



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 2026/006

Région de la capitale nationale

Évaluation des modèles portuaires de prévisions océaniques développés dans le cadre du Plan de Protection des Océans : Saint John, Nouveau-Brunswick

Stephanne Taylor¹, Rachel Horwitz¹, Michael Dunphy², Maxim Krassovski², Hauke Blanken², Simon St-Onge Drouin³, Adam Drozdowski¹

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

² Pêches et Océans Canada
Institut des sciences de la mer
9860, chemin West Saanich
Sidney (Colombie-Britannique) V8L 4B2

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 978-0-660-97523-8 N° cat. Fs70-5/2026-006F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Taylor, S., Horwitz, R., Dunphy, M., Krassovski, M., Blanken, H., St-Onge Drouin, S. et Drozdowski, A. 2026. Évaluation des modèles portuaires de prévisions océaniques développés dans le cadre du Plan de Protection des Océans : Saint John, Nouveau-Brunswick. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2026/006. xiii + 132 p.

Also available in English :

Taylor, S., Horwitz, R., Dunphy, M., Krassovski, M., Blanken, H., St-Onge Drouin, S., and Drozdowski, A. 2026. Assessment of Port Ocean Prediction System Developed Under Canada's Oceans Protection Plan: Saint John, New Brunswick. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2026/006. xii + 126 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	xiii
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 SAINT JOHN ET BAIE DE FUNDY	5
3.1 OCÉANOGRAPHIE RÉGIONALE	5
3.2 DOMAINE ET CONFIGURATION	6
3.3 INITIALISATION	8
3.4 CONDITIONS AUX LIMITES OUVERTES	8
3.4.1 Conditions aux limites ouvertes de la rivière et NS_TIDE	9
3.5 APPORT EN EAU DOUCE	10
3.6 MODÈLE DES GLACES	10
3.7 STABILITÉ DU SYSTÈME DE MODÉLISATION	11
4 PARAMÈTRES D'ÉVALUATION	12
4.1 SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES	12
4.1.1 Niveau d'eau	13
4.1.2 Vitesse de courant.....	14
4.1.3 Propriétés de l'eau	16
4.1.4 Dérive	17
4.2 PRÉVISIONS.....	18
5 RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES	19
5.1 NIVEAU D'EAU	19
5.1.1 Hauteur moyenne de la surface de la mer	20
5.1.2 Niveau d'eau de marée	20
5.1.3 Scores totaux	21
5.1.4 Niveaux d'eau résiduels	22
5.1.5 Niveau d'eau des ondes de tempête	23
5.2 COURANTS	23
5.2.1 ADCP horizontaux.....	24
5.2.2 Courantomètres.....	25
5.2.3 ADCP ancrés.....	26
5.2.4 Transects d'ADCP	28

5.3	PROPRIÉTÉS DE L'EAU	29
5.3.1	Température de surface de la mer	29
5.3.2	Sondes CTD ancrées	30
5.3.3	Profils CTD	31
5.3.4	Traversiers	32
5.4	DÉRIVE	32
6	RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES PRÉVISIONS	34
6.1	NIVEAU D'EAU RÉSIDUEL	34
6.2	ADCP HORIZONTAL	34
6.3	TEMPÉRATURE DE SURFACE DE LA MER	34
7	SOMMAIRE	35
8	CONSTATATIONS PRINCIPALES	35
9	REMERCIEMENTS	36
10	RÉFÉRENCES CITÉES	36
11	TABLEAUX	40
12	FIGURES	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Paramètres clés de configuration des modèles Fundy500 et SJ100.	40
Tableau 2 : Composantes de marée déduites utilisées dans le Fundy500. La première composante de chaque paire est déduite par rapport à la deuxième composante.....	41
Tableau 3 : Réglage des composantes de marée entre le Fundy500 et le SJ100.	41
Tableau 4 : Description des marégraphes utilisés dans les calculs NS_TIDE.....	42
Tableau 5 : Valeurs de conversion du niveau de référence vertical pour les marégraphes.	42
Tableau 6 : Paramètres de niveau d'eau de marée de M2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.	43
Tableau 7 : Paramètres de niveau d'eau de marée de N2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.	43
Tableau 8 : Paramètres de niveau d'eau de marée de S2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.	43
Tableau 9 : Paramètres de niveau d'eau de marée de K1 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.	44
Tableau 10 : Paramètres de niveau d'eau de marée de O1 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.	44
Tableau 11 : Paramètres de niveau d'eau de marée de L2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.	44
Tableau 12 : Paramètres de niveau d'eau de marée de NU2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.	45
Tableau 13 : Paramètres de niveau d'eau de marée de K2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.	45
Tableau 14 : Paramètres de niveau d'eau de marée de 2N2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.	45
Tableau 15 : Paramètres de niveau d'eau de marée de λ_2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.	46
Tableau 16 : Paramètres de marée de niveau d'eau P1 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.	46
Tableau 17 : Paramètres de niveau d'eau de marée de M2 pour Saint John pour chaque année de la période de simulation rétrospective. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.....	46
Tableau 18 : Scores pour le niveau d'eau total pour 2018.	47
Tableau 19 : Scores pour le niveau d'eau de marée pour 2018.	47
Tableau 20 : Scores pour le niveau d'eau résiduel pour 2018.....	47
Tableau 21 : Scores pour les ondes de tempête, en moyenne sur 11 tempêtes. Le nombre de tempêtes disponibles pour chaque station est indiqué entre parenthèses à côté du nom de la station.	47
Tableau 22 : Scores pour la température de surface de la mer pour toute la période de simulation rétrospective (2016-2021). À noter que les scores de Fundy FORCE peuvent ne pas	

être élevés, car il y a des pics de froid dus au fait que la température de l'air est mesurée plutôt que la température de l'eau (voir la figure 59). Les biais et la CRMSE sont exprimés en °C, γ^2 et Pearson sont sans unité.	48
Tableau 23 : Scores pour la température et la salinité enregistrés par les sondes CTD ancrées. Les biais et la CRMSE sont exprimés en °C et en psu pour la température et la salinité respectivement, γ^2 et Pearson sont sans unité.	48
Tableau 24 : Score moyen de l'indice de performance de Molcard pour chaque type et modèle de bouées dérivantes, pour 6 longueurs de simulation.	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de séquençement 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 oranges indiquent les moments où un fichier de redémarrage est généré et utilisé pour lancer l'étape suivante. La pseudo-analyse pour demain (Aujourd'hui+1) commencera avec le même fichier de redémarrage que celui utilisé pour démarrer la prévision 00Z d'aujourd'hui, et la séquence se répétera.	50
Figure 2 : Carte des domaines du Fundy500 (en haut) et du SJ100 (au milieu à gauche) avec indication des emplacements notables. Une vue agrandie d'une section du SJ100 autour du port de Saint John (au milieu à droite) montre les caractéristiques plus locales dans le port. L'image du bas est un schéma de la circulation générale dans la baie de Fundy. P.I. est l'abréviation de Partridge Island, et P.B.S. signifie Pilot Boarding Station.	51
Figure 3 : Schéma du niveau d'eau aux chutes réversibles (RF) illustrant les situations à marée basse (à gauche) et à marée haute (à droite). Le niveau d'eau est indiqué par une ligne bleue, et la flèche orange indique la direction du débit.	52
Figure 4 : Niveaux d'eau observés et prédits par NS_TIDE à Oak Point. L'image du coin supérieur gauche montre la base utilisée pour toutes les années, et les trois autres images montrent de courts fragments d'observations sur deux jours et des prévisions NS_TIDE à divers stades de la rivière.	52
Figure 5 : Emplacements des cyclones toutes les 6 heures de 2010 à 2021.	53
Figure 6 : Marégraphes (carrés bleus) et stations de composantes de marée (cercles verts) dans la baie de Fundy.	53
Figure 7 : HSM moyenne de la simulation rétrospective pour le Fundy500. Les unités sont en mètres.	54
Figure 8 : HSM moyenne de la simulation rétrospective pour le SJ100. L'échelle de couleurs est la même qu'à la Figure 7.	54
Figure 9 : Composantes de marée M2 pour les quatre marégraphes disponibles dans le domaine. À noter que ces données sont calculées sur 2017 plutôt que 2018, de sorte que Parker's Cove peut être inclus dans le graphique.	55
Figure 10 : Paramètre de la composante M2 pour les stations de composantes seulement autour de la baie de Fundy. Cutler (00004) se trouve sur la partie nord de la côte du Maine, et les stations sont réparties dans le sens horaire autour de la baie de Fundy. Les stations le long de la rivière Saint-Jean, ainsi que certaines dans la baie de Passamaquoddy et dans la partie supérieure de la baie de Fundy, sont omises. La partie supérieure de la baie de Fundy, qui comprend d'importantes zones intertidales, est ombragée.	56
Figure 11 : Statistiques clés pour l'évaluation des niveaux d'eau tracées annuellement de 2016 à 2022.	57
Figure 12 : Niveau d'eau résiduel (sans marée) pour Saint John en 2018. Veuillez noter que l'augmentation du niveau d'eau résiduel au début de l'année, bien que la marée montante d'avril soit plus évidente dans les courants que dans le niveau d'eau du port.	58
Figure 13 : Niveau d'eau résiduel (sans marée) tracé pour toute la série chronologique disponible pour Parker's Cove.	59
Figure 14 : Le niveau d'eau résiduel (sans marée) a été tracé pour toute la période de simulation rétrospective pour Eastport.	60

Figure 15 : Le niveau d'eau résiduel (sans marée) a été tracé pour toute la période de simulation rétrospective pour Cutler Farris.	61
Figure 16 : Spectres de fréquence pour le niveau d'eau total (en haut) et résiduel (en bas) à Saint John en 2016.	62
Figure 17 : Spectres de fréquence pour le niveau d'eau total (en haut) et résiduel (en bas) à Parker's Cove en 2016.	63
Figure 18 : Onde de tempête à Saint John pour 11 tempêtes sélectionnées.	64
Figure 19 : Vitesse en surface au 2020-06-01 00:00 UTC pour les trois modèles. Veuillez noter que les structures de courant sont plus nettes et précises pour le modèle SJ100 que pour les deux autres modèles. Les unités sont en m/s.	65
Figure 20 : Schéma montrant l'importance d'évaluer les données d'ADCP par rapport à la surface variable (ligne pointillée verte) plutôt que le point de référence $z=0$ (ligne pointillée rouge). La ligne pointillée rouge présente un écart régulier dans les données à marée basse, ce qui faussera toute évaluation.	66
Figure 21 : Emplacement des installations d'ADCP horizontal à l'embouchure de la rivière Saint-Jean.	66
Figure 22 : Ellipses de marée à l'ADCP horizontal du côté ouest pour le déploiement à la mi-2019.	67
Figure 23 : Ellipses de marée à l'ADCP horizontal du côté est pour le déploiement à la mi-2019.	67
Figure 24 : Série chronologique sur une semaine du courant le long du rivage (total et résiduel, respectivement panneau du haut et du milieu) modélisé et enregistré par l'ADCP horizontal ouest pour le déploiement à la mi-2019 et de l'erreur sur le courant total (panneau du bas).	68
Figure 25 : Série chronologique sur une semaine du courant le long du rivage (total et résiduel, respectivement panneau du haut et du milieu) modélisé et enregistré par l'ADCP horizontal ouest pour le déploiement en décembre 2021, et de l'erreur sur le courant total (panneau du bas).	69
Figure 26 : Série chronologique sur une semaine du courant le long du rivage (total et résiduel, respectivement panneau du haut et du milieu) modélisé et enregistré par l'ADCP horizontal est pour le déploiement à la mi-2019, et de l'erreur sur le courant total (panneau du bas).	70
Figure 27 : Série chronologique sur une semaine du courant le long du rivage (total et résiduel, respectivement panneau du haut et du milieu) modélisé et enregistré par l'ADCP horizontal est pour le déploiement à l'automne 2019, et de l'erreur sur le courant total (panneau du bas).	71
Figure 28 : Emplacement des observations d'ADCP. Les trois observations à l'extérieur du domaine de SJ100 se trouvent dans la baie Maces et sont présentes dans le Fundy500.	72
Figure 29 : Ellipses de marée de la M2 pour l'ADCP de l'arrière-port (IH).	73
Figure 30 : Ellipses de marée de la M2 pour l'ADCP de l'avant-port (OH).	74
Figure 31 : Ellipses de marée de la M2 pour l'ADCP de l'île Partridge (PI).	75
Figure 32 : Ellipses de marée de la M2 pour l'ADCP 598, à Canaport.	76
Figure 33 : Ellipses de marée de la M2 pour l'ADCP 607, au large de Cape Spencer.	77
Figure 34 : Ellipses de marée de la M2 pour l'ADCP 612, dans la baie Maces (à l'extérieur du domaine du SJ100).	78

Figure 35 : Ellipses de marée de la M2 à la bouée Smart. Cet ADCP est orienté vers le bas à partir de la surface de la mer (qui le soulève).....	79
Figure 36 : Toutes les ellipses de marée à l'ADCP de l'île Partridge à 3 mètres sous la surface. L'échelle relative des composantes S2, N2 et diurnes par rapport aux ellipses de la M2 est similaire pour tous les autres ADCP du domaine.	80
Figure 37 : Courants résiduels à l'avant-port à 3 mètres sous la surface.....	81
Figure 38 : Courants résiduels à l'ADCP 598 à 5 mètres sous la surface.	82
Figure 39 : Courants résiduels près de la surface avec ADCP orienté vers le bas sur la bouée Smart.	83
Figure 40 : Spectres rotatifs du courant résiduel et de son erreur pour l'ADCP 598 à 5 m sous la surface.	84
Figure 41 : Spectres rotatifs du courant résiduel et de son erreur pour l'ADCP orienté vers le bas sur la bouée Smart à 1,0 m sous la surface.....	85
Figure 42 : Spectres rotatifs du courant résiduel et de son erreur pour l'ADCP 591 à 4 m sous la surface.	86
Figure 43 : Spectres rotatifs du courant résiduel et de son erreur pour l'ADCP 593 (dans la baie Maces) à 3 m sous la surface.	87
Figure 44 : Série chronologique sur une semaine du courant total (observé et modélisé) pour l'ADCP 598 (à Canaport).	88
Figure 45 : Série chronologique sur une semaine du courant total (observé et modélisé) pour l'ADCP de la bouée Smart.	89
Figure 46 : Série chronologique sur une semaine du courant total (observé et modélisé) pour l'ADCP de l'île Partridge.	90
Figure 47 : Profils verticaux des vitesses (panneaux du haut) et des directions (panneaux du bas) des courants moyens et des corrélations vectorielles associées pour l'ADCP de l'île Partridge (PI).....	91
Figure 48 : Profils verticaux des vitesses (panneaux du haut) et des directions (panneaux du bas) des courants moyens et des corrélations vectorielles associées pour l'ADCP 598 (à Canaport).	92
Figure 49 : Profils verticaux des vitesses (panneaux du haut) et des directions (panneaux du bas) des courants moyens et des corrélations vectorielles associées pour l'ADCP 607 (au large de Cape Spencer).	93
Figure 50 : Profils verticaux des vitesses (panneaux du haut) et des directions (panneaux du bas) des courants moyens et des corrélations vectorielles associées pour l'ADCP de la bouée Smart.	94
Figure 51 : Profils verticaux des statistiques pour les mouillages près de Saint John en 2016. La ligne du haut indique le biais moyen pour les courants u (continue) et v (pointillée). Les rangées du milieu et du bas montrent la CRMSE et le γ^2 pour le courant total (continue), de marée (tiretée) et résiduel (pointillée).	95
Figure 52 : Profils verticaux des statistiques pour les mouillages dans le port en 2019. La ligne du haut indique le biais moyen pour les courants u (continue) et v (pointillée). Les rangées du	

milieu et du bas montrent la CRMSE et le γ^2 pour le courant total (continue), de marée (tiretée) et résiduel (pointillée).	96
Figure 53 : Profils verticaux des statistiques pour un ensemble de mouillages le long de la côte en 2017. La ligne du haut indique le biais moyen pour les courants u (continue) et v (pointillée). Les rangées du milieu et du bas montrent la CRMSE et le γ^2 pour le courant total (continue), de marée (tiretée) et résiduel (pointillée).	97
Figure 54 : Transect d'ADCP traversant l'embouchure de la rivière Saint-Jean (panneaux du haut). Les observations (Transect4) du 2019-04-26 sont présentées sur les 2 panneaux du milieu et les résultats du modèle SJ100 sur les deux panneaux du bas. Le courant V est perpendiculaire au transect (c.-à-d. le long du chenal), et le courant U est le long du transect (c.-à-d. entre les chenaux). Noter la variation du courant le long du transect (entre les chenaux). Les autres modèles ne représentent pas adéquatement le transect et ne sont donc pas présentés. Un débit positif est considéré sortant de la rivière.	98
Figure 55 : Transect d'ADCP de l'embouchure de la rivière jusqu'au bout de l'île Partridge, grossièrement après le chenal dragué principal. Du haut vers le bas, sont présentés les observations (Transect5) du 2019-04-26 et les résultats pour les modèles SPOG-E (CIOPS-E), le Fundy 500 et le SJ100.	99
Figure 56 : Transect d'ADCP près de l'île Partridge. Du haut vers le bas, sont présentés les observations (Transect7) du 2019-04-26 et les résultats pour les modèles SPCOG-E (CIOPS-E), Fundy500 et SJ100.	100
Figure 57 : Biais par rapport à la CRMSE pour les sept transects des ADCP pour les trois modèles : SPCOG-E (CIOPSE_BoF), Fundy500 et SJ100.	101
Figure 58 : Emplacement des observations de la température de surface de la mer (TSM).	102
Figure 59 : Température de surface de la mer (TSM) à la bouée SmartAtlantic (SA) à l'extérieur du port de Saint John. La série chronologique couvre toute la période de la simulation rétrospective.	103
Figure 60 : Température de surface de la mer (TSM) à la bouée 44490, entre Grand Manan et la péninsule de Digby.....	104
Figure 61 : Température de surface de la mer (TSM) à la bouée Fundy FORCE, près de Parrsboro (N.-É.). Les pointes de température froide peuvent être dues au fait que suivant les mouvements de la bouée la sonde peut basculer dans l'air, plutôt que correspondre à une mesure précise de la TSM.	105
Figure 62 : Température de surface de la mer (TSM) à la station Eastport (Maine).....	106
Figure 63 : Température de surface de la mer (TSM) à la station Cutler Farris, Maine.....	107
Figure 64 : Emplacements des sondes CTD ancrées (MCTD).....	108
Figure 65 : Température et salinité près du fond marin des promontoires est de la Musquash. La salinité observée diminue au milieu de la série probablement en raison d'une impulsion d'eau douce de la rivière Musquash.	109
Figure 66 : Température et salinité près du fond marin des promontoires est de la Musquash.	110
Figure 67 : Température et salinité près du fond marin des promontoires ouest de la Musquash.	111

Figure 68 : Température et salinité près de la surface juste en amont des chutes réversibles.	112
Figure 69 : Température et salinité en surface dans la zone intertidale de la baie de Courtenay. Cette zone n'est pas bien représentée dans le modèle, mais elle est incluse pour évaluer dans quelle mesure les modèles saisissent bien le signal de basse fréquence.	113
Figure 70 : Température et salinité en profondeur au large de Grand Manan. Aucune donnée sur la salinité observée n'était disponible, mais elle est incluse afin de pouvoir comparer les caractéristiques des séries chronologiques du SPCOG-E et du Fundy500.	114
Figure 71 : Régions du domaine du modèle portuaire utilisées pour les statistiques agrégées de CTD. Les points rouges indiquent les profils CTD utilisés, couvrant toute la durée de la simulation rétrospective.	115
Figure 72 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour les 3 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF), Fundy500 et SJ100, dans la région de Saint John (SJ) en 2016.	116
Figure 73 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour les 3 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF), Fundy500 et SJ100, dans la région de Saint John (SJ) en 2019. La majeure partie des profils de 2019 ont été établis pendant la crue et l'inondation printanières, et les modèles présentent un biais salé aux faibles profondeurs proches de la surface qui étaient exceptionnellement douce.	117
Figure 74 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour 3 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF), Fundy500 et SJ100, dans la région de Saint John (SJ) pour l'ensemble de la simulation rétrospective.	118
Figure 75 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour 3 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF), Fundy500 et SJ100, dans la partie centrale de la baie de Fundy (MFundy).	119
Figure 76 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour 2 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF) et Fundy500, dans la partie inférieure de la baie de Fundy (LFundy).	120
Figure 77 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour 2 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF) et Fundy500, dans la région de la baie de Passamaquoddy (Pmqdy).	121
Figure 78 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour 2 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF) et Fundy500, dans la partie supérieure de la baie de Fundy (UFundy).	122
Figure 79 : Carte de toutes les trajectoires de dérive utilisées pour l'évaluation de SJ100 et de Fundy500. Toutes les trajectoires sont rognées selon les limites de domaine du modèle SJ100.	123
Figure 80 : Indice moyen de performance de Molcard (haut) et distance moyenne de séparation (bas) pour les bouées dérivantes Davis pendant 25 heures après le déploiement simulé des bouées. La couleur indique le modèle hydrodynamique. La zone ombrée indique un écart-type autour de la moyenne.	124
Figure 81 : Indice de performance de Molcard moyen (haut) et distance moyenne de séparation (bas) pour les bouées dérivantes Long de la SBSA pendant 25 heures après le déploiement simulé des bouées. La couleur indique le modèle hydrodynamique. La zone ombrée indique un écart-type autour de la moyenne.	125

Figure 82 : Indice de performance de Molcard moyen (haut) et distance moyenne de séparation (bas) pour les bouées dérivantes Disk de la SBSA pendant 25 heures après le déploiement simulé des bouées. La couleur indique le modèle hydrodynamique. La zone ombrée indique un écart-type autour de la moyenne.	126
Figure 83 : Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel en fonction de l'échéance de la prévision de 00Z à Cutler Farris pour l'ensemble des prévisions de 48-h réalisées sur la période de 2 mois (Déc.-Jan.). Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.	127
Figure 84 : Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel en fonction de l'échéance de la prévision de 00Z à Eastport pour l'ensemble des prévisions de 48-h réalisées sur la période de 2 mois (Déc.-Jan.). Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.	128
Figure 85 : Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel en fonction de l'échéance de la prévision de 00Z à Saint John pour l'ensemble des prévisions de 48-h réalisées sur la période de 2 mois (Déc.-Jan.). Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.	129
Figure 86 : Biais et CRMSE de la température de surface de la mer (TSM) en fonction de l'échéance de la prévision de 00Z à la bouée 44490 pour l'ensemble des prévisions de 48-h réalisées sur la période de 2 mois (Déc.-Jan.). Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.	130
Figure 87 : Biais et CRMSE de la température de surface de la mer (TSM) en fonction de l'échéance de la prévision de 00Z à la bouée Smart pour l'ensemble des prévisions de 48-h réalisées sur la période de 2 mois (Déc.-Jan.). Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.	131
Figure 88 : Biais et CRMSE de la température de surface de la mer (TSM) en fonction de l'échéance de la prévision de 00Z à la bouée FORCE pour l'ensemble des prévisions de 48-h réalisées sur la période de 2 mois (Déc.-Jan.). Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.	132

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 (MPO 2016). À cette fin, la sous-initiative d'océanographie 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).

L'évaluation du modèle fait partie intégrante de cette élaboration et, à cet égard, les modèles portuaires sont évalués en fonction des données d'observation disponibles et du 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. De plus, la performance du modèle pendant les tempêtes majeures a été examinée.

Les détails de la configuration et de l'évaluation du système de prévisions océaniques portuaires de Saint John au Nouveau-Brunswick (SPOP-SJ) sont présentés. Le système imbriqué à deux niveaux s'avère fournir des prévisions améliorées pour les niveaux d'eau et les températures de surface de la mer (TSM) par rapport au système SPCOG-E existant. La simulation rétrospective du système SPOP-SJ est également plus habile que celle du système SPCOG-E à reproduire les observations, dont les niveaux d'eau et les propriétés de température et de salinité de la mer, et surtout les courants.

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 des 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 (« systèmes de prévisions océaniques portuaires », ou SPOP) développé pour le port de Saint John au Nouveau Brunswick et son approche. La conception commune à tous les modèles portuaires est présentée en section 2, tandis que la section 3 décrit les spécificités du modèle du port de Saint John en lien avec les particularités océanographiques régionales. Après avoir décrit les paramètres d'évaluation utilisés pour évaluer tous les modèles 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 Saint John. Les performances du SPOP du port de Saint John sont résumées en section 7, et les constatations principales sont listées en section 8.

2 CONCEPTION DES MODÈLES PORTUAIRES

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

2.1 SÉLECTION DU MODÈLE

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

and Chassé 2000) et le golfe du Saint-Laurent (GSL) (Saucier 2003). Ces travaux ont ensuite été suivis par la mise en œuvre par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) d'un modèle équivalent pour le GSL basé sur NEMO, le système régional de prévision marine (SRPM) du GSL. Ce système SRPM a été opérationnel de 2011 à 2021, mais il n'a pas été envisagé de reprendre aucun de ces anciens modèles dans le cadre du PPO. Les prototypes FVCOM du système de sécurité de classe mondiale pour les navires-citernes utilisaient des maillages de modèle non structurés pour résoudre les régions côtières à une échelle jusqu'à quelques dizaines de mètres ou moins, la résolution diminuant graduellement jusqu'à quelques kilomètres aux limites ouvertes pour correspondre à la grille du modèle parent. Le modèle FVCOM n'a pas d'antécédents de déploiement opérationnel au Canada, tandis que le modèle NEMO 3.6 ([Nucleus of European Modelling of the Ocean](#)) est utilisé opérationnellement par le Réseau opérationnel canadien de systèmes couplés de prévision environnementale (CONCEPTS). Au début du PPO, un exercice de comparaison entre les modèles FVCOM 4.1 et NEMO 3.6 (Nudds *et al.* 2020) a guidé le processus décisionnel pour sélectionner quel code de base utiliser pour les modèles des systèmes de prévisions océaniques portuaires. Des modèles océaniques ont été construits à partir des deux codes pour la baie de Fundy et le port de Saint John (Paquin *et al.* 2020), région choisie en raison de l'amplitude des marées et de la complexité de la circulation océanique. Étant donné que dans ce contexte la lacune la plus importante du modèle NEMO 3.6 était l'absence de la représentation du processus périodique d'inondation et d'assèchement du littoral, si le modèle NEMO 3.6 pouvait donner des résultats satisfaisants dans la baie de Fundy, il pourrait alors probablement être utilisé dans les autres régions. La correspondance des résultats des deux modèles avec les observations, ainsi que leur efficacité de calcul, leur stabilité et leur solidité respectives ont été évaluées. Tous deux se sont révélés compétents pour reproduire les données observées; ni l'un ni l'autre n'était significativement supérieur et le choix du modèle à utiliser à l'avenir reposait davantage sur les autres facteurs.

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

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

2.2 STRATÉGIE DE RÉDUCTION D'ÉCHELLE

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

autrement indépendamment les uns des autres. Cette stratégie d'imbrication unidirectionnelle permet également de corriger les erreurs systématiques aux frontières ouvertes.

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

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

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

2.3 SÉQUENCEMENT DES SIMULATIONS

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

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

3.1 OCÉANOGRAPHIE RÉGIONALE

La baie de Fundy est une baie à forte marée qui se trouve entre le Nouveau-Brunswick et la Nouvelle-Écosse et qui est reliée à l'extrémité nord du golfe du Maine. Du fait de sa géométrie, la fréquence de résonance du système du golfe du Maine et de la baie de Fundy est proche de celle des marées M2 (Garrett 1972), de sorte que les marées dans la région sont importantes. Dans la partie supérieure de la baie de Fundy, l'amplitude des marées atteint 16 m, ce qui crée des zones intertidales importantes. Saint John, au Nouveau-Brunswick, se trouve à peu près au milieu de la rive nord de la baie de Fundy, et le marnage dans le port est d'environ 8 m. La ville de Saint John borde la rivière Saint-Jean, qui est le plus grand apport d'eau douce dans la baie de Fundy. Le panache de la rivière alimente une grande partie de la circulation près de la surface dans le port, et à mesure qu'il se propage le long de la côte et se dissipe, il fournit un flux important d'eau douce vers le golfe du Maine.

La circulation résiduelle à l'entrée de la baie est principalement alimentée par le courant de la Nouvelle-Écosse qui se propage le long du rivage sud de la Nouvelle-Écosse et tourne dans le sens des aiguilles d'une montre autour du cap de Sable; des apports plus faibles provenant du

flux qui se propage dans le chenal Nord-Est et de la circulation dans le golfe du Maine sont également présents (Aretxabaleta *et al.* 2008; 2009). Le débit résiduel dans la baie se trouve principalement du côté est de l'entrée, et le flux sortant principal de la baie se trouve à l'est de l'île Grand Manan; un tourbillon dans la partie inférieure de la baie de Fundy est présent pendant la majeure partie de l'année. Dans le chenal relativement étroit entre Grand Manan et la partie continentale du Nouveau-Brunswick le flux d'eau est principalement sortant, qui constitue une source d'eau douce pour le courant côtier dans le golfe du Maine.

Les emplacements importants autour de la baie sont indiqués dans les rangées supérieure et centrale de la figure 2, et les schémas généraux de circulation près de la surface décrits dans le paragraphe précédent sont indiqués dans la rangée du bas. Les rangées du haut et du bas montrent la bathymétrie du domaine à haute résolution (500 m) de la baie de Fundy (Fundy500), et la rangée du milieu montre la bathymétrie du domaine à très haute résolution (100 m) centré sur le port de Saint John (SJ100) (totalité du domaine à gauche, et vue agrandie autour du port de Saint John à droite).

La ville de Saint John se trouve le long de la rivière Saint-Jean, un vaste réseau hydrographique qui traverse le centre du Nouveau-Brunswick. Les deux configurations de domaine comprennent la rivière Saint-Jean vers l'intérieur des terres, presque jusqu'à Evandale, à environ 40 km de la baie de Fundy. La rivière a généralement de 5 à 20 m de profondeur, les régions moins profondes étant plus prévalentes à l'intérieur des terres. La baie Kennebecasis est une ramification beaucoup plus profonde de la rivière, qui atteint près de 75 m de profondeur à certains endroits. Un faible signal de marée se propage jusqu'à l'étendue de la rivière comprise dans le domaine, bien que la rivière soit imposée comme une limite ouverte d'eau douce et qu'aucun sel ne soit exporté ou importé du système par la limite ouverte de la rivière. Le signal de marée dans les parties supérieures du domaine (station 01AP003 près d'Oak Point) est fortement modulé par le seuil aux chutes réversibles, qui agit comme un régulateur modulant l'interaction entre la rivière et l'eau de l'océan. À marée basse, la rivière s'écoule de la terre jusqu'à l'océan, mais à marée haute, l'amplitude des marées en aval du seuil est suffisamment grande pour que, à moins que le niveau de la rivière soit élevé, le niveau d'eau en provenance du port dépasse le signal de niveau d'eau de la rivière, et la rivière s'écoule vers l'intérieur des terres (voir la figure 3). Les composantes de marée montrent une forte baisse d'amplitude et un décalage de phase entre le port et juste en amont des chutes réversibles (marégraphe 01AP005), bien que ces changements ne se produisent peut-être pas tous uniquement au seuil (Horwitz, *et al.* 2021). Au fur et à mesure que le signal de marée se déplace à partir du marégraphe du port (CHS 00065) et du marégraphe des chutes réversibles du côté amont du seuil (01AP005), la M2 diminue de près de 3 m et est décalée d'environ 30°. Un double coin salé se forme en raison des chutes réversibles et de la présence importante de sel à leur proximité, ce qui signifie que la limite de la rivière (eau douce) doit être placée plus en amont. Il n'y a pas de données sur la salinité disponibles aux chutes réversibles, et en raison d'un biais systématique dû au changement de densité causé par la présence périodique de sel, elles ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de l'eau.

3.2 DOMAINE ET CONFIGURATION

Le système du port de Saint John (SPOP-SJ) se compose de deux domaines unidirectionnels à échelle réduite à partir du SPCOG-E, et il s'agit d'une version mise à jour du système décrit dans (Paquin *et al.* 2020). Le domaine de la baie de Fundy (Fundy500) raffine la grille du SPCOG-E par un facteur de 5, ce qui donne une résolution horizontale nominale d'environ 500 m. Plus précisément, la résolution zonale varie de 430 à 440 m, et la résolution méridionale varie de 395 à 415 m. Le domaine du port de Saint John (SJ100) raffine le Fundy500 par un facteur de 5, et a donc une résolution nominale de 100 m, mais plus précisément une résolution

d'environ 85 m. Comme les grilles sont simplement raffinées et ne sont pas étirées ou tournées, le Fundy500 et le SJ100 sont des grilles ORCA à haute résolution; la bathymétrie pour les deux domaines est indiquée à la figure 2. Le Fundy500 couvre toute la baie de Fundy et se termine à peu près à une ligne de latitude s'étendant de l'extrémité de la péninsule de Digby jusqu'à la côte du Maine; la baie Saint Mary's n'est pas comprise, pas plus qu'aucun des chenaux reliant la baie Saint Mary's à la baie de Fundy. Le SJ100 possède un domaine plus petit, s'étendant de la rivière Lepreau à St. Martins et atteignant environ 40 km vers le milieu de la baie.

La modélisation du réseau hydrographique est essentielle pour saisir les patrons de circulation près de la surface dans le port de Saint John. Le Fundy500 et le SJ100 comprennent tous deux le réseau hydrographique de la rivière Saint-Jean, qui s'étend de Oak Point en amont jusqu'au port, et la baie Kennebecasis est comprise. Le flux d'eau sortant de la rivière est fortement modulé par le seuil des chutes réversibles, qui se trouve à environ 5 km en amont de la tête du port.

Le Fundy500 et le SJ100 partagent une grille verticale, qui varie de $dz = 1$ m à la surface à $dz = \sim 18$ m à une profondeur d'environ 200 m. Le Fundy500 a 40 niveaux verticaux, et le SJ100 en a 34. La bathymétrie utilisée pour le Fundy500 et le SJ100 provient du système de référence CGVD28 et a été fournie pour ce projet par le Service hydrographique du Canada (SHC). Les deux domaines utilisent les mêmes grilles de données que celles utilisées dans (Paquin, et al. 2020), avec des ajustements très mineurs apportés aux régions aux limites ouvertes pour permettre une propagation plus fluide du signal à partir du modèle d'origine. Les données côtières proviennent de la solution canadienne de séparation verticale continue du système de référence hydrographique (communément appelée CANEAST2015v1CL) (Robin, et al. 2016), et ont été fournies par le SHC. Étant donné que le NEMO3.6 ne s'applique pas aux zones intertidales, une profondeur d'eau minimale de 7 m est établie dans la majeure partie du Fundy500 et dans l'ensemble du SJ100 (y compris dans le réseau hydrographique de la rivière Saint-Jean); une valeur de 9 m est utilisée dans la partie supérieure de la baie de Fundy pour tenir compte de la grande amplitude des marées. Malheureusement, cela aplatit certaines caractéristiques topographiques près de la côte et, par conséquent, il se peut que le modèle ne saisisse pas entièrement la circulation qui est canalisée ou limitée par des caractéristiques topographiques peu profondes. Afin de conserver les propriétés de résonance de la baie, les étendues du bassin Minas et de la baie de Chignecto sont réduites afin que le volume total d'eau dans la partie supérieure de la baie de Fundy demeure constant, que la zone intertidale soit incluse ou non dans le modèle numérique. Nous réduisons également l'étendue du port de Musquash, bien que cela n'ait pas d'effet important sur la résonance des marées du système. L'archipel des îles et des chenaux de la baie de Passamaquoddy est également simplifié pour le Fundy500 en raison d'un manque de résolution. Étant donné que la baie est ouverte et que le littoral ne comporte pas de fjords ou de bras de mer étroits, la résolution du Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD) de 2,5 km est suffisamment fine pour résoudre les caractéristiques atmosphériques près du rivage dans la région.

Les paramètres de modèle importants sont fournis pour le NEMO par le biais d'un fichier de liste de noms et sont répertoriés dans le tableau 1. Le modèle d'advection est une diminution de la variation totale avec des sous-étapes verticales pour la stabilité, et la fermeture de turbulence est un modèle d'échelle de longueur généralisée (GLS). La viscosité horizontale est calculée par un laplacien de viscosité avec un modèle Smagorinsky. Le frottement non linéaire sur le fond est utilisé avec une formulation quadratique. De petites parcelles de traînée de fond accrue sont imposées autour des chutes réversibles pour le Fundy500 et le SJ100, et dans le passage Minas pour le Fundy500; cela aide à maintenir la stabilité du modèle. Des conditions de limite latérale de glissement partiel sont utilisées, et le modèle conserve à la fois l'énergie et l'entropie.

3.3 INITIALISATION

Les conditions initiales sont générées à partir du SPCOG-E pour le Fundy500 et du Fundy500 pour le SJ100. Le SPCOG-E n'a pas de réseau hydrographique, et les valeurs initiales du Fundy500 dans la rivière sont grossièrement interpolées à partir de la baie ouverte. Le Fundy500 est initialisé le 2016-02-21 et, pour s'assurer que la rivière soit suffisamment revenue à ses conditions initiales, elle doit s'écouler pendant plus d'un mois avant que le SJ100 ne soit initialisé le 2016-04-01. Le SJ100 peut être ajusté pendant 15 jours, et la période d'analyse du Fundy500 et du SJ100 commence le 2016-04-15. Les modèles Fundy500 et SJ100 fonctionnent ensuite jusqu'au 1^{er} février 2022, et les prévisions sont effectuées quotidiennement du 2021-12-01 au 2022-01-31.

3.4 CONDITIONS AUX LIMITES OUVERTES

Les formulations de conditions aux limites ouvertes sont de type Flather pour la hauteur de la surface de la mer (HSM) et un schéma de relaxation de flux pour les variables tridimensionnelles, température (T), salinité (S) et vitesses de courant (U et V). Une combinaison de données horaires provenant des composantes du SPCOG-E et de WebTide est utilisée pour forcer le Fundy500. Le signal de la marée est retiré des données du SPCOG-E sont au moyen d'un ensemble de composantes (statiques) qui sont calculées sur plusieurs années, de sorte que le plus grand nombre possible de composantes sont comprises, mais ni les composantes annuelles (SA) et semi-annuelles (SSA) ne sont comprises. Dix composantes Webtide provenant du maillage Scotia-Fundy-Maine (M2, N2, S2, O1, K1, L2, K2, 2N2, NU2, M4) sont extraites à la limite du Fundy500 et appliquées sans aucun réglage (Dupont *et al.* 2005). Quatre composantes supplémentaires (P1, λ_2 , T2, Q1) sont calculées par inférence à partir des composantes K1, L2, S2 et O1 respectivement, et sont également appliquées. Les données des marégraphes de Yarmouth et de Cutler-Farris sont utilisées pour calculer le rapport entre les amplitudes des composantes déduites et de référence et la différence de leurs phases, et les composantes déduites sont calculées en mettant à l'échelle les composantes sources par la moyenne des relations aux deux marégraphes (voir le tableau 2). Le domaine est suffisamment petit pour que les relations entre les paires de composantes aux deux marégraphes ne soient pas radicalement différentes. Les quatre composantes déduites sont petites (amplitude < 5 cm), mais l'inclusion de celles-ci réduit l'erreur de profondeur d'eau totale à Saint John. À noter que l'onde supérieure de marée M4 est incluse dans le forçage des limites ouvertes même si elle est principalement générée localement; elle est disponible dans l'ensemble de données WebTide et le SPCOG-E l'inclut dans son forçage des limites ouvertes. La M6 et les autres ondes supérieures ne sont pas explicitement incluses, et toutes les autres composantes qui auraient pu être déduites et appliquées ont des amplitudes observées inférieures à 1 cm.

Le SJ100 est forcé avec les données horaires du Fundy500. Avant la simulation du SJ100, les composantes de marée de deux années du Fundy500 (d'avril 2016 à avril 2018) sont calculées avec T_TIDE aux limites ouvertes du SJ100 pour être utilisées à la fois pour le retrait et la réimposition du signal de marée. (Une période de deux ans permet d'inclure la composante T2.) Le signal de marée est retiré des données du Fundy500 par ces composantes, puis les mêmes 14 composantes sont réimposées. Cela est utile pour deux raisons : a) imposer les marées en tant que composantes permet au forçage des marées de varier en douceur et évite la coupure du signal qui résulte du forçage à des moments discrets, ce qui, autrement, tronquerait le signal des marées d'environ 30 cm (~10 %) pour les données horaires, et b) l'utilisation de composantes isolées permet de régler les composantes avec soin et individuellement, améliorant ainsi les résultats dans la zone d'intérêt. La M2 est réglée d'abord en ajustant finement le paramètre de frottement sur le fond, et aucun ajustement n'est effectué dans les

fichiers de composantes statiques. Les 13 autres composantes ont des ajustements d'amplitude ou de phase appliqués, qui sont détaillés dans le tableau 3. Les réglages sont généralement moindres, bien que ceux des composantes déduites soient proportionnellement plus importants que ceux des composantes fournies par WebTide, et les phases nécessitaient généralement plus de réglage que d'amplitudes. Le réglage des marées s'est fait de façon itérative, avec une première modélisation effectuée, puis les marées ont été calculées, et les fichiers de composantes ont été ajustés en fonction de l'écart entre les marées observées et celles modélisées. Cela a été répété jusqu'à ce que les ajustements n'aient pas d'incidence importante sur les résultats, et l'ajustement net est présenté ici. Les composantes les plus importantes ont d'abord été réglées, ensuite les plus petites, puis les composantes déduites.

Il y a une non-concordance dans les niveaux de référence verticaux entre le système du modèle portuaire et le système d'origine (SPCOG-E), alors nous ajustons les conditions des limites latérales entrantes de Fundy500. Le domaine de SPCOG-E dépasse la définition de la surface du CGVD28, et le décalage local entre le niveau de référence du SPCOG-E et le CGVD28 n'est pas connu a priori. Pour déterminer la différence entre la surface du CGVD28 et la surface de référence du SPCOG-E, nous utilisons de longues séries chronologiques de données du marégraphe observées à trois stations de mesure du niveau d'eau dans la région (Saint John 00065, Yarmouth 00365 et Halifax 00491). Le niveau moyen de la mer observé à chaque station est calculé, converti du zéro des cartes au CGVD28 à l'aide des décalages connus fournis par le SHC, puis comparé au niveau moyen de la mer modélisé par le SPCOG-E aux trois stations. La différence entre le niveau de la mer observé et le SPCOG-E est semblable entre les trois stations : 0,687 m, 0,681 m et 0,693 m pour Saint John, Yarmouth et Halifax, respectivement (Paquin, et al. 2020). Pour assurer la conformité du système, la HSM entrante du SPCOG-E est augmentée de 0,69 m. Dans Paquin *et al.* 2020, les conditions aux limites ouvertes océaniques entrantes n'ont pas été ajustées, mais plutôt le niveau de l'eau de la rivière (qui est indiqué dans le système de référence CGVD28) a été réduit de 0,69 m. Cela a été fait parce qu'on craignait que l'ajustement des conditions aux limites ouvertes océaniques perturbe la dynamique des marées du système, mais nous avons constaté depuis que ce n'est pas le cas. L'utilisation d'un système de référence vertical uniforme pour toutes les composantes du système nous permet d'évaluer la profondeur totale de l'eau du modèle, plutôt que seulement les composantes de marée et une composante réduite sans marée; cette évaluation est essentielle à la navigation électronique.

3.4.1 Conditions aux limites ouvertes de la rivière et NS_TIDE

La limite de la rivière est appliquée juste en amont d'Oak Point à l'aide des données sur les niveaux d'eau du marégraphe d'Oak Point (01AP003), d'une température climatologique et d'une salinité nulle. La limite est imposée en tant que niveau d'eau, de sorte que le courant peut évoluer librement en fonction de la pente de la surface. Le flux de la rivière vers le port est ensuite contrôlé par la largeur du chenal de la rivière; un chenal plus large permet un flux plus important de la rivière, avec des courants plus rapides en raison d'une pente plus prononcée à la surface. Un capteur de température est maintenant disponible à Oak Point, mais il a été installé en 2021. Par conséquent, par souci d'uniformité, la température climatologique de la rivière a été utilisée pour toute la simulation rétrospective.

Les conditions aux limites ouvertes de la rivière sont mises en œuvre à l'aide des données du marégraphe 01AP003 afin de saisir la pleine variabilité de la rivière physique. Cette station se trouve à l'intérieur du port, mais il y a toujours un signal de marée détectable dans les données, superposé au système fluvial à plus longue échelle; c.-à-d. que le signal du niveau d'eau d'Oak Point est un signal de marée fluviale mixte. De plus, l'utilisation des données des marégraphes exige (a) une solution de rechange pour corriger les lacunes des données

manquantes et (b) une procédure de prévision. Ces deux exigences sont remplies en utilisant NS_TIDE, une extension de T_TIDE conçue pour être utilisée dans les rivières où les marées ne sont pas stationnaires (Matte et al. 2013). NS_TIDE utilise une station entièrement fluviale en amont et une station entièrement marégraphique en aval (ainsi que tout autre prédicteur pertinent localement) pour décomposer le signal à une station intermédiaire qui a un signal maritime fluvial mixte. Cette décomposition est effectuée en générant d'abord une base relative aux signaux fluviaux, de marée et mixtes sur une longue série chronologique. Il faut veiller à ne pas inclure d'inondations lors de la création de la base, car la relation entre la synchronisation des signaux à chaque marégraphe est rompue lorsque l'eau peut s'écouler sur les berges et dans la rivière. Nous utilisons des séries chronologiques d'un an allant de juillet 2019 à juillet 2020 pour générer les relations décalées entre les marégraphes; l'inondation historique du printemps 2019 avait pris fin à la fin de mai. En plus du marégraphe fluvial en amont (Fredericton, 01AK003) et du marégraphe en aval (marégraphe 00065 du SHC), nous incluons un troisième signal du marégraphe aux chutes réversibles (01AP005), même s'il s'agit d'un signal très mixte : sans cela, NS_TIDE ne dispose d'aucune information sur la façon dont le signal de marée varie au niveau du seuil. L'omission de ce marégraphe dans les calculs double presque l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre la prédiction et le signal observé à Oak Point, bien que cela équivaut à passer d'une RMSE d'environ 5 cm à une RMSE d'environ 10 cm. Les marégraphes, leurs décalages et leurs données de repli sont tous présentés dans le tableau 4. Puisque les données en temps réel ne sont pas soumises à un contrôle manuel de la qualité, toutes les données des marégraphes sont traitées au moyen d'un filtre de seuil afin d'éliminer les données erronées, et les écarts dans chaque série de marégraphes sont corrigés à l'aide de la méthode indiquée dans le tableau 4.

Une fois cette base générée, une prévision du niveau d'eau à Oak Point peut être calculée en fournissant des séries chronologiques de données en amont et en aval, décalées de façon appropriée. Il n'est pas nécessaire que ces données soient limitées à la même période utilisée pour générer la base, car la relation entre les marégraphes ne change pas d'une année à l'autre. La base peut être utilisée pour fournir des prévisions dans des conditions propices aux inondations, bien que l'erreur soit généralement légèrement plus importante qu'une série chronologique ordinaire de même durée; la création de la base est plus sensible aux conditions propices aux inondations que l'utilisation de la base. La figure 4 montre la base générée, les données des marégraphes observées, ainsi que des prévisions sur deux jours dans les conditions de crue printanière, de basse mer et de crue automnale. La RMSE entre les prévisions et les observations est généralement inférieure à 10 cm, atteignant seulement 10 cm avec de courtes prédictions à des niveaux d'eau de la rivière très élevés.

3.5 APPORT EN EAU DOUCE

La seule entrée d'eau douce dans le système est la rivière Saint-Jean, qui est mise en œuvre par une limite ouverte du niveau d'eau à Oak Point, comme il est décrit à la section 3.4.1. La rivière Saint-Jean est la plus importante source d'eau douce qui se déverse dans la baie de Fundy, et aucun autre ruissellement d'eau douce n'est utilisé dans le modèle. L'élaboration future d'un modèle peut envisager l'ajout d'apports climatologiques en eau douce provenant d'autres cours d'eau qui pourraient être importants pour les modèles de circulation locaux ou les applications près du rivage. Il peut s'agir des rivières Musquash, Lepreau, Annapolis, Ste-Croix, Shubenacadie, Salmon et Petitcodiac.

3.6 MODÈLE DES GLACES

La glace est gérée par la fonction « ice-if » du NEMO. La fonction « ice-if » permet de vérifier si l'eau de mer atteint le point de congélation local, et si c'est le cas, le NEMO fixe la température

et le flux thermique, et fixe la concentration de glace à une valeur spécifiée dans un fichier fourni. Le fichier fourni utilisé a une concentration uniforme de zéro.

3.7 STABILITÉ DU SYSTÈME DE MODÉLISATION

La stabilité est primordiale pour un modèle opérationnel, et une évaluation de base de la robustesse du modèle a été effectuée. Tout d'abord, le modèle a fonctionné pendant six ans sans intervention, sans accident physique ni accident numérique, et cet intervalle de six ans comprenait des inondations, des tempêtes et des ouragans importants. L'inondation de 2018 de la rivière Saint-Jean a été la plus importante jamais enregistrée, le niveau d'eau d'Oak Point atteignant près de 6 m; le niveau d'eau de pointe de crue typique se situe autour de 3 m. À titre d'essai de résistance brut pour assurer la stabilité numérique, le modèle a été mis en fonction pour la crue/inondation printanière de 2018 avec des niveaux d'eau culminant à deux fois la hauteur observée; le modèle est demeuré stable et a produit des résultats physiquement raisonnables. Les observations en temps réel sont utilisées uniquement dans le calcul des conditions aux limites ouvertes de la rivière, et les données de repli pour tous les marégraphes utilisés sont indiquées dans le tableau 4. Les données des modèles atmosphériques et océaniques sont fournies par les systèmes opérationnels, et il n'y a donc pas de solutions de rechange.

Les limites du système peuvent être regroupées en deux catégories, soit les limites dues à la géométrie fondamentale du système et les limites dues aux données utilisées pour forcer le système. La première catégorie comprend ce qui suit :

- Comme le NEMO3.6 ne tient pas compte des zones intertidales, une profondeur minimale doit être imposée dans l'ensemble du système pour maintenir la stabilité. Cette profondeur minimale peut approfondir les caractéristiques bathymétriques peu profondes, pouvant ainsi réduire ou ajuster la façon dont les courants sont orientés par la topographie. Certaines caractéristiques de la bathymétrie du port de Saint John sont aplaties par ce phénomène, de sorte que les courants peuvent être orientés différemment ou insuffisamment dans le modèle par rapport aux observations. Les résultats dans la partie supérieure de la baie de Fundy pourraient ne pas être fiables en raison des vastes plaines intertidales de la région.
- Le lien entre le réseau hydrographique et le port est assez étroit, surtout aux chutes réversibles. Cela est inévitable pour cette configuration, puisque le domaine à la plus haute résolution a une valeur de Δx d'environ 85 m, et que la rivière se rétrécit à environ 200 m entre les chutes réversibles et le port. Le réseau hydrographique est prévu principalement pour assurer un flux d'eau sortant important vers le port et la baie ouverte, et la circulation dans le réseau hydrographique n'est pas bien vérifiée.

La deuxième catégorie comprend certains de ces facteurs :

- tout biais ou changement de variabilité dans les systèmes de forçage d'origine (SPCOG, SHRPD) sera hérité par le modèle;
- la température de la rivière est imposée en tant que climatologie, qui a été dérivée d'une variété de données sur la température de la rivière dans la région. Cela peut avoir une incidence sur la précision de la température du panache de la rivière du modèle, pouvant ainsi avoir des répercussions sur le mélange de l'eau de la rivière et de l'océan;
- les marées sont imposées comme composantes de marée statiques, bien que les valeurs particulières des composantes M2 (et autres) changent d'une année à l'autre (Ku, et al. 1985). N'importe quel ensemble de composantes aura alors des compétences variables pour représenter le niveau des eaux de marée dans le modèle. L'amplitude des M2 observée fluctue de moins de 10 cm au cours de la simulation rétrospective.

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'heure de la prévision pour un plus petit ensemble d'observations disponibles pendant la période de prévision.

Les sources de données contrôlées par 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

$$ERREUR = x_m - x_o$$

où x_o et 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, x_o et 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 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),

$$\text{biais} = \frac{1}{N} \sum ERREUR = \frac{1}{N} \sum x_m - \frac{1}{N} \sum x_o = \overline{x_m} - \overline{x_o},$$

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

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

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

$$\gamma^2 = \frac{\text{CRMSE}^2}{\sum (x_o - \overline{x_o})^2},$$

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

$$\text{PEARSONR} = \frac{\sum (x_m - \overline{x_m})(x_o - \overline{x_o})}{\sqrt{\sum (x_m - \overline{x_m})^2 \sum (x_o - \overline{x_o})^2}},$$

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 et Christensen 2015)

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

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

4.1.1 Niveau d'eau

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

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

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

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

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

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

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

où h_o et ϕ_o sont l'amplitude et le retard de phase par rapport à Greenwich observés (indice o) pour une composante de marée donnée, tandis que h_m et ϕ_m sont l'amplitude et la phase modélisées (indice m) (Cummins et 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, Perrie et Long (2019), qui fournit les trajectoires mondiales des tempêtes de 1958 à 2021 (la figure 5 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 et 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 courantmètres 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 courantmètres 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 CRMSE, les indices de performance γ^2 et du coefficient de corrélation de Pearson r sur toute la période d'évaluation. Les valeurs du modèle sont interpolées linéairement aux emplacements des observations dans les dimensions horizontale et verticale. Les séries chronologiques observées et modélisées sont interpolées au plus grand intervalle de données commun.

Les thermosalinographes installés sur les traversiers sont des capteurs de température et de conductivité embarqués sur les navires. Ils fournissent une mesure de la température et de la salinité de l'eau proche de la surface en recueillant les données par le biais d'un des circuits d'eau de mer du navire. Les résultats du modèle qui seront comparés à ces données sont

obtenus à partir du point le plus proche des emplacements observés à la fois horizontalement et verticalement, puis interpolés linéairement aux heures d'observation. Des diagrammes Hovmöller des observations, des résultats du modèle et des différences, ainsi que des statistiques de base, sont utilisés pour évaluer la performance du modèle en ce qui concerne l'eau à proximité de la surface.

4.1.4 Dérive

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

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

Cette méthode d'application de la dérive due au vent suppose que les courants qui agissent sur la partie immergée de la bouée dérivante, de même que les vents qui soufflent directement à la surface de l'océan, sont parfaitement connus. Cependant, aucune de ces hypothèses n'est vraie en réalité, puisque : 1) la représentation des courants de surface dans NEMO est limitée par les restrictions de stabilité pour la résolution verticale près de la surface et l'incertitude du modèle en général; et 2) la vitesse du vent tirée du modèle du SHRPD est également assujettie à l'incertitude du modèle et elle est fournie à 10 m, où les vents sont habituellement environ 30 % plus forts qu'à 1 m, mais peuvent être jusqu'à cinq fois plus forts selon la vitesse du vent et la stabilité atmosphérique (Smith 1988).

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

Le terme de la dérive due au vent utilisé ici pourrait être optimisé en le calculant pour chaque combinaison de modèles océan/atmosphère selon la procédure décrite dans Sutherland *et al.* (2020), mais cela dépasse la portée du présent rapport. Nous nous concentrons sur l'amélioration du forçage des courants de surface pour les simulations de la dérive, sans évaluer la pertinence des prédictions du vent dans les domaines du modèle portuaire pour prévoir la dérive ou commenter l'utilité potentielle d'un système de prévision des vagues à l'échelle du port. Le paramétrage de la dérive due au vent utilisé ici vise simplement à fournir un

lien déterministe cohérent entre les courants modélisés, les vents et le mouvement des divers types de dériveurs. Étant donné l'incertitude considérable associée à ce terme de la dérive due au vent, nous considérons que c'est l'évaluation des courants de surface par rapport aux observations des ADCPs et des courantomètres qui est le facteur déterminant de l'aptitude du modèle à prévoir la dérive, plutôt que l'analyse des trajectoires des bouées dérivantes observées et modélisées.

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

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

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

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

où $\dot{x}_o$ et $\dot{x}_m$ sont les positions de la bouée dérivante observée et modélisée, et $||$ indique l'ampleur de la différence vectorielle, c'est-à-dire la distance, entre eux.

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

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

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

4.2 PRÉVISIONS

Pour évaluer des prévisions, il faut exécuter un ensemble de prévisions (ici d'une durée de 48 heures, chacune commençant à 00Z) et évaluer la performance selon les prédictions indépendantes en fonction de l'échéance de la prédiction. L'évaluation des prévisions a été effectuée pour un ensemble d'environ 60 prévisions consécutives en comparant les valeurs du

modèle aux données de marégraphes, aux températures de surface de la mer et aux enregistrements des ADCPs horizontaux. Pour des raisons logistiques, l'ensemble des prévisions ont été réalisées lors de l'hiver 2021/22. La performance des prévisions a été évaluée comme étant l'écart (biais et erreur CRMSE) avec les valeurs observées en fonction de l'échéance des prévisions. Les courbes de croissance des erreurs représentent l'écart moyen sur l'ensemble des prévisions évaluées. Nous incluons des intervalles de confiance à 95 % calculés au moyen d'une méthode « bootstrap ».

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

5 RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES

Pour évaluer notre système de modèle portuaire à deux niveaux, nous comparons les résultats de notre modèle à ceux du SPCOG-E. Nous avons des données 3D horaires du SPCOG-E sur l'ensemble du domaine du Fundy500, et pouvons donc faire des comparaisons significatives pour tous les types d'observations, pas seulement le niveau d'eau et les quantités à la surface. La période de simulation rétrospective commence le 2016-04-15 et se termine le 2022-01-01, bien qu'elle soit prolongée jusqu'au 2022-02-01 pour faciliter l'évaluation des prévisions. La simulation rétrospective est divisée par année civile, de sorte que la période d'évaluation de 2017 s'étend du 1^{er} janvier 2017 au 1^{er} janvier 2018. (Veuillez noter que 2016 ne s'étend que sur environ huit mois.) L'ensemble de la période de simulation rétrospective s'étend des années 2016 à 2021.

Les observations utilisées pour évaluer le modèle comprennent les niveaux d'eau des marégraphes (canadiens et américains), les séries chronologiques de la température et de la salinité des bouées et des sondes CTD ancrées, le courant des ADCP ancrés et remorqués et des ADCP horizontaux flottants, les profils de profondeur de la température et de la salinité des profils CTD, et les bouées dérivantes.

5.1 NIVEAU D'EAU

La circulation et le niveau d'eau dans la baie de Fundy sont dominés par les grandes marées, qui se traduisent par une amplitude de près de 16 m dans les parties supérieures de la baie. Saint John se trouve à peu près au milieu de la rive nord de la baie, et l'amplitude des marées est d'environ 8 m; les composantes semi-diurnes représentent environ 90 % de l'amplitude des marées à Saint John. Pour être utile à des fins opérationnelles, un modèle doit bien représenter le niveau de l'eau, bien qu'en raison de l'absence d'inondation et d'assèchement dans le NEMO 3.6, nous ne nous attendons pas à obtenir des résultats fiables dans les régions où il y a de vastes replats de marée (c.-à-d. la partie supérieure de la baie de Fundy). Certaines zones intertidales autour de Saint John ont été aménagées en établissant une profondeur bathymétrique minimale de 7 m dans les simulations, mais aucune vérification n'est effectuée dans ces zones.

Le port de Saint John est le point de mire de ce modèle et possède un seul indicateur de niveau d'eau en temps réel (Saint John, 00065) situé sur un quai sans zone intertidale à proximité. D'autres marégraphes fonctionnant en temps réel dans le domaine du Fundy500 se trouvent

dans la baie de Passamaquoddy (Eastport, marégraphe NOAA 8410140) et sur la partie nord de la côte du Maine (Cutler-Farris, marégraphe NOAA 8411060); seul le marégraphe du port 00065 est présent dans le domaine du SJ100 (voir la figure 6 pour connaître l'emplacement du marégraphe). Un marégraphe à Parker's Cove (00320) du côté néo-écossais de la baie de Fundy a été en service pendant quelques années, et les observations se sont terminées en 2017. Les conversions du niveau de référence vertical au zéro des cartes ou de la moyenne des basses mers au CGVD28 sont répertoriées dans le tableau 5.

Comme il est indiqué à la section 3.4.1, le SPCOG-E a un niveau de référence vertical différent de celui du CGVD28, et les valeurs de HSM moyennes à long terme à Saint John, à Yarmouth et à Halifax indiquent que la différence locale entre les niveaux d'eau du SPCOG-E et du CGVD28 est d'environ 0,69 m. Tous les niveaux d'eau du SPCOG-E sont augmentés de 0,69 m avant comparaison avec les résultats du Fundy500 ou du SJ100, ce qui facilite la comparaison visuelle entre les solutions du modèle.

5.1.1 Hauteur moyenne de la surface de la mer

Un champ de hauteur moyenne à long terme de la surface de la mer est requis par le SHC pour ses produits de navigation électronique, et ces champs pour le Fundy500 et le SJ100 sont indiqués à la figure 7 et à la figure 8. Dans la plus grande partie du domaine, la HSM moyenne est d'environ 0,25 m, tandis que le réseau hydrographique a des valeurs plus près de 1,5 m. Comme prévu, les valeurs de la rivière sont généralement conformes au niveau d'eau observé à Oak Point, et le seuil aux chutes réversibles freine l'écoulement de l'eau dans le port et réduit considérablement l'amplitude du signal de marée qui se propage à l'intérieur des terres. Le niveau moyen de l'eau est plus élevé dans le port de Saint John que dans la majeure partie du reste du domaine, probablement en raison du flux d'eau sortant de la rivière et de la rétention d'eau due au seuil aux chutes réversibles. Les HSM moyennes minimales locales se trouvent au large de Grand Manan et dans le passage Minas.

5.1.2 Niveau d'eau de marée

La M2 est de loin la composante dominante dans la baie de Fundy, bien que la N2 et la S2 soient également importantes. Les tableaux de toutes les composantes forcées avec des amplitudes supérieures à 5 cm sont les tableau 6 au tableau 16, triés de façon générale par ordre d'amplitude à Saint John; les composantes M4, T2 et Q1 sont suffisamment petites pour être omises. Les valeurs de 2017 sont présentées de sorte que Parker's Cove est inclus dans les tableaux; la différence entre les valeurs des paramètres de 2017 et de toute autre année est généralement faible. Toutes les composantes de marée de Fundy500 (sauf M2) sont réglées manuellement avant d'être utilisées pour forcer le SJ100, ce qui nous permet de générer une solution de marées précise à Saint John. Les paramètres de la M2 pour 2017 pour les quatre stations sont tracés à la figure 9. Compte tenu du travail minutieux effectué pour régler les marées à Saint John, il n'est pas surprenant que le SJ100 surpasse le SPCOG-E à cet endroit, mais le Fundy500 surpasse également le SPCOG-E. L'amplitude de la M2 est considérablement améliorée par le Fundy500 et le SJ100 à toutes les stations, et les phases sont également comparables ou améliorées.

Saint John, Eastport et Cutler Farris se trouvent tous sur la rive ouest de la baie de Fundy; les seules observations de niveau d'eau disponibles sur la rive est se trouvent à Parker's Cove et se terminent au milieu de 2017. Même si les séries chronologiques de Parker's Cove sont limitées, la comparaison des composantes de marée des deux côtés de la baie permet de déterminer si la structure de la solution de marées traversant la baie est exacte. Le domaine du Fundy500 fournit des résultats comparables au SPCOG-E : l'amplitude de la M2 est améliorée par rapport au SPCOG-E, mais n'est pas aussi précise qu'à Saint John. Les erreurs de phase

pour les composantes les plus importantes sont relativement faibles, ce qui laisse croire que la structure des lignes isophases de l'autre côté de la baie est généralement exacte.

L'utilisation de composantes de marée statiques pour forcer le courant de marée est bien fondée sur le plan physique, car les marées du modèle SPCOG-E d'origine ne sont pas suffisamment bonnes pour être utilisées pour forcer le modèle près du rivage. Cependant, comme les marées dans la baie de Fundy sont importantes en raison de la géométrie du système qui résonne à la fréquence de la M2, la modulation nodale de la marée astronomique est réduite en raison de la physique du frottement sur le fond, de type quadratique. Nos outils d'analyse tiennent compte de la modulation nodale astronomique, mais ne peuvent pas tenir compte d'une modulation spécifique locale. Ku *et al.* suggèrent que même si la modulation astronomique est de +/- 3,7 %, dans la baie de Fundy, la modulation nodale n'est que de +/- 2,4 %, c'est-à-dire qu'il y a une différence de 1,3 % (Ku, et al. 1985). La M2 à Saint John a une amplitude d'environ 3,05 à 3,10 m, et nous prévoyons donc que nos amplitudes de marées calculées varieront d'environ 3 à 4 cm d'une année à l'autre. Le tableau 17 indique les paramètres de marée de la M2 à Saint John pour chacune des six années étudiées, ainsi que la moyenne. Bien que la phase ne fluctue pas de plus d'un degré, l'amplitude de la M2 observée varie de 3,02 m à 3,07 m, ce qui correspond en gros à la différence que nous attendons de notre analyse harmonique des marées ne tenant pas compte de la modulation nodale réduite. Les résultats de notre modèle portuaire montrent la correspondance la plus proche de la M2 dans la première partie de la simulation rétrospective, c'est-à-dire l'intervalle au cours duquel les composantes ont été calculées avant d'être imposées pendant les six années de la simulation rétrospective. Plus tard, en particulier lorsque l'amplitude de la M2 observée est faible, la différence entre l'amplitude de la M2 modélisée et observée est plus grande. Il n'existe pas de moyen clair d'éviter ce problème lors de l'utilisation de fichiers de composantes statiques.

L'historique des composantes de marée est également disponible à plus de 50 stations autour de la baie de Fundy; elles sont considérées comme statiques et sont fournies par le SHC. (Nous utilisons un sous-ensemble de 35 stations réparties autour de la baie pour des graphiques plus lisibles.) Une carte des marégraphes fonctionnant en temps réel et des stations de composantes utilisées dans la présente évaluation est présentée à la figure 6; les stations de composantes le long de la rivière Saint-Jean sont omises dans l'évaluation, ainsi que les stations qui ne sont pas inondées pour le Fundy500. Il est à noter que les stations de la partie supérieure de la baie de Fundy sont incluses, afin de fournir une certaine estimation de la compétence des modèles en dehors de l'endroit où nous nous attendons à ce qu'ils produisent de bons résultats. L'amplitude et la phase pour la M2 sont tracées pour ces stations historiques à la figure 10. Le Fundy500 et le SJ100 surpassent constamment le SPCOG-E dans la partie inférieure de la baie, des stations Cutler (00004) à St Martins (000129) et de Margaretsville (00315) à West Narrows (00339). Les résultats près de Saint John sont particulièrement bons dans le cas du SJ100, avec des amplitudes à moins de 5 cm de la composante statique. Dans la partie supérieure de la baie de Fundy, nous sous-estimons à la fois la phase et l'amplitude de la M2; la phase est décalée d'environ 10° seulement et la différence d'amplitude est d'au plus 50 cm, et souvent seulement de 10 à 20 cm. Nous ne nous attendons pas à être performants dans ce domaine, et prévoyons une amélioration lorsque nous passerons au NEMO4 avec inondation et assèchement.

5.1.3 Scores totaux

Les statistiques sur le niveau d'eau total et avec marée pour 2018 pour le SPCOG-E, le Fundy500 et le SJ100 sont présentées dans le tableau 18 et le tableau 19. L'année 2018 a été choisie comme année représentative en raison de l'inondation historique du printemps, où les

niveaux d'eau à Oak Point ont atteint un sommet de près de 6 mètres, tandis qu'une crue printanière type atteint un pic d'environ 3 mètres. Une deuxième inondation au printemps 2019 n'a pas été aussi importante, mais les graves inondations sont de plus en plus fréquentes dans la région, et le flux d'eau sortant de la rivière est une partie essentielle de la circulation dans le port. Le Fundy500 et le SJ100 utilisent tous deux des données de marégraphes pour déterminer l'état de la rivière, tandis que le SPCOG-E utilise une climatologie, et ne peut donc pas tenir compte de la variabilité interannuelle.

Les tracés des statistiques calculées pour chacune des six années couvertes par cette simulation rétrospective sont présentés à la figure 11, et en général, les statistiques ne se dégradent pas de façon significative au cours de la simulation rétrospective pour l'un des trois modèles présentés, c'est-à-dire que les points dispersés restent groupés pour toutes les stations. Nous constatons que le Fundy500 et le SJ100 affichent une performance nettement supérieure à celle du SPCOG-E dans les statistiques sur les niveaux d'eau, et que le SJ100 affiche une performance légèrement supérieure à celle du Fundy500. L'erreur quadratique moyenne centrée (CRMSE) du niveau d'eau total pour le SJ100 (c.-à-d. le domaine le plus performant) est d'environ 10 cm pour toutes les années, ce qui est déterminé également par les niveaux d'eau avec et sans marée, qui ont tous deux des valeurs entre 5 et 10 cm pour toutes les années.

5.1.4 Niveaux d'eau résiduels

Les séries chronologiques des niveaux d'eau résiduels pour Saint John, Parker's Cove, Eastport et Cutler Farris sont tracées à la figure 12, à la figure 13, à la figure 14 et à la figure 15 respectivement. La série chronologique pour 2018 est présentée pour Saint John afin de mieux voir la variation de fréquence plus élevée, mais la série chronologique complète disponible est présentée pour les trois autres marégraphes. Les données du SPCOG-E ont été augmentées de 0,69 m afin qu'elles puissent être facilement comparées aux autres séries chronologiques. La variation de fréquence élevée rend les détails de la série chronologique difficiles à voir, mais l'histogramme des valeurs est utile. Le SJ100 et le Fundy500 affichent des résultats semblables pour Saint John et correspondent bien aux observations, et le Fundy500 correspond également aux observations d'Eastport et de Cutler Farris. Cependant, sa performance n'est pas aussi bonne à Parker's Cove : l'histogramme observé est plus étroit que celui du Fundy500. Cela donne à penser que la circulation le long de la côte de la Nouvelle-Écosse pourrait bénéficier d'une certaine attention et que les résultats pourraient s'améliorer si le flux d'eau sortant de la rivière Annapolis est inclus. Les statistiques sur les niveaux d'eau résiduels pour 2018 sont indiquées dans le tableau 20; les statistiques des autres années sont similaires.

Les spectres de fréquence pour les niveaux d'eau totaux et résiduels à Saint John et à Parker's Cove pour 2016 sont indiqués à la figure 16 et à la figure 17, respectivement. L'analyse spectrale est sensible aux déficiences dans les signaux d'oscillation, car elle effectue une interpolation linéaire pour les données manquantes. Pour le marégraphe de Saint John, la période d'analyse de 2016 comporte le moins de données manquantes de toutes les années prises en compte, et est donc la moins susceptible d'inclure d'énergie parasite générée par l'interpolation linéaire des manques importants dans les données; Parker's Cove est inclus aux fins de comparaison. Le spectre total des niveaux d'eau montre deux choses qui n'ont pas encore été établies : a) l'ampleur globale et les petites variations de la bande de basse fréquence sont bien saisies par le modèle portuaire, et b) les observations ont une valeur de référence plus élevée d'énergie haute fréquence ($> \sim 3$ cpj) que n'importe lequel des modèles. Ces deux caractéristiques sont valables pour toutes les stations du domaine (Eastport et Cutler Farris ne sont pas montrées), mais Saint John en particulier a relativement plus d'énergie dans la bande à très haute fréquence que n'importe laquelle des autres stations; par conséquent,

l'écart entre le modèle et les observations à haute fréquence est le plus grand pour Saint John. Cet écart peut être un artefact numérique du traitement spectral, car les spectres sans marée présentent un écart plus faible à des fréquences élevées, et la série chronologique sans marée est sans oscillation. Les spectres sans marée à la figure 16 soulignent que nous apparions mieux le signal à basse fréquence observé à Saint John avec le signal du SJ100 qu'avec le signal du Fundy500 ou celui du SPCOG-E, en particulier dans la bande de 0,1 à 1 cpj; Parker's Cove voit une amélioration moindre. Cependant, tous les spectres des deux stations se situent à l'intérieur de l'intervalle de confiance de 95 %, ce qui ne peut être considéré comme un résultat fort, mais les résultats sont néanmoins encourageants.

5.1.5 Niveau d'eau des ondes de tempête

La baie de Fundy est souvent orageuse et plusieurs ouragans, tempêtes post-tropicales et tempêtes du nord-est ont traversé la région au cours de la période de simulation rétrospective. Une sélection de 11 tempêtes s'étendant sur les années et les saisons de rétrospection et environ 40 hPa de pressions centrales minimales (963 à 1008 hPa) a été choisie pour évaluer dans quelle mesure les ondes de tempête sont bien saisies par les simulations rétrospectives. Les tempêtes sont identifiées par le mois et l'année où elles se sont produites, ou par leur nom s'il s'agit d'une tempête nommée ou bien encore de ses reliquats. L'apogée de la tempête a été considéré comme le marqueur temporel de la pression centrale la plus basse, et l'effet de marée a été retiré du signal de niveau d'eau en utilisant une fenêtre de 40 jours (c.-à-d. 20 jours avant l'apogée de la tempête et 20 jours après). Le signal d'onde de tempête correspond au niveau d'eau total moins le signal de marée. Des graphiques montrant une période de quatre jours autour de l'apogée de chaque tempête sont présentés pour Saint John à la figure 18.

Nos modèles saisissent de façon fiable la synchronisation du signal d'onde de tempête, le Fundy500 et le SJ100 montrant des séries chronologiques très similaires. Le SJ100 a tendance à saisir le niveau d'eau à l'apogée de façon légèrement plus fiable que le Fundy500 et a un biais global plus faible, bien que la différence entre les deux configurations soit faible. Les ouragans sont bien modélisés par les deux systèmes, et le signal après l'apogée de la tempête est mieux saisi par le Fundy500 et le SJ100 que par le SPCOG-E. Les différences visuelles entre les trois modèles sont faibles, mais il est clair que les configurations du modèle portuaire fonctionnent au moins aussi bien que le SPCOG-E et saisissent le moment et la variabilité des ondes de tempête.

Les statistiques pour les trois stations de mesure du niveau d'eau à long terme sont présentées dans le tableau 21; Parker's Cove est incluse, mais une seule des 11 tempêtes considérées s'est produite pendant que le marégraphe était en fonction. Les modèles portuaires égalent ou surpassent statistiquement le SPCOG-E à toutes les stations, et le SJ100 surpasse constamment le Fundy500. Cela indique que les modèles à plus haute résolution améliorent la modélisation des ondes de tempête par rapport au système existant, même à l'extérieur de la région d'intérêt principale.

5.2 COURANTS

Bien que nous nous attendions à ce que le modèle portuaire donne de meilleurs résultats pour les propriétés de l'eau et les niveaux d'eau, nous anticipons que la plus grande amélioration relative concerne les courants. Le panache de la rivière Saint-Jean influence fortement la circulation près de la surface dans le port, et nous supposons qu'une résolution plus élevée améliore la représentation de l'étendue et de la structure du panache. Les observations visuelles effectuées sur le terrain et les photos satellites montrent que le bord du panache de la rivière est un front très marqué, et que des fronts marqués persistent dans la circulation lorsque le panache de la rivière est repoussé d'avant en arrière par la circulation des marées. La figure

19 illustre la vitesse en surface au 2020-06-01, 00:00 UTC pour le SPCOG-E, le Fundy500 et le SJ100, et l'effet d'une meilleure résolution est clair. Les fronts sont bien marqués dans le SJ100, tandis qu'ils sont flous dans le Fundy500 et peuvent ne pas être visibles dans le SPCOG-E. Des caractéristiques à plus petite échelle sont visibles dans le SJ100, et les structures sont plus complexes.

Les observations de courant sont principalement fournies par les déploiements d'ADCP dans la région de Saint John en 2016, en 2017 et en 2019. La bouée Smart Atlantic est également munie d'un ADCP orienté vers le bas qui, mises à part certaines interruptions, fournit des courants pour toute la période de la simulation rétrospective. Quelques transects d'ADCP ont été effectués dans le port de Saint John en avril 2019, et deux ADCP horizontaux ont été installés sur des systèmes flottant et coulissant le long de rails montés sur des structures de quai à la jonction de la rivière et du port.

Le port de Saint John est relativement peu profond, et la profondeur totale de l'eau peut varier d'un facteur deux au cours d'un cycle de marée en raison de la grande amplitude des marées. Toutes les séries chronologiques de courants sont considérées à une profondeur définie à partir de la surface variable, plutôt que d'être extraites par rapport à une hauteur fixe au-dessus du fond. Cela permet d'éviter des trous importants ou le crénelage dans les séries chronologiques par un manque récurrent de données à marée basse (voir la figure 20 pour un schéma). Par conséquent, il n'y a souvent que des couches d'eau relativement minces qui sont constamment analysables, car les ADCP ancrés se trouvent généralement à quelques mètres au-dessus du fond marin dans des eaux de 10 à 15 m de profondeur.

5.2.1 ADCP horizontaux

Deux ADCP horizontaux ont été installés à la jonction de la rivière et du port, un sur chaque berge (voir la figure 21). Celui du côté est a été installé à l'ancienne raffinerie de sucre et celui du côté ouest, au quai n° 11. Les ADCP horizontaux ont été conçus pour saisir les courants près de la surface. Pour s'assurer que les données de surface seraient recueillies tout au long du cycle des marées, des ADCP horizontaux ont été installés sur des chariots flottants qui se soulèvent et descendent en coulissant sur une paire de rails verticaux à mesure que la marée monte et descend. Les ADCP horizontaux étaient dans l'eau en 2019 et en 2021, bien que le déploiement de 2021 ait connu des problèmes et produit un nombre limité de données utilisables.

Les ADCP horizontaux sont installés à un point étroit à la tête du port, et seul le SJ100 a une résolution suffisante pour donner des résultats de modèle utiles à comparer aux observations. Le Fundy500 utilise un seul et large point de grille pour représenter le chenal formé par la rivière à partir de l'amont des chutes réversibles jusqu'au port (et ce point de grille est légèrement au nord de la rivière elle-même), et le SPCOG-E n'inclut pas du tout la rivière. Tous les tracés de cette section n'affichent que le SJ100, car les deux autres domaines du modèle ont des terres aux emplacements pertinents. Les données observées et modélisées sont décomposées en courant le long du rivage et en courant perpendiculaire au rivage, et nous nous concentrons sur le courant le long du rivage. Le cap de l'instrument du côté est est de 257° par rapport au nord vrai, et le cap de l'instrument du côté ouest est de 50°.

Les ellipses de marée du premier déploiement des instruments ouest et est sont présentées à la figure 22 et à la figure 23 respectivement; les résultats des déploiements subséquents sont presque identiques. Comme prévu, la M2 est de loin la composante dominante, de sorte que seules les grandes composantes semi-diurnes sont tracées. Les deux instruments présentent des différences semblables d'inclinaison des ellipses de marée, ce qui laisse croire que l'angle auquel la rivière rejoint le port n'est peut-être pas précis; il faudra peut-être une résolution plus

élevée pour résoudre ce problème. L'amplitude de l'ellipse orientale correspond bien aux observations, et l'ellipse est légèrement plus large. L'ellipse occidentale a un axe semi-majeur trop long et n'a pas la très petite largeur observée dans les observations. Compte tenu de la résolution grossière du domaine du SJ100 par rapport à la largeur du chenal, ces résultats sont acceptables.

Les séries chronologiques des courants totaux et résiduels le long du rivage sont indiquées à la figure 24 et à la figure 25 pour le côté ouest, et à la figure 26 et à la figure 27 pour le côté est. Le synchronisation du cycle des marées est bien saisie dans les quatre séries chronologiques, les hausses et les baisses marquées du courant le long du rivage se produisant simultanément dans les observations et les résultats du modèle. Cependant, les résultats du modèle sont beaucoup plus lisses lorsque les courants sont plus élevés que les observations, en particulier du côté ouest de la rivière, où le modèle a tendance à dépasser les observations. Les observations ont une structure intéressante : pour la marée descendante (c.-à-d. lorsque les courants le long du rivage sont les plus négatifs), il y a presque un rebond, les observations atteignant un sommet, puis se relaxant légèrement (devenant moins négatives) avant la marée basse. C'est ce qui ressort davantage lors du déploiement de décembre que lors de celui de juillet, et le courant résiduel de décembre montre une périodicité beaucoup plus forte que celle du déploiement de juillet. Les durées des deux déploiements ne sont pas suffisamment longues pour tirer des conclusions fermes sur l'incidence de la saisonnalité sur les courants le long du rivage, mais cela donne à penser qu'il peut y avoir des caractéristiques différentes selon le stade de la rivière.

Les résultats pour l'instrument de l'est sont similaires en ce sens que le modèle a un signal plus lisse que les observations à la marée montante et descendante, mais les observations sont plates et bruyantes à la marée montante et descendante, au lieu de la forme de U inversé observée par l'instrument de l'est. Le modèle est généralement moins négatif que les observations, ce qui indique que nous sous-estimons le courant le long du rivage du côté est du chenal, particulièrement en cas de marée montante. C'est plus évident en octobre qu'en juin, ce qui fait encore une fois allusion à une certaine saisonnalité. Même si l'erreur de l'instrument de l'ouest oscille autour de 0, les observations de l'instrument de l'est sont constamment sous-estimées par le modèle.

Bien que nous nous concentrons sur la composante du courant le long du rivage, les observations suggèrent que le courant perpendiculaire au rivage peut être intéressant; les ellipses de marée observées ont des axes semi-mineurs, et il y a des oscillations à haute fréquence visibles en particulier aux bords des pics de courant le long du rivage. Un transect d'ADCP perpendiculaire à l'axe de la rivière qui a été réalisé à peu près entre les deux emplacements des ADCP horizontaux montre une variabilité entre les chenaux (voir la section 5.2.4 et la figure 54) qui n'est pas bien saisie par le SJ100, car il n'y a pas une résolution suffisante pour modéliser correctement une grande variabilité d'un côté à l'autre de la rivière. Une analyse plus approfondie des données des ADCP horizontaux observées pourrait être utile pour l'élaboration de futurs modèles dans la région de Saint John, en particulier si des domaines imbriqués à plus haute résolution sont envisagés.

5.2.2 Courantomètres

Il n'y avait aucun courantomètre à profondeur unique dans le domaine à utiliser pour l'évaluation du modèle.

5.2.3 ADCP ancrés

Il y a eu environ 25 déploiements d'ADCP dans le port de Saint John et dans les environs au cours de la simulation rétrospective (voir la figure 28). La plupart d'entre eux sont de courts déploiements d'instruments à balayage ascendant fixés au fond pendant quelques mois, bien qu'il y ait également un ADCP à balayage descendant sur la bouée Smart qui fournit une série chronologique pluriannuelle; certains emplacements sont échantillonnés plusieurs fois. La plupart des déploiements disponibles sont localisés près du port en eau peu profonde, avec une profondeur totale pouvant varier d'un facteur deux au cours d'un cycle de marée. À ce titre, les observations doivent être traitées d'une manière qui tient rigoureusement compte des variations de la surface. Pour cette évaluation, toutes les profondeurs sont mesurées par rapport à la position variable de la surface de la mer, et non par rapport à une surface fixe de référence de la surface de la mer. Si cela n'était pas fait, les eaux peu profondes et les grandes marées causeraient des manques récurrents dans les données à marée basse, ce qui biaiserait l'analyse des séries chronologiques de façon non physique.

Comme pour le niveau de l'eau, la M2 est de loin la composante dominante dans les courants de marée. La N2 et la S2 sont les suivantes, mais ont un axe semi-majeur d'environ un ordre de grandeur inférieur à celui de la M2 pour tous les mouillages pris en compte; les composantes diurnes sont encore plus petites. Le SJ100 surpasse considérablement le Fundy500 et le SPCOG-E : le Fundy500 a une géométrie de rivière grossière qui devrait être revue dans les versions futures, et le SPCOG-E manque à la fois la géométrie du port et le panache de rivière distinct qui influence une grande partie de la circulation près de la surface. La plupart des tracés de cette section comprennent le SPCOG-E, mais pour plus de clarté visuelle, certains tracés de séries chronologiques peuvent ne pas l'inclure. La circulation est évaluée à plusieurs profondeurs sous la surface, afin de saisir au maximum la structure barocline des ellipses de marée.

5.2.3.1 Composantes de marée

La circulation dans le domaine est fortement liée aux marées, et la capacité du modèle portuaire à faire correspondre les ellipses de marée est donc essentielle pour reproduire les structures de circulation. Les profils verticaux des ellipses de marée de M2 pour un sous-ensemble de mouillages ADCP sont présentés de la figure 29 à la figure 35. Ces mouillages sont situés partout dans le port (IH, OH, PI), à la bouée Smart près de la station d'embarquement des pilotes, à Canaport (598), au large de Cape Spencer (607) et dans la baie Maces (612).

Le SPCOG-E sous-estime fortement l'amplitude de l'axe semi-majeur dans le port et surestime celui de Canaport et de Cape Spencer. Le SPCOG-E ne saisit pas non plus de façon constante l'angle des ellipses, et les ellipses ne varient pas de façon significative avec la profondeur. Le Fundy500 fait mieux que le SPCOG-E, en particulier dans les zones situées juste à l'extérieur du port (par exemple, à la bouée Smart ou à Canaport). La largeur des ellipses et l'angle d'inclinaison sont généralement améliorés, et une plus grande baroclinicité est saisie. Cependant, le SJ100 surpasse constamment le SPCOG-E et le Fundy500 à l'intérieur et à l'extérieur du port; la baroclinicité est mieux représentée, l'amplitude et la largeur des ellipses sont plus précises et l'angle des ellipses correspond beaucoup plus uniformément aux observations.

Aux mouillages près de zones bathymétriques peu profondes (par exemple, le mouillage dans l'arrière-port), l'axe semi-majeur modélisé est trop petit et l'axe semi-mineur est trop grand, c'est-à-dire que le courant n'est pas suffisamment concentré en raison de l'absence de contrainte et d'effet d'entonnoir par manque de certaines caractéristiques physiques. Nous nous attendons à ce que le passage à NEMO4, qui a la capacité de représenter le processus

périodique d'inondation et d'assèchement et donc de gérer ces zones peu profondes, améliore les courants dans ces régions.

Les ellipses de marée ne sont pas nécessairement les plus grandes à proximité de la surface; les mouillages localisés dans le panache de la rivière, comme celui de l'île Partridge, ont des ellipses plus petites près de la surface qui augmentent avec la profondeur. Le SJ100 saisit cette caractéristique, qui n'est pas visible dans le SPCOG-E. Les autres ellipses semi-diurnes sont petites par rapport à la M2, et les ellipses diurnes sont encore plus petites. La figure 36 montre les ellipses des composantes M2, N2, S2 O1 et K1 pour le mouillage de l'île Partridge à 3 m sous la surface; d'autres mouillages ont des rapports relatifs entre les composantes similaires.

5.2.3.2 Circulation résiduelle

La circulation résiduelle est bruitée, d'autant plus que le traitement a été effectué sans imposer de filtres à bande passante pour éliminer la circulation très proche de la fréquence de la M2. Les séries chronologiques sont suffisamment courtes pour permettre de voir les structures à basse fréquence malgré la variabilité à haute fréquence. La figure 37 montre le mouillage dans l'avant-port, qui était installé pendant l'inondation de 2019. Les courants est-ouest et nord-sud augmentent en amplitude pendant près d'un mois complet au printemps avant et pendant la marée montante, et seul le SJ100 saisit cette configuration. Conformément aux résultats des marées, le SPCOG-E ne saisit pas l'amplitude ou la variabilité des observations sans marée, et le Fundy500 saisit seulement le courant nord-sud de manière raisonnable. Des résultats semblables ont été observés pour les mouillages dans l'arrière-port et de l'île Partridge qui étaient installées en même temps, ce qui indique que le SJ100 est le plus performant des trois modèles dans la zone du port pendant la marée montante. Cette conclusion est importante pour la navigation électronique, car les navigateurs devront peut-être se fier davantage aux résultats des modèles dynamiques lorsque la circulation dans le port est inhabituelle.

Les séries chronologiques pour les courants résiduels près de la surface pour le mouillage 598 et la bouée Smart sont indiquées à la figure 38 et à la figure 39 respectivement. Les différences dans les signaux sont plus difficiles à voir, bien que les histogrammes montrent que le SJ100 et le Fundy500 sont encore plus performants que le SPCOG-E. Nous utilisons l'analyse spectrale pour isoler plus clairement les bandes de fréquences faibles à moyennes; les tracés des spectres rotatifs sans marée pour 598 et la bouée Smart sont présentés à la figure 40 et à la figure 41 respectivement. Le SPCOG-E sous-estime considérablement le signal à presque toutes les fréquences pour les deux déploiements. Cet écart peut être d'un ordre d'amplitude, en particulier autour de la fréquence de 0,5 cpj. Le Fundy500 est plus habile que le SPCOG-E, mais tend à sous-estimer la bande de fréquence 5 à 10 cpj. Le SJ100 correspond aux formes de spectres à toutes les fréquences pour ces deux emplacements, et est le plus performant des trois modèles. La différence entre le Fundy500 et le SJ100 n'est pas toujours supérieure à l'intervalle de confiance de 95 %, mais ils représentent généralement une amélioration par rapport au SPCOG-E pour la plupart des fréquences.

La figure 42 et la figure 43 affichent des spectres rotatifs sans marée pour deux autres déploiements : 591 dans le port de Saint John et 593 à l'extérieur du domaine de SJ100 dans la baie Maces. Les mêmes tendances sont observées à ces endroits : les modèles portuaires surpassent le SPCOG-E (qui sous-estime le signal à la plupart des fréquences), et là où le SJ100 est disponible, il a plus d'énergie à des fréquences plus élevées que le Fundy500. Nous remarquons également qu'aucun de ces tracés de spectre n'a de pics facilement apparents aux bandes quasi inertielles, et nous ne voyons aucune différence substantielle entre les spectres en sens horaire et en sens antihoraire. Nous concluons que les oscillations quasi inertielles ne sont pas importantes dans la région du port de Saint John ou dans la baie Maces, mais nous

n'avons aucune observation plus près des régions aux limites ouvertes du Fundy500 pour évaluer s'il y a des niveaux importants d'énergie quasi inertielle ailleurs dans le système.

5.2.3.3 Courant total

Pour comparer les résultats avec et sans marée, nous avons tracé trois extraits d'une semaine du courant total pour trois mouillages différents à Canaport, à la bouée Smart et à l'île Partridge à la figure 44, à la figure 45 et à la figure 46 respectivement, en séparant les séries temporelles de la vitesse et de la direction. Seul le SJ100 est présenté par souci de clarté, car les tracés précédents ont démontré qu'il surpasse le Fundy500 et le SPCOG-E. Les trois figures montrent que le SJ100 saisit la temporalité du signal (en grande partie avec marée) à la fois en vitesse et en direction, et qu'il correspond à la vitesse maximale ou la sous-estime légèrement. La direction du flux modélisé est un peu plus lisse que la direction observée, et le courant manque une partie de la variabilité haute fréquence des observations, mais dans l'ensemble, ces extraits choisis arbitrairement montrent que le SJ100 fait un bon travail de modélisation du courant total dans la zone d'intérêt.

5.2.3.4 Statistiques

Les profils de profondeur des courants moyens et la corrélation vectorielle des ADCP sélectionnés sont présentés de la figure 47 à la figure 50. Conformément au reste de l'analyse, le SJ100 surpasse le Fundy500 et le SPCOG-E pour ce qui est de l'appariement des observations, particulièrement près de la surface. Les courants moyens totaux et résiduels sont affichés, et le SJ100 correspond toujours à la forme du profil de vitesse moyenne, même s'il ne correspond pas tout à fait à l'amplitude du profil. L'amplitude de la corrélation vectorielle varie considérablement avec la profondeur, et nous voyons des corrélations plus élevées dans la colonne d'eau. L'angle de corrélation est également tracé, bien que toute interprétation ne soit robuste uniquement que lorsque l'amplitude de la corrélation est élevée.

Les mouillages sont souvent déployés en groupes, ce qui nous permet d'agréger les profils verticaux des statistiques pour trois ou quatre mouillages simultanés. Les amarrages de ports de 2016 sont présentés à la figure 51, les amarrages de ports de 2019 sont présentés à la figure 52, et une répartition des amarrages de la baie Maces à Cape Spencer est présentée à la figure 53. Dans chacun de ces tracés, la rangée du haut montre le biais moyen pour les courants u et v , et les rangées du milieu et du bas montrent la CRMSE et le γ^2 des courants totaux, de marée et résiduels. Toutes les profondeurs considérées n'avaient pas suffisamment de données pour effectuer une analyse harmonique des marées, de sorte que certaines des lignes pointillées au milieu et en bas sont plus limitées que les lignes continues. Sur les trois tracés, nous constatons que le modèle portuaire surpasse le SPCOG-E dans le port de Saint John, mais que l'amélioration n'est pas aussi importante loin du port. Le biais est le plus fortement réduit avec une résolution accrue près du port. La composante de marée prédomine l'ensemble de la CRMSE, ce qui suggère que pour améliorer davantage les résultats, nous devrions nous concentrer sur les modèles de circulation des marées. En revanche, les valeurs γ^2 sont plus petites pour la circulation totale et avec marée que pour la circulation résiduelle. Le SJ100 a les valeurs les plus faibles (c.-à-d. les meilleures) de γ^2 , bien que $\gamma^2 > 1$ pour la circulation résiduelle à certains mouillages.

5.2.4 Transects d'ADCP

Sept transects d'ADCP ont été effectués autour du port de Saint John au printemps 2019. Trois transects représentatifs sont présentés à la figure 54, à la figure 55 et à la figure 56, et les résultats du modèle sont comparées à ces observations. Un transect traverse la rivière où il rejoint le port, un transect commence à la jonction rivière-port et s'étend juste au-delà de l'ouvrage longitudinal de l'île Partridge, et un autre traverse le panache de la rivière juste au sud

de l'île Partridge. Pour tous les tracés, v correspond au courant perpendiculaire au transect et u au courant le long du transect, et les trois transects ont été effectués le même jour (26 avril 2019). Le modèle SJ100 saisit la plupart des caractéristiques de la circulation; les amplitudes sont généralement comparables ou sous-estimées, surtout lorsqu'on se trouve près de certains éléments peu profonds du port qui orientent et focalisent la circulation. Le transect qui traverse l'embouchure de la rivière relie approximativement les deux emplacements des ADCP horizontaux, et n'est donc présent que dans le SJ100. Fait important, il montre la variabilité entre les chenaux que nous ne saisissons pas dans notre modèle (encore relativement grossier), ce qui correspond aux résultats des ADCP horizontaux. Des navires traversent ce transect; si la variabilité entre les chenaux est importante pour les navigateurs, cela peut motiver à augmenter la résolution dans le port.

Pour comparer les transects des trois modèles, la figure 57 affiche un diagramme de dispersion du biais par rapport à la CRMSE. Chaque transect a une forme de marqueur différente, et les résultats du modèle sont indiqués par couleur. De meilleurs résultats sont trouvés plus près de l'origine, et le SJ100 est toujours plus performant pour représenter les courants que le Fundy500 ou le SPCOG-E. Les scores sont considérés comme un agrégat de tous les points à toutes les profondeurs, et pas seulement les courants près de la surface, et fournissent donc une mesure de la façon dont la structure verticale de la vitesse horizontale est saisie.

5.3 PROPRIÉTÉS DE L'EAU

Des séries chronologiques à long terme sur les températures de surface sont disponibles dans toute la baie de Fundy, aux bouées, aux stations marégraphiques de la NOAA et à une station de recherche dans la partie supérieure de la baie de Fundy (voir la figure 58). Les mesures de la température et de la salinité des sondes CTD ancrées sont disponibles en grande partie dans la rivière Saint-Jean et les zones intertidales environnantes (voir la figure 64). Des profils CTD sont disponibles dans les eaux canadiennes de tout le domaine, bien que la plupart des profils soient installés près de Saint John ou de la région de la baie de Passamaquoddy au début de la période de simulation rétrospective.

5.3.1 Température de surface de la mer

Trois bouées offrent des données de TSM disponibles, soit la bouée Smart Atlantic (figure 59), la bouée West Bay of Fundy déployée par ECCC (44490, figure 60) et une bouée Fundy FORCE dans le bassin Minas (figure 61). Il existe également des séries chronologiques de température disponibles pour les deux marégraphes de la NOAA dans le domaine (figure 62 et figure 63). La bouée Smart Atlantic est la seule dans le domaine du SJ100 et la seule couvrant toute la période de simulation rétrospective : la bouée West Fundy a été installée en 2019 (et perdue en juin 2022), et la bouée FORCE a également été installée en 2019.

Les trois modèles (SPCOG-E, Fundy500 et SJ100) saisissent le cycle saisonnier de la TSM, en représentant bien à la fois le synchronisme des changements de saisons et celui des hauts et les bas saisonniers. Il y a un biais chaud d'un degré ou deux pendant les mois d'été à la bouée West Fundy en particulier; ce biais est partiellement, mais pas entièrement, hérité du SPCOG-E, et pourrait être amélioré en ajustant les paramètres de pénétration de la lumière. À la bouée Smart, le Fundy500 et le SJ100 ne saisissent pas entièrement l'étendue de la variabilité de la TSM. Cette bouée est suffisamment près du port pour que la TSM soit influencée par la température de l'eau de la rivière, et puisque nous utilisons une température climatologique de la rivière, nous ne recevons pas le signal de variabilité à haute fréquence du panache de la rivière. Le SPCOG-E et le Fundy500 captent assez bien le signal de la TSM à la bouée FORCE, à l'exception de pointes occasionnelles. Il n'est pas clair si ces pointes dans observations sont dues à des intrusions d'eau froide qui ne sont pas modélisées ou si elles sont

des artefacts du fait que la bouée se déplace et bascule dans l'air. Bien que la partie supérieure de la région de la baie de Fundy ne soit pas concernée par l'élaboration de ce modèle, il est encourageant de constater que le signal de TSM du Fundy500 correspond bien aux observations.

Ces comparaisons qualitatives sont appuyées par les statistiques au tableau 22 : à la bouée Smart Atlantic, le SJ100 surpasse le SPCOG-E et le Fundy500 (sauf pour le biais global, où le Fundy500 a une valeur plus petite). Le biais à toutes les stations est inférieur à 2 °C, et inférieur à un demi-degré à la bouée Smart. Les deux stations de la côte présentent des biais plus importants que les bouées ancrées au large, ce qui laisse croire que cela pourrait être dû à la représentation de l'atmosphère à l'interface terre-mer. La CRMSE se situe autour de 1 à 1,5° pour la plupart des stations, et les séries chronologiques montrent que c'est surtout la variabilité à haute fréquence qui nous manque. Les valeurs γ^2 sont inférieures à 0,1, ce qui indique un bon niveau de performance des modèles portuaires, et le Fundy500 et le SJ100 surpassent le SPCOG-E.

5.3.2 Sondes CTD ancrées

Des sondes CTD ancrées ont été déployées principalement près de la côte dans le cadre du Programme sur les données environnementales côtières de référence, et seules les sondes qui se trouvent en eaux libres sont prises en compte dans la présente évaluation (voir la figure 64). Comme notre système ne comprend pas le ruissellement d'eau douce provenant de rivières autres que la rivière Saint-Jean, nous ne saisissons pas entièrement les variations de la salinité observées dans les petits estuaires le long de la côte (en particulier dans la zone de protection marine de l'estuaire de la Musquash). Les statistiques pour toutes les sondes CTD ancrées sont indiquées au tableau 23. Le SPCOG-E n'inclut pas la rivière Saint-Jean, et les mouillages de la rivière Musquash sont si près de la rive qu'ils se retrouvent sur la terre ferme dans le domaine à moyenne résolution du SPCOG-E.

Trois déploiements ont été effectués aux promontoires de l'estuaire de la Musquash, où les sondes sont situées près du fond marin à des endroits exposés à la baie ouverte (voir la figure 65, la figure 66 et la figure 67). Nous saisissons généralement assez bien le signal de basse fréquence, bien que nous manquions une impulsion persistante d'eau plus douce à l'automne en raison de l'absence de ruissellement d'eau douce de la (petite) rivière Musquash. La crue automnale est à la fois plus faible et plus longue que les crues automnales types observées dans les signaux de la rivière Saint-Jean, peut-être parce que le flux d'eau sortant de la rivière n'est pas assez fort pour pousser le signal d'eau douce bien au-delà de l'étendue de l'estuaire. Les observations présentent une plus grande variabilité de fréquence que les configurations du modèle portuaire, bien que cela soit probablement dû à l'absence de ruissellement mesuré. Il existe peu de données de marégraphe contemporaines pour la rivière, et comme la région comprend des marais d'eau salée situés dans une zone intertidale, il peut être difficile de les obtenir. Il est encourageant de constater que, même en l'absence de flux d'eau sortant de la rivière Musquash, nous saisissons autant de signaux de température et de salinité au niveau des pointes de l'estuaire que nous le faisons.

Des sondes ont également été déployées dans la rivière Saint-Jean (étiquetés « les Narrows ») et la baie Courtenay, et deux déploiements près de la surface sont illustrés à la figure 68 et à la figure 69. Le déploiement des Narrows s'est fait juste en amont des chutes réversibles, et le SJ100 et le Fundy500 saisissent tous deux la variabilité à basse fréquence et la synchronisation des oscillations de marée. Les oscillations à haute fréquence entre l'eau salée et l'eau douce ne sont pas entièrement saisies, et les modèles peuvent être légèrement trop mélangés aux chutes réversibles, ou ne peuvent simplement pas saisir la netteté de la limite entre l'eau douce et l'eau salée. Un déploiement dans la baie Courtenay est inclus même s'il était situé dans une zone

intertidale parce qu'il s'agit d'une zone importante pour la navigation électronique en raison des terminaux pétroliers situés à la tête de la baie. À l'exception des pointes de froid, nous saisissons bien le signal de température, bien que nous ne saisissons pas la variabilité ou l'amplitude de la salinité.

Il existe également une série chronologique des températures en eau profonde près de Grand Manan, à l'extérieur du domaine du SJ100 (voir la figure 70). Le signal du Fundy500 correspond assez bien à celui du SPCOG-E, mais comme pour le SPCOG-E, il fait trop chaud en été et un peu trop froid en automne. Il y a très peu d'observations disponibles en profondeur à l'extérieur de la zone d'intérêt, alors il n'est pas clair si cela indique un biais persistant et si ce biais est hérité des conditions limites du SPCOG-E.

5.3.3 Profils CTD

Le domaine du Fundy500 est divisé en cinq régions pour l'analyse des profils CTD, comme le montre la figure 71, soit la région de Saint John (SJ), la baie de Passamaquoddy (Pmqdy) et les régions supérieure, centrale et inférieure de la baie de Fundy ({U,M,L}Fundy). Bien que les régions de Saint John et de la baie de Passamaquoddy soient relativement faciles à déterminer, les divisions entre les régions supérieure, centrale et inférieure de Fundy sont quelque peu arbitraires. La région de Saint John comprend des profils qui ont été établis dans le réseau hydrographique, mais aucun ne se trouve en amont des chutes réversibles. De plus, aucune observation utilisée n'a été recueillie dans les eaux américaines, puisque toutes les sources de profils CTD utilisées étaient canadiennes; cela ne touche que la partie inférieure de la baie de Fundy. La figure 71 trace les emplacements des profils utilisés pour l'ensemble de la simulation rétrospective à l'aide de points rouges. Les profils de profondeur du biais de la température et de la salinité et la CRMSE pour les tracés de la région de Saint John pour 2016 et 2019 sont présentés à la figure 72 et à la figure 73, et pour les cinq régions sur l'ensemble de la simulation rétrospective, de la figure 74 à la figure 78.

À Saint John, les modèles portuaires ont un biais de température légèrement plus important que le SPCOG-E, et les modèles portuaires sont plus chauds que les observations d'environ 0,5 °C à toutes les profondeurs pendant toute la simulation rétrospective. Le SPCOG-E n'a presque pas de biais en profondeur et est légèrement trop froid près de la surface. Les valeurs de la CRMSE sont relativement importantes, et les intervalles biais $\pm$ CRMSE se chevauchent fortement pour les trois modèles. Les modèles portuaires surpassent le SPCOG-E pour la salinité, avec des biais et des CRMSE plus petits. Le SPCOG-E utilise un ruissellement climatologique et ne peut donc pas saisir la variabilité du signal de salinité près de la surface. Ces tendances sont généralement semblables dans la partie centrale de la baie de Fundy également, bien que le biais de température du SPCOG-E soit plus important que dans la région de Saint John. Le SJ100 surpasse légèrement le Fundy500 pour la température, et les trois modèles sont comparables pour la salinité.

La plupart des profils utilisés dans cette évaluation ont été établis en 2016, de sorte que le graphique sommaire pour la région de Saint John semble assez similaire pour l'année 2016, comme il l'est pour l'ensemble de la simulation rétrospective. L'année 2019 vient au deuxième rang pour le nombre de profils disponibles, et les tendances des températures sont semblables à celles de 2016 et à celles des simulations rétrospectives dans l'ensemble. Le signal de salinité en 2019 présente un biais de salinité plus important (~ 8 psu tout au plus) qu'en 2016 (presque aucun biais net pour le SJ100). Il y a environ 50 profils établis dans la région pour 2016, mais seulement une vingtaine en 2019, et une partie des travaux sur le terrain de 2019 ont été effectués pendant la crue printanière et l'inondation. Nous sous-estimons probablement la teneur en eau douce des eaux du port près de la surface pendant l'inondation.

Les trois autres régions sont couvertes uniquement par le Fundy500 et le SPCOG-E. Dans la partie inférieure de la baie de Fundy et de la baie de Passamaquoddy, le Fundy500 affiche un biais de chaleur de +0,5 à 1 °C, tandis que le SPCOG-E affiche un biais d'environ ~ +0,25 à 0,5 °C. Les signaux de salinité sont comparables entre le Fundy500 et le SPCOG-E dans la partie inférieure de la baie de Fundy, avec un biais de salinité d'environ +1 psu et une grande CRMSE. Les signaux diffèrent davantage dans la baie de Passamaquoddy, bien que les grandes valeurs de la CRMSE pour la température du SPCOG-E suggèrent que la résolution peut être un problème pour le SPCOG-E dans la région. Il n'y a pas beaucoup de profils dans la partie supérieure de la baie de Fundy, mais le Fundy500 correspond au SPCOG-E pour la température et a une plus petite CRMSE pour la salinité. Il y a des sources d'eau douce dans la partie supérieure de la baie de Fundy qui ne sont pas incluses dans le Fundy500, mais qui sont prises en compte dans la climatologie des eaux de ruissellement utilisée dans le SPCOG-E.

5.3.4 Traversiers

Il n'y a pas de traversiers équipés de thermosalinographes dans la baie de Fundy, bien qu'il y ait des discussions de longue date pour en installer un sur le traversier entre Digby et Saint John.

5.4 DÉRIVE

Les données des bouées dérivantes utilisées pour l'évaluation dans les modèles de la baie de Fundy et de Saint John proviennent de deux sources. Quatorze bouées dérivantes Davis ont été déployées dans le port de Saint John entre décembre 2019 et mars 2020 dans le cadre du PPO, à l'appui de l'évaluation du modèle (Schillinger n.d.). Elles ont été déployées par paires environ toutes les deux semaines au cours de cette période. Un deuxième groupe de 108 bouées dérivantes a été déployé par la Fundy North Fisherman's Association (FNFA) dans le cadre du Programme sur les données environnementales côtières de référence du PPO (Mitchell 2022). Ces bouées dérivantes ont été conçues à la Station biologique de St. Andrews (SBSA) et prennent deux formes. La moitié des bouées dérivantes de la FNFA sont des bouées dérivantes, appelées Disk, en forme de disque de 50 cm de diamètre et de 11 cm de hauteur à moitié submergé. L'autre moitié est constituée de bouées dérivantes, appelées Long, de 72,5 cm de hauteur et de 11,5 cm de largeur, composées d'ensembles d'ailerons orthogonaux orientés verticalement. Les bouées dérivantes de la FNFA ont été déployées dans le port près du terminal de GNL Canaport en grappes serrées de 4 à 5 bouées dérivantes du même type, environ une fois par mois tout au long de 2021. Les trajectoires de toutes les bouées dérivantes utilisées pour l'évaluation du modèle sont présentées à la figure 79.

Le rapport de surface de traînée et le coefficient de prise au vent pour les bouées dérivantes conçues par la SBSA ont été calculés selon la même méthode que celle appliquée aux bouées dérivantes de type commercial dans Hourston (2021). Les rapports de surface de traînée de 0,034 et de 0,236 pour les bouées dérivantes Long et Disk de la SBSA donnent des coefficients de prise au vent efficaces de 1,64 et de 2,68 %, ce qui comprend 1 % pour la dérive de Stokes, comme le recommandent Sutherland *et al.* (2020). La bouée dérivante Davis a un rapport de surface de traînée de 0,011 (Hourston 2021) et un coefficient de prise au vent de 1,27 %.

Toutes les données des bouées dérivantes de la région de Saint John ont été interpolées sur une base horaire et rognées pour se trouver dans les limites terrestres et océaniques du domaine du SJ100. Des simulations de dérive ont été amorcées chaque heure à la position des vraies bouées dérivantes et ont duré 25 heures. Des simulations de dérive ont été effectuées à l'aide des courants de la couche de surface du SJ100, du Fundy500 et du SPCOG-E, qui ont tous une épaisseur d'environ 1 m.

La figure 80, la figure 81 et la figure 82 montrent l'indice de comparaison de Molcard (en haut) et la distance de séparation moyenne (en bas) des bouées dérivantes Davis, Long et Disk, respectivement, en fonction de l'heure de simulation pour chaque modèle de circulation. Les indices à 4 points horaires sont indiqués dans le tableau 24. Pour les bouées dérivantes Davis, les trois modèles ont une performance similaire, tandis que pour les bouées dérivantes Long et Disk, l'indice du SPCOG-E est inférieur à celui du Fundy500 et du SJ100. Pour les trois types de bouées dérivantes, les résultats des trois modèles se situent bien dans la plage d'un écart-type. Les distances de séparation moyennes augmentent continuellement au cours des périodes de simulation de 25 heures, avec une augmentation plus rapide plus tôt dans les simulations, et une augmentation plus graduelle plus tard au cours des périodes. Les indices de comparaison de Molcard diminuent au cours de la période de simulation, mais montrent également un signal périodique fort à la période de marée M2 dominante. Le comportement périodique de l'indice de comparaison de Molcard s'explique par sa dépendance à l'égard de la distance de la position initiale des bouées dérivantes dans le dénominateur du calcul de l'indice (voir la section 4.1.4). Dans cette zone de forte marée, le mouvement dominant de chaque bouée dérivante suit une ellipse de marée. Quelle que soit l'heure de début, chaque bouée dérivante revient près de sa position de départ après avoir terminé une ellipse de marée complète. À ces moments, le déplacement de la bouée dérivante par rapport à sa position de départ est faible par rapport à son déplacement, parfois juste avant ou après une période de marée complète. Les distances de séparation augmentent de façon monotone, de sorte que la variation de l'indice de Molcard avec la période de la M2 indique que l'indice n'est peut-être pas le meilleur choix pour un régime de débit avec marée élevé.

L'indice de comparaison lors de la simulation des bouées dérivantes Disk (figure 82) est inférieur à celui des bouées dérivantes Davis (figure 80) et Long (figure 81) pendant les 12 premières heures et semblable pendant les 12 heures suivantes. Un plus faible indice est attendu puisque les disques occupent seulement les 5,5 cm supérieurs de la colonne d'eau, comparativement à 0,95 m et 0,725 m pour les bouées dérivantes Davis et longues, qui sont beaucoup plus près de l'épaisseur supérieure d'environ 1 m représentée par la couche de surface du modèle. Ce résultat indique que soit les courants de surface de 1 m sont verticalement uniformes, soit que tout cisaillement dans le premier mètre est proportionnel au vent et a été raisonnablement pris en compte par le coefficient de prise au vent plus important utilisé pour les bouées dérivantes Disk.

De nombreux facteurs peuvent contribuer aux écarts-types importants des indices de comparaison et des distances de séparation, qui indiquent une grande variation dans l'espace et dans le temps de la précision de la prédiction de la dérive. Outre les inexactitudes potentielles des trois modèles de circulation, l'effet du vent et des vagues sur ces bouées dérivantes est peu limité. Pour les bouées dérivantes de la SBSA en particulier, le coefficient de prise au vent est estimé à partir de la forme des bouées dérivantes, mais aucune étude sur le terrain n'a été publiée pour établir leur coefficient type. Pour les trois types de bouées dérivantes, le coefficient de prise au vent supplémentaire ajouté pour tenir compte de la dérive de Stokes est tiré de la littérature fondée sur des analyses en haute mer, et non d'une information propre au champ de vagues près de Saint John, qui est très à l'abri de la houle de l'océan et sujet à une courte remontée des vents du nord et de l'ouest. Par conséquent, il pourrait y avoir beaucoup de place à l'amélioration des indices de comparaison en simulation de dérive si les paramètres de simulation étaient optimisés pour les modèles à haute résolution horizontale et adaptés à cette région géographique.

6 RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES PRÉVISIONS

L'évaluation des prévisions est effectuée sur une période de deux mois, du 3 décembre 2021 au 31 janvier 2022, et des prévisions de 48 heures sont diffusées quotidiennement à partir de la pseudo-analyse quotidienne (c.-à-d. simulation rétrospective). Seules les observations du niveau de l'eau et de la TSM sont utilisées pour évaluer les prévisions, car il n'y avait pas d'observations d'ADCP horizontaux utilisables dans la période de deux mois. Le niveau d'eau résiduel est évalué à Saint John (00065), à Eastport (marégraphe NOAA 8410140) et à Cutler Farris (marégraphe NOAA 8411060). La TSM est évaluée aux bouées Smart, 44490 et FORCE, à Eastport et à Cutler Farris.

6.1 NIVEAU D'EAU RÉSIDUEL

Le biais et la CRMSE du niveau d'eau résiduel sont tracés en fonction de l'échéance pour chacun des trois marégraphes à la figure 83, à la figure 84 et à la figure 85. Le biais pour le Fundy500 à Cutler Farris et à Eastport est d'environ -0,03 m et -0,17 m respectivement, et le SPCOG-E a produit des résultats légèrement plus habiles; il y a un signal semi-diurne visible à Cutler Farris, mais aucune tendance évidente à Eastport au cours des 48 heures. Les deux domaines du modèle portuaire ont une performance supérieure au SPCOG-E à Saint John, et le SJ100 a un biais plus faible (-0,02 m) et une CRMSE plus petite (~0,07 m) que le Fundy500. La variabilité de la CRMSE est légèrement plus grande vers la fin de la prévision qu'au début, bien que la moyenne d'ensemble demeure inférieure à 0,1 m pour le SJ100 à chaque échéance.

6.2 ADCP HORIZONTAL

Aucune donnée d'ADCP horizontal utilisable n'était disponible pendant la période d'évaluation des prévisions.

6.3 TEMPÉRATURE DE SURFACE DE LA MER

Les tracés de biais et de la CRMSE en fonction de l'échéance pour la bouée 44490, la bouée Smart et la bouée FORCE sont présentés à la figure 86, à la figure 87 et à la figure 88. Ces trois emplacements couvrent la majeure partie du domaine, ce qui donne un bon aperçu de la façon dont la TSM est modélisée dans la région.

La bouée 44490 est située au large de Grand Manan, près de l'entrée de la baie de Fundy. Comme pour la simulation rétrospective, le SPCOG-E a un biais (plus chaud) plus petit que le Fundy500 à chaque échéance, bien que le Fundy500 ne soit pas plus d'un demi-degré plus chaud que les observations. Cependant, la CRMSE du Fundy500 est mieux que celle du SPCOG-E, peut-être en partie parce que la circulation des marées s'améliore au Fundy500 par rapport au SPCOG-E. À la bouée Smart près de Saint John, le SPCOG-E est légèrement chaud, le Fundy500 est légèrement froid et le SJ100 n'a pas de biais net important. La CRMSE est également plus petite pour le SJ100 que le Fundy500 ou le SPCOG-E, ce qui indique que la variabilité est mieux saisie. Étant donné que le panache de la rivière n'a pas de signal de température haute fréquence imposé directement par l'eau de la rivière en amont, ces résultats sont encourageants. Les résultats à la bouée FORCE montrent un signal semi-diurne clair, ce qui indique qu'il y a des écarts dans la circulation des marées dans la région; cela n'est pas surprenant.

7 SOMMAIRE

Nous avons montré que les modèles portuaires Fundy500 et SJ100 sont robustes, stables et habiles. Nous avons procédé à une simulation rétrospective de six ans qui comprenait deux inondations historiques et quatre ouragans, et le modèle est demeuré stable et a produit des résultats physiques tout au long de la période. Nous avons également réalisé des prévisions de 48 heures pendant deux mois en hiver, avec des prévisions lancées à chaque jour.

Dans la région immédiate de Saint John, nous constatons que le SJ100 est le plus précis pour la reproduction des observations des trois solutions de modèle envisagées; cela est particulièrement vrai pour le niveau de l'eau et les courants. Les observations à long terme, y compris les marégraphes et la bouée Smart Atlantic, montrent que les modèles donnent des résultats constants d'une année à l'autre. Les observations sont concentrées dans la région de Saint John, mais le Fundy500 et le SPCOG-E peuvent reproduire des observations dans les parties inférieure et centrale de la baie de Fundy également. Les résultats des marées dans la partie supérieure de la baie de Fundy sont étonnamment acceptables pour le Fundy500, et nous prévoyons qu'ils seront encore améliorés en passant au NEMO4. Le SJ100 est toujours le meilleur système pour reproduire les courants observés dans la région de Saint John, surpassant parfois de loin le SPCOG-E.

Notre analyse de la dérive montre que le modèle portuaire fonctionne de façon comparable au SPCOG-E sur le plan statistique. Le Fundy500 et le SJ100 ont des indices de Molcard légèrement plus élevés que le SPCOG-E pour les bouées dérivantes Long, mais des indices légèrement plus faibles pour les bouées dérivantes Davis et presque les mêmes indices pour les bouées Disk. L'écart-type des deux statistiques est important pour les trois types de bouées dérivantes, et les différences entre les modèles ne sont pas significatives.

Les prévisions réalisées sur une période de deux mois ont également été analysées. Nous ne constatons aucune croissance significative des erreurs au cours de la durée de prévision de 48 heures, et les modèles portuaires sont habiles à reproduire les niveaux d'eau totaux et résiduels ainsi que la TSM. Les modèles portuaires donnent des résultats plus performants que le SPCOG-E, avec des biais et une CRMSE plus petits.

Nous concluons que le système de modèle portuaire à deux niveaux (Fundy500 et SJ100) représente une nette amélioration par rapport à la solution de modèle existante (SPCOG-E). Notre évaluation a été conçue en tenant compte des applications de la prédiction de la dérive et de la navigation électronique, et nous avons montré que, en particulier, le modèle portuaire est apte à reproduire les courants près de la surface, les niveaux d'eau et les températures de surface.

8 CONSTATATIONS PRINCIPALES

1. Le SJ100 et le Fundy500 surpassent ou égalent les compétences du SPCOG-E pour tous les types d'observations prises en compte.
2. Le SJ100 donne des résultats plus précis sur les marées et les niveaux d'eau résiduels que le Fundy500 ou le SPCOG-E à Saint John. Le Fundy500 fournit des résultats améliorés par rapport au SPCOG-E.
3. Le SJ100 est de loin le plus apte des trois modèles considérés pour reproduire les courants dans le port de Saint John et autour de celui-ci. Il reproduit avec précision la circulation avec et résiduelle mieux que le Fundy500 ou le SPCOG-E, surtout dans l'arrière-port.

-
4. Les résultats des ADCP horizontaux montrent que le flux d'eau sortant de la rivière est adéquatement représenté par le SJ100, mais qu'il n'est pas bien saisi par le Fundy500 ou le SPCOG-E.
 5. La variabilité de la TSM et des sondes CTD ancrées est bien saisie par le SJ100, bien que les trois modèles montrent un léger biais.
 6. Le SJ100 et le Fundy500 ont un biais chaud dans les profils CTD qui n'est pas observé dans le SPCOG-E, bien que les valeurs de la CRMSE soient presque aussi importantes que le biais. Le SJ100 et le Fundy500 affichent tous deux de meilleurs résultats pour la salinité que le SPCOG-E.
 7. Les résultats de dérive pour le Fundy500 et le SJ100 sont comparables à ceux du SPCOG-E.
 8. Les prévisions du niveau de l'eau et de la température de surface ne montrent pas de croissance importante du biais ou de la CRMSE au cours de la période de prévision. Le SJ100 fournit les meilleurs résultats pour les ondes de tempête, les niveaux d'eau totaux et les températures de surface dans la région de Saint John.

9 REMERCIEMENTS

Jean-Philippe Paquin, Youyu Lu et Xianmin Hu ont élaboré le modèle portuaire original de Saint John sur lequel se base le SPOP, avec l'aide de Mitchell O'Flaherty Sproul et de Susan Haigh. Les observations ont été fournies et traitées par Doug Schillinger, Fred Page, Peter Kraska, Justine McMillan, le Programme sur les données environnementales côtières de référence, la Fundy North Fisherman's Association et Fundy FORCE. Les données bathymétriques et côtières ont été fournies par le Service hydrographique du Canada et Phil MacAulay. Le code Matlab pour NS_TIDE a été fourni par Pascal Matte. L'analyse de la dérive a été effectuée à l'aide d'outils conçus par Nancy Soontiens et Jennifer Holden. Toutes les simulations ont été effectuées à l'aide d'une suite Maestro, et l'aide avec cette suite a été fournie par Sarah MacDermid et Ji Lei. Un grand merci à tous ces collègues et collaborateurs pour leurs points de vue et leurs contributions.

10 RÉFÉRENCES CITÉES

- Aretxabaleta, Alfredo L., Dennis J. McGillicuddy, Keston W. Smith, and Daniel R. Lynch. 2008. "Model Simulations of the Bay of Fundy Gyre: 1. Climatological Results." *Journal of Geophysical Research* 113 (C10): C10027. <https://doi.org/10.1029/2007JC004480>.
- Aretxabaleta, Alfredo L., Dennis J. McGillicuddy, Keston W. Smith, James P. Manning, and Daniel R. Lynch. 2009. "Model Simulations of the Bay of Fundy Gyre: 2. Hindcasts for 2005–2007 Reveal Interannual Variability in Retentiveness." *Journal of Geophysical Research* 114 (C9): C09005. <https://doi.org/10.1029/2008JC004948>.
- 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).
- Dupont, Frédéric, Charles G. Hannah, and David Greenberg. 2005. "Modelling the Sea Level of the Upper Bay of Fundy." *Atmosphere-Ocean* 43 (1): 33–47. <https://doi.org/10.3137/ao.430103>.
- 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>.
- Garrett, Christopher. 1972. "Tidal Resonance in the Bay of Fundy and Gulf of Maine." *Nature* 238 (5365): 441–43. <https://doi.org/10.1038/238441a0>.
- Horwitz, Rachel M., Stephanie Taylor, Youyu Lu, Jean-Philippe Paquin, Doug Schillinger, and David A. Greenberg. 2021. "Rapid reduction of tidal amplitude due to form drag in a narrow channel." *Continental Shelf Research*, 213, 104299. doi:10.1016/j.csr.2020.104299
- 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.
- Ku, L.-F., D. A. Greenberg, C. J. Garrett, and F. W. Dobson. 1985. "Nodal Modulation of the Lunar Semidiurnal Tide in the Bay of Fundy and Gulf of Maine." *Science*, 230, 69-71. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.230.4721.69>
- 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.
- Madec, Gurvan. 2016. *NEMO Ocean Engine*. Note Du Pole de Modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace 27. NEMO European Consortium.
-

-
- 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), 569-589.
- 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>.
- Mitchell, L. 2022. Data provided by the Fundy North Fisherman's Association. *Personal Communication*. Retrieved from www.fundynorth.org/opp
- Molcard, A., P.M. Poulain, P. Forget, A. Griffa, Y. Barbin, J. Gaggelli, J.C. De Maistre, and M. Rixen. 2009. "Comparison between VHF Radar Observations and Data from Drifter Clusters in the Gulf of La Spezia (Mediterranean Sea)." *Journal of Marine Systems* 78 (November): S79–89. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.01.012>.
- Niiler, Pearn P., Andrew S. Sybrandy, Kenong Bi, Pierre M. Poulain, and David Bitterman. 1995. "Measurements of the Water-Following Capability of Holey-Sock and TRISTAR Drifters." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 42 (11–12): 1951–64. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00076-3).
- Nudds, Shannon, Youyu Lu, Simon Higginson, Susan P. Haigh, Jean-Philippe Paquin, Mitchell O'Flaherty-Sproul, Stephanie Taylor, et al. 2020. "Evaluation of Structured and Unstructured Models for Application in Operational Ocean Forecasting in Nearshore Waters." *Journal of Marine Science and Engineering* 8 (7): 484. <https://doi.org/10.3390/jmse8070484>.
- Paquin, Jean-Philippe, Youyu Lu, Stephanie Taylor, Hauke Blanken, Guillaume Marcotte, Xianmin Hu, Li Zhai, et al. 2020. "High-Resolution Modelling of a Coastal Harbour in the Presence of Strong Tides and Significant River Runoff." *Ocean Dynamics* 70 (3): 365–85. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01334-7>.
- Paquin, Jean-Philippe, François Roy, Gregory C. Smith, Frédéric Dupont, 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 1.5.0 to 2.0.0. Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction Tech. Note. https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoe/product_guide/docs/tech_notes/technote_ciops-east-200_e.pdf.
- Paquin, Jean-Phillipe, Gregory C. Smith, Frederic Dupont, Sarah MacDermid, Yukie Hata, Oleksandr Huizy, Ji Lei, Yosvany Martinez, Michael Dunphy, Maxim Krassovski, Stephanie Taylor, Hauke Blanken, Jennifer Holden, Nancy Soontiens, Susan E. Allen, and Doug Latornell. 2021b. "Coastal Ice Ocean Prediction System for the West Coast of Canada (CIOPS-W): Update from version 1.5.0 to 2.0.0." Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction Tech. Note. https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoe/product_guide/docs/tech_notes/technote_ciops-west-200_e.pdf.
-

-
- Paquin, Jean-Phillipe, Gregory C. Smith, Francois Roy, Frederic Dupont, Sarah MacDermid, Ji Lei, Youyu Lu, Stephanie Taylor, Hauke Blanken, and Li Zhai. 2022. "Coastal Ice Ocean Prediction System for the West Coast of Canada (CIOPS-W): System Description for Versions 1.0.0 and 1.5.0." Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction Tech. Note.
https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoe/product_guide/docs/tech_notes/technote_ciops-west-100_e.pdf.
- Robin, Catherine, Shannon Nudds, Phillip M. MacAulay, André G. Godin, Bodo De Lange Boom, and Jason Bartlett. 2016. "Hydrographic Vertical Separation Surfaces (HyVSEPs) for the Tidal Waters of Canada." *Marine Geodesy*, 39(2), 195-222.
doi:10.1080/01490419.2016.1160011
- 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>.
- Schillinger, D. J. (n.d.). Oceanographic data collected at Saint John Harbour in support of the development of a real-time, port scale, prediction system. *in preparation*.
- Smith, Stuart D. 1988. "Coefficients for Sea Surface Wind Stress, Heat Flux, and Wind Profiles as a Function of Wind Speed and Temperature." *Journal of Geophysical Research* 93 (C12): 15467. <https://doi.org/10.1029/JC093iC12p15467>.
- Soontiens, Nancy, and Jennifer Holden J. 2024. "A framework for evaluation and characterization of drift prediction in the marine environment." Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 383: ix + 45 p. <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/41252287.pdf>.
- Sutherland, Graig, Nancy Soontiens, Fraser Davidson, Gregory C. Smith, Natacha Bernier, Hauke Blanken, Douglas Schillinger, et al. 2020. "Evaluating the Leeway Coefficient of Ocean Drifters Using Operational Marine Environmental Prediction Systems." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 37 (11): 1943–54. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0013.1>.
- Zhang, Minghong, William Perrie, and Zhenxia Long. 2019. "Springtime North Pacific Oscillation and Summer Sea Ice in the Beaufort Sea." *Climate Dynamics* 53 (1–2): 671–86.
<https://doi.org/10.1007/s00382-019-04627-1>.

11 TABLEAUX

Tableau 1 : Paramètres clés de configuration des modèles Fundy500 et SJ100.

Paramètre de la liste nominale	Grille externe (Fundy500)	Grille interne (SJ100)
Dimensions de la grille, NX x NY x NZ	929 x 429 x 40	799 x 1009 x 34
Résolution horizontale	~420 m	~85 m
Résolution verticale	1 m – 18 m	1 m – 16 m
Pas de temps (barocline/barotrope)	30 s/1 s	10 s/0,333 s
Décalage de la hauteur de la surface de la mer aux conditions aux limites ouvertes	0,69 m (uniquement S et O)	0,0 cm
Source de forçage des marées	WebTide (Scotia-Fundy-Maine) et inférence	Fundy500
Composantes de marée	M2, S2, N2, K1, O1, L2, K2, NU2, 2N2, M4, P1, Q1, λ_2 , T2	M2, S2, N2, K1, O1, L2, K2, NU2, 2N2, M4, P1, Q1, λ_2 , T2
Équation d'état	EOS-80	EOS-80
Surface libre	Volume variable	Volume variable
Pénétration de la lumière	Deux bandes	Deux bandes
Condition aux limites latérales	Glissement partiel : shlat=1	Glissement partiel : shlat=1
Advection de mouvement	Forme vectorielle, avec 5 sous-étapes pour l'advection verticale	Forme vectorielle, avec 5 sous-étapes pour l'advection verticale
Diffusion latérale de mouvement	Opérateur laplacien horizontal et méthode Smagorinsky	Opérateur laplacien horizontal et méthode Smagorinsky
Advection de traceur	Dissipation de la variance totale, avec 5 sous-étapes pour l'advection verticale	Dissipation de la variance totale, avec 5 sous-étapes pour l'advection verticale

Paramètre de la liste nominale	Grille externe (Fundy500)	Grille interne (SJ100)
Diffusion latérale du traceur	Opérateur laplacien isoneutre et méthode Smagorinsky	Opérateur laplacien isoneutre et méthode Smagorinsky
Diffusion verticale	k-ε (GLS)	k-ε (GLS)
Frottement sur le fond	Quadratique, avec friction supplémentaire aux chutes réversibles et dans le passage Minas.	Quadratique, avec friction supplémentaire aux chutes réversibles

Tableau 2 : Composantes de marée déduites utilisées dans le Fundy500. La première composante de chaque paire est déduite par rapport à la deuxième composante.

Composantes	Rapports d'amplitude (Yarmouth, Cutler-Farris)	Différences de phase (Yarmouth, Cutler-Farris)	Amplitude	Étape
λ2 et L2	0,301, 0,370	-5, -23	0,335 m	-14,0°
P1 et K1	0,300, 0,334	0, +2	0,315 m	+1,0°
Q1 et O1	0,157, 0,159	-14, -19	0,158 m	-16,5°
T2 et S2	0,089, 0,087	-20, -21	0,088 m	-20,5°

Tableau 3 : Réglage des composantes de marée entre le Fundy500 et le SJ100.

Composante	Amplitude	Étape	Composante	Amplitude	Étape
S2	-0,04 m	-4,0°	K2	Aucune	-6,0°
N2	Aucune	-4,0°	λ2	Aucune	+7,5°
O1	Aucune	+5,5°	P1	Aucune	-132,0°
K1	Aucune	+5,5°	T2	+0,01 m	-23,5°
L2	+ 0,01 m	+18,0°	Q1	Aucune	-62,5°
2N2	- 0,02 m	-29,0°	M4	Aucune	-252,0°
NU2	+0,01 m	+6,0°	—	—	—

Tableau 4 : Description des marégraphes utilisés dans les calculs NS_TIDE.

Identifiant du marégraphe	Type de signal	Utilisation	Retard dans NS_TIDE	Procédure de repli
01AP003 – Oak Point	Marée fluviale mixte	Simulation rétrospective des conditions aux limites ouvertes, Prévion des conditions aux limites ouvertes	—	Simulation rétrospective : Écarts importants corrigés avec NS_TIDE Prévion : Prévü à l’aide de NS_TIDE
01AK003 – Fredericton	Fluvial	Marégraphe en amont NS_TIDE	+ 18,5 heures	Persistance, puis retour graduel à la climatologie
00065 – Saint John	Marée	Marégraphe en aval NS_TIDE	0 heure	Aucune nécessité, car les données utilisées sont des composantes statiques calculées à partir des observations
01AP005 – Chutes réversibles	Marée fluviale très mixte	Le marégraphe NS_TIDE doit inclure le décalage de phase au-dessus du seuil	+ 2 heures	Composantes harmoniques (pour éviter d’avoir besoin d’une solution NS_TIDE récursive)

Tableau 5 : Valeurs de conversion du niveau de référence vertical pour les marégraphes.

Station	Niveau de référence d’origine	Conversion à CGVD28
00065 – Saint John	Zéro des cartes	-4,17 m
8410140 – Eastport	Moyenne des basses mers	-2,69 m
8411060 – Cutler Farris	Moyenne des basses mers	-2,07 m
00320 – Parker’s Cove	Zéro des cartes	-4,88 m

Tableau 6 : Paramètres de niveau d'eau de marée de M2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.

Observation			Erreur d'amplitude			Erreur de phase			Erreur de marée		
Nom de la station	Ampl	Phase	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	2,022	93,61	+0,128	+0,035	-	-1,33	+1,60	-	0,097	0,047	-
Eastport	2,654	98,27	+0,336	+0,007	-	+2,78	+3,23	-	0,257	0,106	-
Saint John	3,055	97,92	+0,249	+0,023	+0,037	+0,01	-0,72	-0,44	0,176	0,032	0,031
Parkers Cove	3,433	88,69	+0,221	-0,141	-	+3,10	+1,48	-	0,207	0,117	-

Tableau 7 : Paramètres de niveau d'eau de marée de N2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.

Observation			Erreur d'amplitude			Erreur de phase			Erreur de marée		
Nom de la station	Ampl	Étape	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	0,422	60,92	+0,011	-0,005	-	0	+5,21	-	0,008	0,027	-
Eastport	0,539	66,37	+0,048	-0,010	-	+5,93	+8,26	-	0,053	0,055	-
Saint John	0,615	65,74	+0,026	-0,005	-0,004	+2,57	+3,71	-0,44	0,027	0,028	0,005
Parkers Cove	0,679	56,82	+0,025	-0,028	-	+6,18	+6,16	-	0,056	0,054	-

Tableau 8 : Paramètres de niveau d'eau de marée de S2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.

Observation			Erreur d'amplitude			Erreur de phase			Erreur de marée		
Nom de la station	Ampl	Étape	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	0,314	131,34	+0,001	+0,015	-	-6,29	+5,51	-	0,024	0,024	-
Eastport	0,419	138,70	+0,026	+0,012	-	-0,88	+8,37	-	0,019	0,045	-
Saint John	0,472	137,97	+0,018	+0,036	-0,001	-4,09	+3,75	-0,46	0,028	0,034	0,003
Parkers Cove	0,537	131,19	+0,009	+0,011	-	-2,98	+3,59	-	0,021	0,025	-

Tableau 9 : Paramètres de niveau d'eau de marée de K1 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.

Observation			Erreur d'amplitude			Erreur de phase			Erreur de marée		
Nom de la station	Ampl	Étape	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	0,148	193,89	+0,014	-0,003	-	-0,53	-4,35	-	0,010	0,008	-
Eastport	0,158	196,96	+0,018	-0,004	-	+0,16	-3,70	-	0,013	0,008	-
Saint John	0,160	194,59	+0,016	-0,002	-0,003	+0,58	-5,01	+0,78	0,011	0,010	0,003
Parkers Cove	0,165	190,27	+0,014	-0,005	-	+1,64	-4,17	-	0,011	0,009	-

Tableau 10 : Paramètres de niveau d'eau de marée de O1 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.

Observation			Erreur d'amplitude			Erreur de phase			Erreur de marée		
Nom de la station	Ampl	Étape	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	0,112	173,04	+0,010	-0,002	-	-3,36	-6,23	-	0,009	0,009	-
Eastport	0,116	176,23	+0,016	-0,001	-	-3,64	-5,93	-	0,013	0,008	-
Saint John	0,117	172,06	+0,014	+0,001	+0,001	-1,25	-5,63	+0,67	0,010	0,008	0,001
Parkers Cove	0,123	171,00	+0,010	-0,004	-	-2,96	-7,47	-	0,008	0,012	-

Tableau 11 : Paramètres de niveau d'eau de marée de L2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.

Observation			Erreur d'amplitude			Erreur de phase			Erreur de marée		
Nom de la station	Ampl	Étape	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	0,112	136,79	-0,051	-0,006	-	+0,25	-13,36	-	0,036	0,018	-
Eastport	0,149	137,25	-0,063	-0,006	-	-8,81	-16,57	-	0,046	0,030	-
Saint John	0,182	137,47	-0,081	-0,018	-0,011	-7,81	-18,34	+0,62	0,059	0,041	0,008
Parkers Cove	0,194	128,84	-0,081	-0,019	-	-9,15	-17,71	-	0,060	0,042	-

Tableau 12 : Paramètres de niveau d'eau de marée de NU2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.

Observation			Erreur d'amplitude			Erreur de phase			Erreur de marée		
Nom de la station	Ampl	Étape	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	0,098	68,80	-0,080	+0,006	-	+17,64	-3,60	-	0,057	0,006	-
Eastport	0,131	73,08	-0,105	+0,003	-	+7,97	-2,62	-	0,075	0,005	-
Saint John	0,148	73,42	-0,120	+0,005	+0,013	+8,96	-7,59	-0,94	0,085	0,015	0,010
Parkers Cove	0,162	63,61	-0,131	0	-	+9,54	-4,54	-	0,093	0,009	-

Tableau 13 : Paramètres de niveau d'eau de marée de K2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.

Observation			Erreur d'amplitude			Erreur de phase			Erreur de marée		
Nom de la station	Ampl	Étape	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	0,088	130,50	-0,007	-0,004	-	-7,46	+5,19	-	0,009	0,006	-
Eastport	0,113	137,94	0	-0,005	-	+0,98	+7,59	-	0,001	0,011	-
Saint John	0,133	139,19	-0,010	-0,004	-0,002	-4,71	+1,55	-6,14	0,010	0,004	0,010
Parkers Cove	0,153	128,50	-0,015	-0,013	-	+1,10	+5,27	-	0,011	0,013	-

Tableau 14 : Paramètres de niveau d'eau de marée de 2N2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.

Observation			Erreur d'amplitude			Erreur de phase			Erreur de marée		
Nom de la station	Ampl	Étape	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	0,060	33,98	-0,057	+0,013	-	+36,11	+22,05	-	0,041	0,020	-
Eastport	0,075	37,44	-0,073	+0,013	-	+4,85	+25,04	-	0,052	0,027	-
Saint John	0,086	36,55	-0,084	+0,015	-0,011	-5,01	+21,05	-5,02	0,059	0,026	0,009
Parkers Cove	0,091	25,93	-0,089	+0,016	-	-19,59	+25,19	-	0,063	0,032	-

Tableau 15 : Paramètres de niveau d'eau de marée de λ_2 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.

Observation			Erreur d'amplitude			Erreur de phase			Erreur de marée		
Nom de la station	Ampl	Étape	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	0,035	115,00	-0,022	-0,002	-	-33,93	+0,58	-	0,018	0,002	-
Eastport	0,050	115,44	-0,029	+0,001	-	-38,93	-3,10	-	0,025	0,002	-
Saint John	0,059	114,80	-0,037	-0,001	-0,001	-36,43	-3,11	+7,02	0,030	0,002	0,005
Parkers Cove	0,065	107,80	-0,039	-0,003	-	-38,47	-4,68	-	0,033	0,004	-

Tableau 16 : Paramètres de marée de niveau d'eau P1 pour 2017. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.

Observation			Erreur d'amplitude			Erreur de phase			Erreur de marée		
Nom de la station	Ampl	Étape	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	0,050	192,81	+0,002	-0,005	-	+0,76	+127,39	-	0,001	0,060	-
Eastport	0,054	195,96	+0,003	-0,007	-	+1,73	+127,68	-	0,002	0,064	-
Saint John	0,053	191,42	+0,004	-0,007	-0,003	+2,82	+128,54	+3,60	0,003	0,064	0,003
Parkers Cove	0,059	191,97	-0,001	-0,011	-	-0,87	+126,34	-	0,001	0,067	-

Tableau 17 : Paramètres de niveau d'eau de marée de M2 pour Saint John pour chaque année de la période de simulation rétrospective. L'erreur de marée et l'amplitude sont exprimées en mètres, et les phases en degrés.

Observation			Erreur d'amplitude			Erreur de phase			Erreur de marée		
Année	Ampl	Étape	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
2016	3,073	98,10	+0,240	-0,015	+0,001	-0,19	-1,02	-0,60	0,170	0,040	0,033
2017	3,055	97,92	+0,249	+0,023	+0,037	+0,01	-0,72	-0,44	0,176	0,032	0,031
2018	3,079	97,79	+0,231	+0,009	+0,022	+0,47	-0,20	+0,07	0,164	0,010	0,016
2019	3,026	99,03	+0,278	+0,054	+0,068	-0,94	-1,59	-1,20	0,200	0,071	0,066
2020	3,046	98,44	+0,264	+0,033	+0,048	-0,55	-1,08	-0,63	0,188	0,047	0,042
2021	3,067	97,95	+0,284	+0,060	+0,074	+0,13	-0,38	+0,01	0,201	0,045	0,052

Tableau 18 : Scores pour le niveau d'eau total pour 2018.

Score : Modèle :	Biais (m)			CRMSE (m)			χ^2			Pearson		
	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	0,026	0,009	-	0,15	0,123	-	0,009	0,006	-	0,997	0,997	-
Eastport	-0,099	-0,1	-	0,314	0,194	-	0,024	0,009	-	0,995	0,995	-
Saint John	-0,033	-0,033	-0,022	0,245	0,145	0,097	0,011	0,004	0,002	0,997	0,998	0,999

Tableau 19 : Scores pour le niveau d'eau de marée pour 2018.

Score : Modèle :	CRMSE (m)			χ^2			Pearson		
	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	0,137	0,106	-	0,008	0,005	-	0,997	0,998	-
Eastport	0,3	0,175	-	0,022	0,008	-	0,996	0,996	-
Saint John	0,227	0,118	0,06	0,01	0,003	0,001	0,998	0,999	1

Tableau 20 : Scores pour le niveau d'eau résiduel pour 2018.

Score : Modèle :	CRMSE (m)			χ^2			Pearson		
	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris	0,069	0,063	-	0,246	0,203	-	0,877	0,898	-
Eastport	0,099	0,086	-	0,445	0,329	-	0,791	0,832	-
Saint John	0,107	0,084	0,079	0,572	0,353	0,315	0,728	0,827	0,843

Tableau 21 : Scores pour les ondes de tempête, en moyenne sur 11 tempêtes. Le nombre de tempêtes disponibles pour chaque station est indiqué entre parenthèses à côté du nom de la station.

Score : Modèle :	CRMSE (m)			χ^2			Pearson		
	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
Cutler Farris (11)	0,046	0,046	-	0,131	0,125	-	0,934	0,941	-
Eastport (11)	0,061	0,053	-	0,197	0,138	-	0,907	0,934	-
Saint John (11)	0,059	0,059	0,056	0,205	0,192	0,178	0,893	0,907	0,911
Parkers Cove (1)	0,056	0,055	-	0,16	0,158	-	0,932	0,943	-

Tableau 22 : Scores pour la température de surface de la mer pour toute la période de simulation rétrospective (2016-2021). À noter que les scores de Fundy FORCE peuvent ne pas être élevés, car il y a des pics de froid dus au fait que la température de l'air est mesurée plutôt que la température de l'eau (voir la figure 59). Les biais et la CRMSE sont exprimés en °C, γ^2 et Pearson sont sans unité.

Nom de la station	Score	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
44490 – Ouest de la baie de Fundy	Biais	0,122	0,481	-
	CRMSE	0,738	0,87	-
	γ^2	0,049	0,068	-
	Pearson	0,986	0,986	-
Cutler Farris	Biais	0,89	0,752	-
	CRMSE	1,238	1,04	-
	γ^2	0,137	0,097	-
	Pearson	0,963	0,969	-
Eastport	Biais	1,794	0,884	-
	CRMSE	2,344	1,041	-
	γ^2	0,584	0,115	-
	Pearson	0,936	0,98	-
FundyFORCE	Biais	0,391	0,438	-
	CRMSE	0,89	1,071	-
	γ^2	0,031	0,045	-
	Pearson	0,986	0,983	-
SmartAtlantic Saint John	Biais	-0,221	-0,064	-0,33
	CRMSE	1,268	1,356	1,161
	γ^2	0,081	0,092	0,068
	Pearson	0,962	0,953	0,966

Tableau 23 : Scores pour la température et la salinité enregistrés par les sondes CTD ancrées. Les biais et la CRMSE sont exprimés en °C et en psu pour la température et la salinité respectivement, γ^2 et Pearson sont sans unité.

Nom de la station	Variable : Modèle :	Température			Salinité		
		SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
2090_183	Biais	0,517	0,563	-	-	-	-
12019-04	CRMSE	0,904	0,872	-	-	-	-
	γ^2	0,241	0,224	-	-	-	-
	Pearson	0,964	0,969	-	-	-	-
011	Biais	-	-0,509	-0,186	-	-2,264	-3,348
Courtenay	CRMSE	-	2,384	1,861	-	13,084	9,991
Bay	γ^2	-	1,284	0,782	-	2,243	1,308
Intertidal	Pearson	-	0,502	0,588	-	-0,19	-0,019
013 SJR	Biais	-	-0,045	-0,037	-	3,599	-6,191
Narrows	CRMSE	-	0,454	0,851	-	5,37	5,399
	γ^2	-	0,151	0,531	-	0,801	0,81
	Pearson	-	0,954	0,954	-	0,569	0,552

Nom de la station	Variable : Modèle :	Température			Salinité		
		SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
050 Musquash East Headlands	Biais	-	0,628	0,49	-	2,25	2,264
	CRMSE	-	0,494	0,416	-	2,106	2,116
	χ^2	-	0,286	0,203	-	1,161	1,171
	Pearson	-	0,944	0,947	-	-0,288	-0,388
059 Musquash East Headlands	Biais	-	0,157	0,114	-	0,488	0,582
	CRMSE	-	0,508	0,478	-	0,846	0,838
	χ^2	-	0,053	0,047	-	0,75	0,737
	Pearson	-	0,974	0,977	-	0,56	0,539
060 Musquash West Headlands	Biais	-	0,174	-0,003	-	0,509	0,63
	CRMSE	-	0,51	0,602	-	0,856	0,818
	χ^2	-	0,071	0,099	-	0,66	0,603
	Pearson	-	0,966	0,95	-	0,605	0,631

Tableau 24 : Score moyen de l'indice de performance de Molcard pour chaque type et modèle de bouées dérivantes, pour 6 longueurs de simulation.

Type de bouée dérivante	Heure	Indice de performance de Molcard			Distance de séparation (km)		
		SGPOG-E	Fundy500	SJ100	SGPOG-E	Fundy500	SJ100
CODE-Davis	4	0,56	0,57	0,59	2,47	2,44	2,36
	8	0,44	0,43	0,46	4,13	4,25	4,07
	12	0,22	0,2	0,21	5,33	5,85	5,53
	16	0,32	0,27	0,29	6,12	7,35	6,83
	20	0,33	0,28	0,3	7,11	8,78	7,93
	24	0,25	0,21	0,22	7,9	10,16	8,52
SBSA Long	4	0,52	0,58	0,59	3,33	2,73	2,7
	8	0,43	0,46	0,47	5,35	4,68	4,59
	12	0,24	0,3	0,31	6,68	6,24	5,91
	16	0,33	0,36	0,37	7,68	7,49	7,27
	20	0,36	0,38	0,39	8,26	8,38	7,86
	24	0,28	0,31	0,3	9,46	9,82	8,75
SBSA Disk	4	0,49	0,52	0,52	3,4	3,21	3,3
	8	0,4	0,4	0,4	5,42	5,52	5,67
	12	0,31	0,28	0,28	6,36	7,15	7,05
	16	0,33	0,31	0,32	7,34	8,47	8,19
	20	0,23	0,29	0,3	9,54	9,55	8,84
	24	0,19	0,25	0,26	11,02	11,16	10,18

12 FIGURES

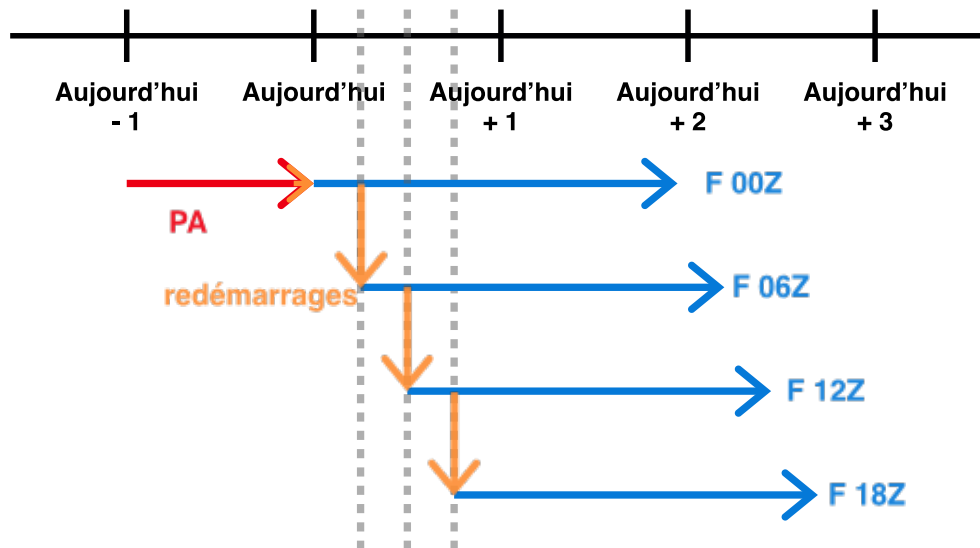


Figure 1 : Schéma de séquençage de la pseudo-analyse (PA, en rouge) et des 4 prévisions de 48 h (en bleu) pour une date donnée. Les lignes pointillées grises sont espacées de six heures et les flèches oranges indiquent les moments où un fichier de redémarrage est généré et utilisé pour lancer l'étape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

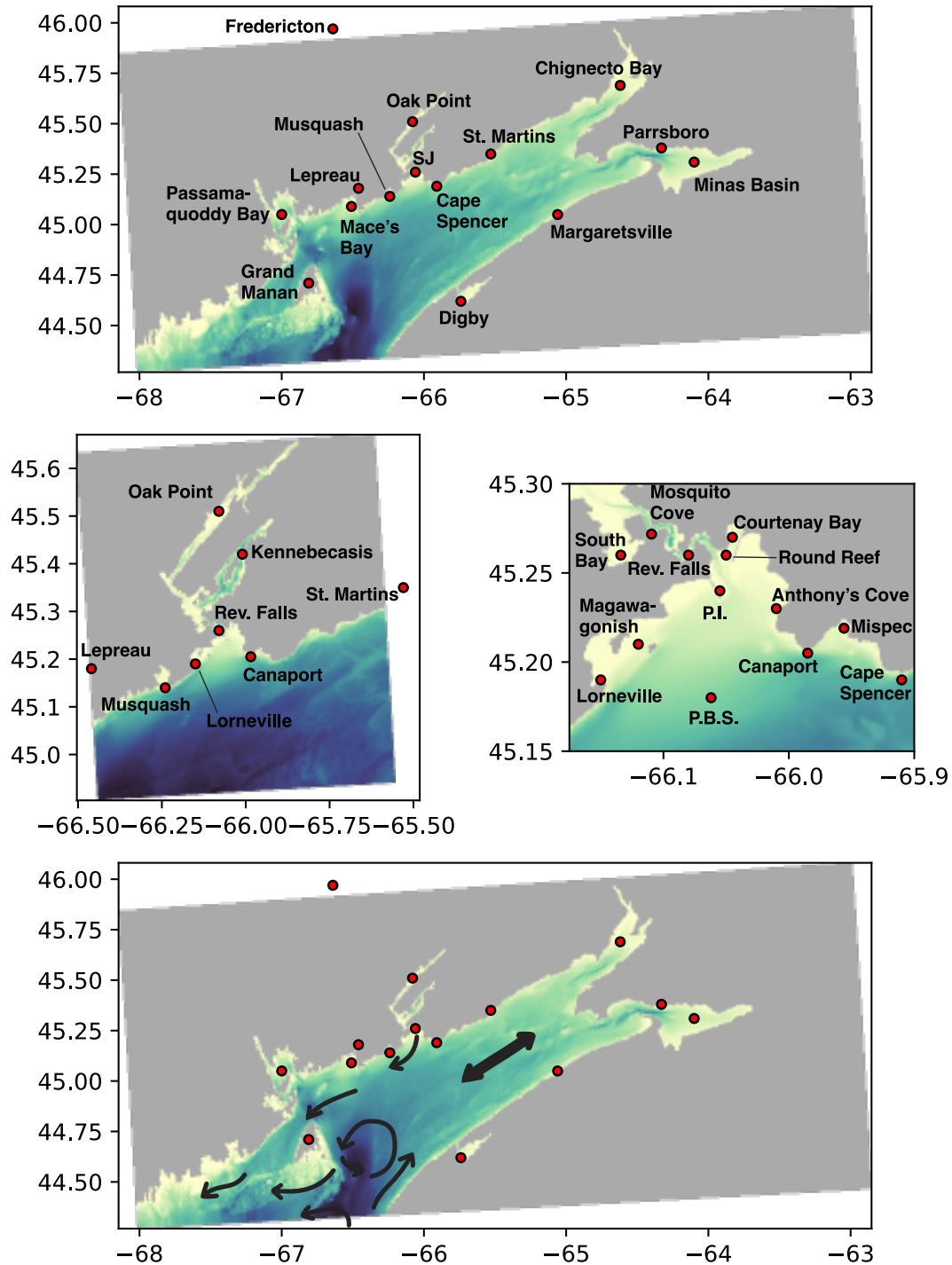


Figure 2 : Carte des domaines du Fundy500 (en haut) et du SJ100 (au milieu à gauche) avec indication des emplacements notables. Une vue agrandie d'une section du SJ100 autour du port de Saint John (au milieu à droite) montre les caractéristiques plus locales dans le port. L'image du bas est un schéma de la circulation générale dans la baie de Fundy. P.I. est l'abréviation de Partridge Island, et P.B.S. signifie Pilot Boarding Station.

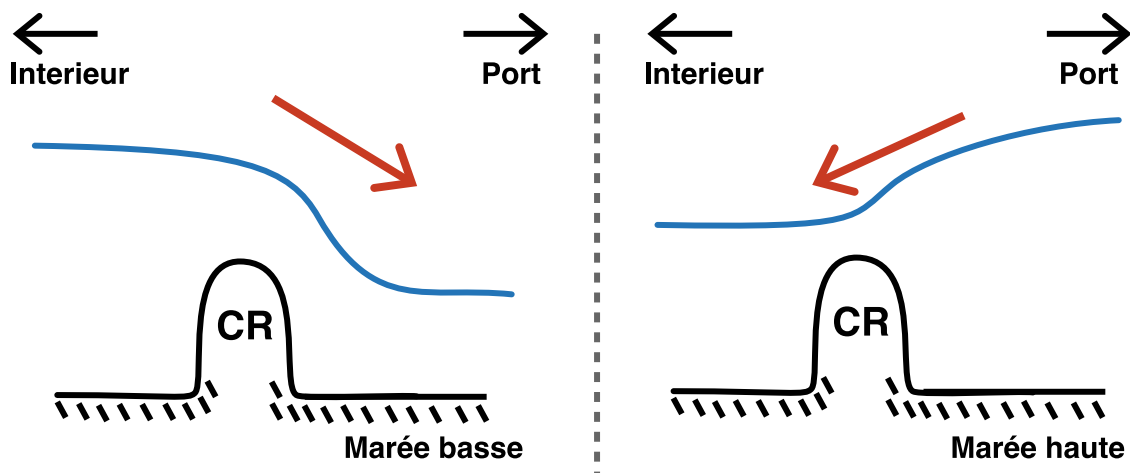


Figure 3 : Schéma du niveau d'eau aux chutes réversibles (RF) illustrant les situations à marée basse (à gauche) et à marée haute (à droite). Le niveau d'eau est indiqué par une ligne bleue, et la flèche orange indique la direction du débit.

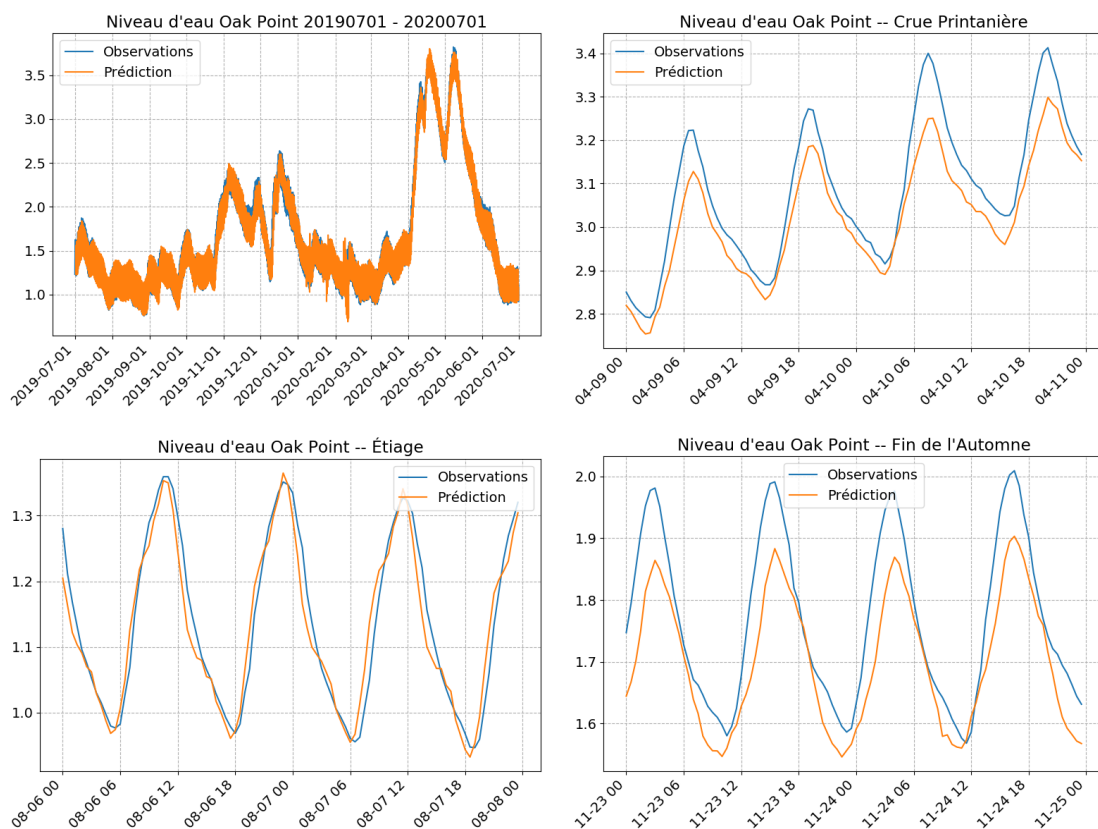


Figure 4 : Niveaux d'eau observés et prédits par NS_TIDE à Oak Point. L'image du coin supérieur gauche montre la base utilisée pour toutes les années, et les trois autres images montrent de courts fragments d'observations sur deux jours et des prévisions NS_TIDE à divers stades de la rivière.

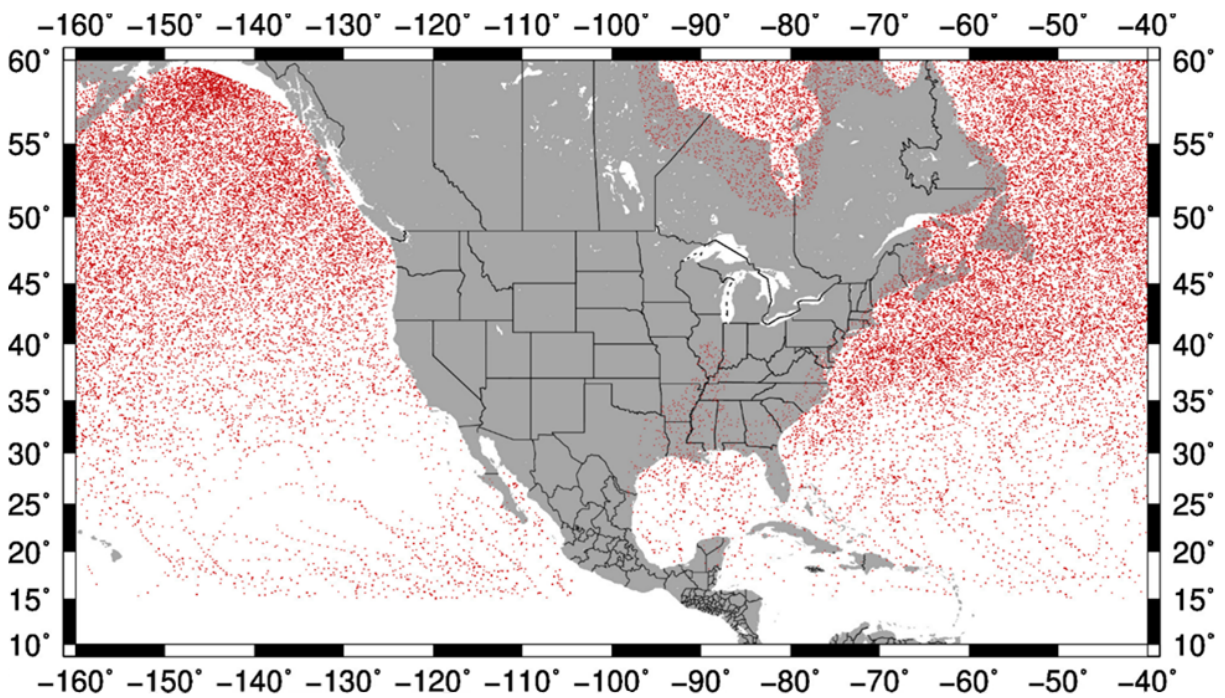


Figure 5 : Emplacements des cyclones toutes les 6 heures de 2010 à 2021.

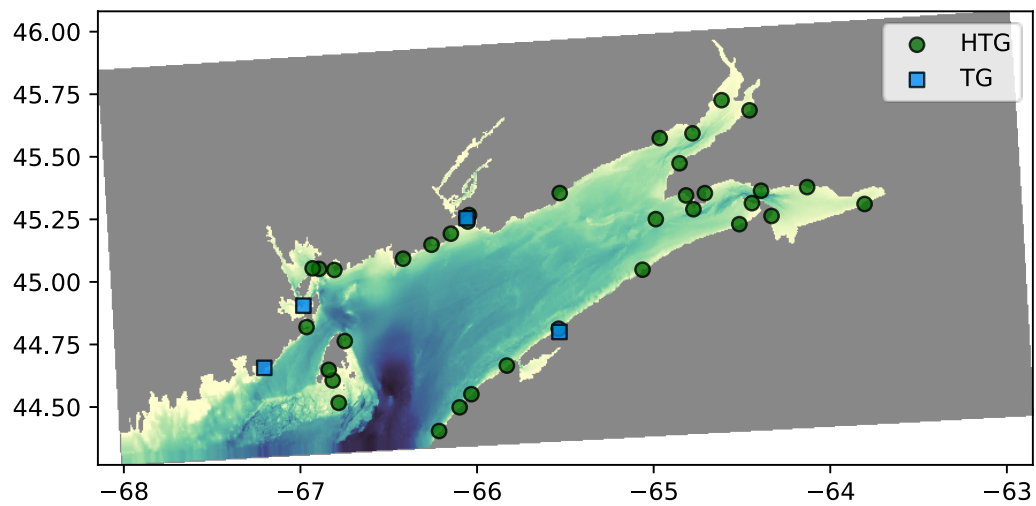


Figure 6 : Marégraphes (carrés bleus) et stations de composantes de marée (cercles verts) dans la baie de Fundy.

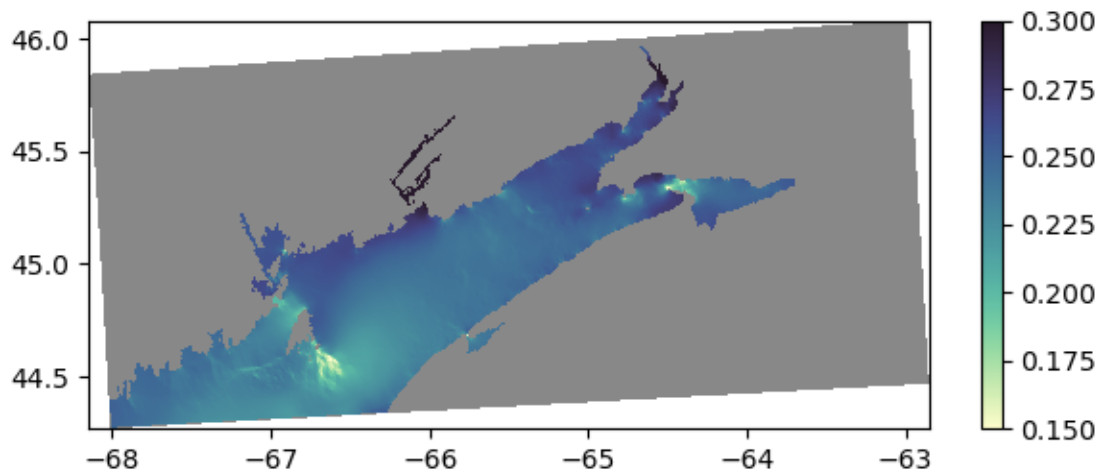


Figure 7 : HSM moyenne de la simulation rétrospective pour le Fundy500. Les unités sont en mètres.

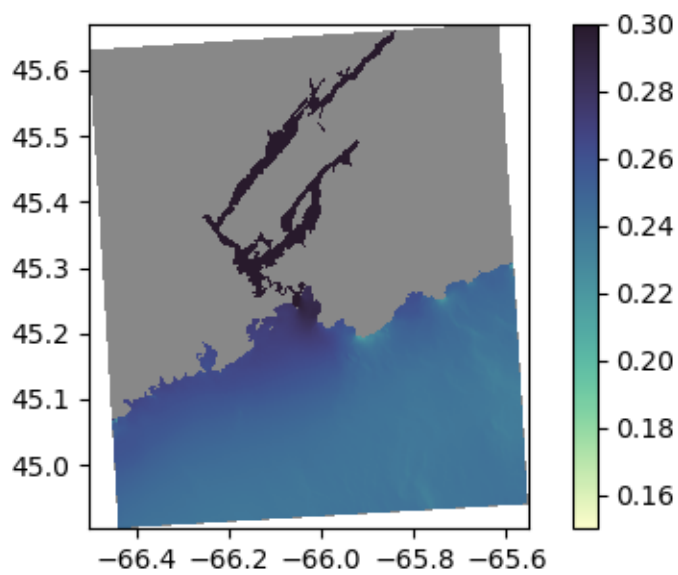


Figure 8 : HSM moyenne de la simulation rétrospective pour le SJ100. L'échelle de couleurs est la même qu'à la Figure 7.

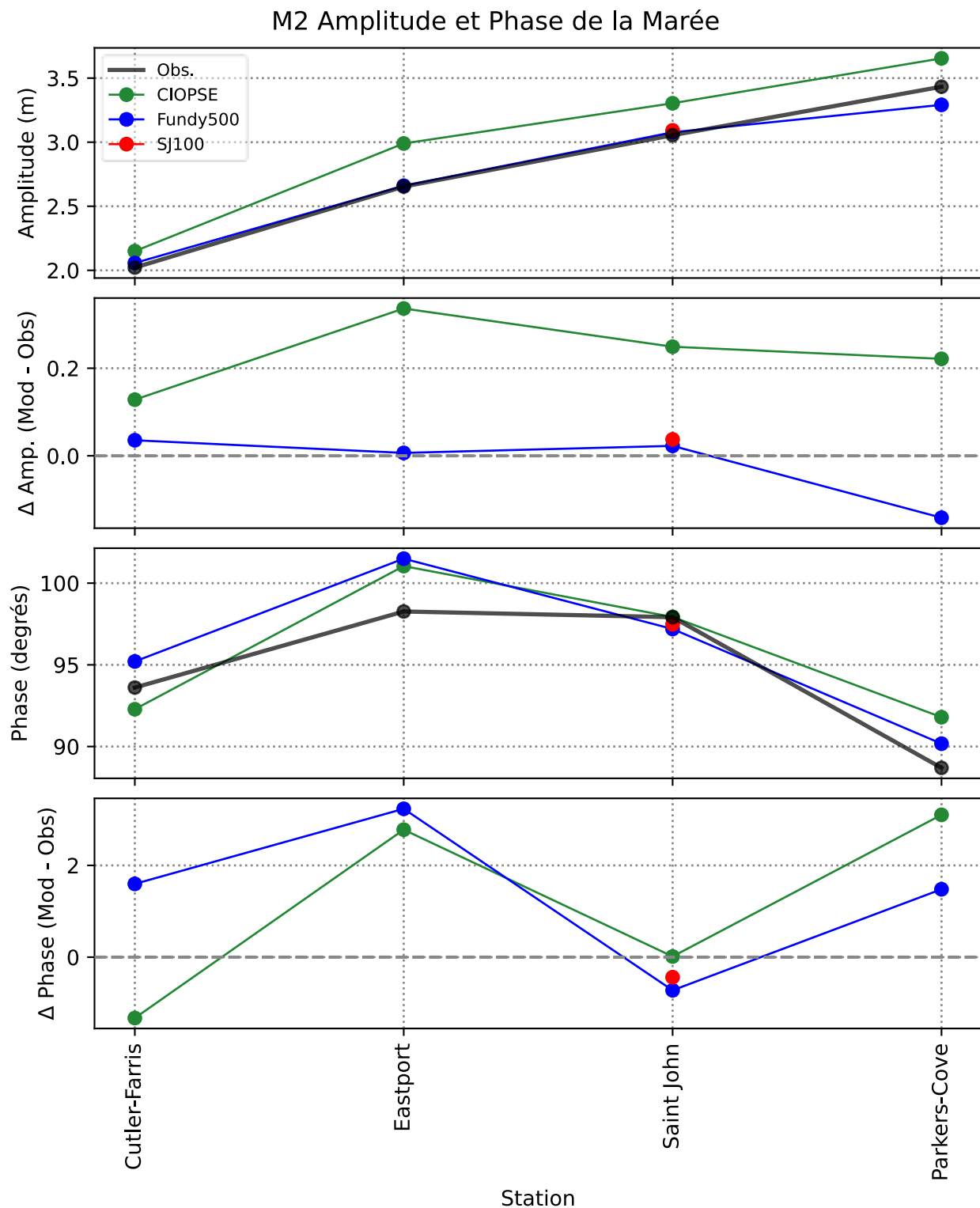


Figure 9 : Composantes de marée M2 pour les quatre marégraphes disponibles dans le domaine. À noter que ces données sont calculées sur 2017 plutôt que 2018, de sorte que Parker's Cove peut être inclus dans le graphique.

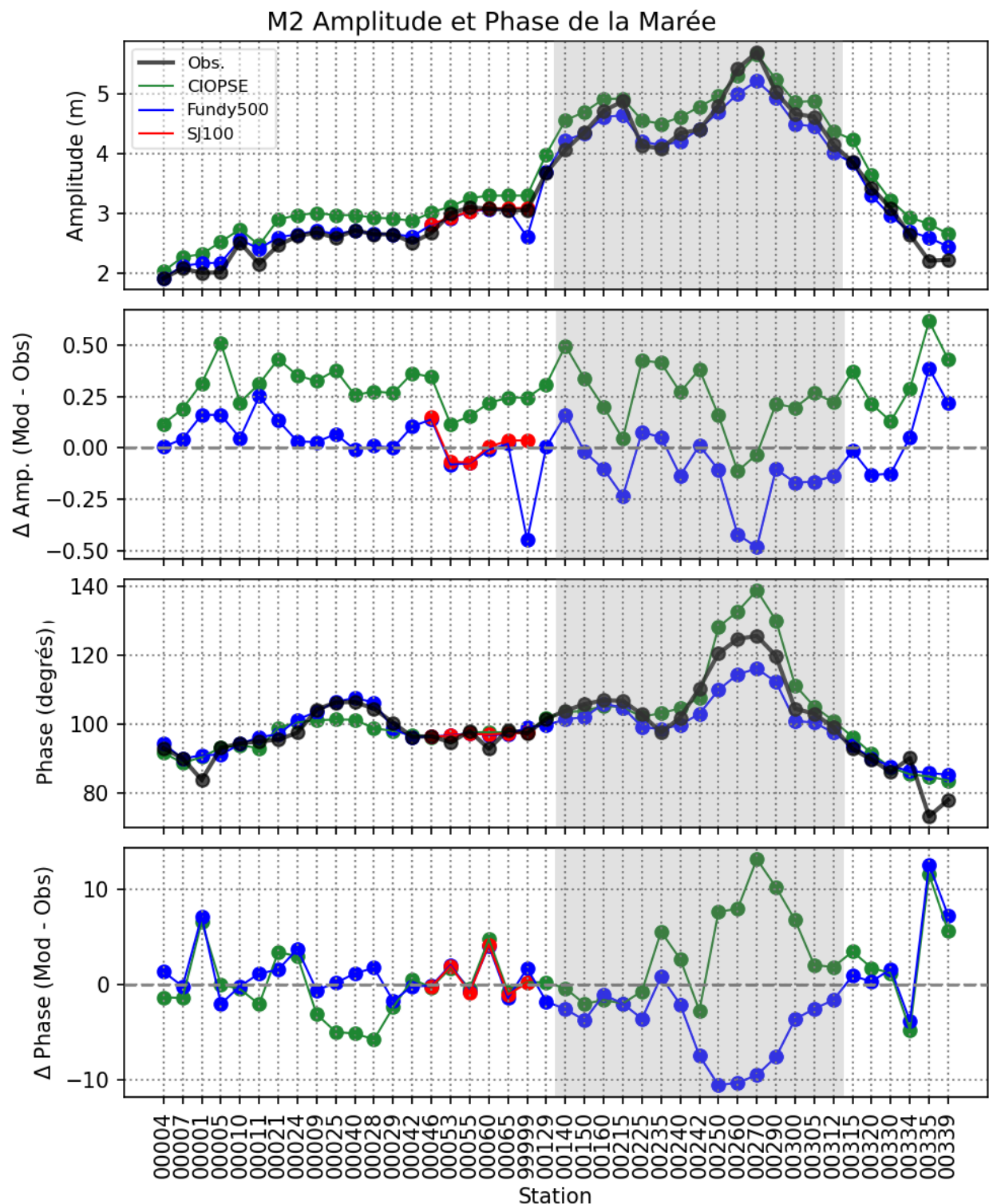


Figure 10 : Paramètre de la composante M2 pour les stations de composantes seulement autour de la baie de Fundy. Cutler (00004) se trouve sur la partie nord de la côte du Maine, et les stations sont réparties dans le sens horaire autour de la baie de Fundy. Les stations le long de la rivière Saint-Jean, ainsi que certaines dans la baie de Passamaquoddy et dans la partie supérieure de la baie de Fundy, sont omises. La partie supérieure de la baie de Fundy, qui comprend d'importantes zones intertidales, est ombragée.

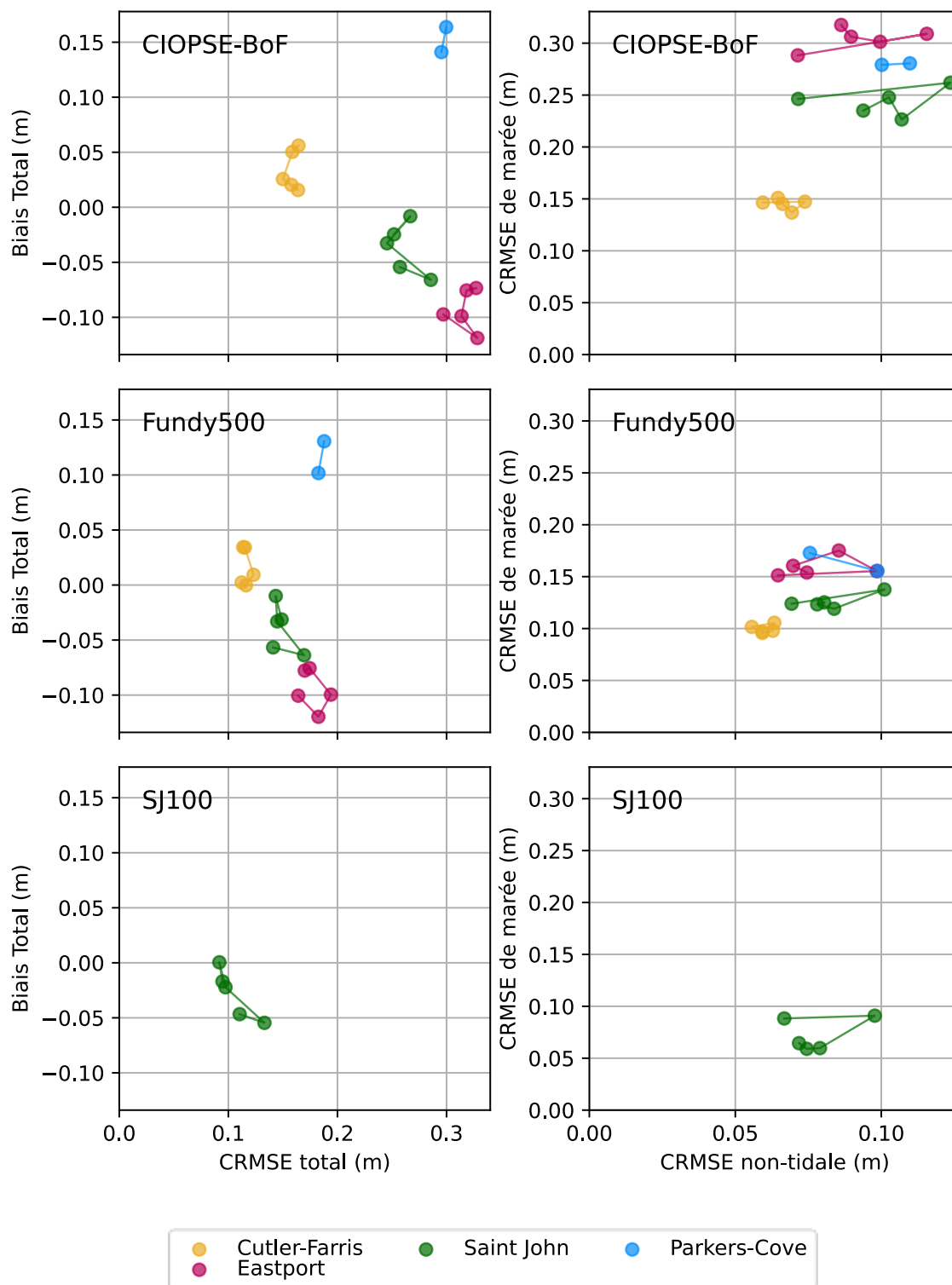


Figure 11 : Statistiques clés pour l'évaluation des niveaux d'eau tracées annuellement de 2016 à 2022.

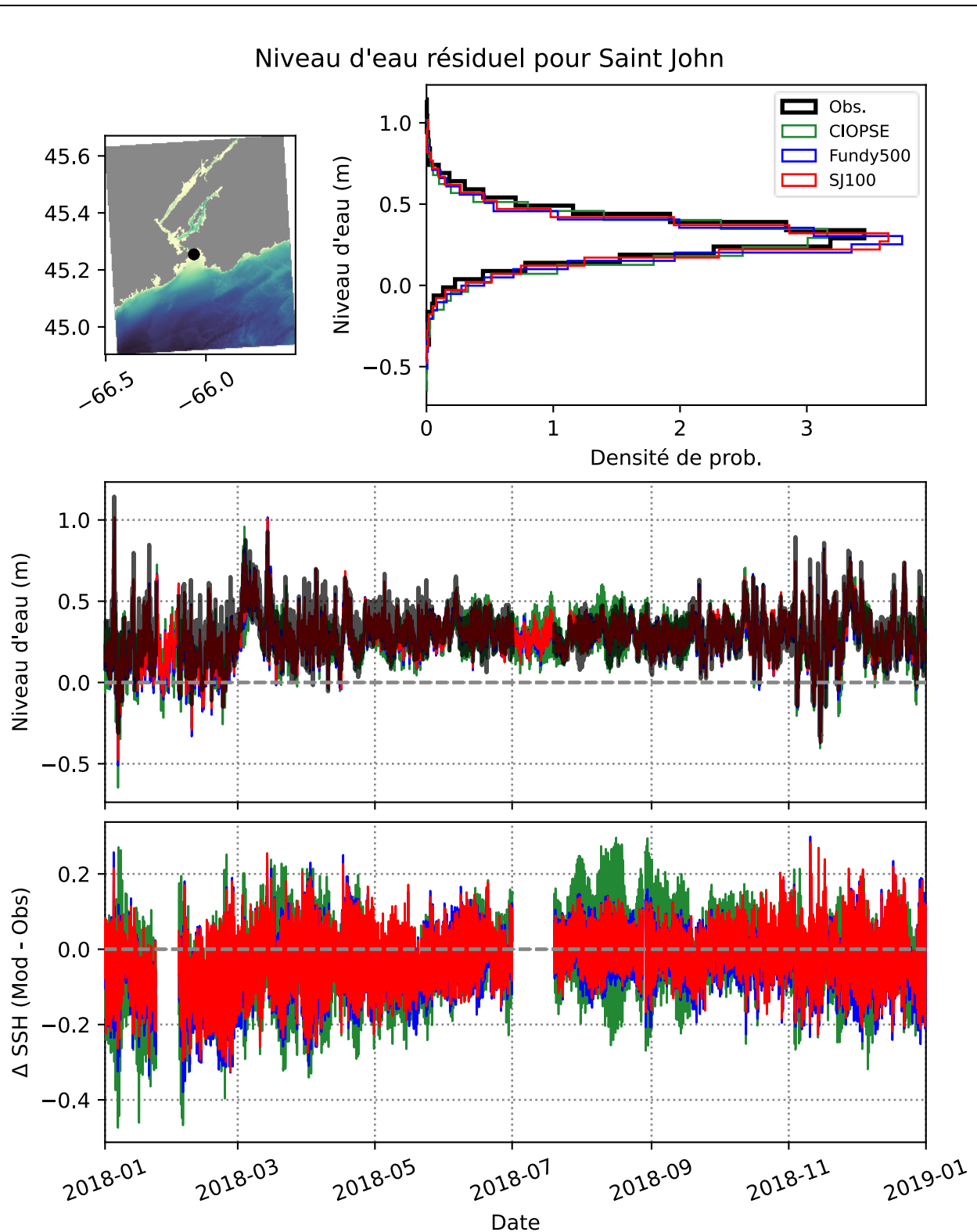


Figure 12 : Niveau d'eau résiduel (sans marée) pour Saint John en 2018. Veuillez noter que l'augmentation du niveau d'eau résiduel au début de l'année, bien que la marée montante d'avril soit plus évidente dans les courants que dans le niveau d'eau du port.

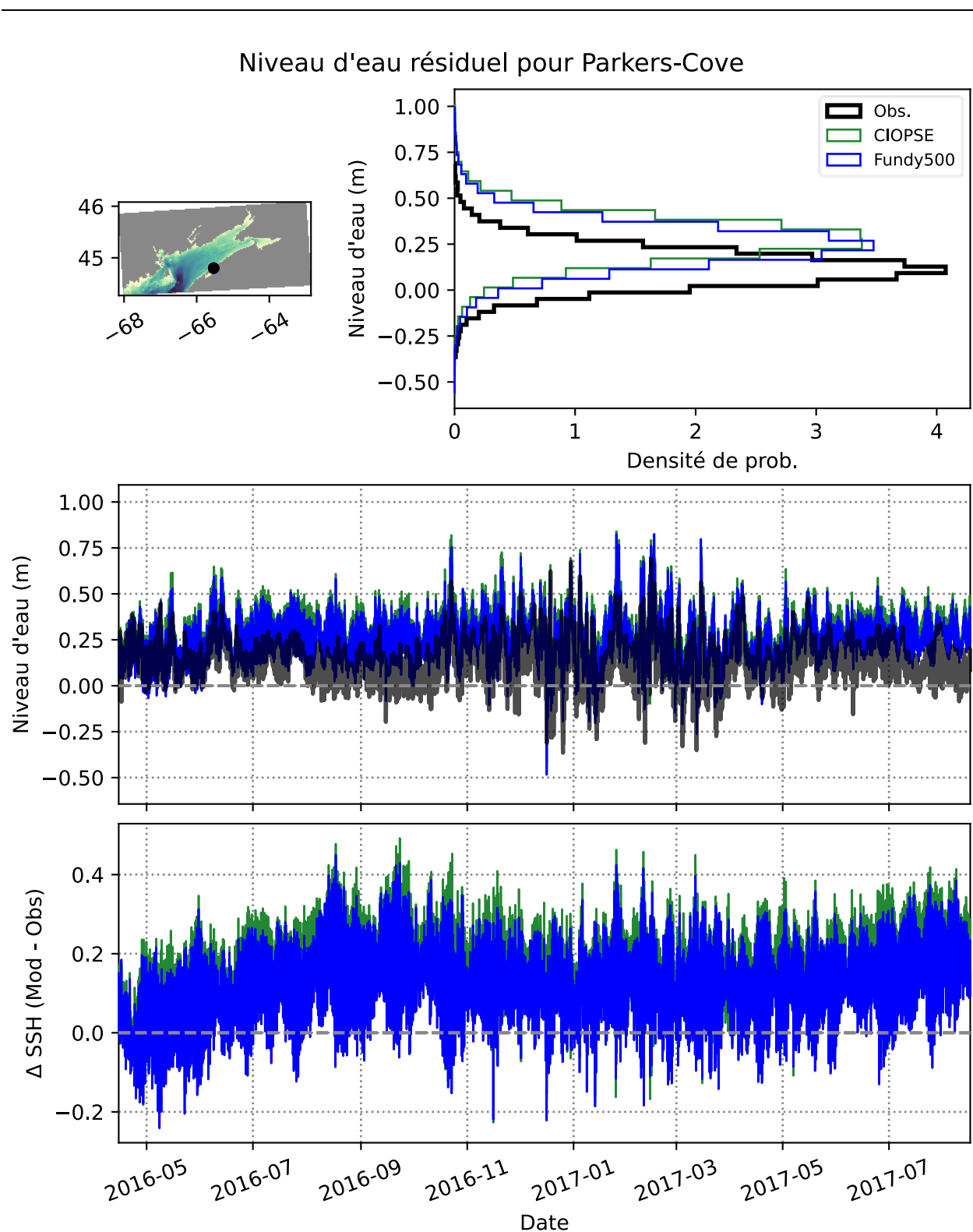


Figure 13 : Niveau d'eau résiduel (sans marée) tracé pour toute la série chronologique disponible pour Parker's Cove.

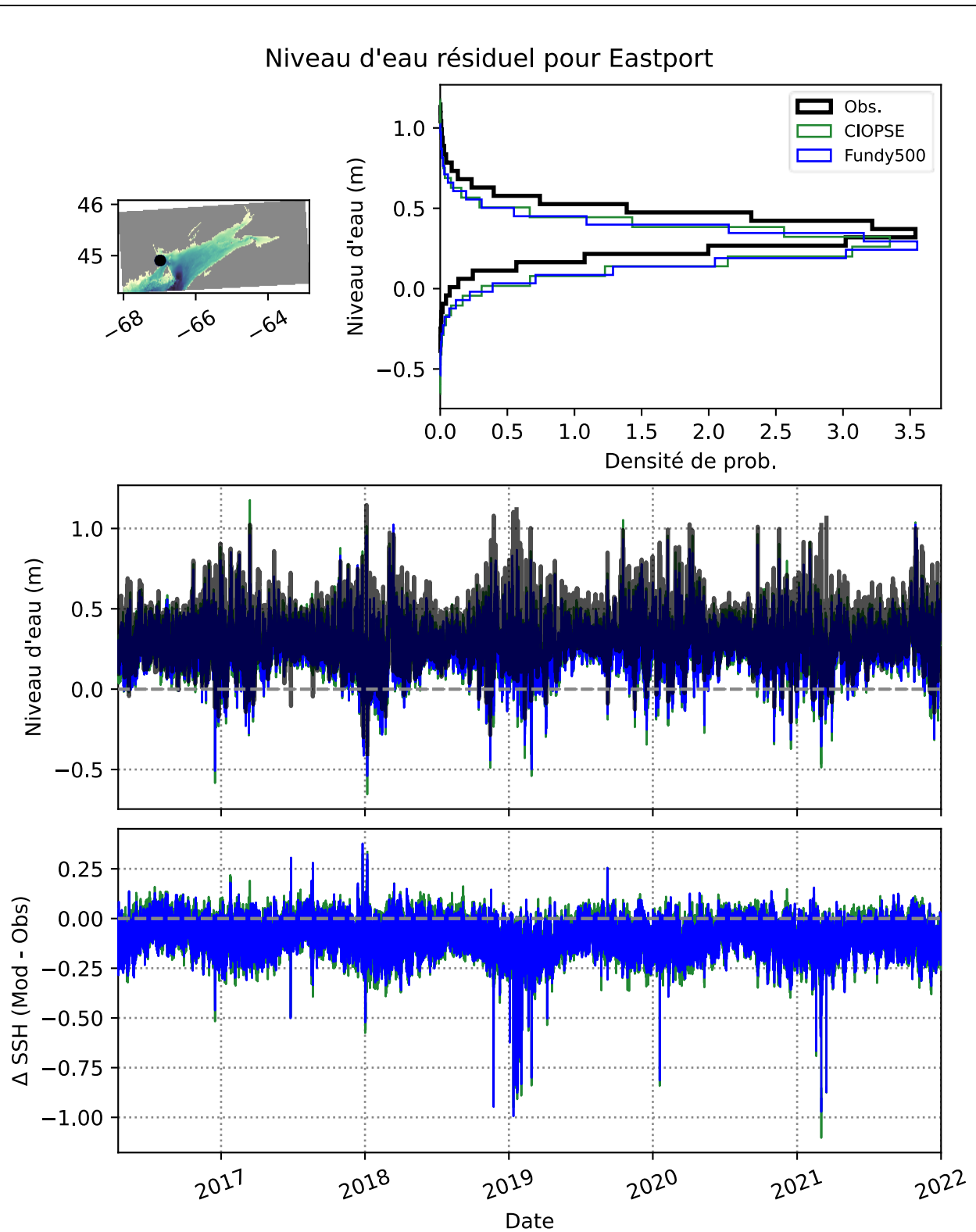


Figure 14 : Le niveau d'eau résiduel (sans marée) a été tracé pour toute la période de simulation rétrospective pour Eastport.

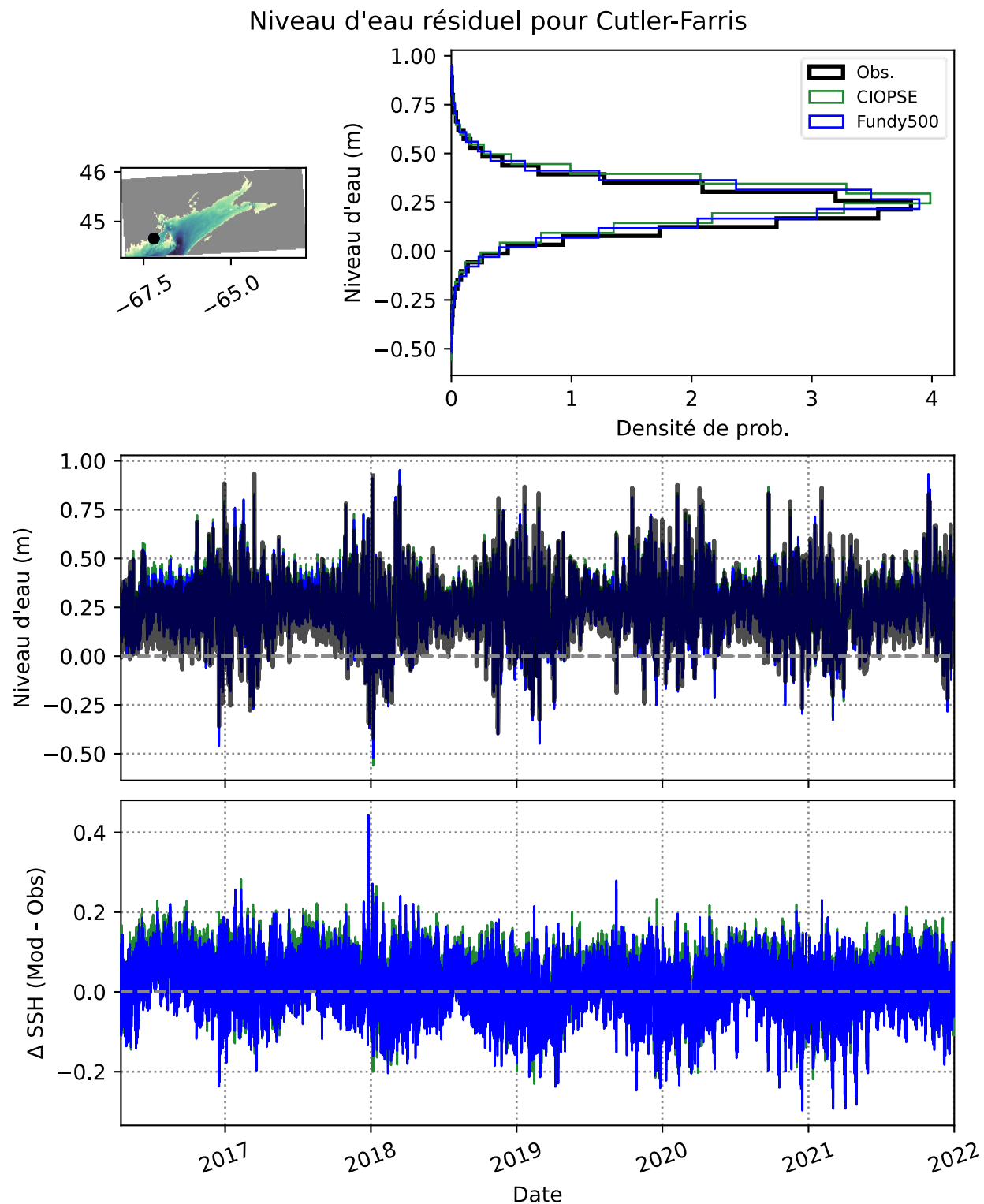


Figure 15 : Le niveau d'eau résiduel (sans marée) a été tracé pour toute la période de simulation rétrospective pour Cutler Farris.

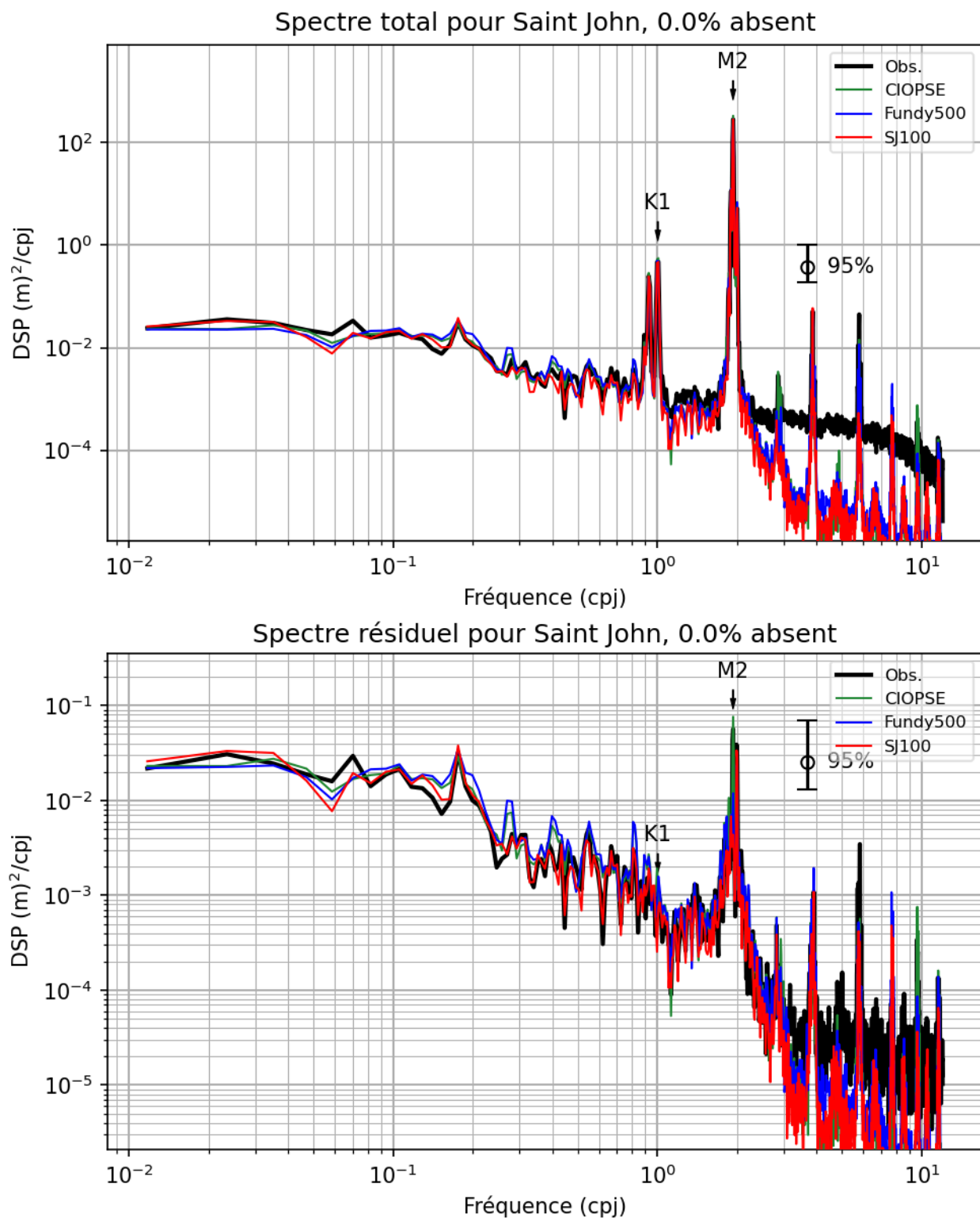


Figure 16 : Spectres de fréquence pour le niveau d'eau total (en haut) et résiduel (en bas) à Saint John en 2016.

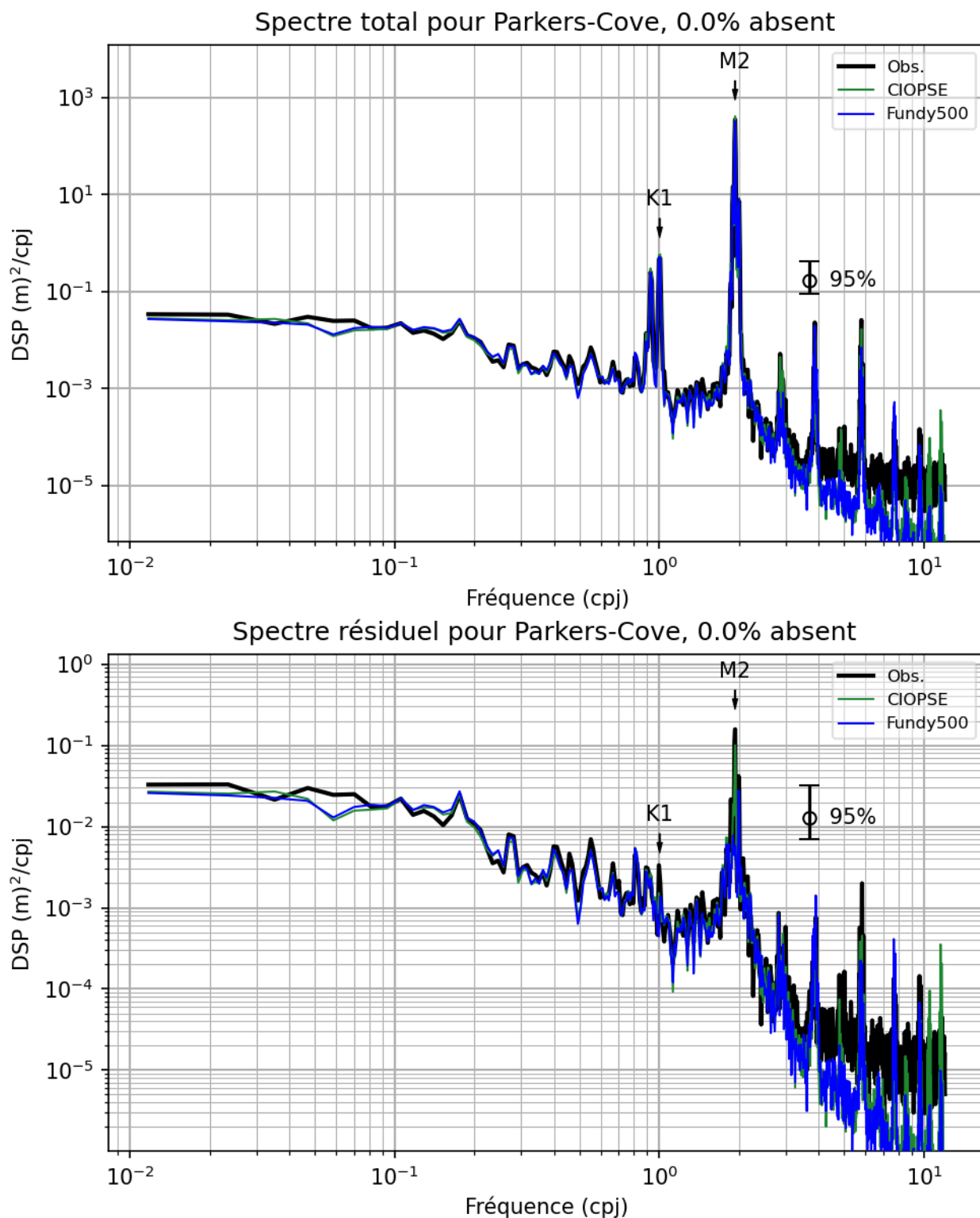


Figure 17 : Spectres de fréquence pour le niveau d'eau total (en haut) et résiduel (en bas) à Parker's Cove en 2016.

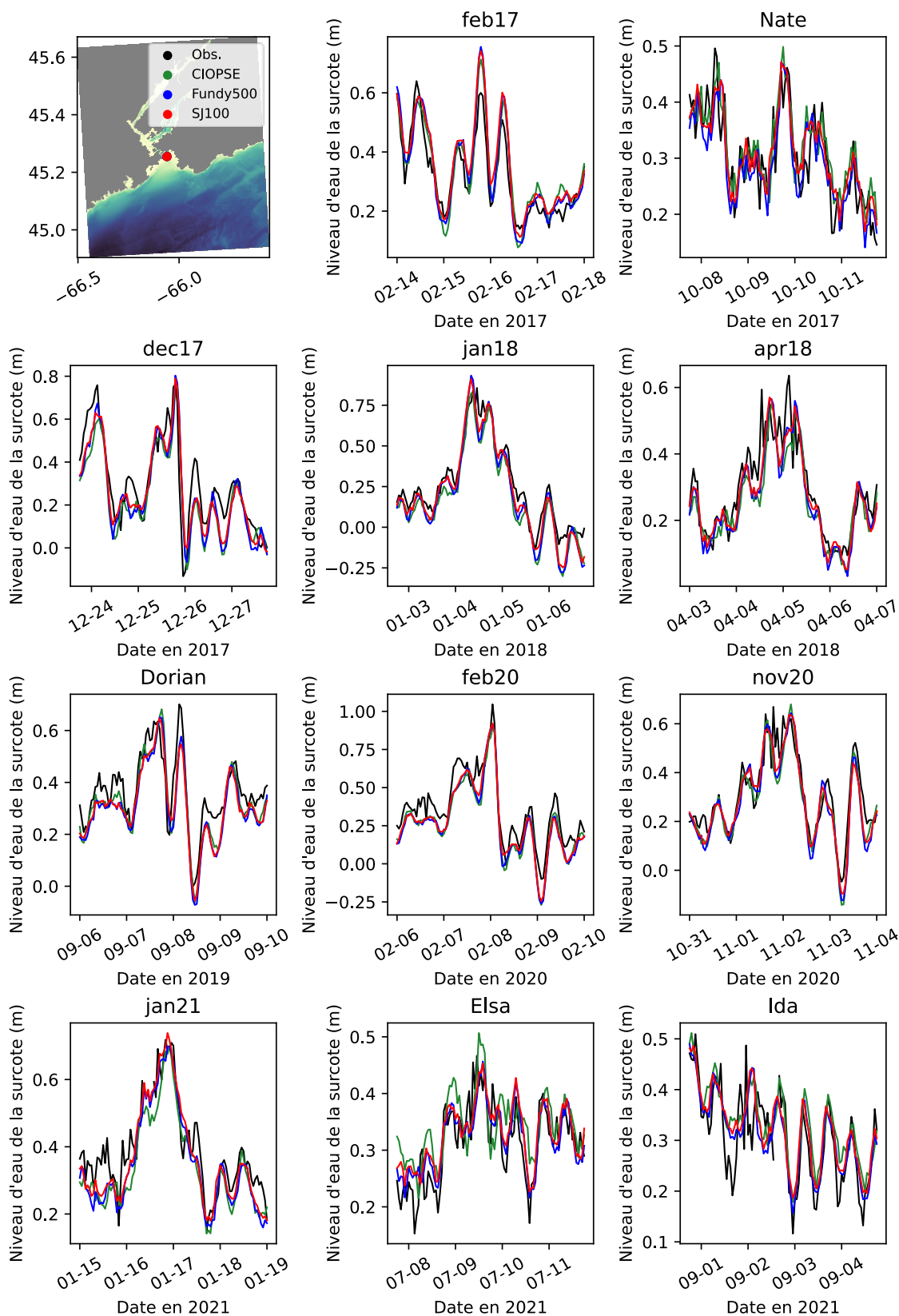


Figure 18 : Onde de tempête à Saint John pour 11 tempêtes sélectionnées.

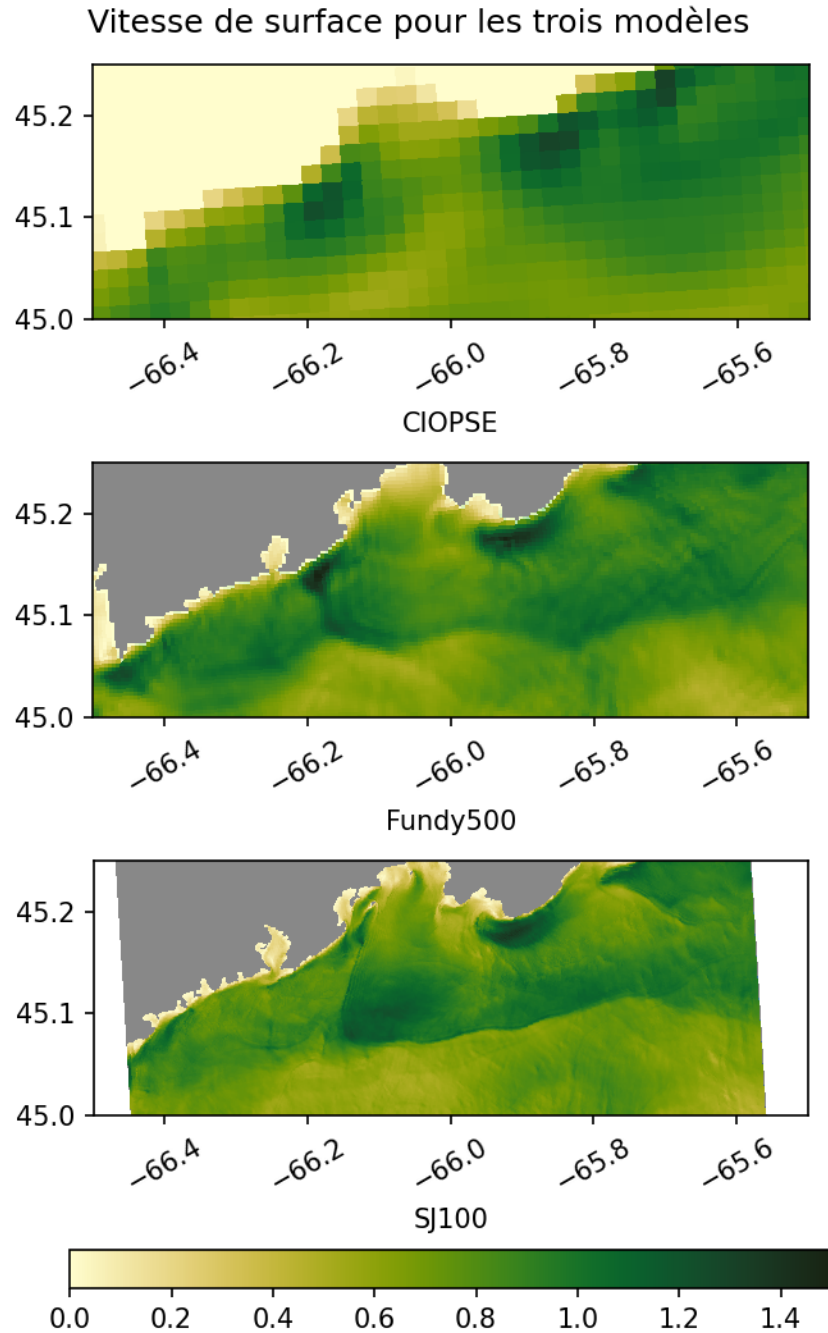


Figure 19 : Vitesse en surface au 2020-06-01 00:00 UTC pour les trois modèles. Veuillez noter que les structures de courant sont plus nettes et précises pour le modèle SJ100 que pour les deux autres modèles. Les unités sont en m/s.

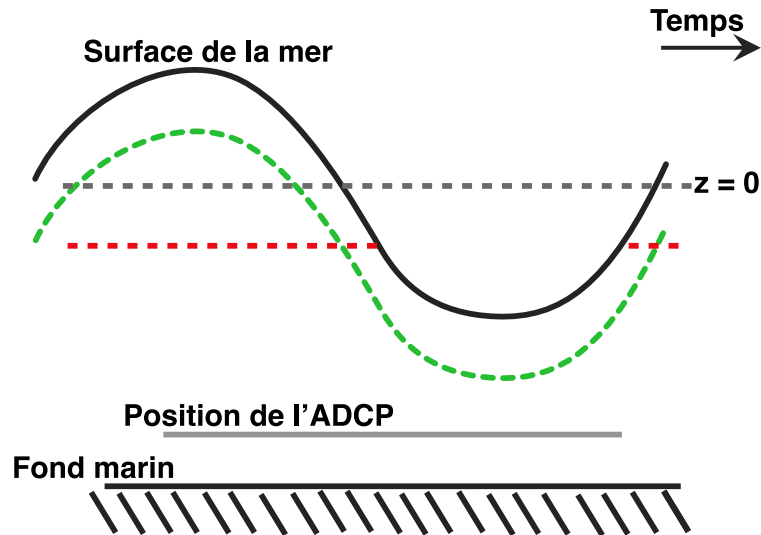


Figure 20 : Schéma montrant l'importance d'évaluer les données d'ADCP par rapport à la surface variable (ligne pointillée verte) plutôt que le point de référence $z=0$ (ligne pointillée rouge). La ligne pointillée rouge présente un écart régulier dans les données à marée basse, ce qui faussera toute évaluation.

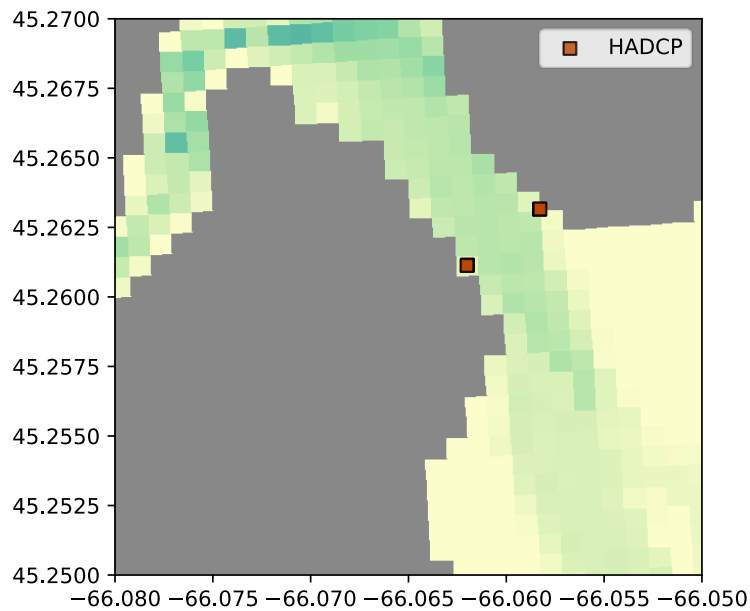


Figure 21 : Emplacement des installations d'ADCP horizontal à l'embouchure de la rivière Saint-Jean.

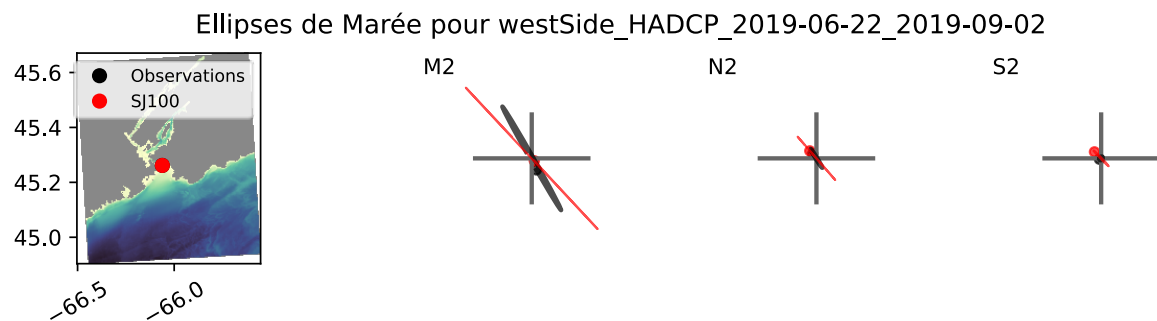


Figure 22 : Ellipses de marée à l'ADCP horizontal du côté ouest pour le déploiement à la mi-2019.

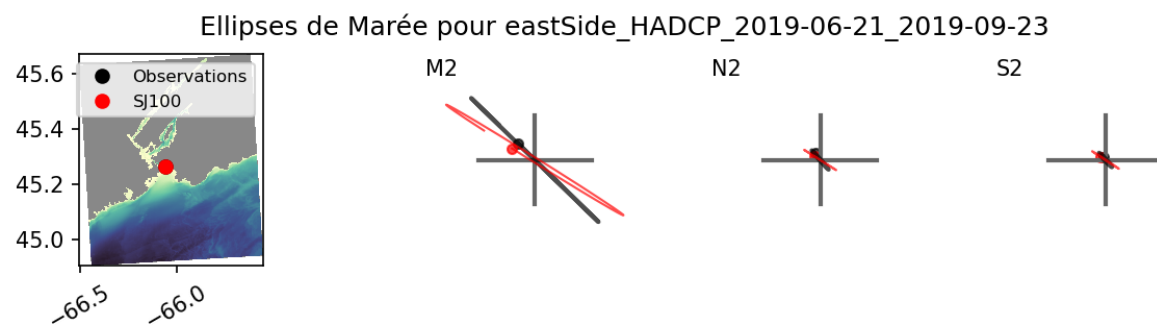


Figure 23 : Ellipses de marée à l'ADCP horizontal du côté est pour le déploiement à la mi-2019.

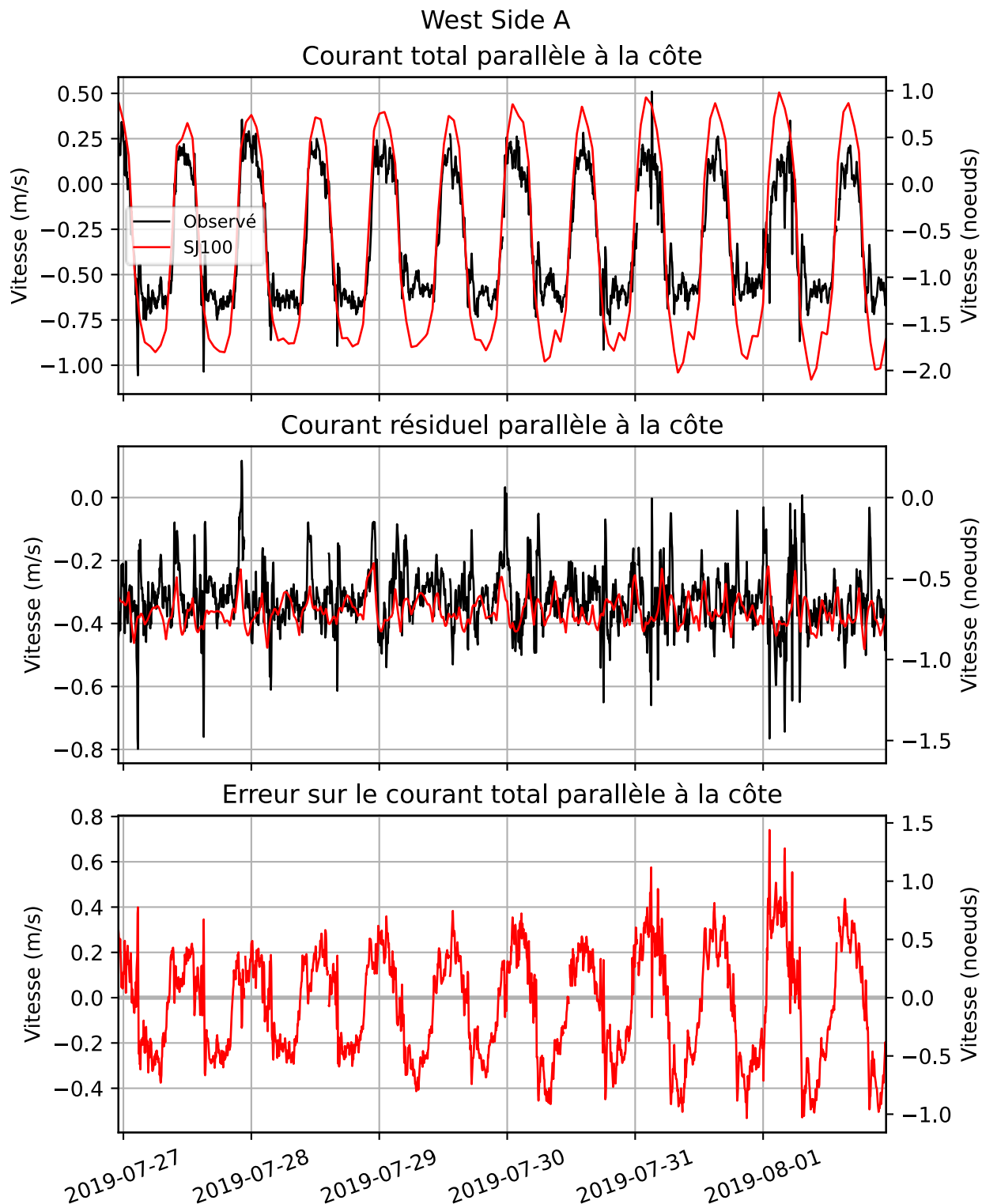


Figure 24 : Série chronologique sur une semaine du courant le long du rivage (total et résiduel, respectivement panneau du haut et du milieu) modélisé et enregistré par l'ADCP horizontal ouest pour le déploiement à la mi-2019 et de l'erreur sur le courant total (panneau du bas).

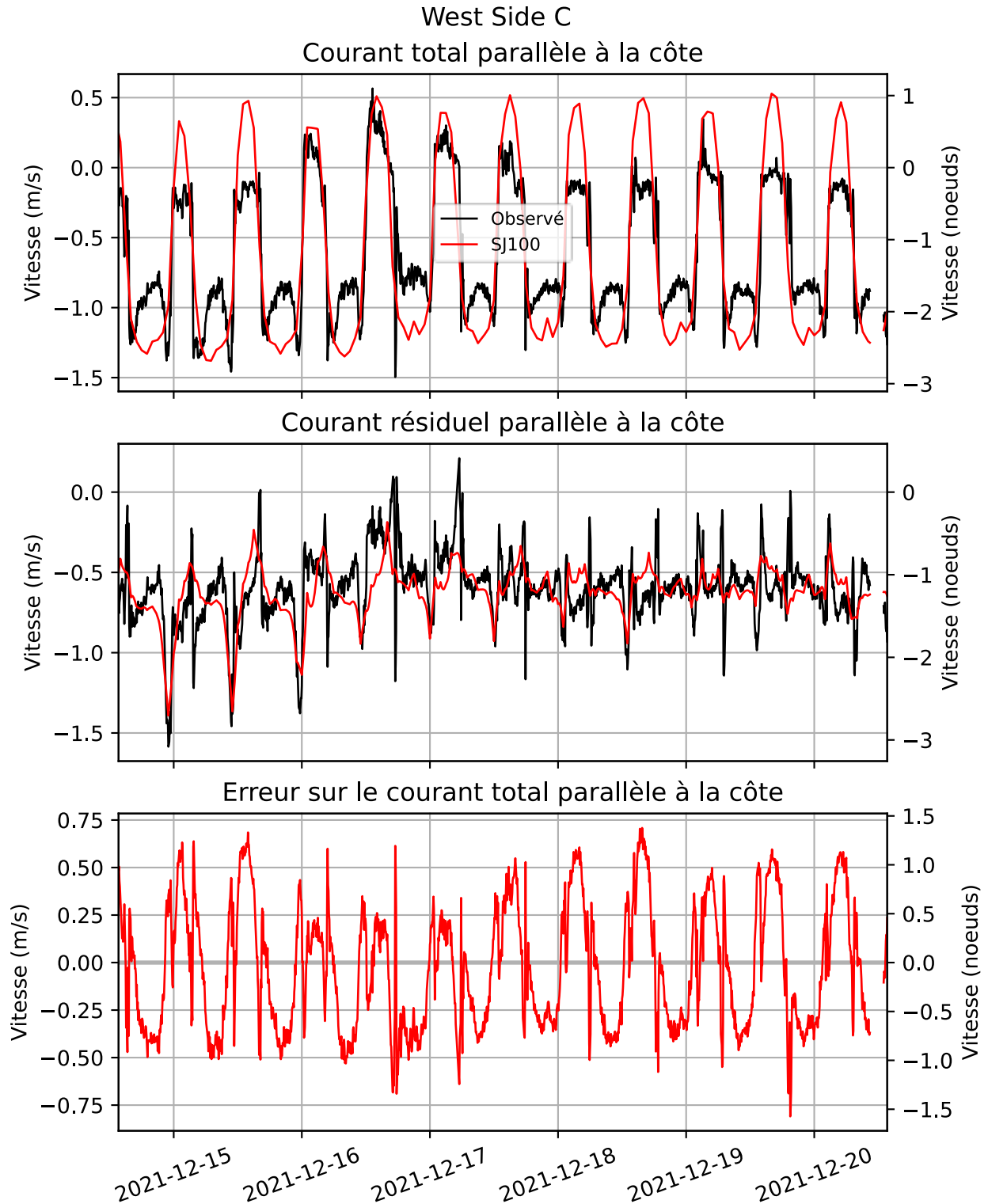


Figure 25 : Série chronologique sur une semaine du courant le long du rivage (total et résiduel, respectivement panneau du haut et du milieu) modélisé et enregistré par l'ADCP horizontal ouest pour le déploiement en décembre 2021, et de l'erreur sur le courant total (panneau du bas).

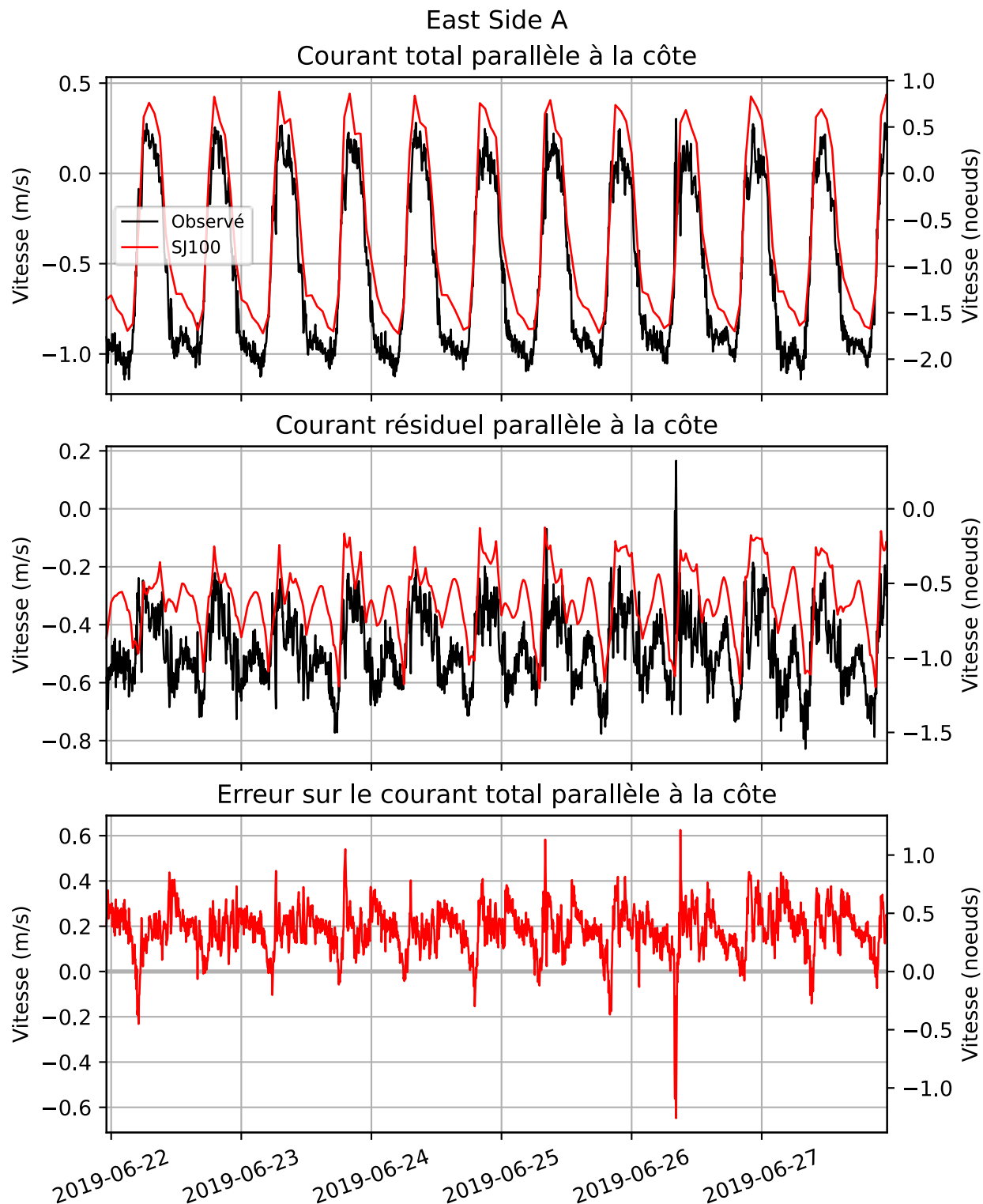


Figure 26 : Série chronologique sur une semaine du courant le long du rivage (total et résiduel, respectivement panneau du haut et du milieu) modélisé et enregistré par l'ADCP horizontal est pour le déploiement à la mi-2019, et de l'erreur sur le courant total (panneau du bas).

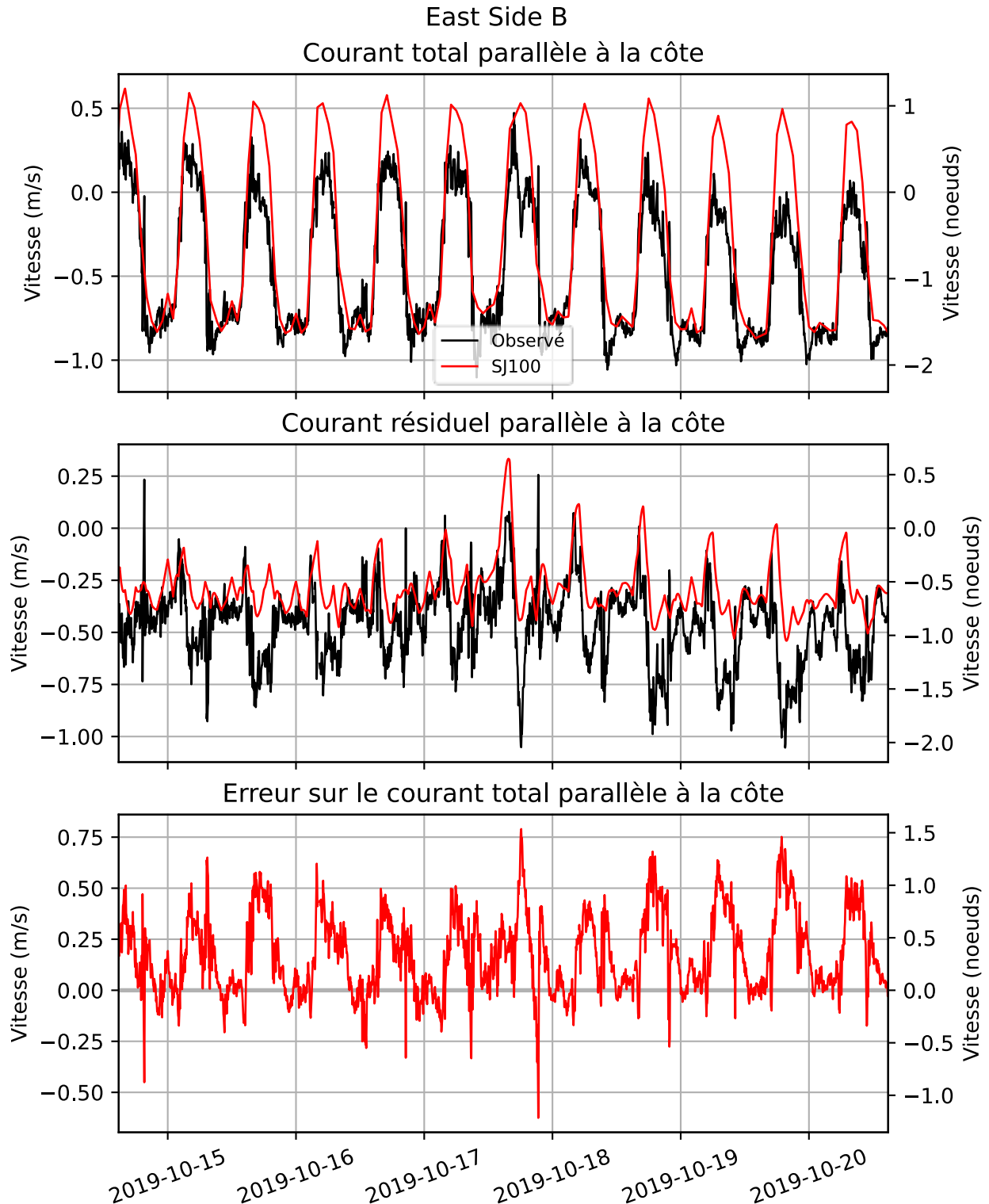


Figure 27 : Série chronologique sur une semaine du courant le long du rivage (total et résiduel, respectivement panneau du haut et du milieu) modélisé et enregistré par l'ADCP horizontal est pour le déploiement à l'automne 2019, et de l'erreur sur le courant total (panneau du bas).

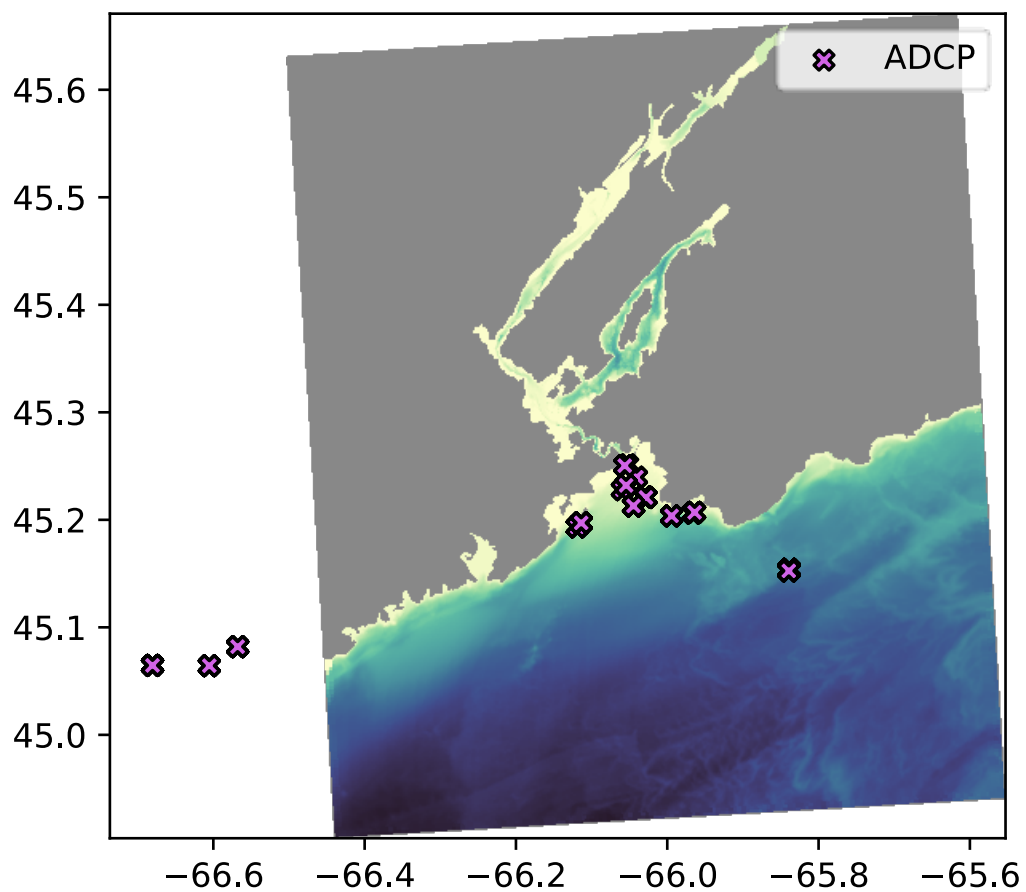


Figure 28 : Emplacement des observations d'ADCP. Les trois observations à l'extérieur du domaine de SJ100 se trouvent dans la baie Maces et sont présentes dans le Fundy500.

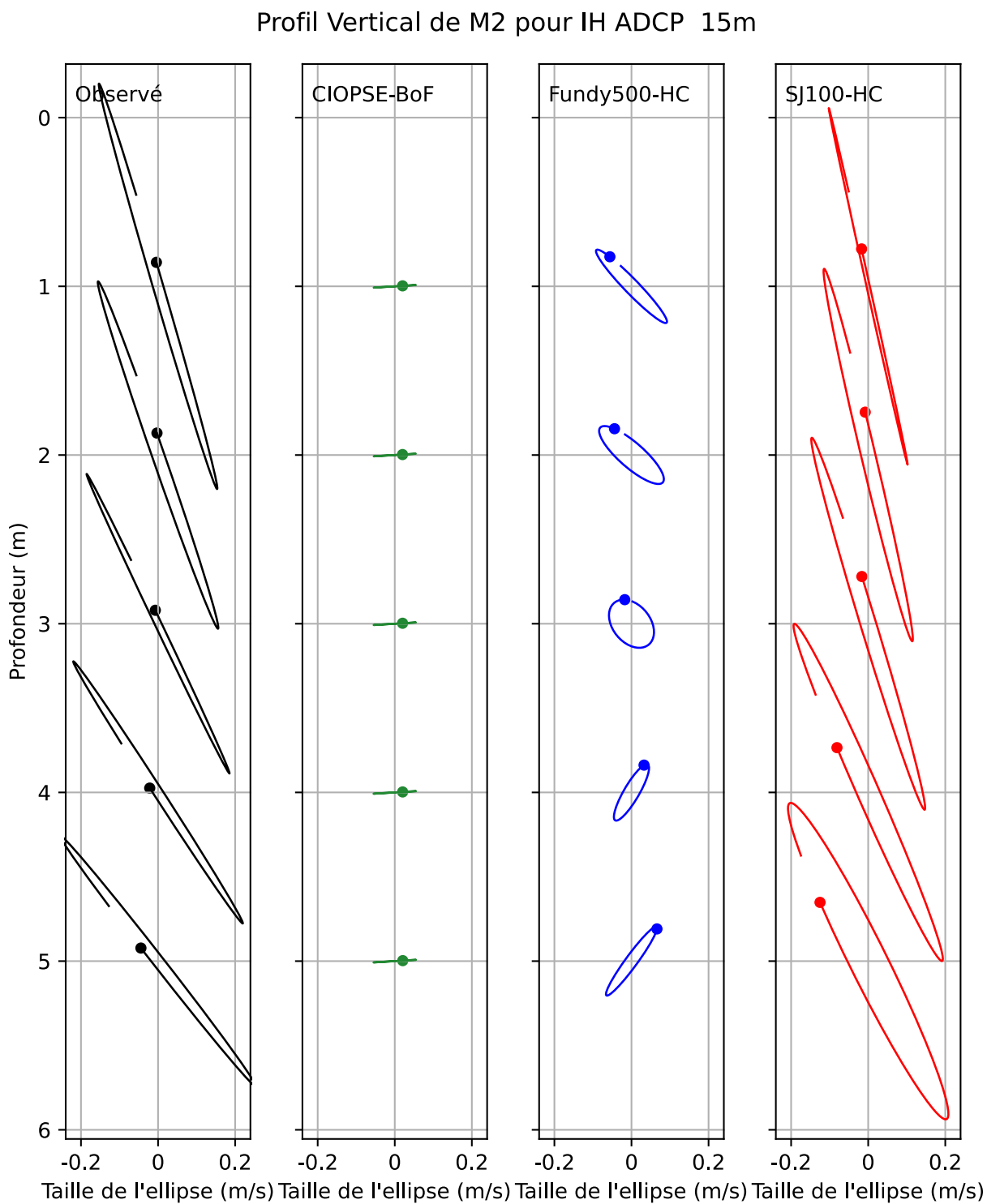


Figure 29 : Ellipses de marée de la M2 pour l'ADCP de l'arrière-port (IH).

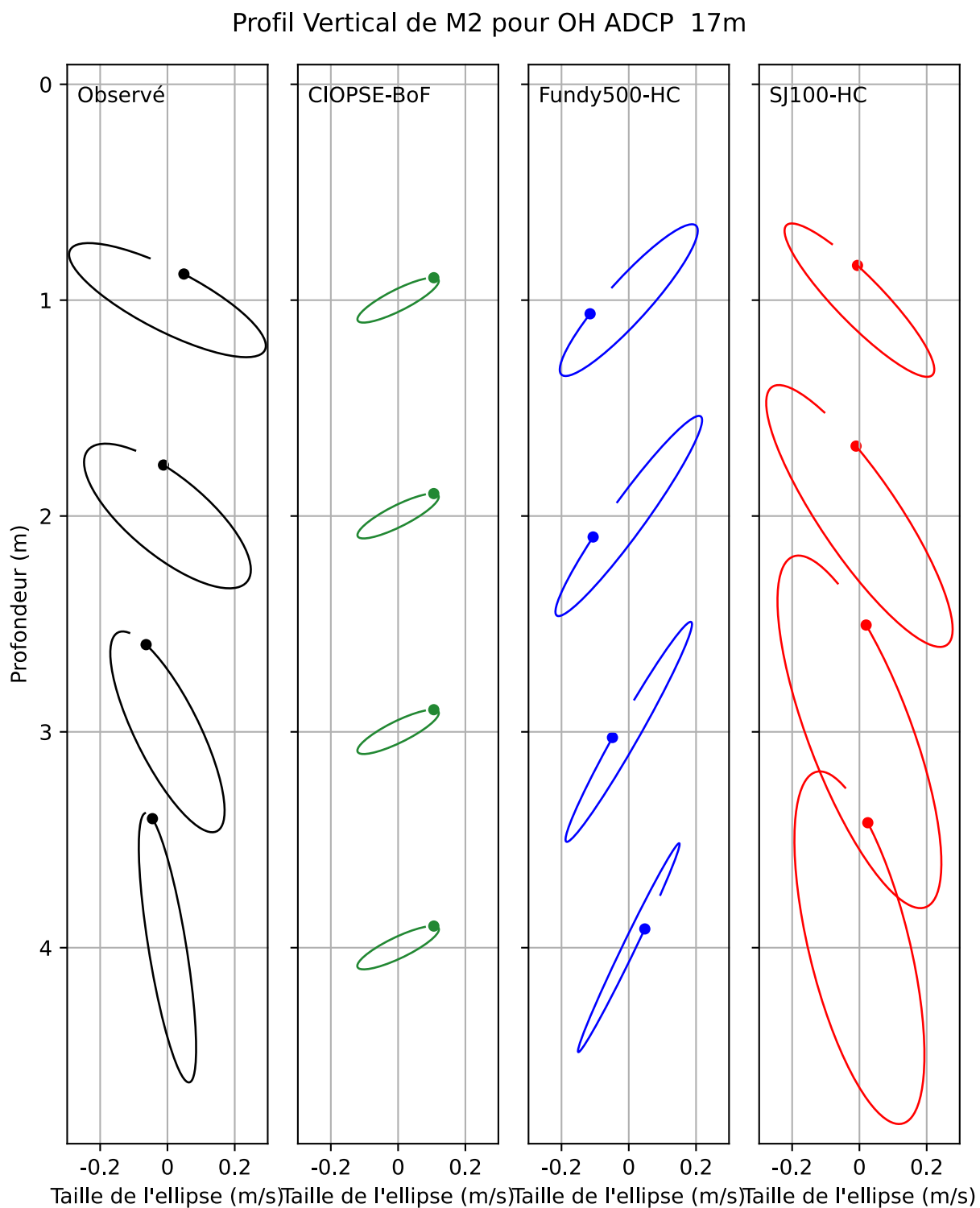


Figure 30 : Ellipses de marée de la M2 pour l'ADCP de l'avant-port (OH).

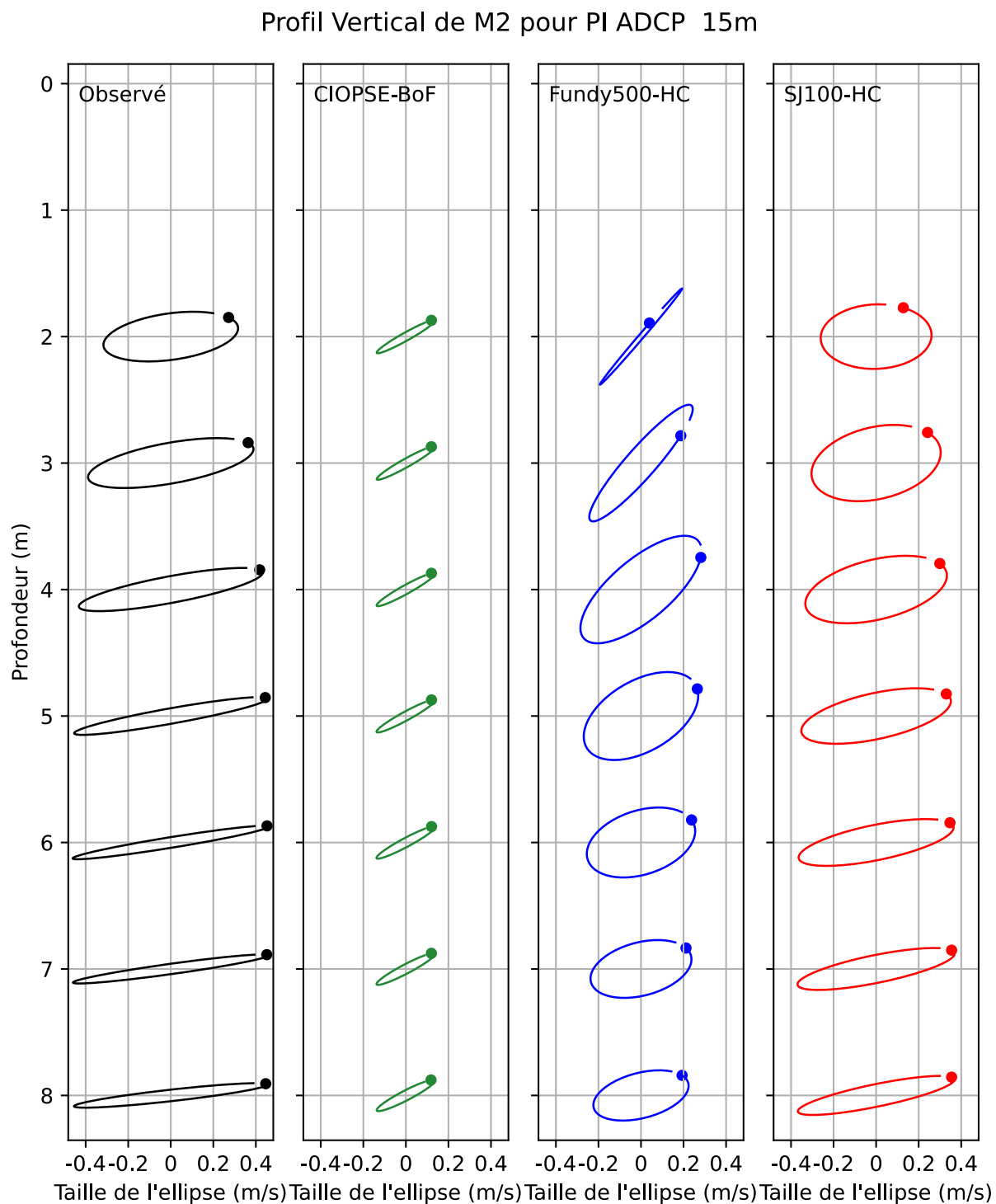


Figure 31 : Ellipses de marée de la M2 pour l'ADCP de l'île Partridge (PI).

Profil Vertical de M2 pour SaintJohn-598a ADCP 13m

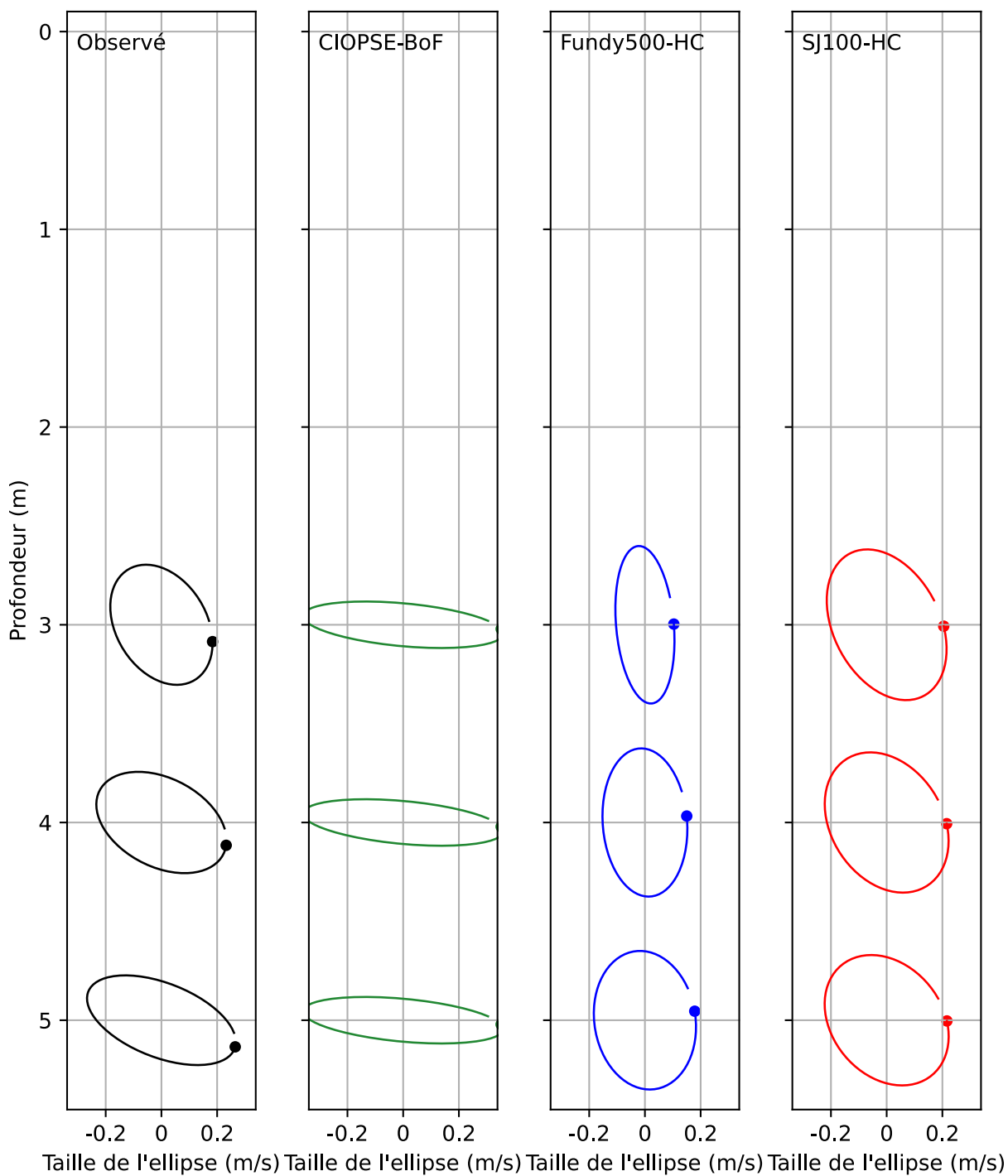


Figure 32 : Ellipses de marée de la M2 pour l'ADCP 598, à Canaport.

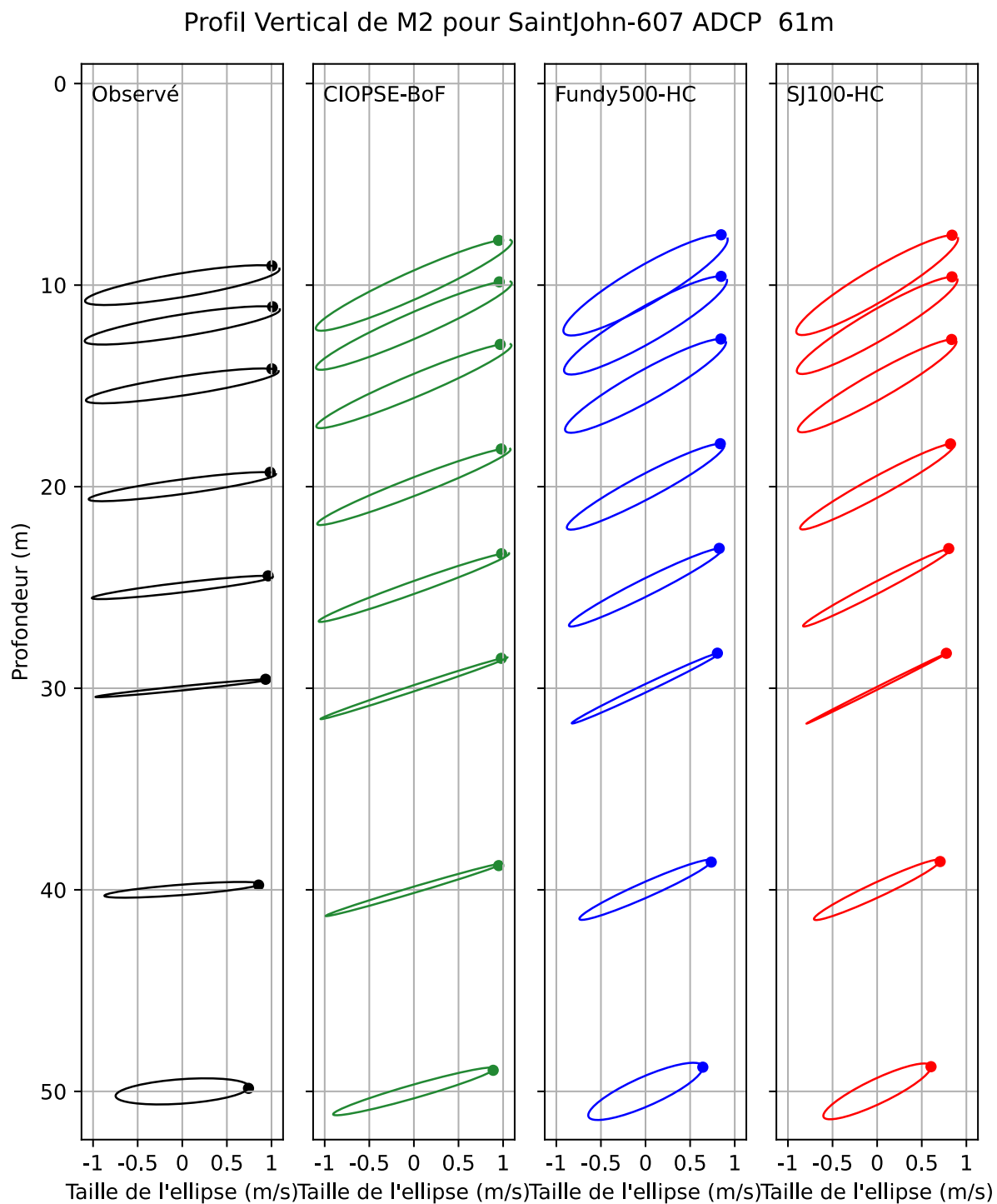


Figure 33 : Ellipses de marée de la M2 pour l'ADCP 607, au large de Cape Spencer.

Profil Vertical de M2 pour SaintJohn-612 ADCP 41m

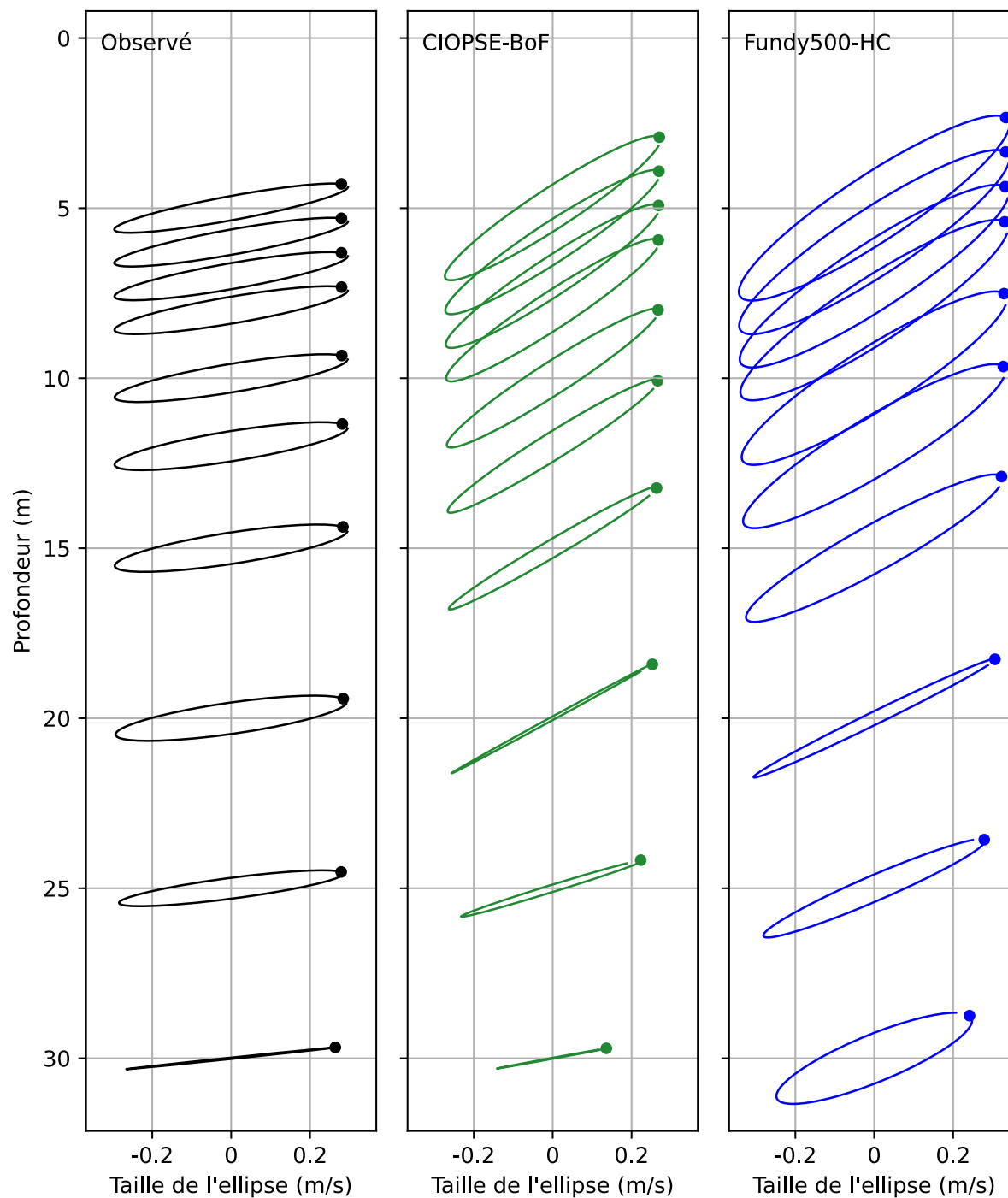


Figure 34 : Ellipses de marée de la M2 pour l'ADCP 612, dans la baie Maces (à l'extérieur du domaine du SJ100).

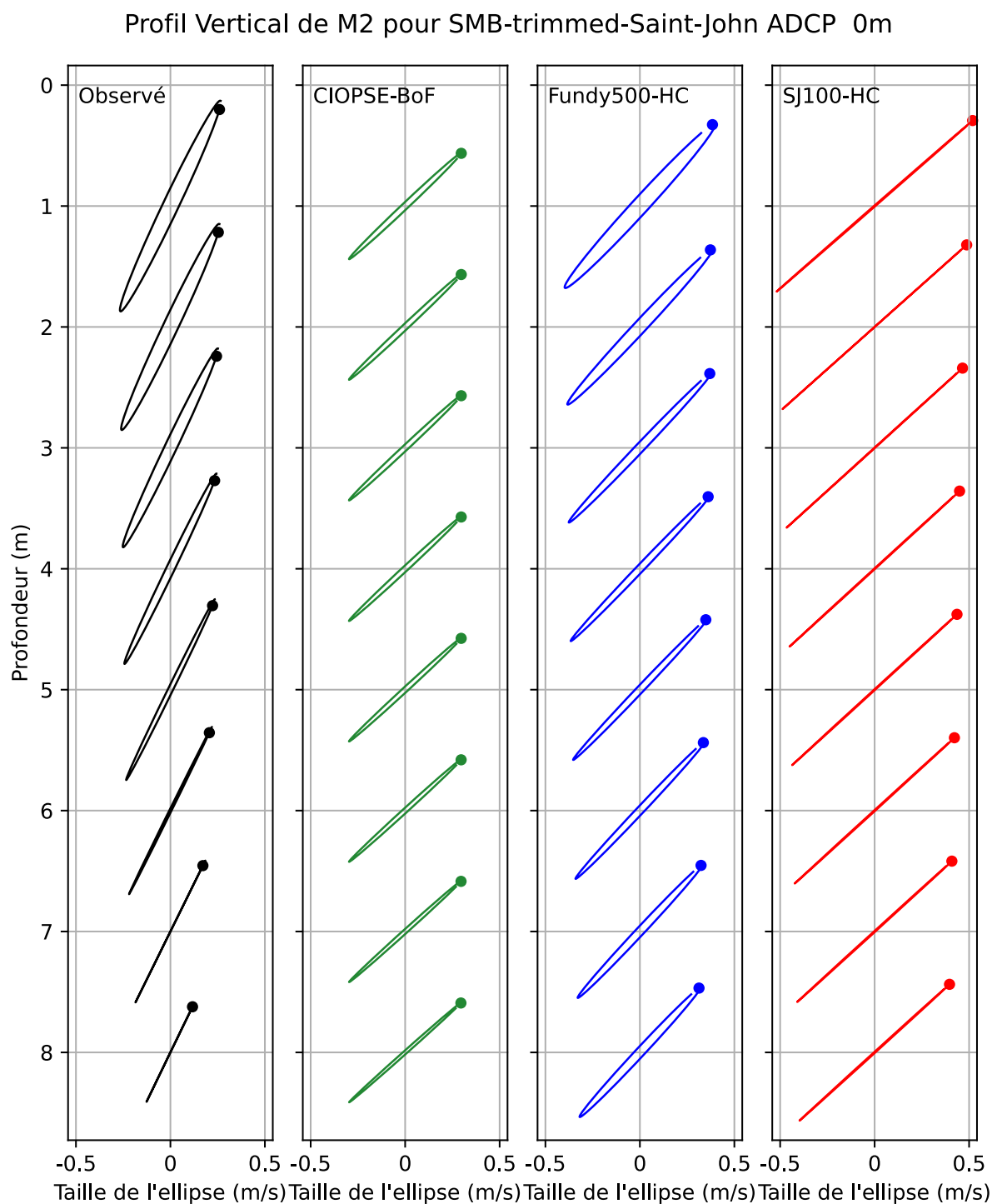


Figure 35 : Ellipses de marée de la M2 à la bouée Smart. Cet ADCP est orienté vers le bas à partir de la surface de la mer (qui le soulève).

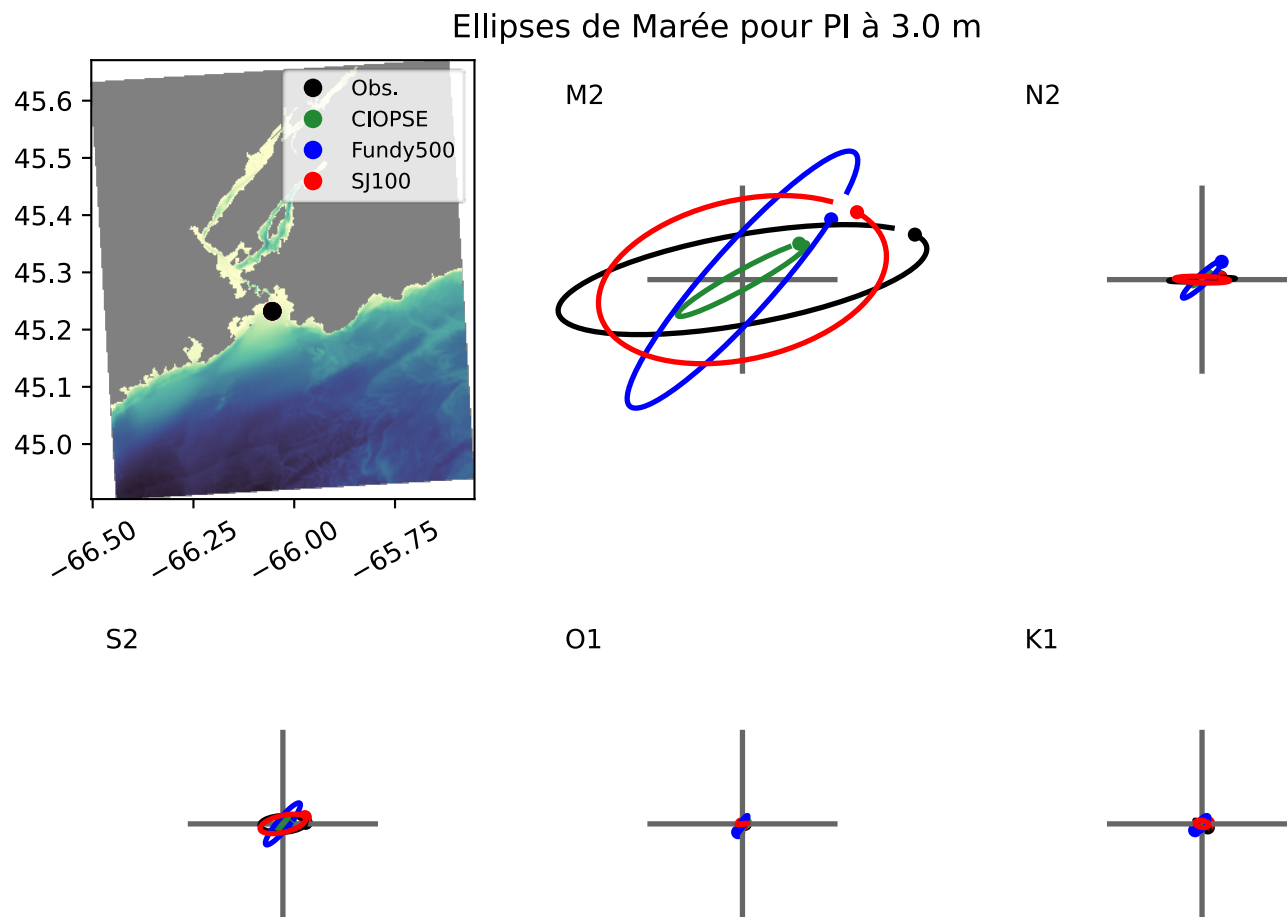


Figure 36 : Toutes les ellipses de marée à l'ADCP de l'île Partridge à 3 mètres sous la surface. L'échelle relative des composantes S2, N2 et diurnes par rapport aux ellipses de la M2 est similaire pour tous les autres ADCP du domaine.

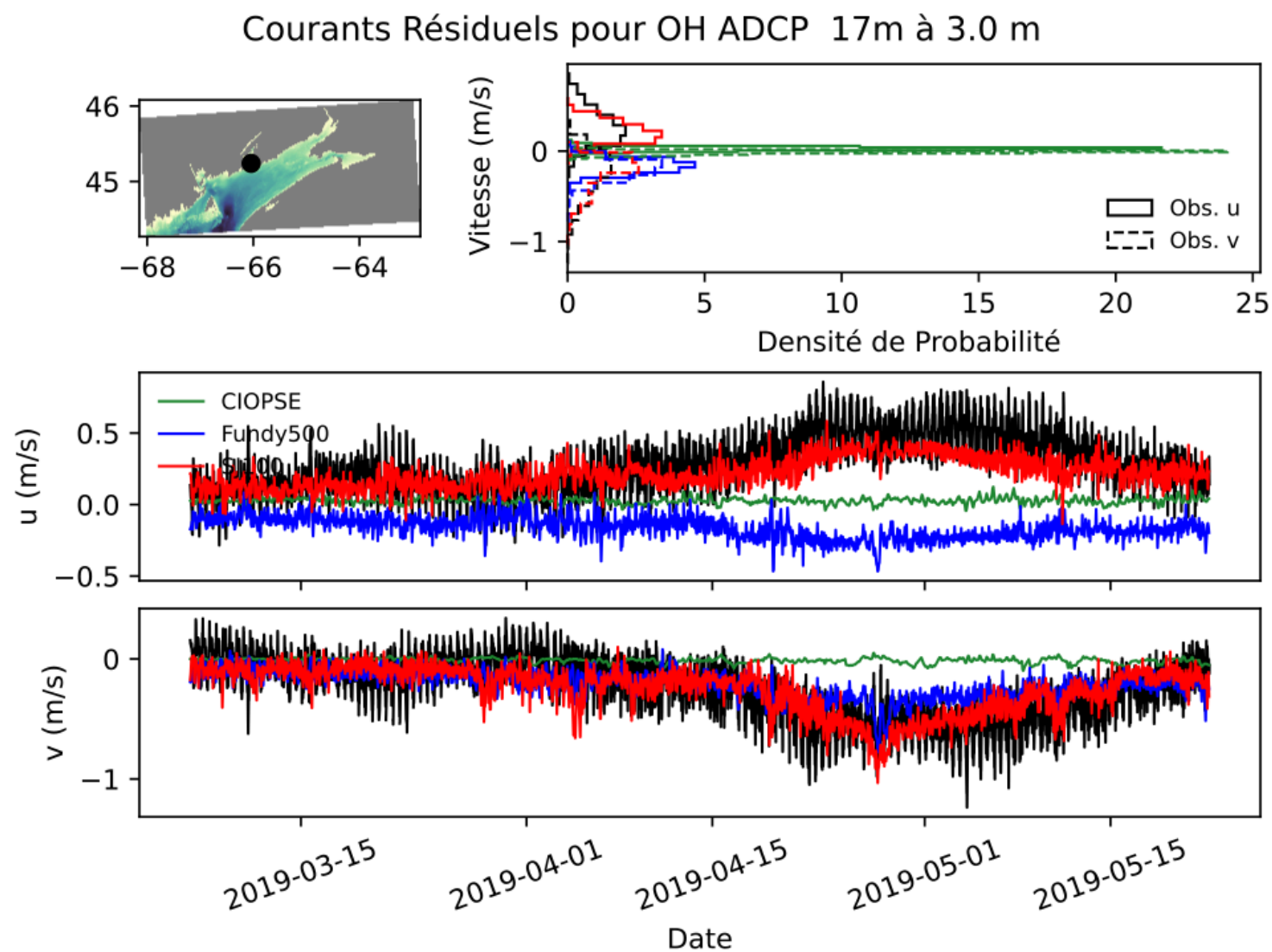


Figure 37 : Courants résiduels à l'avant-port à 3 mètres sous la surface.

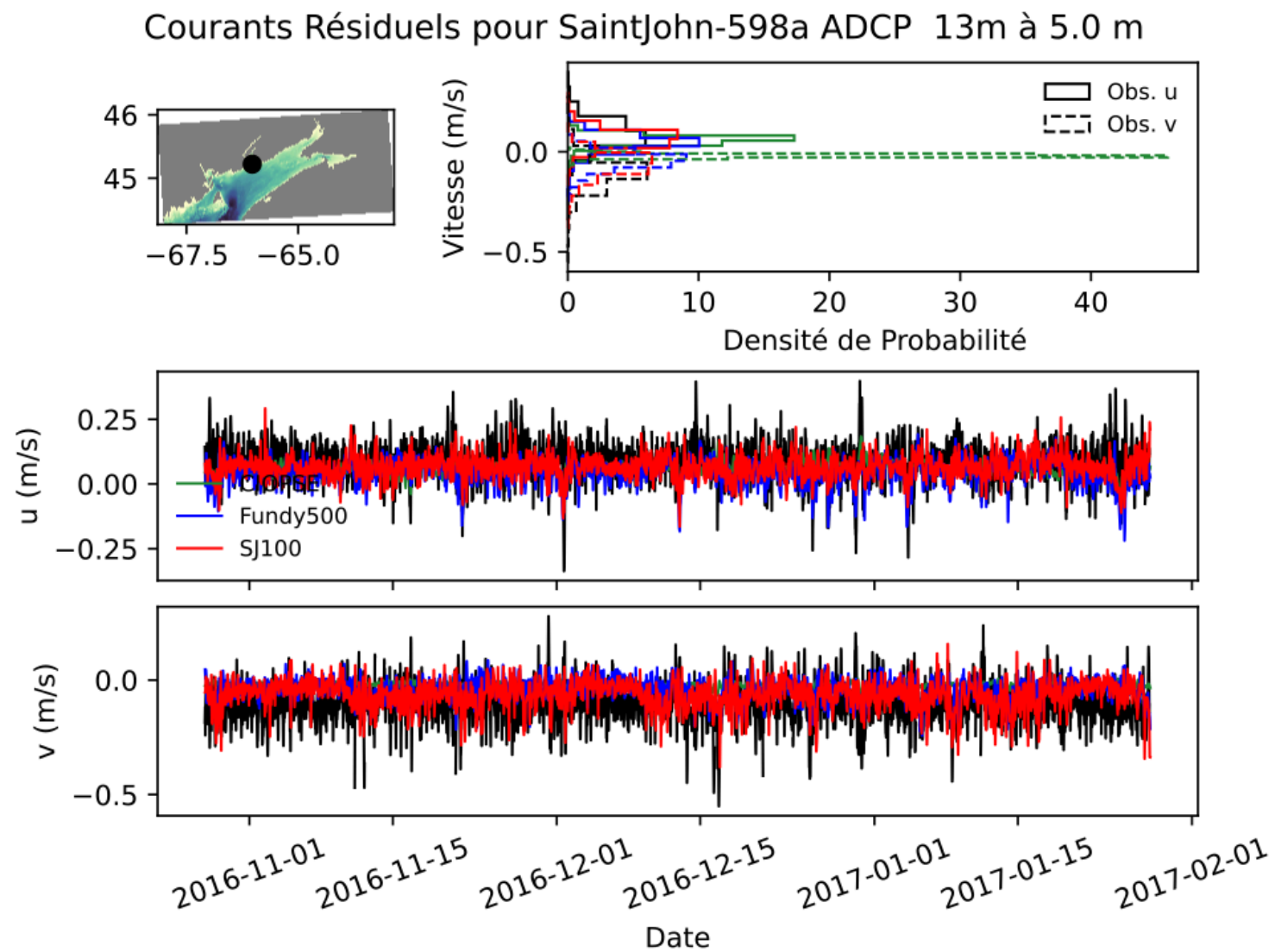


Figure 38 : Courants résiduels à l'ADCP 598 à 5 mètres sous la surface.

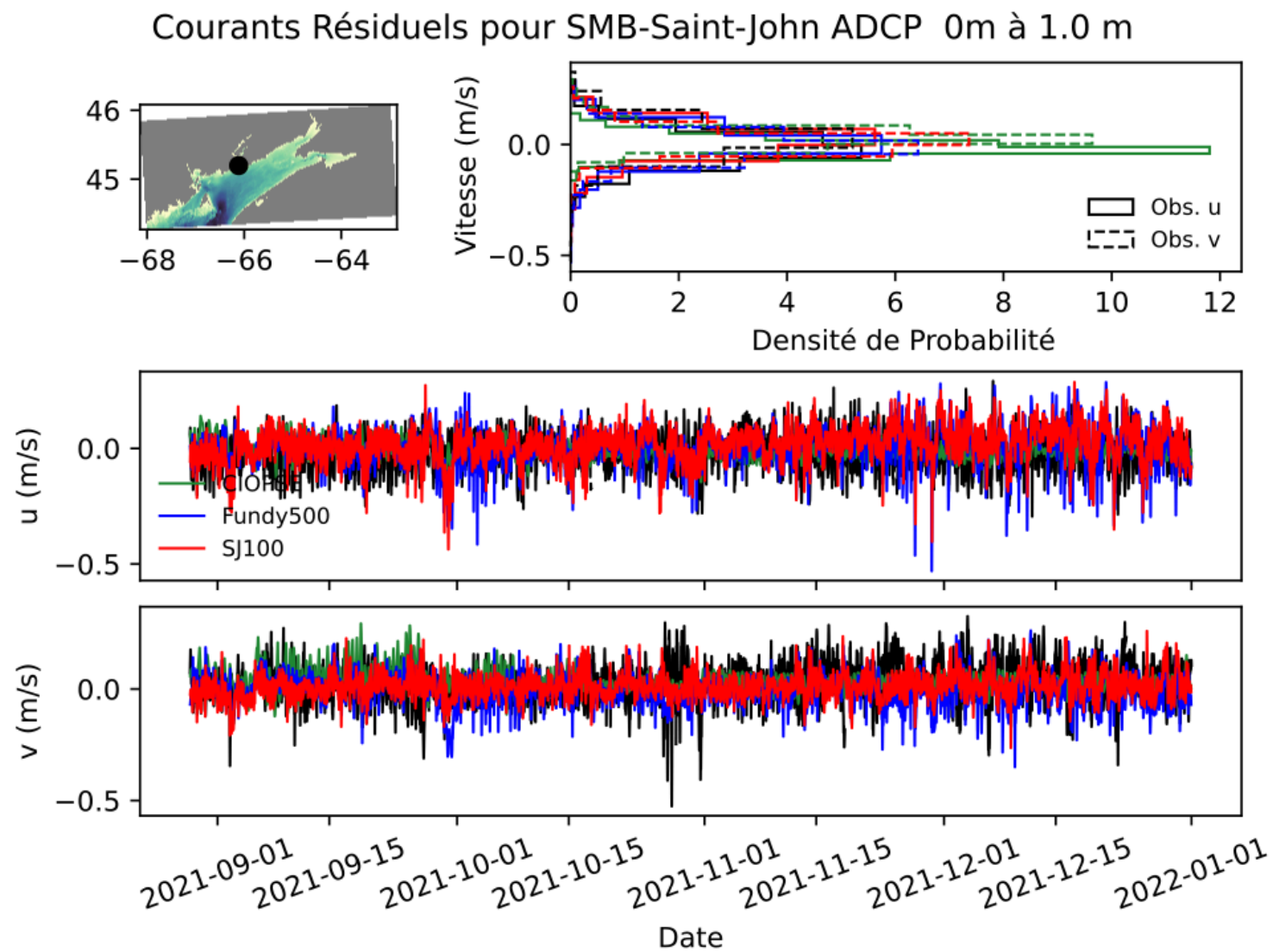


Figure 39 : Courants résiduels près de la surface avec ADCP orienté vers le bas sur la bouée Smart.

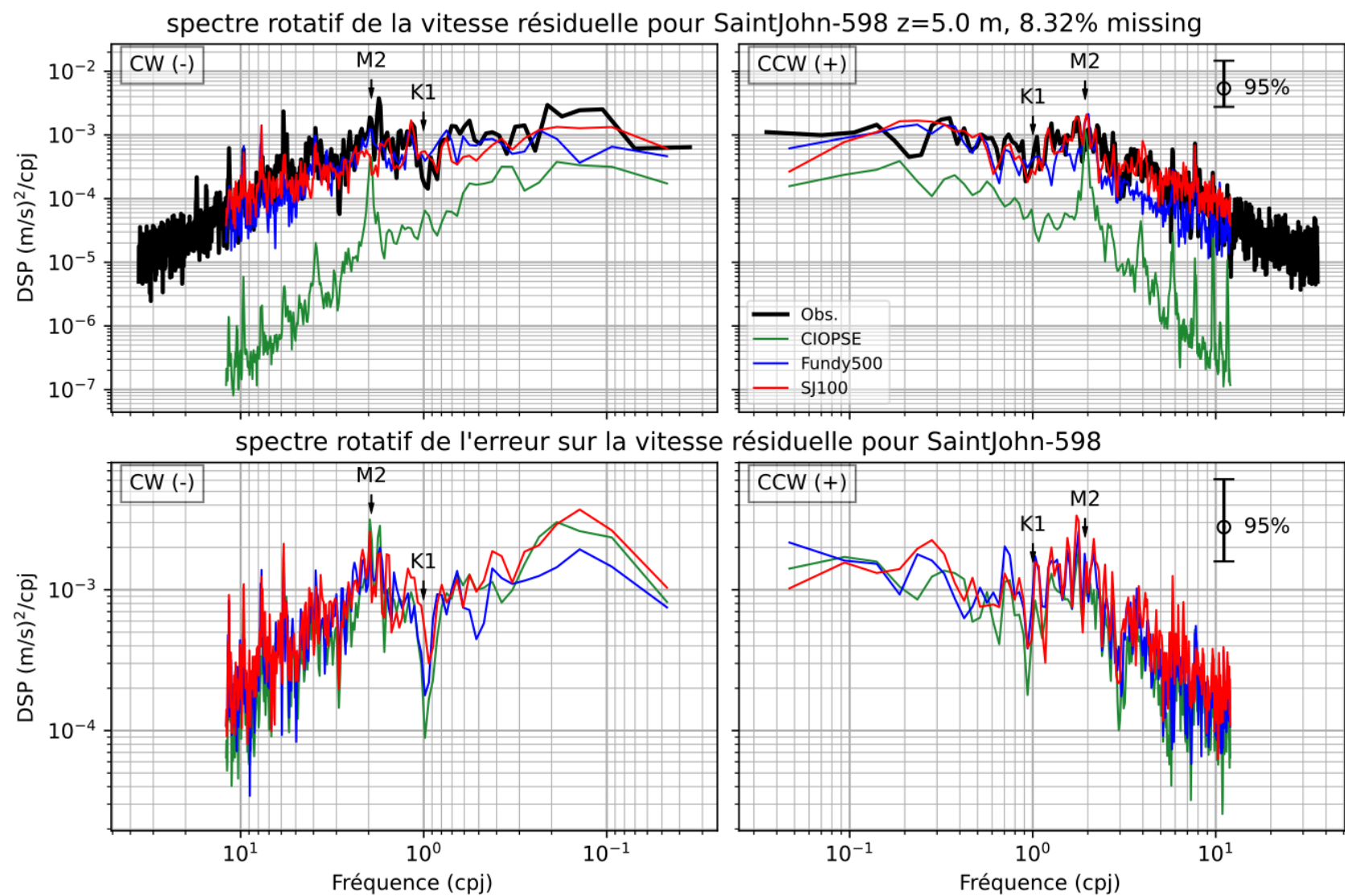


Figure 40 : Spectres rotatifs du courant résiduel et de son erreur pour l'ADCP 598 à 5 m sous la surface.

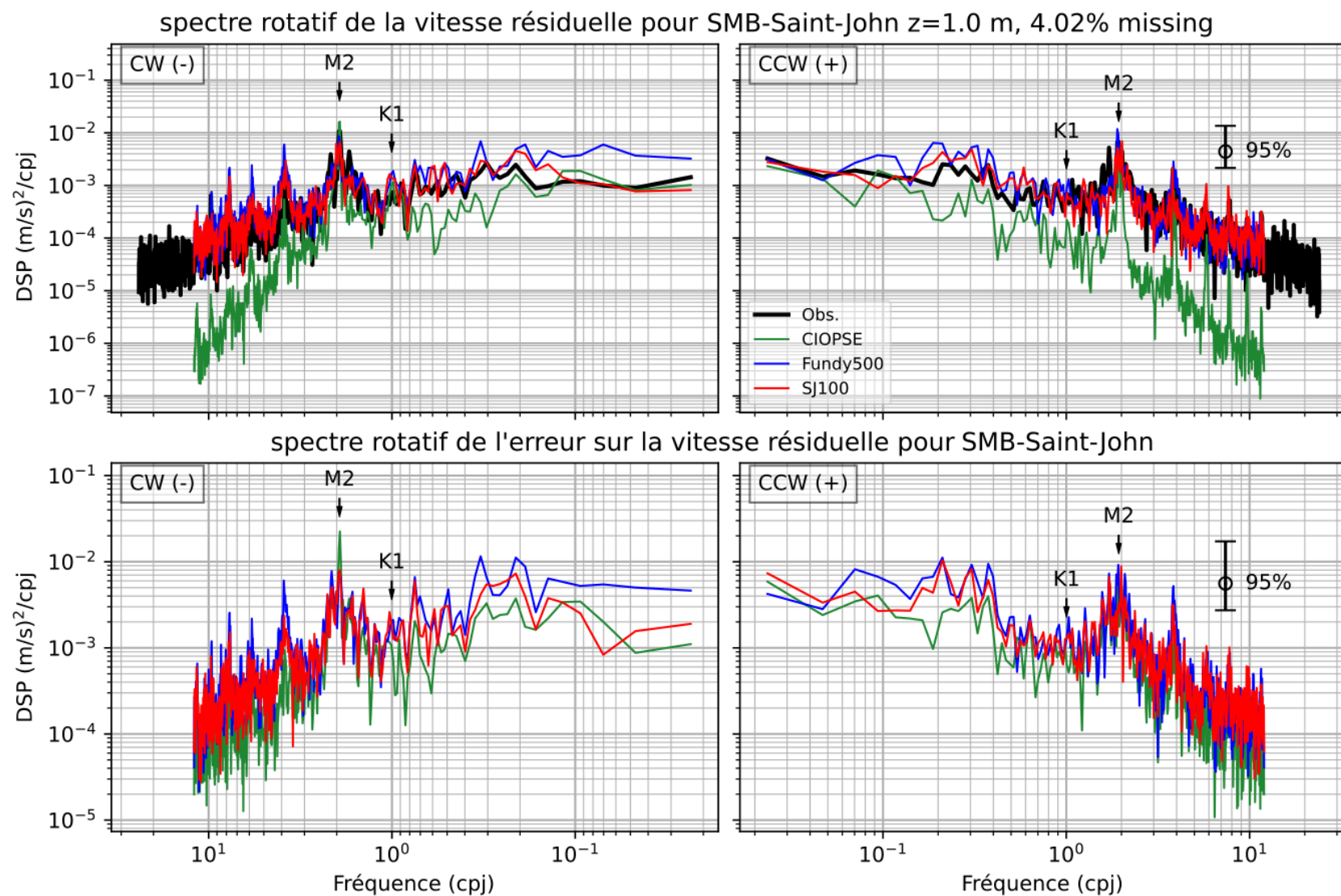


Figure 41 : Spectres rotatifs du courant résiduel et de son erreur pour l'ADCP orienté vers le bas sur la bouée Smart à 1,0 m sous la surface.

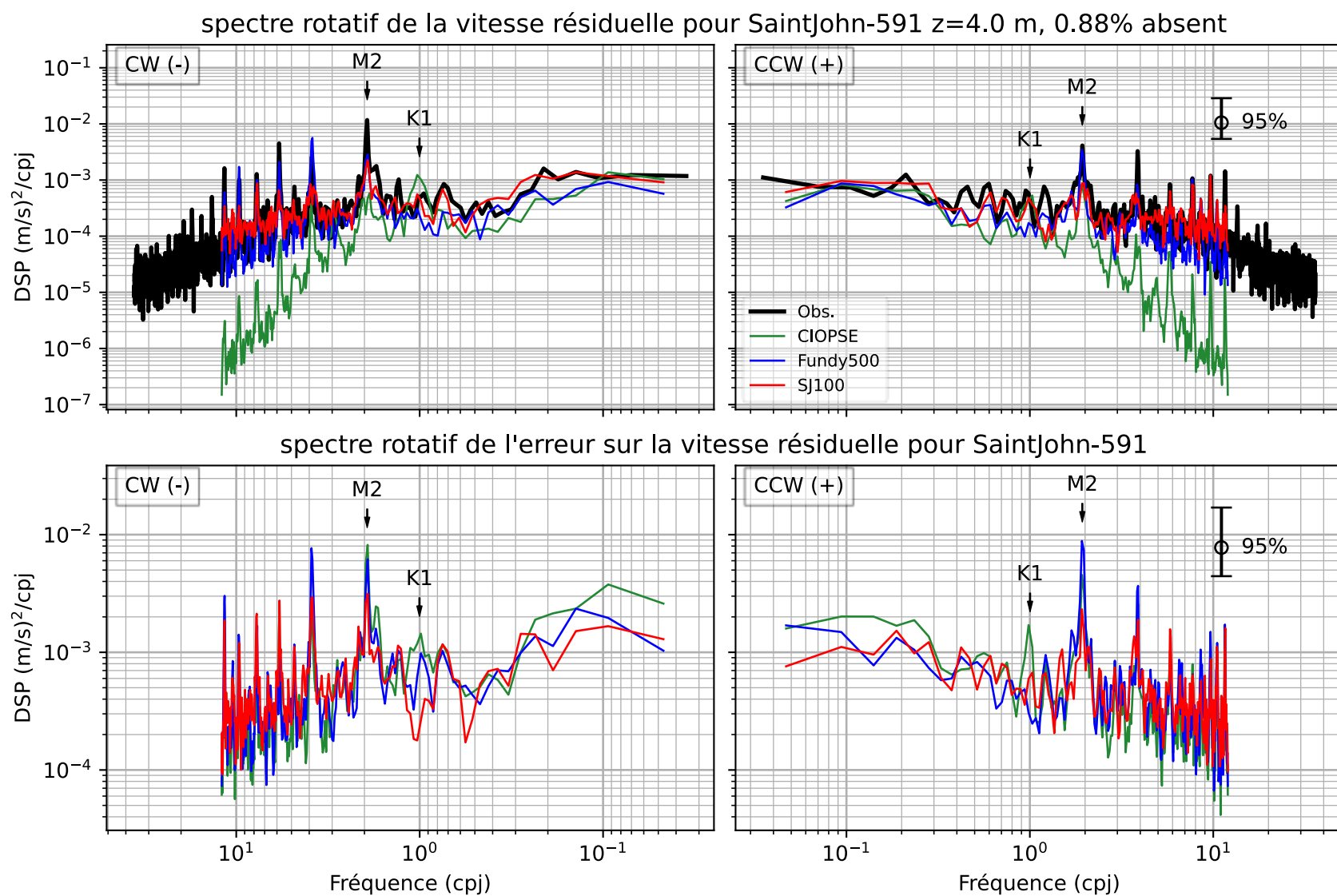


Figure 42 : Spectres rotatifs du courant résiduel et de son erreur pour l'ADCP 591 à 4 m sous la surface.

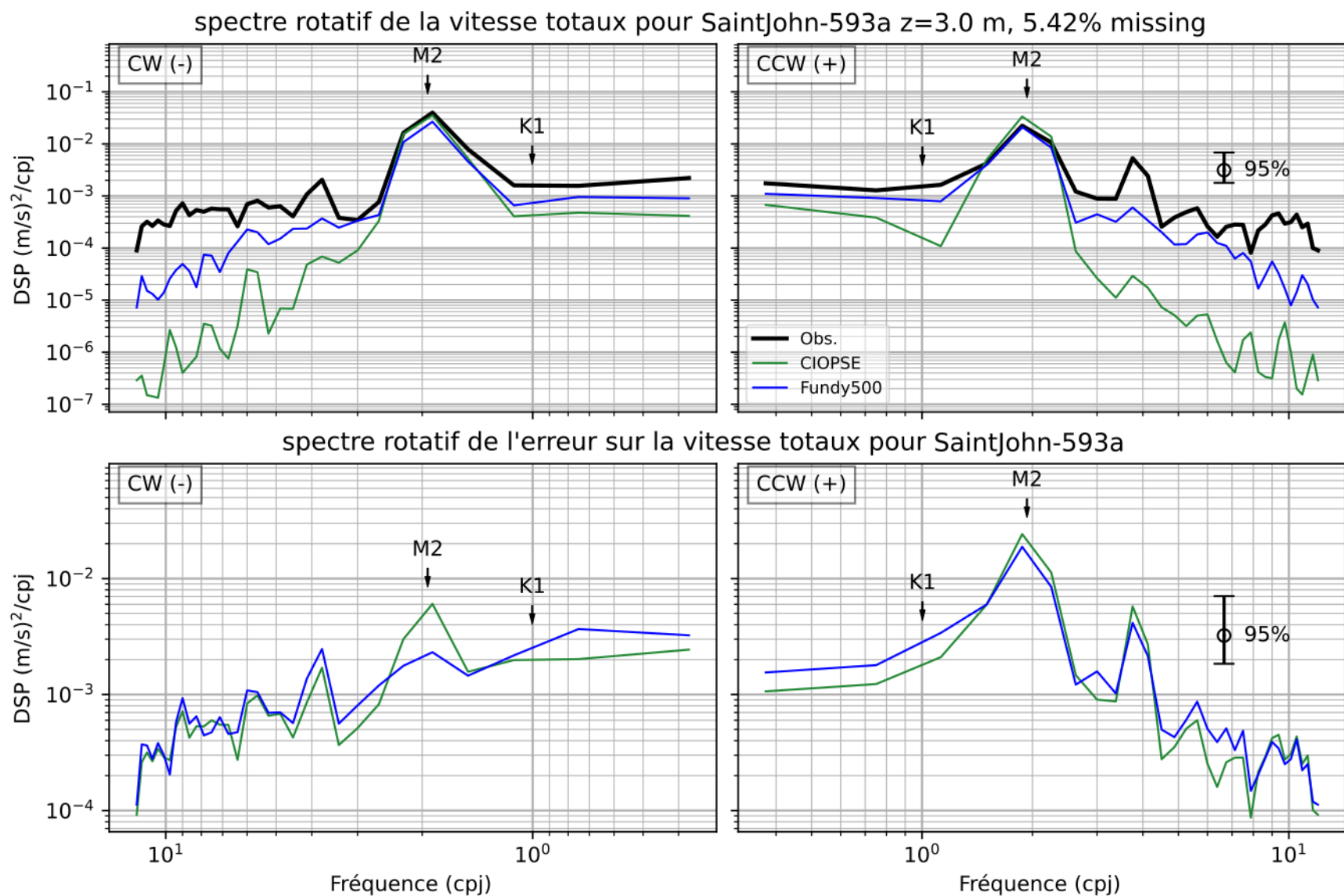


Figure 43 : Spectres rotatifs du courant résiduel et de son erreur pour l'ADCP 593 (dans la baie Maces) à 3 m sous la surface.

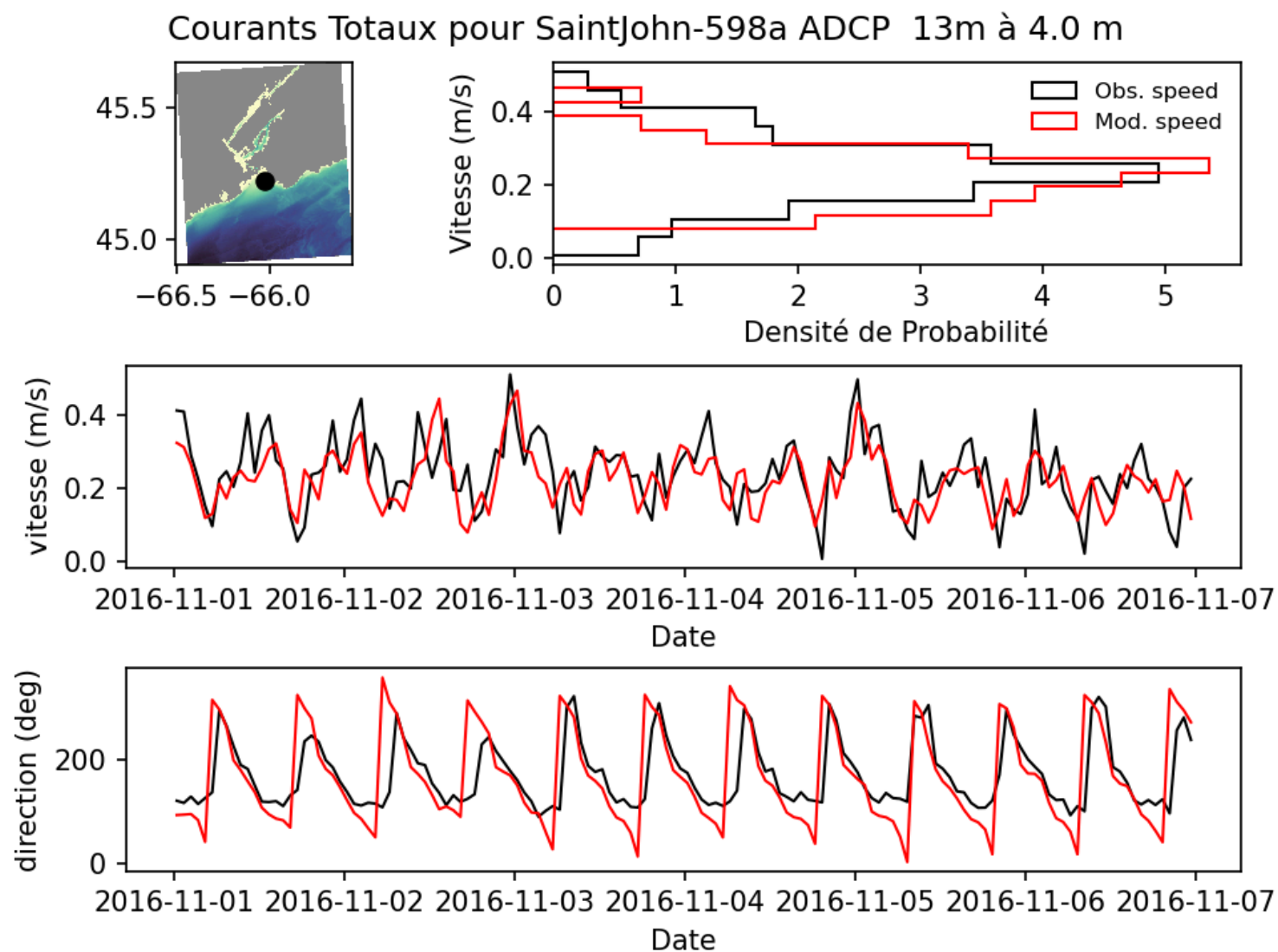


Figure 44 : Série chronologique sur une semaine du courant total (observé et modélisé) pour l'ADCP 598 (à Canaport).

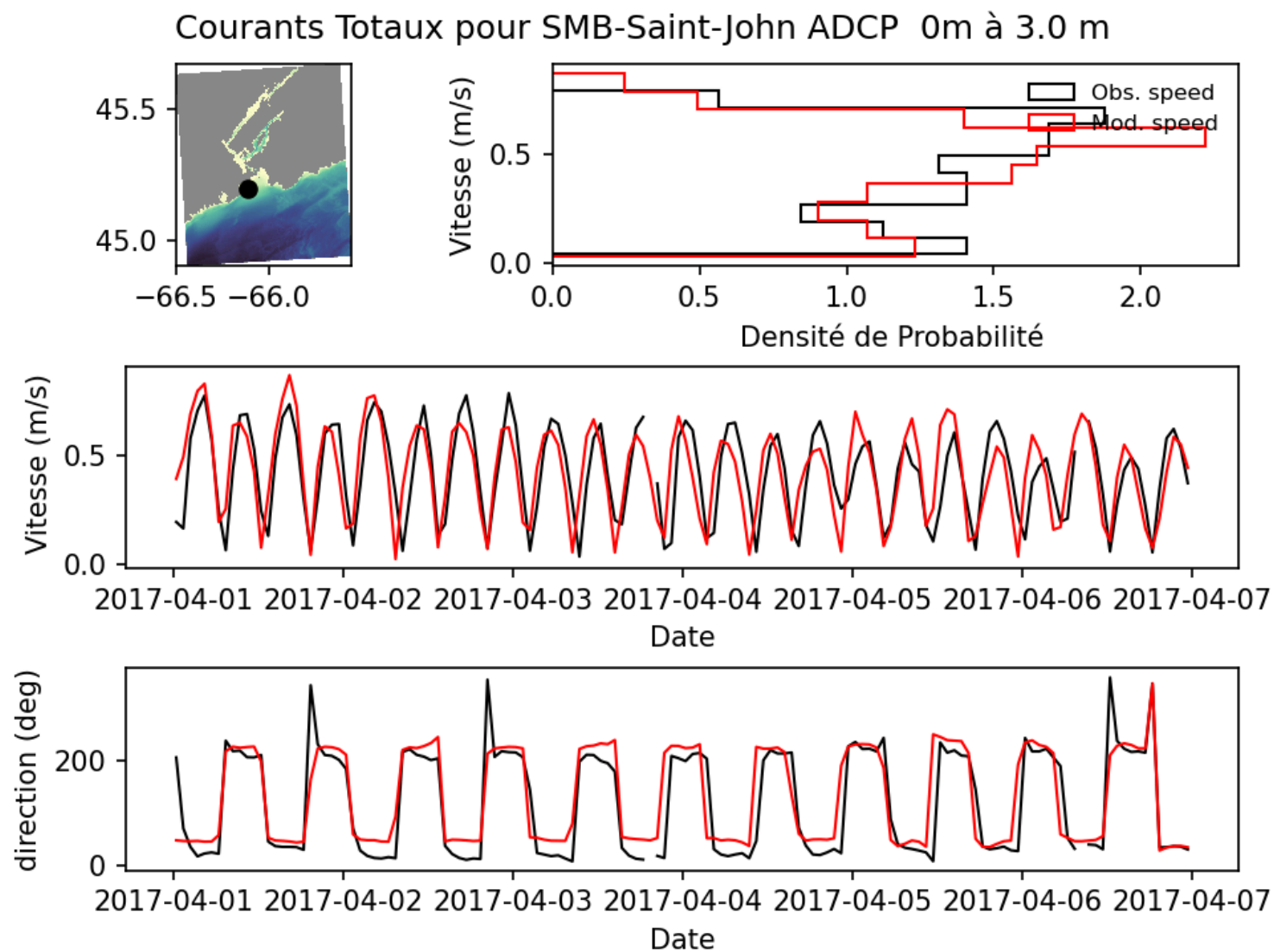


Figure 45 : Série chronologique sur une semaine du courant total (observé et modélisé) pour l'ADCP de la bouée Smart.

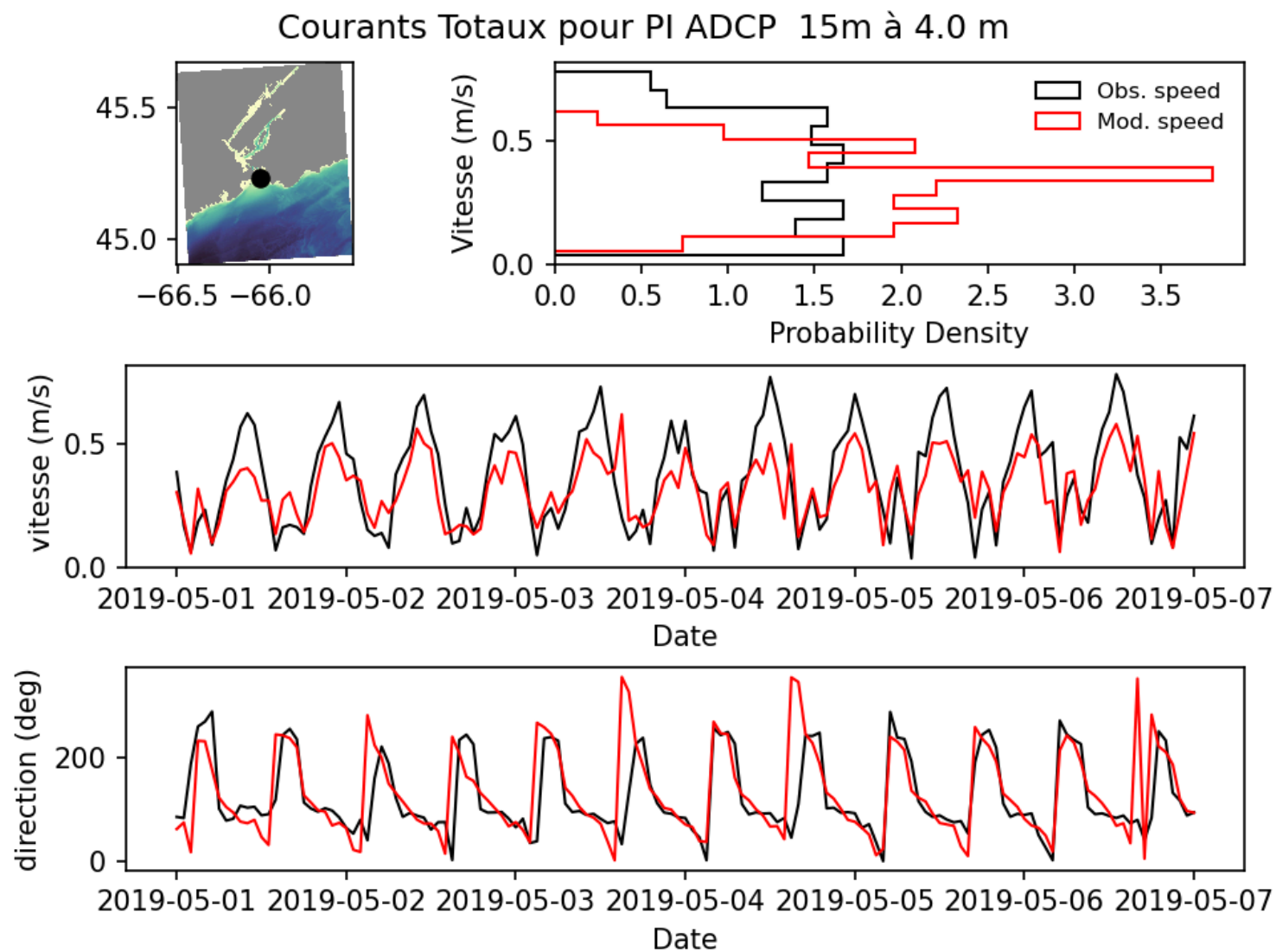


Figure 46 : Série chronologique sur une semaine du courant total (observé et modélisé) pour l'ADCP de l'île Partridge.

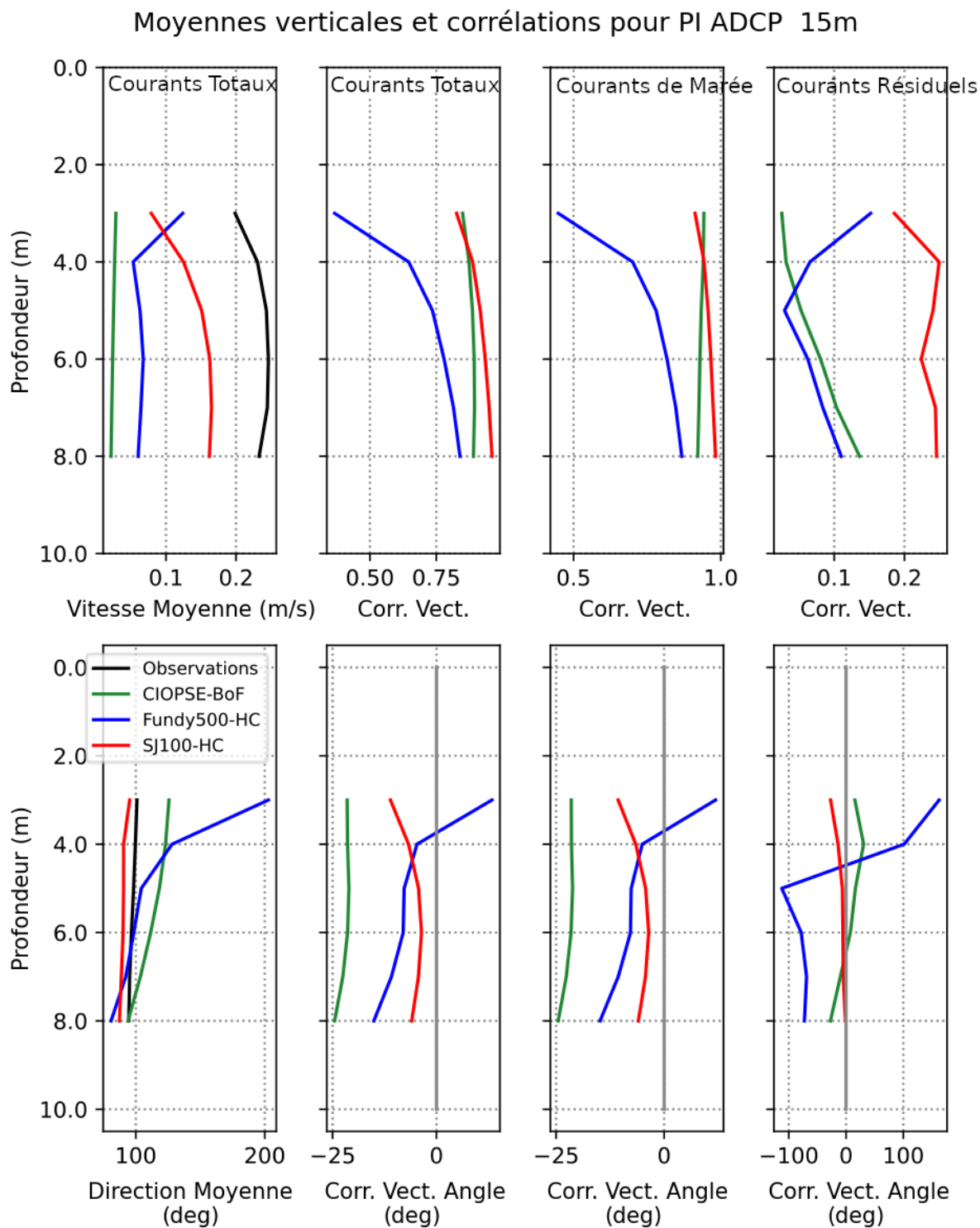


Figure 47 : Profils verticaux des vitesses (panneaux du haut) et des directions (panneaux du bas) des courants moyens et des corrélations vectorielles associées pour l'ADCP de l'île Partridge (PI).

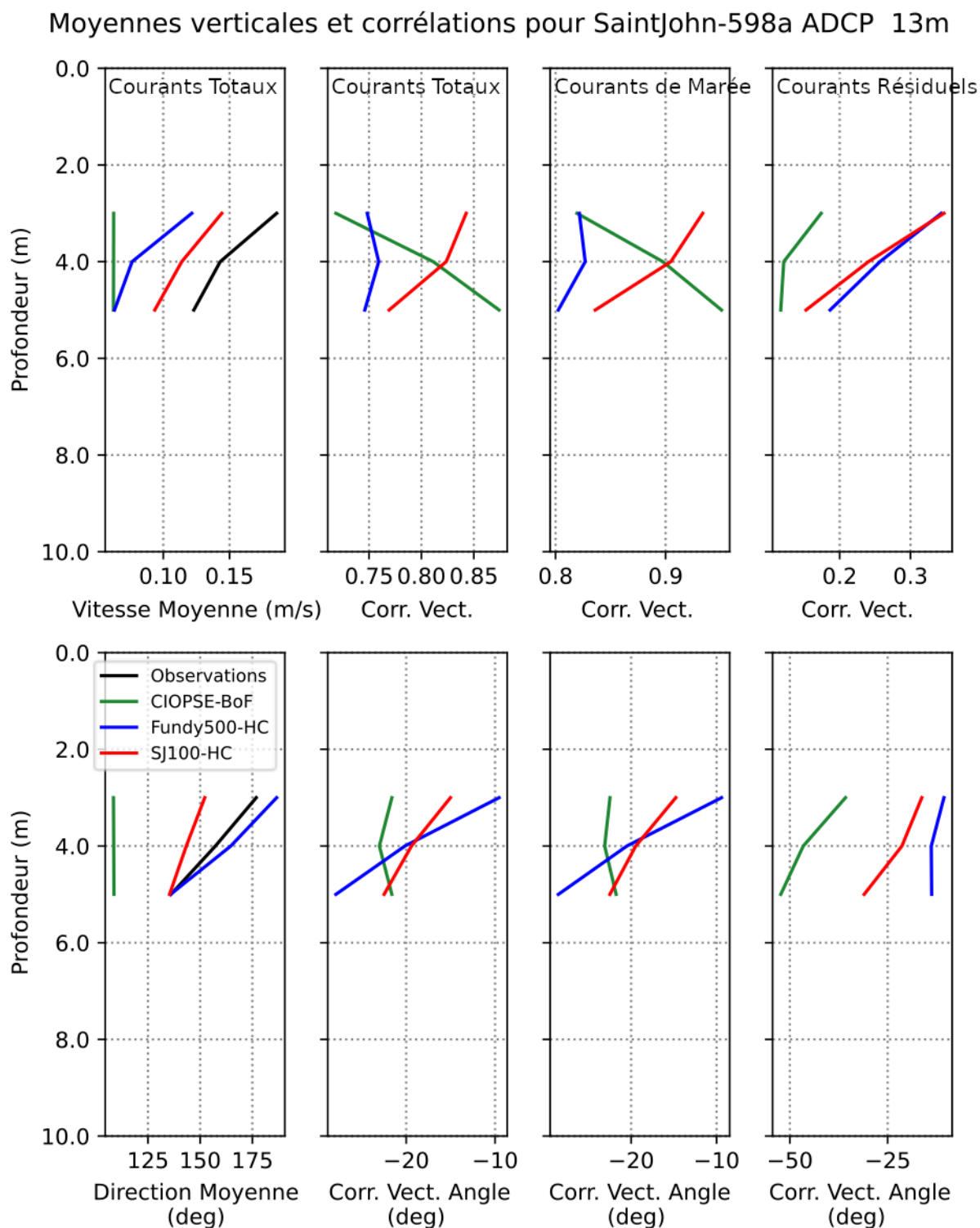


Figure 48 : Profils verticaux des vitesses (panneaux du haut) et des directions (panneaux du bas) des courants moyens et des corrélations vectorielles associées pour l'ADCP 598 (à Canaport).

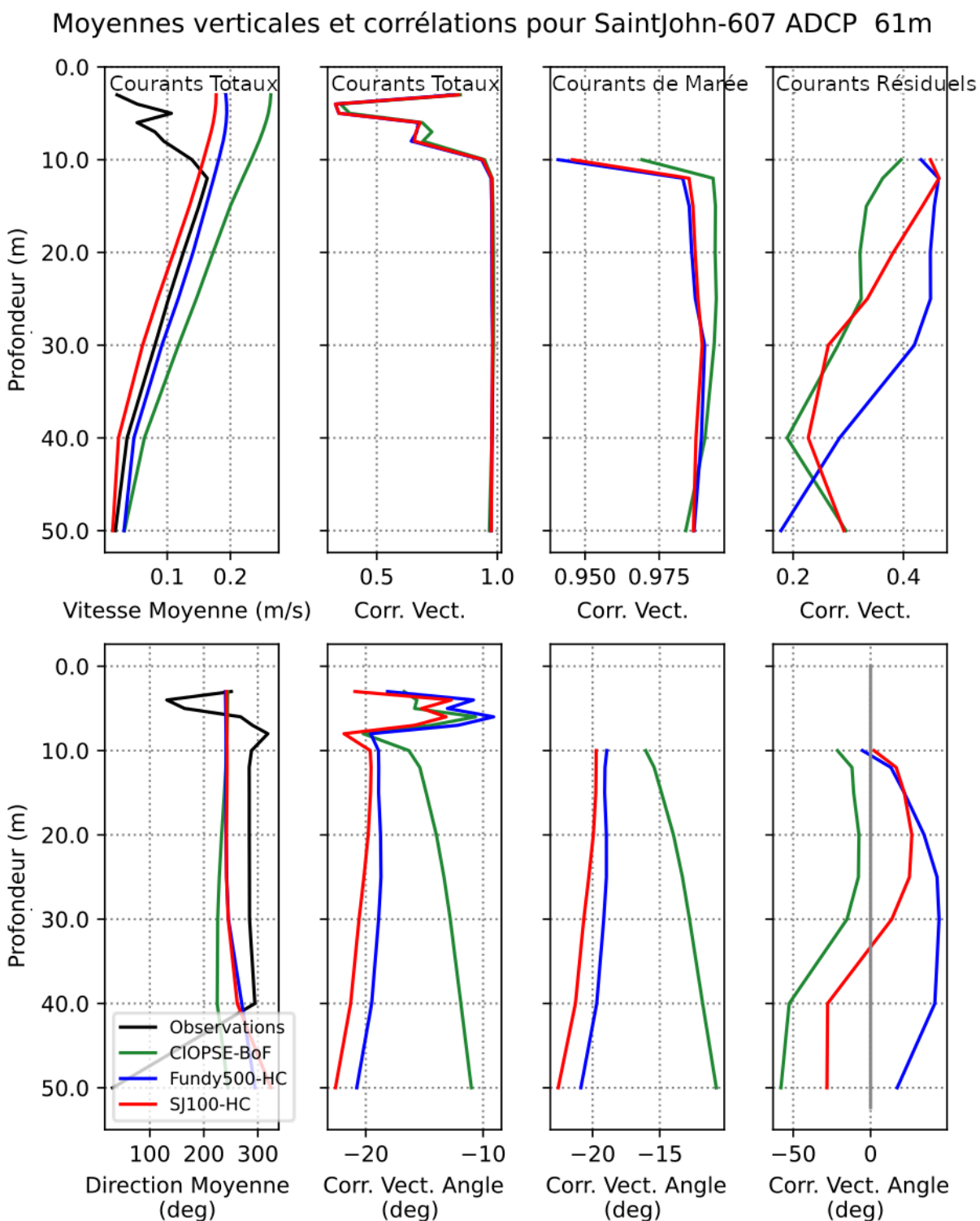


Figure 49 : Profils verticaux des vitesses (panneaux du haut) et des directions (panneaux du bas) des courants moyens et des corrélations vectorielles associées pour l'ADCP 607 (au large de Cape Spencer).

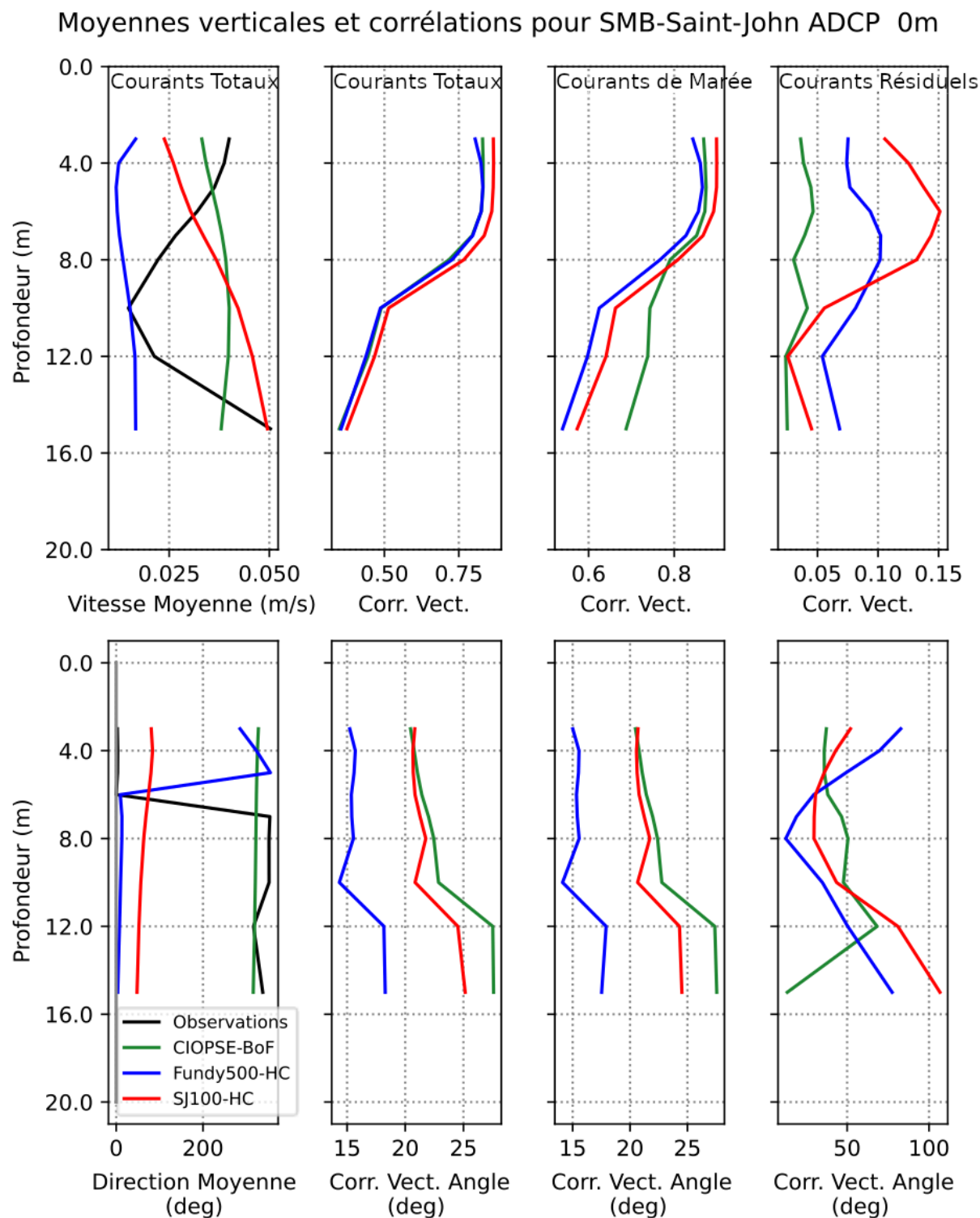


Figure 50 : Profils verticaux des vitesses (panneaux du haut) et des directions (panneaux du bas) des courants moyens et des corrélations vectorielles associées pour l'ADCP de la bouée Smart.

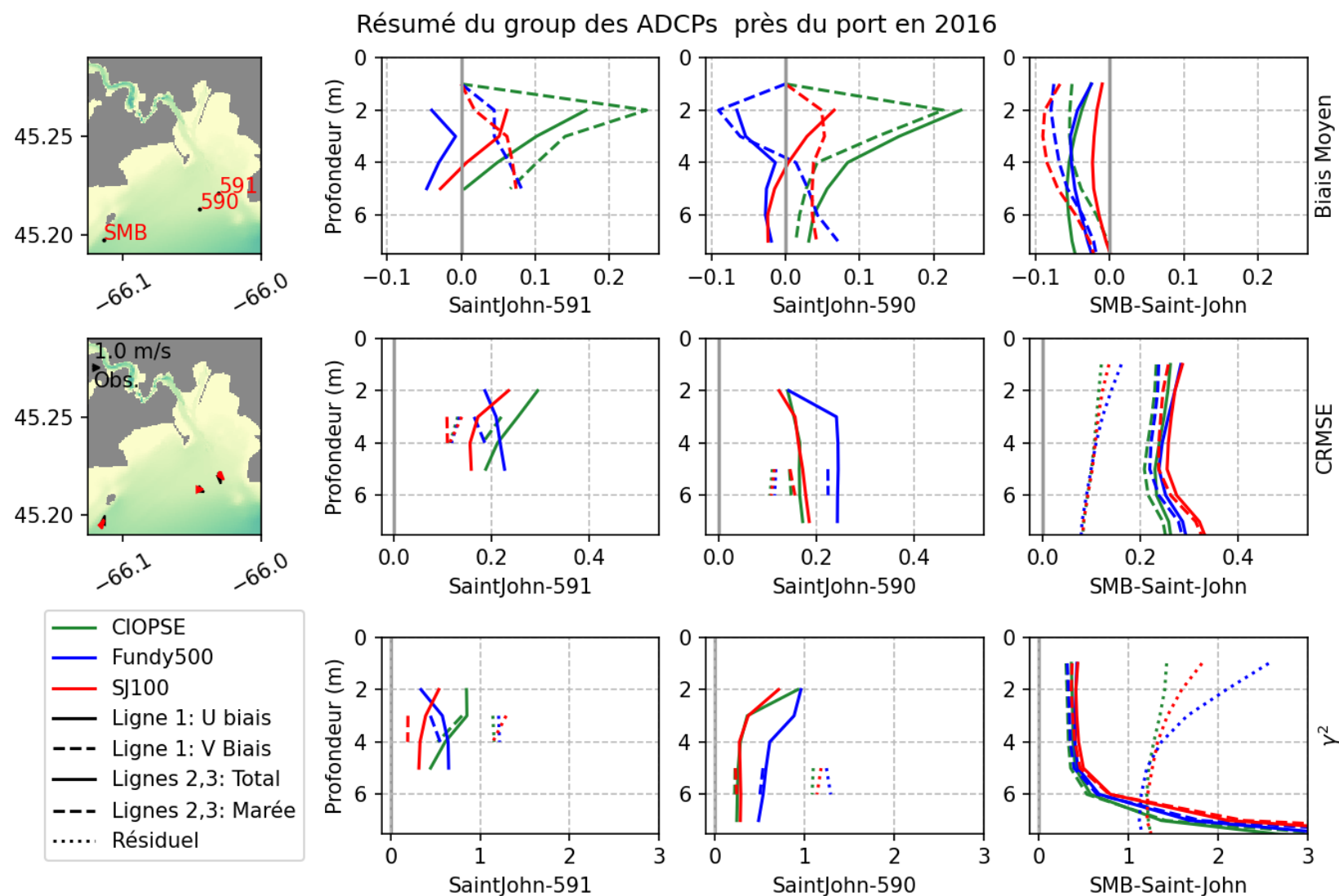


Figure 51 : Profils verticaux des statistiques pour les mouillages près de Saint John en 2016. La ligne du haut indique le biais moyen pour les courants u (continue) et v (pointillée). Les rangées du milieu et du bas montrent la CRMSE et le χ^2 pour le courant total (continue), de marée (tiretée) et résiduel (pointillée).

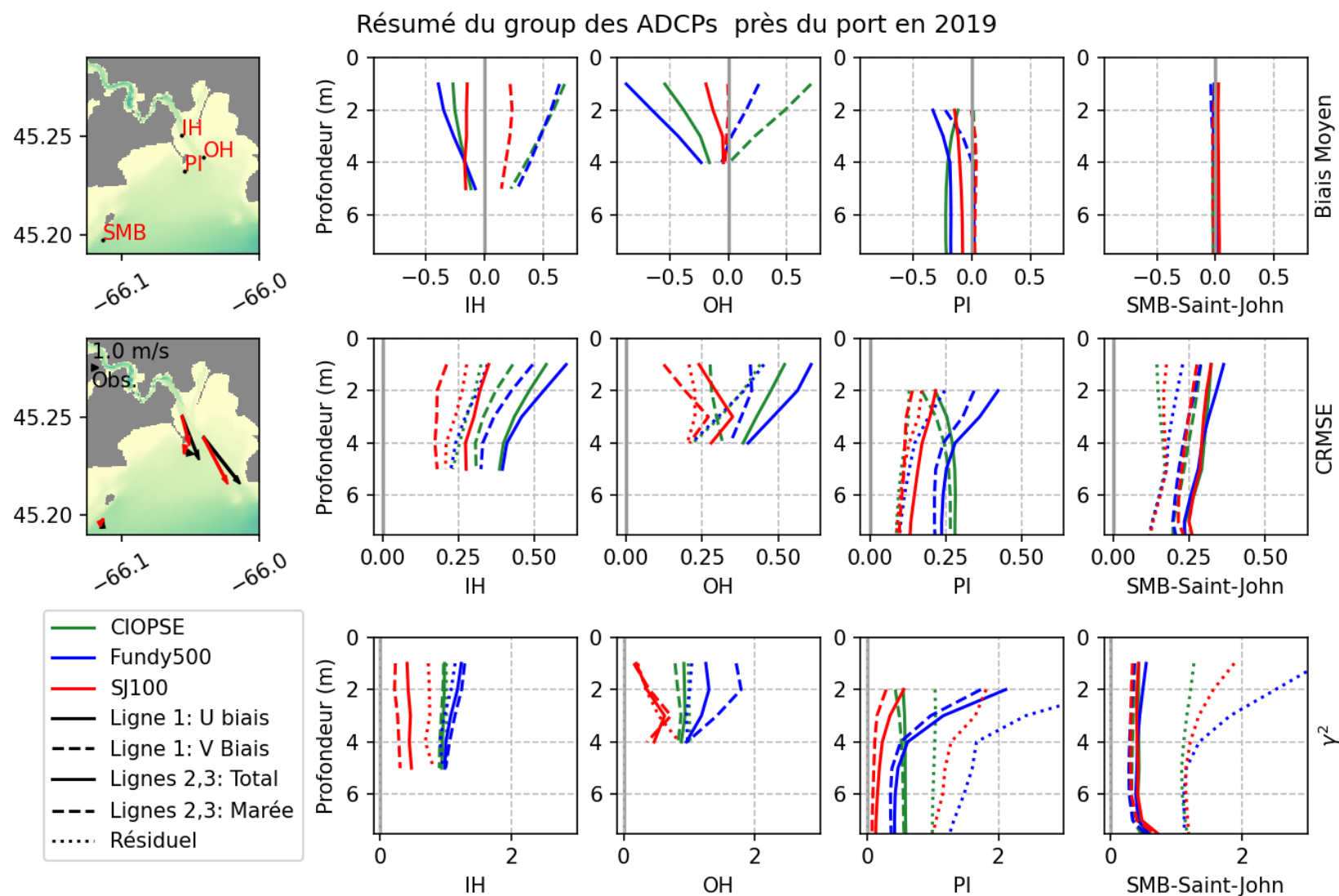


Figure 52 : Profils verticaux des statistiques pour les mouillages dans le port en 2019. La ligne du haut indique le biais moyen pour les courants u (continue) et v (pointillée). Les rangées du milieu et du bas montrent la CRMSE et le χ^2 pour le courant total (continue), de marée (tiretée) et résiduel (pointillée).

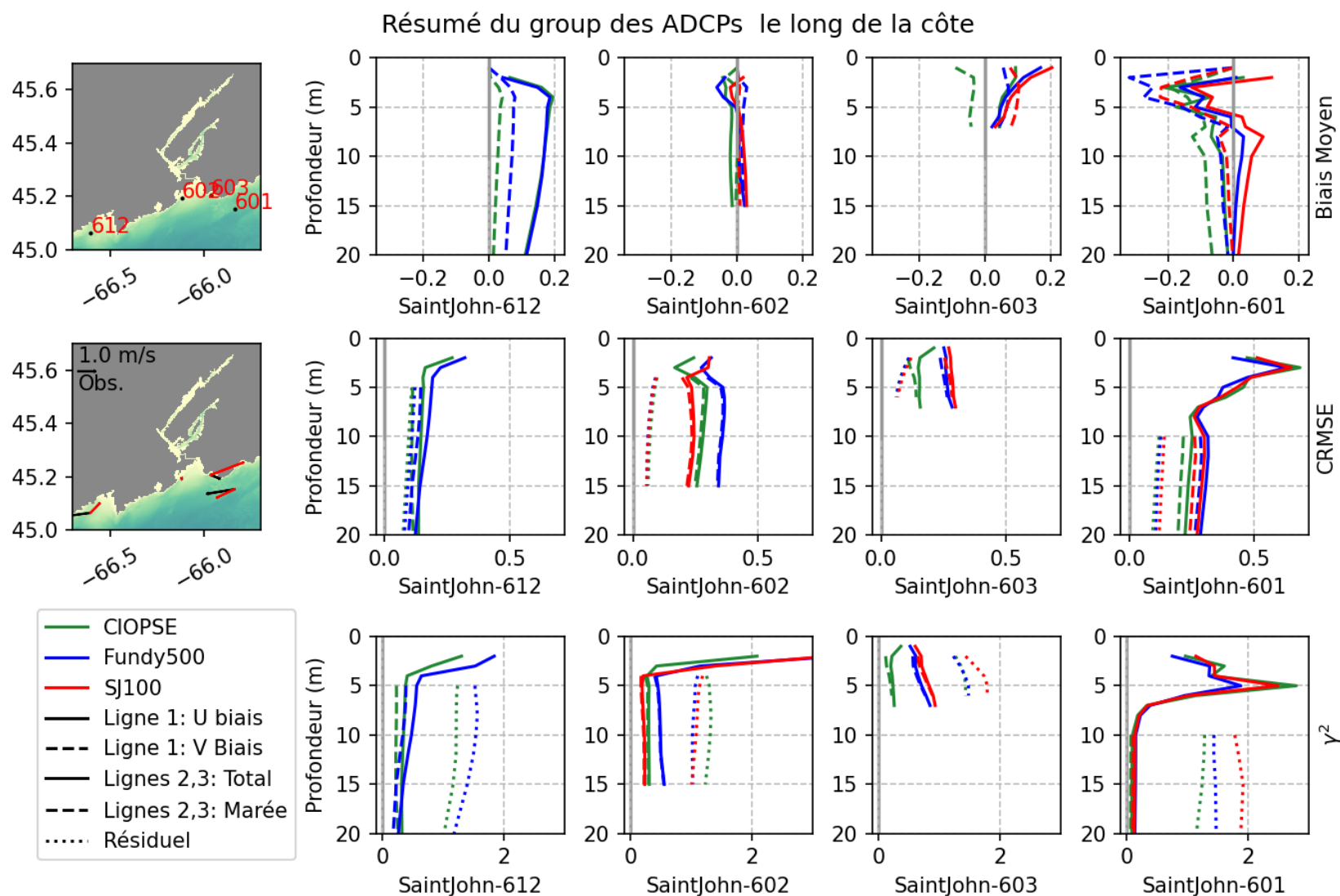


Figure 53 : Profils verticaux des statistiques pour un ensemble de mouillages le long de la côte en 2017. La ligne du haut indique le biais moyen pour les courants u (continue) et v (pointillée). Les rangées du milieu et du bas montrent la CRMSE et le χ^2 pour le courant total (continue), de marée (tiretée) et résiduel (pointillée).

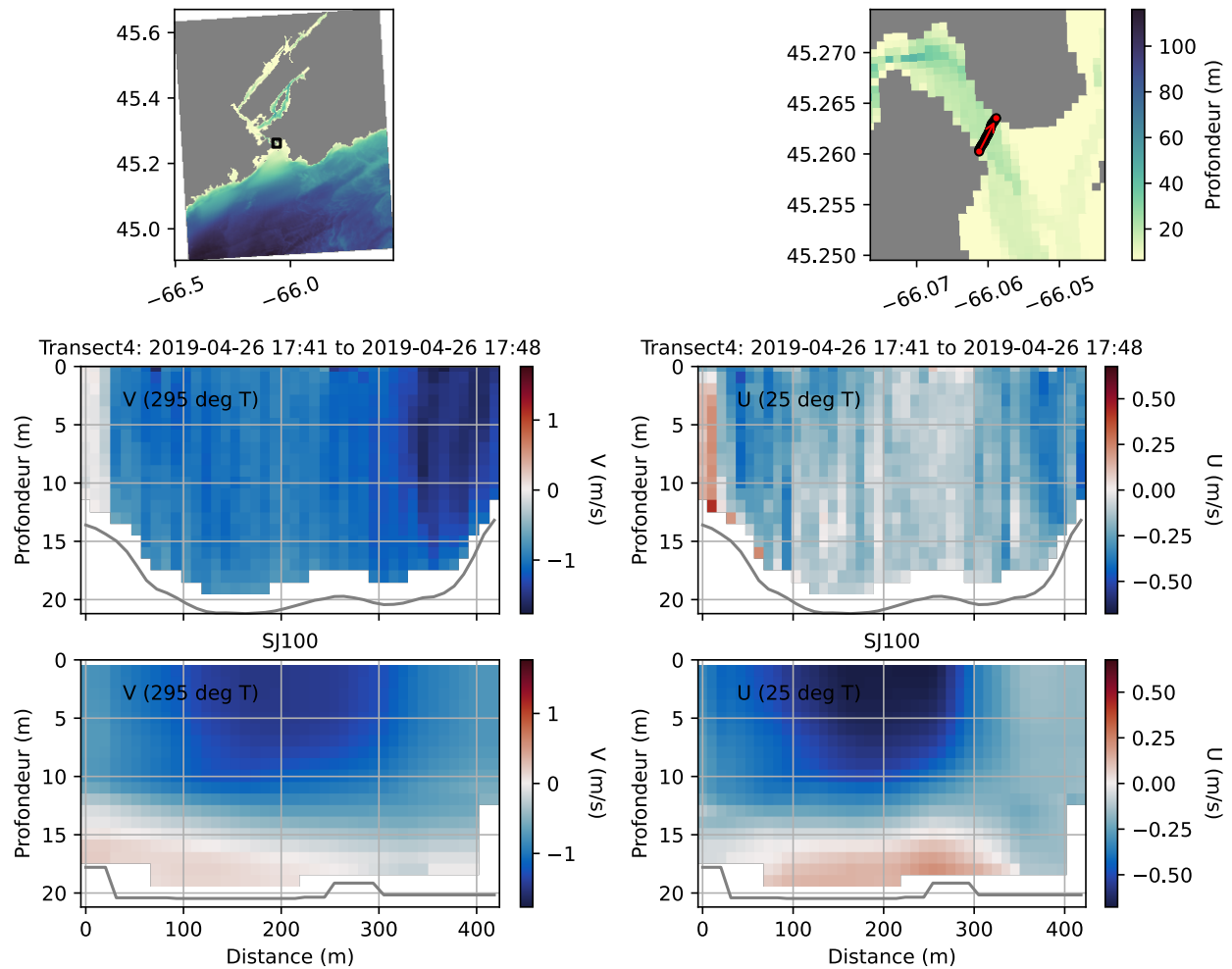


Figure 54 : Transect d'ADCP traversant l'embouchure de la rivière Saint-Jean (panneaux du haut). Les observations (Transect4) du 2019-04-26 sont présentées sur les 2 panneaux du milieu et les résultats du modèle SJ100 sur les deux panneaux du bas. Le courant V est perpendiculaire au transect (c.-à-d. le long du chenal), et le courant U est le long du transect (c.-à-d. entre les chenaux). Noter la variation du courant le long du transect (entre les chenaux). Les autres modèles ne représentent pas adéquatement le transect et ne sont donc pas présentés. Un débit positif est considéré sortant de la rivière.

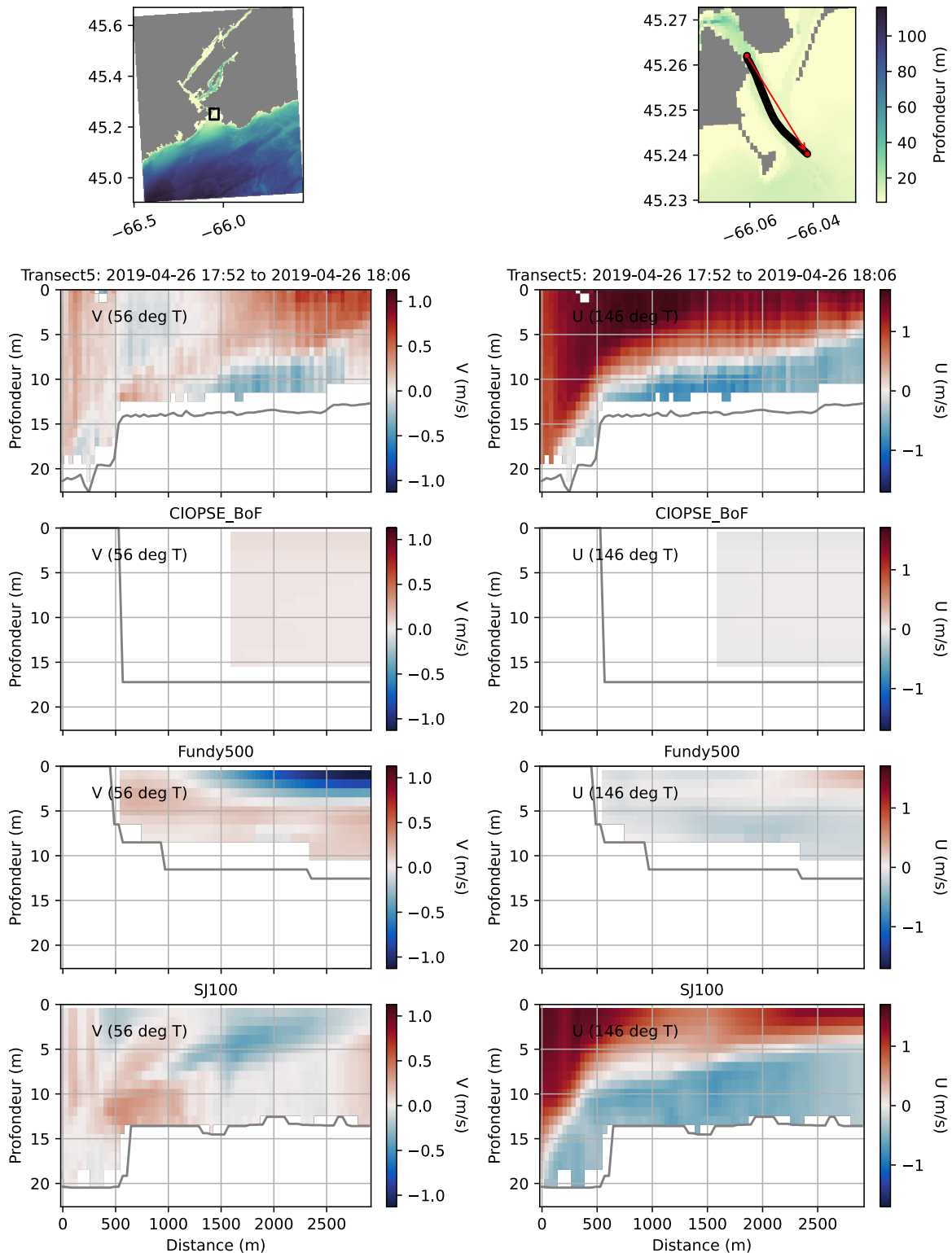


Figure 55 : Transect d'ADCP de l'embouchure de la rivière jusqu'au bout de l'île Partridge, grossièrement après le chenal dragué principal. Du haut vers le bas, sont présentés les observations (Transect5) du 2019-04-26 et les résultats pour les modèles SPOG-E (CIOPS-E), le Fundy 500 et le SJ100.

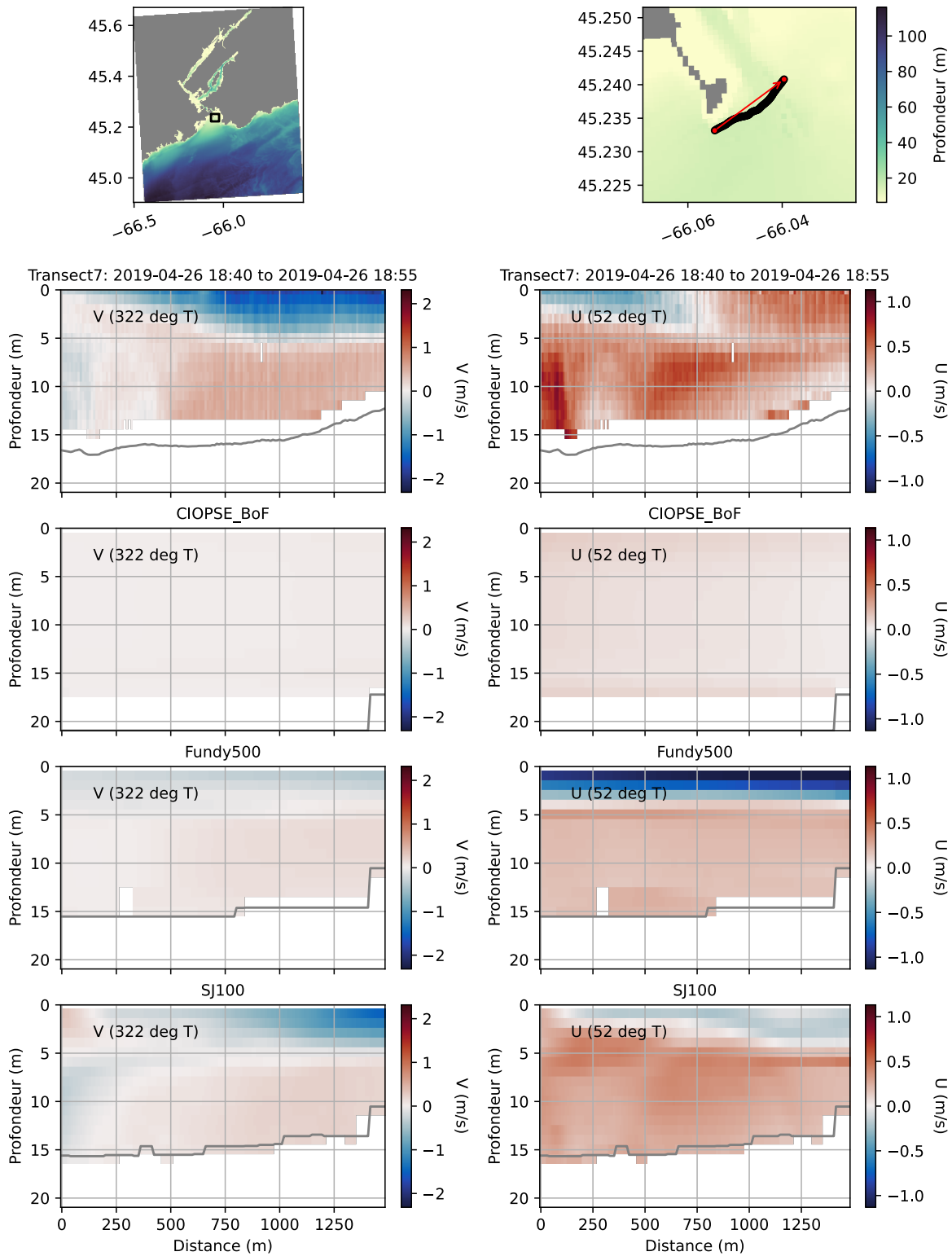


Figure 56 : Transect d'ADCP près de l'île Partridge. Du haut vers le bas, sont présentés les observations (Transect7) du 2019-04-26 et les résultats pour les modèles SPCOG-E (CIOPS-E), Fundy500 et SJ100.

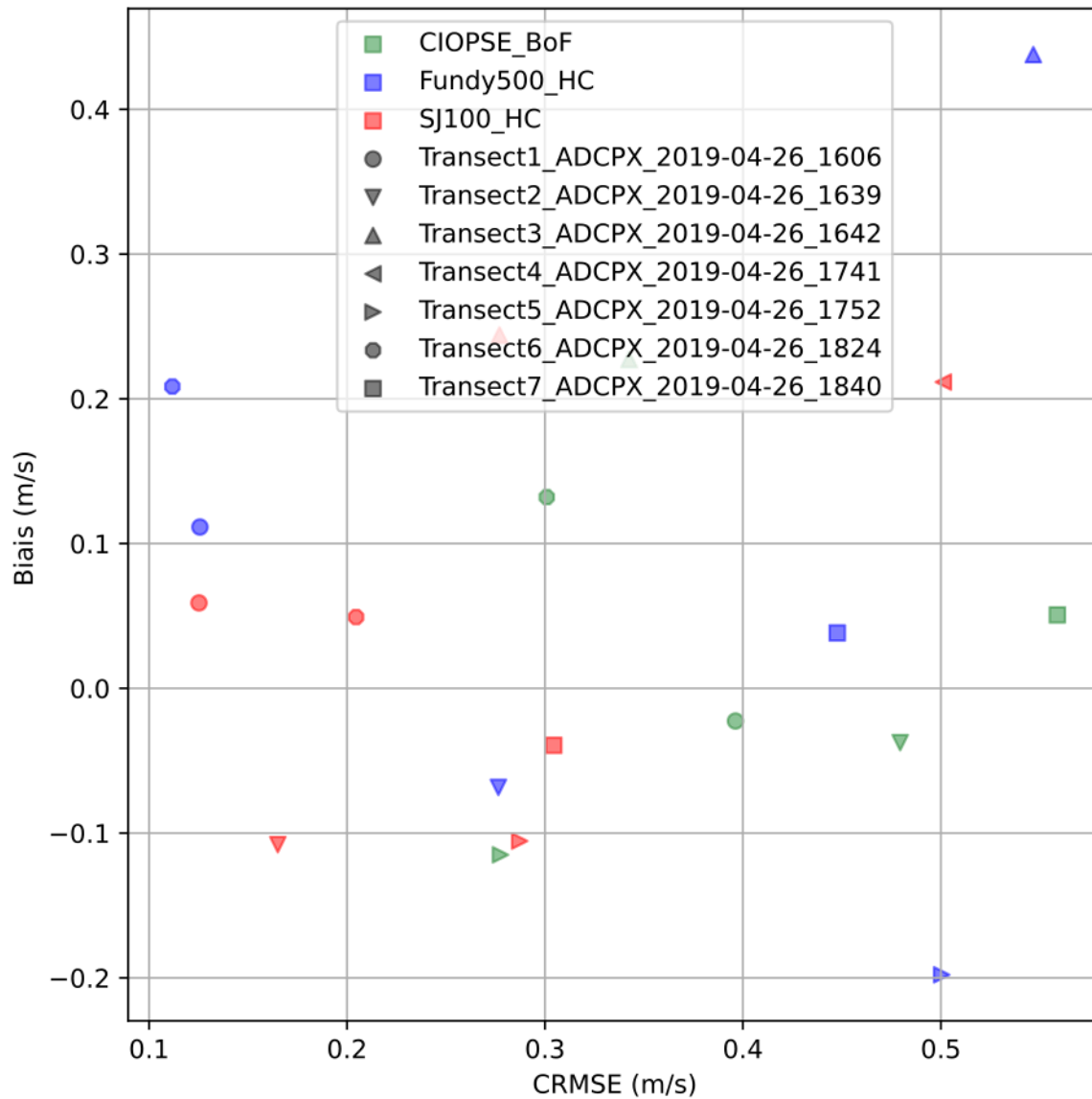


Figure 57 : Biais par rapport à la CRMSE pour les sept transects des ADCP pour les trois modèles : SPCOG-E (CIOPSE_BoF), Fundy500 et SJ100.

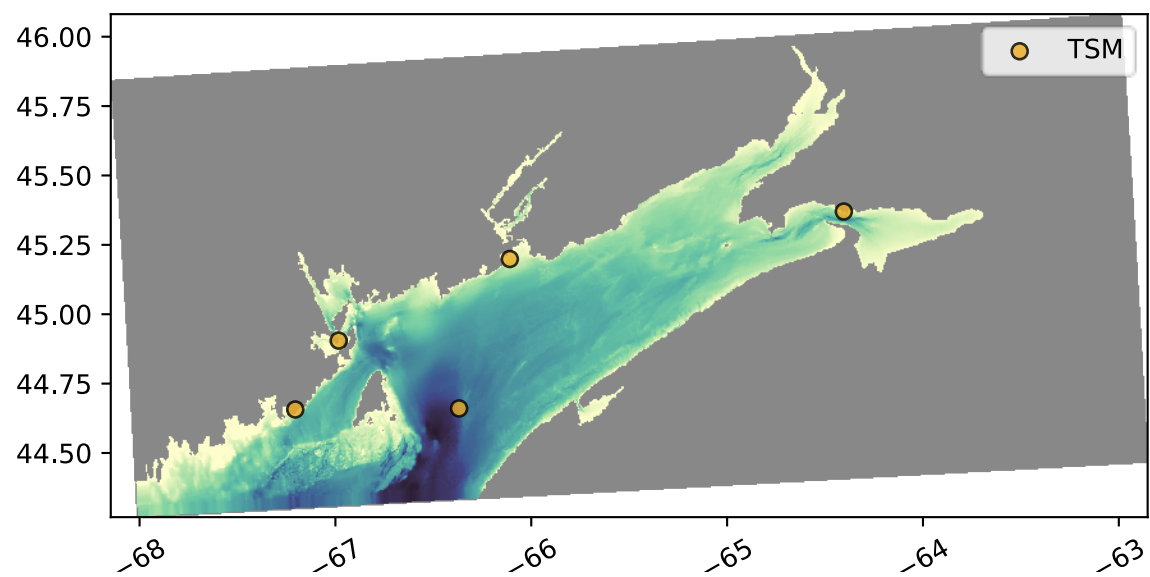


Figure 58 : Emplacement des observations de la température de de surface de la mer (TSM).

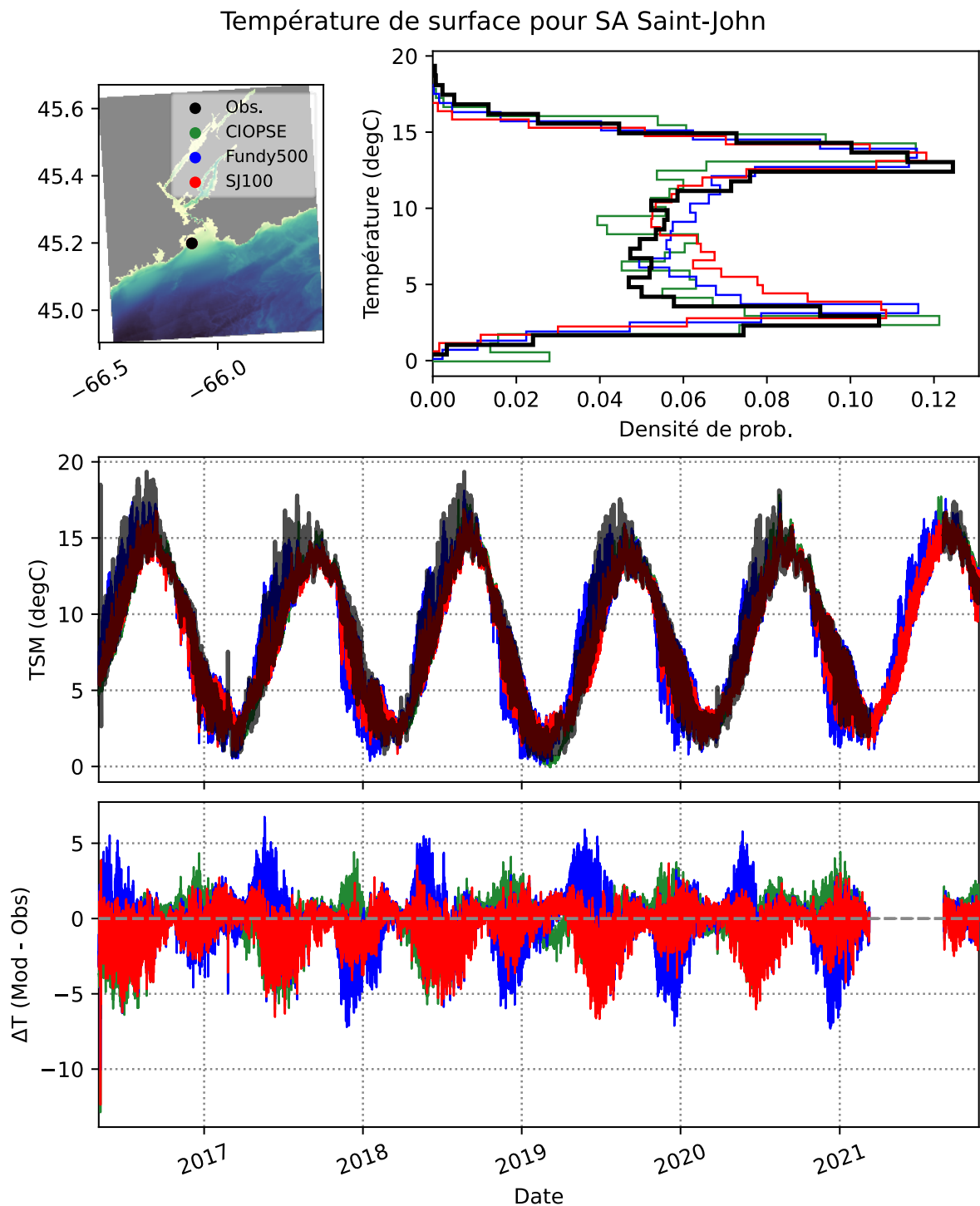


Figure 59 : Température de surface de la mer (TSM) à la bouée SmartAtlantic (SA) à l'extérieur du port de Saint John. La série chronologique couvre toute la période de la simulation rétrospective.

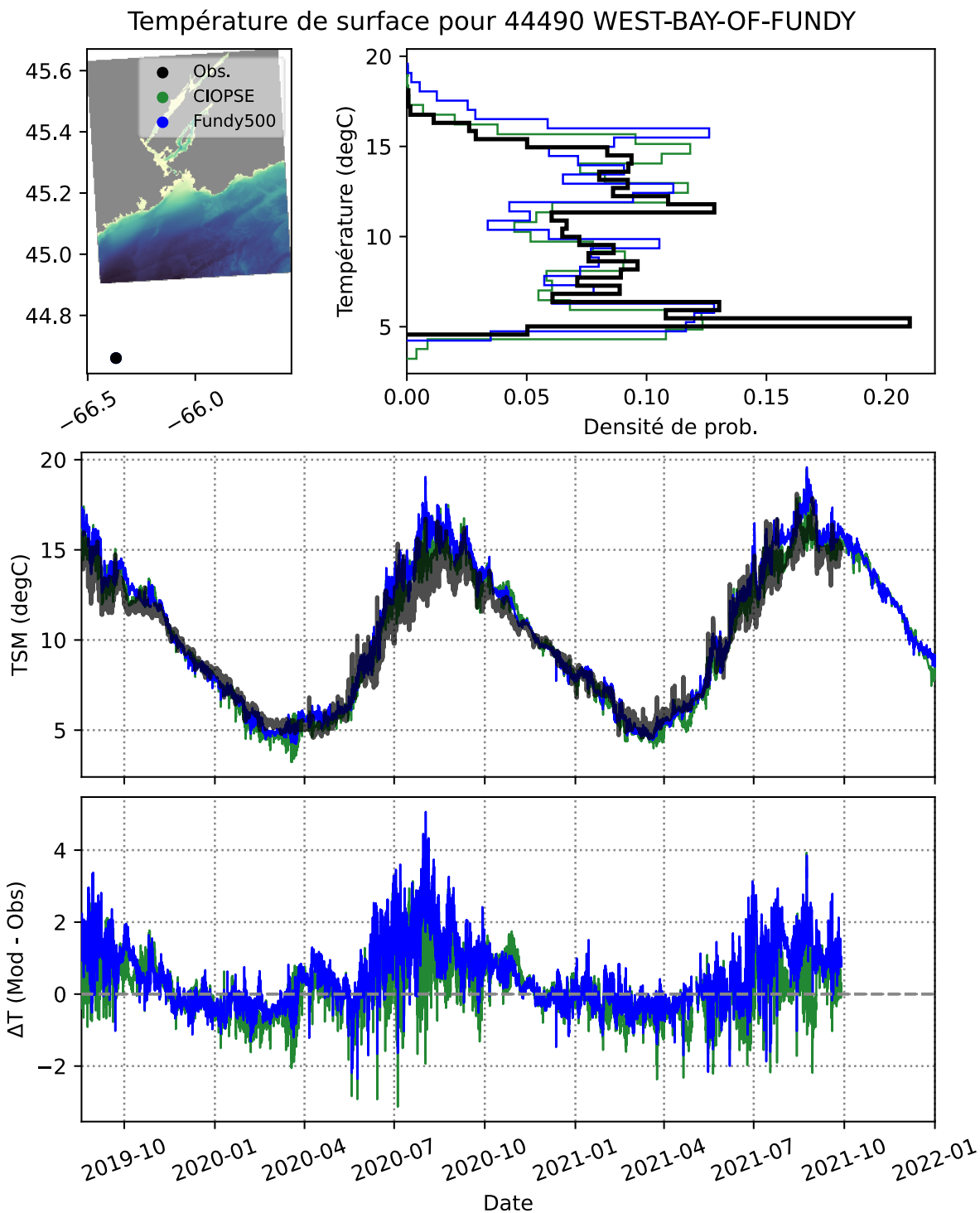


Figure 60 : Température de surface de la mer (TSM) à la bouée 44490, entre Grand Manan et la péninsule de Digby.

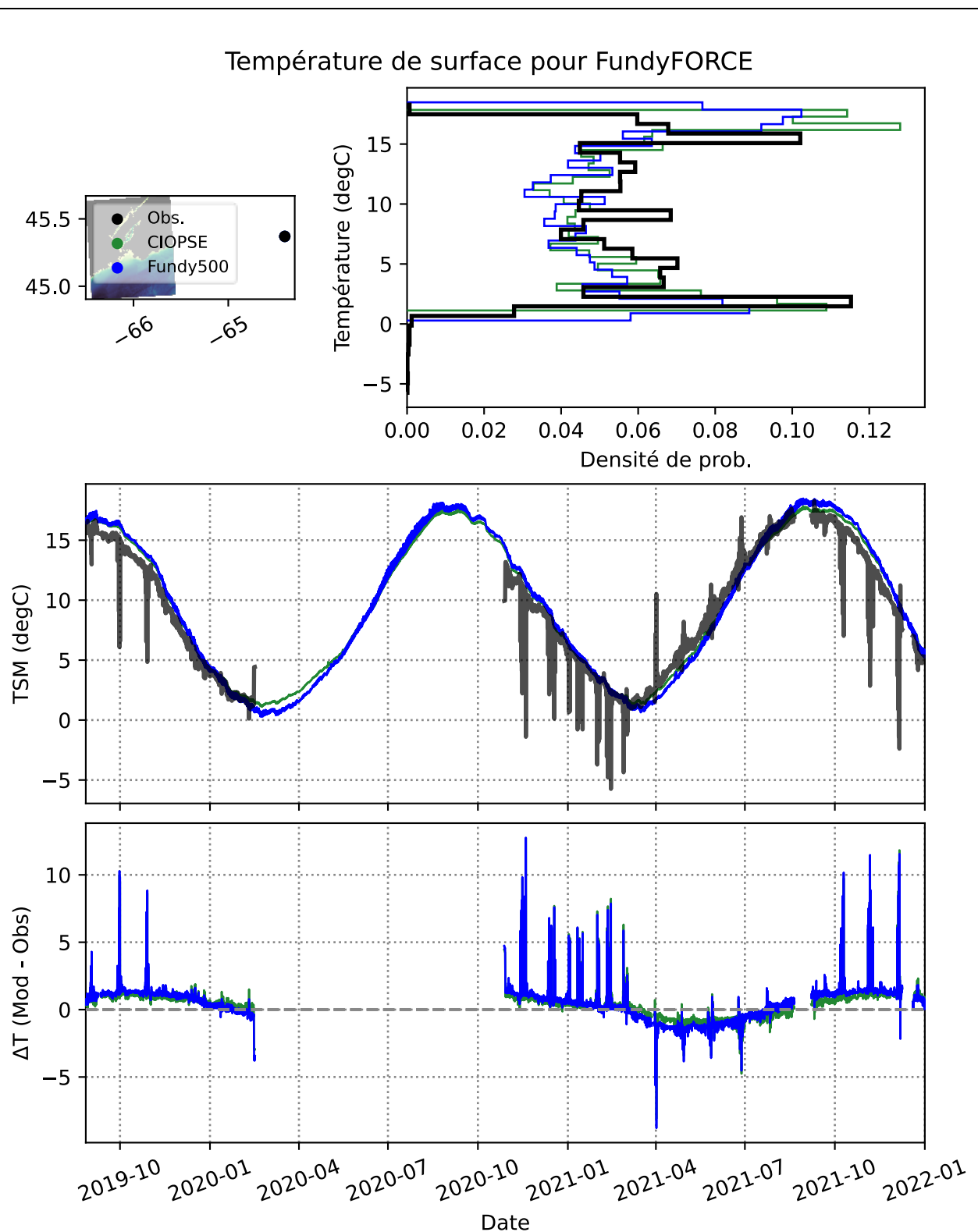


Figure 61 : Température de surface de la mer (TSM) à la bouée Fundy FORCE, près de Parrsboro (N.-É.). Les pointes de température froide peuvent être dues au fait que suivant les mouvements de la bouée la sonde peut basculer dans l'air, plutôt que correspondre à une mesure précise de la TSM.

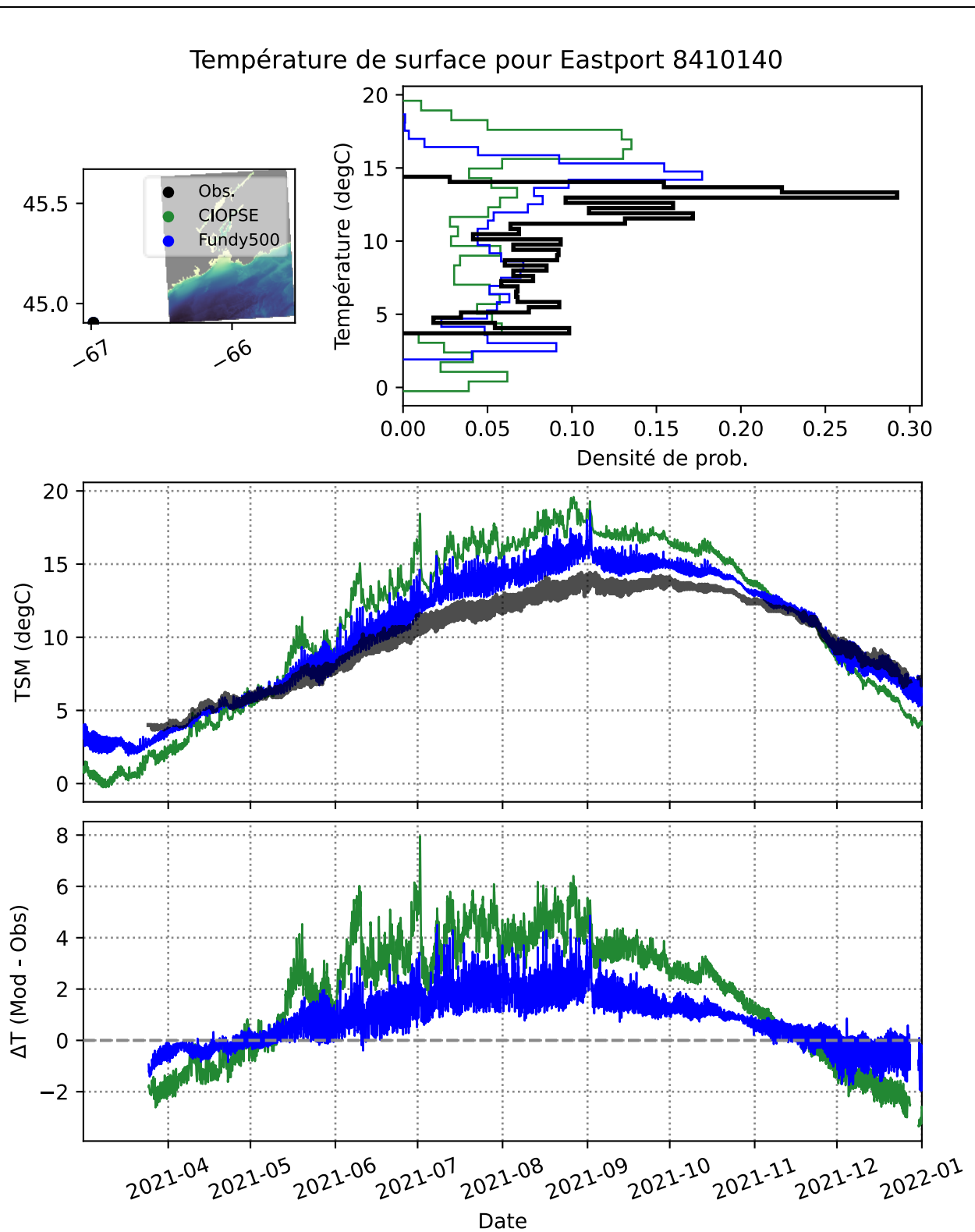


Figure 62 : Température de surface de la mer (TSM) à la station Eastport (Maine).

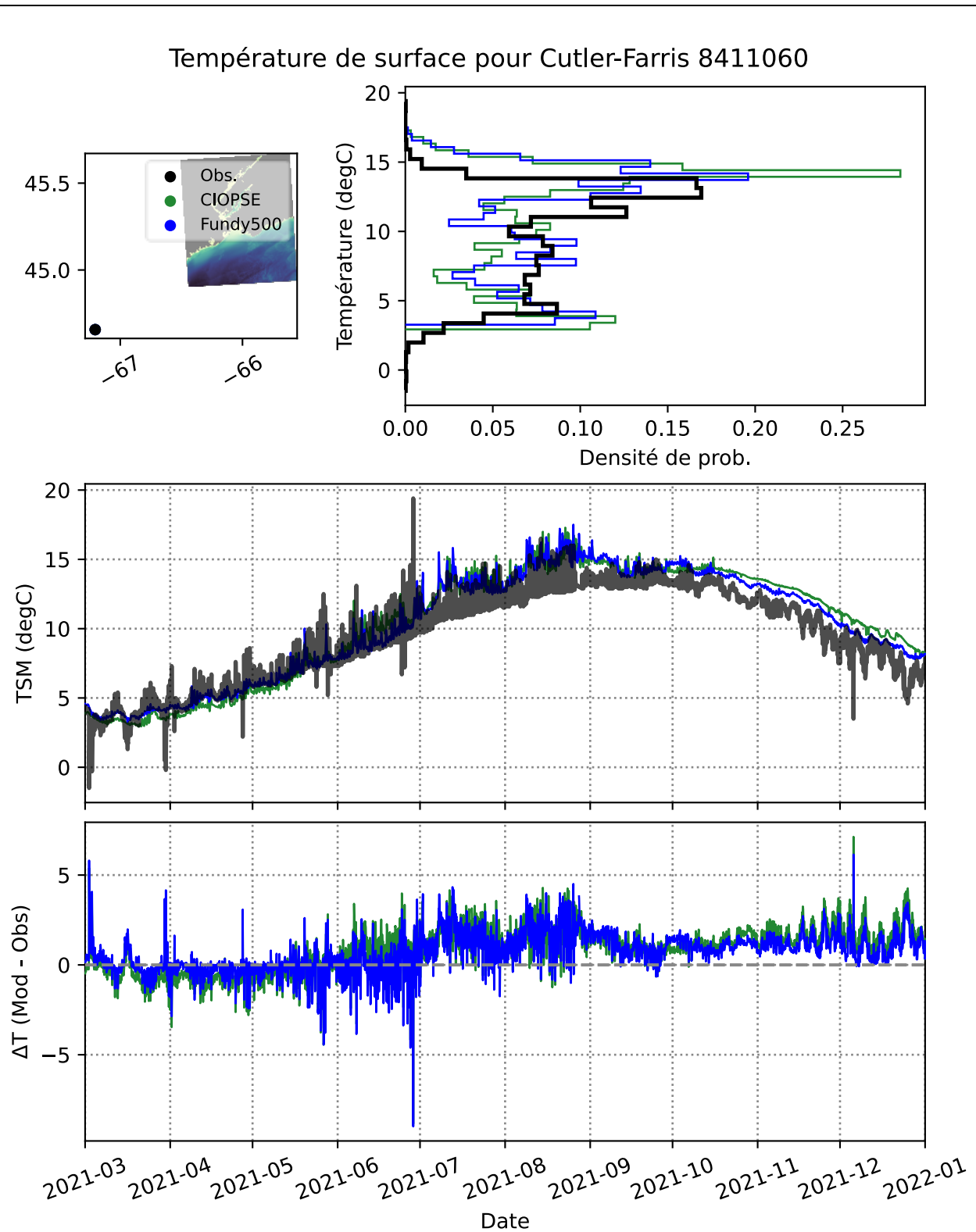


Figure 63 : Température de surface de la mer (TSM) à la station Cutler Farris, Maine.

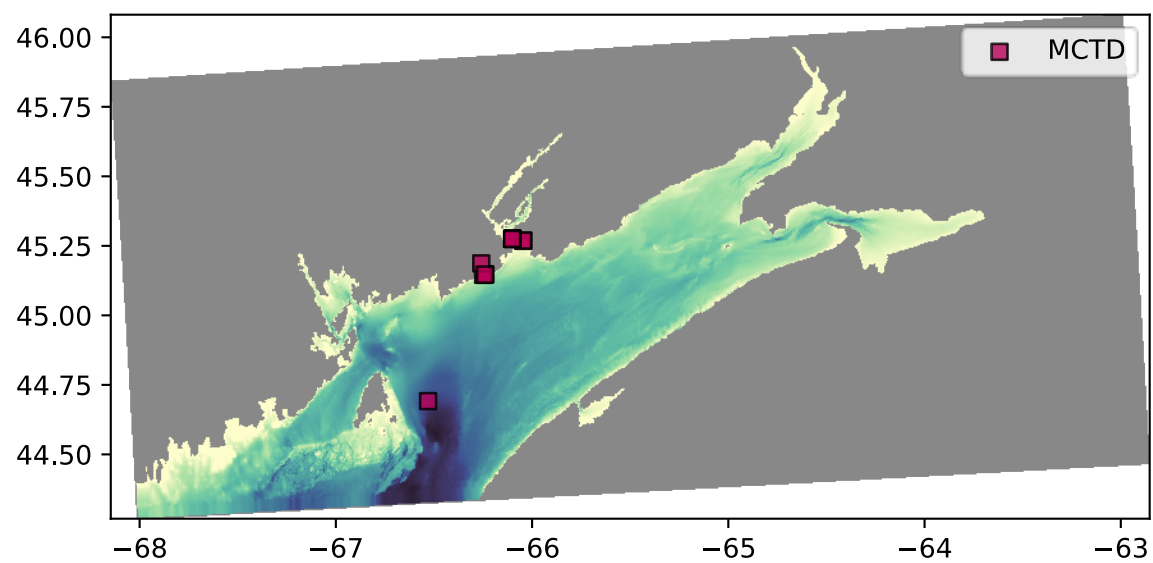


Figure 64 : Emplacements des sondes CTD ancrées (MCTD).

MCTD T et S pour MAR-BASE-PHYS-050 MQ EastHeadlands à 10 m

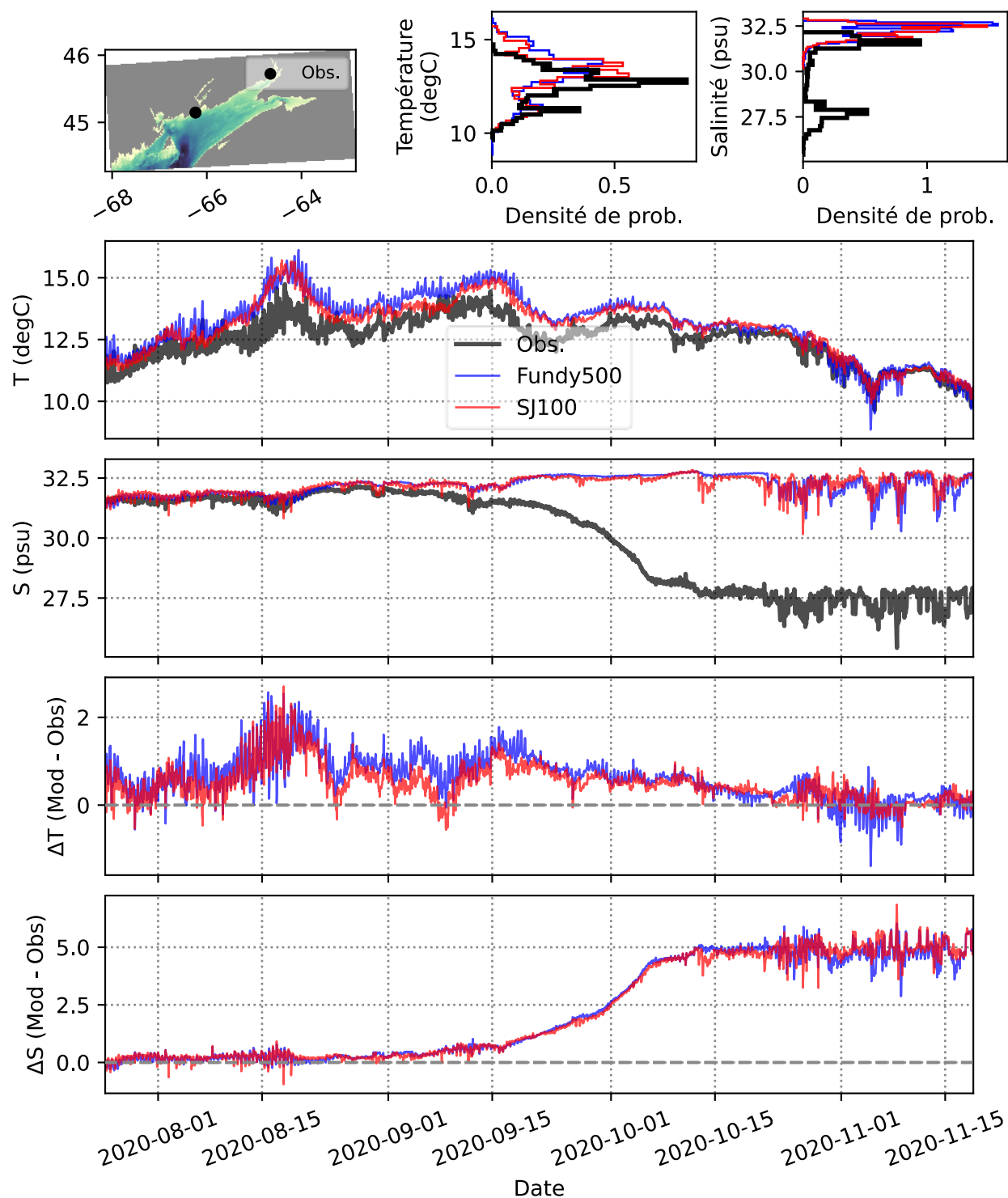


Figure 65 : Température et salinité près du fond marin des promontoires est de la Musquash. La salinité observée diminue au milieu de la série probablement en raison d'une impulsion d'eau douce de la rivière Musquash.

MCTD T et S pour MAR-BASE-PHYS-059 ME EastHeadlands à 10 m

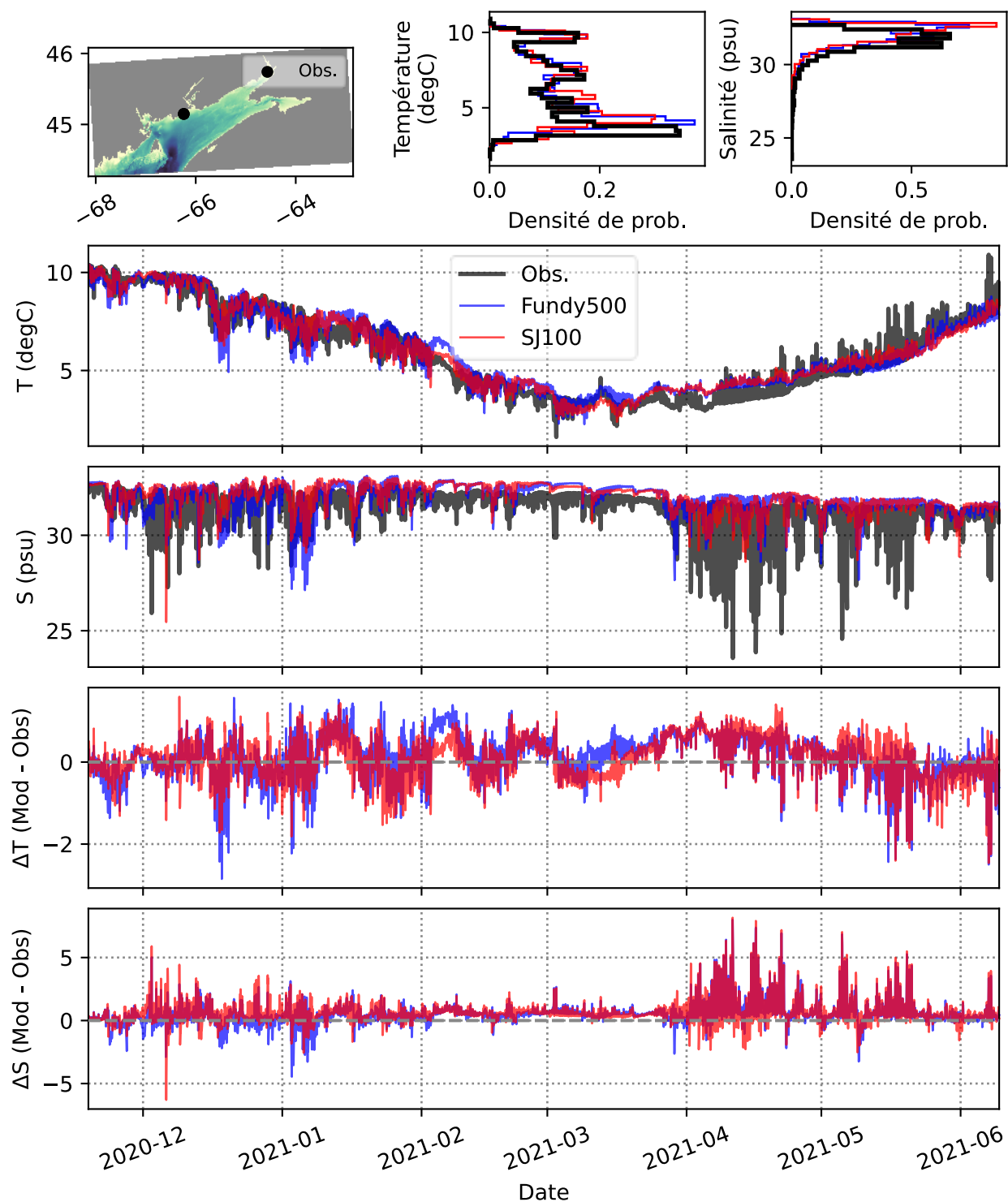


Figure 66 : Température et salinité près du fond marin des promontoires est de la Musquash.

MCTD T et S pour MAR-BASE-PHYS-060 ME WestHeadlands à 10 m

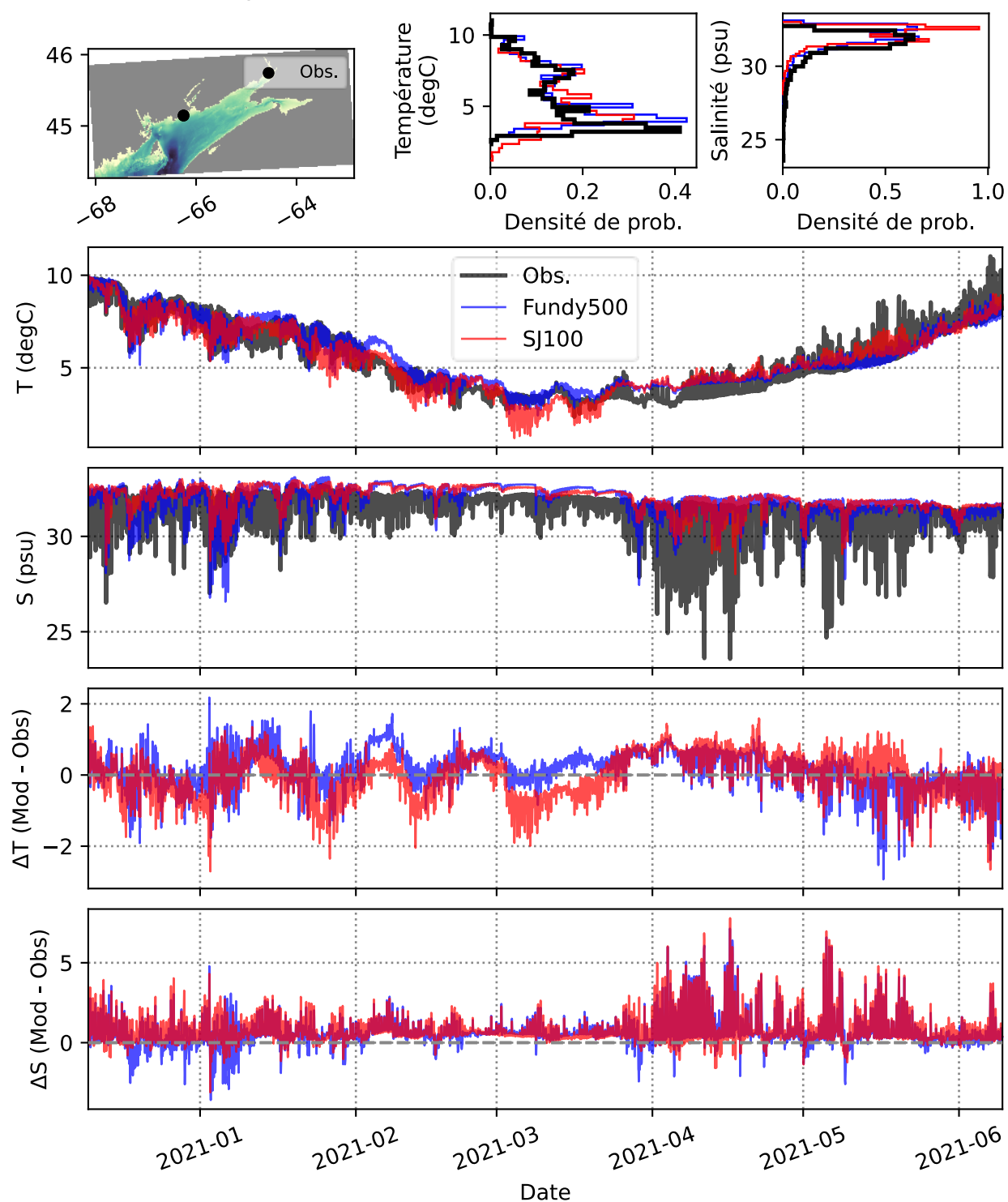


Figure 67 : Température et salinité près du fond marin des promontoires ouest de la Musquash.

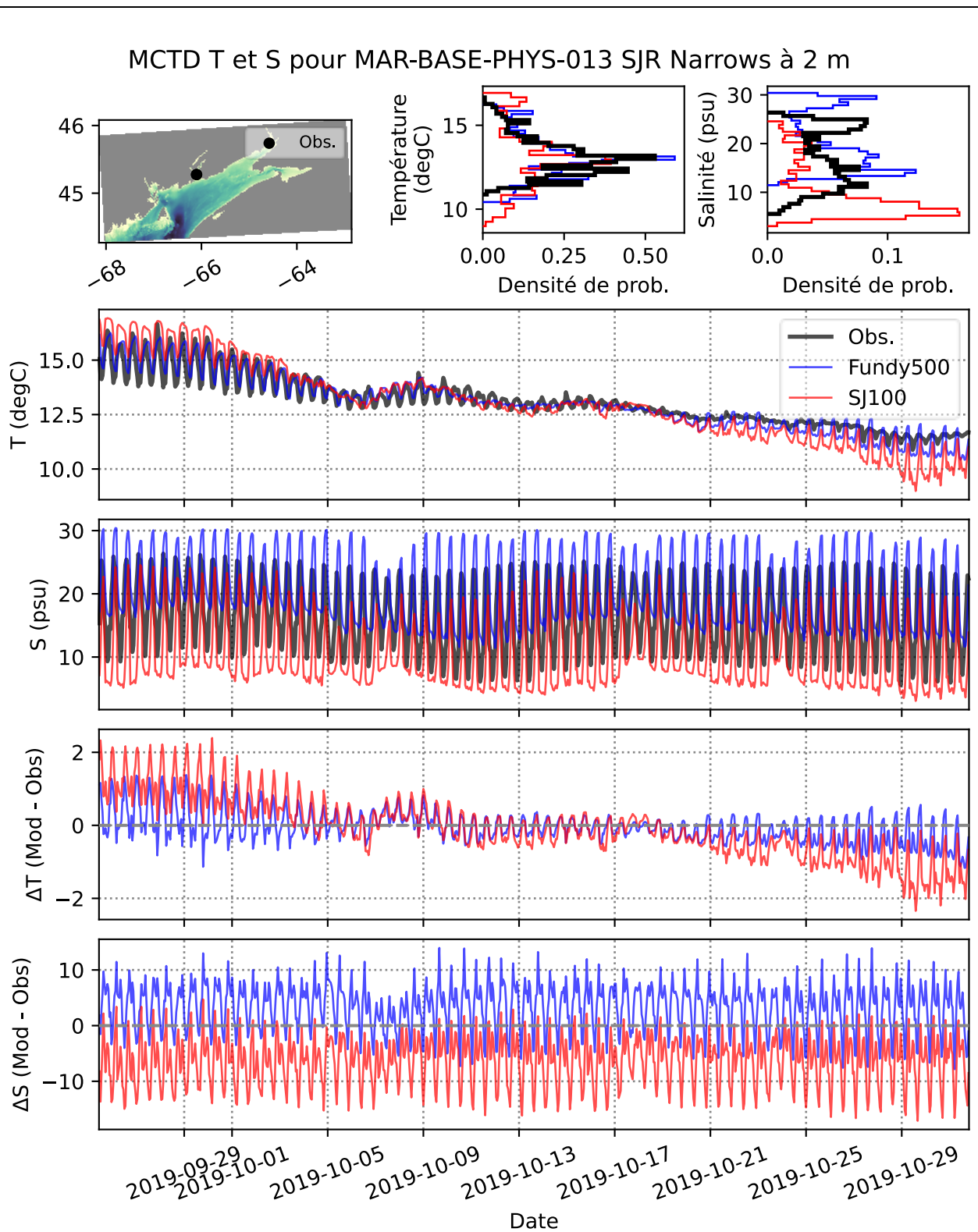


Figure 68 : Température et salinité près de la surface juste en amont des chutes réversibles.

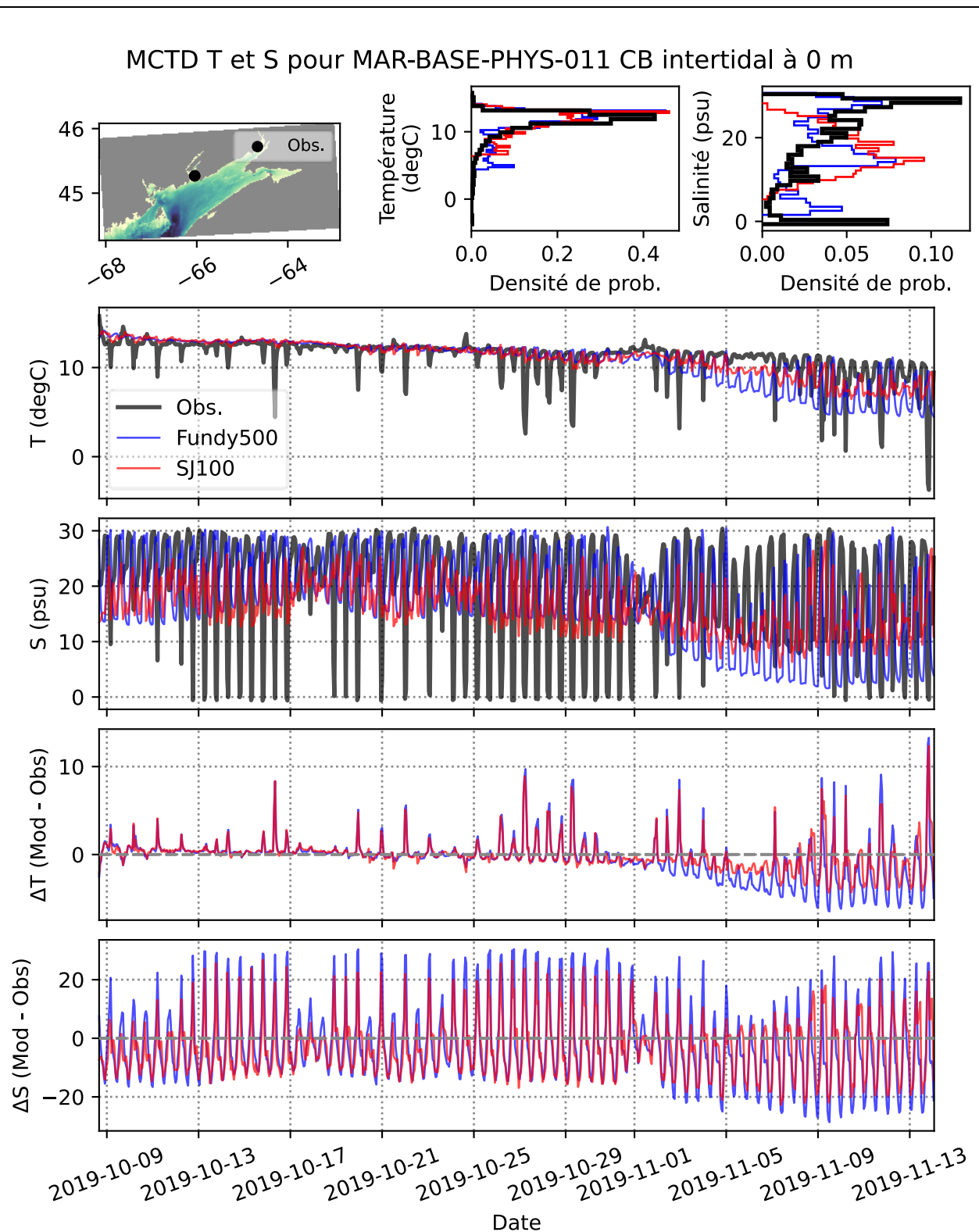


Figure 69 : Température et salinité en surface dans la zone intertidale de la baie de Courtenay. Cette zone n'est pas bien représentée dans le modèle, mais elle est incluse pour évaluer dans quelle mesure les modèles saisissent bien le signal de basse fréquence.

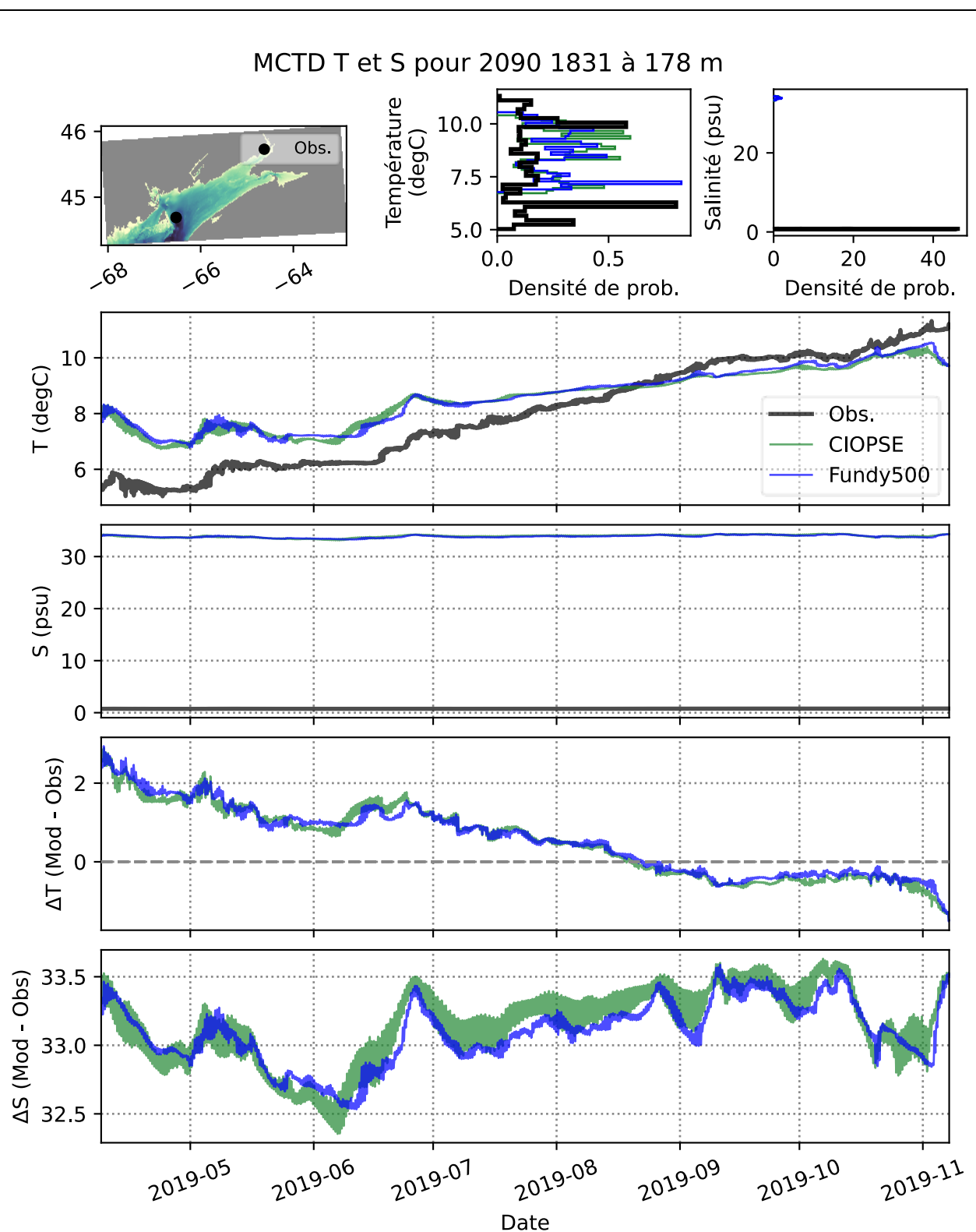


Figure 70 : Température et salinité en profondeur au large de Grand Manan. Aucune donnée sur la salinité observée n'était disponible, mais elle est incluse afin de pouvoir comparer les caractéristiques des séries chronologiques du SPCOG-E et du Fundy500.

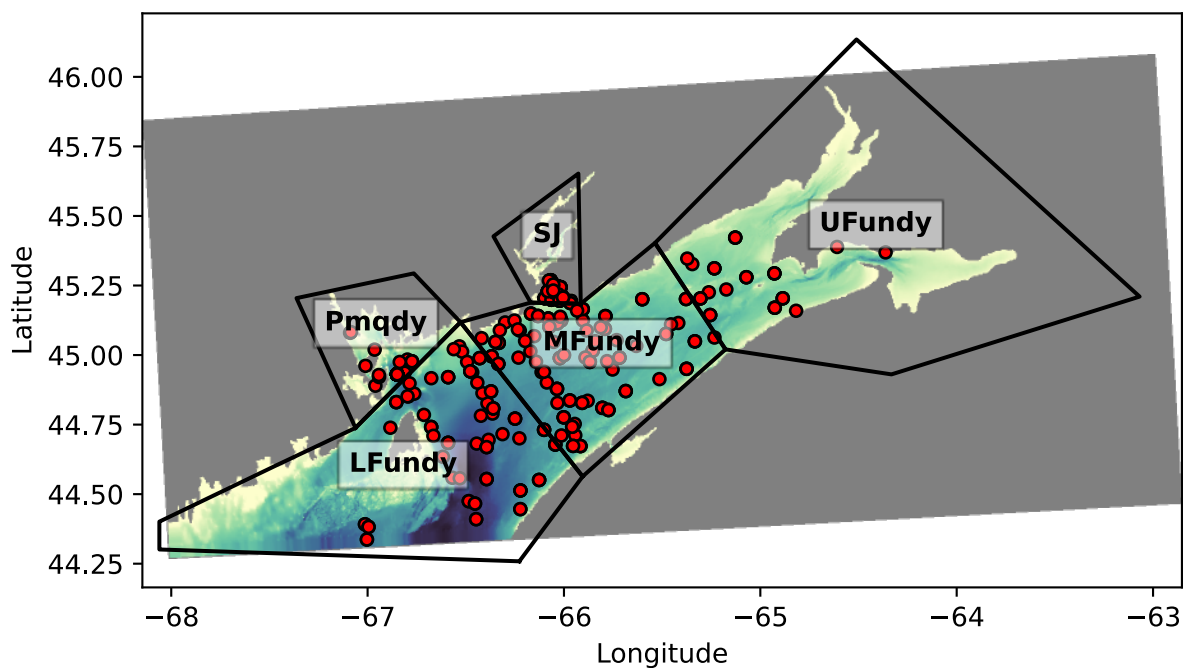


Figure 71 : Régions du domaine du modèle portuaire utilisées pour les statistiques agrégées de CTD. Les points rouges indiquent les profils CTD utilisés, couvrant toute la durée de la simulation rétrospective.

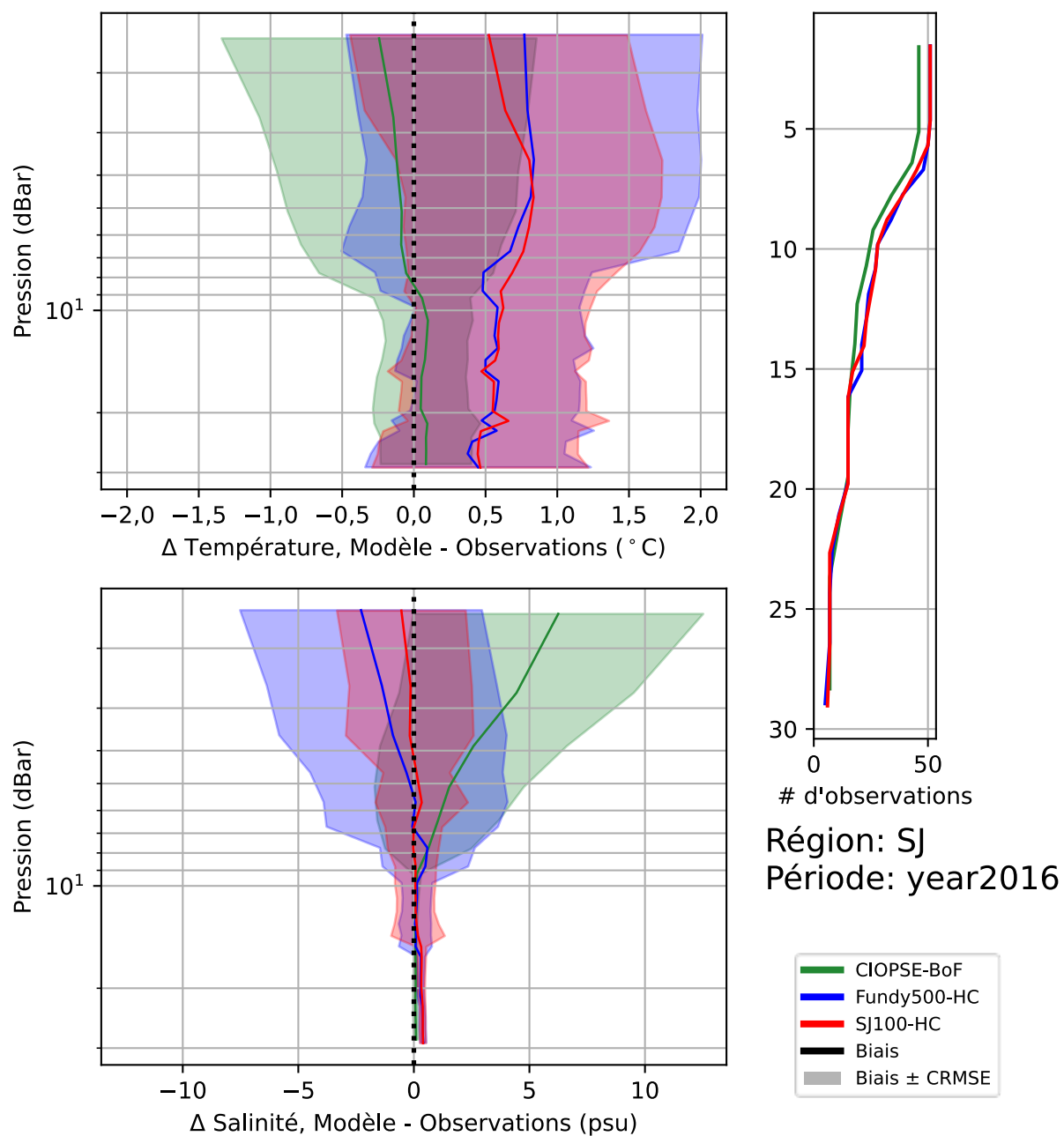


Figure 72 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour les 3 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF), Fundy500 et SJ100, dans la région de Saint John (SJ) en 2016.

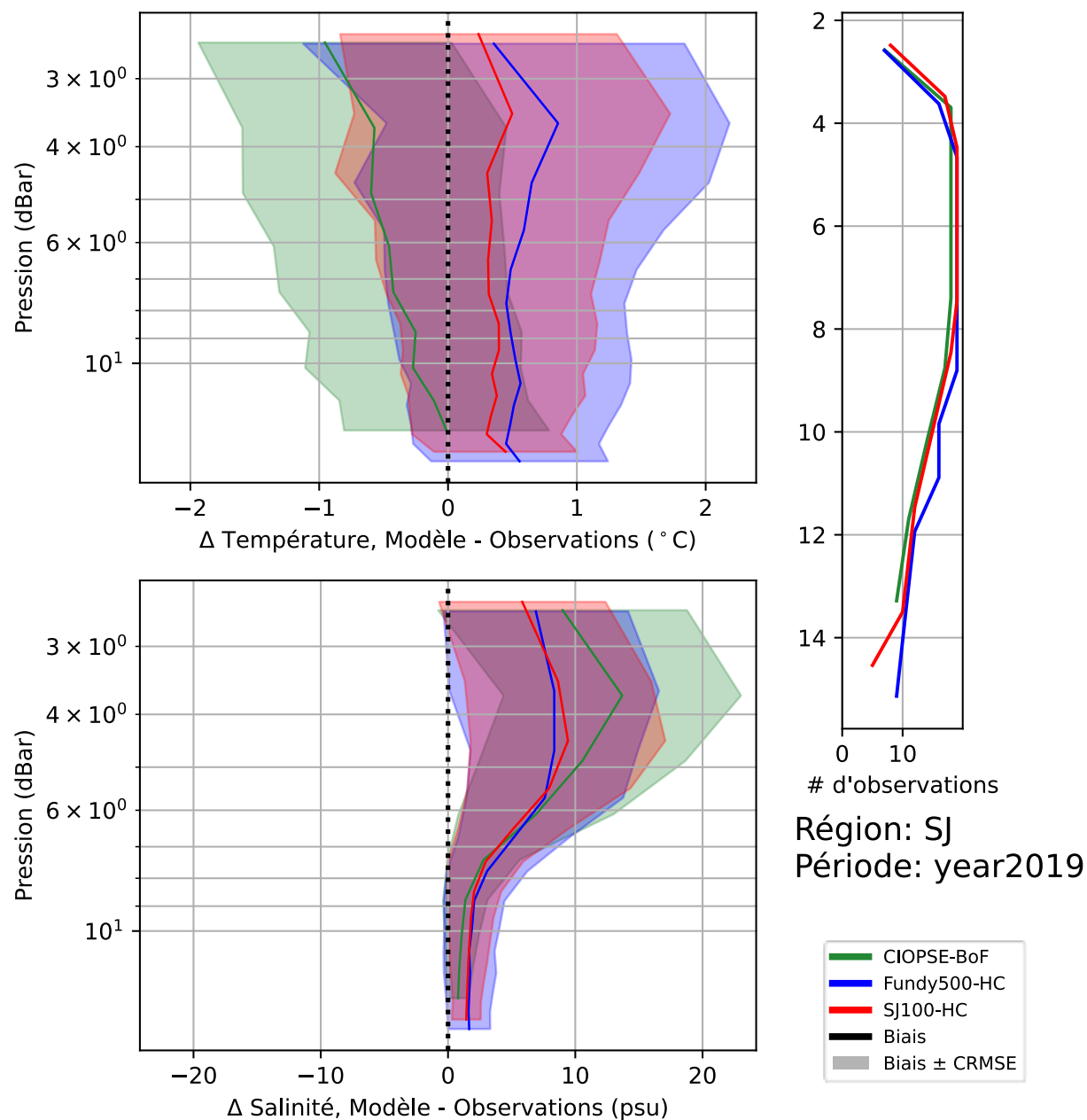


Figure 73 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour les 3 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF), Fundy500 et SJ100, dans la région de Saint John (SJ) en 2019. La majeure partie des profils de 2019 ont été établis pendant la crue et l'inondation printanières, et les modèles présentent un biais salé aux faibles profondeurs proches de la surface qui étaient exceptionnellement douce.

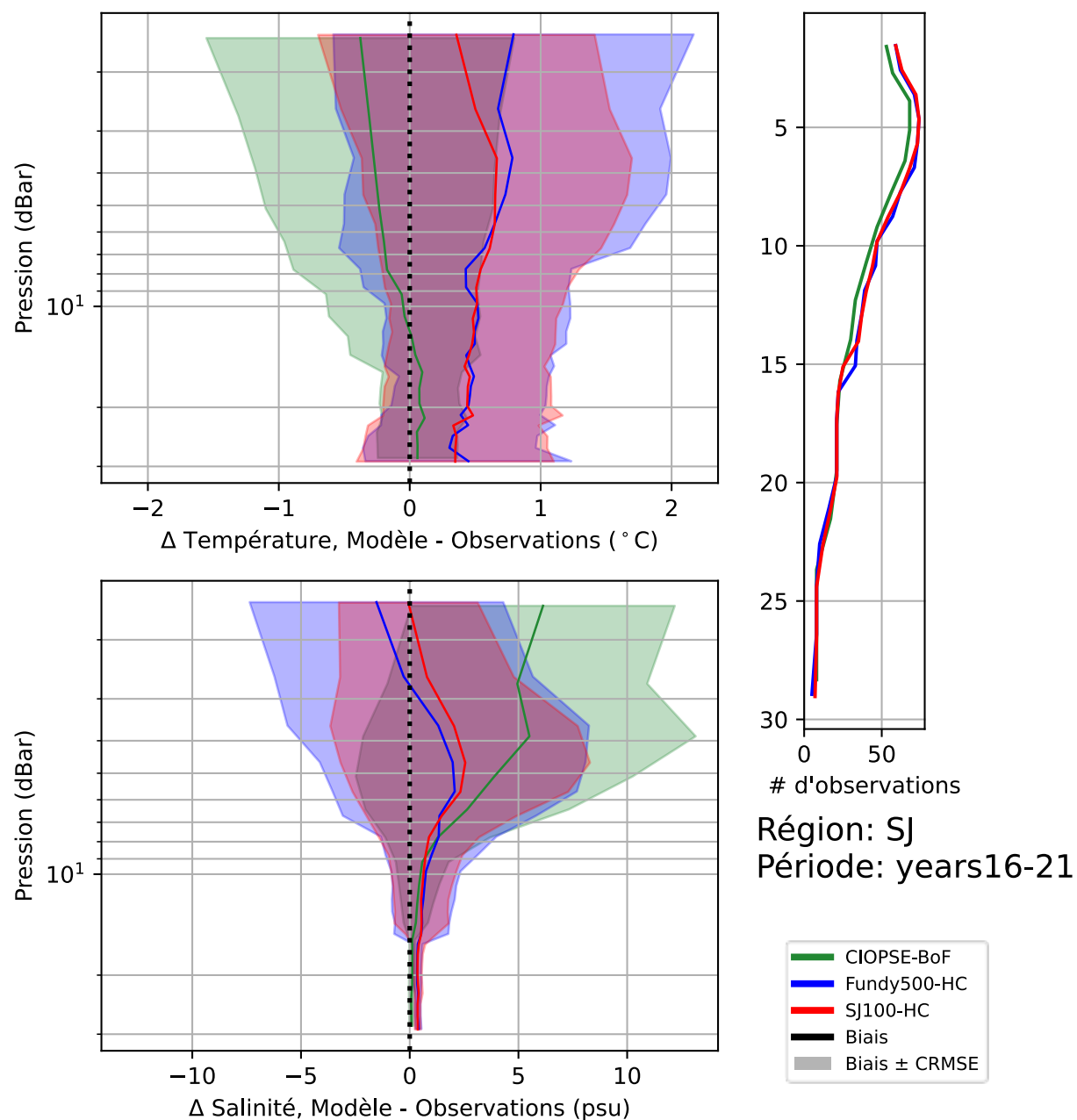


Figure 74 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour 3 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF), Fundy500 et SJ100, dans la région de Saint John (SJ) pour l'ensemble de la simulation rétrospective.

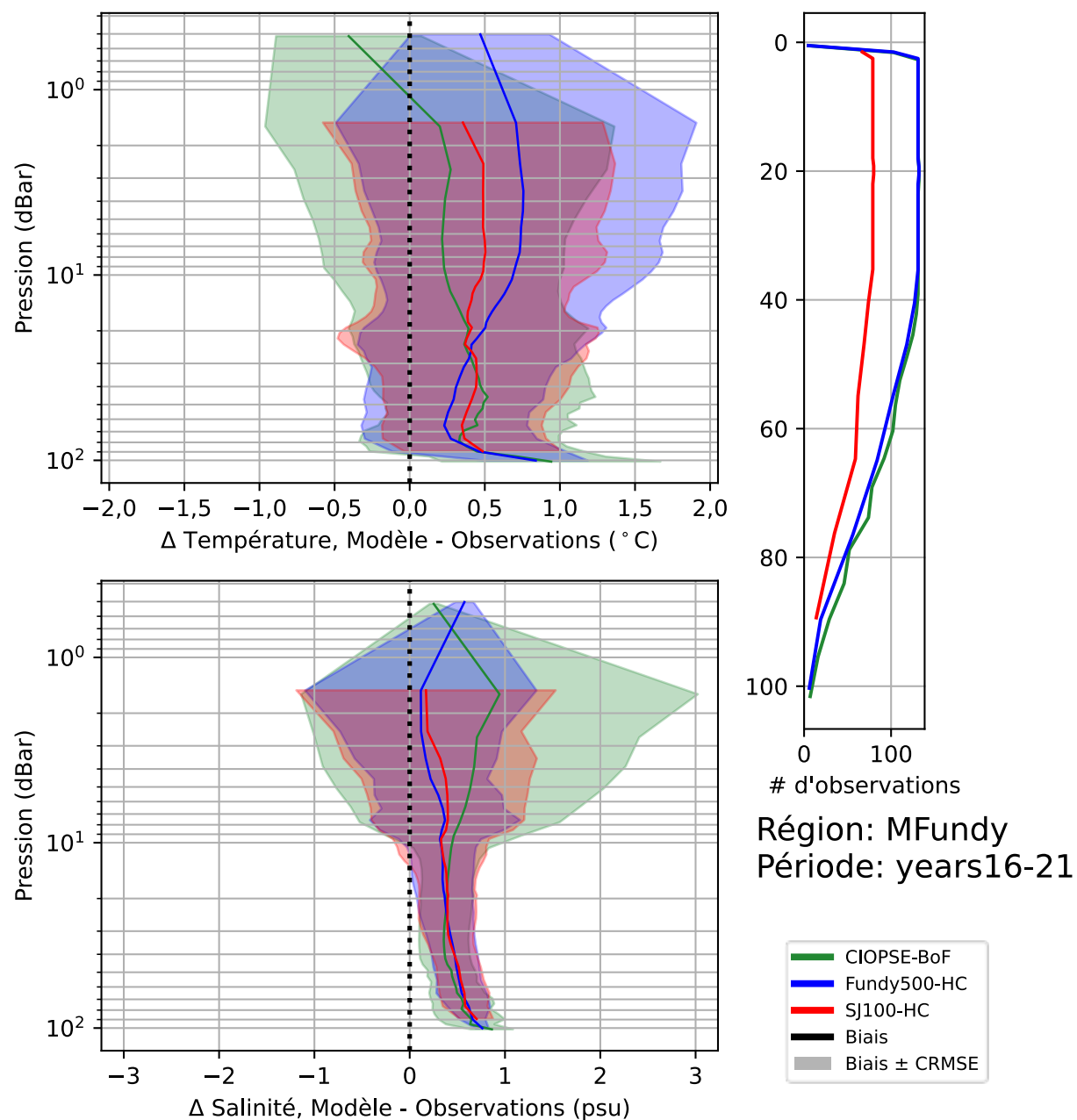


Figure 75 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour 3 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF), Fundy500 et SJ100, dans la partie centrale de la baie de Fundy (MFundy).

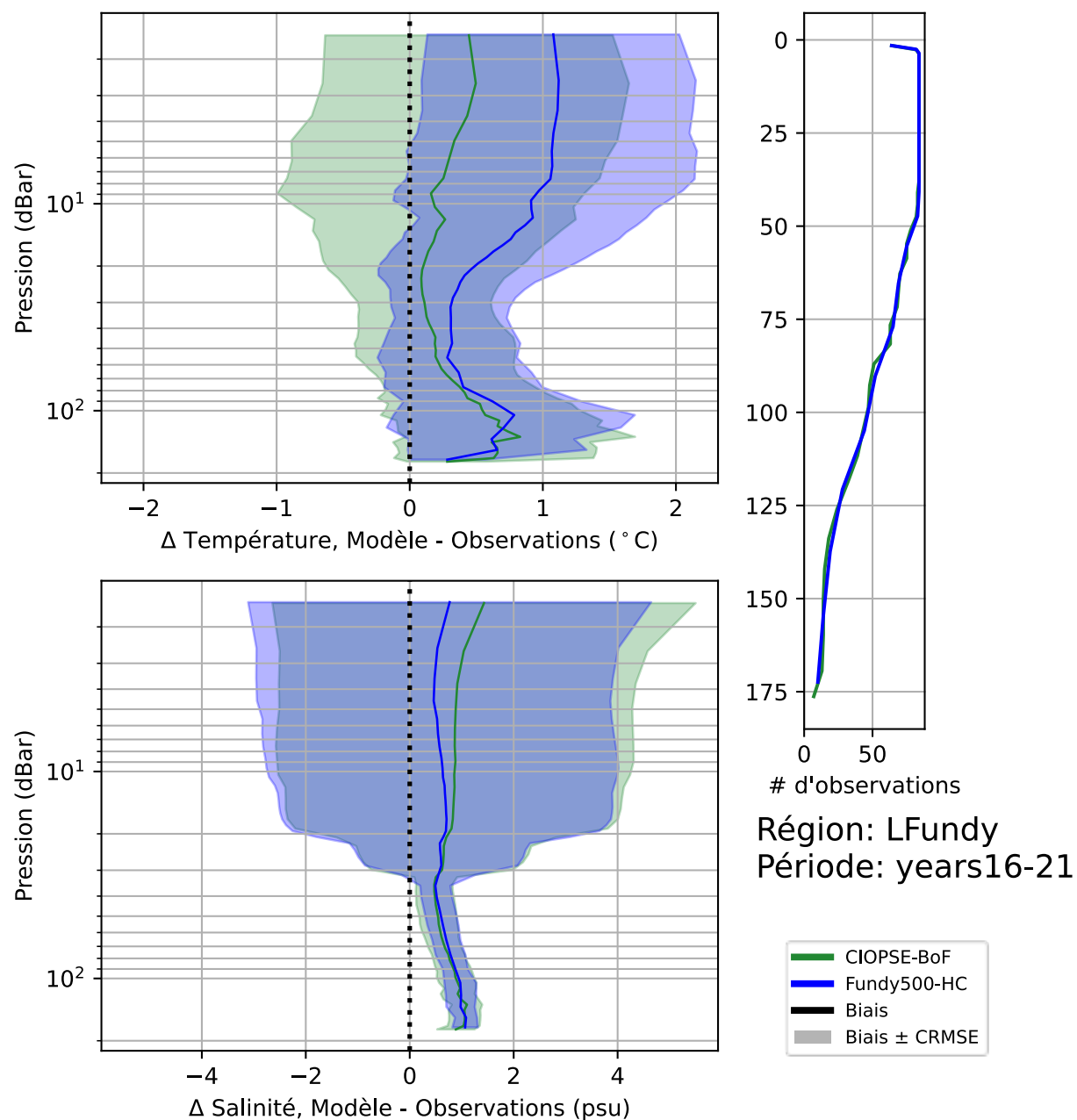


Figure 76 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour 2 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF) et Fundy500, dans la partie inférieure de la baie de Fundy (LFundy).

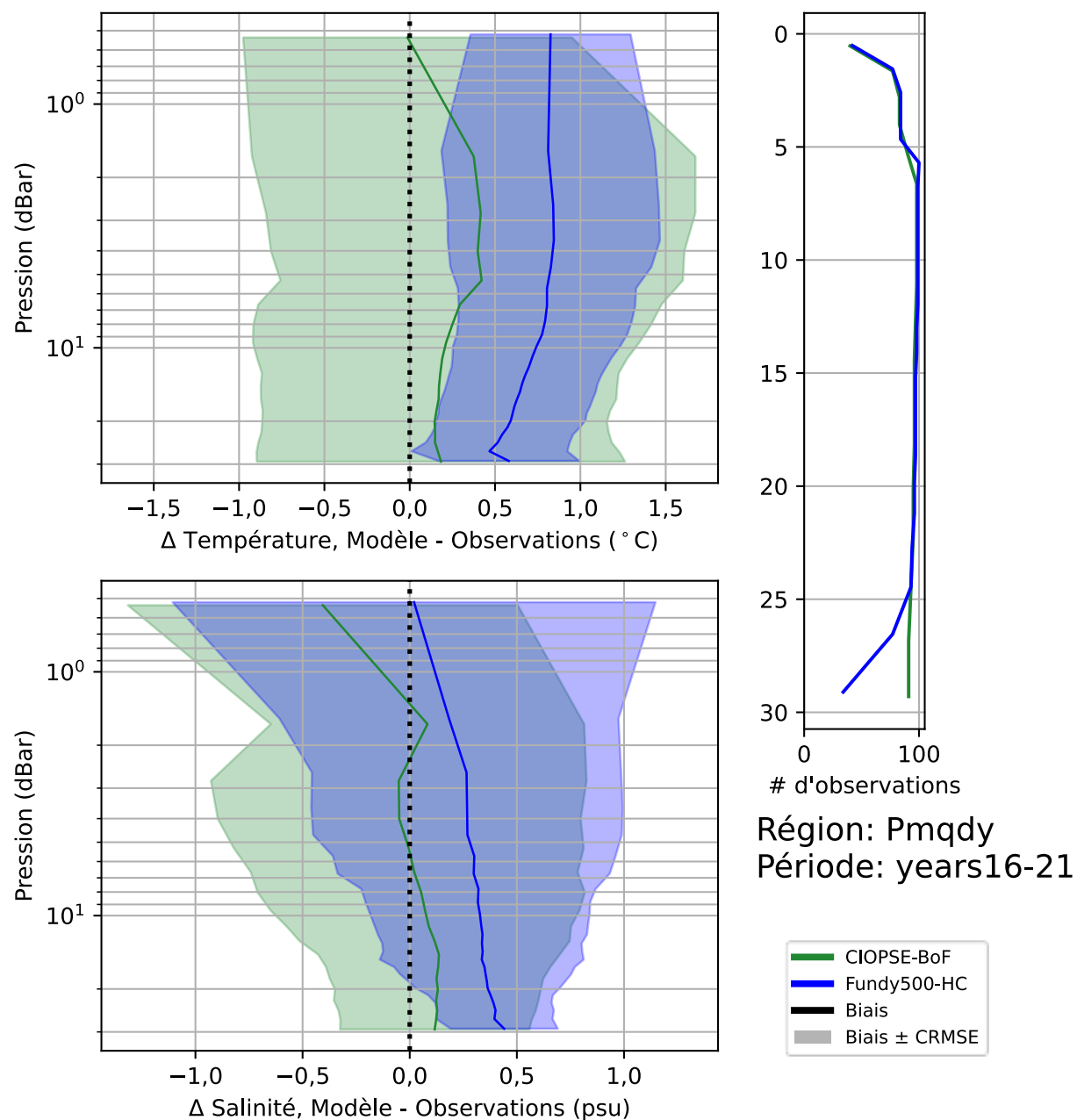


Figure 77 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour 2 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF) et Fundy500, dans la région de la baie de Passamaquoddy (Pmqdy).

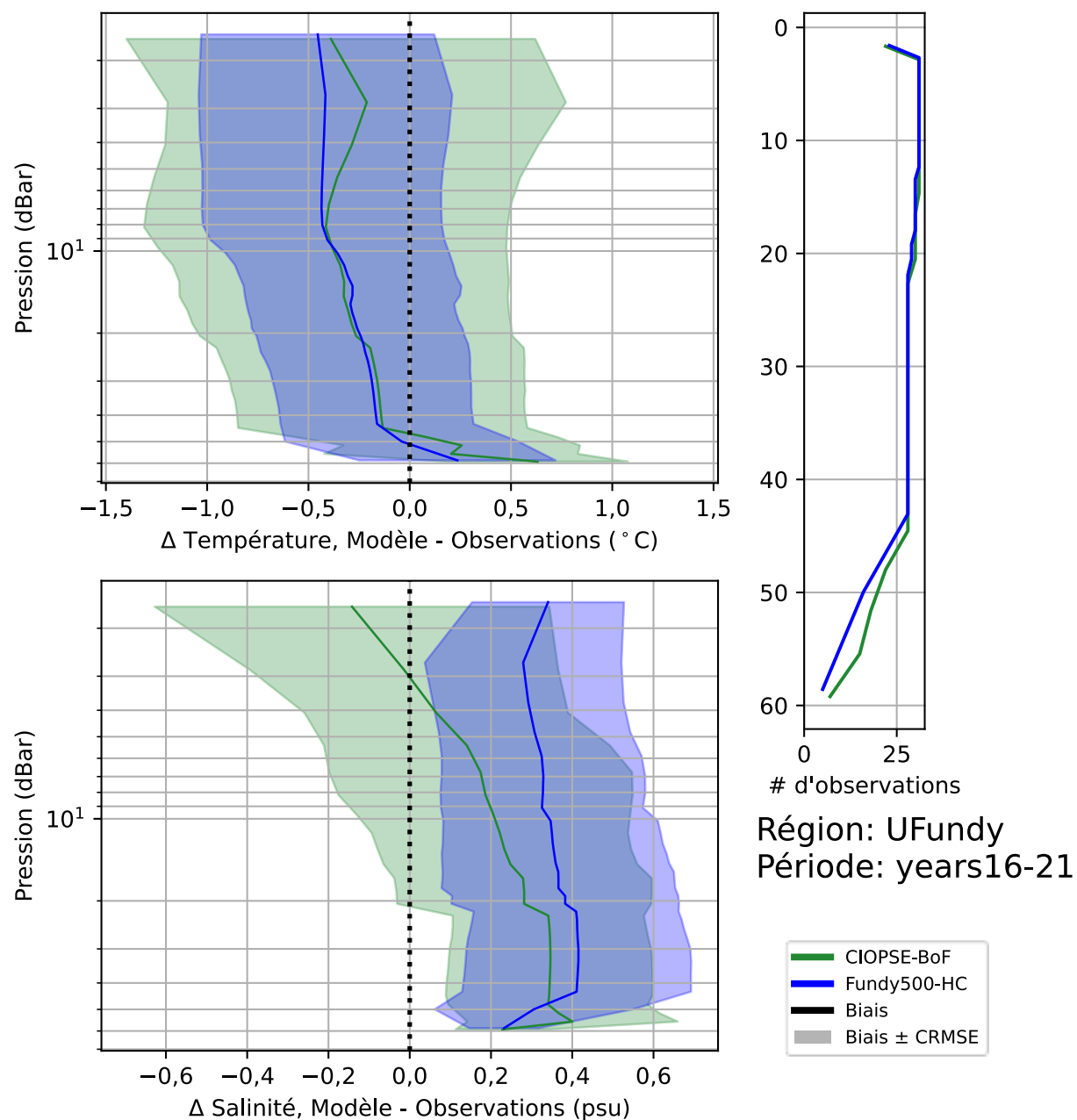


Figure 78 : Profils verticaux du biais et de la CRMSE de la température et de la salinité pour 2 modèles, SPCOG-E (CIOPSE-BoF) et Fundy500, dans la partie supérieure de la baie de Fundy (UFundy).

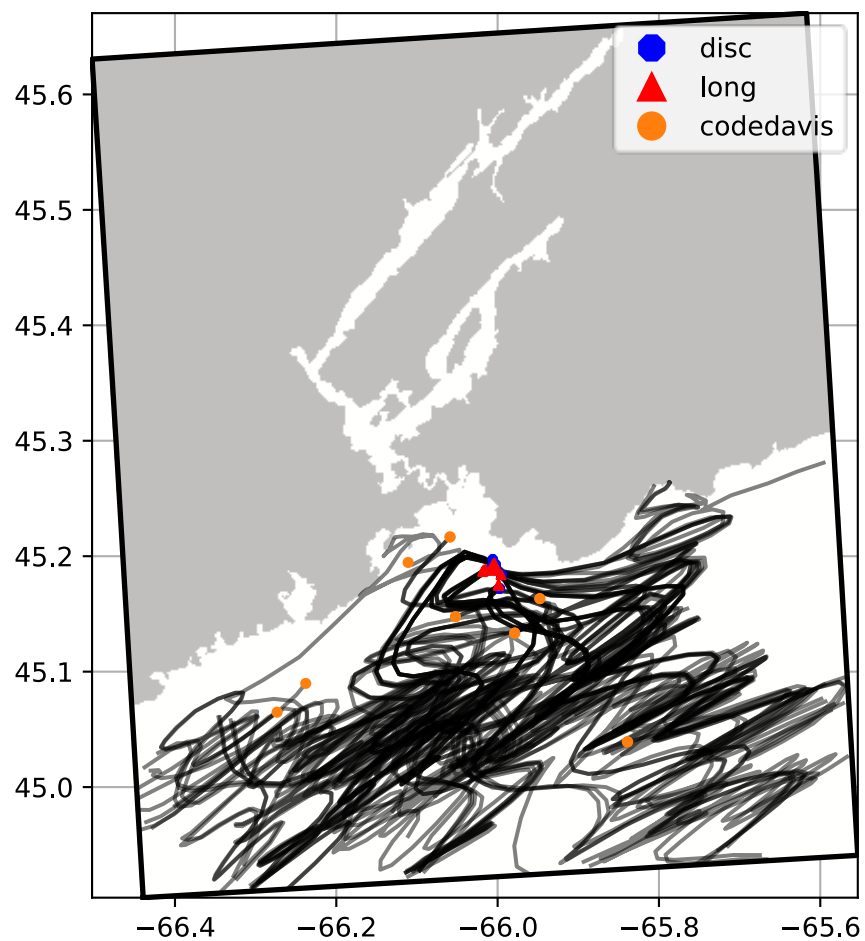


Figure 79 : Carte de toutes les trajectoires de dérive utilisées pour l'évaluation de SJ100 et de Fundy500. Toutes les trajectoires sont rognées selon les limites de domaine du modèle SJ100.

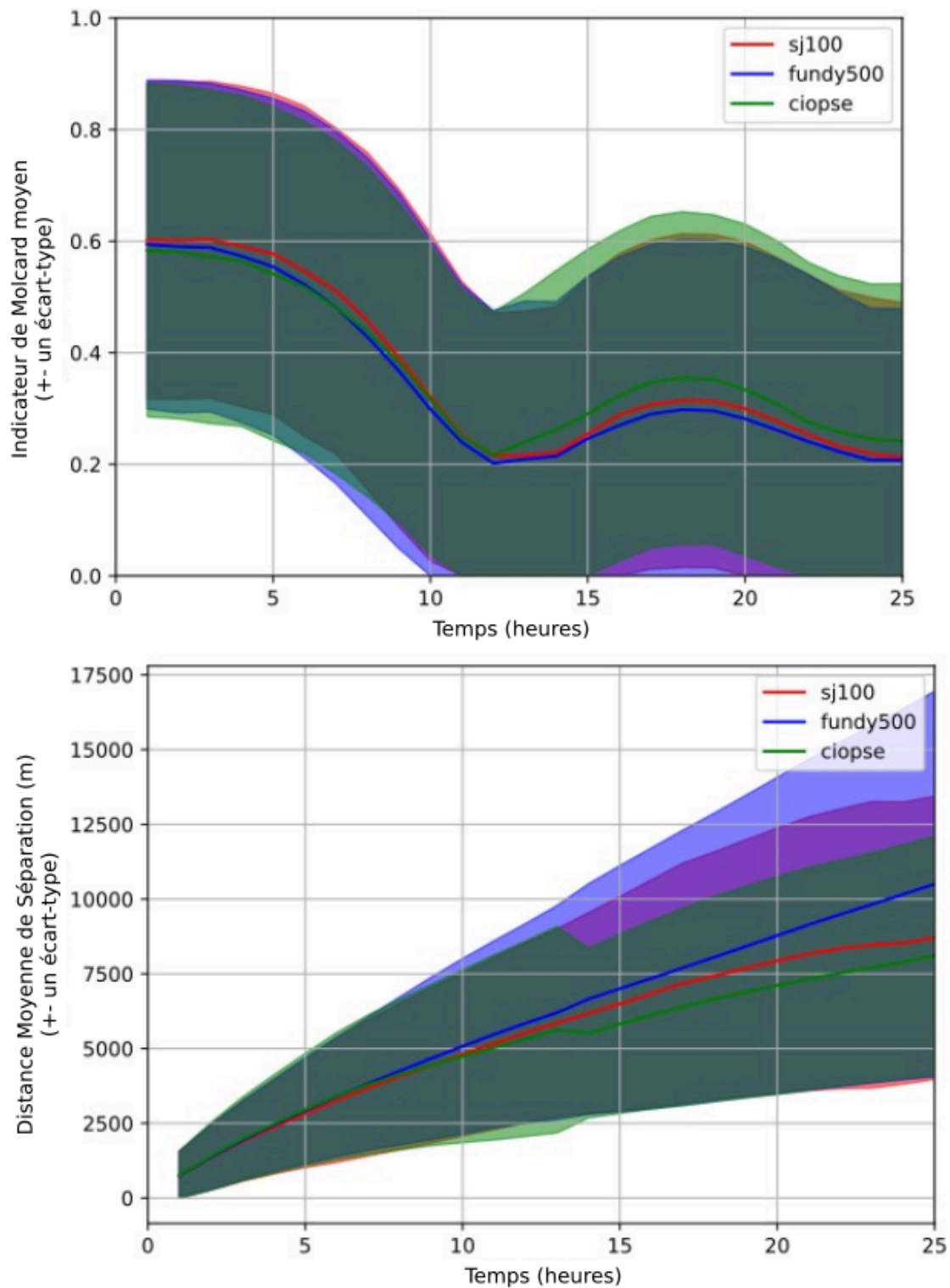


Figure 80 : Indice moyen de performance de Molcard (haut) et distance moyenne de séparation (bas) pour les bouées dérivantes Davis pendant 25 heures après le déploiement simulé des bouées. La couleur indique le modèle hydrodynamique. La zone ombrée indique un écart-type autour de la moyenne.

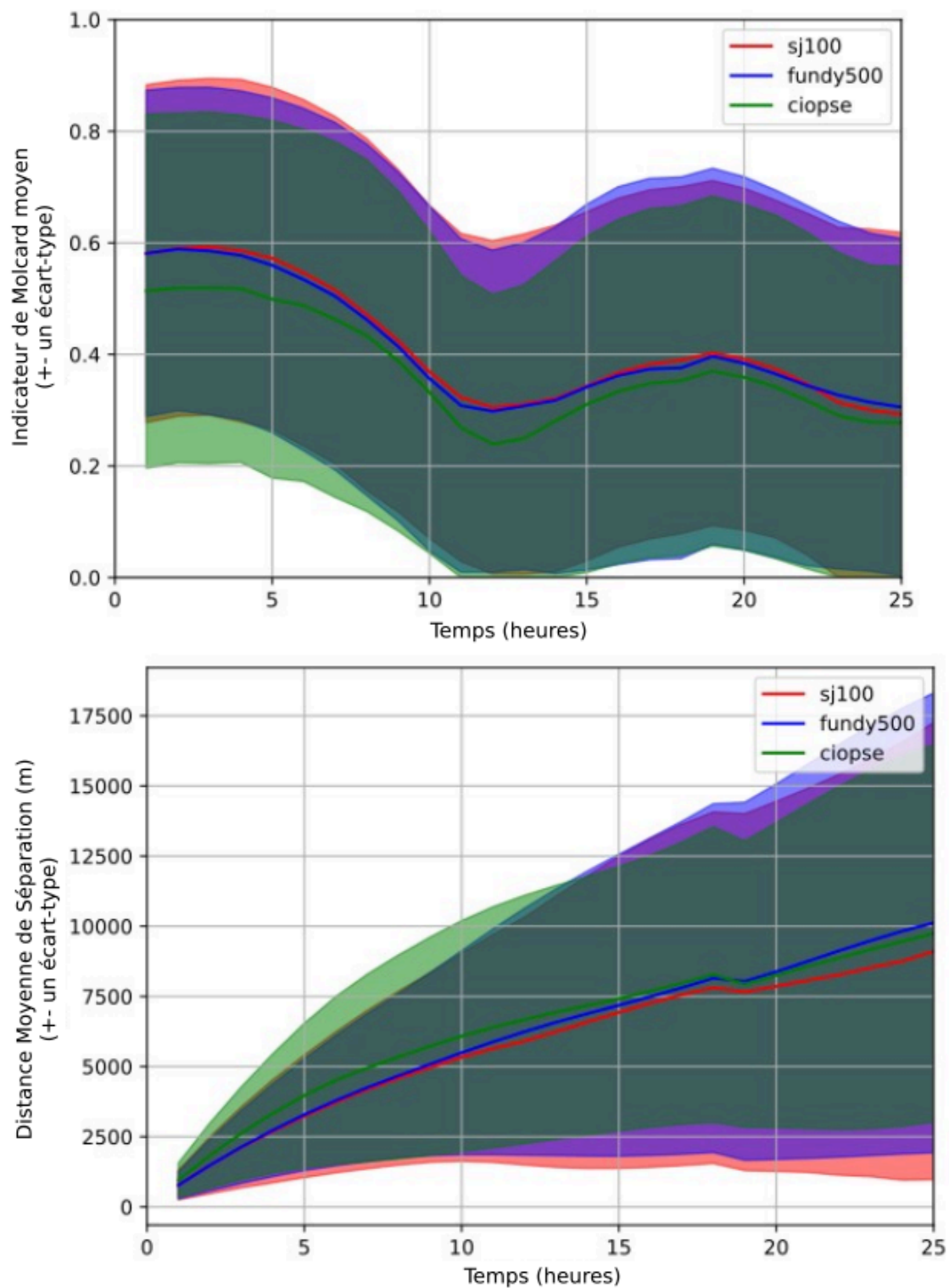


Figure 81 : Indice de performance de Molcard moyen (haut) et distance moyenne de séparation (bas) pour les bouées dérivantes Long de la SBSA pendant 25 heures après le déploiement simulé des bouées. La couleur indique le modèle hydrodynamique. La zone ombrée indique un écart-type autour de la moyenne.

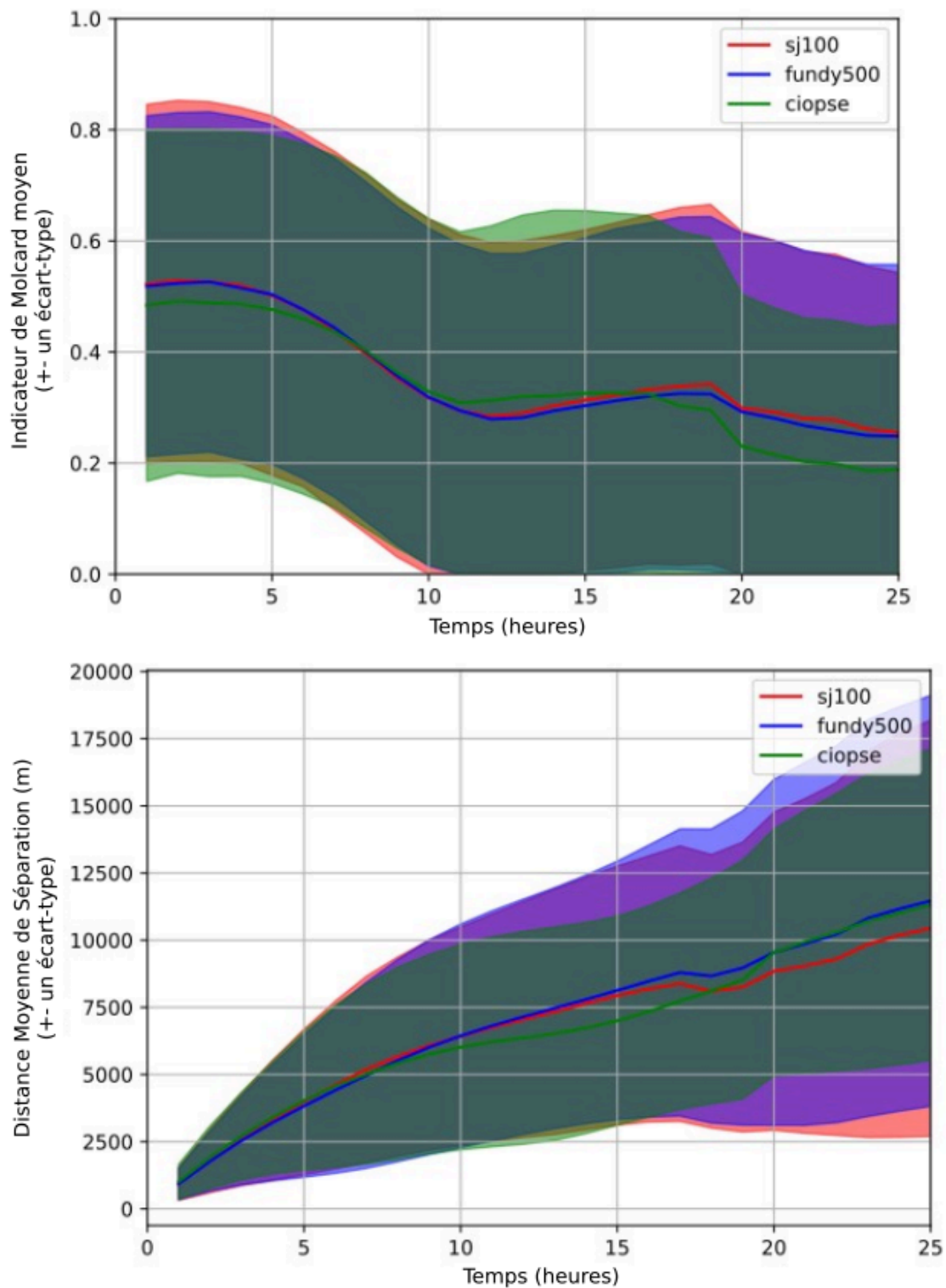


Figure 82 : Indice de performance de Molcard moyen (haut) et distance moyenne de séparation (bas) pour les bouées dérivantes Disk de la SBSA pendant 25 heures après le déploiement simulé des bouées. La couleur indique le modèle hydrodynamique. La zone ombrée indique un écart-type autour de la moyenne.

BIAIS, CRMSE pour Cutler-Farris sur la période decjan

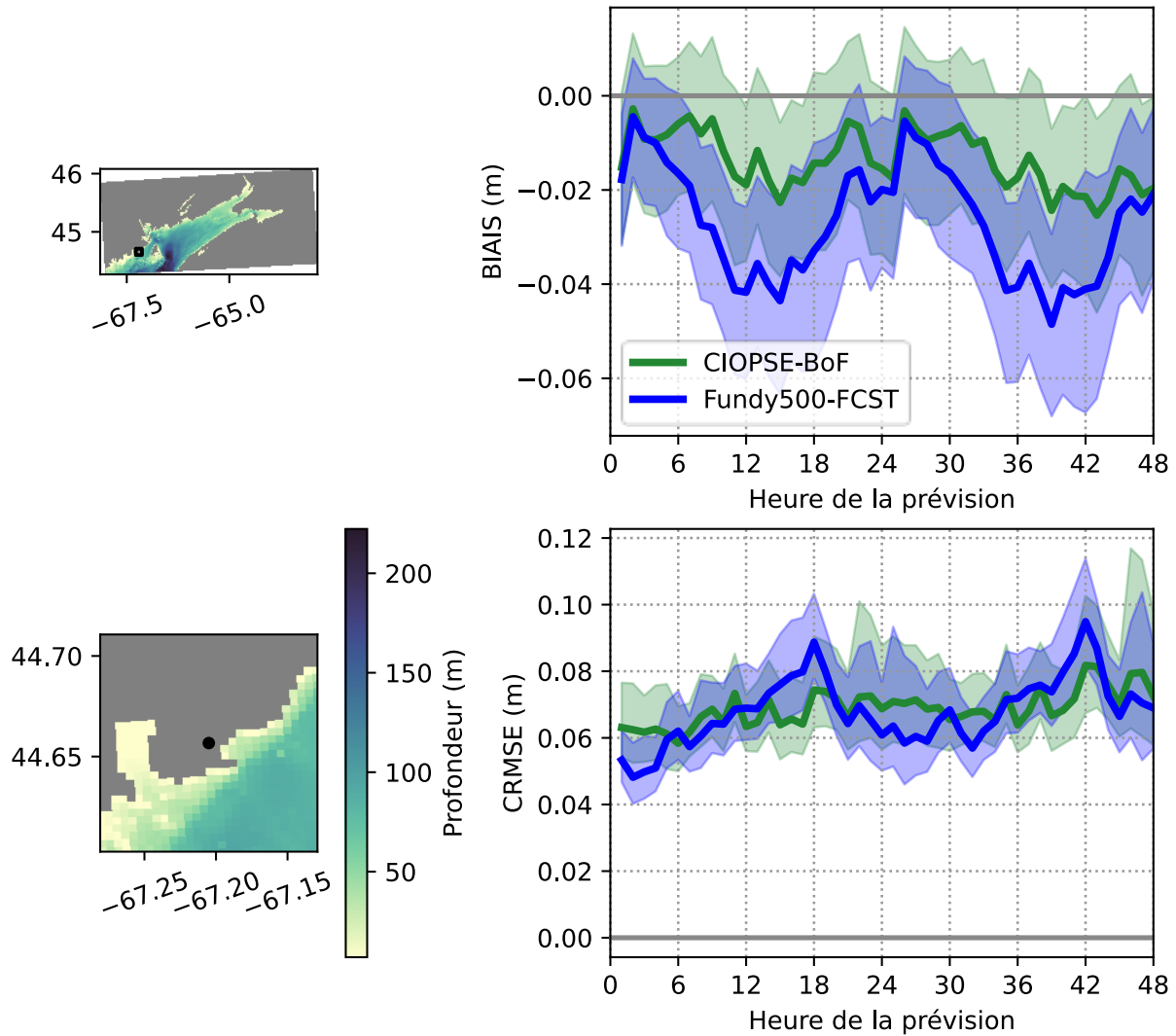


Figure 83 : Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel en fonction de l'échéance de la prévision de 00Z à Cutler Farris pour l'ensemble des prévisions de 48-h réalisées sur la période de 2 mois (Déc.-Jan.). Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.

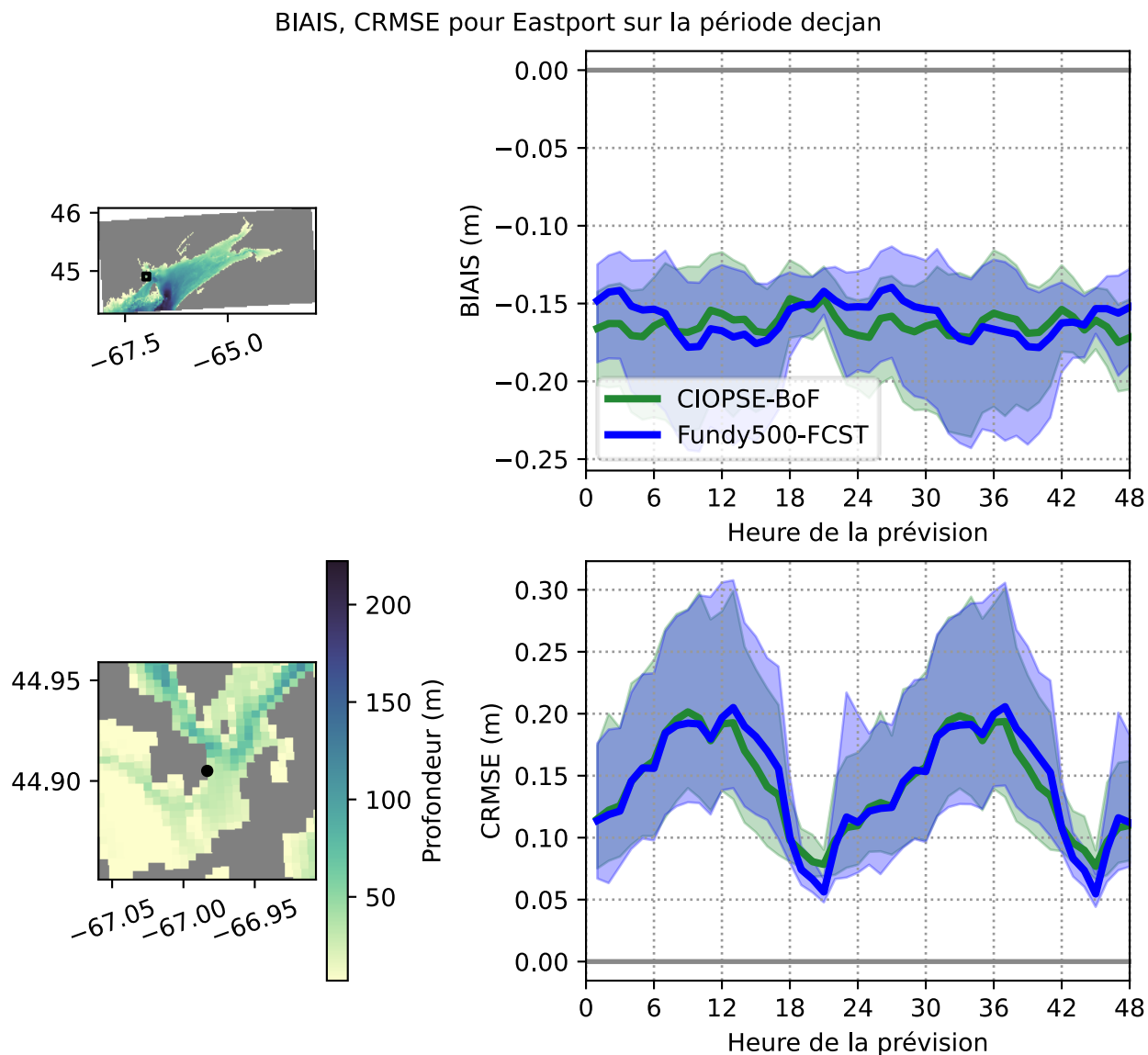


Figure 84 : Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel en fonction de l'échéance de la prévision de 00Z à Eastport pour l'ensemble des prévisions de 48-h réalisées sur la période de 2 mois (Déc.-Jan.). Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.

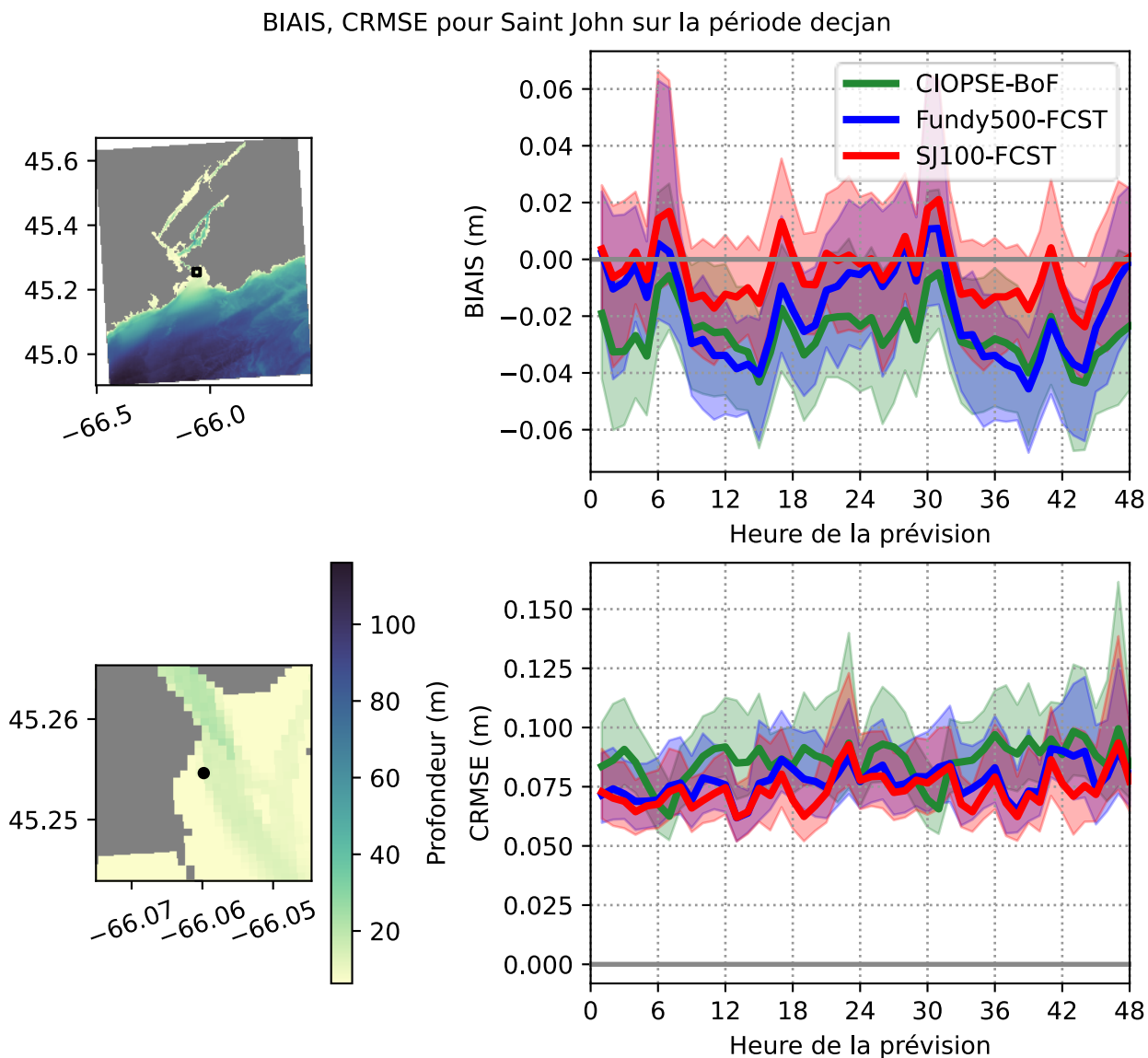


Figure 85 : Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel en fonction de l'échéance de la prévision de 00Z à Saint John pour l'ensemble des prévisions de 48-h réalisées sur la période de 2 mois (Déc.-Jan.). Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.

BIAIS, CRMSE pour 44490_2021-06_2022-02 sur la période decjan

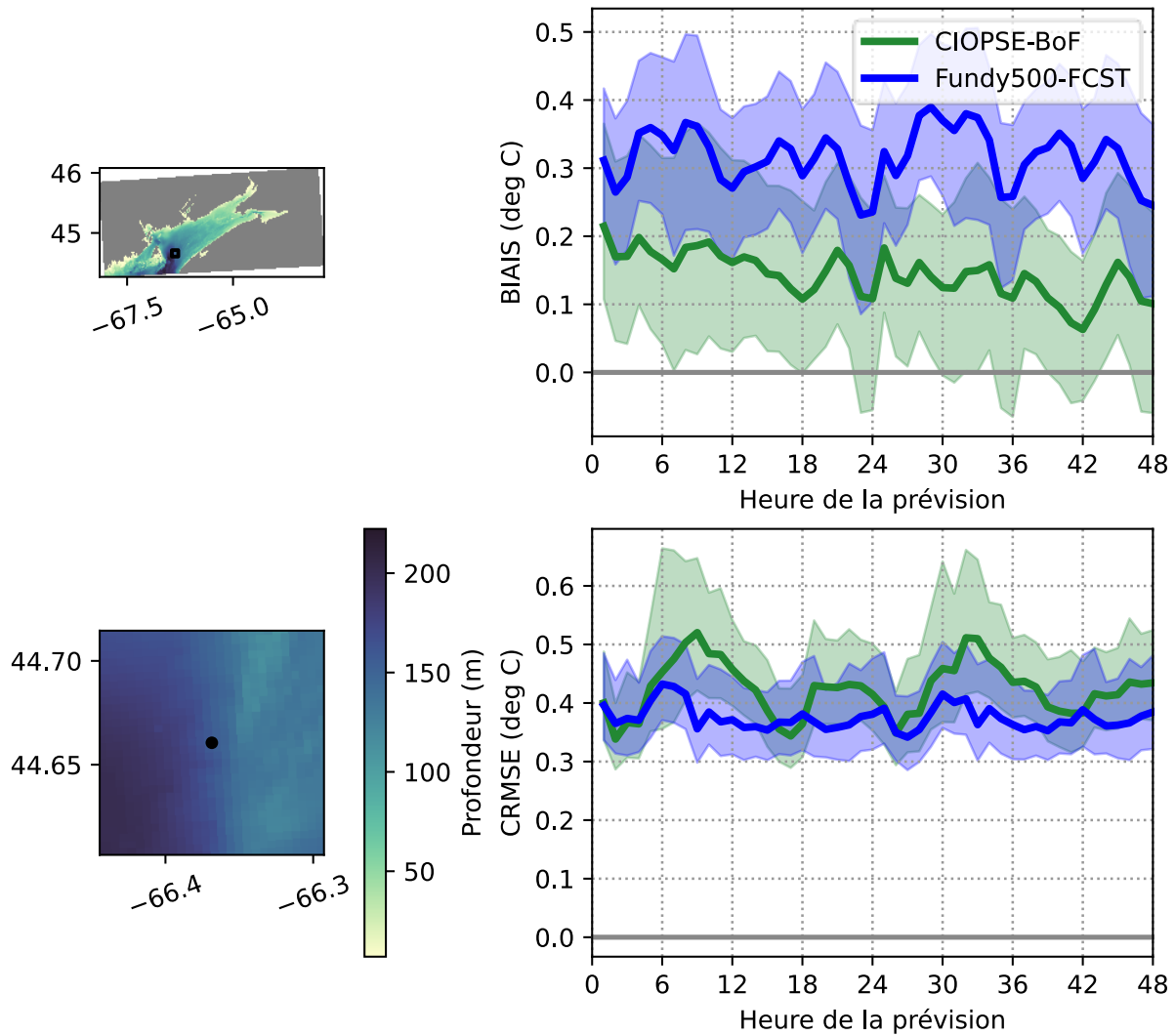


Figure 86 : Biais et CRMSE de la température de surface de la mer (TSM) en fonction de l'échéance de la prévision de 00Z à la bouée 44490 pour l'ensemble des prévisions de 48-h réalisées sur la période de 2 mois (Déc.-Jan.). Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.

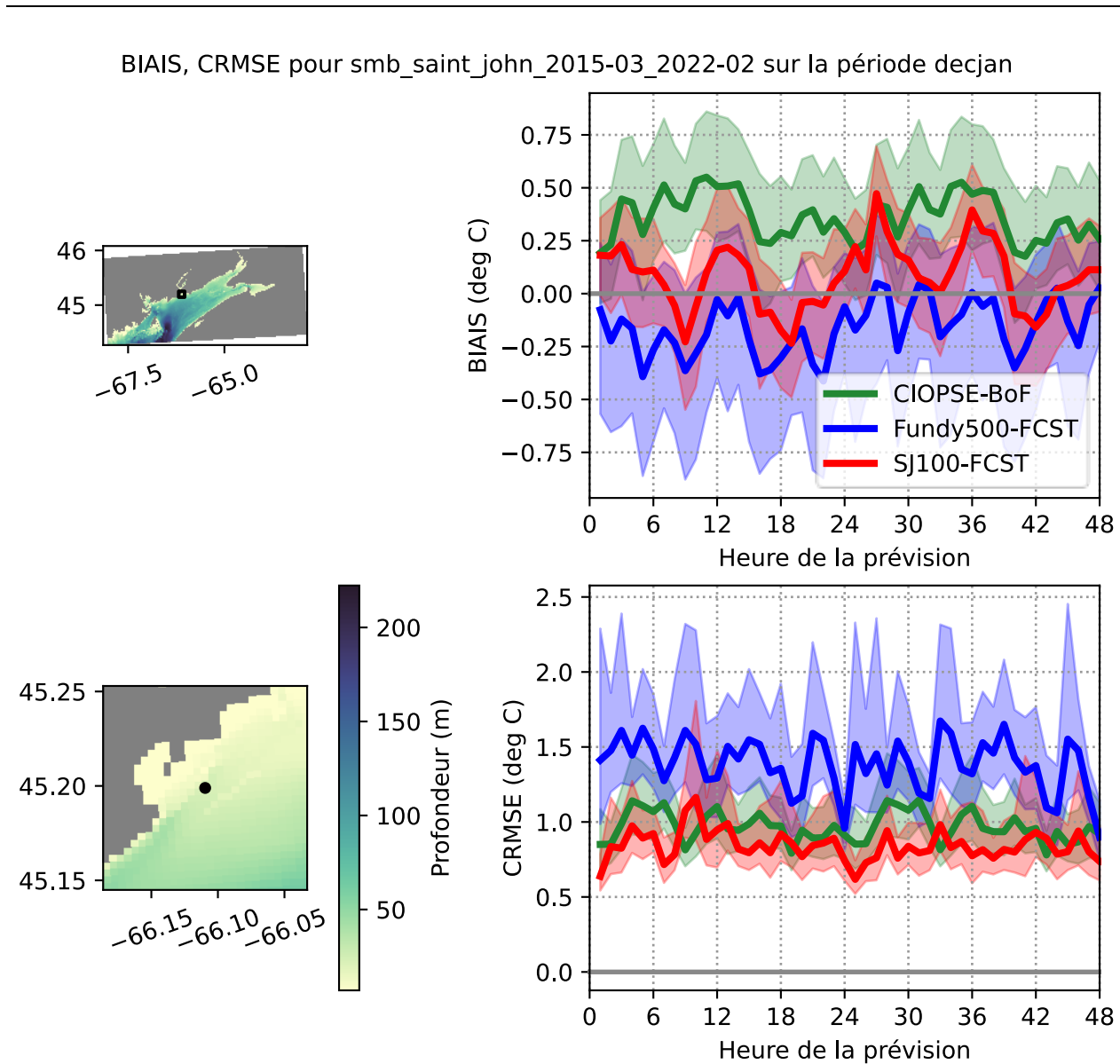


Figure 87 : Biais et CRMSE de la température de surface de la mer (TSM) en fonction de l'échéance de la prévision de 00Z à la bouée Smart pour l'ensemble des prévisions de 48-h réalisées sur la période de 2 mois (Déc.-Jan.). Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.

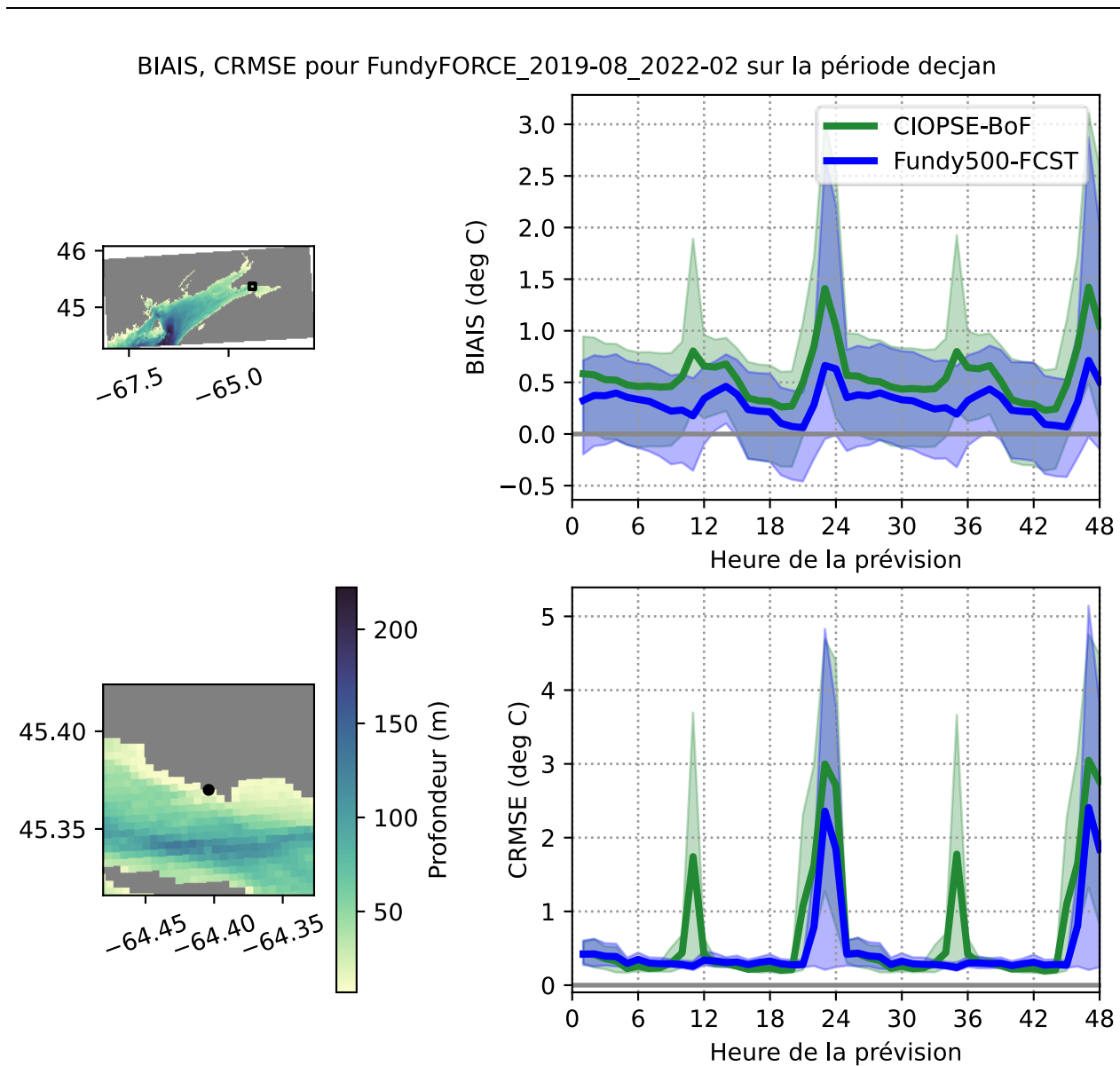


Figure 88 : Biais et CRMSE de la température de surface de la mer (TSM) en fonction de l'échéance de la prévision de 00Z à la bouée FORCE pour l'ensemble des prévisions de 48-h réalisées sur la période de 2 mois (Déc.-Jan.). Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.