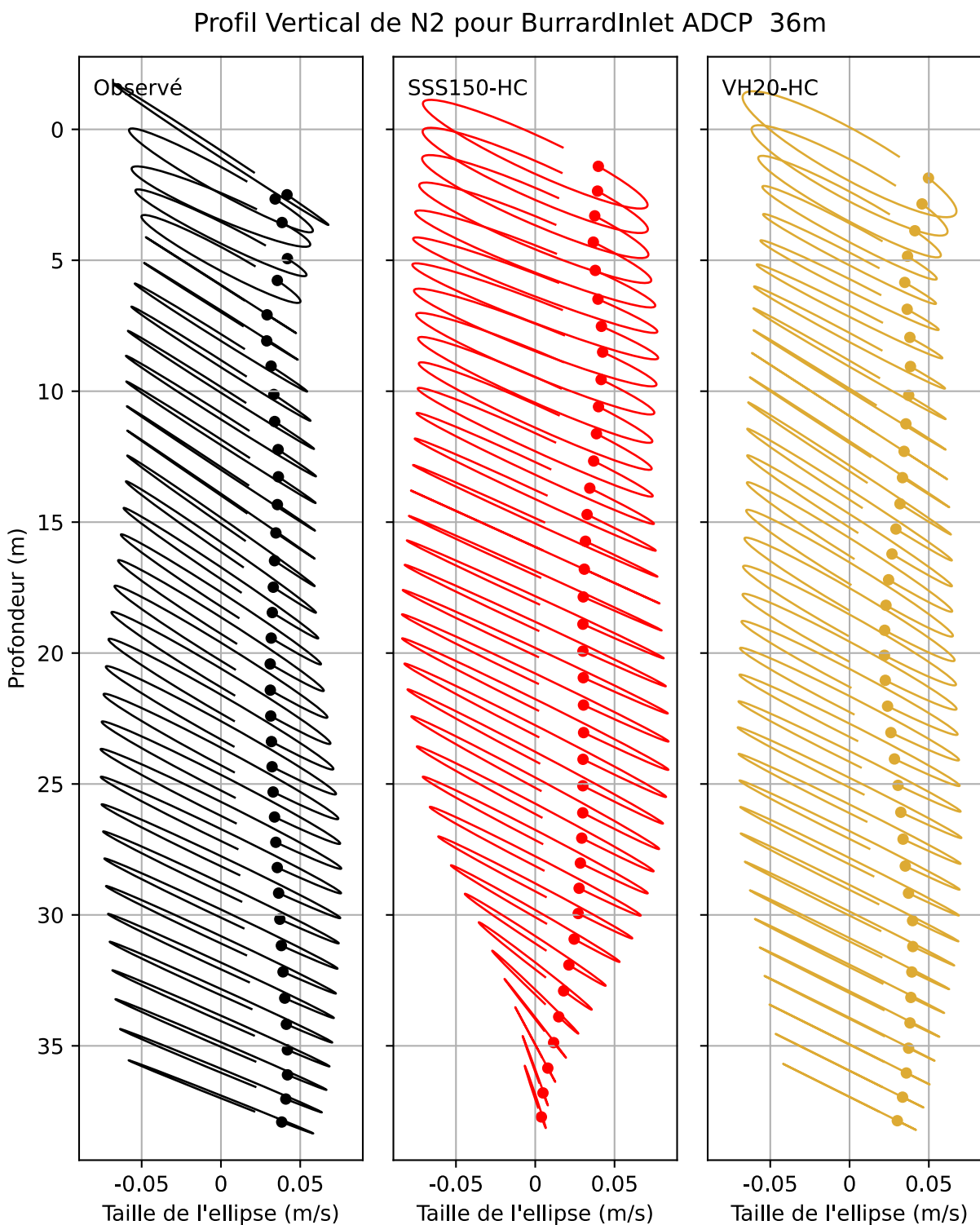


Figure 48. Ellipses de courant pour N2 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.

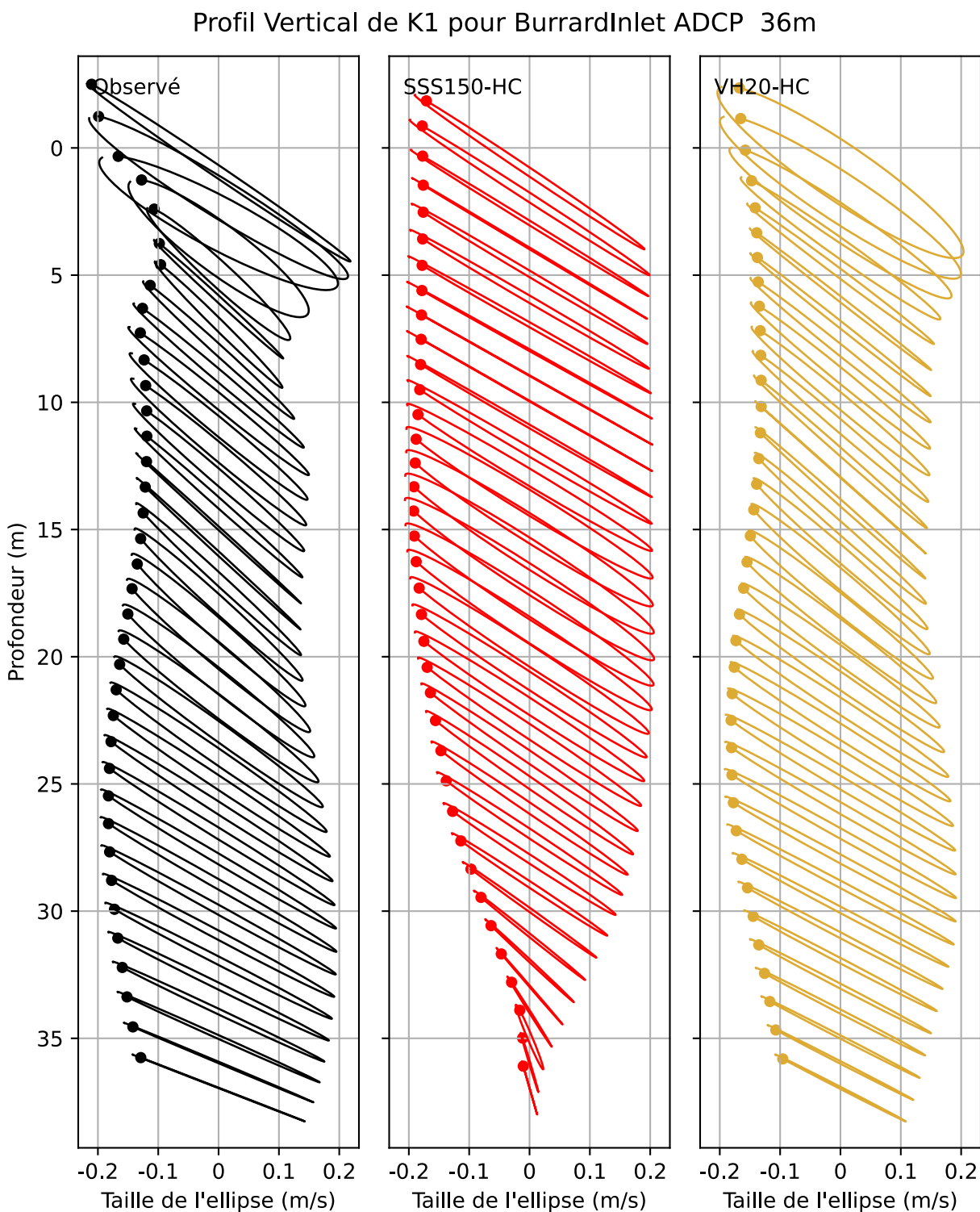


Figure 49. Ellipses de courant pour K1 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.

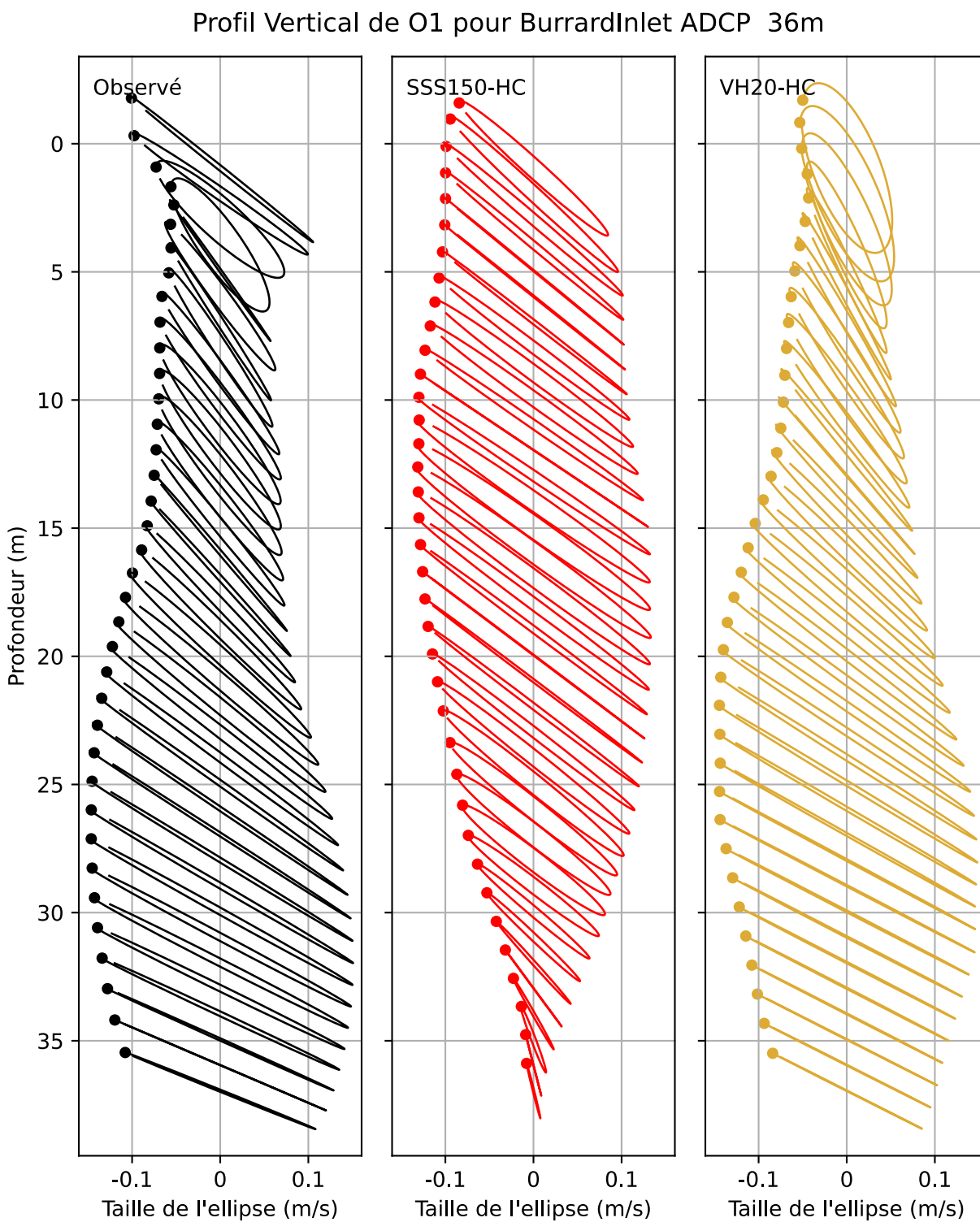


Figure 50. Ellipses de courant pour O1 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.

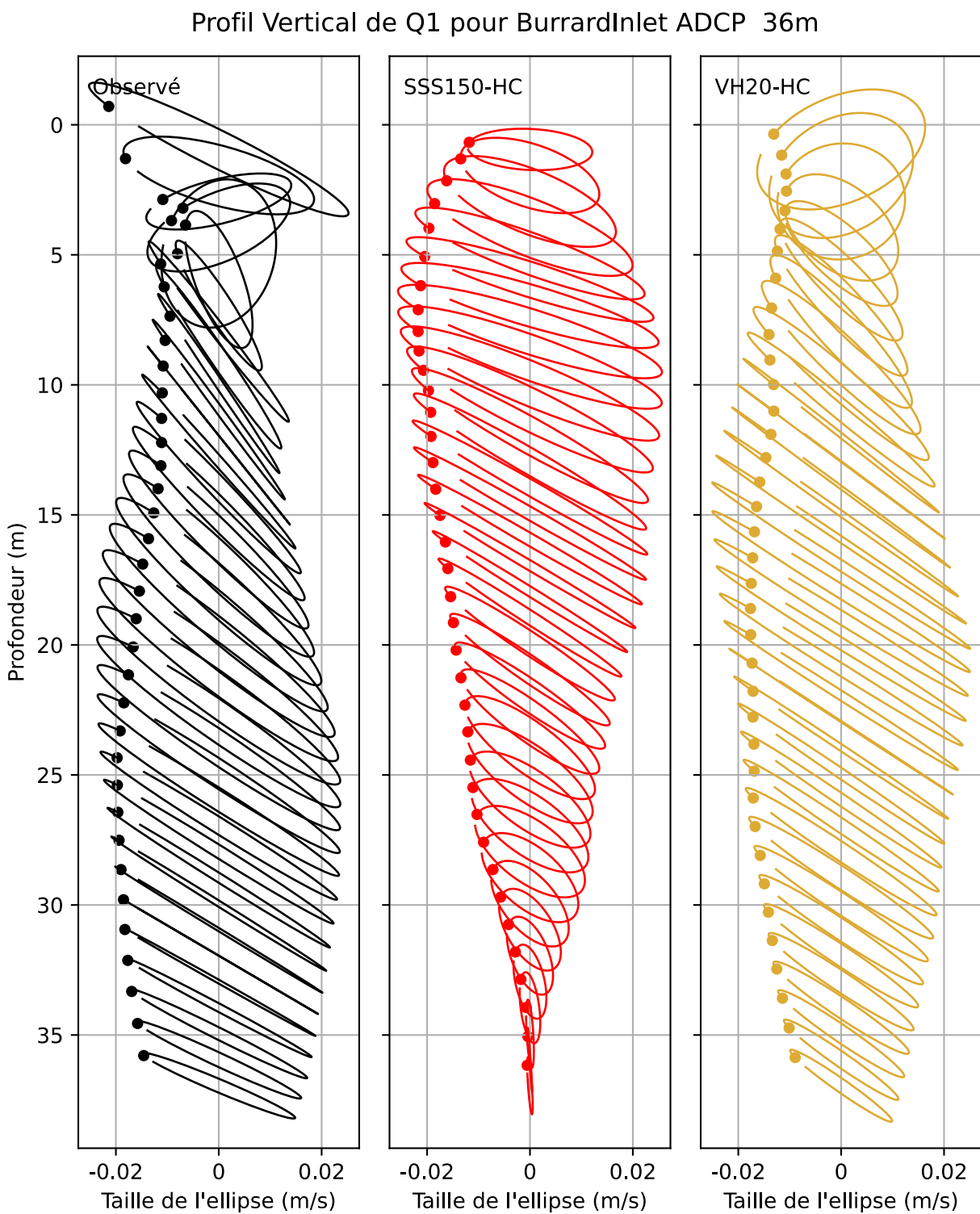


Figure 51. Ellipses de courant pour Q1 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.

Profil Vertical de K2 pour BurrardInlet ADCP 36m

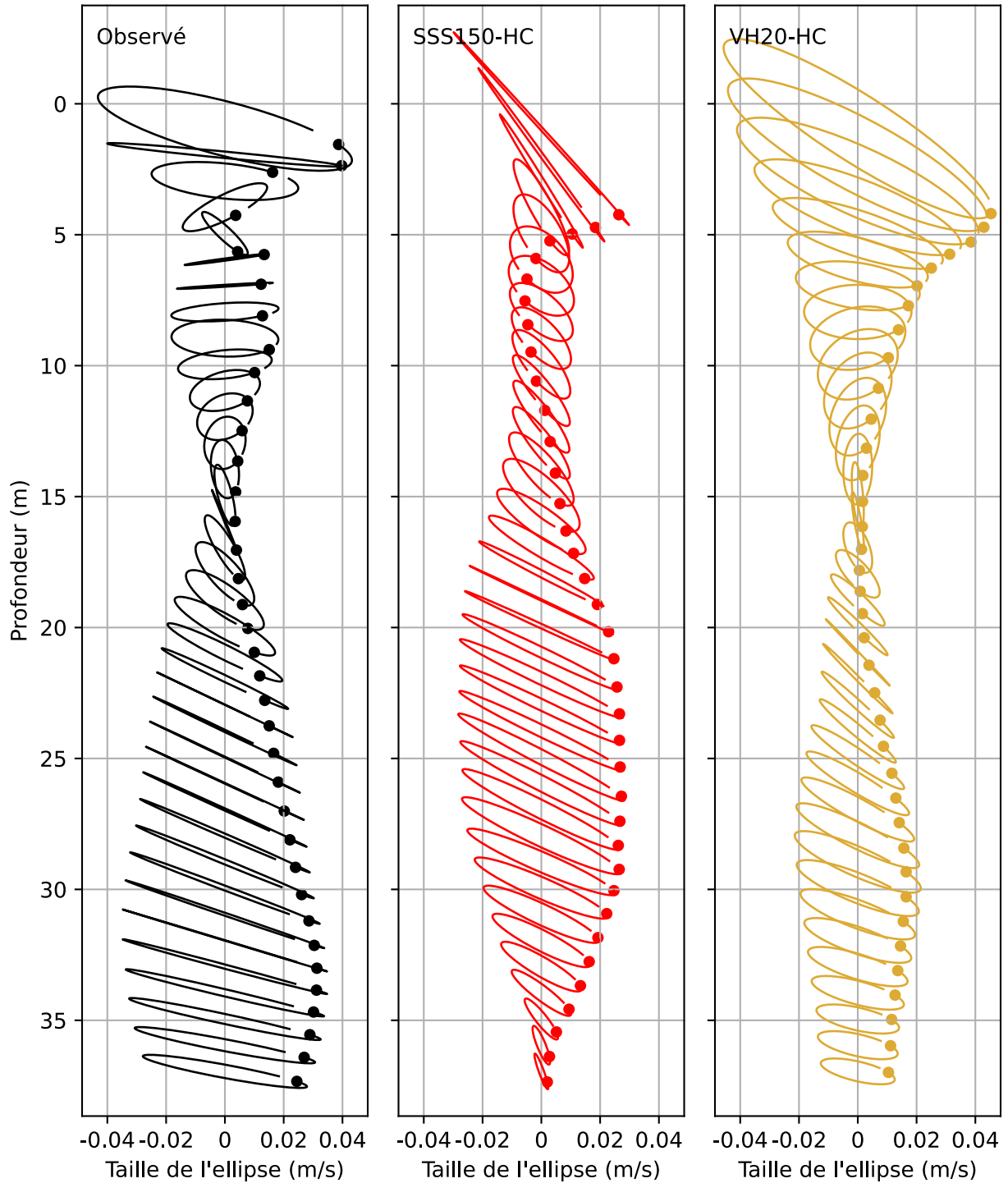


Figure 52. Ellipses de courant pour K2 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.

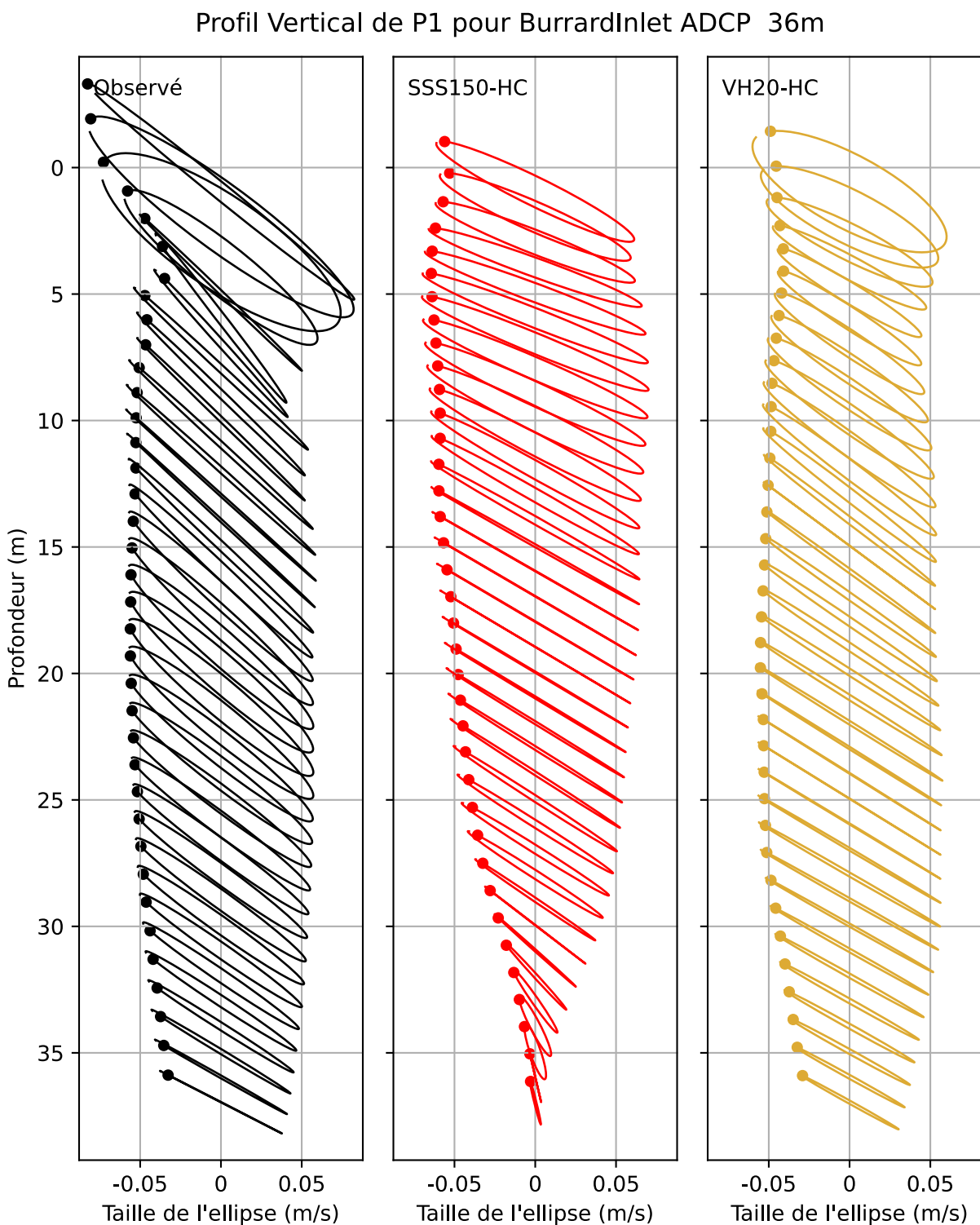


Figure 53. Ellipses de courant pour P1 provenant de l'ADCP de la baie Burrard.

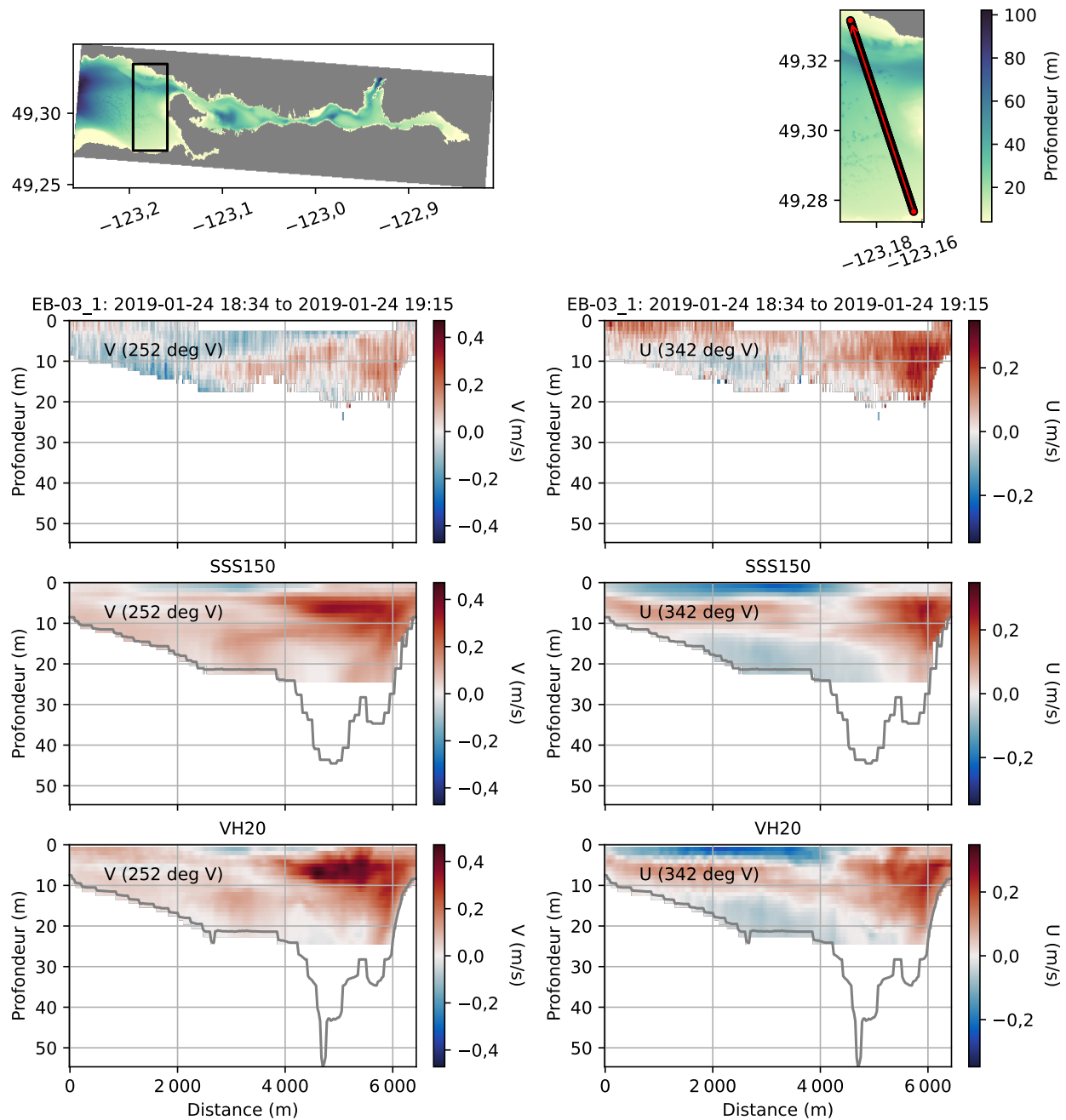


Figure 54. Composantes de courant observées et modélisées perpendiculairement au transect (panneaux de gauche) et le long du transect (panneaux de droite) pour un transect ADCP (EB-03_1) relevé près de First Narrows dans la baie des Anglais. La direction positive est indiquée dans chaque panneau en degrés vrais (deg V). 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.

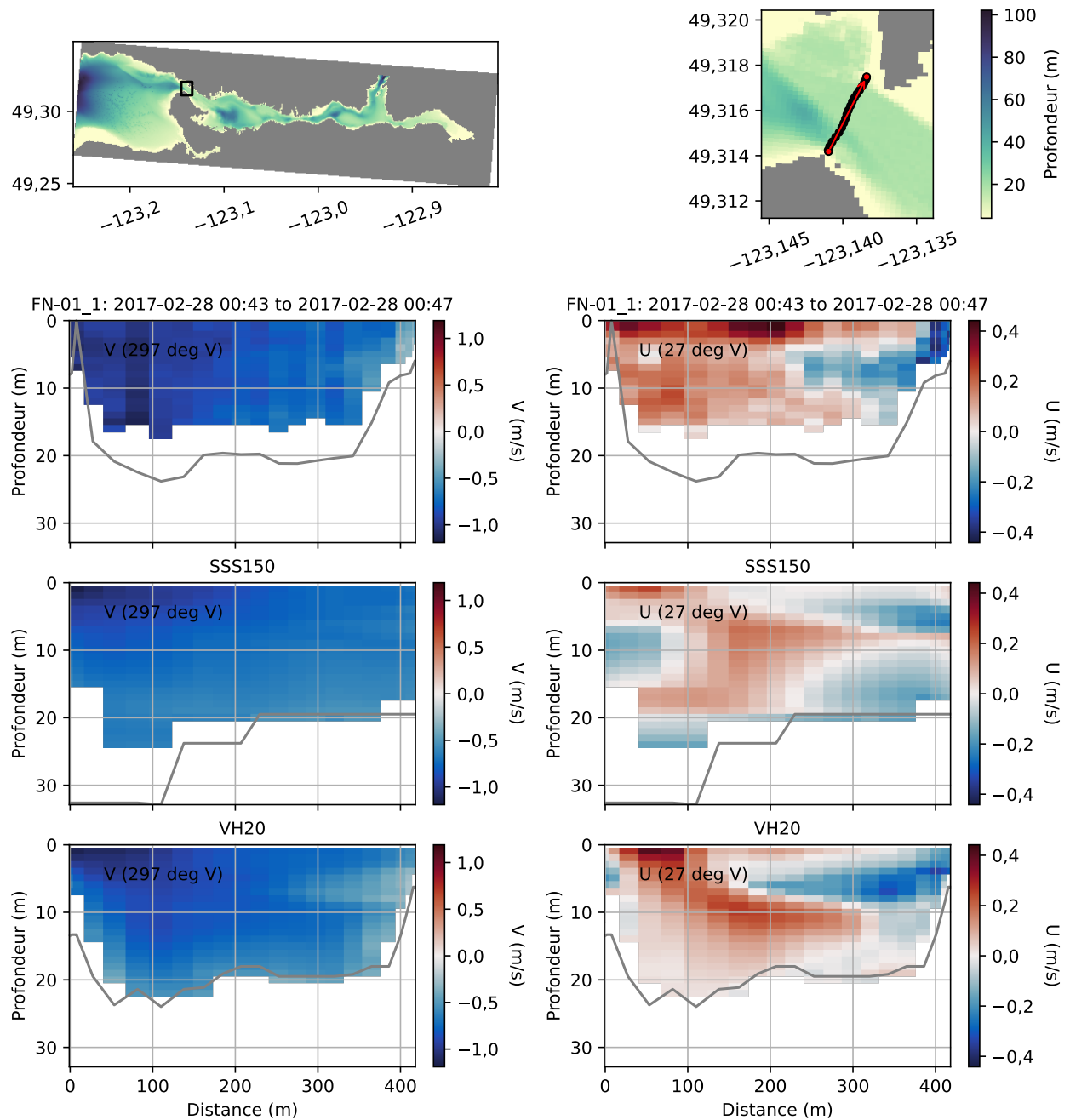


Figure 55. Identique à la Figure 54, mais pour un transect ADCP (FN-01_1) relevé à travers First Narrows.

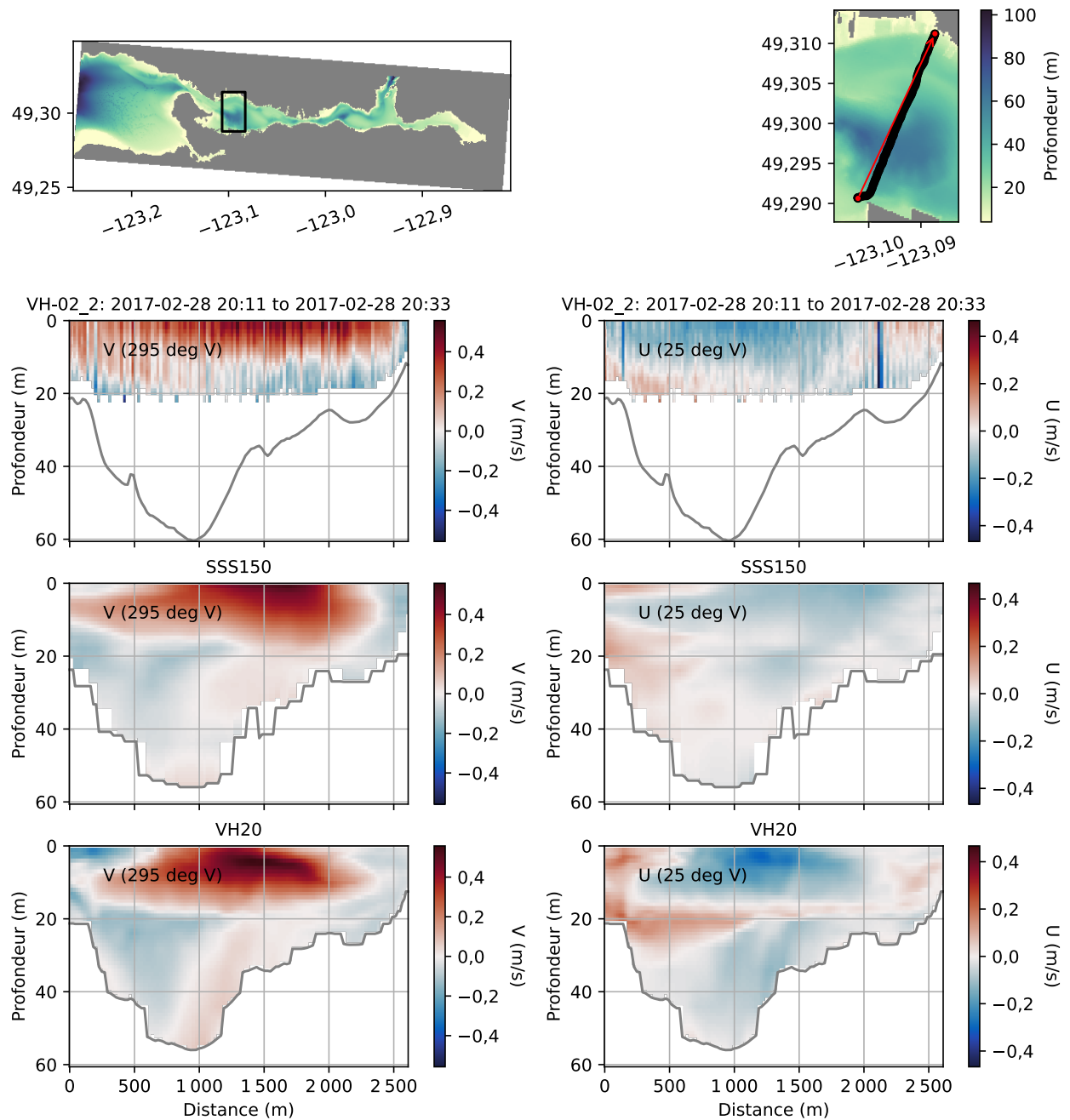


Figure 56. Identique à la Figure 54, mais pour un transect ADCP (VH-02_2) relevé à travers le port de Vancouver.

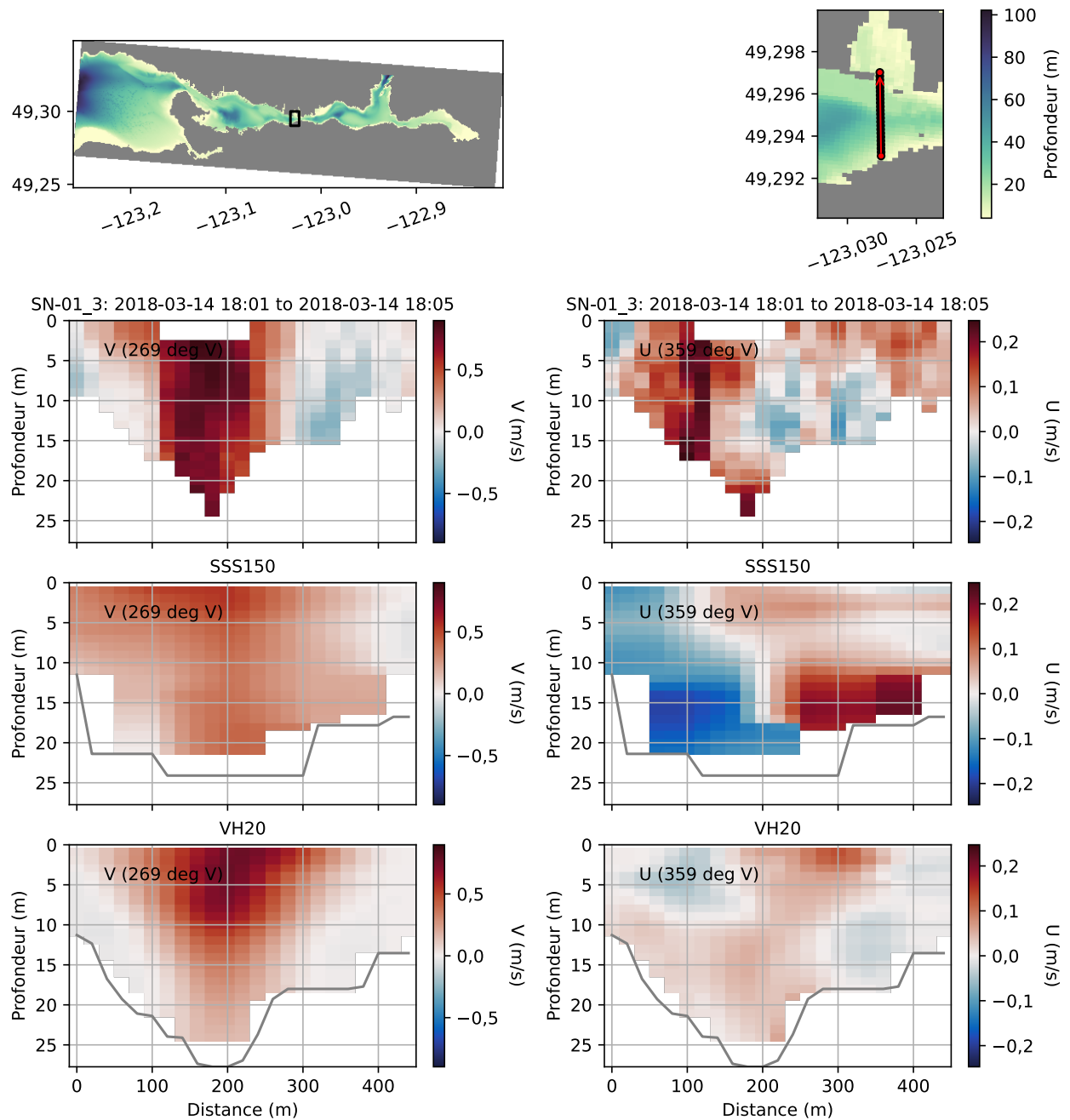


Figure 57. Identique à la Figure 54, mais pour un transect ADCP (SN-01_3) relevé près de Second Narrows.

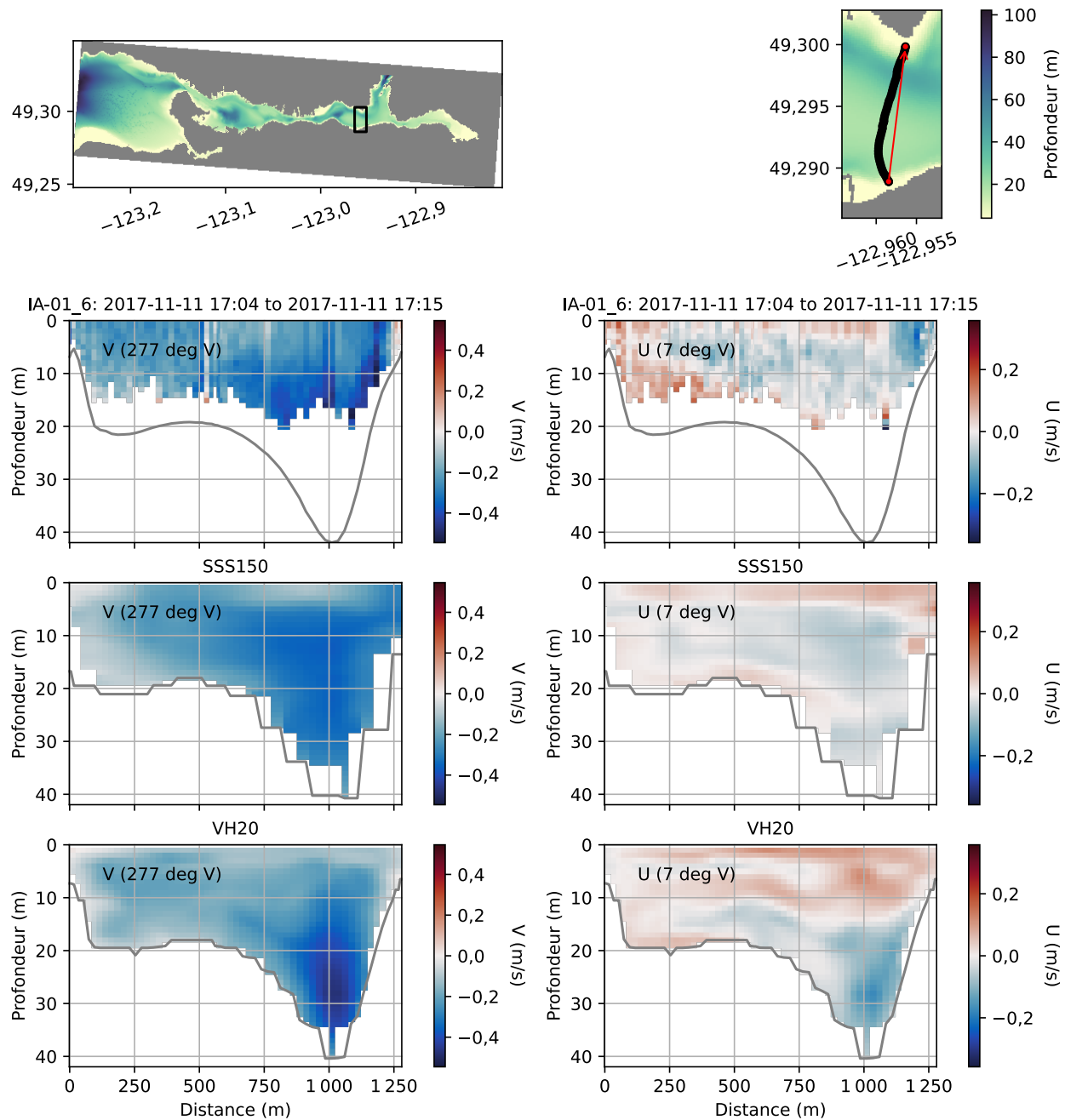


Figure 58. Identique à la Figure 54, mais pour un transect ADCP (IA-01_6) relevé à l'est de Second Narrows.

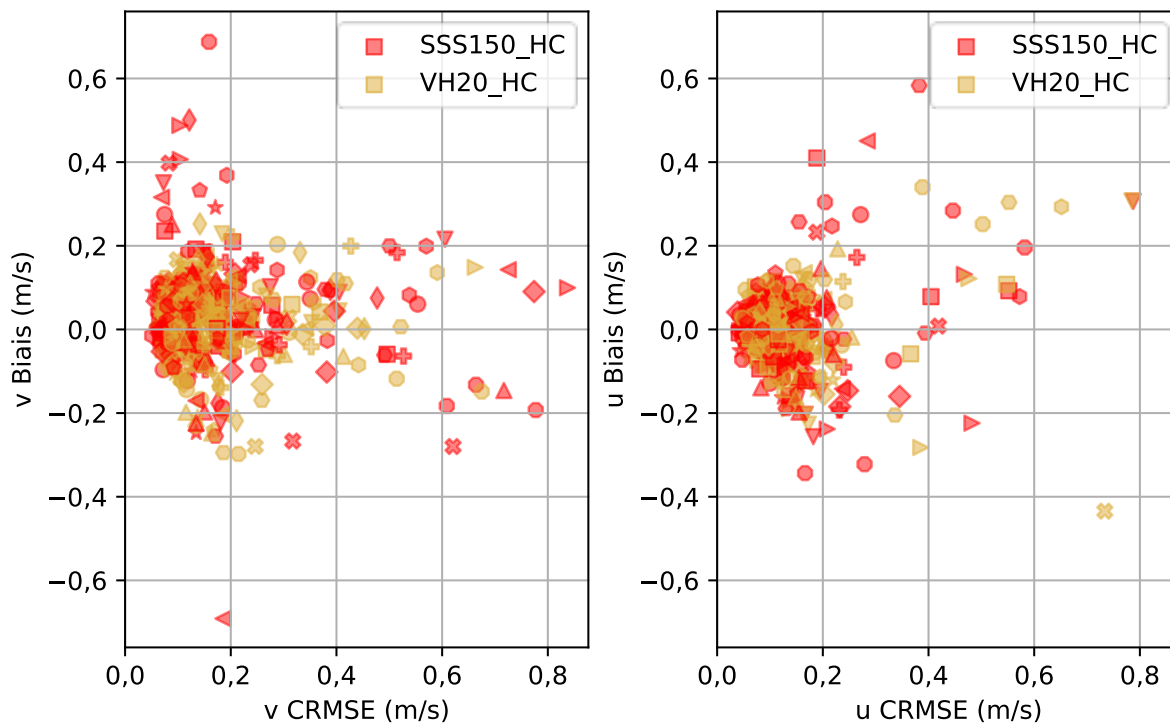


Figure 59. Diagramme de dispersion du biais moyen par rapport à la CRMSE pour chaque transect pour le courant normal au transect (à gauche) et le courant le long du transect (à droite). Chaque marqueur représente un transect (les formes du marqueur se répètent en raison d'un nombre limité de formes) et sa couleur indique le modèle.

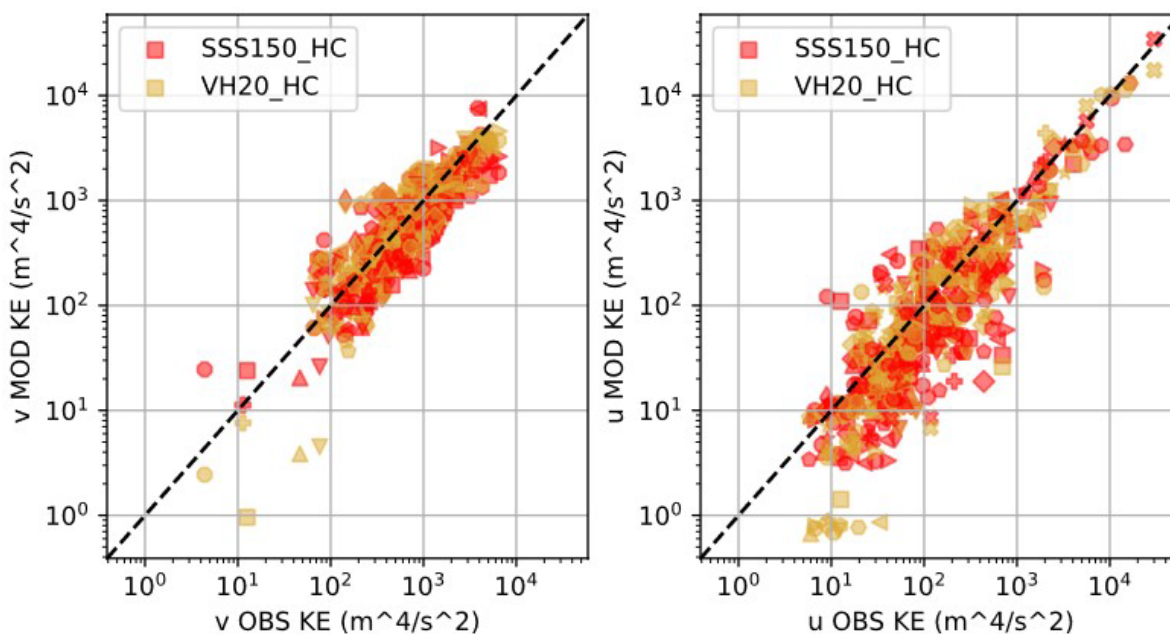


Figure 60. Comparaison de l'énergie cinétique (par unité de densité, par unité de distance) pour la composante du courant normal au transect (à gauche) et la composante du courant le long du transect (à droite). Chaque marqueur représente un transect (les formes du marqueur se répètent en raison d'un nombre limité de formes) et sa couleur indique le modèle.

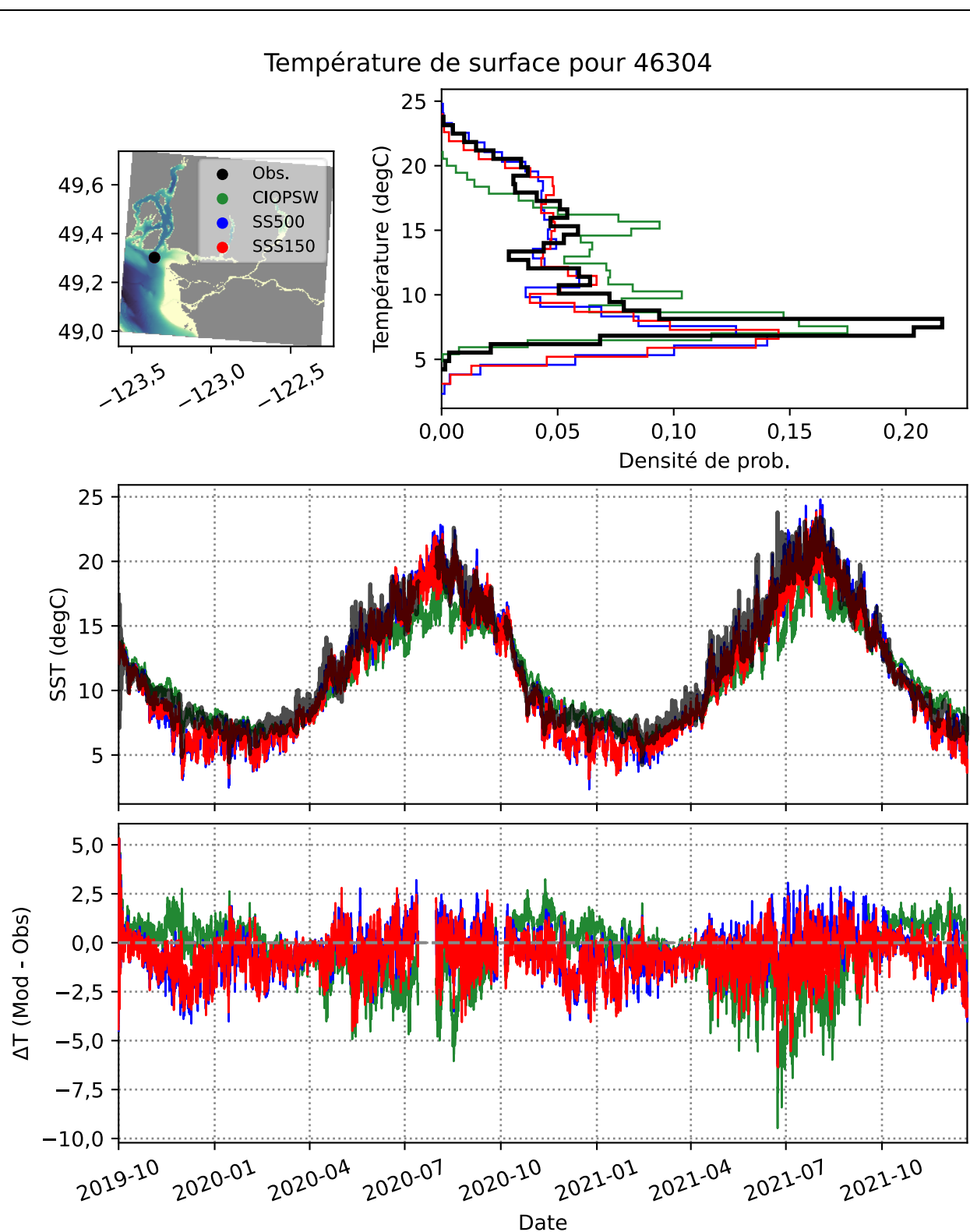


Figure 61. Température de surface de la mer à l'entrée de la baie des Anglais (bouée 46304).

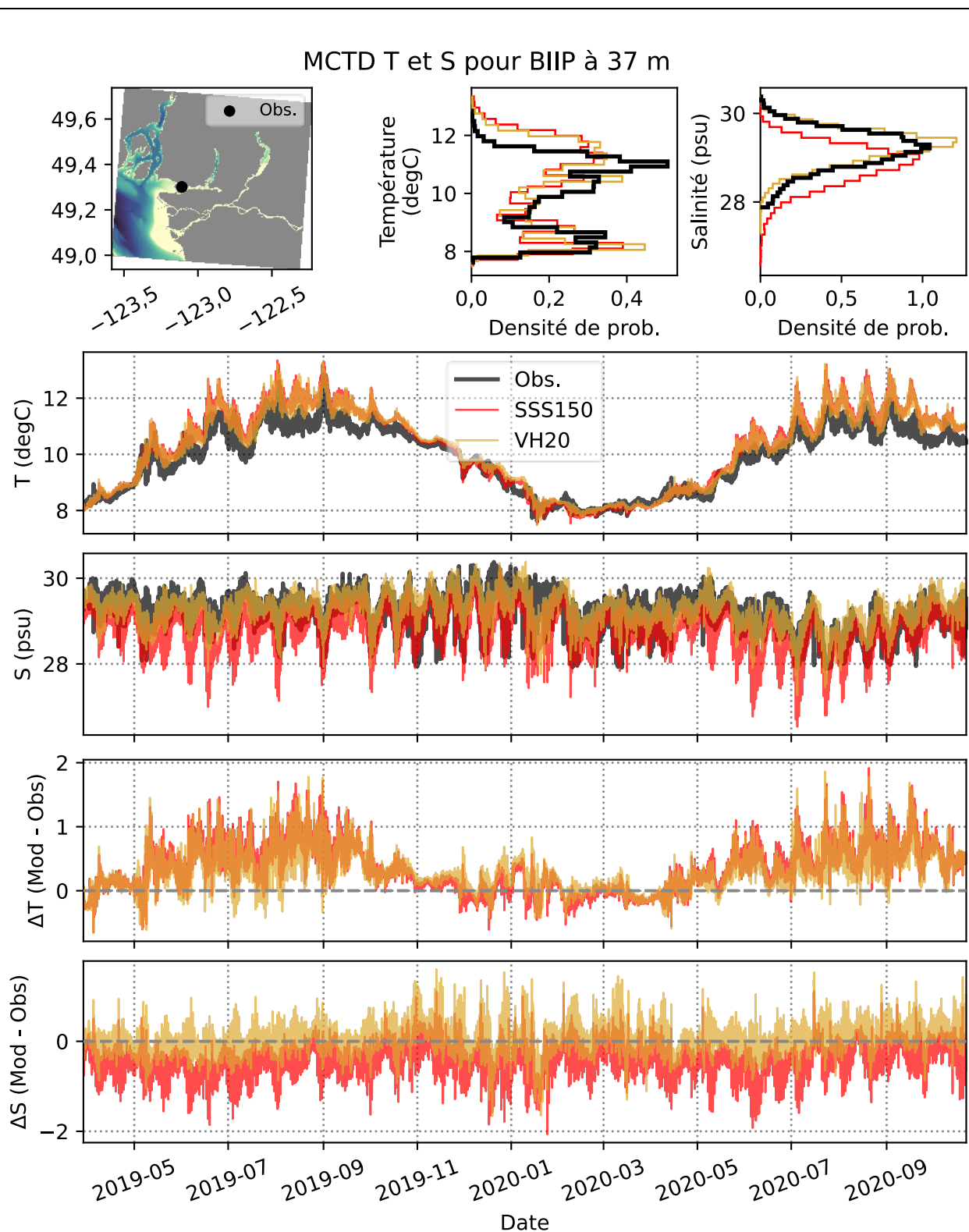


Figure 62. Température et salinité observées et modélisées pour la sonde CTD ancrée de la plateforme d'instruments de la baie Burrard (déploiement en mars 2019) à une profondeur de 37 m.

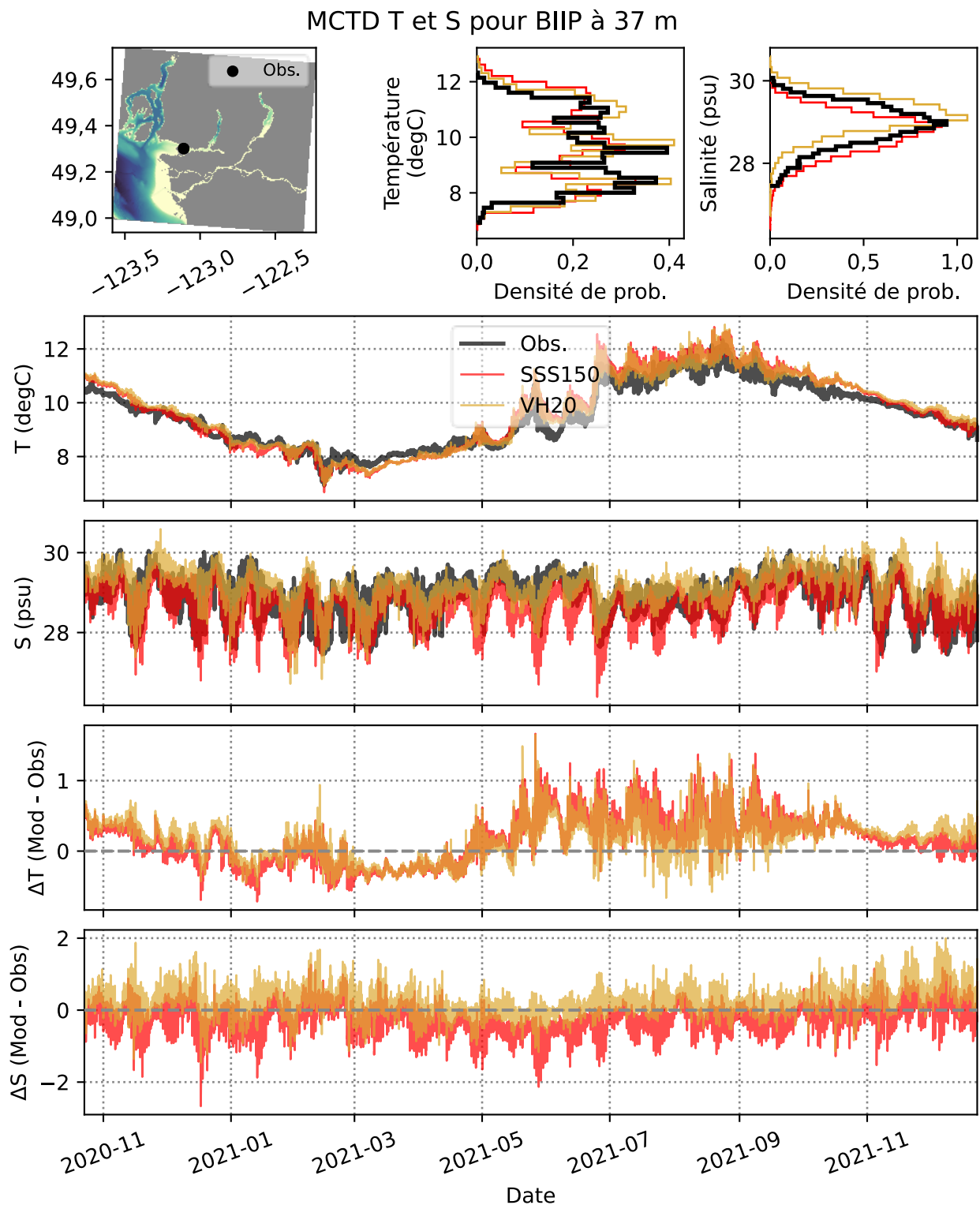


Figure 63. Température et salinité observées et modélisées pour la sonde CTD ancrée de la plateforme d'instruments de la baie Burrard (déploiement en octobre 2020) à une profondeur de 37 m.

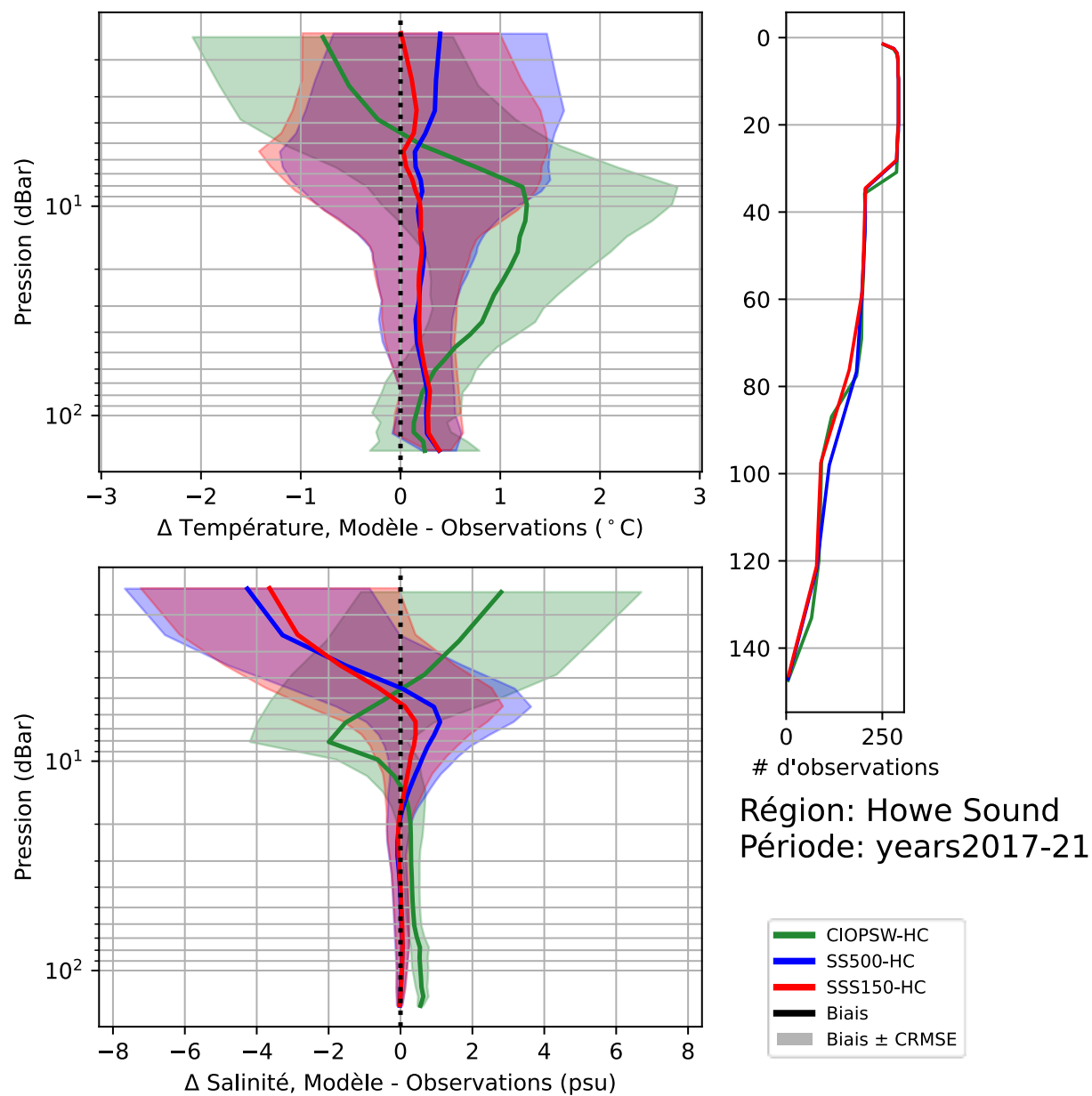


Figure 64. Comparaison des profils CTD pour la région de la baie Howe.

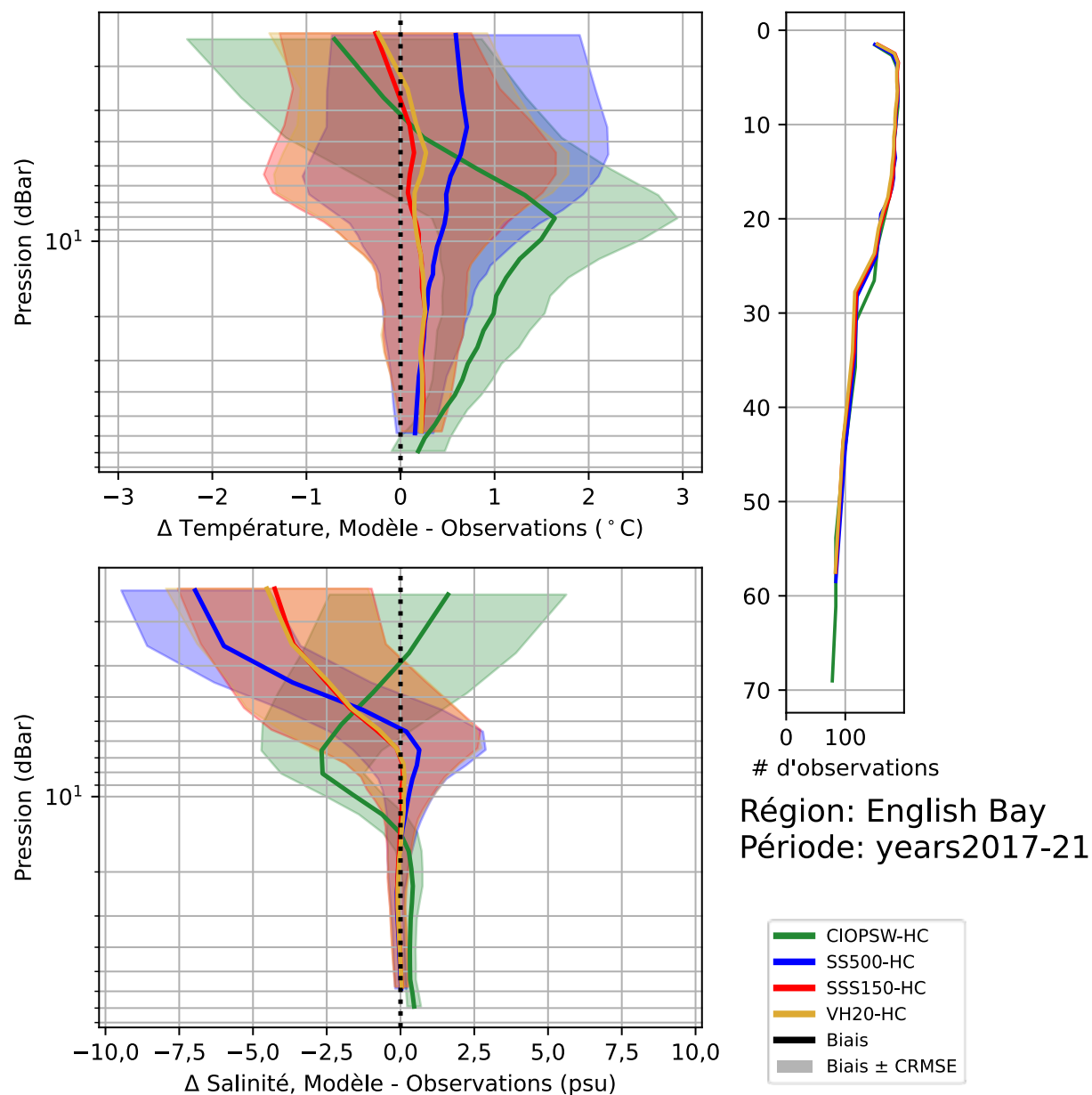


Figure 65. Comparaison des profils CTD pour la région de la baie des Anglais.

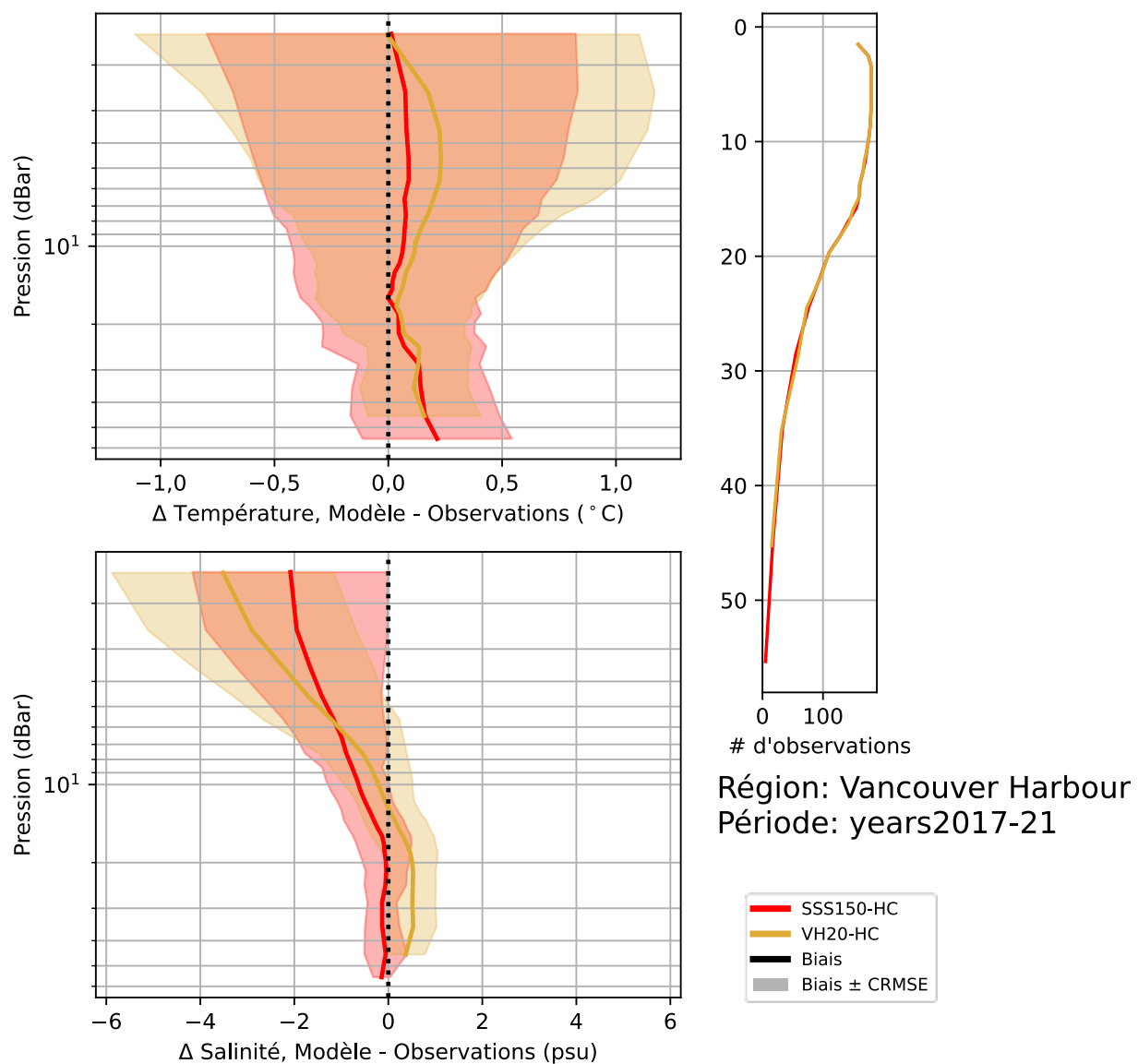


Figure 66. Comparaison des profils CTD pour la région du port de Vancouver.

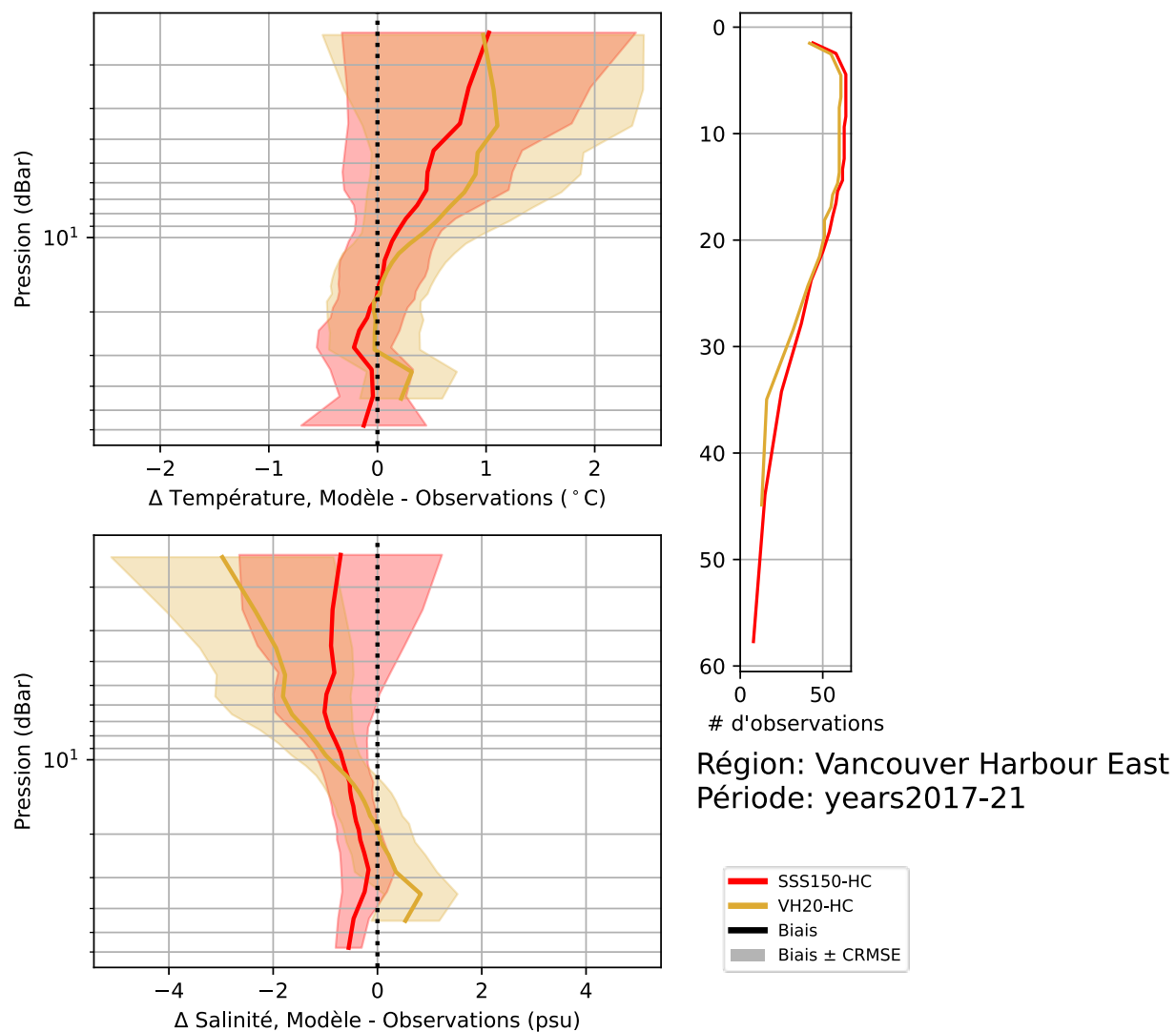


Figure 67. Comparaison des profils CTD pour la région du port de Vancouver-Est.

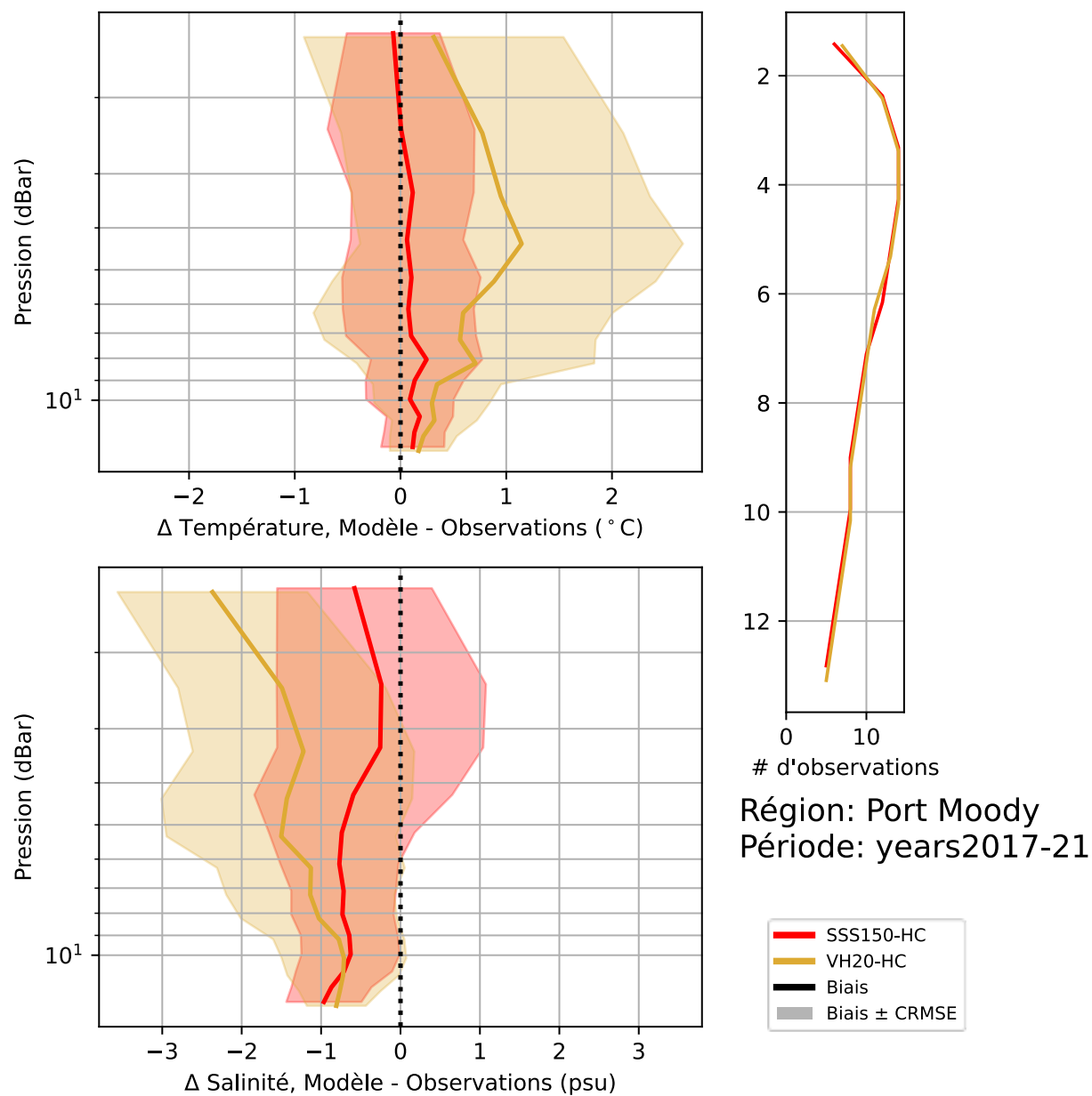


Figure 68. Comparaison des profils CTD pour la région de Port Moody.

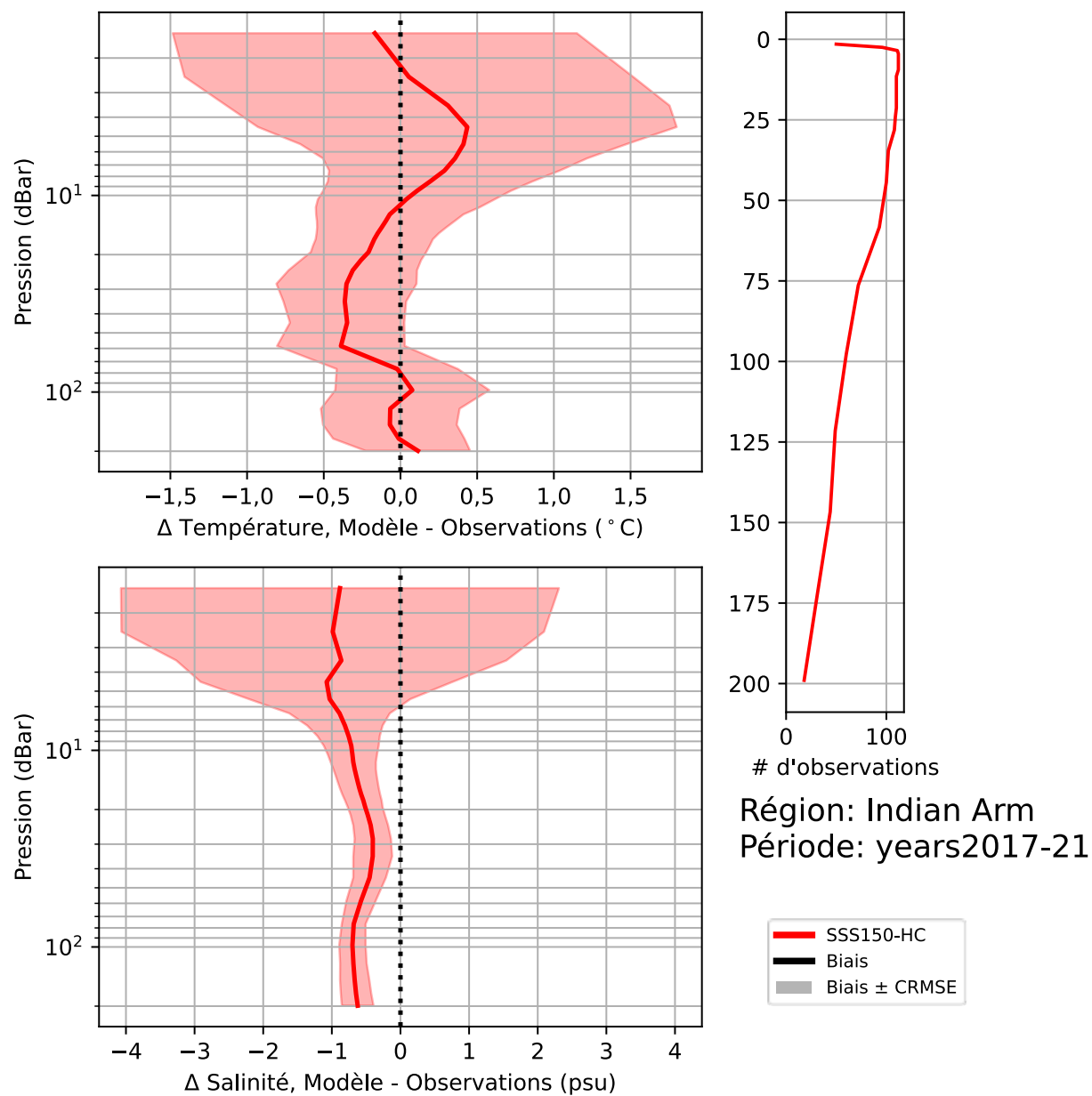


Figure 69. Comparaison des profils CTD pour la région de Indian Arm.

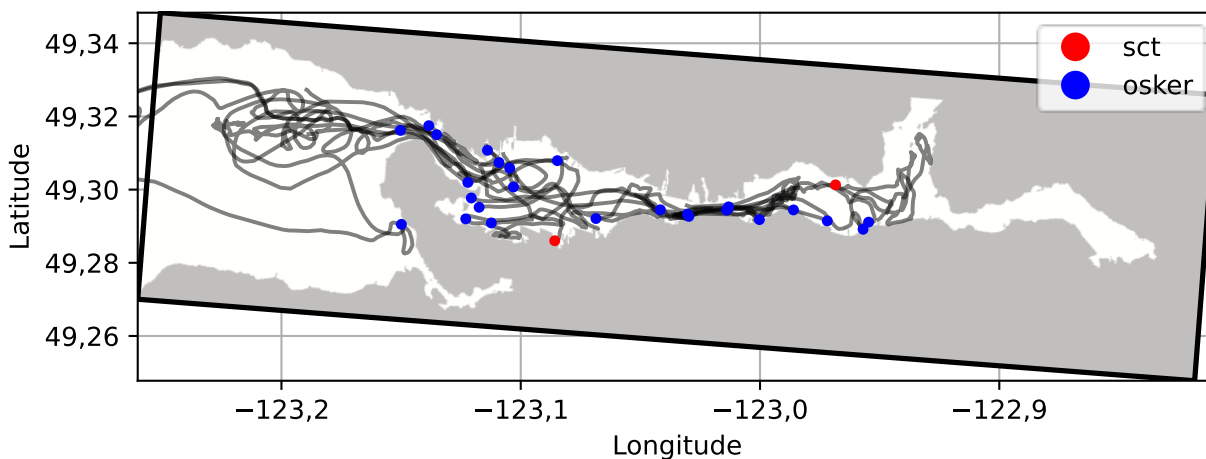


Figure 70. Trajectoires de dérive pour les deux types de bouées dérivantes (OSKER et SCT) utilisées pour l'évaluation de la dérive.

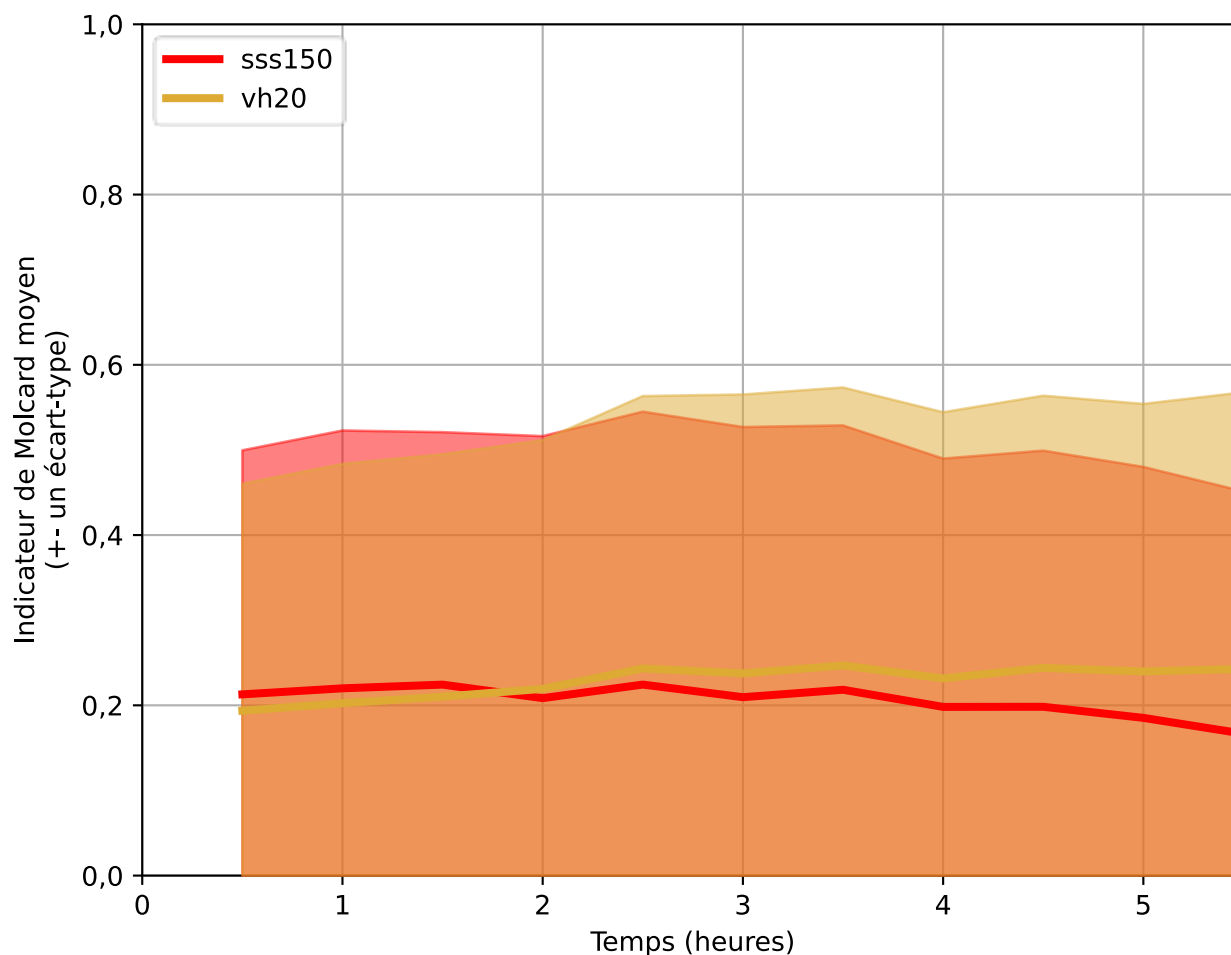


Figure 71. Indice de performance de Molcard en fonction du temps dans l'expérience de dérive. La zone ombrée affiche $\pm$ un écart type.

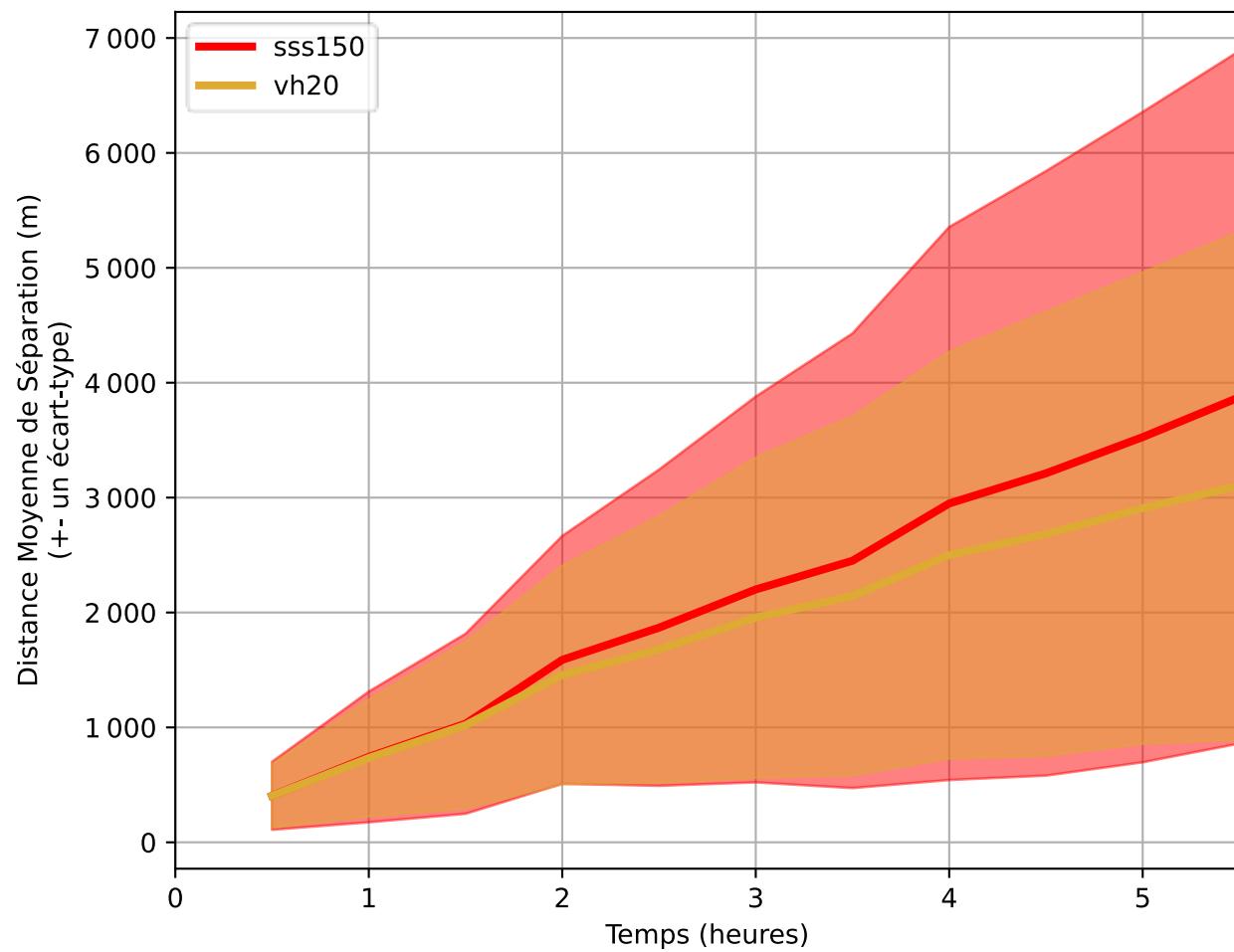


Figure 72. Distance de séparation en fonction du temps dans l'expérience de dérive. La zone ombrée affiche $\pm$ un écart type.

BIAIS, CRMSE pour Point Atkinson sur la période forecast_eval

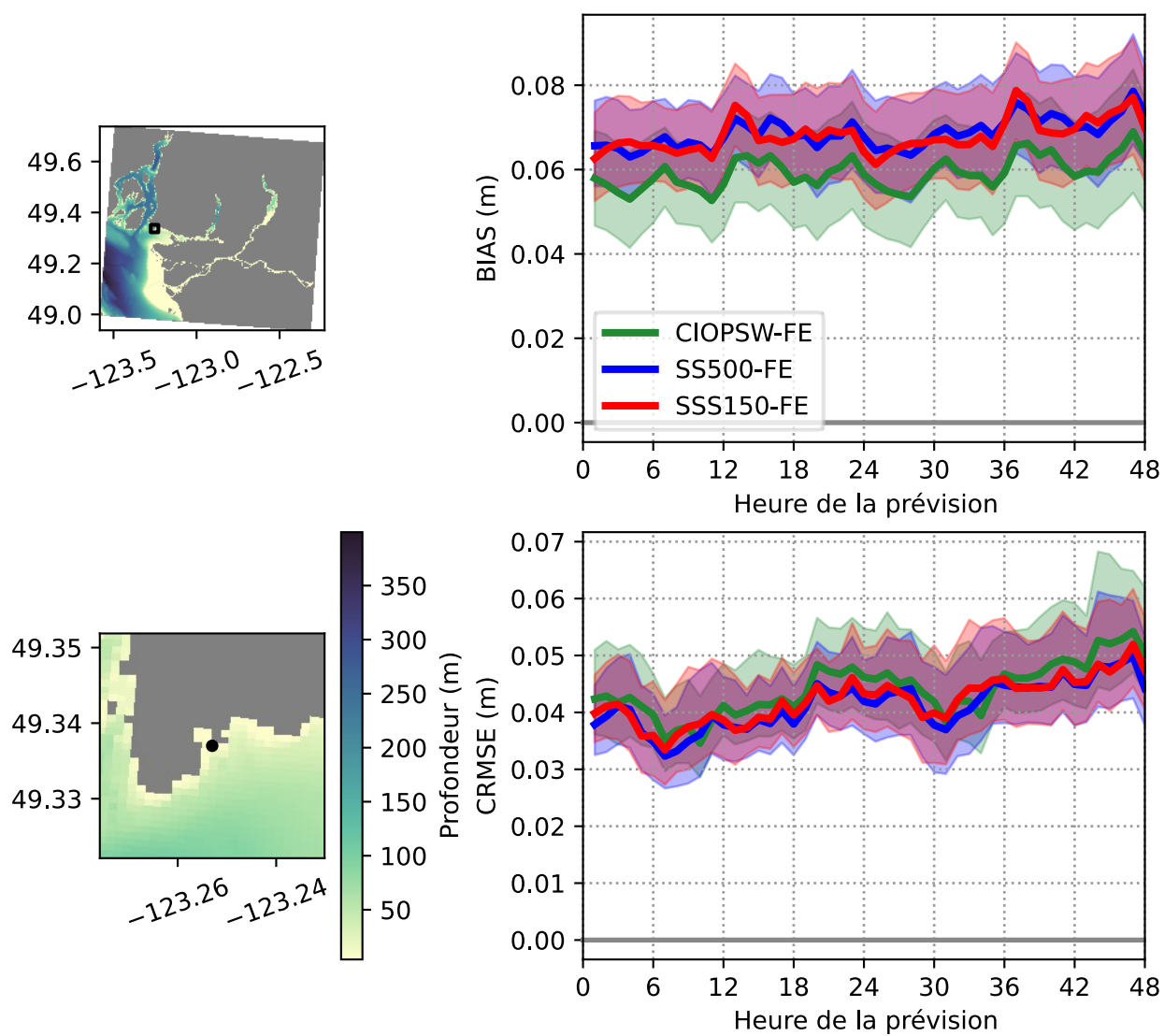


Figure 73. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Point Atkinson.

BIAIS, CRMSE pour Sandy Cove sur la période forecast_eval

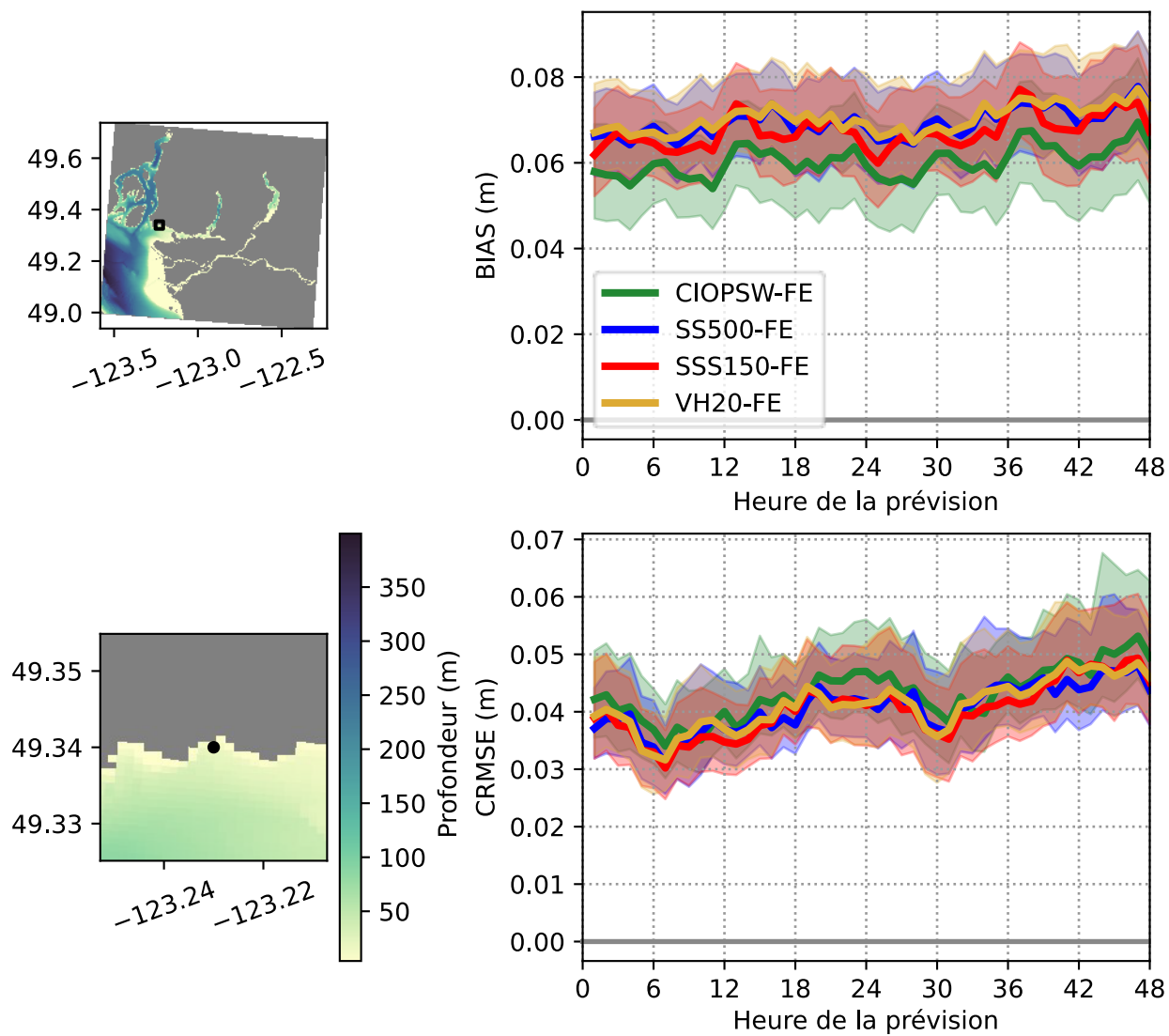


Figure 74. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Sandy Cove.

BIAS, CRMSE pour Kitsilano sur la période forecast_eval

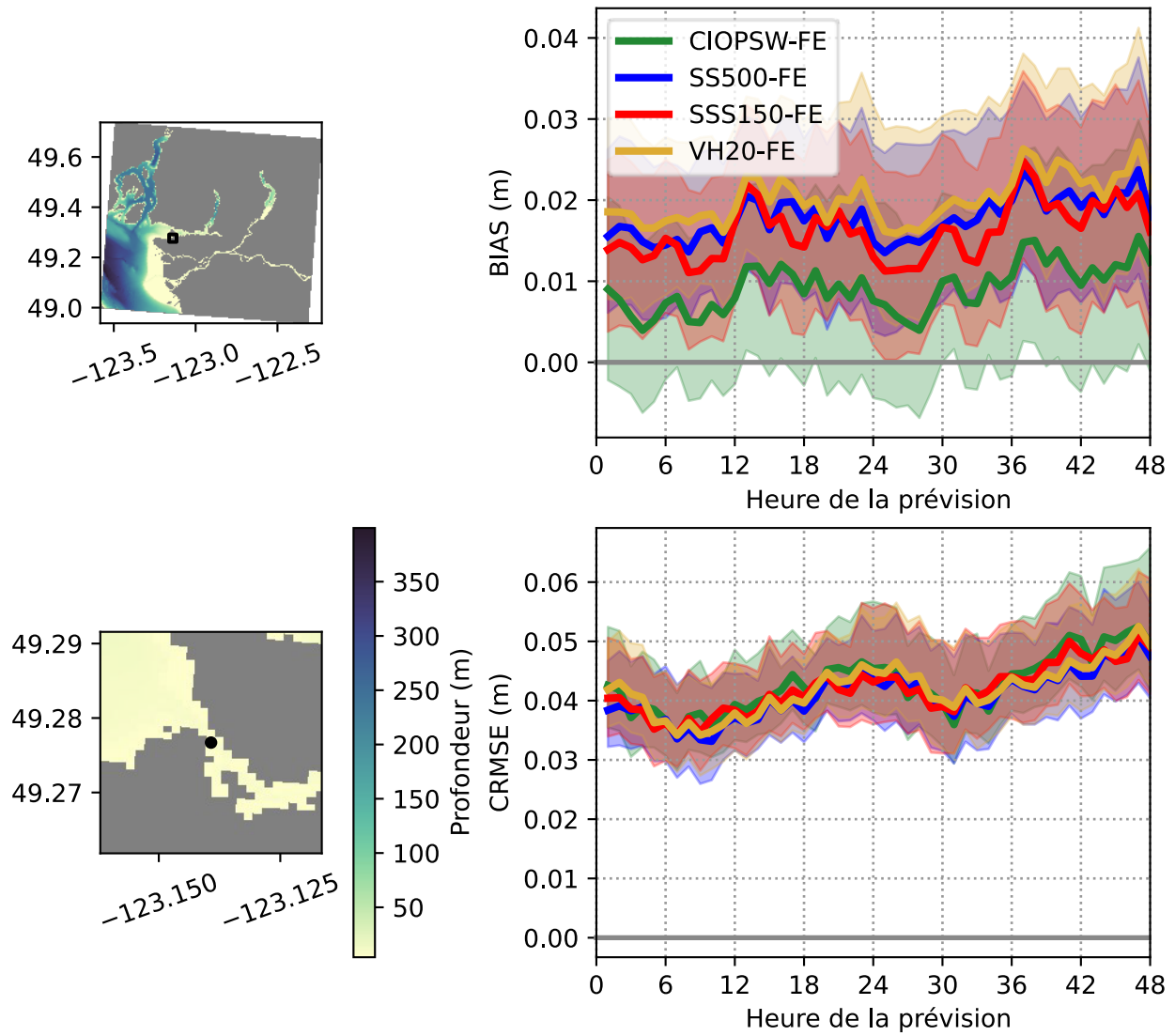


Figure 75. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Kitsilano.

BIAIS, CRMSE pour Ambleside sur la période forecast_eval

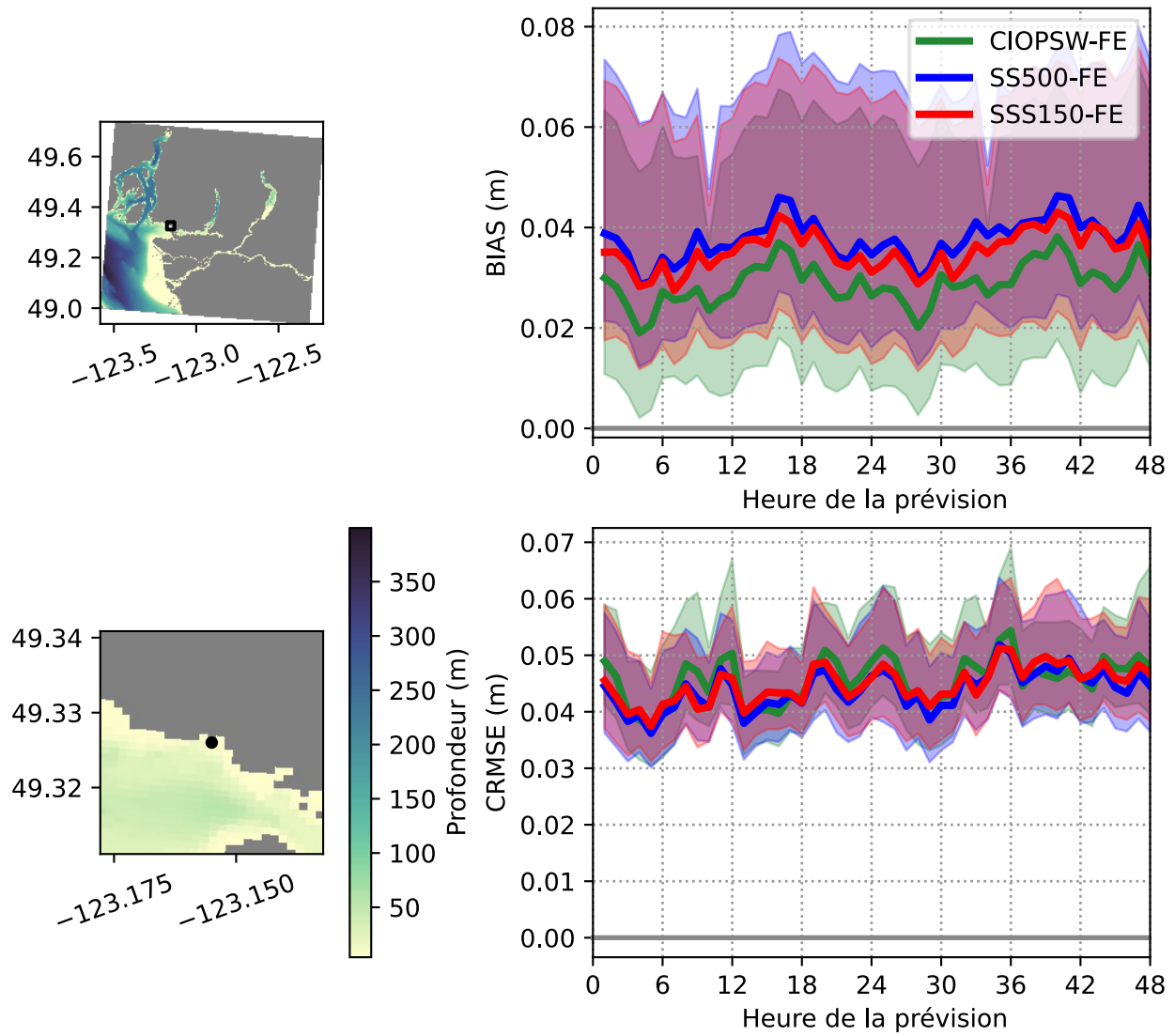


Figure 76. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Ambleside.

BIAIS, CRMSE pour Vancouver sur la période forecast_eval

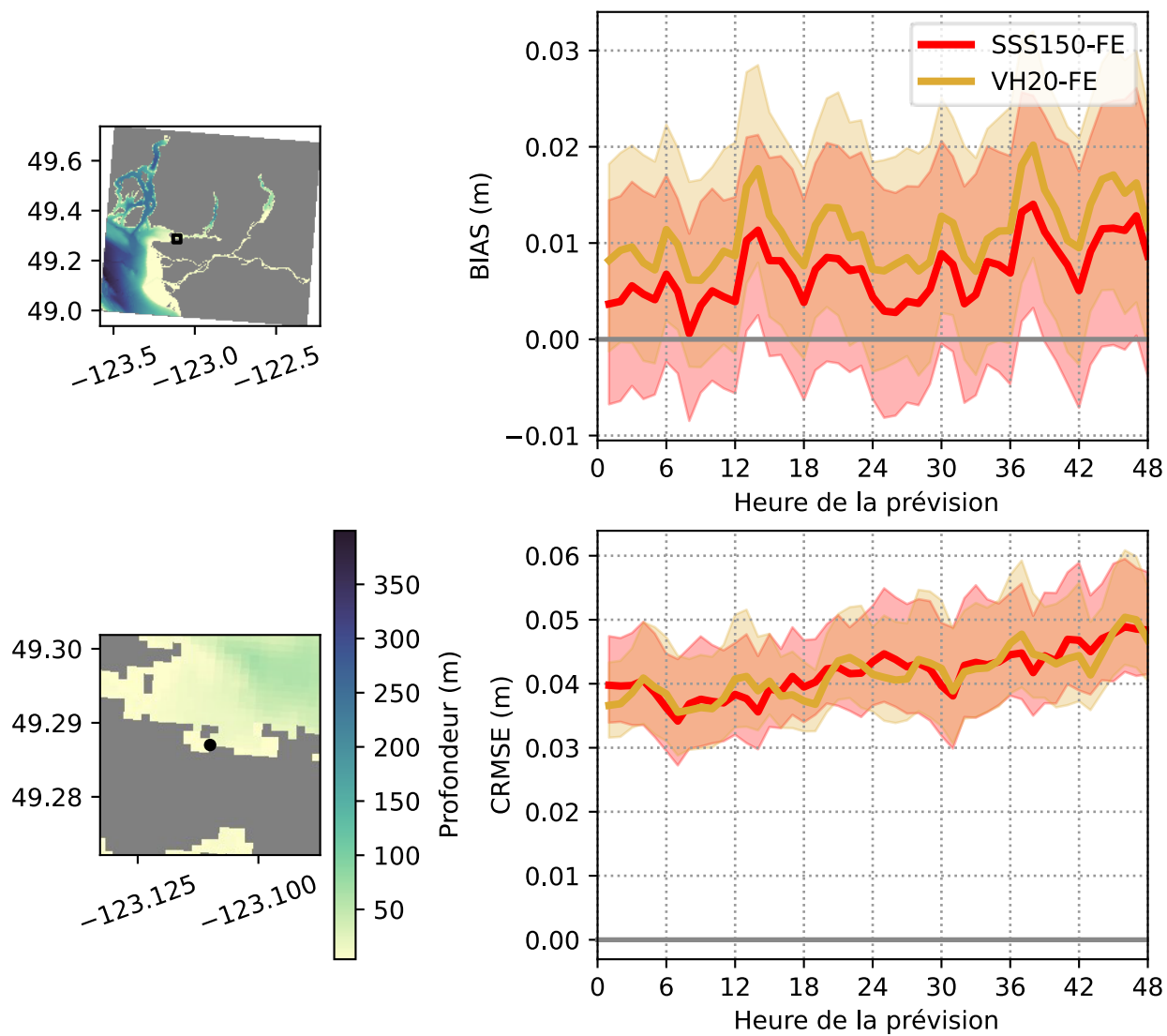


Figure 77. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel dans le port de Vancouver.

BIAIS, CRMSE pour Port Moody sur la période forecast_eval

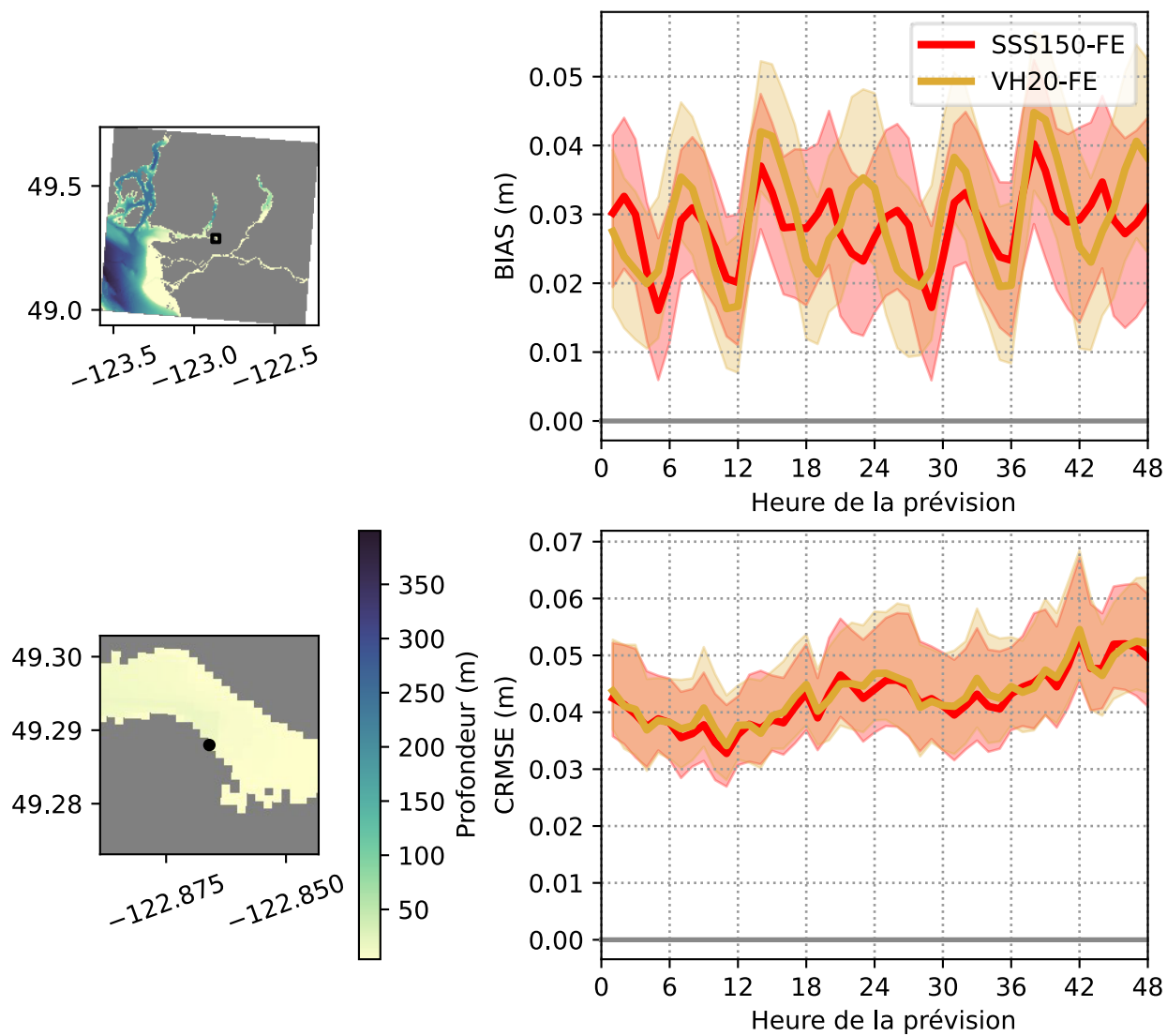


Figure 78. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Port Moody.

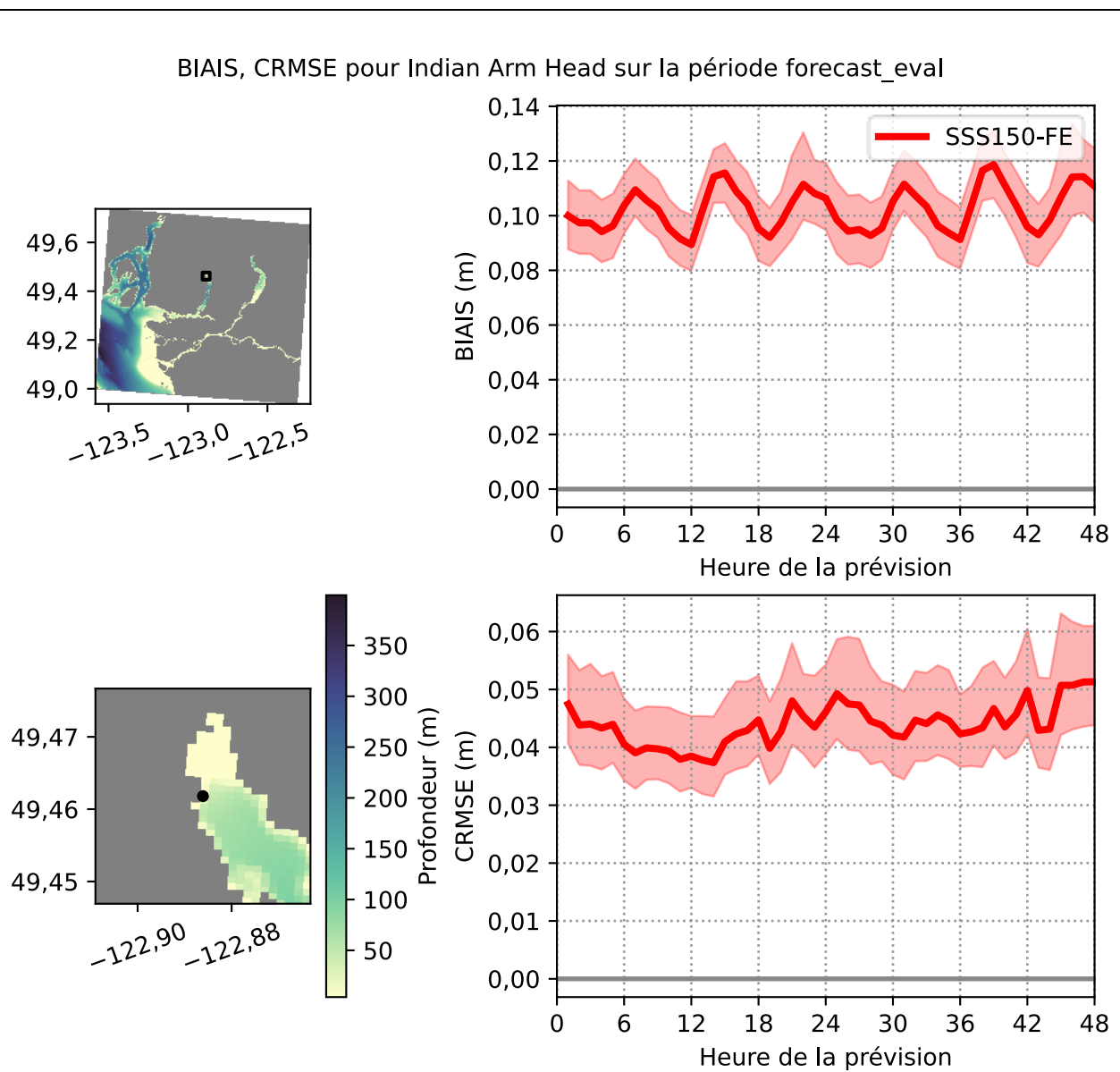


Figure 79. Évaluation des prévisions du niveau d'eau résiduel à Indian Arm Head.

BIAIS, CRMSE pour Second Narrows sur la période forecast_eval

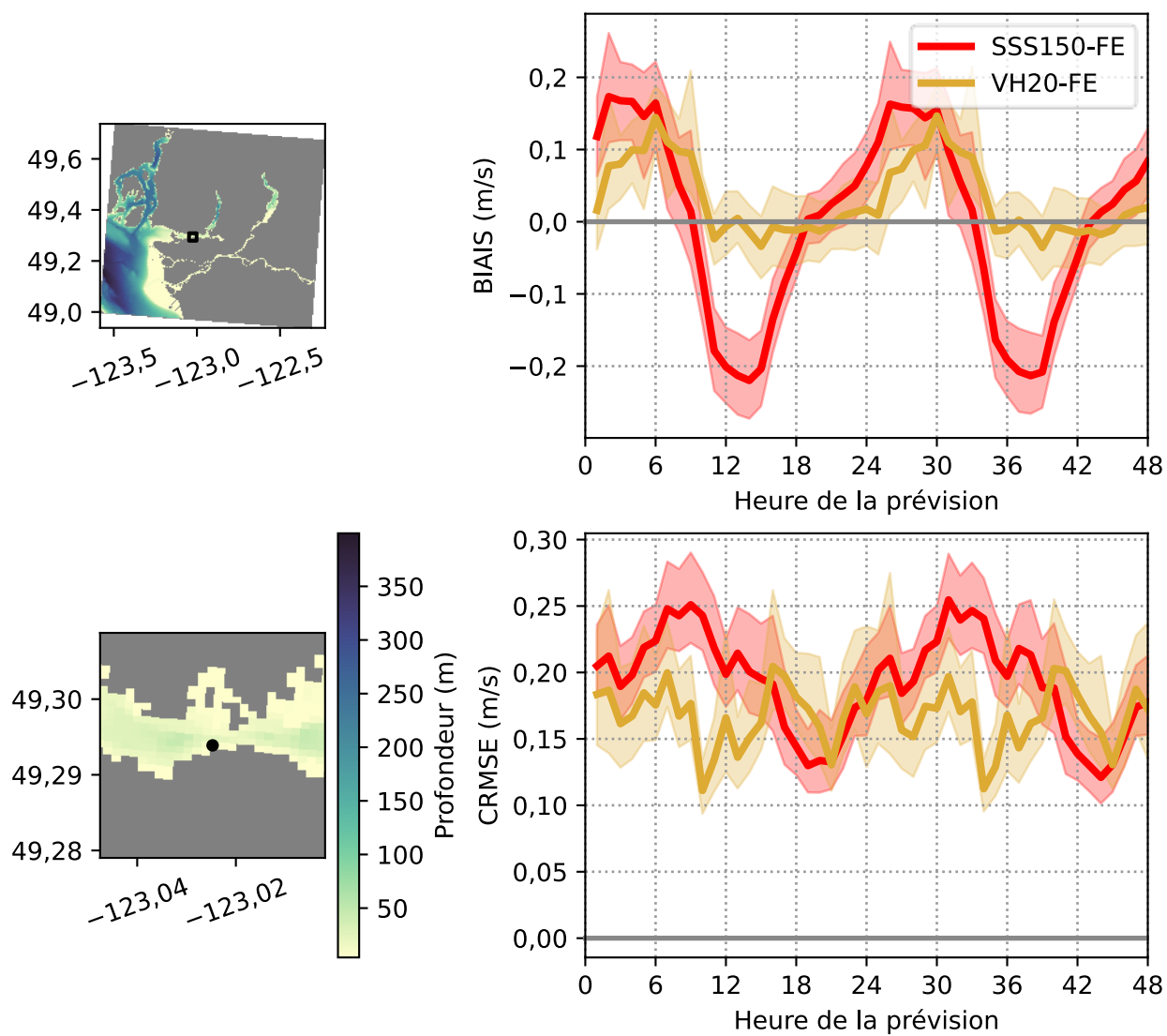


Figure 80. Évaluation des prévisions pour les courants le long du rivage à l'ADCP horizontal situé à Second Narrows dans le port de Vancouver.

BIAIS, CRMSE pour English Bay sur la période forecast_eval

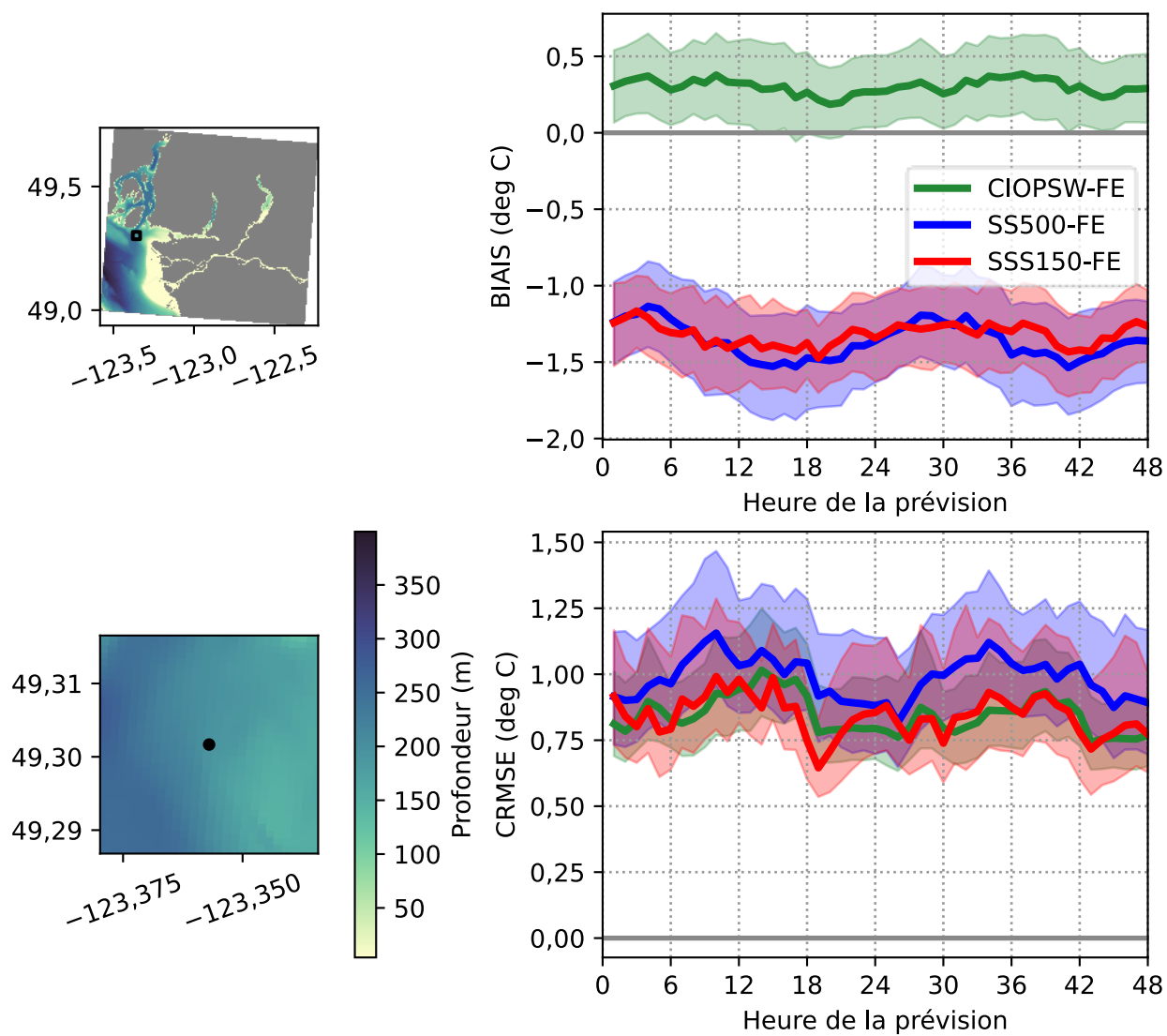


Figure 81. Évaluation des prévisions de la température de surface de la mer à l'entrée de la baie des Anglais (bouée 46304 d'ECCC).