



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 2026/004

Région de la capitale nationale

Évaluation du système de prévisions océaniques portuaires élaboré dans le cadre du Plan de Protection des Océans - Estuaire du Saint-Laurent

Simon St-Onge Drouin¹, Rachel Horwitz², Michael Dunphy³, Maxim Krassovski³,
Stephanne Taylor², Adam Drozdowski², Hauke Blanken³

¹ Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
850, route de la Mer
Mont-Joli (Québec) G5H 3Z4

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

³ Pêches et Océans Canada
Institut des sciences de la mer
9860, chemin West Saanich
Sidney (Colombie-Britannique) V8L 4B2

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 978-0-660-97519-1 N° cat. Fs70-5/2026-004F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

St-Onge Drouin, S., Horwitz, R., Dunphy, M., Krassovski, M., Taylor, S., Drozdowski, A. et Blanken, H. 2026. Évaluation du système de prévisions océaniques portuaires élaboré dans le cadre du Plan de Protection des Océans - Estuaire du Saint-Laurent. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2026/004. xiii + 134 p.

Also available in English :

St-Onge Drouin, S., Horwitz, R., Dunphy, M., Krassovski, M., Taylor, S., Drozdowski, A., and Blanken, H. 2026. Assessment of Port Ocean Prediction System Developed Under Canada's Oceans Protection Plan: St. Lawrence Estuary. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2026/004. xi + 128 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. ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT.....	5
3.1. OCÉANOGRAPHIE RÉGIONALE.....	5
3.2. DOMAINE ET CONFIGURATION.....	6
3.3. INITIALISATION.....	7
3.4. CONDITIONS AUX LIMITES OUVERTES.....	7
3.4.1. Système de référence vertical.....	7
3.4.2. Modèle unidimensionnel : r1d.....	8
3.5. APPORT EN EAU DOUCE.....	8
3.6. MODÈLE DES GLACES.....	9
3.7. STABILITÉ, ROBUSTESSE ET LIMITES DU SYSTÈME DE MODÉLISATION.....	9
3.7.1. Stabilité et robustesse.....	9
3.7.2. Limites.....	9
4. PARAMÈTRES D'ÉVALUATION.....	10
4.1. SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES.....	10
4.1.1. Niveau d'eau.....	11
4.1.2. Vitesse de courant.....	12
4.1.3. Propriétés de l'eau.....	14
4.1.4. Dérive.....	15
4.2. PRÉVISIONS.....	17
5. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES.....	17
5.1. NIVEAU D'EAU.....	17
5.1.1. Hauteur moyenne à long terme de la surface de la mer.....	17
5.1.2. Niveau d'eau de marée.....	18
5.1.3. Niveau d'eau résiduel.....	19
5.1.4. Scores globaux.....	20
5.1.5. Niveau d'eau des ondes de tempête.....	20
5.2. COURANTS.....	20
5.2.1. ADCP horizontaux.....	20
5.2.2. Courantomètres.....	22

5.2.3.	ADCP	22
5.2.4.	Transects d'ADCP	23
5.2.5.	Courants de surface	23
5.3.	PROPRIÉTÉS DE L'EAU	24
5.3.1.	Température de surface de la mer	24
5.3.2.	Sondes CTD ancrées	24
5.3.3.	Profils CTD	26
5.3.4.	Thermosalinographes installés sur un navire	27
5.4.	DÉRIVE	27
6.	RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES PRÉVISIONS	28
6.1.	NIVEAU D'EAU RÉSIDUEL	28
7.	SOMMAIRE.....	28
8.	CONSTATATIONS PRINCIPALES.....	29
9.	REMERCIEMENTS.....	29
10.	RÉFÉRENCES CITÉES.....	30
11.	TABLEAUX	34
12.	FIGURES	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Principaux paramètres de la configuration du ESTL200 et du ESTL500.....	34
Tableau 2. Ruissellement climatologique mensuel (m ³ /s).	35
Tableau 3. Numéro d'identification (ID) et nom des stations actives de niveau d'eau et décalage utilisé pour transférer les données sur le niveau d'eau dans le CGVD28.....	35
Tableau 4. Numéro d'identification (ID) et nom des stations historiques de niveau d'eau.....	36
Tableau 5. Comparaison de la composante M2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2021.	36
Tableau 6. Comparaison de la composante S2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2021.	37
Tableau 7. Comparaison de la composante N2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2021.	38
Tableau 8. Comparaison de la composante K1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2021.	38
Tableau 9. Comparaison de la composante M4 pour les marégraphes actifs pour l'année 2021.	39
Tableau 10. Comparaison de la composante M2 pour les marégraphes historiques.	39
Tableau 11. Scores du niveau d'eau de marée pour l'année 2021.	41
Tableau 12. Scores du niveau d'eau résiduel pour l'année 2021.....	42
Tableau 13. Scores du niveau d'eau total pour l'année 2021.....	42
Tableau 14. Nom et date des tempêtes.....	43
Tableau 15. Moyenne des scores, niveau d'eau indépendant des marées, pour les sept tempêtes choisies.	43
Tableau 16. Scores des courants de surface totaux par comparaison avec les ADCP horizontaux à Québec et à Lévis.	44
Tableau 17. Scores des courants résiduels à la surface par comparaison avec les ADCP horizontaux à Québec et à Lévis.	44
Tableau 18. Scores des courants de marée à la surface par comparaison avec les ADCP horizontaux à Québec et à Lévis.	44
Tableau 19. Amplitude et phase des composantes principales des courants de surface tirées des ADCP horizontaux à Québec et à Lévis; phase, amplitude et erreur de marée pour le ESTL500 et le ESTL200.	44
Tableau 20. Statistiques sur le courant total pour l'ADCP à la bouée IML-4.	46
Tableau 21. Statistiques sur le courant résiduel pour l'ADCP à la bouée IML-4.	46
Tableau 22. Statistiques sur le courant de marée pour l'ADCP à la bouée IML-4.....	47
Tableau 23. Scores de salinité et de température près de la surface pour 2017, d'après la comparaison avec les sondes CTD fixées aux marégraphes.....	47
Tableau 24. Scores de température près de la surface pour les années 2016 à 2019 à la station 3057, d'après la comparaison avec les sondes CTD fixées aux marégraphes.....	48

Tableau 25. Scores de salinité près de la surface pour les années 2016 à 2019 à la station 3057, d'après la comparaison avec les sondes CTD fixées aux marégraphes.....	48
Tableau 26. Scores de température près de la surface pour les années 2016 à 2021 à la station 3100, d'après la comparaison avec les sondes CTD fixées aux marégraphes.....	48
Tableau 27. Scores pour la température et la salinité du thermosalinographe sur le navire Oceanex Connaigra à une profondeur d'environ 8 m.	49
Tableau 28. Scores pour la base de données de bouées dérivantes du projet TReX en 2020..	49
Tableau 29. Scores pour les bouées dérivantes déployées dans le secteur de Saint-François, île d'Orléans, en juillet 2019.....	50

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma de séquençage de la pseudo-analyse (PA, en rouge) et des 4 prévisions de 48 h (en bleu) pour une date donnée. Les lignes pointillées grises sont espacées de six heures et les flèches 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.	51
Figure 2. Emplacements des cyclones toutes les 6 heures de 2010 à 2021.	51
Figure 3. Limites des domaines du SPCOG-E, du ESTL500 et du ESTL200.	52
Figure 4. Bathymétrie et limites des domaines du ESTL500 et du ESTL200.	53
Figure 5. Bathymétrie du ESTL500, avec les indices <i>i</i> et <i>j</i> comme axes vertical et horizontal. Les composantes de marée du logiciel OTPS sont appliquées à la limite ouverte est.	54
Figure 6. Bathymétrie du ESTL200, avec les indices <i>i</i> et <i>j</i> comme axes vertical et horizontal. Les composantes de marée du logiciel OTPS sont appliquées à la limite ouverte est.	55
Figure 7. Ruissellement maximal du Saint-Laurent par année, pour la période de 1968 à 2021.	56
Figure 8. Stations marégraphiques pour la partie amont de la zone modélisée. Les stations actives en temps réel sont indiquées en noir et les stations historiques en bleu.	57
Figure 9. Stations marégraphiques pour la partie en aval de la zone modélisée. Les stations actives en temps réel sont indiquées en noir et les stations historiques en bleu.	58
Figure 10. Carte de la hauteur moyenne (sur une période de 6 ans) de la surface de la mer (m) pour le domaine du ESTL200.	59
Figure 11. Carte de la hauteur moyenne (sur une période de 6 ans) de la surface de la mer (m) pour le domaine du ESTL500.	60
Figure 12. Hauteur moyenne (sur une période de 6 ans) de la surface de la mer pour les trois modèles et les observations (ligne noire en pointillés). Le ESTL200 est indiqué en rouge, le ESTL500 en bleu et le SPCOG-E (CIOPS-E) en vert. L'emplacement approximatif de la connexion avec le modèle r1d est indiqué par une flèche.	61
Figure 13. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante M2 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques actives (voir la carte des stations marégraphiques sur la Figure 8 et la Figure 9).	62
Figure 14. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante S2 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques actives (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).	63
Figure 15. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante N2 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques actives (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).	64
Figure 16. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante K1 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques actives (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).	65
Figure 17. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante M4 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques actives (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).	66

Figure 18. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante M2 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques historiques (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).	67
Figure 19. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante N2 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques historiques (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).	68
Figure 20. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante S2 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques historiques (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).	69
Figure 21. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante K1 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques historiques (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).	70
Figure 22. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante M4 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques historiques (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).	71
Figure 23. Niveau d'eau résiduel à la station 3345 pour l'année 2021.	72
Figure 24. Niveau d'eau résiduel à la station 3300 pour l'année 2021.	73
Figure 25. Niveau d'eau résiduel à la station 3248 pour l'année 2021.	74
Figure 26. Niveau d'eau résiduel à la station 3100 pour l'année 2021.	75
Figure 27. Spectre du niveau d'eau résiduel (panneau supérieur) et spectre d'erreur (panneau inférieur) à la station 3057 pour l'année 2021.	76
Figure 28. Spectre du niveau d'eau résiduel (panneau supérieur) et spectre d'erreur (panneau inférieur) à la station 3424 pour l'année 2021.	77
Figure 29. Résumé de la stabilité temporelle des scores du niveau d'eau pour chaque station et chaque modèle. Pour le niveau d'eau total (panneaux de gauche), le biais est sur l'axe vertical et la CRMSE sur l'axe horizontal. Les panneaux de droite montrent la CRMSE avec marée sur l'axe vertical et la CRMSE sans marée sur l'axe horizontal. Chaque point représente un seul score annuel.	78
Figure 30. Niveau d'eau résiduel pour les 7 tempêtes choisies à la station 2985.	79
Figure 31. Niveau d'eau résiduel pour les 7 tempêtes choisies à la station 3057.	80
Figure 32. Niveau d'eau résiduel pour les 7 tempêtes choisies à la station 3100.	81
Figure 33. Niveau d'eau résiduel pour les 7 tempêtes choisies à la station 3248.	82
Figure 34. Carte de la position (début des deux flèches) et de la couverture (flèches bleues) des deux ADCP horizontaux déployés de chaque côté du Saint-Laurent, un au port de Québec et un au quai de Lévis.	83
Figure 35. Carte de la position (points rouges) des deux ADCP horizontaux déployés de chaque côté du Saint-Laurent, un au port de Québec et un au quai de Lévis. La bathymétrie du ESTL200 pour cette région est également tracée sur la figure.	83
Figure 36. Nuages de points des courants à Lévis et axe principal de variance pour l'année 2021 pour les observations, le ESTL500 et le ESTL200.	84
Figure 37. Nuages de points des courants à Québec et axe principal de variance pour l'année 2021 pour les observations, le ESTL500 et le ESTL200.	85

Figure 38. Données de l'ADCP horizontal à Lévis et résultats des modèles pour l'année 2020. Courants totaux le long du rivage à partir des observations et des deux modèles dans le panneau 1, courant résiduel le long du rivage dans le panneau 2 et erreur de courant total le long du rivage dans le panneau 3.....	86
Figure 39. Données de l'ADCP horizontal à Lévis et résultats des modèles pour l'année 2021. Courants totaux le long du rivage à partir des observations et des deux modèles dans le panneau 1, courant résiduel le long du rivage dans le panneau 2 et erreur de courant total le long du rivage dans le panneau 3.....	87
Figure 40. Données de l'ADCP horizontal à Lévis et résultats des modèles pour l'année 2020. Courants totaux le long du rivage à partir des observations et des deux modèles dans le panneau 1, courant résiduel le long du rivage dans le panneau 2 et erreur de courant total le long du rivage dans le panneau 3.....	88
Figure 41. Données de l'ADCP horizontal à Lévis et résultats des modèles pour l'année 2020. Ellipses de marée d'après les observations et les deux modèles pour les composantes M2, N2, S2, K2, K1, O1, Q1, P1 et M4.....	89
Figure 42. Données de l'ADCP horizontal à Lévis et résultats des modèles pour l'année 2021. Ellipses de marée d'après les observations et les deux modèles pour les composantes M2, N2, S2, K2, K1, O1, Q1, P1 et M4.....	90
Figure 43. Données de l'ADCP horizontal à Québec et résultats des modèles pour l'année 2021. Ellipses de marée d'après les observations et les deux modèles pour les composantes M2, N2, S2, K2, K1, O1, Q1, P1 et M4.....	91
Figure 44. Ellipses de marée d'après l'ADCP à la bouée IML-4 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500) pour les composantes M2, K1, N2, S2, O1, P1, Q1 et K2, à une profondeur de 1,5 mètre.	92
Figure 45. Ellipses de marée d'après l'ADCP à la bouée IML-4 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500) pour les composantes M2, K1, N2, S2, O1, P1, Q1 et K2, à une profondeur de 20 mètres.....	93
Figure 46. Ellipses de marée d'après l'ADCP à la bouée IML-4 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500) pour les composantes M2, K1, N2, S2, O1, P1, Q1 et K2, à une profondeur de 50 mètres.....	94
Figure 47. Ellipses de marée d'après l'ADCP à la bouée IML-4 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500) pour les composantes M2, K1, N2, S2, O1, P1, Q1 et K2, à une profondeur de 100 mètres.....	95
Figure 48. Ellipses de marée d'après l'ADCP à la bouée IML-4 en 2016 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500) pour la composante M2.....	96
Figure 49. Ellipses de marée d'après l'ADCP à la bouée IML-4 en 2016 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500) pour la composante M2.....	97
Figure 50. Vitesse et direction totales moyennes (colonne 1), amplitude et angle de corrélation vectorielle pour les courants totaux (colonne 2), courants de marée (colonne 3) et courants résiduels (colonne 4), d'après l'ADCP à fréquence plus élevée à la bouée IML-4 en 2016 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500).....	98
Figure 51. Vitesse et direction totales moyennes (colonne 1), amplitude et angle de corrélation vectorielle pour les courants totaux (colonne 2), courants de marée (colonne 3) et courants résiduels (colonne 4), d'après l'ADCP à fréquence plus basse à la bouée IML-4 en 2016 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500).....	99

Figure 52. Courte série chronologique (1 semaine) des courants totaux u et v à une profondeur de 1,5 mètre d'après l'ADCP à fréquence plus élevée à la bouée IML-4 en 2016 pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500).	100
Figure 53. Spectre rotatif du courant total (en haut) et de l'erreur de courant (en bas) pour l'ADCP 11947 à 10 m. Rotation dans le sens horaire sur les panneaux de gauche et rotation antihoraire sur les panneaux de droite.....	101
Figure 54. Spectre rotatif du courant total (en haut) et de l'erreur de courant (en bas) pour l'ADCP 11947 à 50 m. Rotation dans le sens horaire sur les panneaux de gauche et rotation antihoraire sur les panneaux de droite.....	102
Figure 55. Instantanés des courants de surface pour le SPCOG-E (panneau de gauche) et le ESTL200 (panneau de droite), le 8 juin 2017, à 13 h (UTC), correspondant aux courants de jusant et à la basse mer. L'amplitude du courant de surface est représentée par l'échelle de couleur sur l'arrière-plan des flèches blanches. Toutes les cellules du SPCOG-E sont affichées, mais seulement 1 cellule sur 25 est indiquée pour les flèches du ESTL200 (pour des raisons de clarté).	103
Figure 56. Instantanés des courants de surface pour le SPCOG-E (panneau de gauche) et le ESTL200 (panneau de droite), le 8 juin 2017, à 19 h (UTC), correspondant aux courants de flot et aux hautes eaux. L'amplitude du courant de surface est représentée par l'échelle de couleur sur l'arrière-plan des flèches blanches. Toutes les cellules du SPCOG-E sont affichées, mais seulement 1 cellule sur 25 est affichée pour les flèches du ESTL200 (pour des raisons de clarté).	104
Figure 57. Instantanés des courants de surface pour le SPCOG-E (panneau supérieur) et le ESTL200 (deuxième panneau) le 8 juin 2017, à 13 h (UTC), correspondant aux courants de jusant et à la basse mer pour le ESTL200 et le SPCOG-E. L'amplitude du courant de surface est représentée par la longueur des flèches et par l'échelle de couleur des flèches. Les courants de surface du SPCOG-E sont interpolés sur la grille du ESTL200 et 1 cellule sur 49 est indiquée sur la figure (pour des raisons de clarté). Le panneau inférieur représente les courants de surface d'après l'atlas des courants de marée, pour la période allant de 0 à 1 heure après la basse mer. L'échelle de couleur est commune aux trois panneaux et les nœuds sont utilisés au lieu de l'unité m/s pour correspondre à l'échelle de couleur de l'atlas des courants marées. ...	105
Figure 58. Instantanés des courants de surface pour le SPCOG-E (panneau supérieur) et le ESTL200 (deuxième panneau) le 8 juin 2017, à 19 h (UTC), correspondant aux courants de flot et aux hautes eaux pour le ESTL200 et le SPCOG-E. L'amplitude du courant de surface est représentée par la longueur des flèches et par l'échelle de couleur des flèches. Les courants de surface du SPCOG-E sont interpolés sur la grille du ESTL200 et 1 cellule sur 49 est indiquée sur la figure (pour des raisons de clarté). Le panneau inférieur représente les courants de surface d'après l'atlas des courants de marée, pour la période allant de 0 à 1 heure après la basse mer. L'échelle de couleur est commune aux trois panneaux et les nœuds sont utilisés au lieu de l'unité m/s pour correspondre à l'échelle de couleur de l'atlas des courants de marées.	106
Figure 59. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 2985 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).....	107
Figure 60. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3057 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).....	108

Figure 61. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3100 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).....	109
Figure 62. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3248 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).....	110
Figure 63. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3300 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).....	111
Figure 64. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3335 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).....	112
Figure 65. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3353 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).....	113
Figure 66. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3360 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).....	114
Figure 67. Profils CTD et définition des polygones sur le domaine du ESTL200.	115
Figure 68. Profils CTD et définition des polygones sur le domaine du ESTL500 non couvert par le ESTL200.	116
Figure 69. Comparaison des profils CTD compris dans l'ensemble du domaine à 200 m de résolution (ESTL200). Voir la définition de la région All_200 sur la Figure 67. Noter l'échelle logarithmique sur les axes verticaux pour bien illustrer les différences sur les 10 premiers mètres.	117
Figure 70. Comparaison du profil CTD pour la région de l'estuaire moyen. Voir la définition de la région Moyen sur la figure 30.	118
Figure 71. Comparaison du profil CTD pour la région du fjord du Saguenay. Voir la définition de la région Sag sur la figure 30.	119
Figure 72. Profils CTD pour la région du fjord du Saguenay, seulement pour le ESTL200. Voir la définition de la région Sag sur la figure 30.....	120
Figure 73. Comparaison du profil CTD pour la région de l'estuaire maritime. Voir la définition de la région Maritim sur la figure 30.....	121
Figure 74. Trajectoires de l'Oceanex Connaigra pour l'année 2018. Le moment de la position du navire est représenté par l'échelle de couleur. Le rectangle rouge en pointillés représente les limites du domaine du ESTL200.	122
Figure 75. Salinité à 8 m recueillie par le navire sur la section commune aux trois modèles dans l'estuaire moyen. L'axe horizontal est la longitude, l'Île-aux-Coudres et la ville de Tadoussac étant marquées pour servir de points de repère (voir la Figure 74). L'axe vertical est le mois de l'année 2018. La rangée 1 représente les observations, les rangées 2 à 4, les résultats du modèle dans la colonne 1 et les différences avec les observations dans la colonne 2.	123
Figure 76. Température à 8 m recueillie par le navire sur la section commune aux trois modèles dans l'estuaire moyen. L'axe horizontal est la longitude, l'Île-aux-Coudres et la ville de Tadoussac étant marquées pour servir de points de repère (voir la Figure 74). L'axe vertical est	

le mois de l'année 2018. La rangée 1 représente les observations, les rangées 2 à 4, les résultats du modèle dans la colonne 1 et les différences avec les observations dans la colonne 2.	124
Figure 77. Carte de la trajectoire des bouées dérivantes pour le projet TReX, 2020. Le rectangle en pointillés bleus correspond au domaine du ESTL500.....	125
Figure 78. Carte de la trajectoire des bouées dérivantes près de Saint-François, île d'Orléans. Les positions initiales de déploiement sont marquées d'une croix noire.	125
Figure 79. Indice de comparaison de Molcard pour la base de données des bouées dérivantes du projet TReX en 2020.....	126
Figure 80. Distance moyenne de séparation pour la base de données des bouées dérivantes du projet TReX en 2020.....	127
Figure 81. Indice de comparaison de Molcard pour les bouées dérivantes déployées dans le secteur de Saint-François, île d'Orléans, en juillet 2019.....	128
Figure 82. Distance moyenne de séparation pour les bouées dérivantes déployées dans le secteur de Saint-François, île d'Orléans, en juillet 2019.....	129
Figure 83. Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel à la station 2985.....	130
Figure 84. Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel à la station 3424.....	131
Figure 85. Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel à la station 3057.....	132
Figure 86. Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel à la station 3100.....	133
Figure 87. Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel à la station 3248.....	134

RÉSUMÉ

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

Le présent document fait état de l'évaluation de la performance du système de prévisions océaniques de l'estuaire du Saint-Laurent et donne des détails sur le développement et la configuration du système. Les résultats du modèle sont comparés aux données sur les niveaux d'eau, les courants, les propriétés de l'eau et la dérive, et cette comparaison comprend le SPCOG-E dans la mesure du possible. Les résultats montrent que la performance des modèles à haute résolution pour cette région est améliorée pour toutes les observations utilisées par rapport au SPCOG-E dans l'estuaire moyen.

1. INTRODUCTION

Le présent document a pour objet d'examiner les performances des modèles à haute résolution élaborés pour six ports canadiens 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. Ces modèles ont été élaborés pour renforcer les capacités de modélisation des océans du gouvernement du Canada à l'appui, d'une part, des applications concernant la protection de l'environnement et la sécurité maritime (par exemple, prévision de la dérive pour les déversements d'hydrocarbures) et, d'autre part, de la sécurité de la navigation à l'aide d'une application hydrographique de navigation électronique. Les six ports, trois sur la côte Est et trois sur la côte Ouest, ont été choisis comme étant exposés à un risque important d'incidents environnementaux en raison du trafic dense de pétroliers et de leurs besoins complexes en matière de navigation. Des modèles ont été élaborés pour les ports de Kitimat, du bas Fraser et du port de Vancouver sur la côte Ouest, ainsi que pour les ports de Saint John, du détroit de Canso et pour 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, et une expérience de dérive est menée en 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 développé pour l'estuaire du Saint-Laurent et son approche. La conception commune à tous les modèles portuaires est présentée à la section 2, tandis que la section 3 décrit les spécificités du modèle de l'estuaire du Saint-Laurent en lien avec les particularités océanographiques régionales. Après avoir décrit les paramètres d'évaluation utilisés pour évaluer tous les modèles à la section 4, les sections 5 et 6 analysent respectivement les résultats de l'évaluation des prévisions réalisées pour l'estuaire du Saint-Laurent. Les performances du système de modélisation de l'estuaire du Saint-Laurent sont résumées à la section 7, et les constatations principales sont énumérées à la 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 « Finite Volume Community Ocean Model » (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, entre autres, aux besoins opérationnels de CONCEPTS (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 indépendant les uns des autres. Cette stratégie d'imbrication unidirectionnelle permet également de corriger les erreurs systématiques aux limites ouvertes.

Nous n'utilisons pas de modèle dynamique de glace de mer, mais une fonction de NEMO appelée « ice if » (« si glace »), 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 diagnostic 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 (figure 2), 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 capacités. L'objectif de rouler 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. ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT

3.1. OCÉANOGRAPHIE RÉGIONALE

L'estuaire du Saint-Laurent est une zone côtière caractérisée par une bathymétrie complexe, de fortes marées et d'importants ruissellements provenant du fleuve Saint-Laurent, le deuxième fleuve en importance en Amérique du Nord. La principale source de dissipation de l'énergie provient de l'action des marées, puisque 94 % de l'énergie dans l'estuaire moyen est contenue dans les fréquences des marées (Muir 1981).

Dans ce rapport, les appellations « estuaire fluvial », « estuaire moyen » et « estuaire maritime » seront utilisées. L'estuaire fluvial s'étend de Trois-Rivières jusqu'à la pointe ouest de l'île d'Orléans; l'estuaire moyen atteint l'embouchure du fjord du Saguenay et l'estuaire maritime se termine à Pointe-des-Monts. Cette caractérisation résulte de la limite de l'influence importante de la marée (fleuve Saint-Laurent/estuaire fluvial), de la limite de l'intrusion saline (estuaire fluvial/ moyen) et des caractéristiques bathymétriques (estuaire moyen/ maritime).

Les courants de surface dans l'ensemble de l'estuaire sont influencés par le ruissellement provenant du fleuve, qui est de 11 400 m³/s en moyenne (Saucier *et al.* 2009). Dans la partie fluviale, ce ruissellement crée une pente hydraulique. Le niveau d'eau moyen est 4 m plus haut que le niveau moyen de la mer (CGVD28) à Trois-Rivières et atteint le niveau de la mer dans l'estuaire moyen entre l'île d'Orléans et Saint-Joseph-de-la-Rive (Saucier et Chassé 2000).

L'estuaire moyen est divisé en une partie nord et une partie sud par une série de hauts-fonds. La partie nord est généralement plus profonde (plus de 150 m de profondeur dans le bassin de

Charlevoix) et recouverte d'un chenal presque continu. Le chenal sud et le chenal du milieu de la partie sud ont moins de 40 m de profondeur (El-Sabh 1988). Les gradients latéraux de salinité entre les rives nord et sud peuvent atteindre 8 (Neu 1970), et la salinité varie de 0 à 30 dans l'ensemble de l'estuaire moyen (Silverberg et El-Sabh 1990). Les effets de la flottabilité ont une incidence sur les courants résiduels dans toute la colonne d'eau jusqu'à la partie amont de l'estuaire moyen, entre Saint-Joseph-de-la-Rive et l'île d'Orléans (Simons *et al.* 2006).

À la limite des estuaires moyen et maritime, les effets de flottabilité et des marées sont d'une grande importance, particulièrement à l'embouchure du chenal Laurentien, près de Tadoussac, où des isopycnes de 75 mètres de profondeur sont soulevées près de la surface au-dessus des différents seuils (Saucier et Chassé 2000), générant ainsi d'importants processus de mélange.

L'estuaire maritime est plus profond et plus large, caractérisé par de multiples tourbillons cycloniques et anticycloniques et un jet côtier intense appelé le courant de Gaspé, qui est attaché à la pente du fond sud. Plusieurs fronts de densité sont également une caractéristique importante de cette zone (El-Sabh et Murty 1990; Saucier 2003).

3.2. DOMAINE ET CONFIGURATION

Le modèle portuaire du Saint-Laurent devait initialement être intégré au modèle du golfe du Saint-Laurent à 500 m de résolution (GSL500) élaboré à Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Lorsque la mise en œuvre du GSL500 n'a pas été appuyée par ECCC, un modèle de réduction de la résolution à 500 m a été ajouté au système de modélisation portuaire du Saint-Laurent. Les grilles du ESTL500 et du ESTL200 sont donc fondées sur la grille du GSL500 au lieu de la grille du SPCOG-E. Ces grilles sont conçues avec les outils utilisés à ECCC pour produire les grilles GEM-LAM (modèle global environnemental multi-échelle à aire limitée), comme le Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD) à 2,5 km (Milbrandt *et al.* 2016). Le centre de cette projection géographique est défini au centre du golfe du Saint-Laurent, et les grilles sont tournées dans le sens antihoraire selon un angle de 37 degrés.

L'ensemble du système de modélisation du Saint-Laurent décrit ici est illustré à la figure 3. Ce système comprend deux niveaux d'imbrication unidirectionnelle hors ligne : du SPCOG-E au ESTL500 et du ESTL500 au ESTL200.

Le ESTL500 (encadré bleu en pointillés sur la figure 4) s'étend de Pointe-des-Monts à Québec, juste à l'est du pont de Québec. Le ESTL200 (encadré rouge en pointillés sur la figure 4) va des Escoumins à Trois-Rivières, où l'amplitude de la marée est beaucoup plus petite (~15 cm), ce qui facilite la connexion avec le modèle unidimensionnel. Le fjord du Saguenay (figure 4) est inclus dans le ESTL200 pour deux raisons : les échanges de masse d'eau avec l'estuaire à Tadoussac sont importants pour reproduire correctement les masses d'eau ailleurs dans l'estuaire, et il y a deux ports sur la rivière Saguenay où d'autres aménagements sont possibles.

Un bref résumé des principaux paramètres des deux modèles est présenté dans le tableau 1. La résolution verticale a été réduite de 1 m à la surface à 3 m pour le ESTL200 en raison de problèmes de stabilité numérique. L'hypothèse relative à ces instabilités est l'existence d'ondes internes, entraînant une vitesse verticale plus grande à une résolution plus élevée.

Une calibration de la friction sur le fond a été effectuée dans le domaine de l'estuaire moyen du Saint-Laurent à 200 m. Ce réglage tenait compte de l'amplitude et de la phase de la composante M2 des marées, ainsi que de la pente hydraulique dans l'estuaire en amont. Cette calibration n'a pas été effectuée pour le fjord du Saguenay.

3.3. INITIALISATION

La simulation rétrospective du ESTL500 a débuté le 10 février 2016, et nous avons pris en compte les données de sortie du ESTL500 à partir du 20 avril 2016 pour l'évaluation rétrospective, la période restante étant considérée comme un ajustement initial. La simulation rétrospective du ESTL200 a débuté le 20 février 2016, et nous avons pris en compte les données de sortie du ESTL200 à partir du 20 avril 2016 pour l'évaluation rétrospective, la période restante étant considérée comme un ajustement initial. L'état initial dans le fjord du Saguenay, qui ne fait pas partie du domaine du SPCOG-E, a d'abord été tiré du STLE400, un autre modèle de l'estuaire du Saint-Laurent (Saucier et Chassé 2000), pour le ESTL500 et le ESTL200. En amont de la limite ouest du SPCOG-E, dans l'estuaire fluvial du Saint-Laurent, la condition initiale pour la température et la salinité (~ 0) sont extrapolées à partir des valeurs à l'ouest du SPCOG-E.

3.4. CONDITIONS AUX LIMITES OUVERTES

La température, la salinité, la vitesse horizontale et la hauteur de la surface de la mer à la limite est du ESTL500 à une résolution horizontale de 500 m (encadré bleu sur la figure 3) sont calculées à partir des résultats du SPCOG-E (encadré vert sur la figure 3). De la même manière, le ESTL500 fournit les conditions à la limite est au modèle à 200 m de résolution horizontale, le ESTL200 (encadré rouge sur la figure 3).

Il y a un décalage de phase dans les marées propagées par le SPCOG-E à la position de la limite ouverte est du ESTL500. C'est pourquoi, pour améliorer les marées, nous découplons les courants et la hauteur de la surface de la mer du signal de marée avant de les utiliser à la limite est du ESTL500. Les composantes de marée calculées par le logiciel de prévision des marées de l'Université d'État de l'Oregon (OTPS) sont ensuite utilisées pour reconstruire les marées à la limite est, réduisant ainsi le décalage de phase, comme l'illustre la bande gris pâle en bas à droite de la figure 5. Les composantes de marée utilisées sont les suivantes : M2, N2, S2, K2, K1, O1, Q1, P1, M4, Mf, Mm, Mn4 et Ms4. Le même traitement est appliqué à la limite ouverte est du ESTL200 (bande gris pâle en bas à droite sur la figure 6), car le ESTL500 présente également un décalage de phase à cette position. Un effort a été fait pour calibrer la marée dans le ESTL500 en ajustant le frottement sur le fond dans le but de s'affranchir de l'utilisation des composantes de marée du logiciel OTPS à la limite est du ESTL200, sans obtenir de résultats concluants pour l'instant.

3.4.1. Système de référence vertical

Les grilles bathymétriques du ESTL500 et du ESTL200 font référence au même système canadien de référence altimétrique de 1928 ([CGVD28](#)) mais pas la grille bathymétrique du SPCOG-E. Le système de référence vertical utilisé par le SPCOG-E était inconnu au moment de la rédaction du présent rapport. Cependant, le niveau moyen de la mer dans le SPCOG-E est à environ 32 cm en dessous du niveau moyen de la mer observé à Rimouski, lorsque cette observation est référencée au CGVD28. Nous nous sommes efforcés de corriger ce décalage à la limite ouverte est du ESTL500 en ajoutant le décalage dans la condition à la limite ouverte de la hauteur de la surface de la mer du modèle portuaire, mais la variation de la moyenne de la hauteur de la surface de la mer a modifié la propagation de la marée en amont, nécessitant un nouveau réglage du frottement sur le fond qui n'a pas été possible en raison de contraintes de temps. De ce fait, il n'y a pas de correction du décalage pour la hauteur de la surface de la mer à la limite ouverte est du ESTL500. D'autres travaux sur cette question sont prévus pour la prochaine phase de développement du modèle. Afin d'éliminer ces décalages sur les figures présentées dans le présent rapport, nous appliquons un décalage du niveau moyen de la mer de +37 cm à tous les résultats du niveau d'eau des trois modèles, ce qui correspond à une

moyenne du décalage à Rimouski (station 2985, décalage = -32 cm) et à Baie-Sainte-Catherine (station 3424, décalage = -42 cm).

3.4.2. Modèle unidimensionnel : r1d

Les courants de surface résultant du ruissellement du Saint-Laurent sont modulés localement par les marées. Afin de propager l'onde de marée en amont de la limite ouest, il faut coupler de façon bidirectionnelle le modèle NEMO à un modèle unidimensionnel, r1d, pour la partie amont du Saint-Laurent (de Montréal à Trois-Rivières).

Ce modèle unidimensionnel est fondé sur une publication de Dronkers (Dronkers 1969). Il utilise le troisième schéma implicite et l'application de ce schéma à un réseau de bras de cours d'eau, décrit aux pages 53-54 et 61-62 du document.

Une contrainte à ce schéma de couplage est qu'il n'y a pas de flux de quantité de mouvement entre les modèles r1d et NEMO. Le ruissellement calculé par le modèle r1d est ajouté à la colonne d'eau comme s'il s'agissait de pluie. L'énergie cinétique est donc transférée en énergie potentielle, créant possiblement un biais d'élévation artificiel. La compréhension des mécanismes de propagation de l'onde de marée du modèle NEMO au modèle r1d dans ces conditions est incomplète. Cependant, des essais ont été effectués en traitant le ruissellement du Saint-Laurent comme un cours d'eau normal, ce qui a entraîné une dégradation évidente du niveau moyen de la mer. De plus, dans le cas du ESTL200, le modèle NEMO est relié au modèle r1d dans la partie amont de l'estuaire fluvial, à Trois-Rivières, où l'amplitude des marées n'est que d'environ 15 cm. L'absence de transport de la quantité de mouvement à Trois-Rivières n'a pas d'impact significatif dans la région de Québec, où l'amplitude des marées (~ 2 m) est importante comparativement à Trois-Rivières. La connexion du modèle NEMO au modèle r1d dans la partie amont de l'estuaire fluvial, à plus de 130 km à l'ouest de Québec, visait principalement à réduire au minimum l'effet de ce couplage sur la région de Québec. Dans le ESTL500, le modèle r1d est connecté à l'est du pont de Québec. Cette zone de couplage a une incidence sur le niveau d'eau dans la région de Québec, mais l'utilité de cette configuration est de fournir les conditions aux limites au ESTL200 près des Escoumins, beaucoup plus à l'est.

Ce modèle r1d propage les marées en amont. Il a également besoin du débit du Saint-Laurent comme condition aux limites en amont. Ce débit est fourni par un autre modèle unidimensionnel, le STLT1061 (Lefaivre *et al.* 2016), exécuté sur un serveur de la région du Québec de Pêches et Océans Canada. Le STLT1061 fournit un ruissellement à Québec auquel est appliqué un filtre de marées. Les valeurs climatologiques des affluents entre Québec et la section amont du modèle r1d sont soustraites de ce ruissellement et la résultante est appliquée à l'extrémité amont du modèle r1d, autour de Montréal. Les ruissellements climatologiques des affluents sont ensuite réintroduits dans le tronçon approprié du modèle r1d ou dans la cellule appropriée de la grille du modèle NEMO. Cette méthode permet de profiter du fait que le STLT1061 assimile le débit en temps réel pour les grands cours d'eau.

3.5. APPORT EN EAU DOUCE

Nous utilisons les climatologies mensuelles pour le ruissellement de tous les grands cours d'eau, sauf pour le Saint-Laurent, pour lequel nous utilisons un modèle unidimensionnel (voir la section 3.4.2 ci-dessus). Les valeurs climatologiques sont présentées dans le tableau 2. Ces climatologies du ruissellement sont tirées de travaux de modélisation antérieurs pour la région (Saucier 2003; Saucier et Chassé 2000).

Les prévisions du débit du Saint-Laurent sont fournies par le modèle STLT1061 afin d'alimenter les conditions à la limite ouest pour effectuer les prévisions sur 48 heures.

3.6. MODÈLE DES GLACES

Il n'existe pas encore de modèle explicite des glaces dans l'un ou l'autre des deux domaines. Les deux modèles utilisent le modèle de remplacement « ice-if » de NEMO, avec la concentration de glace du SPCOG-E.

3.7. STABILITÉ, ROBUSTESSE ET LIMITES DU SYSTÈME DE MODÉLISATION

3.7.1. Stabilité et robustesse

La simulation rétrospective du ESTL500 et du ESTL200 a été exécutée pour six ans et quatre mois (de février 2016 à juin 2022) et pour un ensemble de 67 prévisions (48h) sous la suite Maestro du modèle portuaire. Cette période historique comprend les plus fortes crues printanières observées en 60 ans en 2017 et en 2019 (figure 7), et le modèle est demeuré stable et a produit des résultats satisfaisants. Plusieurs tempêtes se sont également produites au-dessus des domaines du Saint-Laurent durant cette période, dont certaines sont présentées de la figure 30 à la figure 33, dans le tableau 14 et le tableau 15, et décrites à la section 5.1.5. Les modèles sont demeurés stables pendant ces tempêtes, et les niveaux d'eau ont été reproduits correctement.

La pseudo-analyse et les prévisions de 48h ont été maintenues en fonction pendant un an (du 25 août 2021 au 14 août 2022), sur la grappe de calcul générique pour la science (GCGS), pour le ESTL500 et le ESTL200. L'objectif était de cerner les problèmes qui auraient une incidence sur le déploiement opérationnel et de tester la stabilité du système. La plupart des problèmes étaient liés à un manque de données provenant du modèle à plus grande échelle ou d'une source d'intrants pour les différents forçages (ruissellement, atmosphère), ainsi qu'aux différentes mises à niveau des systèmes de GCGS.

Des solutions de rechange sont en place pour les intrants de ruissellement du Saint-Laurent fournis par le STLT1061 : il fournit des prévisions quotidiennes sur 30 jours. Si la prévision de ruissellement sur 48 h n'est pas produite, la dernière prévision sur 30 jours est utilisée, ce qui assure 30 jours de sécurité. Dans l'éventualité où aucune nouvelle prévision n'est fournie pendant 30 jours, une climatologie du ruissellement du Saint-Laurent est alors utilisée.

3.7.2. Limites

Comme il est mentionné ci-dessus, il n'existe pas encore de modèle explicite des glaces dans l'un ou l'autre des deux domaines. Les conséquences de cette lacune sur les courants de surface sont possiblement plus importantes pour l'estuaire fluvial et le fjord du Saguenay de janvier à mars, la glace étant principalement mobile pour le reste de la zone. Toutefois, cette limite doit être prise en compte pour l'ensemble de la zone si le modèle doit être utilisé pendant l'hiver de janvier à mars.

Aucun réglage du frottement sur le fond n'a été effectué dans le fjord du Saguenay. Par conséquent, l'erreur de marée est plus élevée dans cette région (stations 3424 et 2460) que dans les régions avoisinantes.

La résolution grossière du modèle atmosphérique (SHRPD à 2,5 km) est une limite dans les zones comportant des chenaux étroits, où des valeurs de vent à plus haute résolution seraient nécessaires pour résoudre correctement ces chenaux. C'est le cas dans la région de Québec (y compris l'île d'Orléans) et en amont, ainsi que dans le fjord du Saguenay. Il serait également utile d'avoir une grille océanique à résolution plus élevée, ce que les résultats des profileurs horizontaux de courant à effet Doppler (ADCP horizontaux) tendent à appuyer (voir la section 5.2.1) pour la région de Québec.

Comme il a été mentionné précédemment (section 3.4.1), les modèles portuaires et le SPCOG-E utilisent des systèmes de référence verticaux différents. Le fait de ne pas corriger ce décalage à la limite a pour conséquence de soustraire environ 37 cm d'eau, ce qui devrait davantage influencer la propagation de la vitesse des ondes dans les zones moins profondes que dans les zones plus profondes.

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 des modèles, qui seraient difficiles à évaluer avec une simulation courte. Par ailleurs, 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 (48h) 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

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

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

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

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

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

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

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

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

qui est le rapport entre la variance de l'erreur et la variance observée, de sorte que 0 indique une concordance parfaite entre les variances du modèle et de l'observation et 1 indique que la

variance de l'erreur est aussi importante que la variance du signal. Une valeur de 1 ou supérieure indique qu'il n'y a aucune capacité de prédiction.

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

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

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

Pour les vecteurs (courants), nous utilisons 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 au zéro des cartes 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

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

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, des 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 2 montre un zoom sur l'Amérique du Nord) a guidé 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 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 est la même que 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.

L'extraction du signal associé à la marée d'une onde de tempête se fait en utilisant 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 supplémentaire 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 bruyantes, ont tendance à avoir plus de données manquantes, sont moins stationnaires et sont influencées 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 Υ^2 et la corrélation vectorielle, sont utilisées.

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

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 nuages de points servent à illustrer la distribution de la vitesse et de la direction du courant total et les demi-grand axes des ellipses des courants de marée sont comparées dans la mesure du possible.

4.1.2.2. Courantomètres et ADCPs ancrés

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

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

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

4.1.2.3. Transects d'ADCPs

Les transects d'ADCPs sont trop courts pour une analyse des marées. En conséquence, seuls les courants totaux sont 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 nuages de points 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 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 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 dérive, sans évaluer la pertinence des prédictions du vent dans les domaines des modèles portuaires ni commenter l'utilité potentielle d'un système de prévision des vagues à l'échelle du port (pour prévoir la dérive). 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 différents types de dériveurs. Étant donné l'incertitude considérable associée à ce terme de 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 de 24 heures ou plus (spécifiée par l'utilisateur), dans la mesure du possible. Toutefois, dans certaines régions, la majorité des trajectoires des dériveurs observées duraient moins de 24 heures. Dans ces 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 le module 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 importante 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 les 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'heure de la prévision. 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 T_TIDE, dans lequel une faible valeur (0,1) du nombre de Rayleigh est utilisée (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

Dans cette section, nous évaluons la performance des systèmes de prévisions océaniques portuaires ESTL200 et ESTL500 entre le 20 avril 2016 et le 1^{er} juin 2022. La comparaison avec le SPCOG-E est incluse dans la mesure du possible. Tous les résultats des modèles utilisés sont horaires et instantanés.

5.1. NIVEAU D'EAU

Les positions des marégraphes utilisés sont tracées sur la figure 8 pour l'estuaire fluvial et la partie amont de l'estuaire moyen et sur la figure 9 pour la partie aval de l'estuaire moyen et l'estuaire maritime. Les stations actives en temps réel (en noir) sont utilisées de la sous-section 5.1.1 à la sous-section 5.1.5 et les stations historiques (en bleu) seront ajoutées dans la sous-section 5.1.2.2. Le tableau 3 énumère l'identifiant et le nom des stations, ainsi que le décalage utilisé pour transférer les données sur le niveau d'eau du zéro des cartes au système CGVD28 pour les stations actives et le tableau 4 énumère l'identifiant et le nom des stations des marégraphes historiques.

5.1.1. Hauteur moyenne à long terme de la surface de la mer

Les cartes de la hauteur moyenne à long terme (six ans) de la surface de la mer pour les deux domaines du Saint-Laurent sont présentées à la figure 10 pour le ESTL200 et à la figure 11 pour le ESTL500. Comme il est mentionné à la section 3.4.1, un décalage du niveau moyen de la mer de +37 cm est appliqué à tous les résultats du niveau d'eau des trois modèles (ESTL200, ESTL500 et SPCOG-E). Les valeurs moyennes à long terme de la hauteur de la surface de la mer, modélisées et observées, sont également comparées sur la figure 12, après ajout du décalage de 37 cm. Les trois modèles montrent des différences semblables de la hauteur moyenne à long terme de la surface de la mer pour les stations 2985 (seulement pour le ESTL500 et le SPCOG-E) et 3424. Pour le SPCOG-E, les différences de la hauteur moyenne

à long terme de la surface de la mer augmentent à la station 3057 (+26,9 cm) et à la station 3100 (+30,8 cm; tableau 13). Pour le ESTL500, les différences de la hauteur moyenne à long terme de la surface de la mer sont similaires à celles du ESTL200 jusqu'à la station 3248 (+32,6 cm). Cette augmentation de la hauteur moyenne à long terme de la surface de la mer pour le SPCOG-E et le ESTL500 correspond dans l'espace aux endroits où les deux modèles sont reliés au modèle r1d, qui sont illustrés par des flèches colorées sur la figure 12. Les raisons possibles de cette erreur sont examinées à la section 3.3. Pour le ESTL200, la connexion au modèle unidirectionnel r1d a l'effet inverse : le niveau d'eau moyen diminue (-29,4 cm). Une explication possible est que l'accélération de l'eau à la limite ouest du ESTL200 n'est pas comparable à celle qui se produit aux limites ouest du ESTL500 et du SPCOG-E : l'amplitude des marées n'est que d'environ 15 cm (comparativement à plus de 2 m) et le ruissellement du Saint-Laurent est le principal facteur des courants de surface, qui vont toujours dans la même direction (vers l'aval).

5.1.2. Niveau d'eau de marée

5.1.2.1. Station marégraphique active en temps réel

Pour cette sous-section, nous avons choisi l'année 2021 parce que les données sont aussi disponibles pour les stations 3424 et 3460, ce qui n'était pas le cas pour les années précédentes. Seules les composantes de marée dont l'amplitude est > 25 cm sont présentées.

Nous comparons l'amplitude et la phase de la composante M2 des marées dans les trois modèles aux observations pour les stations marégraphiques actives (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 8 et à la figure 9), pour l'année 2021, à la figure 13. Ces chiffres sont également présentés dans le tableau 5, en plus de l'erreur de marée. À l'exception de l'amplitude de la marée pour la station 3424, les résultats pour l'erreur de phase et d'amplitude sont équivalents ou améliorés pour tous les marégraphes actifs lorsque le ESTL200 n'est pas le seul modèle couvrant la station (3248, 3100, 3057 et 3424). Lorsque nous incluons la phase de la marée et examinons l'erreur de marée (tableau 5), les marées sont nettement améliorées dans le ESTL200 à ces quatre stations. Les 3 stations les plus en aval (3100, 3057 et 3424) de ces quatre stations couvrent une partie importante du domaine du ESTL200 où il existe une stratification, ce qui signifie qu'un modèle tridimensionnel est préférable à un modèle bidimensionnel. La station 3424 est située dans la baie Sainte-Catherine, à l'entrée du fjord du Saguenay, juste en amont d'un seuil important. La calibration du frottement sur le fond a été axée sur l'estuaire moyen lui-même, et non sur le fjord du Saguenay, et les résultats à cette station pourraient être améliorés dans la prochaine itération. Le même raisonnement s'applique à la station 3460, qui est plus en amont dans le fjord du Saguenay (figure 9). La station 2895 (Rimouski) montre qu'en aval du domaine, la composante M2 est meilleure dans le ESTL500 que dans le SPCOG-E. Dans la partie ouest, pour les stations 3300, 3335, 3345, 3353 et 3360, l'erreur de marée augmente pour ESTL200 (les domaines du ESTL500 et du SPCOG-E ne s'étendent pas jusqu'à ces stations à l'ouest). Pour la station 3300, cette erreur est principalement causée par une amplitude modélisée plus faible (~10 cm), tandis que les quatre stations en amont présentent également un décalage de phase important (jusqu'à -17,5 degrés). Il a été décidé d'étendre le EST200 aussi loin à l'ouest pour déplacer la connexion avec le modèle r1d loin de Québec, et à un endroit où l'amplitude de la marée est minimale (~15 cm à Trois-Rivières). Le calibrage du frottement sur le fond est minimal dans cette région ouest et une plus grande attention sera accordée à ces stations dans la prochaine phase de développement.

Nous comparons l'amplitude et la phase des composantes S2, N2 et K1 des marées dans les trois modèles aux observations dans le tableau 6, le tableau 7 et le tableau 8 et à la figure 14, à la figure 15 et à la figure 16, respectivement. Les erreurs de marée dans le ESTL200 sont

inférieures à 2 cm pour toutes les stations, à l'exception de la composante S2 aux stations 3424 et 3460 dans le fjord du Saguenay.

L'amplitude et la phase de la composante quart-diurne M4 des marées dans les trois modèles sont comparées aux observations dans le tableau 9 et à la figure 17. Cette composante devient significative entre les stations 3100 et 3335 (> 15 cm et jusqu'à 31 cm, voir le tableau 9). Elle représente jusqu'à environ 5 cm de l'erreur de marée. Il sera donc important d'en tenir compte lors du rééchantillonnage des marées de l'estuaire fluvial.

5.1.2.2. Stations marégraphiques historiques

La figure 18 permet de comparer l'amplitude et la phase de la composante M2 des marées dans les trois modèles aux observations pour les stations marégraphiques historiques (voir la carte des stations marégraphiques sur la figure 8 et la figure 9). Ces chiffres sont également présentés dans le tableau 10, en plus de l'erreur de marée. Ces comparaisons ne sont pas aussi fiables que les marégraphes actifs (section 5.1.2), car certaines des composantes ont été calculées en utilisant seulement 14 jours de données sur le niveau d'eau. Cependant, elles sont présentées ici car elles donnent une image spatiale plus globale des composantes de marée modélisées, avec 52 stations le long de l'estuaire du Saint-Laurent.

Dans la région est, de la station 2955 à la station 3030 (d'est en ouest, ou de droite à gauche sur la figure), le ESTL500 donne généralement de meilleurs résultats que le SPCOG-E et le ESTL200 pour l'amplitude et la phase. De la station 3160 jusqu'à la limite ouest, l'erreur de marée du ESTL200 est habituellement inférieure à celle du ESTL500 et l'erreur de marée du ESTL500 est généralement inférieure à celle du SPCOG-E. Les exceptions sont la station 3075, où le ESTL500 est meilleur que le ESTL200 en raison d'une erreur de décalage de phase, et la station 3080, où l'erreur de marée du ESTL500 est inférieure d'environ 1 cm à celle du ESTL200.

Les figure 19 à figure 22 montrent la comparaison de l'amplitude et de la phase des composantes de marée avec les stations marégraphiques historiques pour les autres composantes principales (N2, S2, K1 et M4). L'amplitude et la phase sont généralement améliorées dans le ESTL200 et le ESTL500 par rapport au SPCOG-E. L'amplitude des composantes quart-diurne M4 des marées devient significative (> 15 cm) entre les stations 3190 et 3300.

5.1.3. Niveau d'eau résiduel

Les figure 23 à figure 25 illustrent le niveau d'eau résiduel pour trois stations dans l'estuaire fluvial. Pour la station 3345 (figure 23), il y a un biais négatif, qui est indiqué à -14,2 cm dans le tableau 13, et le niveau d'eau résiduel est plus bas dans le modèle au pic de la crue printanière (début avril) d'environ 1 m au maximum. Ce biais pourrait possiblement être éliminé en augmentant le frottement sur le fond dans cette zone, ce qui sera également nécessaire pour améliorer l'amplitude de la marée M2 (qui est trop grande de 7,9 cm, voir le tableau 5). Un nouveau réglage du frottement sur le fond sera effectué dans la prochaine phase de développement. Cependant, la variabilité temporelle modélisée concorde bien avec les observations. La variabilité temporelle modélisée concorde également bien avec les observations aux stations 3300, 3248 et 3100 pour le ESTL200 et le ESTL500 (figure 24, figure 25 et figure 26). À la station 3100 (figure 25), l'erreur du SPCOG-E est augmentée de mai à novembre.

La figure 27 et la figure 28 illustrent le spectre du niveau d'eau résiduel. Les trois modèles produisent un spectre semblable aux observations, mais les fréquences plus élevées (plus de 6 cpd) sont sous-représentées dans les trois modèles.

5.1.4. Scores globaux

Une plus grande résolution améliore généralement tous les scores du niveau d'eau de marée pour 2021 présentés dans le tableau 11, pour toutes les stations communes à deux ou trois domaines de modèle. L'erreur quadratique moyenne centrée (CRMSE) est en moyenne de 7,3 cm dans l'estuaire moyen (stations 3100, 3057 et 3424) pour le ESTL200, comparativement à 32,6 cm pour le SPCOG-E.

Une plus grande résolution améliore généralement les scores du niveau d'eau résiduel pour 2021 présentés dans le tableau 12. Les exceptions sont les scores légèrement meilleurs dans le ESTL500 par rapport au ESTL200 pour les stations 3057 (CRMSE, γ^2 et Pearson) et 3424 (γ^2). Pour la station 3057, la CRMSE est augmentée de 1,5 % pour le ESTL200 par rapport au ESTL500, la valeur de γ^2 est augmentée de 0,3 % pour le ESTL200 par rapport au ESTL500 et le coefficient de Pearson est réduit de 0,5 % pour le ESTL200 par rapport au ESTL500.

Le tableau 13 présente les scores pour le niveau d'eau total. Une plus grande résolution améliore tous les scores (biais, CRMSE, γ^2 et Pearson) pour 2021, pour toutes les stations communes à deux ou trois domaines de modèle. La CRMSE dans l'estuaire moyen (stations 3100, 3057 et 3424) est en moyenne de 14,7 cm pour le ESTL200, de 21,5 cm pour le ESTL500 et de 35,4 cm pour le SPCOG-E.

La figure 29 présente un résumé de la stabilité temporelle des scores du niveau d'eau pour chaque station et chaque modèle : chaque point représente un score annuel, pour un total de 6 points par station (2016-2021). Pour le niveau d'eau total (panneaux de gauche), le biais est représenté sur l'axe vertical et la CRMSE sur l'axe horizontal. Les panneaux de droite montrent la CRMSE avec marée sur l'axe vertical et la CRMSE sans marée sur l'axe horizontal. Chaque point représente un seul score annuel. Aucun score et aucune station n'affiche de différences significatives d'une année à l'autre.

5.1.5. Niveau d'eau des ondes de tempête

Sept tempêtes ont été choisies en fonction de leur impact (pression atmosphérique minimale) sur la zone des modèles du Saint-Laurent. Elles sont répertoriées dans le tableau 14. Dans le tableau 15, nous observons qu'une plus grande résolution améliore les trois scores (CRMSE, γ^2 et Pearson) à toutes les stations communes à deux ou trois modèles. Une série chronologique de quatre jours sur les niveaux d'eau résiduel est présentée pour les sept tempêtes pour la station 2985 à la figure 30, pour la station 3057 à la figure 31, pour la station 3100 à la figure 32 et pour la station 3248 à la figure 33. L'onde de tempête est clairement visible dans les trois modèles. Les scores des stations en amont (3300 à 3360) sont plus faibles, en particulier ceux des stations 3345 à 3360. Cela correspond à un important décalage de la phase de la marée à ces stations pour la composante M2 (tableau 5). L'influence de l'onde de tempête n'est pas propagée aussi bien qu'à d'autres stations, tout comme l'onde de marée. La révision du frottement sur le fond et de la bathymétrie de cette zone amont en vue d'améliorer les marées pourrait également améliorer cet élément. Un processus périodique d'inondation et d'assèchement (schème couvrant-découvrant) pourrait également améliorer ces scores.

5.2. COURANTS

5.2.1. ADCP horizontaux

Deux ADCP horizontaux ont été déployés de chaque côté du Saint-Laurent, un à Lévis et un à Québec, pendant environ deux mois en 2020 et en 2021 (figure 34 et figure 35). Les données de Québec pour 2020 sont inutilisables en raison de problèmes techniques liés à l'appareils.

La figure 36 (Lévis) et la figure 37 (Québec) montrent des nuages de points des courants et l'axe principal de la variance pour l'année 2021 pour les observations, le ESTL500 et le ESTL200. Comme l'axe principal contient 99,7 % (Lévis) et 99,1 % (Québec) de la variance, seuls les courants sur cet axe sont présentés ici. Cet axe correspond au courant le long du rivage, et des valeurs positives représentent des courants orientés approximativement vers le nord (direction vers l'aval). Les résultats du courant total et du courant résiduel le long de la rive de Lévis sont illustrés à la figure 38 (2020) et à la figure 39 (2021). Une plus grande résolution de 500 à 200 m produit une nette amélioration du courant total le long du rivage, visible sur les panneaux 1 et 3, ce que corroborent tous les scores totaux du courant de surface (CRMSE, χ^2 et Pearson) dans le tableau 16. La CRMSE est réduite de 54 % (2020) et de 59 % (2021) lorsque la résolution passe de 500 m à 200 m. L'amplitude du signal est trop faible pour le ESTL500 et le ESTL200 sur le panneau 1 de la figure 38. Cependant, cette erreur est plus faible pour le ESTL200, ce qui est corroborée dans le tableau 19 : l'erreur sur l'amplitude de M2, la principale composante des marées, passe de -46,2 cm à -14,6 cm (2020) et de -41,9 cm à -11,8 cm si l'on augmente la résolution de 500 m à 200 m. Les scores des courants de surface résiduels (tableau 17) sont légèrement moins bons pour le ESTL200 en 2020 que pour le ESTL500 (la CRMSE augmente de 3 % pour le ESTL200), mais augmentent en 2021 (la CRMSE diminue de 1,9 % pour le ESTL200).

Les résultats du courant total et du courant résiduel le long du rivage à Québec sont présentés à la figure 40. Une plus grande résolution de 500 à 200 m produit une nette amélioration du courant total le long du rivage, visible sur les panneaux 1 et 3, ce que corroborent tous les scores totaux du courant de surface (CRMSE, χ^2 et Pearson) dans le tableau 16. La CRMSE est réduite de 54,7 % lorsque la résolution passe de 500 m à 200 m. L'amplitude du signal est trop forte pour les deux modèles, contrairement aux résultats à Lévis. Cependant, cette erreur est plus faible pour le ESTL200, ce que corrobore le tableau 19 : l'erreur sur l'amplitude de M2 passe de +31 cm à +12 cm si l'on augmente la résolution de 500 m à 200 m. La CRMSE moyenne aux deux stations et pour les deux années donne 43,8 cm/s pour le ESTL500 et 19,4 cm/s pour le ESTL200.

En ce qui concerne strictement les marées, tous les scores sont améliorés (tableau 18) et toutes les erreurs de marée sont réduites avec une plus grande résolution (tableau 19), à l'exception de N2 et de Q1 pour l'année 2021. Les ellipses de marée illustrées à la figure 41, à la figure 42 et à la figure 43 montrent que la composante M2 est la composante la plus importante et est bien alignée à Lévis, mais que l'axe principal de l'ellipse M2 à Québec présente un angle par rapport aux observations.

Les courants résiduels sur le rivage à Lévis sont trop faibles (figure 38 et figure 39, panneau 2) et trop forts à Québec (figure 40, panneau 2). Cette asymétrie est accentuée dans le ESTL500. Une hypothèse est que la résolution horizontale est insuffisante pour résoudre correctement cette asymétrie. Il faudra étudier davantage cette hypothèse.

Une particularité observée à Lévis et à Québec dans les courants totaux le long du rivage (modélisés et observés) est que les signaux sont tronqués pendant la marée descendante. Cette asymétrie des marées est signalée dans la documentation pour les eaux peu profondes et les systèmes estuariens lorsque l'amplitude de la composante de marée quart-diurne M4 est grande. Le signal observé des ADCP horizontaux de Québec et de Lévis est semblable au signal de la figure 1 dans (Aubrey and Speer 1985), pour un système où la marée est dominée par le jusant.

5.2.2. Courantomètres

Aucun courantomètre n'était disponible dans les domaines des modèles du Saint-Laurent au moment de la rédaction de ce rapport. Peut-être que des données existent, et des recherches seront menées à ce sujet à l'avenir.

5.2.3. ADCP

Les seules données d'ADCP disponibles pour les modèles de l'estuaire du Saint-Laurent étaient celles de la bouée IML-4, à l'extérieur du domaine du ESTL200. L'examen des données pluriannuelles a permis de relever des écarts importants d'une année à l'autre. Des discussions avec les techniciens responsables du fonctionnement des appareils à la bouée IML-4 ont révélé que des problèmes de compas avaient été signalés pour les années postérieures à 2016 et que la déclinaison magnétique n'avait pas été prise en compte pour certaines de ces années. C'est pourquoi seule l'année 2016 est présentée ici. En 2016, deux ADCP de la marque RDI ont été fixés à la bouée IML-4, l'un à 300 kHz (nommé 11947) jusqu'à une profondeur de 100 mètres et l'autre à 1 200 kHz (nommé 10749) pour les dix mètres supérieurs.

Les figure 44 à figure 47 illustrent les ellipses de marée pour les composantes M2, K1, N2, S2, O1, P1, Q1 et K2 à 1,5 m, 20 m, 50 m et 100 m, respectivement. À une profondeur de 1,5 mètre (figure 44), les ellipses de marée du ESTL500 sont plus proches des observations pour les composantes M2 et S2 et les deux modèles sont semblables pour les autres composantes. À une profondeur de 20 mètres (figure 45), le ESTL500 est plus proche des observations pour la composante N2 et les deux modèles sont similaires pour les autres composantes, avec des angles de l'axe principal de l'ellipse différents pour les composantes M2 et S2. À une profondeur de 50 mètres (figure 46), l'amplitude de l'ellipse du SPCOG-E est trop grande pour les composantes M2, N2 et S2 et la forme de l'ellipse du ESTL500 est plus proche des observations pour ces composantes. À une profondeur de 100 mètres, les deux modèles sont similaires, le SPCOG-E est mieux aligné pour l'amplitude de la composante S2 et le ESTL500 est plus proche des observations pour la composante N2. Étant donné que la composante M2 est la plus importante à toutes les profondeurs, seules les ellipses de marée de cette composante pour toute la couverture verticale de l'instrument sont tracées à la figure 48 et à la figure 49.

La figure 48 représente les ellipses de marée pour les 10 premiers mètres, selon les observations de l'ADCP à la fréquence la plus élevée (10749). L'amplitude des ellipses du SPCOG-E est trop faible et la direction de la rotation est inversée par rapport aux observations et au ESTL500.

La figure 49 montre les ellipses de marée pour les 100 premiers mètres, selon les observations de l'ADCP à la fréquence la plus basse (11947). Les ellipses du ESTL500 sont plus semblables aux observations que celles du SPCOG-E : les ellipses du SPCOG-E sont trop petites et tournent dans le sens inverse pour les 20 premiers mètres, et trop grandes entre 30 mètres environ et 80 mètres.

Sur la figure 50, nous voyons que la vitesse moyenne, l'amplitude de la corrélation vectorielle totale et de marée pour les 10 premiers mètres sont améliorées avec le ESTL500 pour le dispositif 10749. En effet, tous les scores (biais, RMSE, χ^2 et ampleur de la corrélation vectorielle) sauf les degrés de corrélation vectorielle dans le tableau 20 et le tableau 22 pour l'appareil 10749 sont améliorés. L'ampleur de la corrélation vectorielle des courants résiduels est meilleure pour le ESTL500 de la surface à 7,5 m, et pour le SPCOG-E de 7,5 m à 10 m. Il en va de même pour tous les scores sur les courants résiduels dans le tableau 21, à deux exceptions près : les degrés de la corrélation vectorielle sont améliorés pour le SPCOG-E et la RMSE est améliorée pour le ESTL500 à toutes les profondeurs (de 1,5 m à 10 m).

Sur la figure 51, nous voyons que la corrélation vectorielle pour les 30 premiers mètres en ce qui concerne les courants totaux et pour les 50 premiers mètres en ce qui concerne les courants de marée est améliorée pour le ESTL500 pour le dispositif 11947, ce qui se reflète dans les scores de la RMSE, de la χ^2 et de la corrélation vectorielle dans le tableau 20 (courants totaux) et les scores de la χ^2 et de la RMSE dans le tableau 22 (courants de marée). La corrélation vectorielle du courant résiduel est meilleure dans le SPCOG-E, sauf à la surface (7,5 m) où la corrélation vectorielle et la RMSE sont améliorées dans le ESTL500 (tableau 21), ce qui concorde avec les résultats obtenus de l'instrument 10749.

La figure 52 représente une courte série chronologique (1 semaine) des courants totaux u et v à une profondeur de 1,5 mètre, tirée de l'ADCP à la plus haute fréquence à la bouée IML-4 en 2016 pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500). La forme générale du signal est mieux reproduite par le ESTL500 pour cette série chronologique.

Les spectres de rotation du courant total à 10 m sont illustrés sur la figure 53. Les deux modèles sont comparables aux observations à plus faible fréquence, et le ESTL500 est plus proche des observations à des fréquences plus élevées que semi-diurne, tant dans le sens horaire que dans le sens antihoraire. Les mêmes spectres de rotation, mais à 50 m, sont illustrés à la figure 54. À cette profondeur, le ESTL500 est plus proche des observations à presque toutes les fréquences.

En général, le ESTL500 affiche une meilleure performance pour les 30 premiers mètres pour les courants totaux et le SPCOG-E affiche une meilleure performance de 30 m jusqu'au fond pour les courants totaux à la station de la bouée IML-4.

5.2.4. Transects d'ADCP

Aucun transect des ADCP montés sur un navire n'était disponible dans les domaines des modèles de l'estuaire du Saint-Laurent. Peut-être que des données existent, et des recherches seront menées à ce sujet à l'avenir.

5.2.5. Courants de surface

Des instantanés des courants de surface à la marée descendante et à la marée montante sont représentés à la figure 55 et à la figure 56, respectivement, pour le SPCOG-E et le ESTL200, correspondant à la basse mer et aux hautes eaux. L'amplitude du courant de surface est représentée par l'échelle de couleur sur l'arrière-plan des flèches blanches. Des structures de courant plus importantes sont apparentes dans le ESTL200. Certaines de ces structures ajoutées peuvent certainement être attribuées à la résolution plus haute de la bathymétrie, par exemple l'absence de certaines îles dans le SPCOG-E. La contribution du fjord du Saguenay est clairement visible sur le panneau de droite (ESTL200) de la figure 55, alors qu'elle est presque inexistante dans le SPCOG-E. De plus, un tourbillon se formant à droite du courant provenant du fjord du Saguenay est présent dans le ESTL200, mais pas dans le SPCOG-E. Les courants de marée baroclines résultant de la stratification de l'estuaire moyen du Saint-Laurent, qui est presque inexistante dans le SPCOG-E, pourraient également expliquer certaines différences, mais d'autres études sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

La figure 57 et la figure 58 présentent le même instantané des courants de surface pour le SPCOG-E et le ESTL200 sur les panneaux 1 et 2 que la figure 55 et la figure 56, mais cette fois sur la grille native du ESTL200. Les courants de surface du SPCOG-E sont pivotés et interpolés sur la grille native du ESTL200, et une seule cellule sur 49 est indiquée sur la figure pour le ESTL200. Sur le panneau du bas, les courants correspondants obtenus de l'Atlas des Courants de Marée pour l'estuaire du Saint-Laurent (Service Hydrographique du Canada 1997) sont illustrés. Ces courants de marée sont calculés à partir d'un modèle antérieur nommé STLE400

(Saucier *et al.* 1999; Saucier et Chassé 2000). Ce modèle a été étalonné et validé pour les courants de surface avec 51 ADCP et plus de 600 bouées dérivantes de surface. Plus récemment, un nouvel ensemble de bouées dérivantes (St-Onge-Drouin *et al.* 2014) a été utilisé pour la validation de la dérive de surface. Cet atlas des courants de marées est utilisé par les navigateurs depuis 20 ans dans l'estuaire moyen et l'estuaire fluvial du Saint-Laurent. Ce ne sont pas des observations, mais c'est la meilleure estimation actuelle des courants de marée en surface dans cette région. Cependant, il est important de garder à l'esprit que cet atlas des marées ne tient compte que des marées. Il n'y a aucun forçage atmosphérique et le ruissellement du fleuve Saint-Laurent correspond au ruissellement moyen du mois de juillet. Afin de permettre des comparaisons avec les flèches de l'atlas des courants de marée, l'échelle de couleur associée à l'amplitude des courants de surface modélisés est la même que celle utilisée dans l'atlas (de 0 à 7 nœuds) et la couleur est directement sur la flèche. Les courants de surface de l'atlas sont regroupés par trois flèches, chacune correspondant à une tranche de 20 minutes de l'heure. La première (la plus à gauche) correspond au moment des résultats des modèles ESTL200 et SPCOG-E.

Une remarque générale sur la figure 57 et la figure 58 est que l'amplitude des courants de surface modélisés du ESTL200 et du SPCOG-E est plus forte que dans l'atlas, ce qui peut être attribué à plusieurs facteurs : premièrement, l'épaisseur de la couche de surface (l'épaisseur de la première couche du modèle ayant servi à produire l'atlas est de 5 m, comparativement à 3 m et à 1 m pour le ESTL200 et le SPCOG-E); deuxièmement, l'intensité de la circulation barocline, différente en raison des différents apports d'eau douce (2017 est la deuxième crue printanière maximale la plus forte du ruissellement du Saint-Laurent dans les 60 dernières années); troisièmement, les vents ne sont pas pris en compte dans l'atlas; et finalement les résultats des marées diffèrent d'un modèle à l'autre (amplitude et phase des différentes composantes). Sur la figure 57 (marée descendante), les principales différences entre le ESTL200 et le SPCOG-E sont, premièrement, l'impact de l'île Rouge (au milieu de l'estuaire, au sud de l'embouchure du fjord du Saguenay) divisant le courant de jusant en deux et créant une recirculation en aval de l'île et, deuxièmement, l'impact des courants de surface du fjord du Saguenay. Ces deux structures sont semblables entre le ESTL200 et l'atlas des marées. Sur la figure 58 (marée descendante), les structures fines des courants de surface sont mieux représentées dans le ESTL200 que dans le SPCOG-E.

En général, pendant la marée descendante et la marée montante, les courants de surface du ESTL200 correspondent mieux à l'atlas des courants de marée que les courants de surface du SPCOG-E.

5.3. PROPRIÉTÉS DE L'EAU

5.3.1. Température de surface de la mer

Aucune donnée sur la température de surface de la mer n'était disponible dans les domaines du modèle du Saint-Laurent. Certaines données pourraient être trouvées (à la bouée IML-4, par exemple) et prises en compte à l'avenir. Cependant, nous présentons plusieurs sondes CTD ancrées près de la surface dans la section suivante.

5.3.2. Sondes CTD ancrées

Des capteurs de température et de salinité sont fixés à tous les marégraphes actifs décrits à la section 5.1. Cependant, les données sur la salinité sont inutilisables pour la plupart des stations en amont dans l'estuaire fluvial. En raison du nombre de stations et d'années disponibles, nous ne présentons ici que les figures et les tableaux pour l'année 2017. Nous avons choisi l'année 2017 parce que des données étaient disponibles pour toutes les stations cette année-là,

ce qui n'est pas toujours le cas. La station 3057, pour laquelle la température et la salinité sont présentes pour les années 2016 à 2019, et la station 3100 sont présentées pour chaque année disponible (seulement dans les tableau 24 à tableau 26). Ces deux stations sont les seules qui sont communes aux trois domaines et dont les données sont pluriannuelles.

La station la plus à l'est, 2985 (figure 59), est commune au SPCOG-E et au ESTL500 seulement. Le SPCOG-E présente de meilleurs scores (biais, CRMSE, γ^2 et Pearson) pour la salinité et la température (tableau 23).

La station 3057 (figure 60) est commune aux trois modèles. Le SPCOG-E est trop chaud d'avril à juillet, et le ESTL200 affiche trois maximum de température entre août et octobre. Un biais de salinité négatif dans le SPCOG-E est persistant tout au long de l'année, avec des valeurs comprises entre -20 et -5 psu. Tous les scores de température sont considérablement améliorés dans le ESTL500 et le ESTL200 par rapport au SPCOG-E pour cette station (tableau 23). Les scores du biais de salinité et les coefficients de corrélation de Pearson sont également améliorés, mais la CRMSE et la γ^2 sont meilleures pour le SPCOG-E (γ^2 dépasse 1 pour le ESTL500 et le ESTL200, ce qui signifie que la variance de l'erreur dépasse celle des observations). Cela s'explique par la faible variabilité du signal de salinité du SPCOG-E. En effet, comme illustré par le panneau 2 de la figure 60, la variabilité du signal de salinité dans le SPCOG-E est plus faible que dans le ESTL500 et le ESTL200; ce qui est prévisible puisque le mélange est plus important dans cette zone dans le SPCOG-E (le mélange vertical a été augmenté). Les masses d'eau sont pour la plupart uniformes et non stratifiées dans la zone de l'estuaire moyen dans le SPCOG-E et, par conséquent, l'effet des marées sur la variation de la salinité à la station 3057 est réduit au minimum. Cette faible variabilité induite par l'augmentation du mélange dans l'estuaire moyen dans le SPCOG-E donne de meilleurs résultats pour la CRMSE et γ^2 de la salinité comparativement au ESTL200 et au ESTL500. Ces valeurs élevées de la CRMSE pour le ESTL200 et le ESTL500 à la station 3057 signifient probablement que le gradient de salinité horizontal est trop élevé dans cette zone. En effet, un examen de la salinité à partir des données du navire Oceanex Connaigra présentées sur la figure 75 montre que la variation de la salinité au point de repère de L'Île-aux-Coudres (dans un rayon d'environ 10 km de la station 3057) est plus forte pour le ESTL200 et le ESTL500 par rapport aux observations. Dans les observations, la région de forte variation de la salinité se trouve en aval de L'Île-aux-Coudres (et de la station 3057).

La station 3100 (figure 61) est également commune aux trois modèles. Ici, le ESTL500 et le ESTL200 donnent des résultats similaires pour la température et le SPCOG-E présente un biais chaud entre mars et juin, et un biais froid entre juin et décembre. Ce biais est dû à une mauvaise climatologie de la température utilisée dans le couplage du modèle r1d pour le SPCOG-E, qui est connecté à proximité de cette station. De plus, cette climatologie n'est pas interpolée dans le temps, ce qui donne la forme en escalier du signal de température dans le SPCOG-E. Tous les scores sont améliorés dans le ESTL500 et le ESTL200, et le ESTL200 est légèrement meilleur que le ESTL500 pour la CRMSE, γ^2 et Pearson (tableau 23). La sonde de salinité était déficiente à cette station.

La station 3248 (figure 62) est commune au ESTL500 et au ESTL200, et les scores sont semblables entre les deux modèles. La CRMSE est légèrement meilleure pour le ESTL200 (tableau 23).

Les stations 3300, 3335, 3353 et 3600 sont présentées aux figure 63 à figure 66. Elles affichent toutes un biais froid plus marqué en octobre et en décembre (~-2,5 degrés). Cela est peut-être dû à l'utilisation d'une climatologie pour la température du Saint-Laurent.

Un examen des scores annuels de la température pour la station 3057 (tableau 24) révèle que tous les scores sont améliorés dans le ESTL500 et le ESTL200 par rapport au SPCOG-E et

aucune tendance de biais d'une année à l'autre n'est observée dans les modèles. Le biais de salinité (tableau 25) est amélioré dans les deux modèles à plus haute résolution pour chaque année et aucune tendance n'est observée. Les scores de la CRMSE et de γ^2 sont meilleurs dans le SPCOG-E pour les raisons décrites ci-dessus (faible variabilité du signal de salinité dans le SPCOG-E à cette station). Le score de γ^2 dépasse 1 pour le ESTL500 et le ESTL200, ce qui signifie que la variance de l'erreur dépasse celle des observations.

Une plus grande résolution améliore tous les scores de la température à la station 3100 pour toutes les années, à deux exceptions près (le biais pour l'année 2020 est plus faible pour le ESTL500 que pour le ESTL200). Aucune tendance n'est observée dans le biais d'une année à l'autre.

5.3.3. Profils CTD

Les cartes des profils CTD et des polygones définis sont illustrées à la figure 67 et à la figure 68. Seuls les profils communs aux trois domaines ont été utilisés pour l'analyse comparative et aucun profil aberrant n'a été supprimé. La valeur initiale par défaut du seuil de tolérance, de 3 x l'écart type dans un polygone particulier, supprimait tous les profils CTD dans l'estuaire moyen en raison de l'écart type important dans le SPCOG-E. Les biais et l'écart type des modèles sont présentés sur les figures dont il est question dans cette sous-section.

Dans la zone nommée All_200 (figure 69), qui comprend toutes les profils CTD du domaine du ESTL200 communes aux trois domaines, c'est le ESTL500 qui présente le biais de température le plus faible dans toute la colonne d'eau. Les températures de surface (de 0 à 10 m) sont plus froides dans le SPCOG-E. La salinité est comparable entre le ESTL500 et le ESTL200.

Dans la zone nommée Moyen (figure 70), qui comprend toutes les sondes CTD dans l'estuaire moyen communes aux trois domaines, le ESTL500 présente un biais plus faible dans toute la colonne d'eau et le SPCOG-E affiche un biais plus froid pour les 10 m supérieurs et un biais plus chaud de 10 m jusqu'au fond. La performance des deux modèles à plus haute résolution est similaire pour la salinité, mais le ESTL200 comporte un biais plus salé de 10 m jusqu'au fond. Les résultats du SPCOG-E présentent un fort biais doux à toutes les profondeurs dans cette zone en raison de l'augmentation du mélange à l'ouest de Tadoussac pour ce modèle.

Dans la zone appelée Sag (figure 71), qui comprend toutes les profils CTD dans le fjord du Saguenay communs aux trois domaines, le ESTL500 présente également un biais plus faible pour la température et les 10 premiers mètres sont trop froids dans le SPCOG-E. Pour la salinité, c'est le ESTL200 qui affiche le biais le plus faible en surface, le SPCOG-E est trop salé et le ESTL500 est trop doux. La figure 72 illustre les biais et l'écart type pour le ESTL200 seulement, qui est le seul domaine couvrant entièrement le fjord du Saguenay. Il convient de noter que le nombre de profils CTD est plus élevé (environ six fois plus), parce que la figure précédente ne comprend que les profils CTD communs aux trois modèles et que le SPCOG-E n'inclut qu'une petite partie du fjord du Saguenay. Un biais positif de salinité d'environ 2 psu et un biais positif de température sont observés dans toute la colonne d'eau, à l'exception des quelques premiers mètres pour la température.

Dans la zone nommée Maritim (figure 73), qui comprend tous les profils CTD dans l'estuaire maritime communs au SPCOG-E et au ESTL500, le biais est généralement plus faible dans le SPCOG-E que dans ESTL500 pour la salinité et la température. Encore une fois, cela pourrait s'expliquer par l'augmentation du mélange dans le SPCOG-E en amont de Tadoussac, dont l'objectif était de mieux reproduire les masses d'eau en aval de Tadoussac, dans l'estuaire maritime.

Commentaire général sur toutes les figures de CTD : l'augmentation du mélange à l'ouest de Tadoussac dans le SPCOG-E a été ajoutée lorsque le SPCOG-E a migré de la version 1 à la version 2. Le biais de salinité observé dans les profils CTD du ESTL200 et du ESTL500 a augmenté d'une valeur d'environ 1 dans toute la colonne d'eau lorsqu'on a utilisé le SPCOG-E v2 au lieu du SPCOG-E v1. La modification du SPCOG-E explique au moins une partie du biais de salinité pour le ESTL500 et le ESTL200 que l'on observe sur les figures des profils CTD.

5.3.4. Thermosalinographes installés sur un navire

L'*Oceanex Connaigra* est un navire reliant Montréal à St. John's (Terre-Neuve) plusieurs fois par année. Les trajectoires du navire pour l'année 2018 sont indiquées à la figure 74. Le navire est muni d'un capteur de salinité et de température, à une profondeur moyenne de 8 m. Seule l'année 2018 est indiquée sur les figures, mais toutes les années (2016 à 2022) sont compilées dans le tableau des scores.

La figure 75 indique la salinité observée et modélisée dans la première colonne, ainsi que la différence entre le modèle et les observations dans la deuxième colonne. L'examen des trois différents modèles révèle que le cycle saisonnier et la variation spatiale sont assez bien reproduits par les modèles de 200 m et de 500 m, mais que le SPCOG-E ne les reflète pas en raison de l'augmentation du mélange vertical en amont de Tadoussac. Le ESTL200 et le ESTL500 font apparaître un biais doux en amont de L'Île-aux-Coudres et un biais plus salé entre L'Île-aux-Coudres et Tadoussac. Tous les scores (biais, CRMSE et RMSE) sont améliorés dans le ESTL200 et le ESTL500 par rapport au SPCOG-E pour la salinité (tableau 27), chaque année. Le biais est plus faible dans le ESTL500 (de -0,455 à 0,675 pour chacune des années et 0,106 en moyenne de 2016 à 2022) comparativement au ESTL200 (de 0,382 à 1,493 pour chacune des années et 0,959 en moyenne de 2016 à 2022), peut-être en raison de la résolution verticale plus élevée (~1 m) dans le ESTL500 par rapport au ESTL200 (~3 m). Le biais dans le SPCOG-E est de -5,759 psu de 2016 à 2022, mais il est plus asymétrique dans l'espace que les deux modèles à plus haute résolution : il est négatif à l'ouest de Tadoussac et positif à l'est de Tadoussac. Un biais calculé séparément pour ces deux régions donnerait des valeurs plus élevées pour le SPCOG-E, comme les montres la figure 75.

La figure 76 représente la température observée et modélisée dans la première colonne, ainsi que les différences dans la deuxième colonne. Les différences sont plus importantes dans le SPCOG-E : un biais chaud existe en amont de L'Île-aux-Coudres de mars à juillet, pour devenir un biais froid de juillet à la fin octobre (moment de la fin des données). En général, il existe un biais chaud entre L'Île-aux-Coudres et Tadoussac, et le ESTL500 donne de meilleurs résultats globaux. Le biais de température dans le tableau 27 est réduit dans le ESTL500 par rapport au ESTL200, peut-être à nouveau en raison de la résolution verticale des couches de surface (~1 m pour le ESTL500 et ~3 m pour le ESTL200). Les biais de température sont plus faibles dans le SPCOG-E de 2016 à 2022 par rapport au ESTL200; cependant ce biais (figure 76) est asymétrique dans le temps et l'espace dans le SPCOG-E, comme mentionné ci-dessus. Les scores de la CRMSE et de la RMSE sont améliorés pour le ESTL500 et le ESTL200 par rapport au SPCOG-E pour toutes les années.

5.4. DÉRIVE

Deux ensembles de données étaient disponibles dans les domaines des modèles de l'estuaire du Saint-Laurent. Le premier provient de l'année 2020 du projet Tracer Release eXperiment (TReX) dans le golfe du Saint-Laurent, lorsque des bouées dérivantes ont été déployées dans l'estuaire maritime (et non dans le domaine du ESTL200). Au total, nous avons utilisé 232 trajectoires de bouées dérivantes de cette expérience pour évaluer la capacité de dérive

des modèles dans cette zone. Ces trajectoires observées sont illustrées à la figure 77. Les indices de comparaison de Molcard moyens sont semblables pour les modèles du ESTL500 et le SPCOG-E (figure 79 et tableau 28). Les valeurs de l'indice de comparaison de Molcard sont plus élevées pendant les six premières heures dans le ESTL500 et pendant le reste de la période de 24 heures dans le SPCOG-E. La distance moyenne de séparation (figure 80) reflète la même situation.

Le deuxième ensemble de données des bouées dérivantes compte seulement quatre trajectoires observées près de Saint-François, à l'extrémité est de l'île d'Orléans (figure 78), qui ont été recueillies par la Société d'intervention maritime, est du Canada (ECRC-SIMEC). La durée de la dérive est plus courte et seules les quatre premières heures de l'indice de comparaison de Molcard et la distance moyenne de séparation ont été calculées. Les figure 81 et figure 82 montrent que l'indice de comparaison de Molcard et la distance moyenne de séparation sont considérablement améliorés pour le ESTL500 et le ESTL200 par rapport au SPCOG-E : +35 % après 4 heures pour l'indice de comparaison de Molcard en passant du SPCOG-E au ESTL200, et la distance moyenne de séparation est réduite de 42,4 % (de 4,03 km à 2,32 km) (tableau 29). Le ESTL500 et le ESTL200 donnent des résultats similaires.

6. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES PRÉVISIONS

L'évaluation des prévisions a porté sur la période du 1^{er} décembre 2021 au 1^{er} février 2022. Des prévisions sur 48 heures ont été produites chaque jour, chaque prévision démarrant à 0 h durant cette période.

6.1. NIVEAU D'EAU RÉSIDUEL

Nous présentons les stations de mesure du niveau d'eau communes à deux modèles ou plus, soit cinq stations (figure 83 à figure 87), sur lesquelles nous voyons le biais et la CRMSE entre les modèles et les observations. Pour la station 2985 (figure 83), commune uniquement au ESTL500 et au SPCOG-E, le biais est légèrement plus faible dans le ESTL500 comparativement au SPCOG-E et aucune tendance à la hausse n'est visible sur les 48 heures. La CRMSE est légèrement plus faible dans le ESTL500 et une faible tendance à la hausse est observée sur les 48 heures. Le principal facteur expliquant cette tendance (et celle des figures suivantes) est l'inexactitude des prévisions atmosphériques (vents et, dans une mesure moindre, pression). Pour la station 3424 sur la figure 84, le biais est plus fort dans le SPCOG-E : environ -4 cm comparativement à environ -2 cm dans le ESTL500 et le ESTL200. La CRMSE est semblable pour les trois modèles, avec une valeur légèrement plus petite dans le ESTL200 que dans les deux modèles plus grossiers. Pour la station 3057 (figure 85), le biais est similaire entre le ESTL500 et le ESTL200 (environ -3 cm), et plus important pour le SPCOG-E (environ +25 cm). La CRMSE est comparable pour les trois modèles. Des résultats similaires sont observés pour le biais à la station 3100 (figure 86) : le ESTL500 et le ESTL200 sont similaires (environ -5 cm) et plus grands pour le SPCOG-E (environ +23 cm). La CRMSE est également similaire dans le ESTL200 et le ESTL500 (~12 cm), et plus grande dans le SPCOG-E (~15 cm). Pour la station 3248, le biais est autour de zéro dans le ESTL200 et d'environ +35 cm dans le ESTL500. La CRMSE est plus faible dans le ESTL200 (~13 cm) que dans le ESTL500 (~15 cm).

7. SOMMAIRE

Les résultats du modèle du SPCOG-E, du ESTL500 et du ESTL200 ont été comparés aux indicateurs de niveau d'eau (y compris pendant les ondes de tempête), aux ADCP horizontaux et à niveaux multiples, à l'atlas des courants de marée, aux sondes CTD ancrées, aux profils

CTD, aux thermosalinographes installés sur un navire et aux trajectoires des bouées dérivantes. La comparaison des résultats des modèles aux observations montre que la performance de modélisation du ESTL200 est généralement meilleure pour toutes les observations utilisées par rapport au SPCOG-E dans l'estuaire moyen. Nous observons également des améliorations en passant de la résolution à 500 m à la résolution à 200 m, sauf pour les masses d'eau, où le ESTL500 affiche un biais plus faible de température et de salinité. L'évaluation des prévisions pour le niveau d'eau résiduel n'a révélé aucune tendance du biais dans les résultats des prévisions sur 48 heures.

8. CONSTATATIONS PRINCIPALES

- La connexion avec le modèle r1d entraîne une hausse du niveau d'eau moyen pour le SPCOG-E et le ESTL500 (environ +31 cm). C'est le contraire pour le ESTL200 près de Trois-Rivières (environ -30 cm).
- Les scores des niveaux d'eau de marée sont améliorés à toutes les stations communes dans le ESTL200 et l'erreur de marée M2 est réduite dans le ESTL200 à toutes les stations communes. La CRMSE est en moyenne de 7,3 cm dans l'estuaire moyen pour le ESTL200, comparativement à 32,6 cm pour le SPCOG-E.
- Une plus grande résolution améliore tous les scores du niveau d'eau total, partout. La CRMSE dans l'estuaire moyen est de 14,7 cm pour le ESTL200, de 21,5 cm pour le ESTL500 et de 35,4 cm pour le SPCOG-E.
- Les ondes de tempête sont clairement visibles dans les trois modèles et une plus grande résolution horizontale des modèles améliore les scores.
- Lorsqu'on compare les courants de surface avec ceux des ADCP horizontaux de Québec et de Lévis, la CRMSE est en moyenne de 43,8 cm/s pour le ESTL500 et de 19,4 cm/s pour le ESTL200. Le signal est asymétrique en fonction des marées (dans les observations et les résultats), probablement en raison d'une contribution significative de la composante M4.
- Pour les courants totaux à la station de la bouée IML-4, le ESTL500 affiche une meilleure performance pour les 30 premiers mètres et le SPCOG-E, une meilleure performance de 30 m jusqu'au fond.
- La comparaison aux profils des sondes CTD ancrées, aux thermosalinographes installés sur un navire et aux profils CTD souligne la forte amélioration du ESTL200 et du ESTL500 par rapport au SPCOG-E dans l'estuaire moyen, en partie en raison de l'augmentation du mélange en amont de Tadoussac dans le SPCOG-E.
- L'évaluation des prévisions montre qu'aucune tendance n'est visible dans les biais de niveau d'eau résiduel pour les périodes de 48 heures et une légère tendance à la hausse de la CRMSE est observée sur ces périodes.

9. REMERCIEMENTS

Merci à Denis Lefavre pour son soutien continu et toutes les discussions intéressantes. Merci à tous les modélisateurs des ports du Plan de protection des océans : Rachel Horwitz, Michael Dunphy, Stephanie Taylor, Adam Drozdowski, Maxim Krassovski et Hauke Blanken. Merci à François Roy, Greg Smith, Jean-Philippe Paquin et Frederic Dupont d'Environnement et Changement climatique Canada pour leur soutien à l'élaboration du modèle. Merci à Nancy Soontiens pour l'outil d'évaluation de la dérive et pour son aide avec les données sur la dérive dans le Saint-Laurent. Merci à Ji Lei pour son aide avec la suite Maestro. Merci à

Caroline Lafleur, Félix St-Pierre et Michel Rousseau pour la collecte et la recherche de données océaniques. Merci à Simon Senneville pour de nombreux échanges intéressants sur la modélisation numérique de l'estuaire du Saint-Laurent. Merci également à Pascal Matte, Pierre Levasseur (données des bouées dérivantes de la SIMEC), Peter Galbraith (données des thermosalinographes sur l'Océanex Connaigra), Alain D'Astous (données de sortie du STLT1061), André Godin (discussions significatives sur les systèmes de référence verticaux) et à tous les collègues qui ont recueilli des données dans l'estuaire du Saint-Laurent.

10. RÉFÉRENCES CITÉES

- Aubrey, D.G., and P.E. Speer. 1985. "A Study of Non-Linear Tidal Propagation in Shallow Inlet/Estuarine Systems Part I: Observations." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 21 (2): 185–205. [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(85\)90096-4](https://doi.org/10.1016/0272-7714(85)90096-4).
- 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).
- Dronkers, J. J. 1969. "Tidal Computations for Rivers, Coastal Areas, and Sea." *Journal of the Hydraulics Division* 95 (1): 29–78. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001941>.
- Dupont, F., S. Higginson, R. Bourdallé-Badie, Y. Lu, F. Roy, G. C. Smith, J.-F. Lemieux, G. Garric, and F. Davidson. 2015. "A High-Resolution Ocean and Sea-Ice Modelling System for the Arctic and North Atlantic Oceans." *Geoscientific Model Development* 8 (5): 1577–94. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1577-2015>.
- El-Sabh, Mohammed. 1988. "Physical Oceanography of the St. Lawrence Estuary." *Hydrodynamics of Estuaries, Vol. II, Estuarine Case Studies.*, 1988, CRC Press edition.

-
- El-Sabh, Mohammed I., and Tad. S. Murty. 1990. "Mathematical Modelling of Tides in the St. Lawrence Estuary." In *Oceanography of a Large-Scale Estuarine System*, edited by Mohammed I. El-Sabh and Norman Silverberg, 10–50. New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7534-4_2.
- Hourston, Roy A.S. 2021. *Surface Ocean Circulation Tracking Drifter Data from the Northeastern Pacific and Western Arctic Oceans, 2014-2020*. Sidney, B.C.: Fisheries and Oceans Canada = Pêches et Océans Canada.
- Kundu, Pijush K. 1976. "Ekman Veering Observed near the Ocean Bottom." *Journal of Physical Oceanography* 6 (2): 238–42. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1976\)006<0238:EVONTO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1976)006<0238:EVONTO>2.0.CO;2).
- Large, William George, and Stephen G. Yeager. 2004. "Diurnal to Decadal Global Forcing for Ocean and Sea-Ice Models: The Data Sets and Flux Climatologies." NCAR Technical Note NCAR/TN-460+STR. Boulder, CO: Climate and Global Dynamics Division: National Center for Atmospheric Research.
- Lefaivre, Denis, Alain D'Astous, and Pascal Matte. 2016. "Hindcast of Water Level and Flow in the St. Lawrence River Over the 2005–2012 Period." *Atmosphere-Ocean* 54 (3): 264–77. <https://doi.org/10.1080/07055900.2016.1168281>.
- Madec, Gurvan. 2016. *NEMO Ocean Engine*. Note Du Pole de Modelisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace 27. NEMO European Consortium.
- Milbrandt, Jason A., Stéphane Bélair, Manon Faucher, Marcel Vallée, Marco L. Carrera, and Anna Glazer. 2016. "The Pan-Canadian High Resolution (2.5 Km) Deterministic Prediction System." *Weather and Forecasting* 31 (6): 1791–1816. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0035.1>.
- Molcard, A., P.M. Poulain, P. Forget, A. Griffa, Y. Barbin, J. Gaggelli, J.C. De Maistre, and M. Rixen. 2009. "Comparison between VHF Radar Observations and Data from Drifter Clusters in the Gulf of La Spezia (Mediterranean Sea)." *Journal of Marine Systems* 78 (November): S79–89. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.01.012>.
- Muir, Langley Russel. 1981. "Internal tides in a partially mixed estuary." Phd Thesis, University of Southampton. <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/57080.pdf>.
- Neu, H. J. A. 1970. "A Study on Mixing and Circulation in the St. Lawrence Estuary up to 1964." *AOL REPORT 1970-9*, 1970.
- 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, et al. 2021a. "Coastal Ice Ocean Prediction System for the East Coast of Canada (CIOPS-E): Update from Version 1.5.0 to 2.0.0" Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction Tech. Note.
https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoe/product_guide/docs/tech_notes/technote_ciops-east-200_e.pdf.
- Paquin, Jean-Philippe, Gregory C. Smith, Frédéric Dupont, Sarah MacDermid, Yukie Hata, Oleksandr Huizy, Ji Lei, et al. 2021b. "Coastal Ice Ocean Prediction System for the West Coast of Canada (CIOPS-W), Update from Version 1.5.0 to 2.0.0." Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction Tech. Note.
https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoe/product_guide/docs/tech_notes/technote_ciops-west-200_e.pdf.
- Paquin, Jean-Philippe, Gregory C. Smith, François Roy, Frédéric 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.
- 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, FJ, J Chassé, M Couture, R Dorais, A D'astous, D Lefavre, and A Gosselin. 1999. "The Making of a Surface Current Atlas of the St. Lawrence Estuary, Canada." *WIT Transactions on the Built Environment* 43.
- 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>.
- Saucier, François J., François Roy, Simon Senneville, Gregory Smith, Denis Lefavre, Bruno Zakardjian, and Jean-François Dumais. 2009. "Modélisation de la circulation dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en réponse aux variations du débit d'eau douce et des vents." *Revue des sciences de l'eau* 22 (2): 159–76. <https://doi.org/10.7202/037480ar>.
- Service Hydrographique du Canada. 1997. "Atlas Des Courants de Marée: Estuaire Du Saint-Laurent, Du Cap de Bon-Désir à Trois-Rivières. Service Hydrographique Du Canada." Service Hydrographique du Canada.
- Silverberg, Norman, and Mohammed I. El-Sabh. 1990. "The St. Lawrence Estuary: Concluding Remarks." In *Oceanography of a Large-Scale Estuarine System*, edited by Mohammed I. El-Sabh and Norman Silverberg, 421–29. New York, NY: Springer New York.
https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7534-4_18.
-

-
- Simons, Rachel D., Stephen G. Monismith, Ladd E. Johnson, Gesche Winkler, and François J. Saucier. 2006. "Zooplankton Retention in the Estuarine Transition Zone of the St. Lawrence Estuary." *Limnology and Oceanography* 51 (6): 2621–31. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.6.2621>.
- 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>.
- St-Onge-Drouin, Simon, Gesche Winkler, Jean-François Dumais, and Simon Senneville. 2014. "Hydrodynamics and Spatial Separation between Two Clades of a Copepod Species Complex." *Journal of Marine Systems* 129 (January):334–42. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.07.014>.
- 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. Principaux paramètres de la configuration du ESTL200 et du ESTL500.

Paramètre	Grille externe (ESTL500)	Grille interne (ESTL200)
Dimensions de la grille, NX × NY × NZ	290 × 813 × 75	670 × 1640 × 36
Résolution horizontale, $\Delta X \times \Delta Y$	Environ 500 m	Environ 200 m
Résolution verticale	1 m à la surface, 26 m au fond	3 m à la surface, 20 m au fond
Pas de temps (barocline/barotrope)	30 s / 4,3 s	8 s / 1,6 s
Fréquence de mise à jour des limites ouvertes	1 h	1 h
Décalage de la hauteur de la surface de la mer aux conditions aux limites ouvertes	0 cm	0 cm
Conditions aux limites : Barotrope / barocline / traceurs	Flather/spécifié/spécifié	Flather/spécifié/spécifié
Source des composantes de marée aux limites	OTPS	OTPS
Composantes de marée forcées	M2, S2, N2, K2, K1, O1, Q1, P1, M4, Mf, Mm, Mn4, Ms4	M2, S2, N2, K2, K1, O1, Q1, P1, M4, Mf, Mm, Mn4, Ms4
Équation d'état	EOS-80	EOS-80
Surface libre	Volume variable	Volume variable
Pénétration de la lumière	Deux bandes	Deux bandes
Condition des limites latérales	Glissement partiel (shlat=1,2)	Glissement partiel (shlat=0,6)
Advection de la quantité de mouvement	Forme vectorielle, 20 pas de temps intermédiaires pour l'advection verticale	Forme vectorielle, 20 pas de temps intermédiaires pour l'advection verticale
Diffusion latérale de mouvement	Opérateur bilaplacien horizontal et méthode de Smagorinsky	Opérateur bilaplacien horizontal et méthode de Smagorinsky
Advection des traceurs	Dissipation de la variance totale (TVD), 20 pas de temps intermédiaires pour l'advection verticale	Dissipation de la variance totale (TVD), 20 pas de temps intermédiaires pour l'advection verticale

Paramètre	Grille externe (ESTL500)	Grille interne (ESTL200)
Diffusion latérale du traceur	Opérateur laplacien iso-neutre et méthode de Smagorinsky	Opérateur laplacien iso-neutre et méthode de Smagorinsky
Diffusion verticale	k-ε (GLS)	k-ε (GLS)
Frottement sur le fond	Couche logarithmique	Couche logarithmique, variable spatialement
Longueur de rugosité du fond	0,0001	0,0002

Tableau 2. Ruissellement climatologique mensuel (m^3/s).

Nom de la rivière	Longitude	Latitude	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Bécancour	-72,44	46,38	11	11	27	76	32	13	9	14	13	19	21	19
Batiscan	-72,23	46,52	37	36	47	231	265	105	72	67	61	95	94	63
Sainte-Anne	-72,20	46,55	16	16	19	96	151	58	41	40	41	57	48	26
Portneuf	-71,87	46,68	5	3	3	29	11	7	5	6	10	8	11	4
Jacques-Cartier	-71,74	46,67	22	22	23	86	189	83	58	55	55	68	50	33
Chaudière	-71,27	46,74	52	53	137	173	228	85	55	76	72	105	120	92
Etchemin	-71,23	46,76	11	14	21	84	43	21	17	18	16	25	27	20
Saint-Charles	-71,21	46,82	2	0	3	30	14	8	2	4	9	8	9	3
Rivière du Sud	-70,52	47,02	6	10	22	104	138	15	13	0	0	0	101	0
Malbaie	-70,06	47,66	12	10	11	46	124	56	32	25	23	30	26	15
Saguenay	-69,64	48,12	1090	1120	1130	1220	1390	1290	1180	1160	1160	1200	1160	1080
Portneuf	-69,03	48,66	19	16	16	70	244	117	61	49	38	49	44	28
Betsiamites	-68,81	48,82	346	344	301	247	289	257	213	259	214	259	276	311
Rimouski	-68,58	48,46	10	7	9	51	143	46	23	18	16	19	25	18
Outardes	-68,36	49,03	194	167	148	201	868	833	478	395	370	400	324	247
Manicouagan	-68,04	49,20	646	632	571	513	1280	1830	1050	855	805	859	757	686
Godbout	-67,53	49,32	13	12	12	43	177	63	37	24	27	45	34	21
Matane	-67,53	48,85	8	5	4	16	177	83	36	21	20	33	37	26

Tableau 3. Numéro d'identification (ID) et nom des stations actives de niveau d'eau et décalage utilisé pour transférer les données sur le niveau d'eau dans le CGVD28.

ID de la station	Nom de la station	Décalage (m)
2985	Rimouski	2,277
3057	Saint-Joseph-de-la-Rive	3,375
3075	Banc du Cap Brûlé	2,625
3100	Saint-Laurent I.O.	2,523
3110	Saint-François I.O.	2,116
3248	Vieux-Québec	1,982
3280	Neuville	1,374
3300	Portneuf	1,122

ID de la station	Nom de la station	Décalage (m)
3335	Deschaillons-sur-Saint-Laurent	0,702
3345	Batiscan	-1,89
3353	Bécancour	-2,564
3360	Trois-Rivières	-2,956
3424	Baie-Sainte-Catherine	2,405
3460	Port-Alfred	2,648

Tableau 4. Numéro d'identification (ID) et nom des stations historiques de niveau d'eau.

ID de la station	Nom de la station	ID de la station	Nom de la station	ID de la station	Nom de la station
2826	Godbout	3052	Cap-aux-Oies	3130	Rivière-du-Loup
2840	Baie-Comeau	3058	St-Bernard – Isle aux Coudres	3140	Île aux Lièvres
2880	Forestville	3060	Cap-aux-Corbeaux	3160	Pointe-aux-Orignaux
2883	Portneuf-sur-Mer	3070	Sault-au-Cochon	3170	Saint-Jean-Port-Joli
2900	Les Escoumins	3071	Rocher de Neptune	3175	L'Islet-sur-Mer
2955	Matane	3075	Banc du Cap Brûlé	3180	L'Isle-aux-Grues
2975	Institut Maurice-Lamontagne	3080	Saint-Joachim	3190	La Grosse Île
2980	Pointe-au-Père	3087	Sainte-Anne-de-Beaupré	3200	Berthier
2995	Le Bic	3095	Montmorency	3246	Estuaire de la Rivière Saint-Charles
3000	Île Bicquette	3105	Saint-Jean I.O.	3250	Québec (Lauzon)
3005	Trois-Pistoles	3110	Saint-Laurent I.O.	3251	Immigration Warf
3030	Saint-Siméon	3120	Île Verte	3260	Saint-Romuald
3045	Pointe-au-Pic	3122	L'Isle-Verte	3264	Quai des Cageux
3048	Saint-Irénée	3125	Gros-Cacouna	3425	Tadoussac

Tableau 5. Comparaison de la composante M2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2021.

Station	Observation		Erreur d'amplitude (m)			Erreur de phase (degré)			Erreur de marée (m)		
	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
3360	0,085 ± 0,002	135,4 ± 2,0	—	—	+0,055	—	—	-9,41	—	—	0,041
3353	0,192 ± 0,005	117,1 ± 1,5	—	—	+0,080	—	—	-16,80	—	—	0,074
3345	0,286 ± 0,006	100,1 ± 0,9	—	—	+0,079	—	—	-17,46	—	—	0,089
3335	0,619 ± 0,010	68,5 ± 0,8	—	—	-0,024	—	—	-7,71	—	—	0,060
3300	1,421 ± 0,011	28,7 ± 0,4	—	—	-0,098	—	—	+0,18	—	—	0,069
3280	1,536 ± 0,011	9,8 ± 0,4	—	—	-0,018	—	—	-1,02	—	—	0,023
3248	1,833 ± 0,012	331,3 ± 0,4	—	-0,618	-0,025	—	-0,67	-0,32	—	0,437	0,019
3100	2,047 ± 0,011	304,0 ± 0,3	-0,436	+0,065	+0,028	+4,51	-5,06	-0,06	0,325	0,138	0,020

Observation			Erreur d'amplitude (m)			Erreur de phase (degré)			Erreur de marée (m)		
Station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
3057	2,023 ± 0,010	257,5 ± 0,3	-0,009	+0,009	-0,011	-11,34	-6,17	-2,28	0,282	0,154	0,057
3424	1,532 ± 0,008	215,7 ± 0,3	+0,096	-0,024	-0,107	-15,40	-10,16	+1,71	0,306	0,191	0,082
3460	1,782 ± 0,010	219,4 ± 0,3	—	—	-0,121	—	—	+1,27	—	—	0,090
2985	1,254 ± 0,006	201,5 ± 0,2	+0,108	-0,009	—	-6,49	-2,86	—	0,130	0,045	—

Tableau 6. Comparaison de la composante S2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2021.

Observation			Erreur d'amplitude (m)			Erreur de phase (degré)			Erreur de marée (m)		
Station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
3360	0,024 ± 0,003	174,8 ± 5,9	—	—	+0,014	—	—	-10,73	—	—	0,011
3353	0,052 ± 0,005	156,3 ± 5,3	—	—	+0,019	—	—	-14,50	—	—	0,017
3345	0,075 ± 0,007	140,1 ± 4,0	—	—	+0,015	—	—	-13,72	—	—	0,018
3335	0,135 ± 0,010	114,2 ± 4,2	—	—	-0,001	—	—	-5,44	—	—	0,009
3300	0,286 ± 0,009	79,7 ± 2,1	—	—	-0,015	—	—	+2,41	—	—	0,014
3280	0,314 ± 0,011	60,8 ± 1,5	—	—	+0,001	—	—	+1,32	—	—	0,005
3248	0,413 ± 0,011	19,9 ± 1,7	—	-0,148	-0,006	—	+1,04	+2,07	—	0,105	0,011
3100	0,488 ± 0,011	352,4 ± 1,4	-0,109	-0,004	+0,007	+3,45	-1,87	+2,07	0,079	0,012	0,014
3057	0,577 ± 0,009	297,6 ± 1,0	-0,011	-0,033	-0,006	-11,24	-4,89	-0,76	0,080	0,041	0,007
3424	0,484 ± 0,006	258,1 ± 1,1	+0,003	-0,033	-0,053	-18,93	-12,12	+1,66	0,113	0,074	0,038
3460	0,570 ± 0,009	262,4 ± 1,0	—	—	-0,056	—	—	+1,27	—	—	0,040
2985	0,397 ± 0,005	243,3 ± 0,8	+0,009	-0,019	—	-8,98	-3,15	—	0,045	0,020	—

Tableau 7. Comparaison de la composante N2 pour les marégraphes actifs pour l'année 2021.

Observation			Erreur d'amplitude (m)			Erreur de phase (degré)			Erreur de marée (m)		
Station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
3360	0,017 ± 0,003	102,5 ± 9,1	—	—	+0,008	—	—	-5,01	—	—	0,006
3353	0,036 ± 0,005	84,4 ± 8,4	—	—	+0,011	—	—	-14,38	—	—	0,011
3345	0,051 ± 0,005	68,8 ± 6,3	—	—	+0,010	—	—	-14,32	—	—	0,012
3335	0,102 ± 0,010	42,5 ± 4,9	—	—	-0,007	—	—	-6,44	—	—	0,009
3300	0,225 ± 0,011	5,9 ± 2,5	—	—	-0,025	—	—	+2,60	—	—	0,019
3280	0,247 ± 0,010	346,8 ± 2,5	—	—	-0,011	—	—	+1,80	—	—	0,009
3248	0,312 ± 0,012	307,1 ± 2,2	—	-0,124	-0,011	—	+2,67	+2,71	—	0,088	0,013
3100	0,363 ± 0,012	280,0 ± 2,0	-0,094	-0,017	-0,002	+3,12	-0,82	+2,68	0,067	0,013	0,012
3057	0,407 ± 0,009	227,6 ± 1,4	-0,012	-0,023	+0,004	-12,41	-4,82	-1,95	0,061	0,029	0,010
3424	0,336 ± 0,008	189,9 ± 1,4	+0,009	-0,015	-0,019	-18,88	-10,52	+2,02	0,078	0,043	0,016
3460	0,387 ± 0,010	193,3 ± 1,4	—	—	-0,019	—	—	+1,21	—	—	0,014
2985	0,279 ± 0,005	176,2 ± 1,1	+0,012	-0,008	—	-9,72	-2,59	—	0,035	0,010	—

Tableau 8. Comparaison de la composante K1 pour les marégraphes actifs pour l'année 2021.

Observation			Erreur d'amplitude (m)			Erreur de phase (degré)			Erreur de marée (m)		
Station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
3360	0,029 ± 0,002	102,5 ± 3,0	—	—	+0,019	—	—	-4,79	—	—	0,013
3353	0,051 ± 0,003	82,1 ± 2,4	—	—	+0,021	—	—	-9,16	—	—	0,016
3345	0,072 ± 0,004	72,7 ± 2,9	—	—	+0,016	—	—	-11,90	—	—	0,016
3335	0,115 ± 0,005	51,2 ± 2,4	—	—	+0,003	—	—	-5,73	—	—	0,009
3300	0,178 ± 0,007	21,5 ± 2,3	—	—	+0,010	—	—	-1,02	—	—	0,007
3280	0,193 ± 0,008	9,0 ± 2,5	—	—	+0,015	—	—	-1,27	—	—	0,011
3248	0,229 ± 0,009	344,8 ± 2,4	—	-0,052	+0,009	—	-344,73	-0,25	—	0,053	0,007
3100	0,252 ± 0,010	328,4 ± 2,1	-0,014	-0,004	+0,012	+11,82	+2,21	+0,25	0,037	0,007	0,009
3057	0,266 ± 0,011	298,3 ± 2,2	+0,001	-0,009	+0,003	-2,00	+2,46	-0,73	0,007	0,010	0,003
3424	0,242 ± 0,009	283,1 ± 2,5	+0,017	-0,006	-0,003	-7,05	+0,07	+3,35	0,025	0,004	0,010
3460	0,247 ± 0,011	284,6 ± 2,3	—	—	0	—	—	+3,62	—	—	0,011
2985	0,236 ± 0,009	278,1 ± 2,3	+0,018	-0,004	—	-1,57	+3,49	—	0,014	0,011	—

Tableau 9. Comparaison de la composante M4 pour les marégraphes actifs pour l'année 2021.

Observation			Erreur d'amplitude (m)			Erreur de phase (degré)			Erreur de marée (m)		
Station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
3360	0,033 ± 0,002	181,4 ± 3,6	—	—	+0,019	—	—	-16,59	—	—	0,016
3353	0,071 ± 0,003	158,4 ± 3,6	—	—	+0,040	—	—	-31,34	—	—	0,044
3345	0,088 ± 0,005	122,8 ± 3,1	—	—	+0,044	—	—	-27,99	—	—	0,048
3335	0,184 ± 0,011	57,7 ± 3,4	—	—	+0,010	—	—	-5,71	—	—	0,015
3300	0,310 ± 0,016	336,4 ± 3,0	—	—	+0,041	—	—	+7,26	—	—	0,041
3280	0,235 ± 0,012	297,6 ± 2,7	—	—	+0,034	—	—	+3,42	—	—	0,026
3248	0,274 ± 0,012	216,3 ± 2,5	—	+0,022	+0,033	—	+7,96	+1,71	—	0,032	0,024
3100	0,236 ± 0,010	180,6 ± 2,2	+0,030	+0,051	+0,045	+8,61	-2,87	+1,92	0,034	0,037	0,032
3057	0,100 ± 0,005	320,1 ± 2,7	-0,012	-0,004	-0,005	+31,56	-12,57	-11,48	0,037	0,015	0,014
3424	0,040 ± 0,003	50,3 ± 3,5	-0,005	+0,009	+0,019	+299,61	-34,24	+1,73	0,027	0,019	0,014
3460	0,092 ± 0,005	69,7 ± 3,1	—	—	+0,024	—	—	-0,11	—	—	0,017
2985	0,021 ± 0,002	13,1 ± 5,1	+0,007	+0,013	—	+332,09	+9,99	—	0,010	0,010	—

Tableau 10. Comparaison de la composante M2 pour les marégraphes historiques.

Observation			Erreur d'amplitude (m)			Erreur de phase (degré)			Erreur de marée (m)		
Station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
03360	0,072	142,06	—	—	+0,041	—	—	-16,45	—	—	0,034
03353	0,182	118,08	—	—	+0,054	—	—	-17,60	—	—	0,059
03345	0,293	101,53	—	—	+0,035	—	—	-18,43	—	—	0,074
03335	0,581	70,31	—	—	-0,030	—	—	-9,34	—	—	0,069
03300	1,384	28,90	—	—	-0,119	—	—	+0,14	—	—	0,084
03280	1,538	8,86	—	—	-0,068	—	—	+0,16	—	—	0,048
03264	1,728	338,49	—	-0,853	-0,021	—	+10,49	+0,59	—	0,624	0,020
03260	1,822	335,02	—	-0,881	-0,103	—	+9,21	+1,98	—	0,640	0,085
03251	1,737	330,82	—	-0,701	+0,009	—	+6,66	+3,02	—	0,508	0,065
03246	1,771	330,50	—	-0,570	+0,005	—	-0,98	-0,97	—	0,404	0,021
03250	1,825	328,92	—	-0,572	-0,044	—	-2,42	-1,22	—	0,407	0,042
03095	1,757	325,18	—	-0,443	+0,053	—	+1,36	+1,02	—	0,314	0,044
03110	1,934	318,77	—	-0,124	+0,048	—	-8,55	-3,31	—	0,216	0,087

Observation			Erreur d'amplitude (m)			Erreur de phase (degré)			Erreur de marée (m)		
Station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
03087	2,054	311,09	—	-0,343	-0,098	—	-1,18	+0,65	—	0,244	0,071
03105	2,022	310,20	—	-0,026	-0,003	—	-6,29	-1,07	—	0,157	0,027
03460	1,802	217,79	—	—	-0,149	—	—	+2,20	—	—	0,115
03080	2,043	301,98	-0,466	-0,035	-0,017	+2,27	-2,15	+2,81	0,333	0,059	0,071
03100	2,027	303,38	-0,460	+0,046	+0,004	+5,53	-4,67	+0,48	0,347	0,122	0,012
03200	1,908	305,09	-0,362	+0,137	+0,090	+5,00	-5,08	+0,24	0,277	0,157	0,064
03075	2,099	296,16	—	-0,099	-0,080	—	+7,66	+12,93	—	0,206	0,333
03190	2,045	300,76	-0,480	+0,003	-0,030	+2,49	-4,05	-0,12	0,344	0,102	0,021
03070	1,947	280,42	-0,260	+0,153	+0,159	+2,26	+1,11	+2,60	0,191	0,112	0,130
03071	2,104	287,36	-0,445	-0,014	-0,027	-1,27	-3,76	-1,16	0,316	0,098	0,035
03180	1,989	297,69	-0,450	+0,062	+0,033	+1,76	-5,87	-2,20	0,320	0,153	0,059
03060	1,996	259,20	-0,038	-0,099	-0,051	-8,47	+1,40	+1,90	0,208	0,077	0,059
03058	1,930	263,42	+0,059	+0,020	+0,049	-16,30	-8,11	-6,09	0,395	0,195	0,151
03175	1,824	292,15	-0,174	+0,170	+0,155	-13,08	-8,18	-5,03	0,305	0,227	0,161
03057	2,021	255,52	-0,020	0	-0,025	-9,97	-4,91	-1,10	0,247	0,122	0,032
03170	1,853	281,32	-0,189	+0,083	+0,057	-9,93	-4,64	-1,28	0,253	0,123	0,050
03052	1,940	248,66	+0,052	+0,040	-0,041	-10,28	-4,62	+0,66	0,252	0,115	0,033
03048	1,918	244,68	+0,061	+0,046	-0,032	-10,51	-5,36	-0,24	0,256	0,132	0,023
03045	1,813	242,65	+0,111	+0,060	-0,023	-12,19	-5,99	-0,73	0,291	0,143	0,023
03160	1,731	251,23	+0,135	+0,077	+0,006	-15,33	-9,26	-4,01	0,352	0,209	0,086
03030	1,616	229,62	+0,134	+0,050	-0,026	-9,16	-1,49	+4,47	0,212	0,047	0,090
03140	1,629	226,49	+0,053	+0,020	-0,059	-3,94	-1,12	+4,02	0,089	0,027	0,090
03425	1,574	211,99	+0,048	-0,063	-0,149	-12,28	-7,71	+3,28	0,244	0,153	0,122
03130	1,536	224,58	+0,061	-0,030	-0,118	-6,91	-1,84	+3,38	0,140	0,040	0,104
03125	1,487	220,00	+0,040	-0,080	-0,154	-8,98	-2,28	+3,81	0,169	0,070	0,127
03120	1,363	209,63	+0,168	-0,033	-0,140	-8,83	-2,62	+4,46	0,197	0,049	0,122
03122	1,401	221,83	+0,132	-0,091	—	-20,78	-13,01	—	0,385	0,226	—
02900	1,415	203,19	+0,108	-0,011	-0,114	-6,09	-2,49	+4,60	0,134	0,044	0,112
03005	1,404	202,09	+0,098	-0,029	-0,140	-4,35	-1,00	+5,03	0,104	0,027	0,129
02883	1,338	203,52	+0,105	-0,011	—	-10,11	-6,12	—	0,188	0,101	—

Observation			Erreur d'amplitude (m)			Erreur de phase (degré)			Erreur de marée (m)		
Station	Amplitude (m)	Phase (degré)	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
02880	1,408	198,66	+0,018	-0,099	—	-5,91	-2,00	—	0,104	0,077	—
03000	1,345	204,10	+0,081	-0,028	—	-7,40	-2,46	—	0,139	0,045	—
02995	1,370	202,93	+0,032	-0,088	—	-6,38	-1,91	—	0,111	0,069	—
02985	1,279	200,61	+0,081	-0,037	—	-6,02	-2,46	—	0,114	0,046	—
02980	1,273	199,98	+0,083	-0,035	—	-5,76	-2,30	—	0,110	0,043	—
02975	1,212	199,09	+0,108	+0,006	—	-5,46	-1,41	—	0,114	0,022	—
02840	1,174	192,97	+0,076	-0,026	—	-4,79	-1,34	—	0,089	0,027	—
02826	1,050	193,22	+0,134	+0,037	—	-6,14	-2,87	—	0,127	0,046	—
02955	1,142	194,22	+0,053	-0,046	—	-2,80	+0,78	—	0,055	0,034	—

Tableau 11. Scores du niveau d'eau de marée pour l'année 2021.

Station	CRMSE (m)			χ^2			Pearson		
	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
3360	—	—	0,05	—	—	0,454	—	—	0,985
3353	—	—	0,09	—	—	0,315	—	—	0,951
3345	—	—	0,104	—	—	0,199	—	—	0,952
3335	—	—	0,064	—	—	0,017	—	—	0,991
3300	—	—	0,085	—	—	0,006	—	—	0,998
3280	—	—	0,043	—	—	0,001	—	—	0,999
3248	—	0,46	0,045	—	0,113	0,001	—	0,994	0,999
3100	0,343	0,143	0,055	0,05	0,009	0,001	0,995	0,996	1
3057	0,299	0,162	0,067	0,038	0,011	0,002	0,981	0,994	0,999
3424	0,336	0,209	0,097	0,082	0,031	0,007	0,963	0,984	0,999
3460	—	—	0,105	—	—	0,006	—	—	0,999
2985	0,142	0,055	—	0,021	0,003	—	0,993	0,998	—

Tableau 12. Scores du niveau d'eau résiduel pour l'année 2021.

Station	CRMSE (m)			χ^2			Pearson		
	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
3360	—	—	0,158	—	—	0,155	—	—	0,92
3353	—	—	0,166	—	—	0,198	—	—	0,896
3345	—	—	0,147	—	—	0,17	—	—	0,911
3335	—	—	0,152	—	—	0,172	—	—	0,913
3300	—	—	0,174	—	—	0,203	—	—	0,893
3280	—	—	0,154	—	—	0,182	—	—	0,905
3248	—	0,181	0,153	—	0,246	0,176	—	0,872	0,908
3100	0,162	0,148	0,139	0,249	0,206	0,183	0,867	0,892	0,904
3057	0,138	0,128	0,13	0,331	0,286	0,294	0,818	0,845	0,841
3424	0,109	0,108	0,108	0,298	0,293	0,294	0,84	0,844	0,846
3460	—	—	0,126	—	—	0,289	—	—	0,848
2985	0,089	0,086	—	0,263	0,246	—	0,861	0,87	—

Tableau 13. Scores du niveau d'eau total pour l'année 2021.

Station	Biais (m)			CRMSE (m)			χ^2			Pearson		
	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
3360	—	—	-0,294	—	—	0,165	—	—	0,165	—	—	0,914
3353	—	—	-0,312	—	—	0,189	—	—	0,216	—	—	0,89
3345	—	—	-0,142	—	—	0,18	—	—	0,179	—	—	0,912
3335	—	—	0,007	—	—	0,165	—	—	0,074	—	—	0,963
3300	—	—	0,135	—	—	0,193	—	—	0,029	—	—	0,986
3280	—	—	0,076	—	—	0,16	—	—	0,018	—	—	0,991
3248	—	0,326	0,026	—	0,494	0,159	—	0,122	0,013	—	0,984	0,994
3100	0,308	-0,020	-0,003	0,379	0,205	0,15	0,059	0,017	0,009	0,988	0,992	0,996
3057	0,269	0,006	0,001	0,329	0,206	0,146	0,045	0,018	0,009	0,977	0,991	0,996
3424	-0,045	-0,002	0	0,353	0,235	0,145	0,088	0,039	0,015	0,96	0,98	0,994
3460	—	—	0,067	—	—	0,164	—	—	0,014	—	—	0,995
2985	0,053	0,043	—	0,167	0,101	—	0,029	0,01	—	0,989	0,995	—

Tableau 14. Nom et date des tempêtes.

Nom de la tempête	Date
nov18c	2018-11-28 à 12 h
jan21	2021-01-17 à 6 h
mar17	2017-03-15 à 6 h
oct10	2019-10-18 à 0 h
mar21	2021-03-29 à 6 h
Dorian	2019-09-08 à 0 h
Ida	2021-09-03 à 0 h

Tableau 15. Moyenne des scores, niveau d'eau indépendant des marées, pour les sept tempêtes choisies.

Station	CRMSE (m)			χ^2			Pearson		
	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
03360	—	—	0,088	—	—	0,839	—	—	0,638
03353	—	—	0,091	—	—	0,625	—	—	0,721
03345	—	—	0,087	—	—	0,421	—	—	0,803
03335	—	—	0,101	—	—	0,254	—	—	0,881
03300	—	—	0,139	—	—	0,188	—	—	0,913
03280	—	—	0,120	—	—	0,139	—	—	0,940
03248	—	0,156	0,125	—	0,226	0,140	—	0,897	0,934
03100	0,133	0,118	0,115	0,194	0,142	0,135	0,913	0,930	0,936
03057	0,094	0,089	0,085	0,117	0,102	0,097	0,951	0,953	0,956
03424	0,059	0,057	0,052	0,100	0,093	0,087	0,950	0,955	0,959
03460	—	—	0,077	—	—	0,119	—	—	0,941
02985	0,052	0,050	—	0,094	0,090	—	0,952	0,955	—

Tableau 16. Scores des courants de surface totaux par comparaison avec les ADCP horizontaux à Québec et à Lévis.

Station	CRMSE (m/s)		γ^2		Pearson	
	ESTL500	ESTL200	ESTL500	ESTL200	ESTL500	ESTL200
Lévis 2020	0,418	0,192	0,203	0,043	0,924	0,981
Lévis 2021	0,398	0,164	0,148	0,025	0,955	0,989
Québec 2021	0,497	0,225	0,397	0,081	0,88	0,968

Tableau 17. Scores des courants résiduels à la surface par comparaison avec les ADCP horizontaux à Québec et à Lévis.

Station	CRMSE (m/s)		γ^2		Pearson	
	ESTL500	ESTL200	ESTL500	ESTL200	ESTL500	ESTL200
Lévis 2020	0,128	0,132	0,677	0,725	0,575	0,581
Lévis 2021	0,108	0,106	0,715	0,687	0,538	0,590
Québec 2021	0,125	0,109	0,836	0,633	0,488	0,609

Tableau 18. Scores des courants de marée à la surface par comparaison avec les ADCP horizontaux à Québec et à Lévis.

Station	CRMSE (m/s)		γ^2		Pearson	
	ESTL500	ESTL200	ESTL500	ESTL200	ESTL500	ESTL200
Lévis 2020	0,404	0,147	0,195	0,026	0,933	0,991
Lévis 2021	0,383	0,125	0,139	0,015	0,961	0,994
Québec 2021	0,481	0,197	0,383	0,064	0,889	0,977

Tableau 19. Amplitude et phase des composantes principales des courants de surface tirées des ADCP horizontaux à Québec et à Lévis; phase, amplitude et erreur de marée pour le ESTL500 et le ESTL200.

Observation		Erreur d'amplitude (m/s)				Erreur de phase (degré)		Erreur de marée (m/s)	
Station	Co mp.	Amplitude (m/s)	Phase (degré)	ESTL500	ESTL200	ESTL500	ESTL200	ESTL500	ESTL200
Lévis 2020	M2	1,356	113,06	-0,462	-0,146	+12,55	-0,83	0,368	0,104
	N2	0,275	93,50	-0,129	-0,072	+13,69	-0,88	0,098	0,051
	S2	0,365	160,55	-0,126	-0,029	+19,26	+7,42	0,113	0,038
	K1	0,084	110,32	-0,006	+0,007	+27,10	+13,12	0,027	0,015
	O1	0,093	86,24	-0,011	-0,014	+18,25	+2,82	0,021	0,010
	Q1	0,028	20,48	-0,016	-0,017	+32,19	-15,81	0,014	0,013
	M4	0,272	45,07	-0,030	+0,004	+26,50	+7,61	0,086	0,026
Lévis 2021	M2	1,366	111,40	-0,419	-0,118	+12,88	-0,63	0,347	0,084
	N2	0,145	102,58	-0,020	+0,031	+8,31	-8,47	0,020	0,027
	S2	0,341	166,65	-0,085	+0,011	+17,91	+6,33	0,089	0,028
	K1	0,086	119,47	-0,002	+0,011	+22,23	+14,34	0,023	0,018
	O1	0,095	79,62	-0,008	-0,010	+20,62	+7,31	0,024	0,011
	Q1	0,009	126,29	-0,001	-0,006	+7,75	+6,81	0,001	0,004
	M4	0,242	42,76	-0,011	+0,019	+27,29	+8,93	0,079	0,031
	M2	1,005	97,56	+0,308	+0,119	+26,91	+11,23	0,436	0,169

Observation				Erreur d'amplitude (m/s)		Erreur de phase (degré)		Erreur de marée (m/s)	
Station	Co mp.	Amplitude (m/s)	Phase (degré)	ESTL500	ESTL200	ESTL500	ESTL200	ESTL500	ESTL200
Québec 2021	N2	0,126	90,45	+0,048	+0,034	+19,10	+2,87	0,048	0,025
	S2	0,259	157,0 3	+0,095	+0,051	+27,94	+13,96	0,123	0,061
	K1	0,062	124,4 0	+0,058	+0,014	+16,20	-12,23	0,044	0,014
	O1	0,068	93,77	+0,054	+0,004	+8,76	-3,24	0,039	0,004
	Q1	0,010	110,0 2	+0,002	-0,005	+21,13	+19,16	0,003	0,004
	M4	0,255	48,43	+0,065	-0,005	+22,63	+3,34	0,092	0,011

Tableau 20. Statistiques sur le courant total pour l'ADCP à la bouée IML-4.

Station	Profondeur (m)	biais u (m/s) biais v (m/s)		biais u (m/s) biais v (m/s)		RMSE (m/s)		Amplitude de corrélation vectorielle		Degrés de corrélation vectorielle	
		SPCOG-E	SPCOG-E	ESTL500	ESTL500	SPCOG-E	ESTL500	SPCOG-E	ESTL500	SPCOG-E	ESTL500
10749 11 m de 2016-04 à 2016-11	1,5	0,082	0,039	0,021	-0,001	0,343	0,309	0,371	0,525	1,89	8,228
	5	0,075	0,043	0,016	0,007	0,312	0,282	0,369	0,518	1,395	8,352
	7,5	0,059	0,036	0,001	0,002	0,31	0,283	0,363	0,508	0,014	7,953
	10	0,05	0,037	-0,005	0,002	0,297	0,273	0,35	0,493	-2,262	6,313
11947 106 m de 2016-04 à 2016-11	7,5	0,089	0,058	0,032	0,023	0,269	0,248	0,358	0,499	3,804	12,198
	10	0,066	0,054	0,012	0,019	0,273	0,252	0,346	0,483	-0,655	9,911
	15	0,029	0,042	-0,016	0,009	0,273	0,26	0,314	0,432	-6,738	6,528
	20	0,013	0,028	-0,027	-0,002	0,264	0,259	0,276	0,365	-12,728	0,24
	50	-0,019	0,004	-0,04	-0,007	0,218	0,244	0,442	0,309	-6,074	1,617
	100	-0,036	0,002	-0,021	0,001	0,156	0,17	0,632	0,548	6,066	7,814

Tableau 21. Statistiques sur le courant résiduel pour l'ADCP à la bouée IML-4.

Station	Profondeur (m)	RMSE (m/s)		Amplitude de corrélation vectorielle		Degrés de corrélation vectorielle	
		SPCOG-E	ESTL500	SPCOG-E	ESTL500	SPCOG-E	ESTL500
10749 11 m de 2016-04 à 2016-11	1,5	0,29	0,268	0,299	0,348	-8,44	13,094
	5	0,263	0,247	0,299	0,317	-8,653	14,763
	7,5	0,251	0,245	0,293	0,289	-6,605	17,118
	10	0,237	0,234	0,27	0,256	-4,883	17,064
11947 106 m de 2016-04 à 2016-11	7,5	0,236	0,218	0,283	0,289	-3,272	19,923
	10	0,228	0,218	0,275	0,257	-6,248	17,631
	15	0,212	0,22	0,245	0,2	-4,105	15,811
	20	0,202	0,217	0,201	0,17	-0,089	15,281
	50	0,177	0,218	0,283	0,061	-4,018	24,681
	100	0,127	0,142	0,247	0,078	-6,331	32,581

Tableau 22. Statistiques sur le courant de marée pour l'ADCP à la bouée IML-4.

Station	Profondeur (m)	γ^2		RMSE (m/s)	
		SPCOG-E	ESTL500	SPCOG-E	ESTL500
10749 11 m de 2016-04 à 2016-11	1,5	0,671	0,433	0,175	0,141
	5	0,676	0,423	0,159	0,126
	7,5	0,691	0,403	0,176	0,135
	10	0,705	0,411	0,174	0,133
11947 106 m de 2016-04 à 2016-11	7,5	0,716	0,619	0,121	0,113
	10	0,724	0,487	0,146	0,119
	15	0,817	0,514	0,167	0,132
	20	0,938	0,631	0,165	0,135
	50	0,983	0,697	0,123	0,104
	100	0,341	0,364	0,085	0,088

Tableau 23. Scores de salinité et de température près de la surface pour 2017, d'après la comparaison avec les sondes CTD fixées aux marégraphes.

Nom de la station	Score	Température			Salinité		
		SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
2985	Biais (degré C PSU)	0,205	0,960	—	0,139	0,508	—
	CRMSE (degré C PSU)	1,256	1,629	—	2,111	2,341	—
	γ^2	0,101	0,170	—	0,553	0,680	—
	Pearson	0,967	0,973	—	0,685	0,658	—
3057	Biais (degré C PSU)	1,634	0,829	1,097	-13,126	0,030	0,299
	CRMSE (degré C PSU)	2,435	1,216	1,250	3,259	4,193	4,247
	γ^2	0,242	0,060	0,064	0,666	1,103	1,131
	Pearson	0,921	0,979	0,984	0,597	0,691	0,660
3100	Biais (degré C PSU)	-3,199	-0,152	-0,152	—	—	—
	CRMSE (degré C PSU)	5,258	1,032	0,932	—	—	—
	γ^2	0,355	0,014	0,011	—	—	—
	Pearson	0,837	0,993	0,994	—	—	—
3248	Biais (degré C PSU)	—	-0,272	-0,292	—	—	—
	CRMSE (degré C PSU)	—	1,201	1,068	—	—	—
	γ^2	—	0,019	0,015	—	—	—
	Pearson	—	0,991	0,993	—	—	—
3300	Biais (degré C PSU)	—	—	-0,144	—	—	—
	CRMSE (degré C PSU)	—	—	1,278	—	—	—
	γ^2	—	—	0,021	—	—	—
	Pearson	—	—	0,990	—	—	—
3335	Biais (degré C PSU)	—	—	-0,268	—	—	—
	CRMSE (degré C PSU)	—	—	1,538	—	—	—
	γ^2	—	—	0,028	—	—	—
	Pearson	—	—	0,986	—	—	—
3353	Biais (degré C PSU)	—	—	-0,584	—	—	—

Nom de la station	Score	Température			Salinité		
		SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
3360	CRMSE (degré C PSU)	—	—	1,369	—	—	—
	γ^2	—	—	0,024	—	—	—
	Pearson	—	—	0,988	—	—	—
	Biais (degré C PSU)	—	—	-0,649	—	—	—
	CRMSE (degré C PSU)	—	—	1,624	—	—	—
	γ^2	—	—	0,032	—	—	—
	Pearson	—	—	0,989	—	—	—

Tableau 24. Scores de température près de la surface pour les années 2016 à 2019 à la station 3057, d'après la comparaison avec les sondes CTD fixées aux marégraphes.

Température. Station 3057												
Année	Biais (degré C)			CRMSE (degré C)			γ^2			Pearson		
	SPCOG-E	500	200	SPCOG-E	500	200	SPCOG-E	500	200	SPCOG-E	500	200
2016	2,645	1,119	1,518	2,602	1,692	1,652	0,547	0,231	0,221	0,892	0,924	0,932
2017	1,621	0,826	1,091	2,430	1,214	1,249	0,240	0,060	0,063	0,922	0,979	0,984
2018	2,214	1,040	1,255	2,409	1,114	1,098	0,229	0,049	0,048	0,935	0,982	0,989
2019	2,077	1,233	1,419	2,503	1,180	1,228	0,265	0,059	0,064	0,939	0,984	0,989

Tableau 25. Scores de salinité près de la surface pour les années 2016 à 2019 à la station 3057, d'après la comparaison avec les sondes CTD fixées aux marégraphes.

Salinité. Station 3057												
Année	Biais (PSU)			CRMSE (PSU)			γ^2			Pearson		
	SPCOG-E	500	200	SPCOG-E	500	200	SPCOG-E	500	200	SPCOG-E	500	200
2016	-12,030	1,286	1,520	2,817	4,240	4,371	0,772	1,749	1,859	0,533	0,610	0,581
2017	-13,166	0,004	0,274	3,283	4,205	4,263	0,664	1,089	1,119	0,600	0,689	0,659
2018	-11,785	0,808	1,151	2,941	4,373	4,450	0,671	1,484	1,536	0,574	0,639	0,594
2019	-12,745	-0,054	0,268	2,743	4,236	4,227	0,665	1,587	1,580	0,581	0,689	0,652

Tableau 26. Scores de température près de la surface pour les années 2016 à 2021 à la station 3100, d'après la comparaison avec les sondes CTD fixées aux marégraphes.

Température. Station 3100												
Année	Biais (degré C)			CRMSE (degré C)			γ^2			Pearson		
	SPCOG-E	500	200	SPCOG-E	500	200	SPCOG-E	500	200	SPCOG-E	500	200
2016	-5,364	-0,559	-0,548	5,171	0,894	0,816	0,447	0,013	0,011	0,756	0,993	0,994
2017	-3,175	-0,151	-0,151	5,245	1,028	0,928	0,352	0,014	0,011	0,839	0,993	0,994
2018	-2,897	0,113	0,056	5,689	1,254	1,098	0,364	0,018	0,014	0,844	0,993	0,995
2019	-2,596	0,390	0,326	5,354	0,838	0,728	0,362	0,009	0,007	0,830	0,996	0,997
2020	-3,217	-0,225	-0,234	5,062	1,055	0,890	0,329	0,014	0,010	0,855	0,993	0,995
2021	-3,759	-0,757	-0,680	5,000	1,243	1,104	0,315	0,019	0,015	0,868	0,990	0,992

Tableau 27. Scores pour la température et la salinité du thermosalinographe sur le navire Oceanex Connaigra à une profondeur d'environ 8 m.

		S			T		
Période		SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
Biais (PSU degré C)	2016	-5,593	0,675	1,493	-0,317	-0,113	0,789
	2017	-6,095	0,251	1,182	0,056	0,181	0,707
	2018	-5,337	0,105	0,914	0,476	0,385	0,984
	2019	-5,627	-0,035	0,896	0,545	0,490	0,950
	2020	-6,055	-0,455	0,381	0,684	0,309	0,655
	2021	-5,792	0,303	1,086	0,220	0,428	0,960
	2022	-4,366	0,297	1,125	1,122	0,465	0,514
	2016-2022	-5,759	0,106	0,959	0,322	0,317	0,851
CRMSE (PSU degré C)	2016	6,250	2,587	3,004	2,640	1,266	1,464
	2017	6,629	3,186	3,242	2,443	1,139	1,240
	2018	6,445	3,247	3,312	2,692	1,146	1,296
	2019	6,622	3,494	3,559	2,466	1,106	1,295
	2020	6,316	3,331	3,497	2,229	0,992	1,170
	2021	6,441	3,039	3,219	2,443	1,039	1,306
	2022	7,283	4,930	4,776	1,686	0,863	0,782
	2016-2022	6,475	3,214	3,346	2,496	1,117	1,292
RMSE (PSU degré C)	2016	8,387	2,674	3,355	2,658	1,271	1,663
	2017	9,005	3,196	3,451	2,444	1,153	1,427
	2018	8,368	3,248	3,436	2,734	1,209	1,627
	2019	8,689	3,494	3,670	2,526	1,209	1,606
	2020	8,750	3,362	3,517	2,332	1,039	1,341
	2021	8,662	3,054	3,397	2,452	1,123	1,621
	2022	8,490	4,939	4,907	2,025	0,980	0,936
	2016-2022	8,665	3,216	3,480	2,517	1,161	1,547

Tableau 28. Scores pour la base de données de bouées dérivantes du projet TReX en 2020.

Indice de comparaison de Molcard			Distance de séparation (km)	
Heure	SPCOG-E	ESTL500	SPCOG-E	ESTL500
1	0,23	0,24	1,12	1,10
2	0,23	0,24	2,22	2,17
3	0,22	0,24	3,29	3,22
4	0,22	0,23	4,33	4,26
5	0,22	0,23	5,32	5,27
6	0,22	0,22	6,27	6,27
7	0,22	0,22	7,17	7,26
8	0,23	0,22	8,02	8,22
9	0,24	0,22	8,82	9,17
10	0,24	0,23	9,58	10,09
11	0,25	0,23	10,31	11,02
12	0,26	0,23	11,01	11,95

13	0,27	0,23	11,70	12,87
14	0,28	0,23	12,38	13,78
15	0,29	0,24	13,04	14,67
16	0,29	0,24	13,67	15,54
17	0,30	0,24	14,32	16,37
18	0,30	0,24	14,96	17,17
19	0,31	0,25	15,59	17,93
20	0,31	0,25	16,21	18,65
21	0,31	0,25	16,83	19,32
22	0,32	0,26	17,39	19,93
23	0,32	0,26	17,94	20,53
24	0,32	0,27	18,48	21,13

Tableau 29. Scores pour les bouées dérivantes déployées dans le secteur de Saint-François, île d'Orléans, en juillet 2019.

Heure	Indice de comparaison de Molcard			Distance de séparation (km)		
	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200	SPCOG-E	ESTL500	ESTL200
1	0,45	0,54	0,56	1,18	0,86	0,63
2	0,48	0,63	0,64	2,53	1,50	1,17
3	0,45	0,68	0,65	3,78	1,79	1,72
4	0,48	0,68	0,65	4,03	2,12	2,32

12. FIGURES

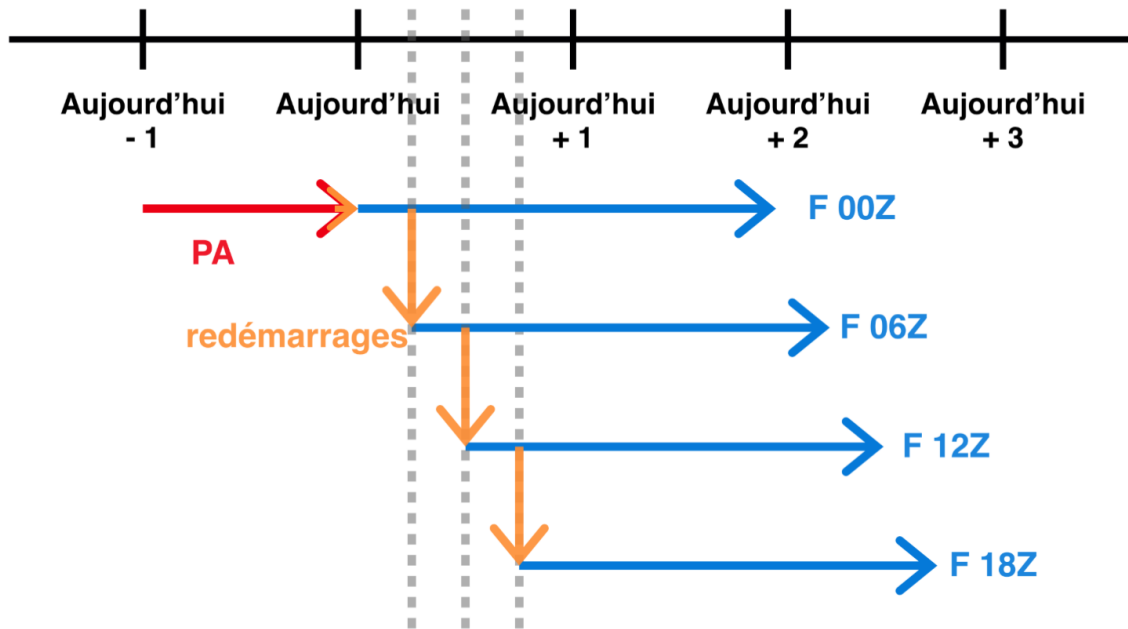


Figure 1. Schéma de séquençage de la pseudo-analyse (PA, en rouge) et des 4 prévisions de 48 h (en bleu) pour une date donnée. Les lignes pointillées grises sont espacées de six heures et les flèches oranges indiquent les moments où un fichier de redémarrage est généré et utilisé pour lancer l'étape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

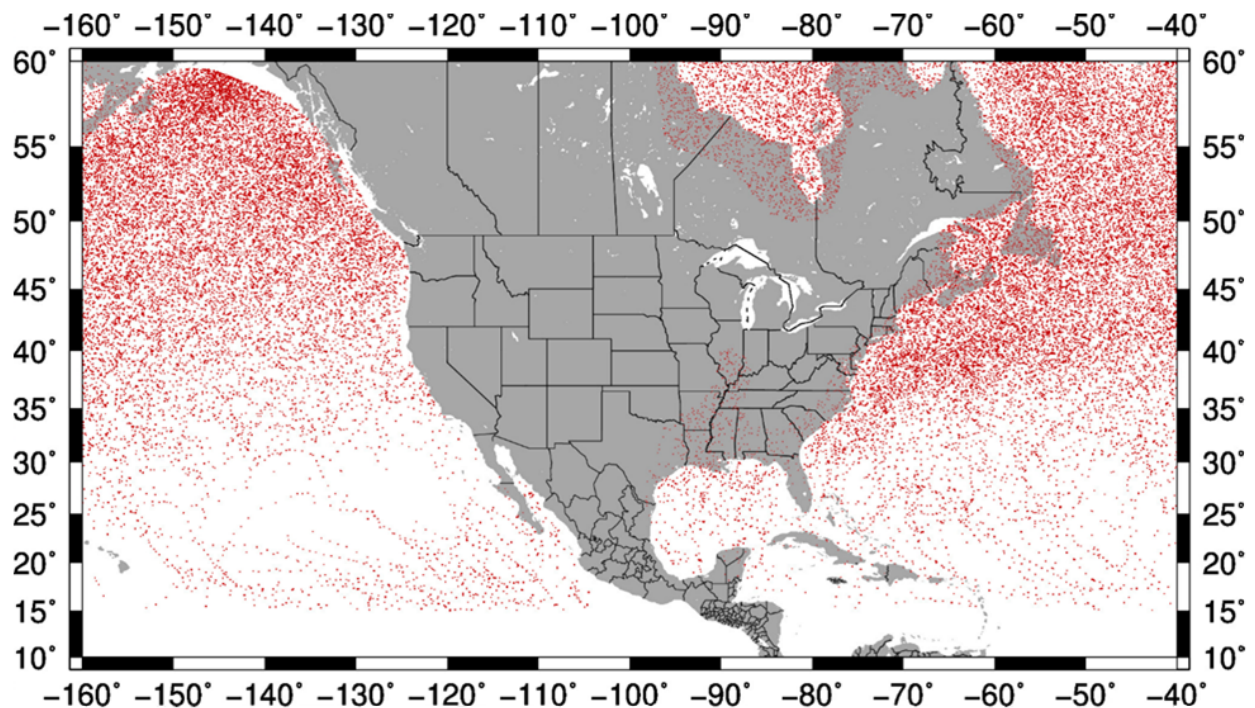


Figure 2. Emplacements des cyclones toutes les 6 heures de 2010 à 2021.

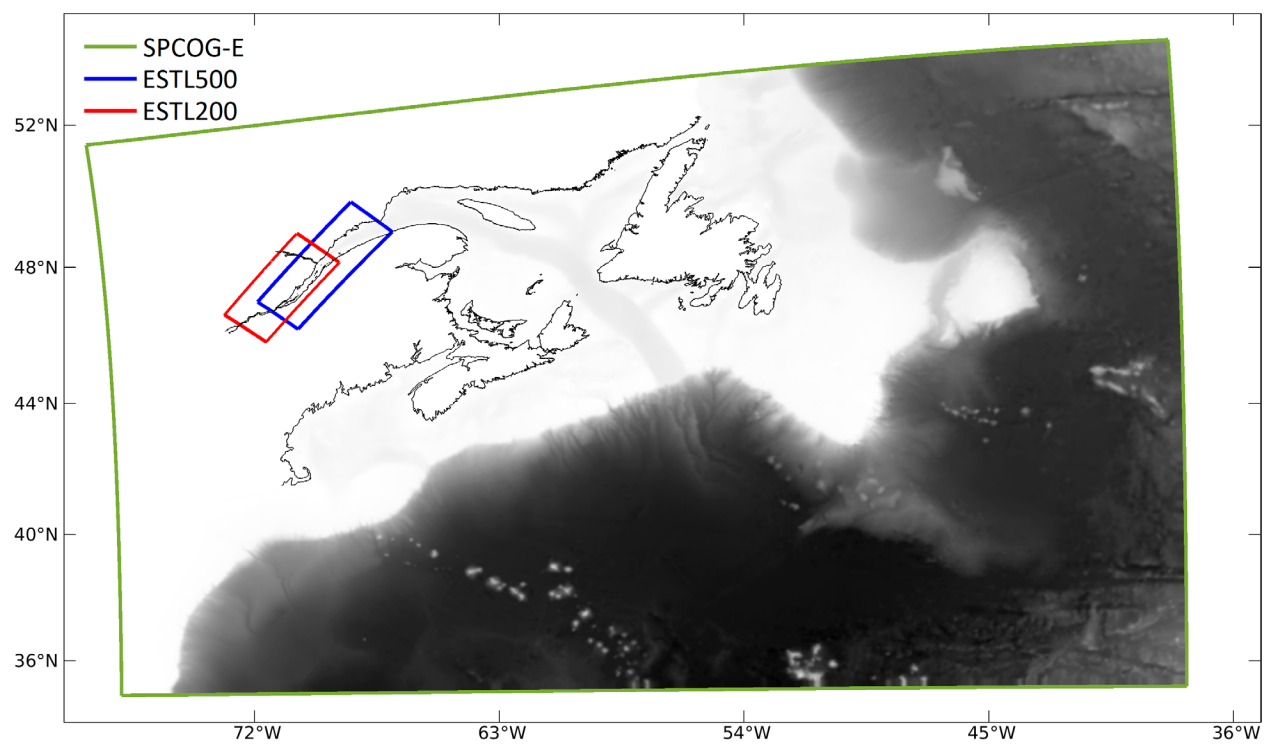


Figure 3. Limites des domaines du SPCOG-E, du ESTL500 et du ESTL200.

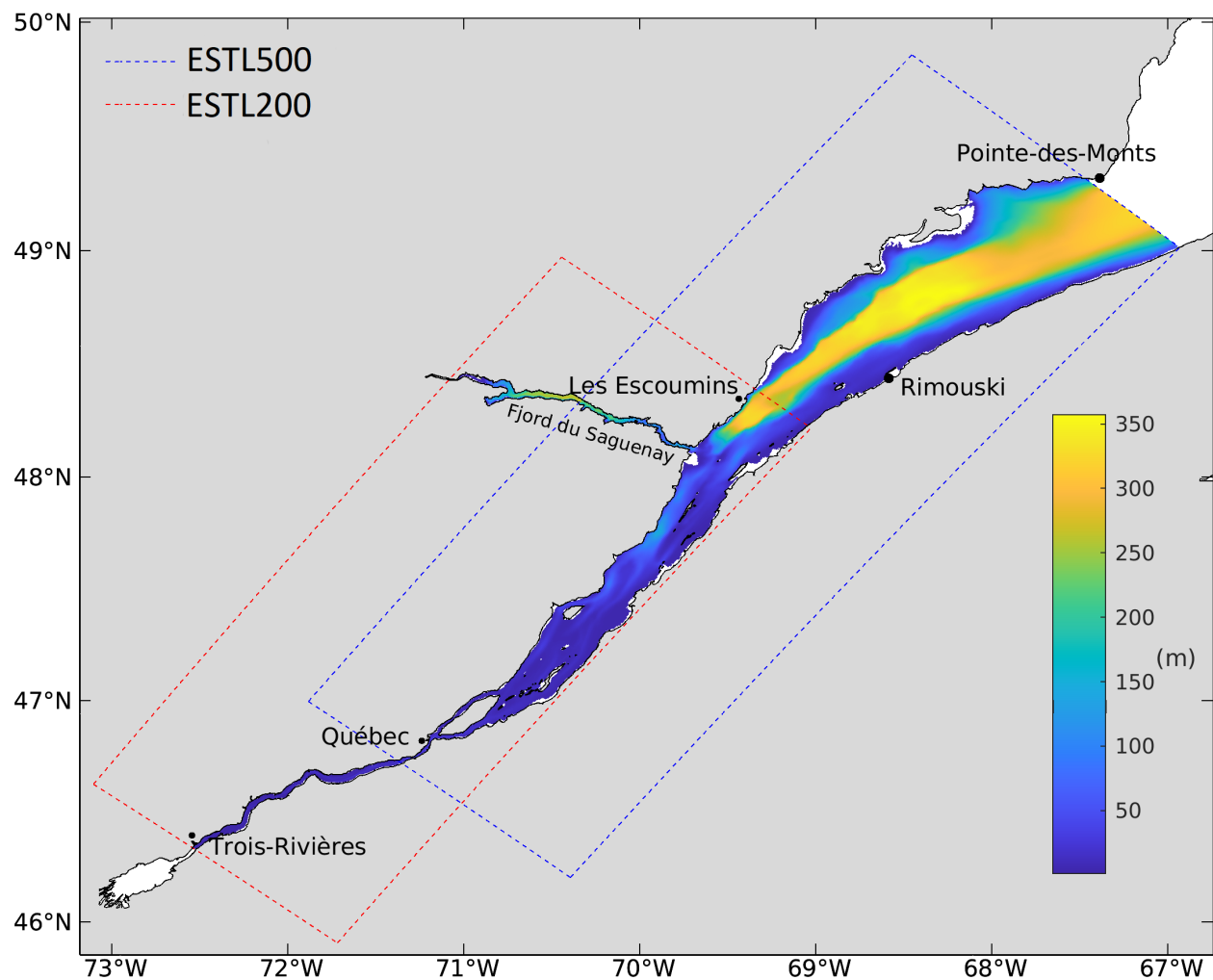


Figure 4. Bathymétrie et limites des domaines du ESTL500 et du ESTL200.

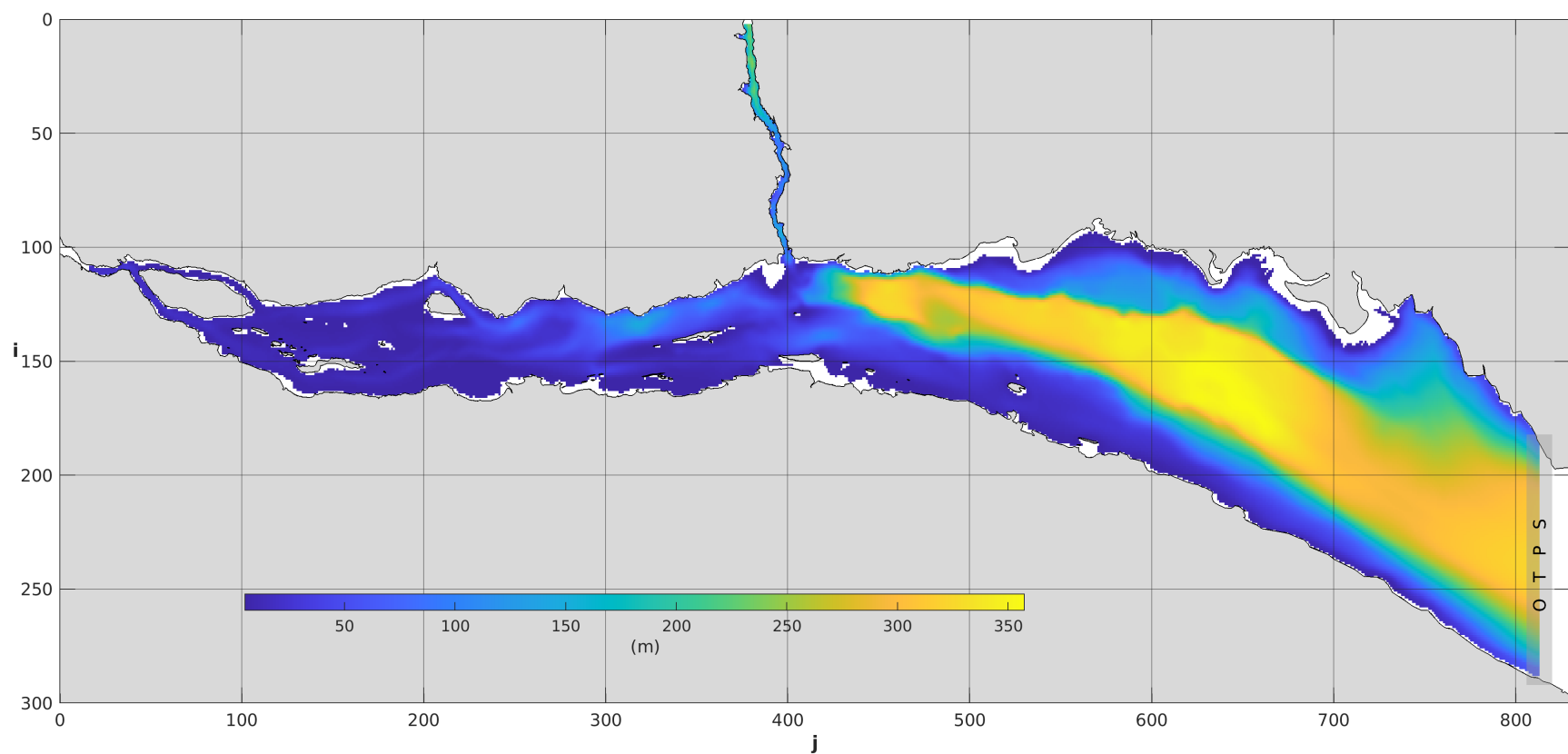


Figure 5. Bathymétrie du ESTL500, avec les indices i et j comme axes vertical et horizontal. Les composantes de marée du logiciel OTPS sont appliquées à la limite ouverte est.

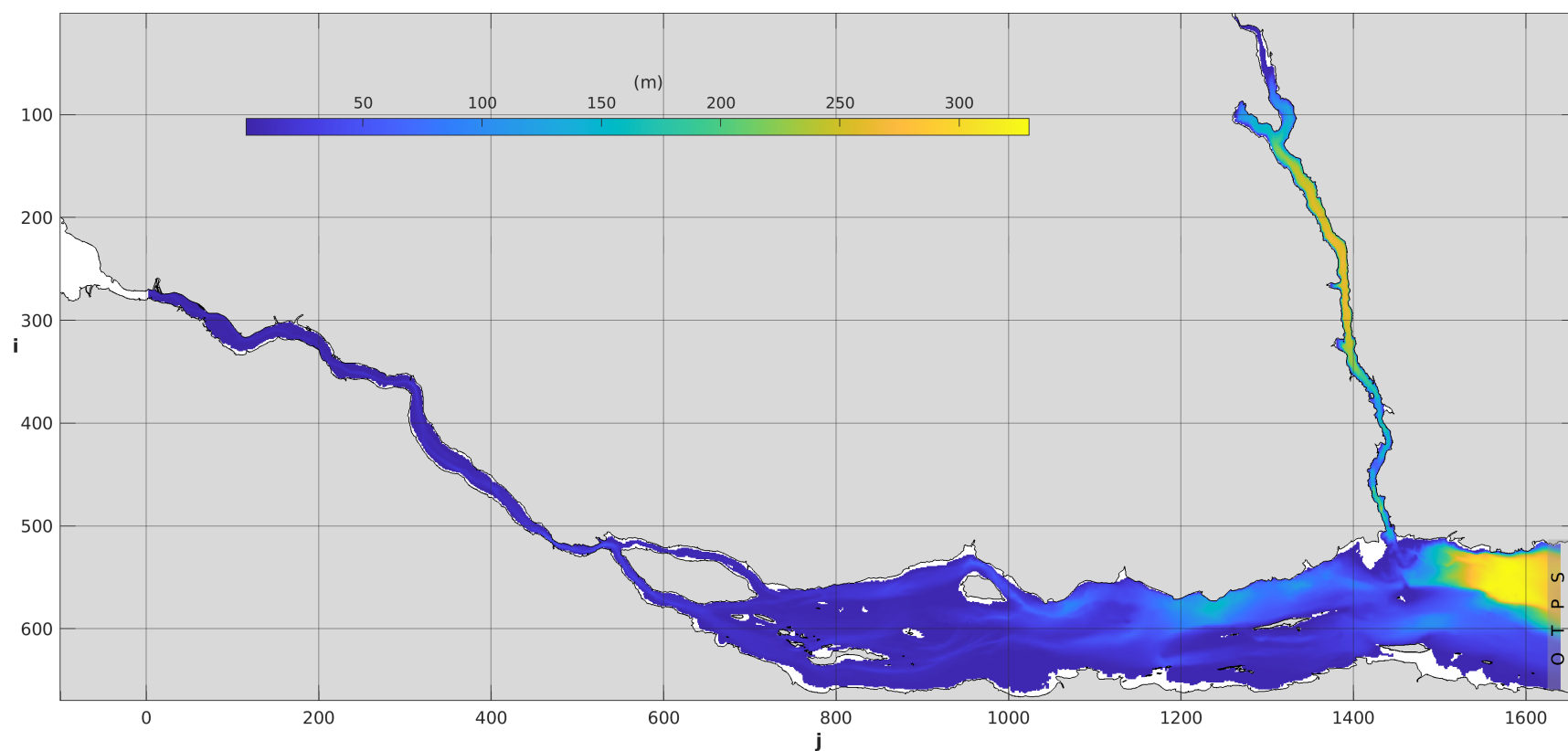


Figure 6. Bathymétrie du ESTL200, avec les indices i et j comme axes vertical et horizontal. Les composantes de marée du logiciel OTPS sont appliquées à la limite ouverte est.

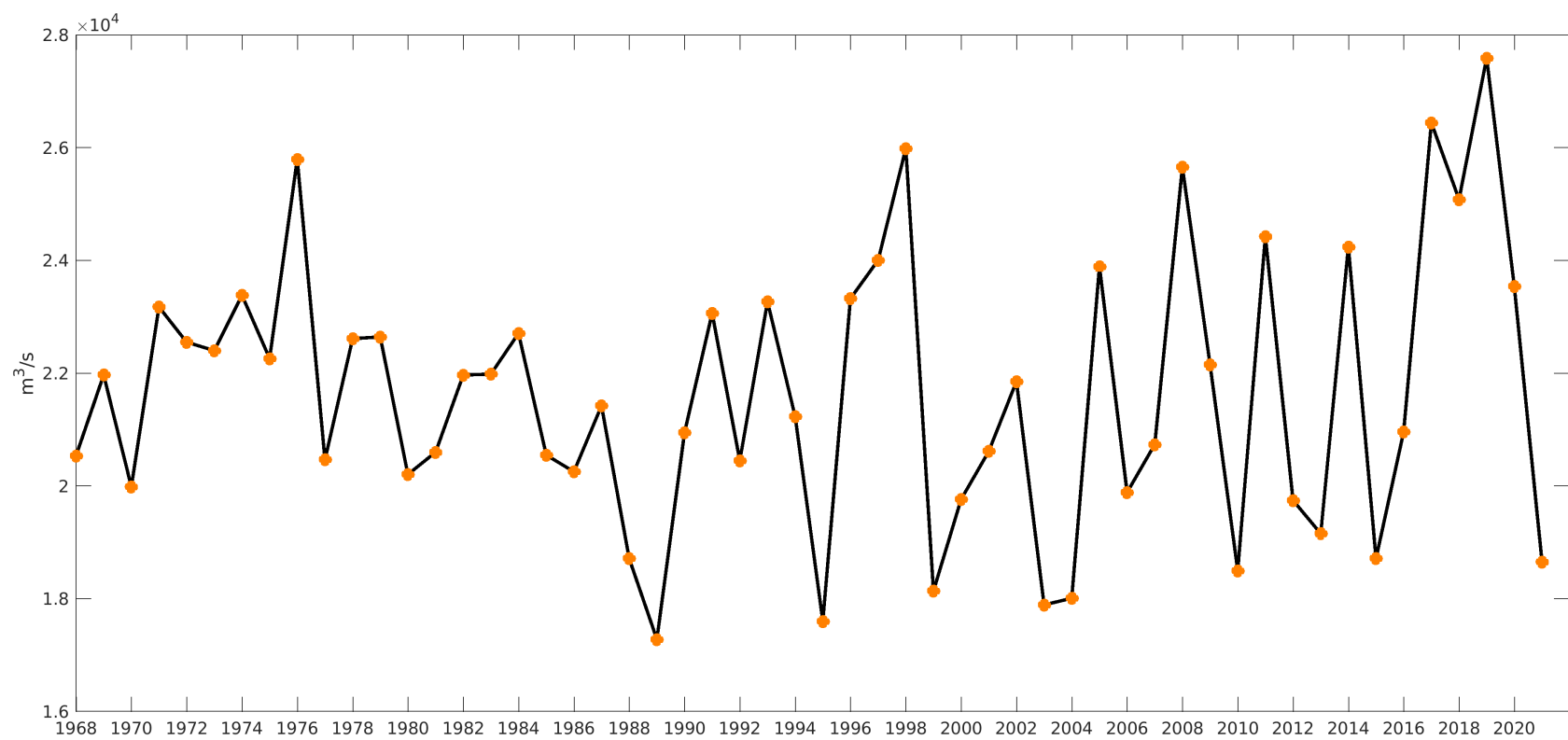


Figure 7. Ruissellement maximal du Saint-Laurent par année, pour la période de 1968 à 2021.

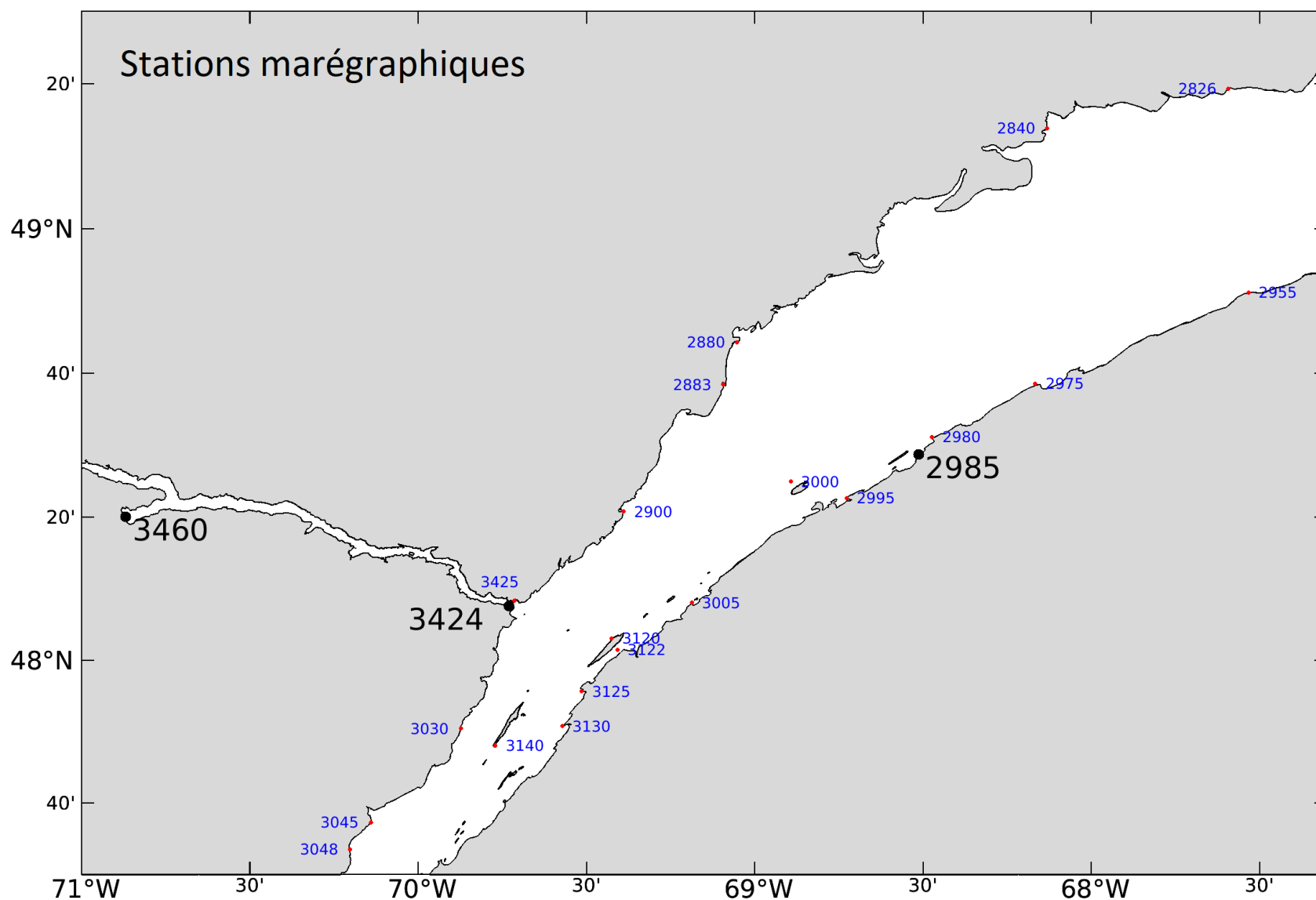


Figure 9. Stations marégraphiques pour la partie en aval de la zone modélisée. Les stations actives en temps réel sont indiquées en noir et les stations historiques en bleu.

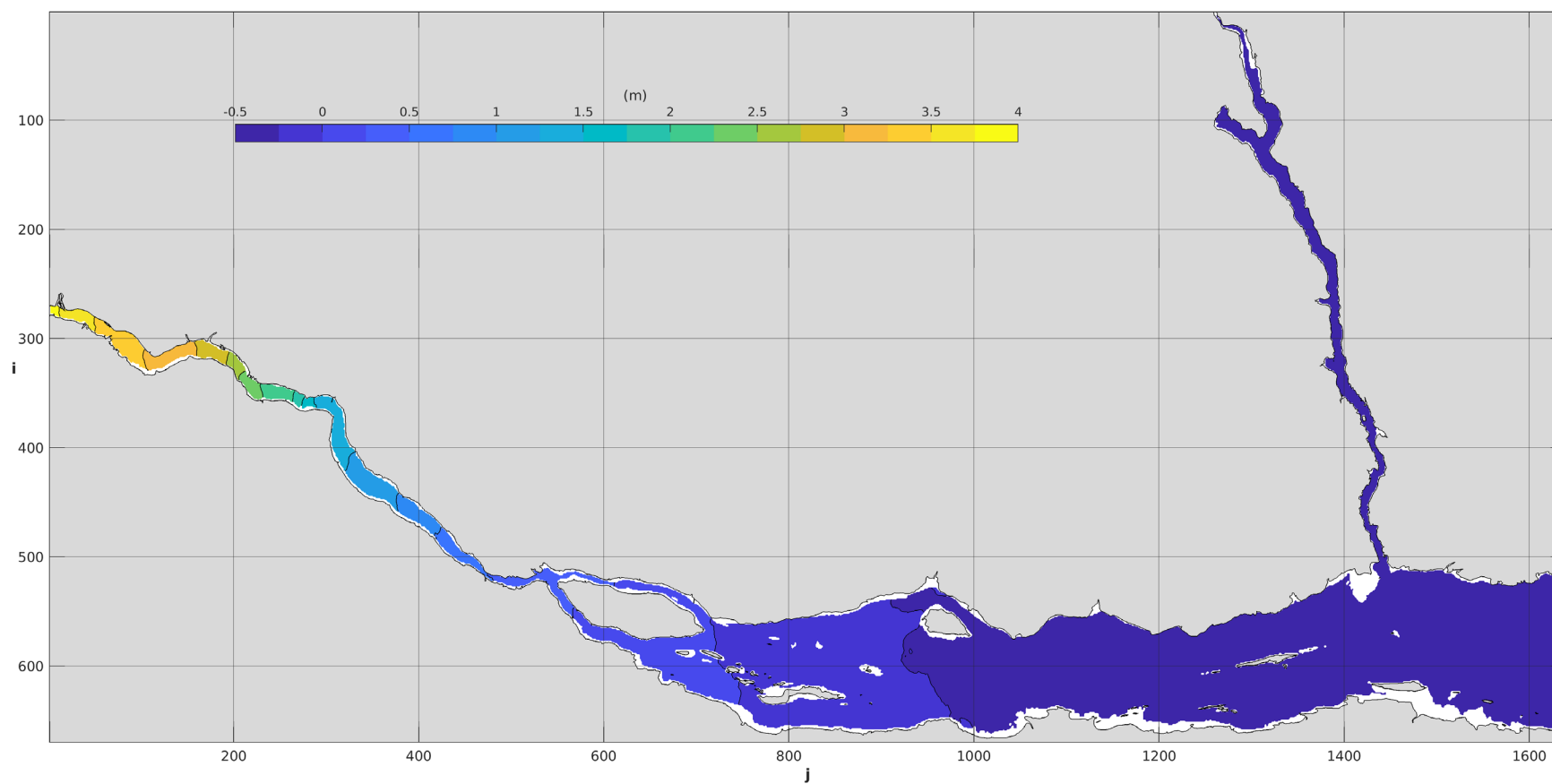


Figure 10. Carte de la hauteur moyenne (sur une période de 6 ans) de la surface de la mer (m) pour le domaine du ESTL200.

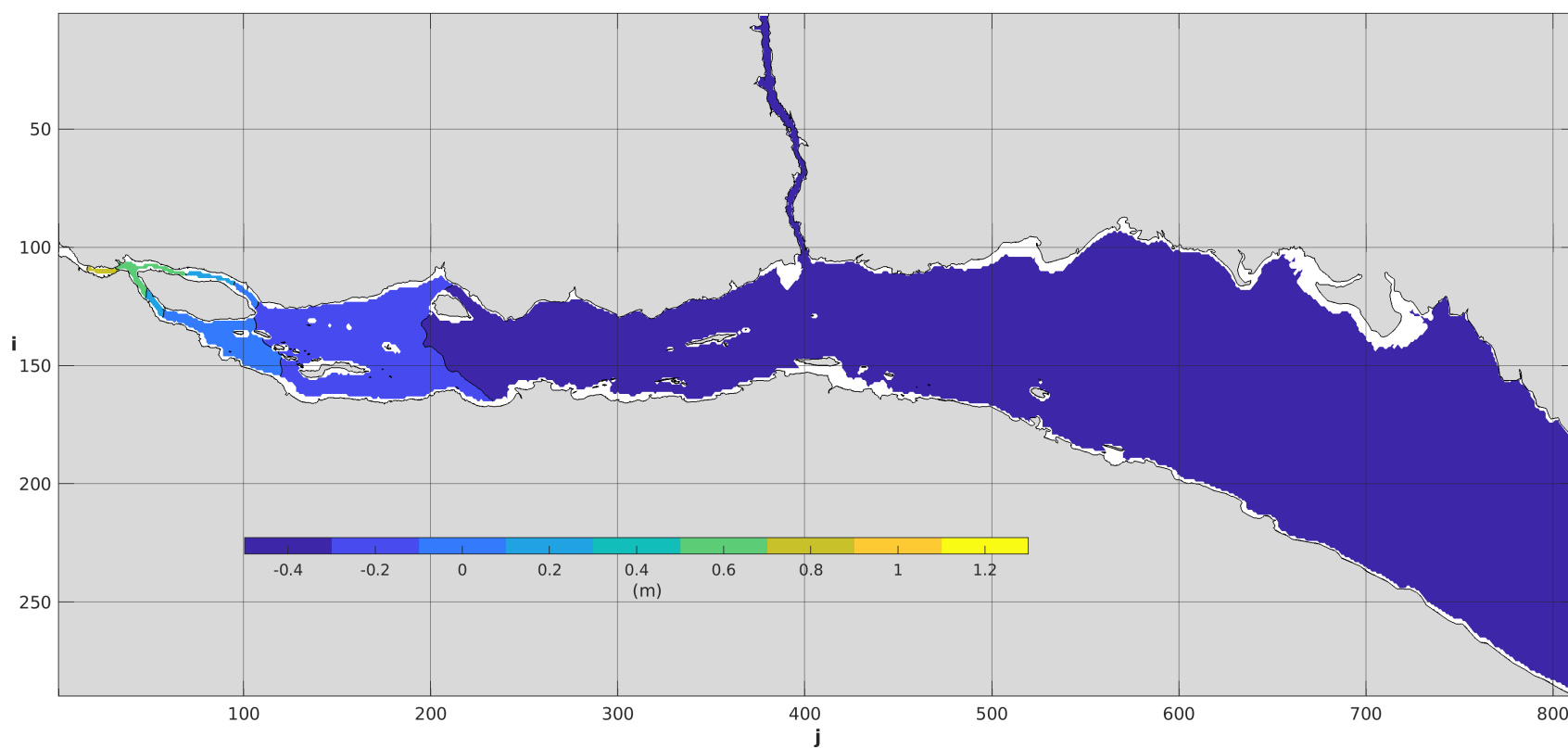


Figure 11. Carte de la hauteur moyenne (sur une période de 6 ans) de la surface de la mer (m) pour le domaine du ESTL500.

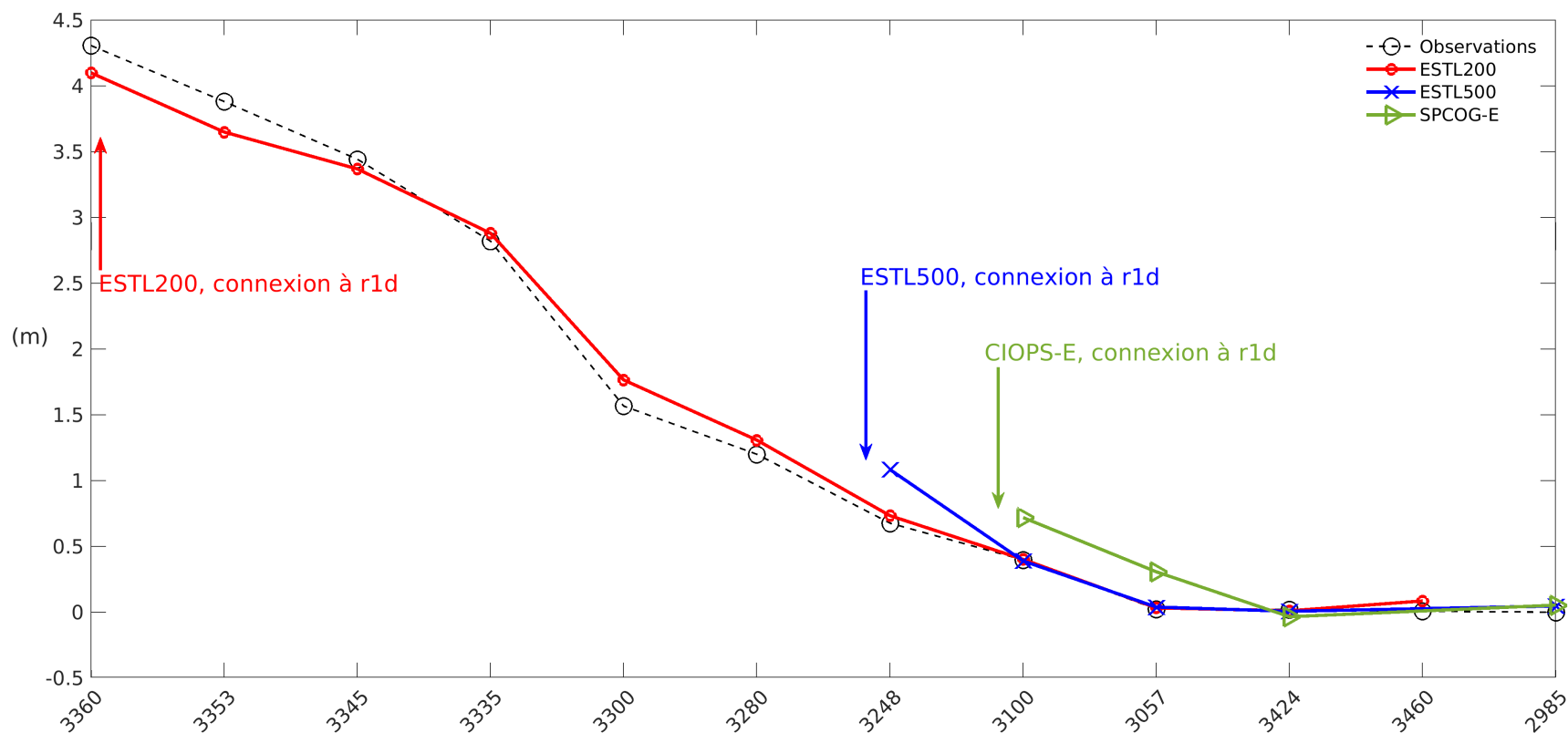


Figure 12. Hauteur moyenne (sur une période de 6 ans) de la surface de la mer pour les trois modèles et les observations (ligne noire en pointillés). Le ESTL200 est indiqué en rouge, le ESTL500 en bleu et le SPCOG-E (CIOPS-E) en vert. L'emplacement approximatif de la connexion avec le modèle r1d est indiqué par une flèche.

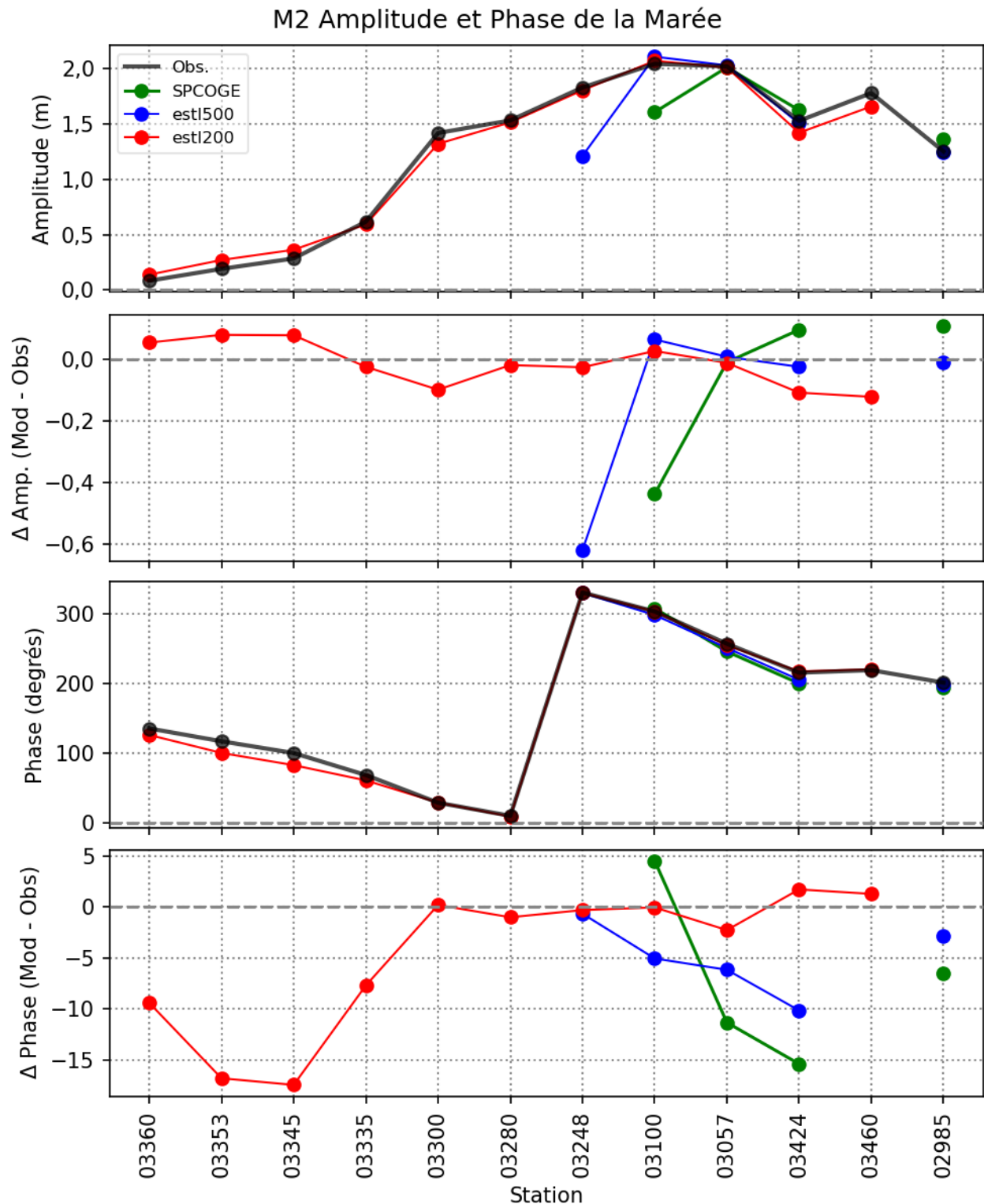


Figure 13. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante M2 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques actives (voir la carte des stations marégraphiques sur la Figure 8 et la Figure 9).

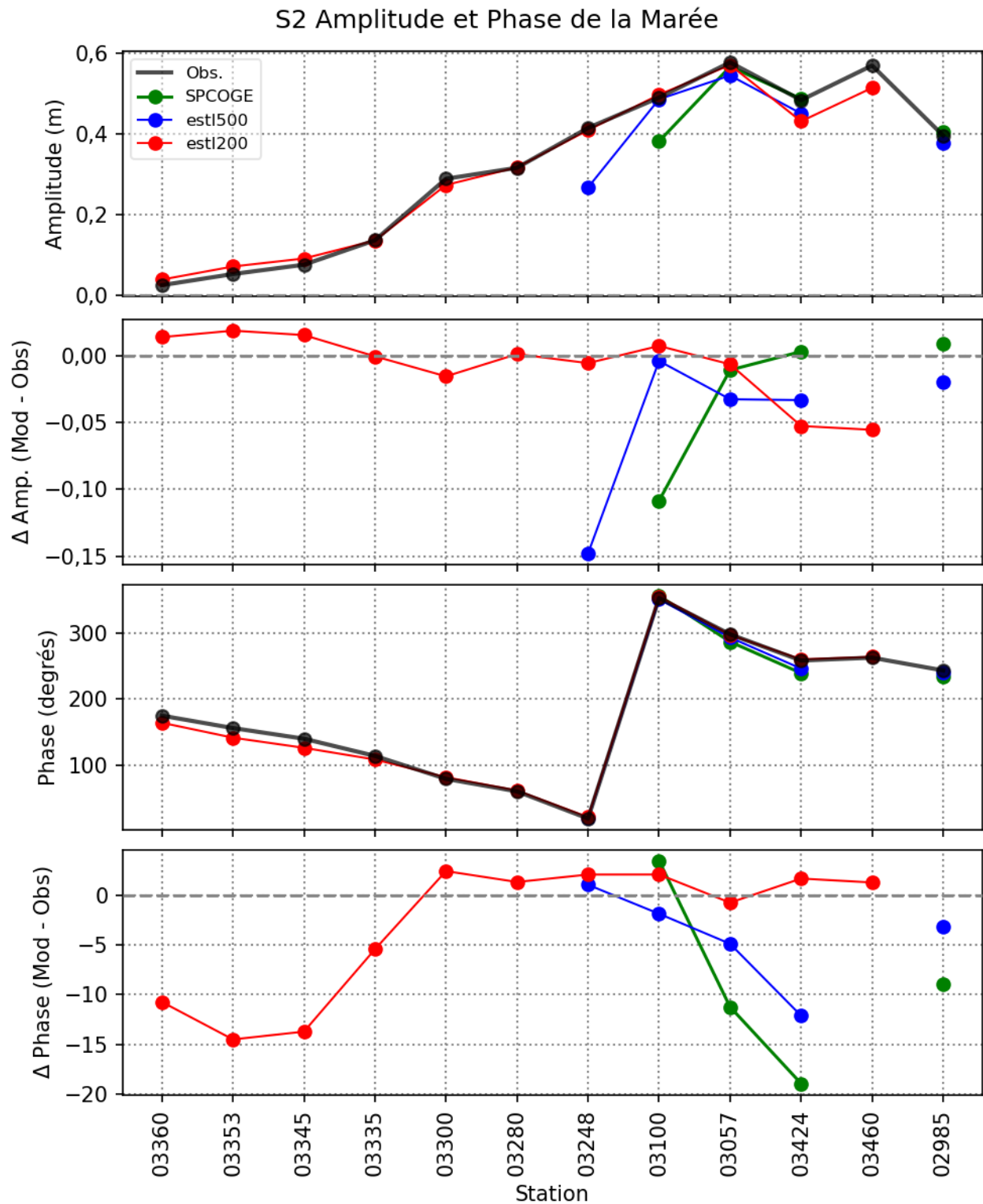


Figure 14. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante S2 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques actives (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

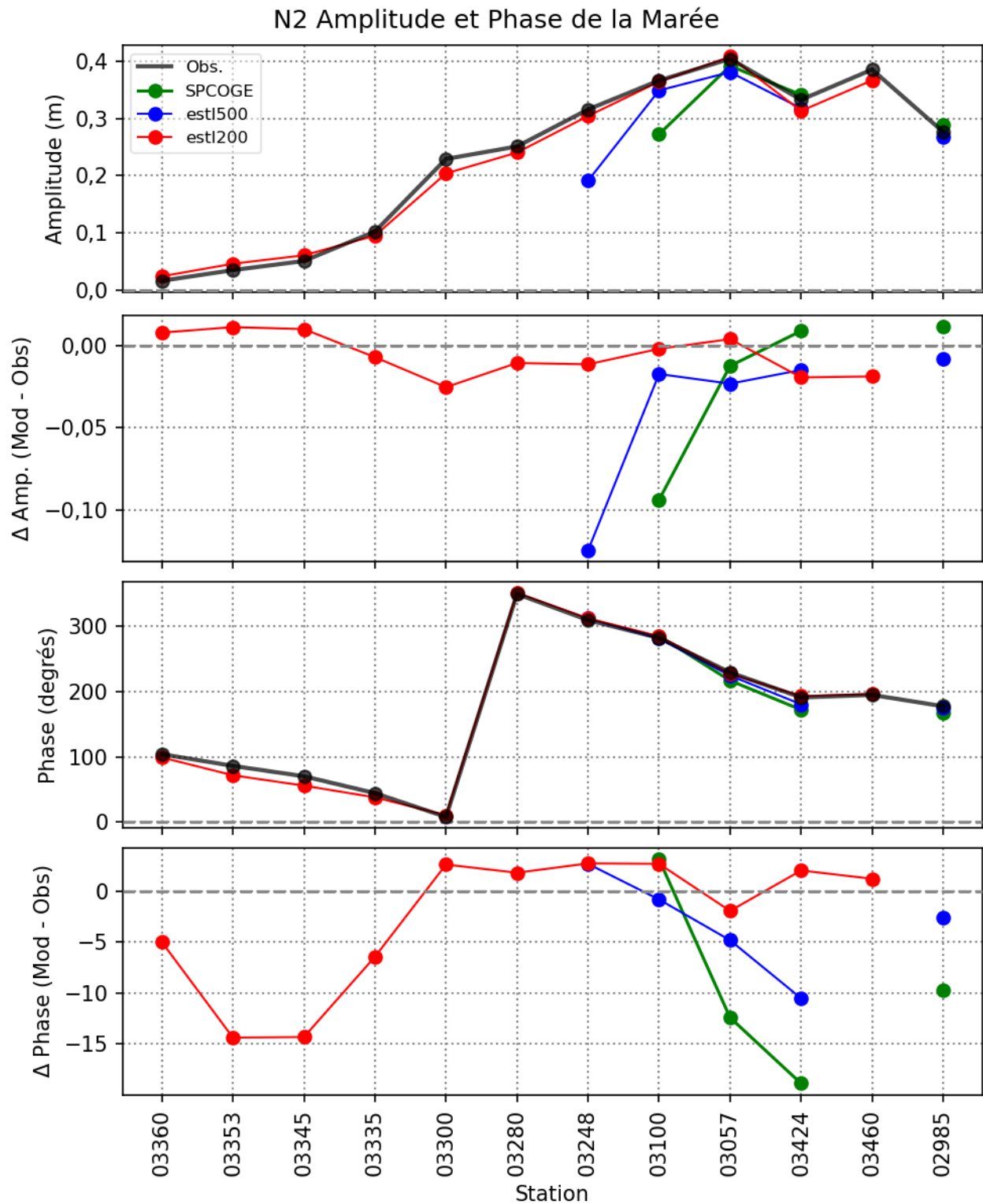


Figure 15. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante N2 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques actives (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

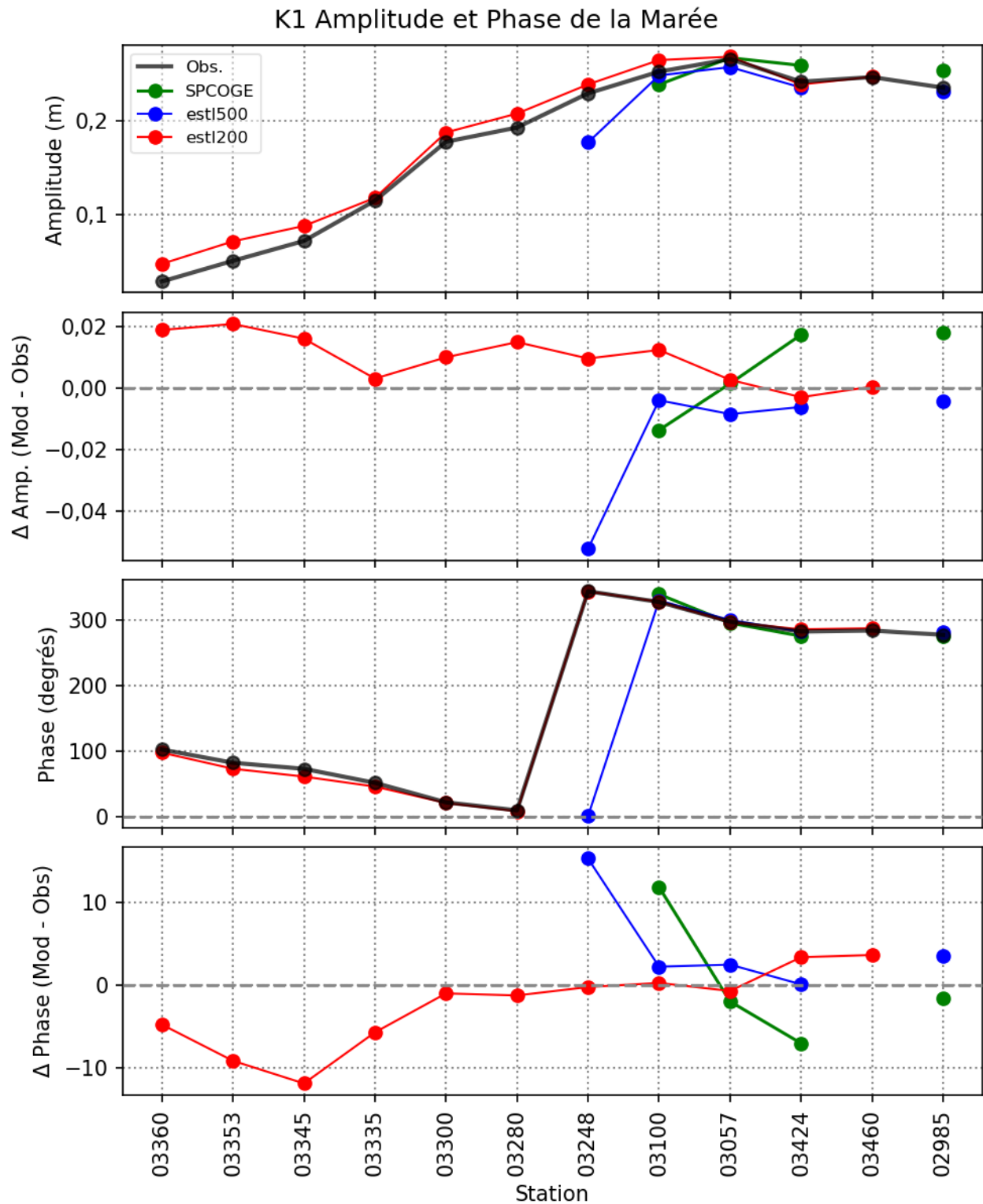


Figure 16. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante K1 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques actives (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

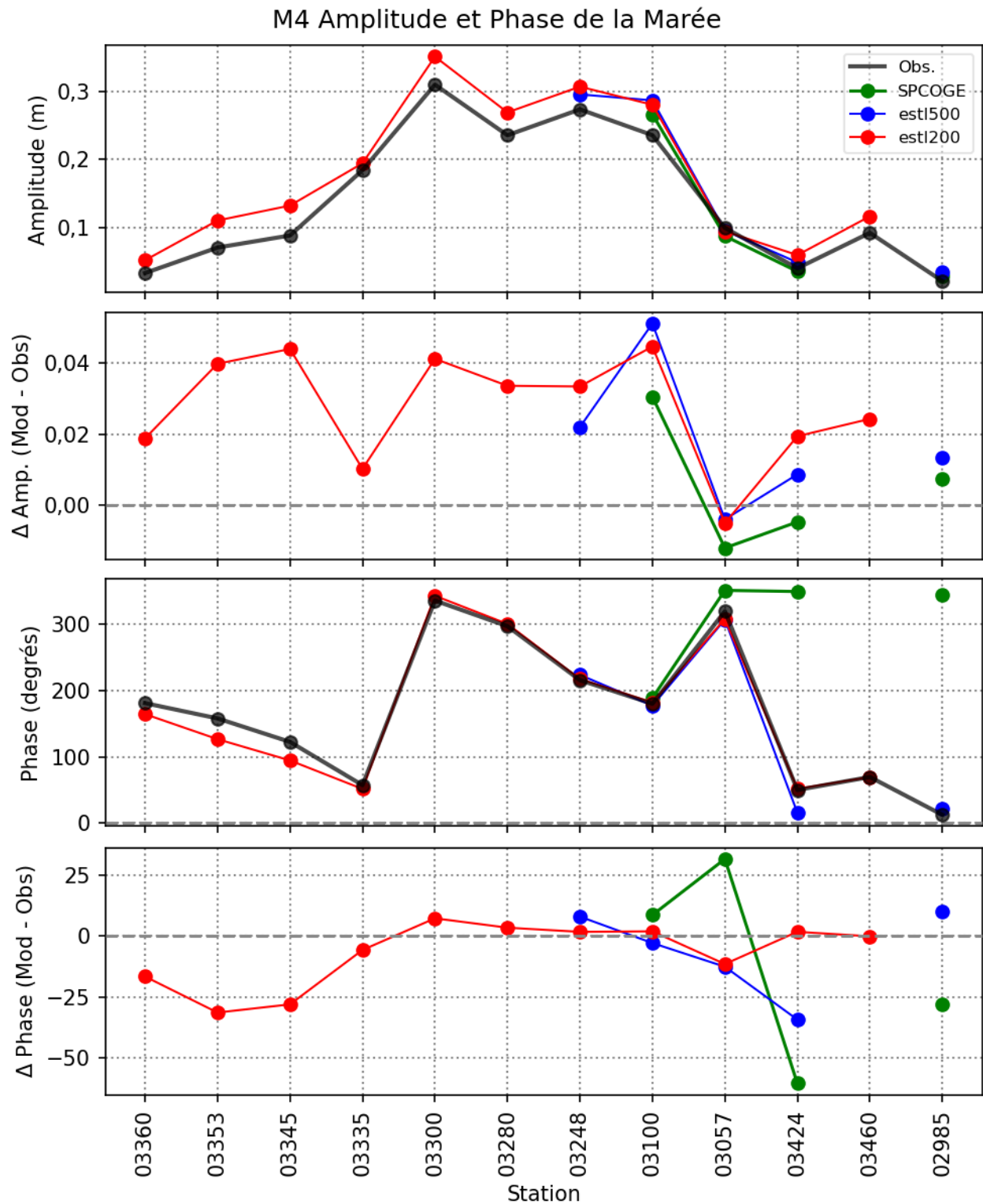


Figure 17. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante M4 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques actives (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

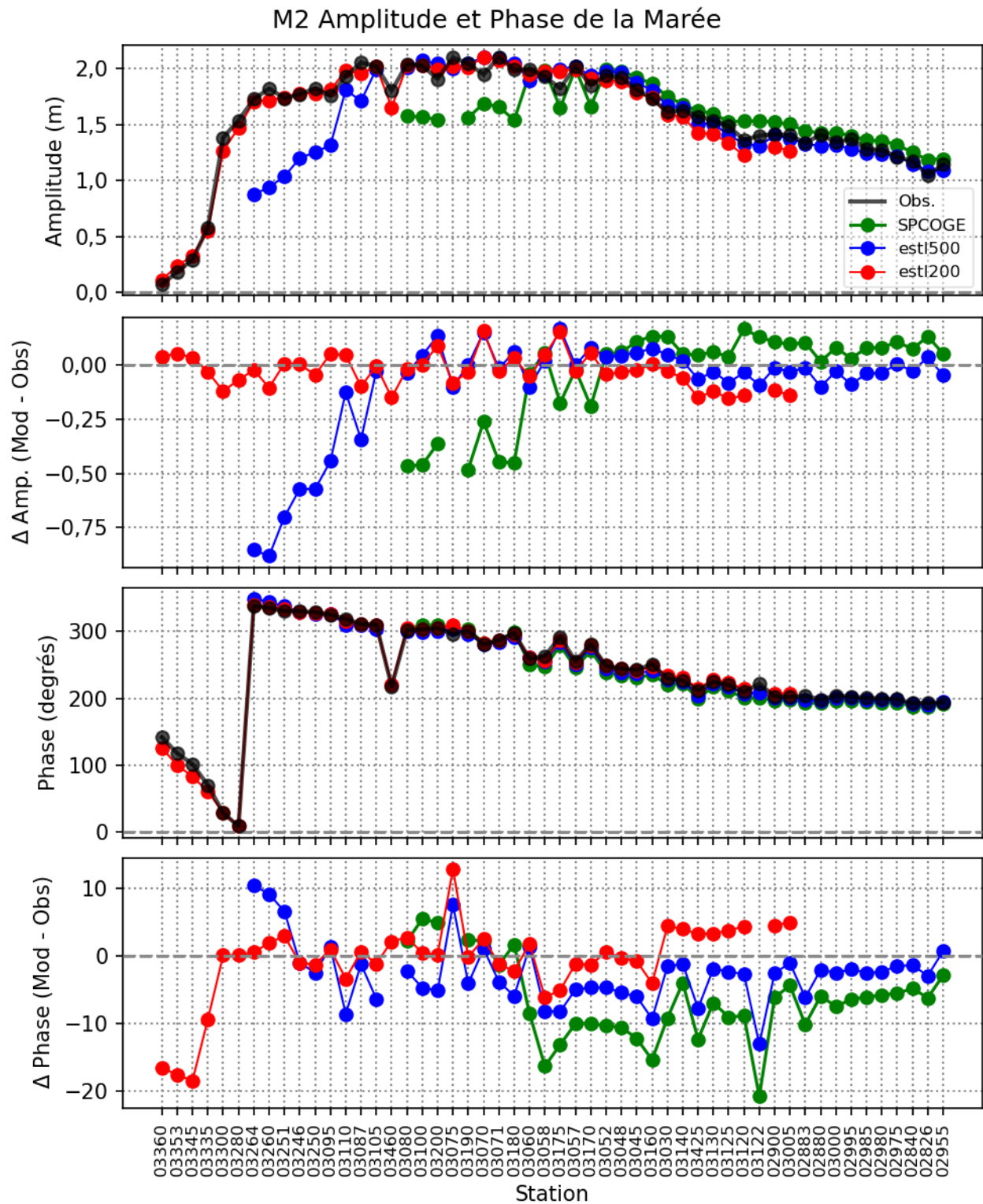


Figure 18. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante M2 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques historiques (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

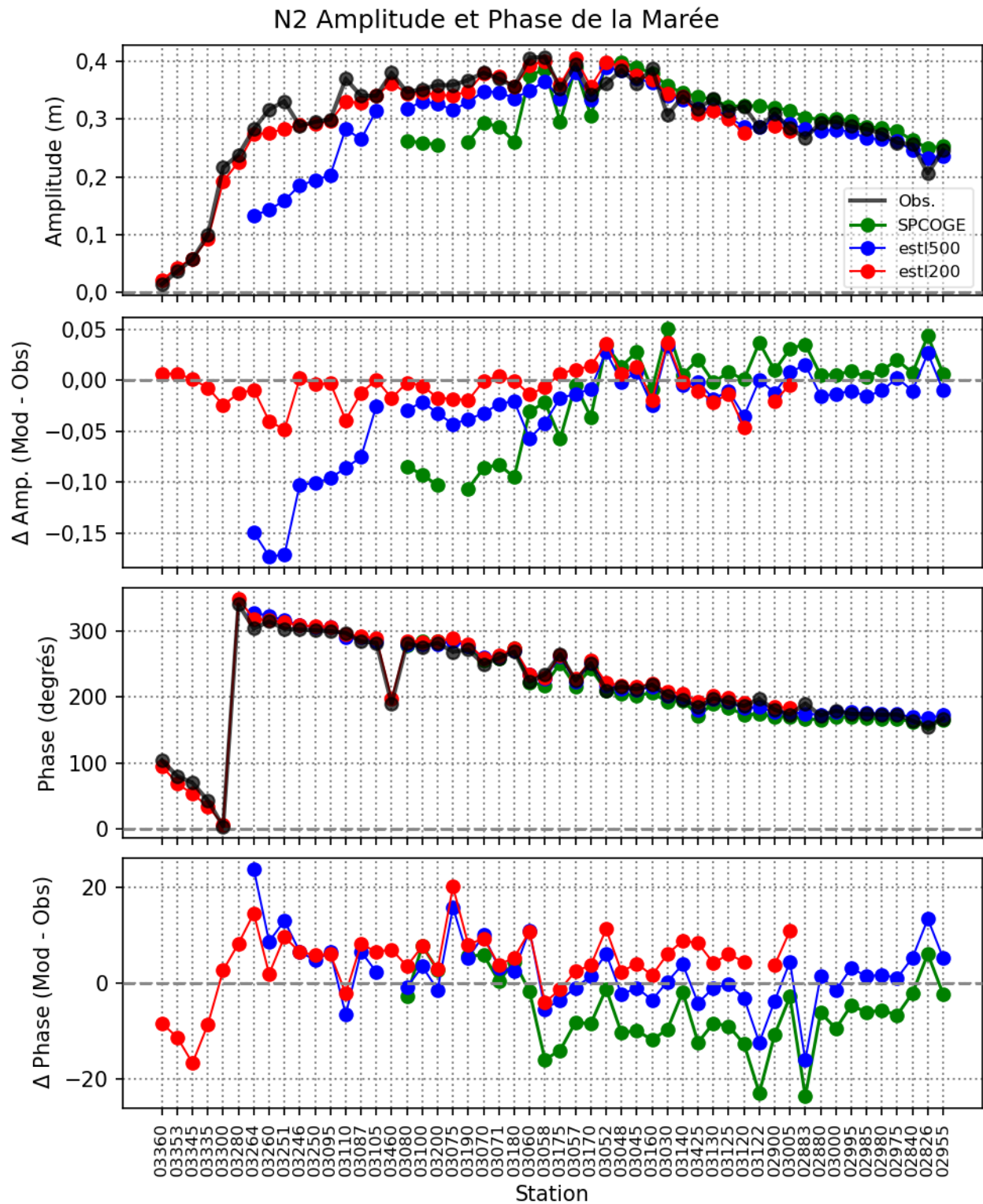


Figure 19. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante N2 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques historiques (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

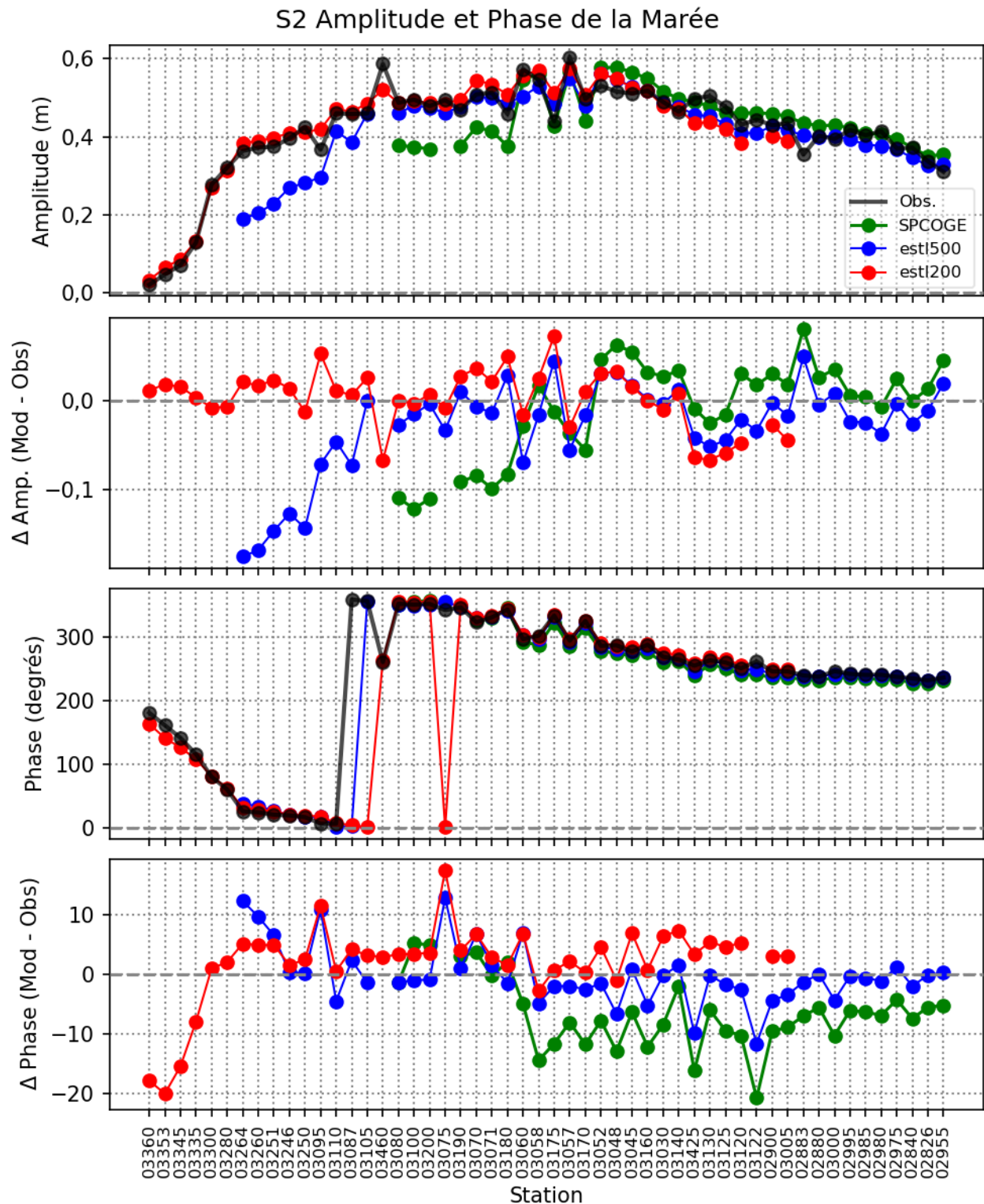


Figure 20. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante S2 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques historiques (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

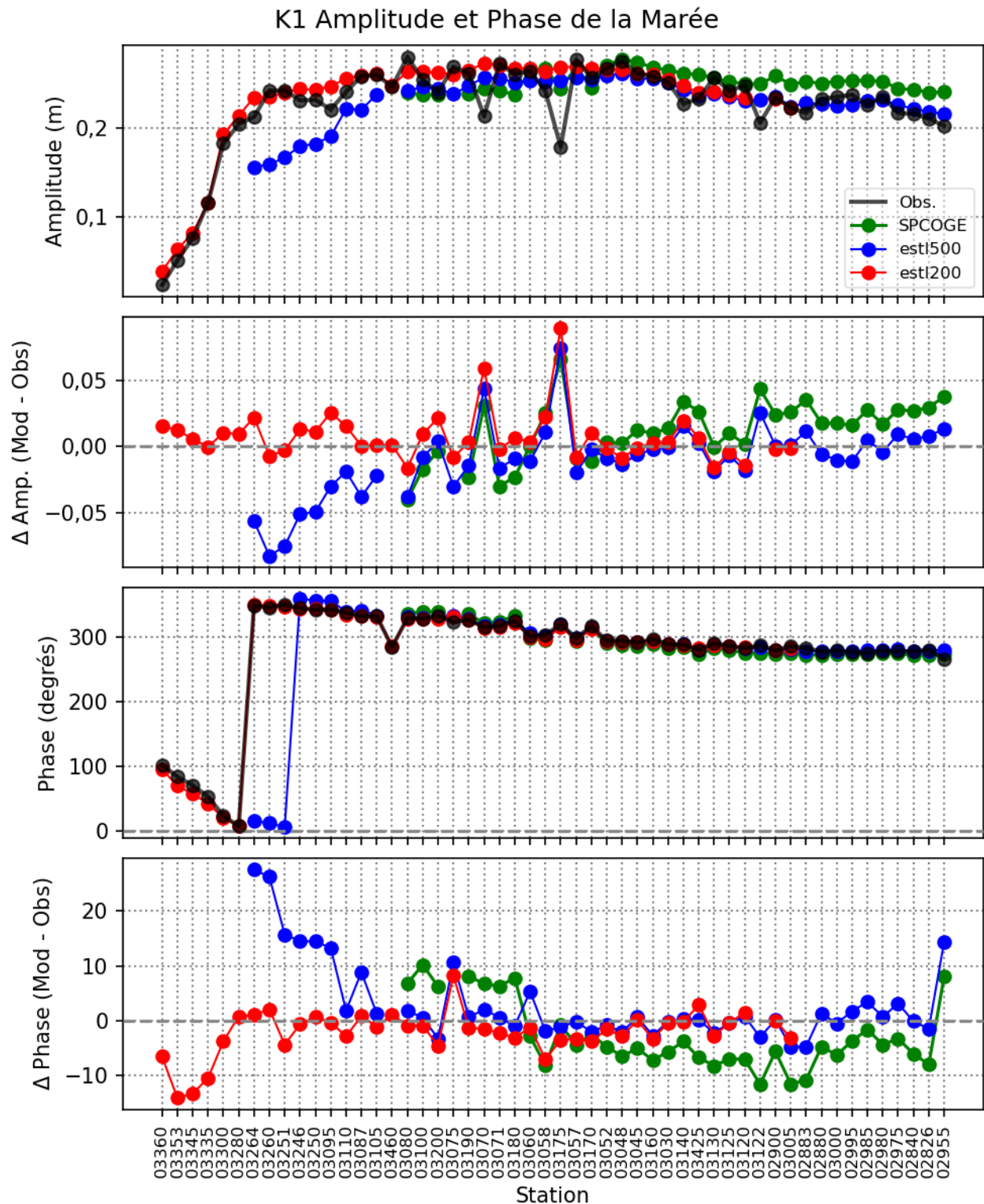


Figure 21. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante K1 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques historiques (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

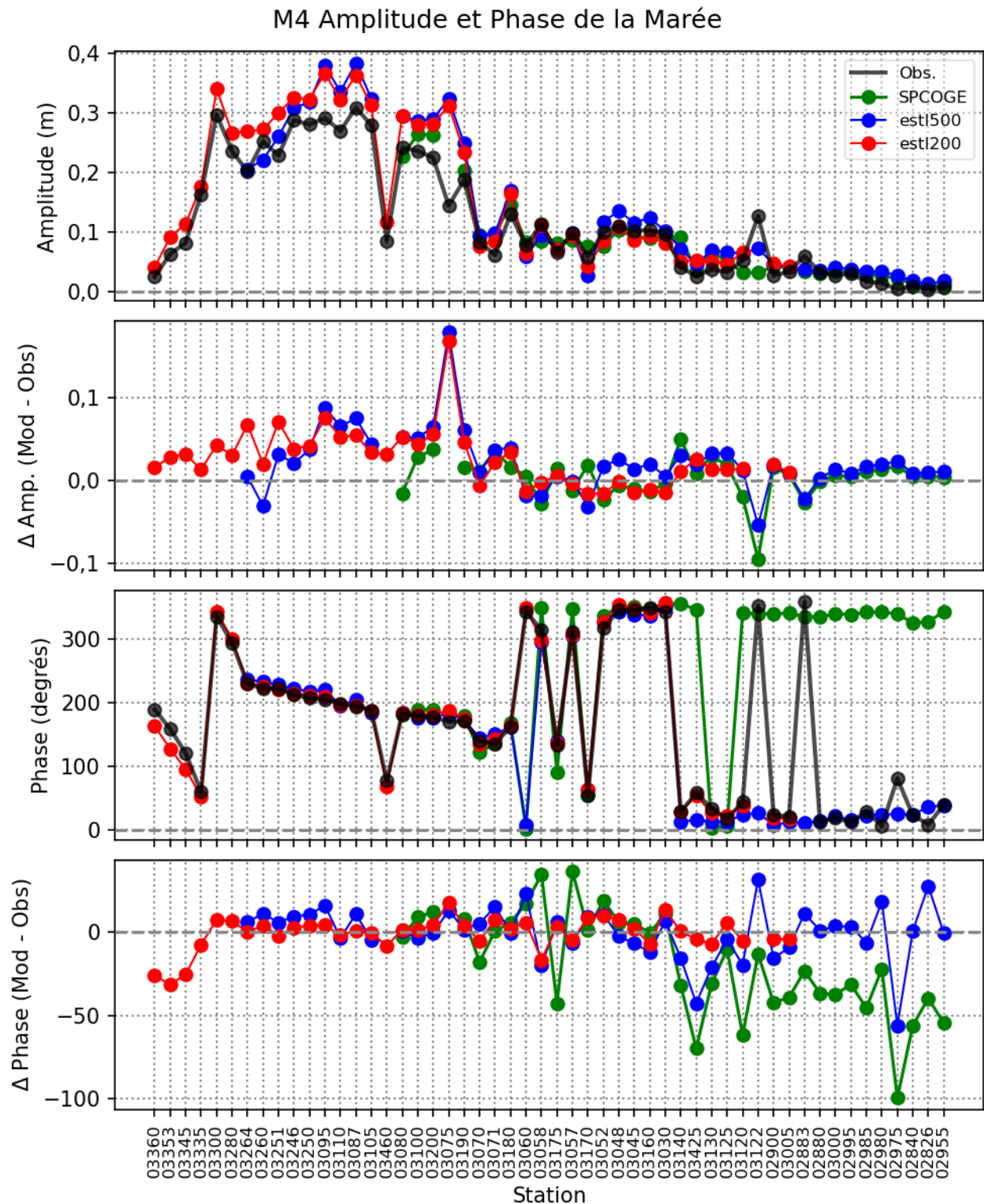


Figure 22. Amplitude (panneaux 1 et 2) et phase (panneaux 3 et 4) de la composante M4 des marées dans les trois modèles comparativement aux observations aux stations marégraphiques historiques (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

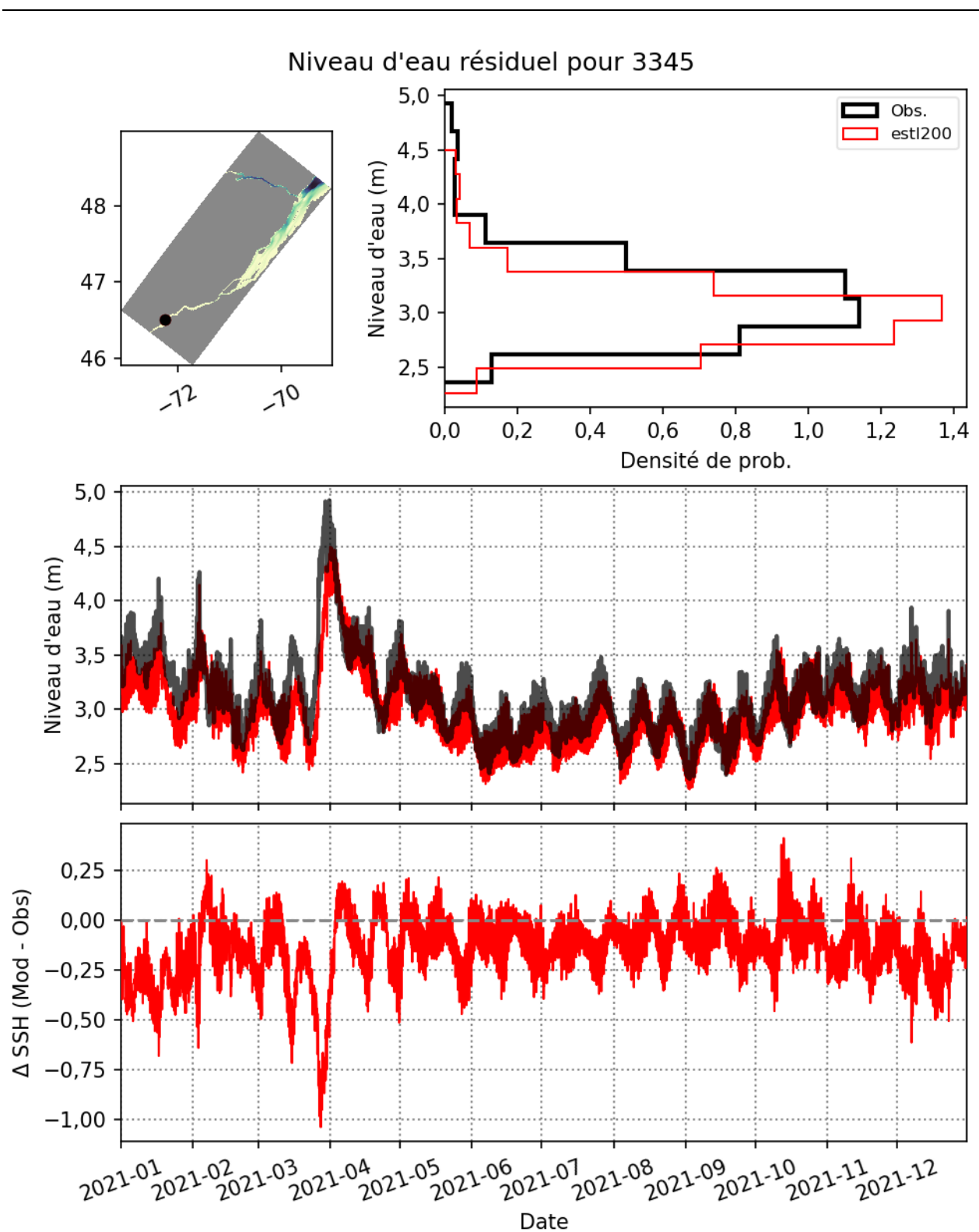


Figure 23. Niveau d'eau résiduel à la station 3345 pour l'année 2021.

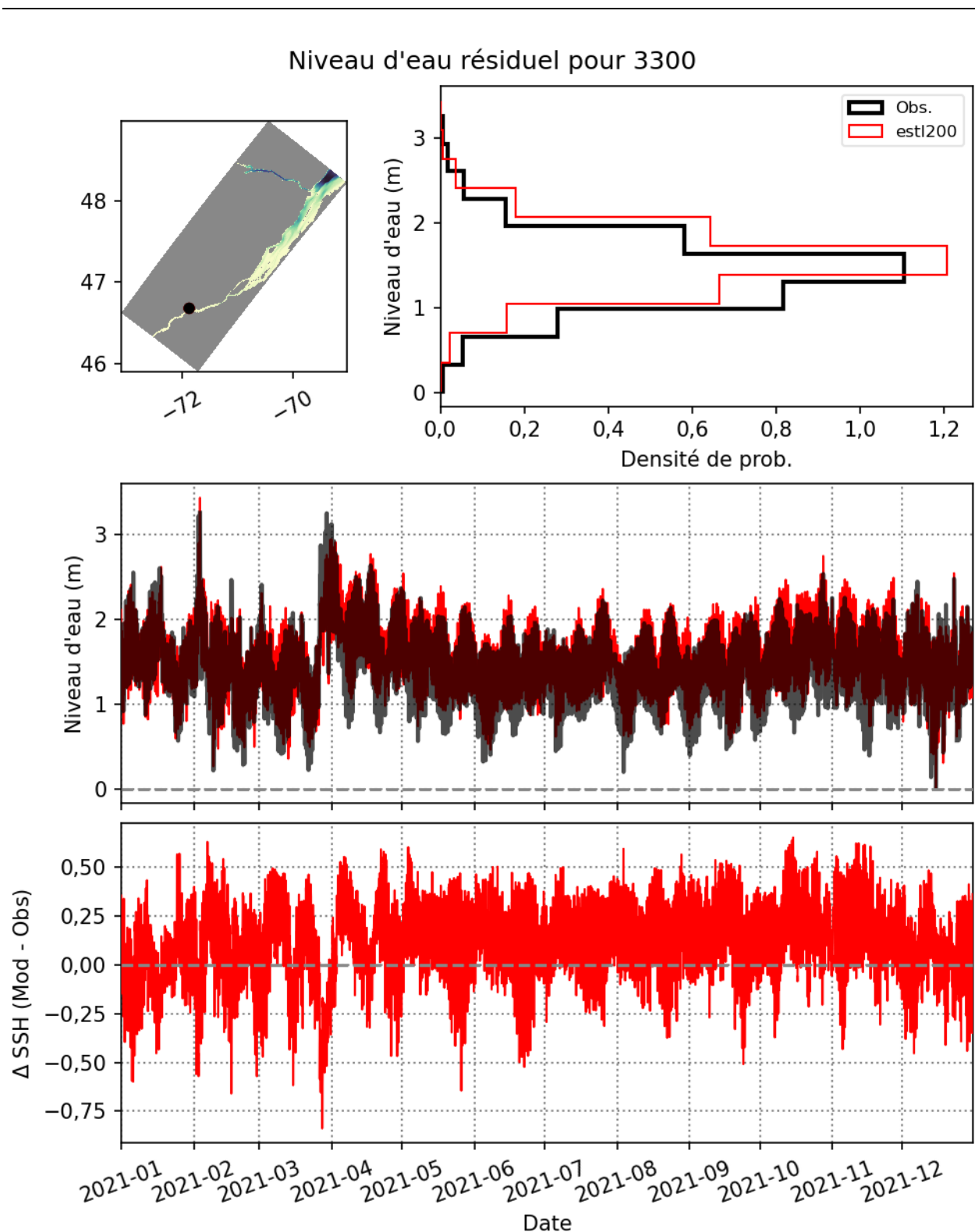


Figure 24. Niveau d'eau résiduel à la station 3300 pour l'année 2021.

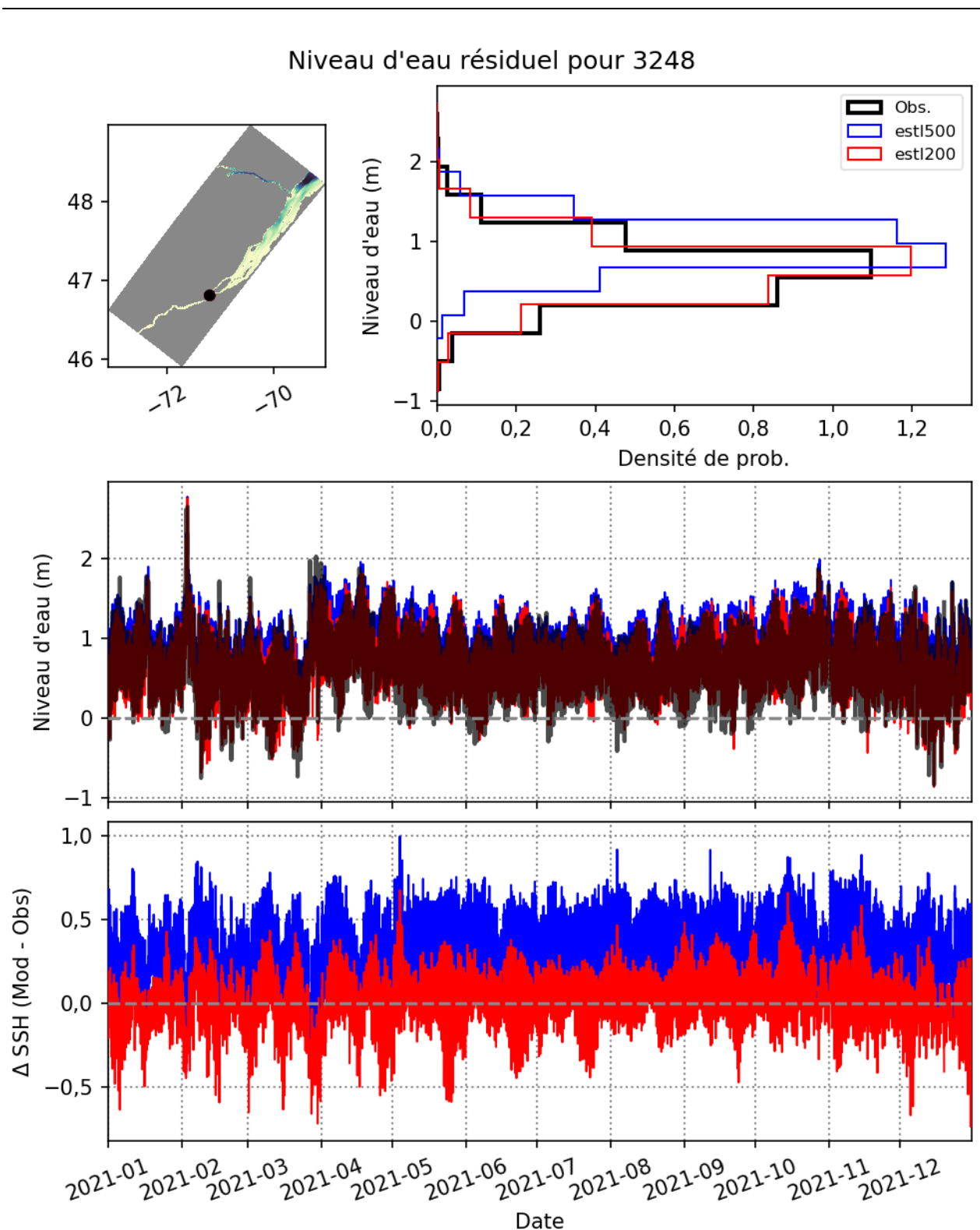


Figure 25. Niveau d'eau résiduel à la station 3248 pour l'année 2021.

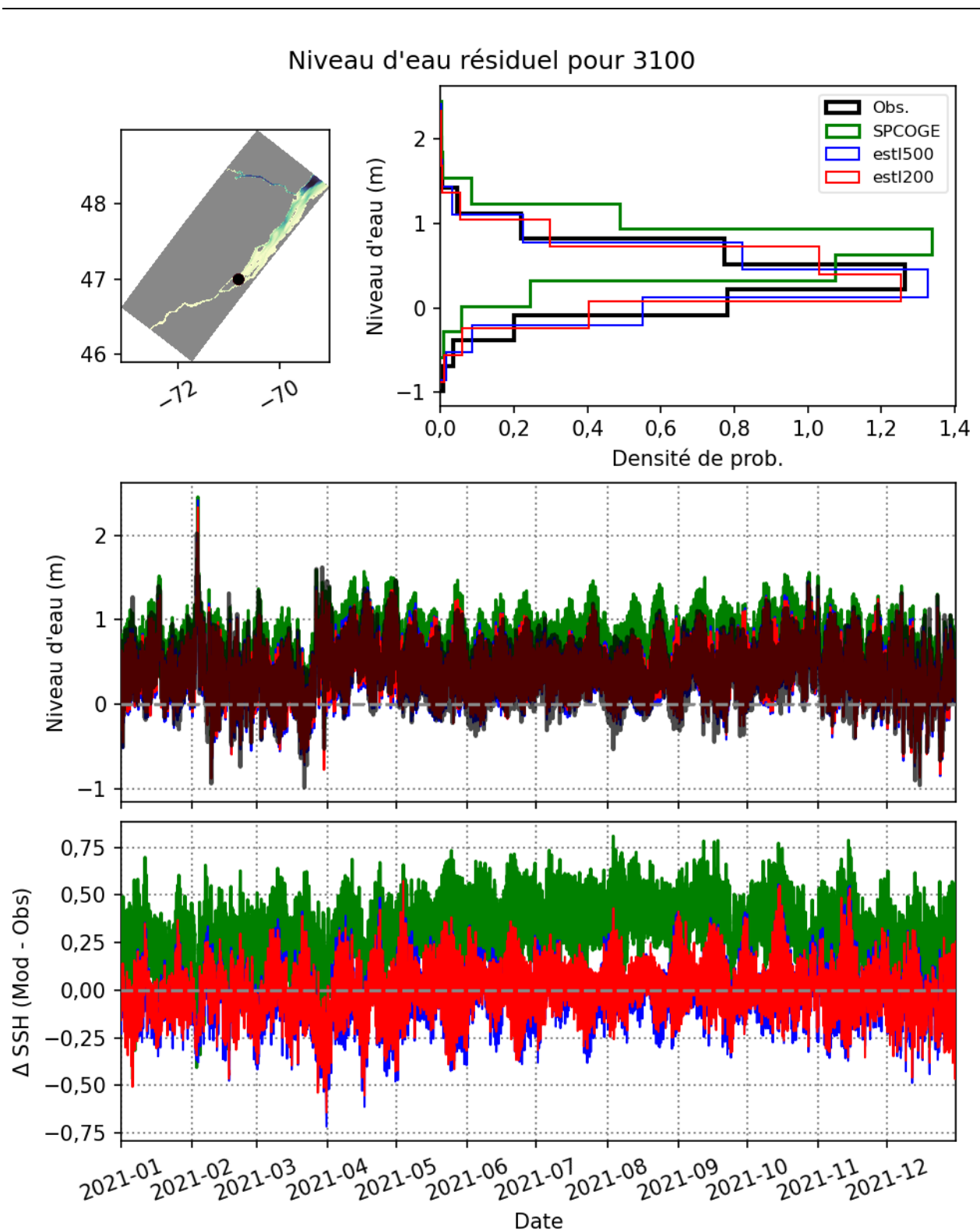


Figure 26. Niveau d'eau résiduel à la station 3100 pour l'année 2021.

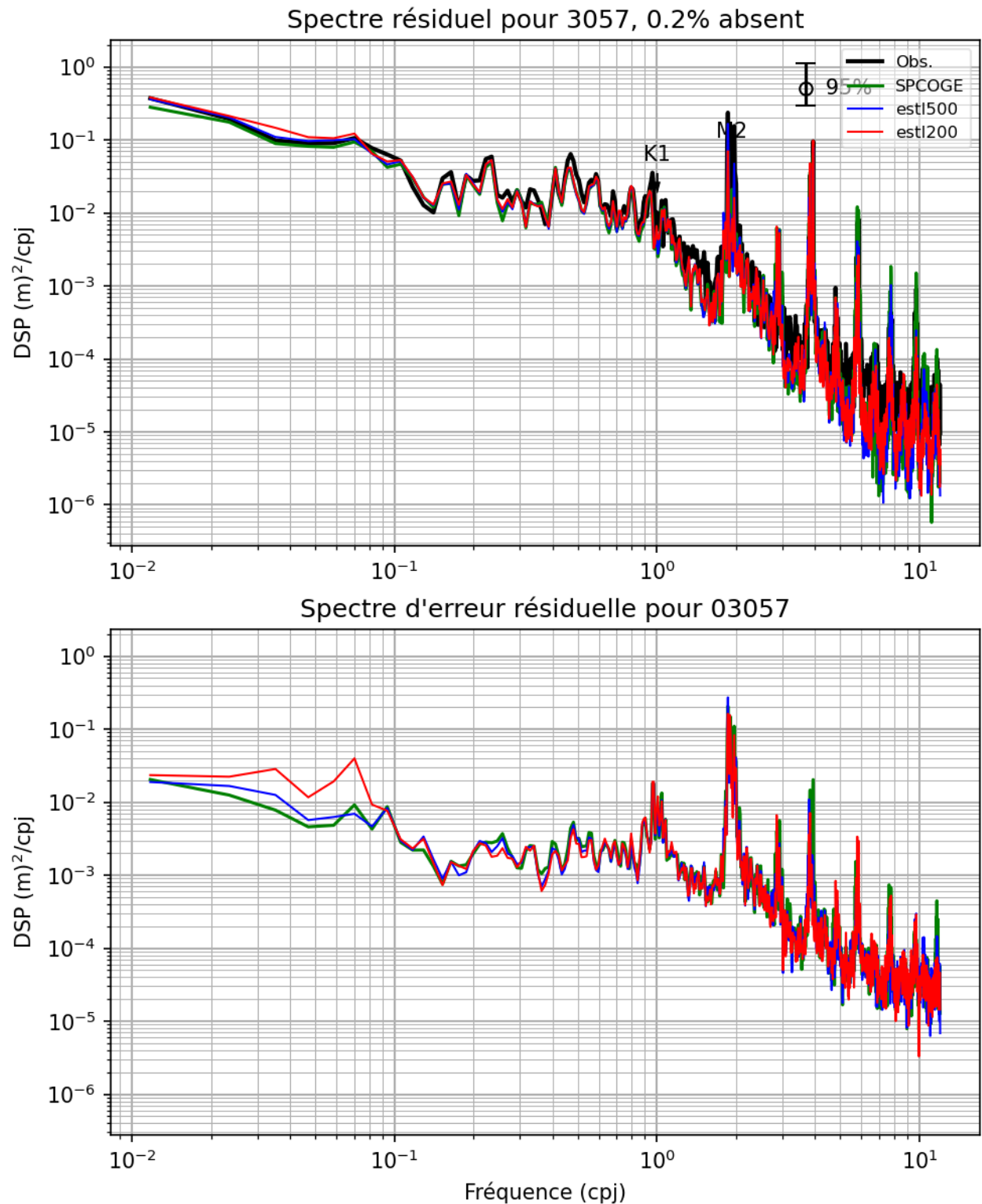


Figure 27. Spectre du niveau d'eau résiduel (panneau supérieur) et spectre d'erreur (panneau inférieur) à la station 3057 pour l'année 2021.

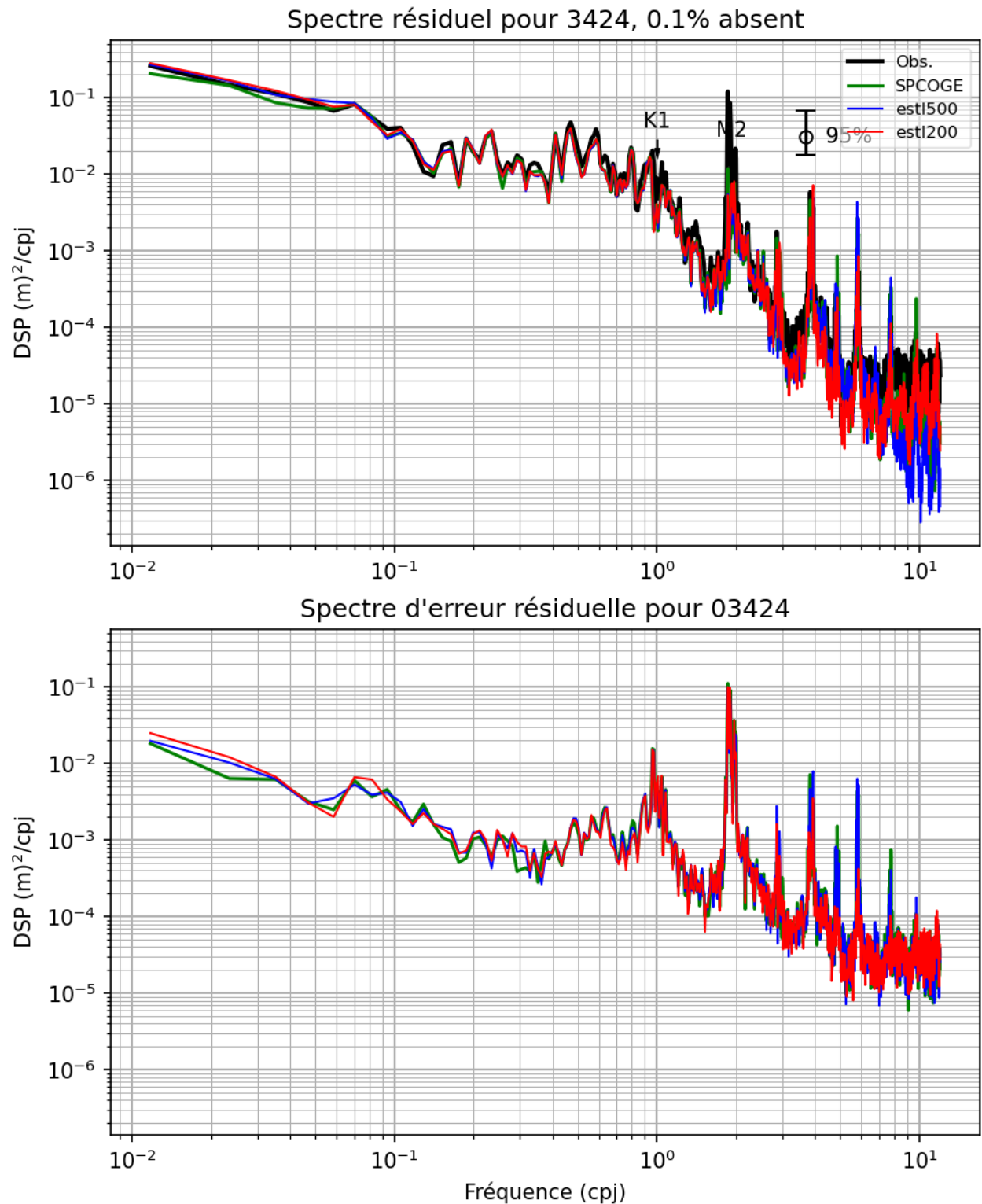


Figure 28. Spectre du niveau d'eau résiduel (panneau supérieur) et spectre d'erreur (panneau inférieur) à la station 3424 pour l'année 2021.

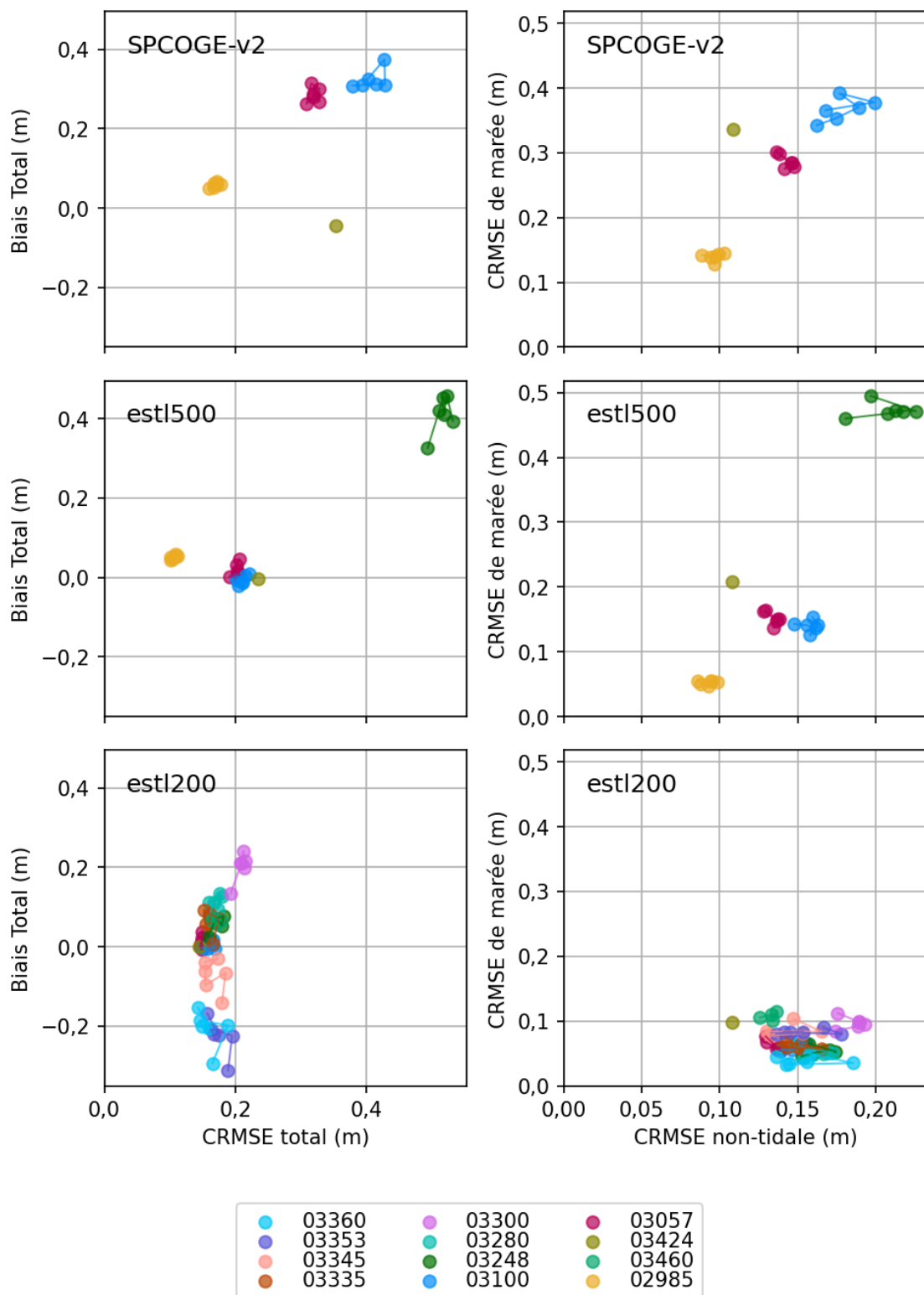


Figure 29. Résumé de la stabilité temporelle des scores du niveau d'eau pour chaque station et chaque modèle. Pour le niveau d'eau total (panneaux de gauche), le biais est sur l'axe vertical et la CRMSE sur l'axe horizontal. Les panneaux de droite montrent la CRMSE avec marée sur l'axe vertical et la CRMSE sans marée sur l'axe horizontal. Chaque point représente un seul score annuel.

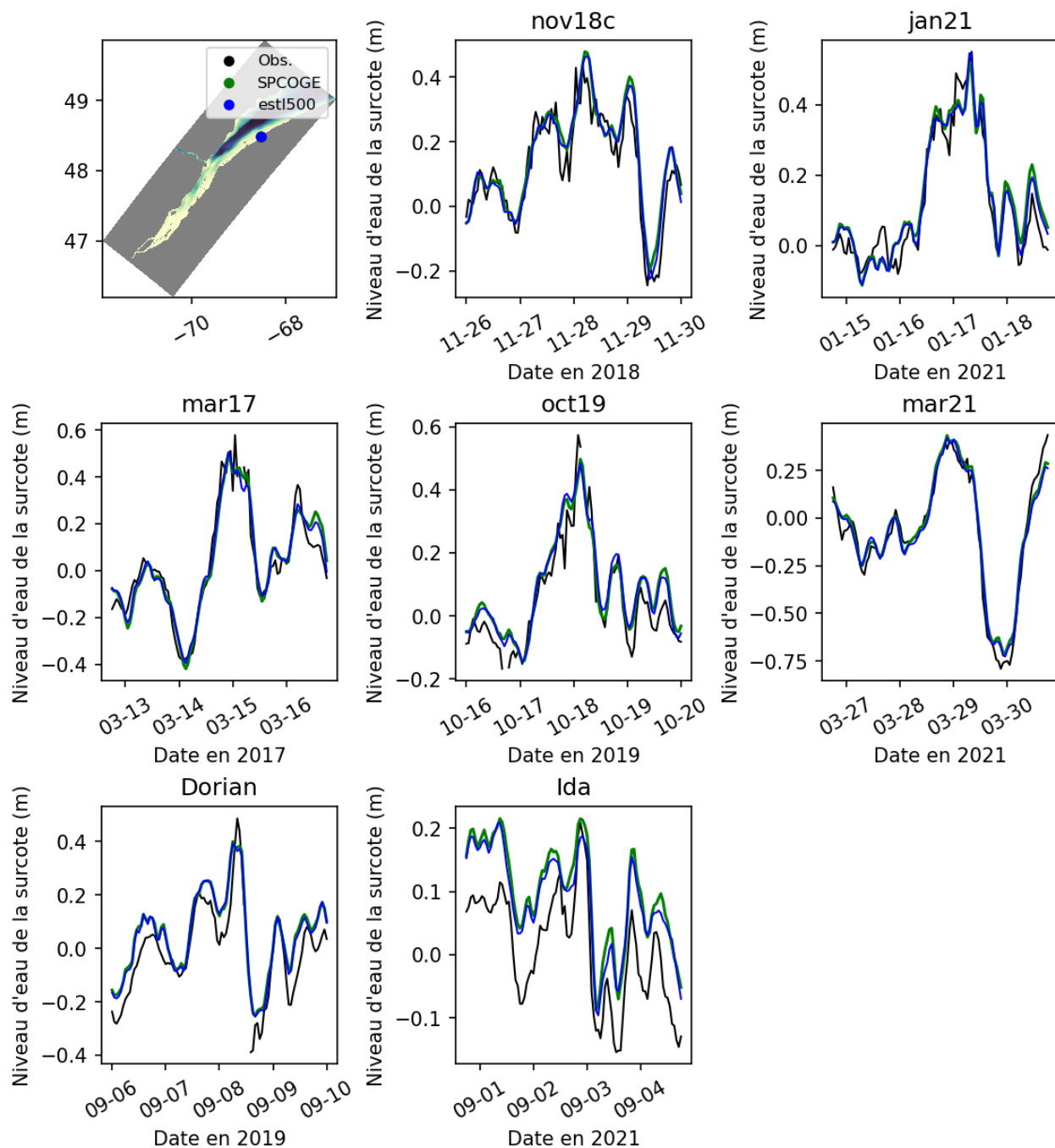


Figure 30. Niveau d'eau résiduel pour les 7 tempêtes choisies à la station 2985.

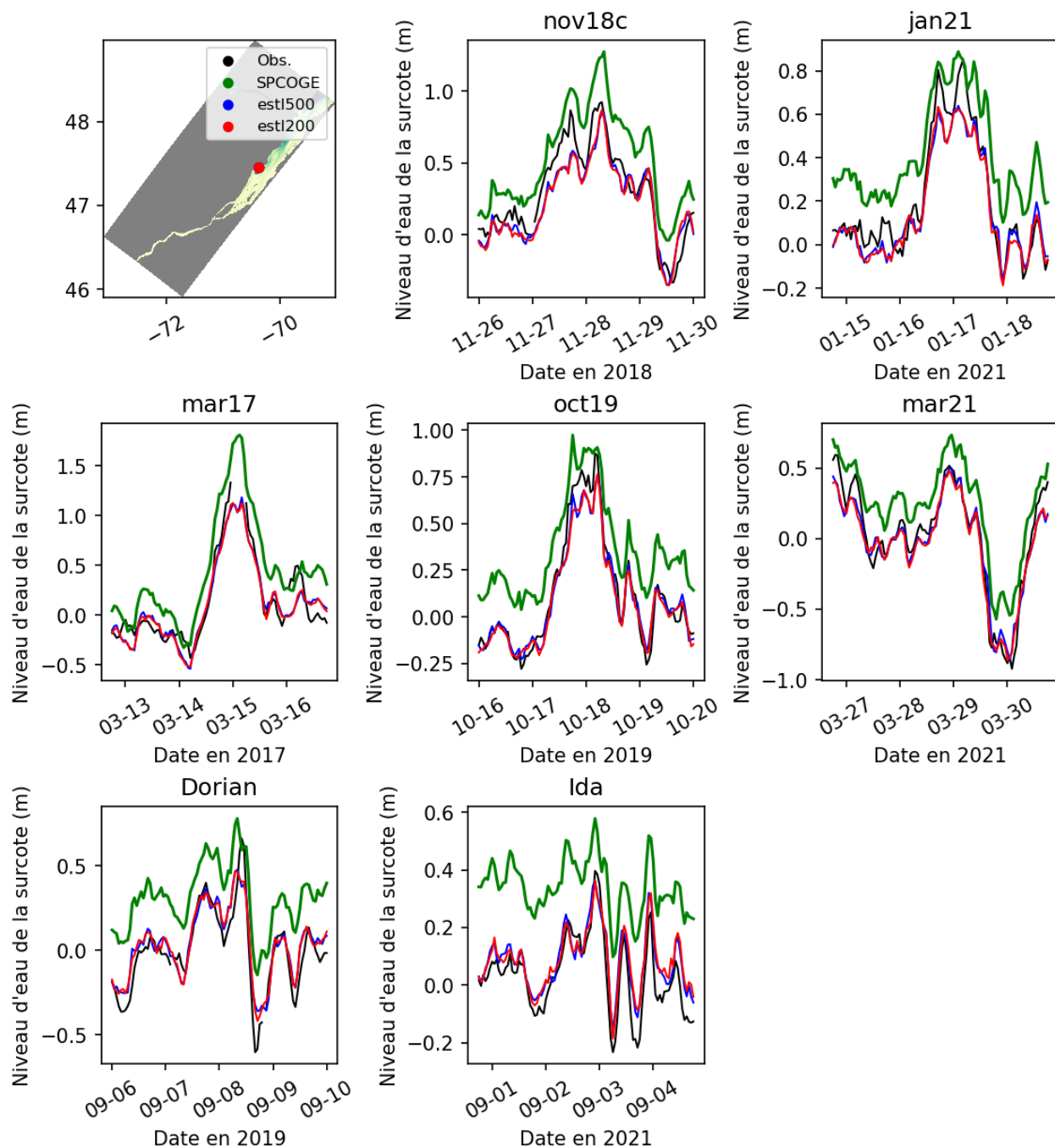


Figure 31. Niveau d'eau résiduel pour les 7 tempêtes choisies à la station 3057.

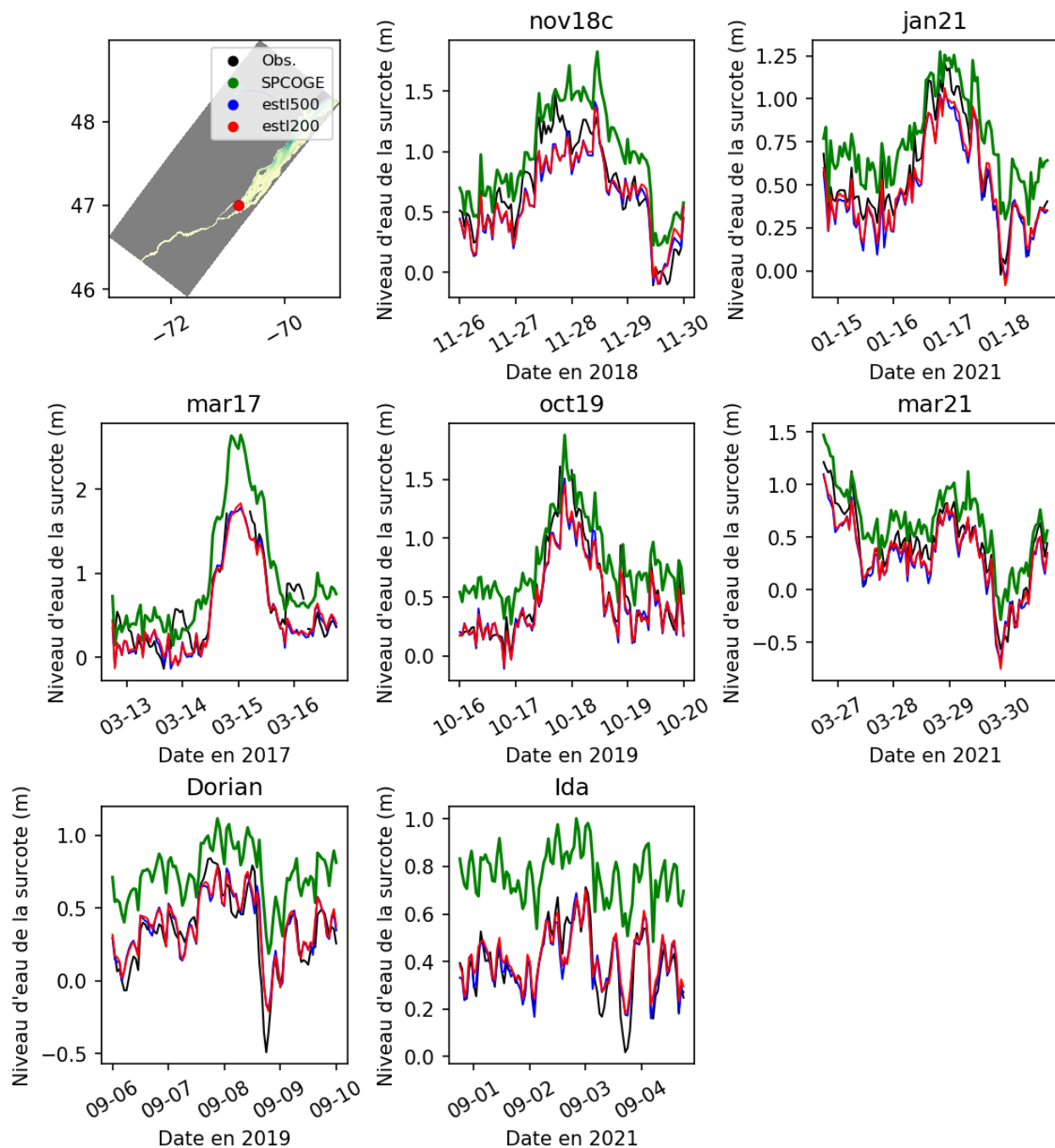


Figure 32. Niveau d'eau résiduel pour les 7 tempêtes choisies à la station 3100.

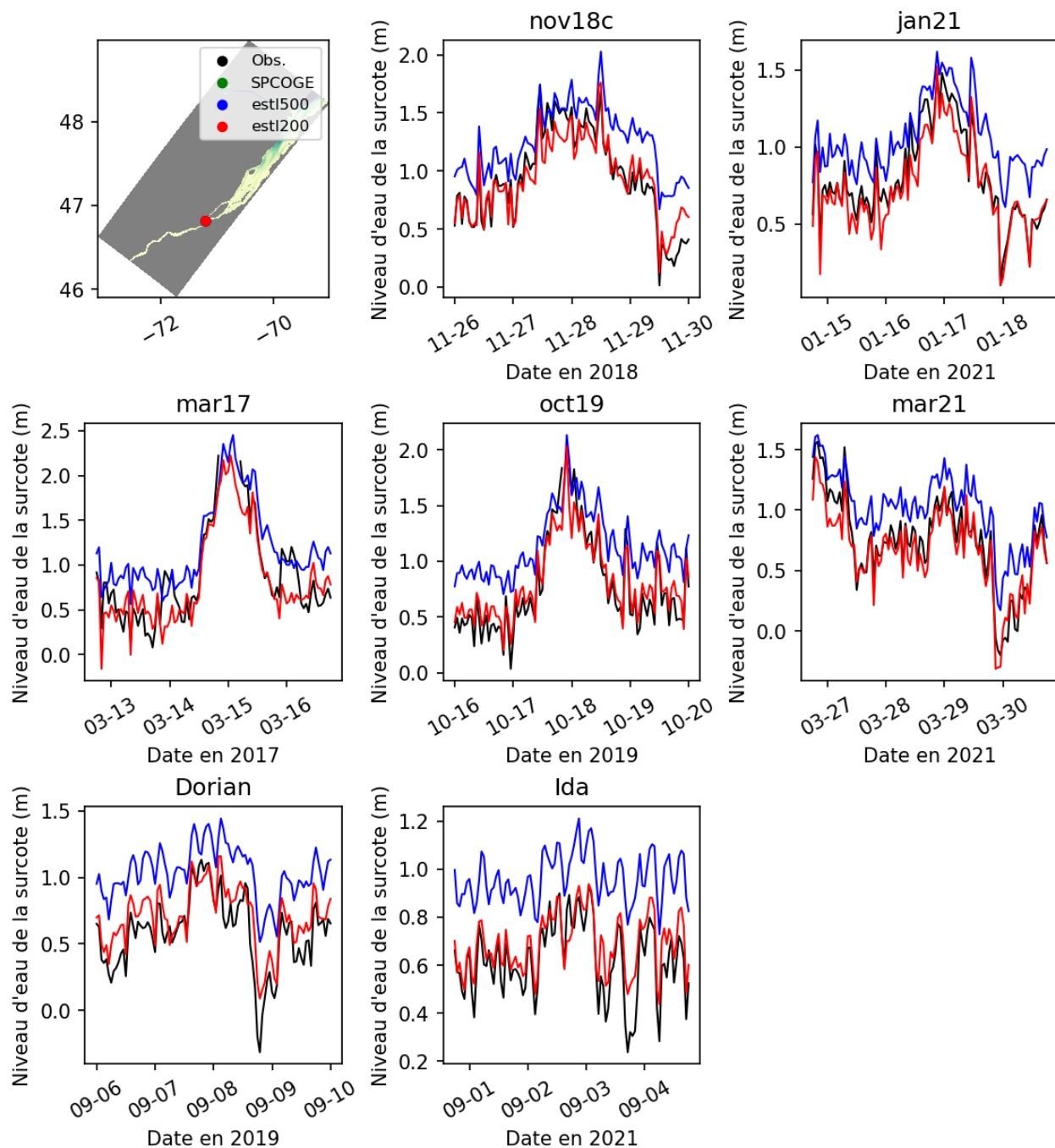


Figure 33. Niveau d'eau résiduel pour les 7 tempêtes choisies à la station 3248.



Figure 34. Carte de la position (début des deux flèches) et de la couverture (flèches bleues) des deux ADCP horizontaux déployés de chaque côté du Saint-Laurent, un au port de Québec et un au quai de Lévis.

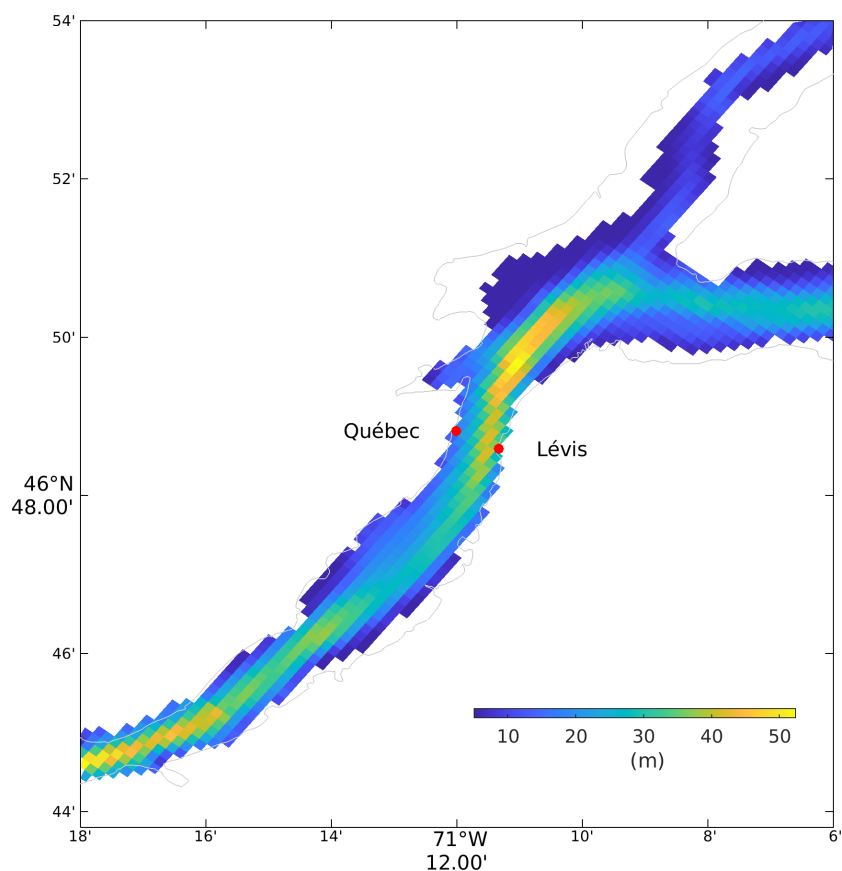
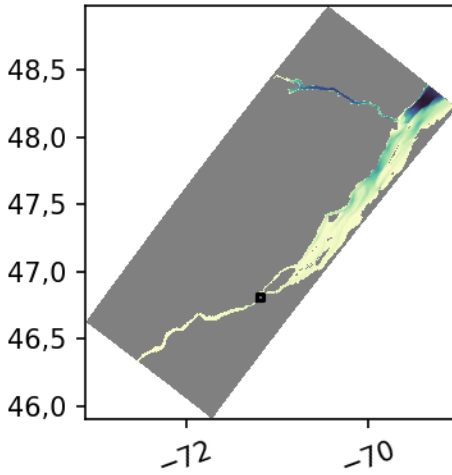
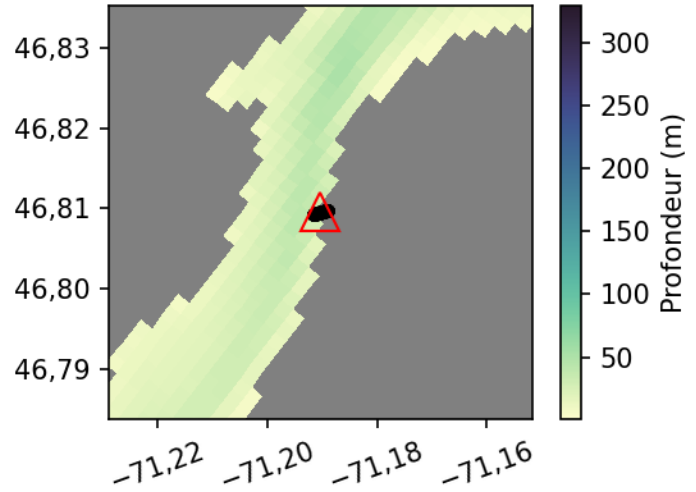


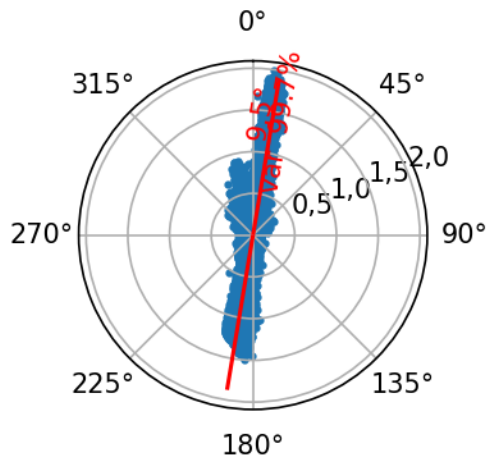
Figure 35. Carte de la position (points rouges) des deux ADCP horizontaux déployés de chaque côté du Saint-Laurent, un au port de Québec et un au quai de Lévis. La bathymétrie du ESTL200 pour cette région est également tracée sur la figure.



levis intervalle 55



estl500 intervalle 55



estl200 intervalle 55

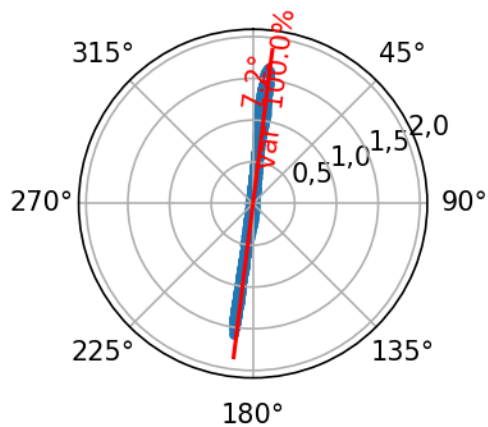
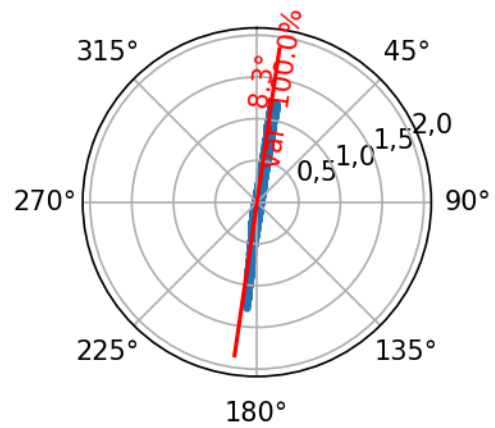


Figure 36. Nuages de points des courants à Lévis et axe principal de variance pour l'année 2021 pour les observations, le ESTL500 et le ESTL200.

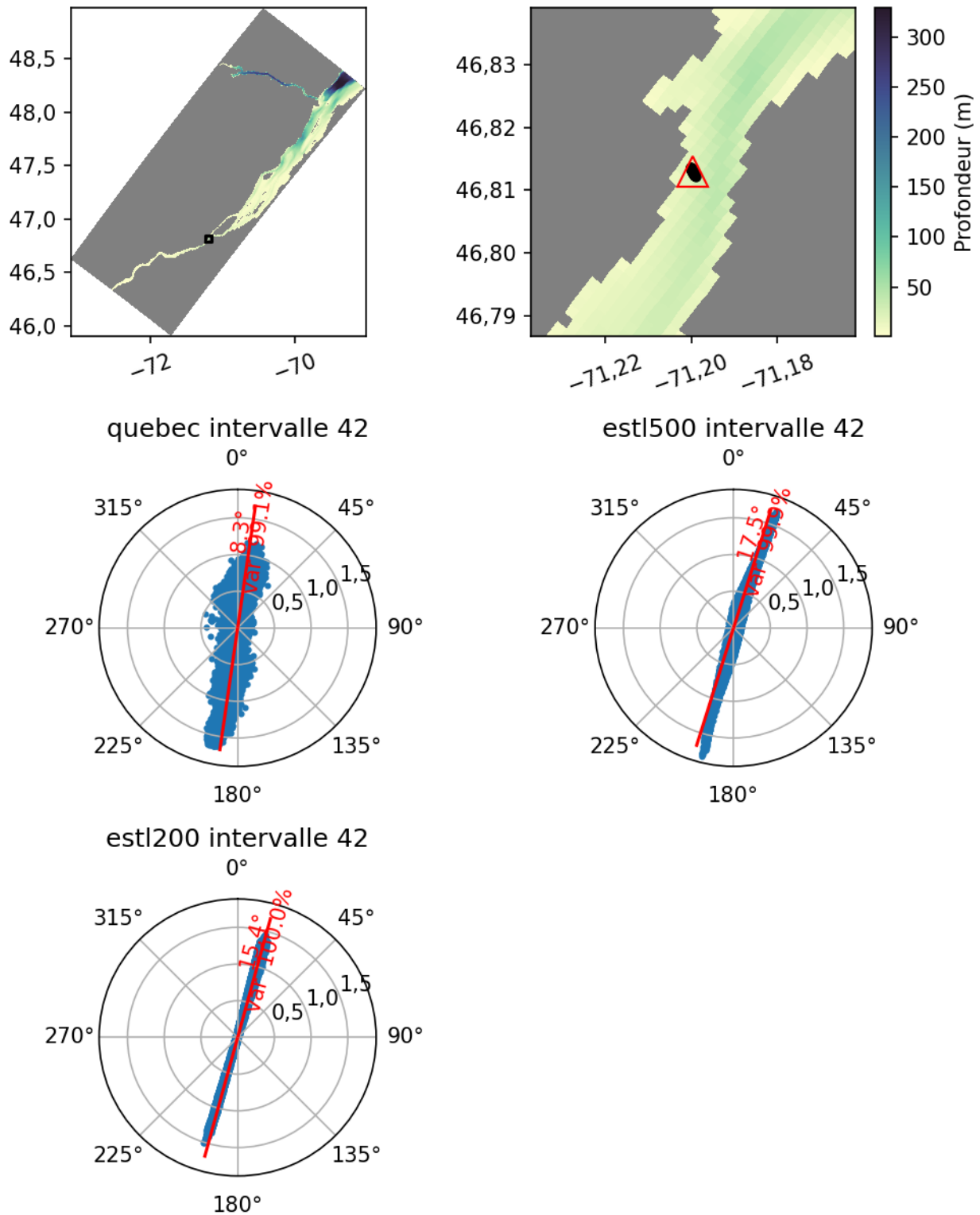


Figure 37. Nuages de points des courants à Québec et axe principal de variance pour l'année 2021 pour les observations, le ESTL500 et le ESTL200.

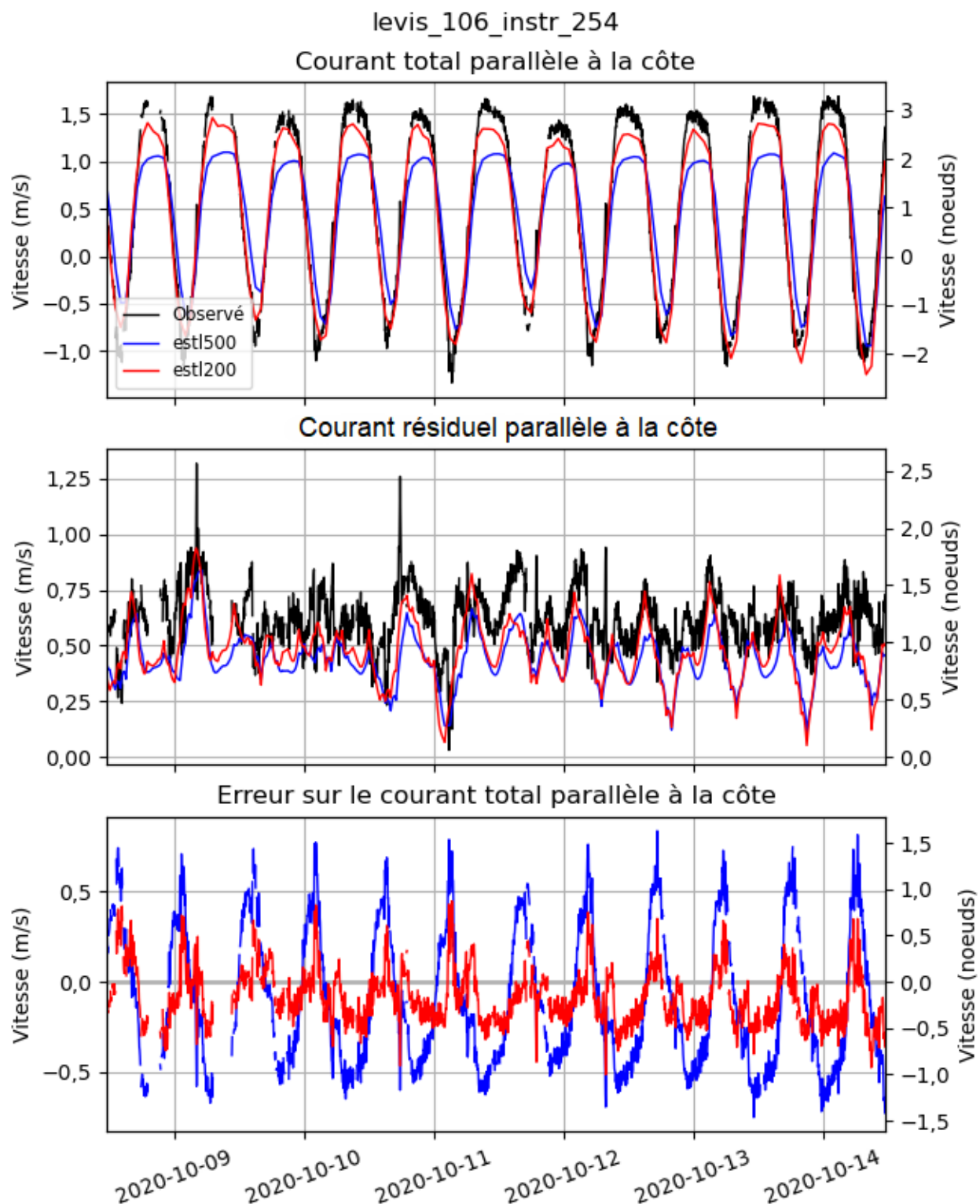


Figure 38. Données de l'ADCP horizontal à Lévis et résultats des modèles pour l'année 2020. Courants totaux le long du rivage à partir des observations et des deux modèles dans le panneau 1, courant résiduel le long du rivage dans le panneau 2 et erreur de courant total le long du rivage dans le panneau 3.

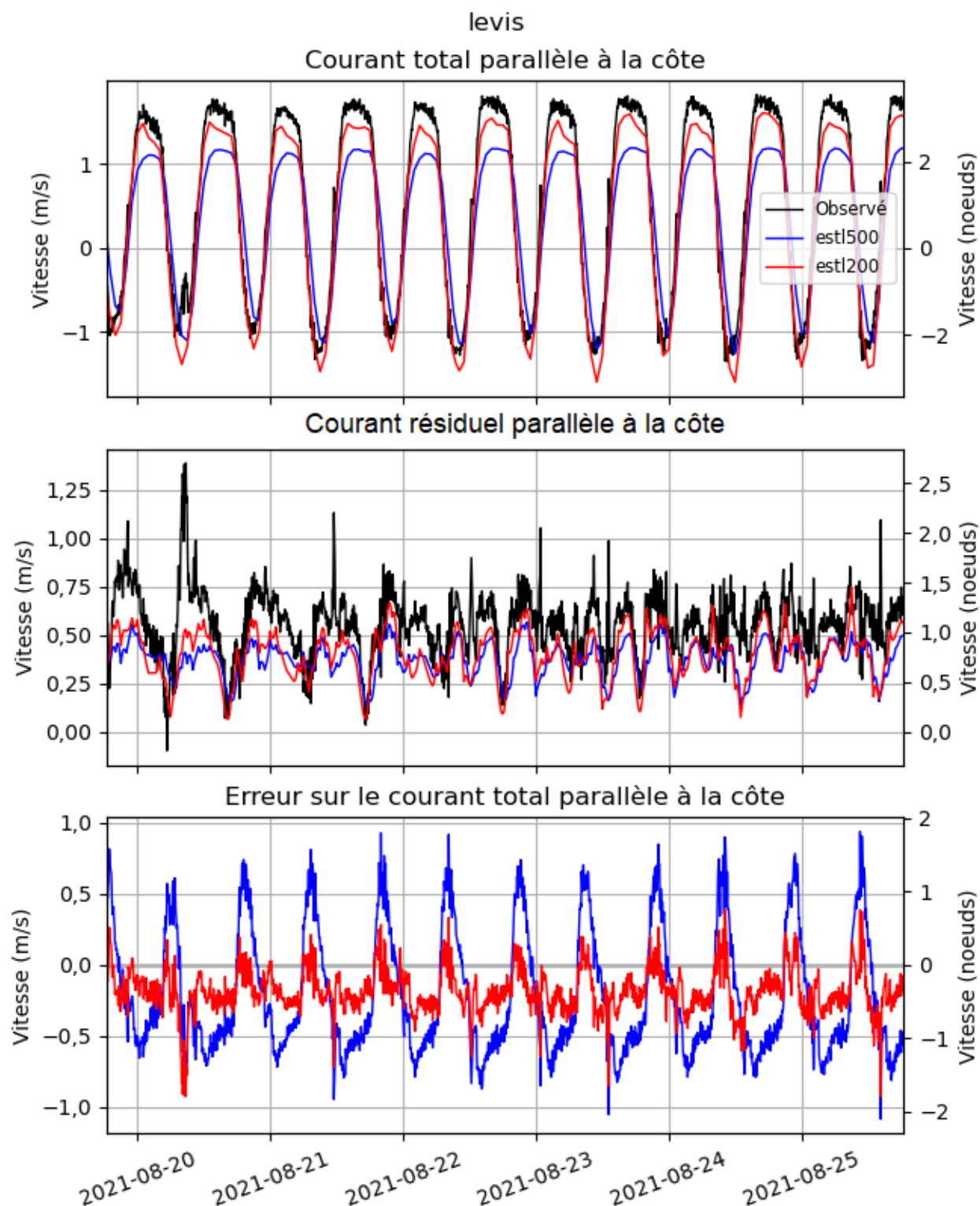


Figure 39. Données de l'ADCP horizontal à Lévis et résultats des modèles pour l'année 2021. Courants totaux le long du rivage à partir des observations et des deux modèles dans le panneau 1, courant résiduel le long du rivage dans le panneau 2 et erreur de courant total le long du rivage dans le panneau 3.

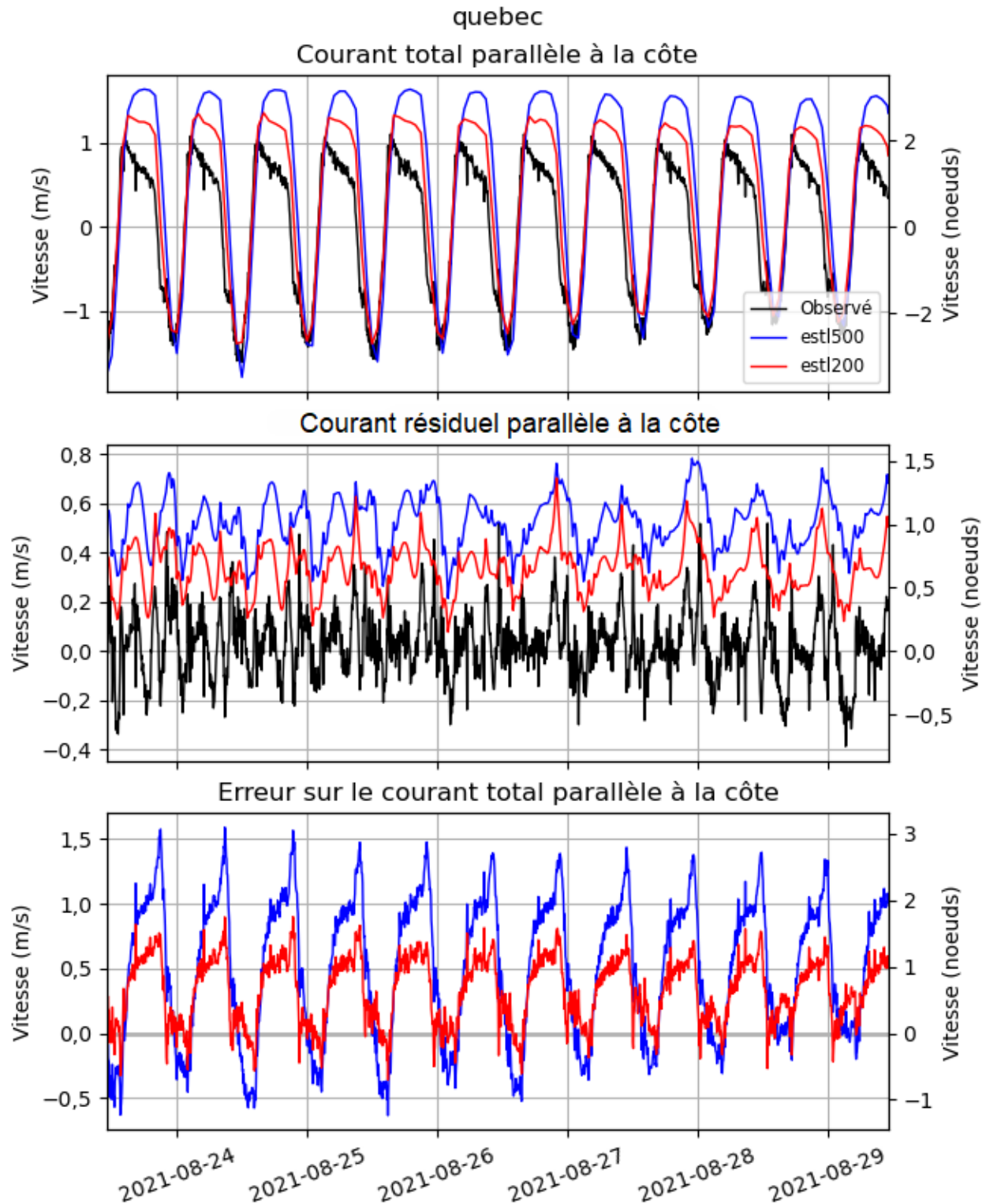


Figure 40. Données de l'ADCP horizontal à Lévis et résultats des modèles pour l'année 2020. Courants totaux le long du rivage à partir des observations et des deux modèles dans le panneau 1, courant résiduel le long du rivage dans le panneau 2 et erreur de courant total le long du rivage dans le panneau 3.

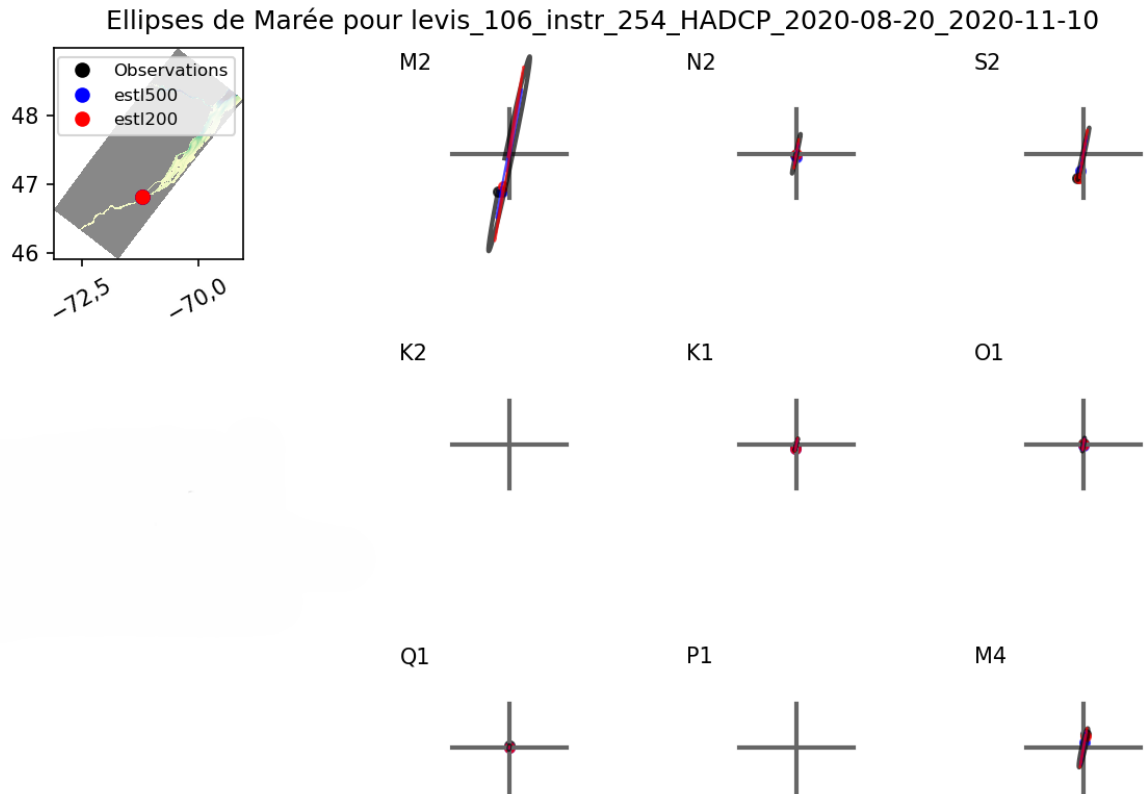


Figure 41. Données de l'ADCP horizontal à Lévis et résultats des modèles pour l'année 2020. Ellipses de marée d'après les observations et les deux modèles pour les composantes M2, N2, S2, K2, K1, O1, Q1, P1 et M4.

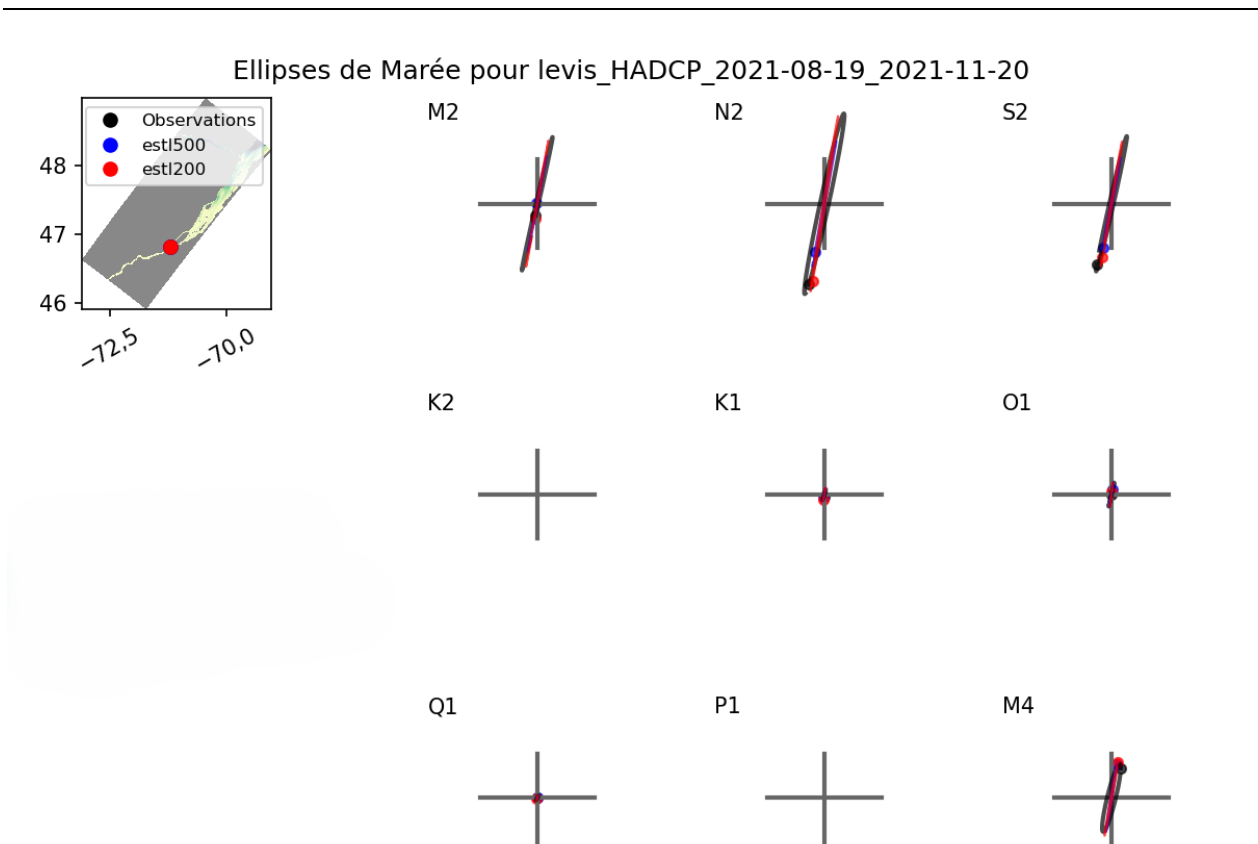


Figure 42. Données de l'ADCP horizontal à Lévis et résultats des modèles pour l'année 2021. Ellipses de marée d'après les observations et les deux modèles pour les composantes M2, N2, S2, K2, K1, O1, Q1, P1 et M4.

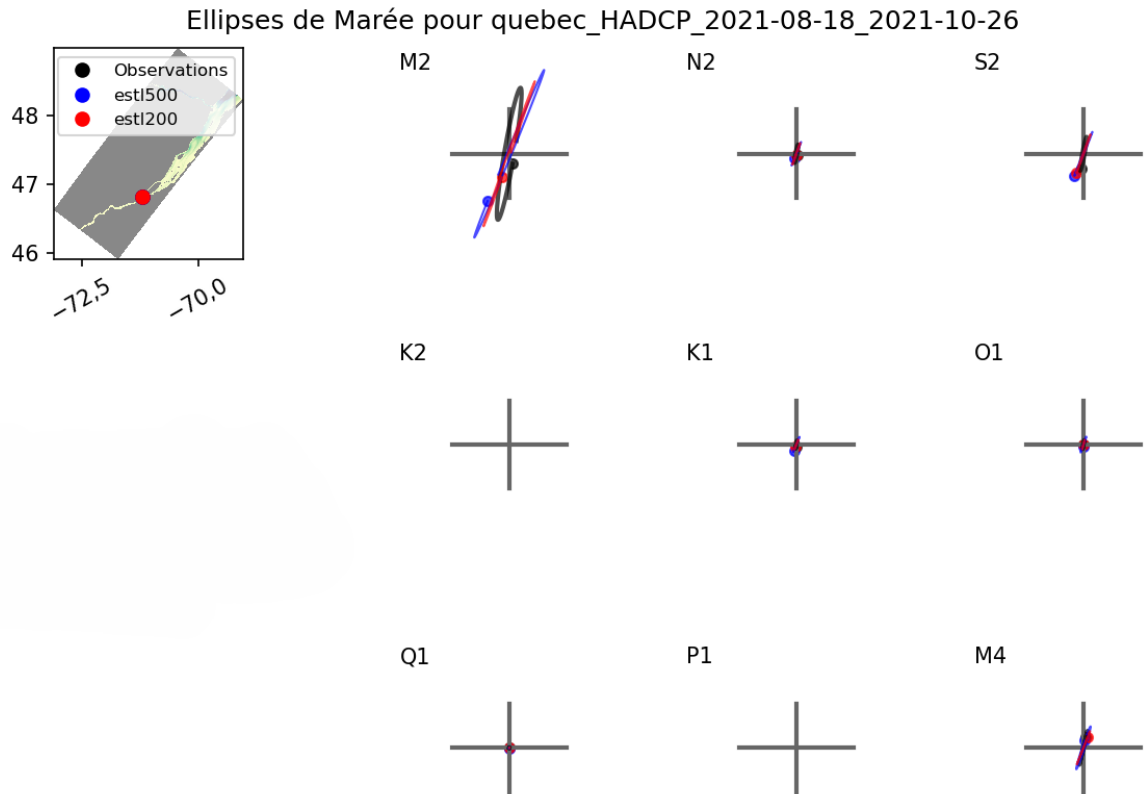


Figure 43. Données de l'ADCP horizontal à Québec et résultats des modèles pour l'année 2021. Ellipses de marée d'après les observations et les deux modèles pour les composantes M2, N2, S2, K2, K1, O1, Q1, P1 et M4.

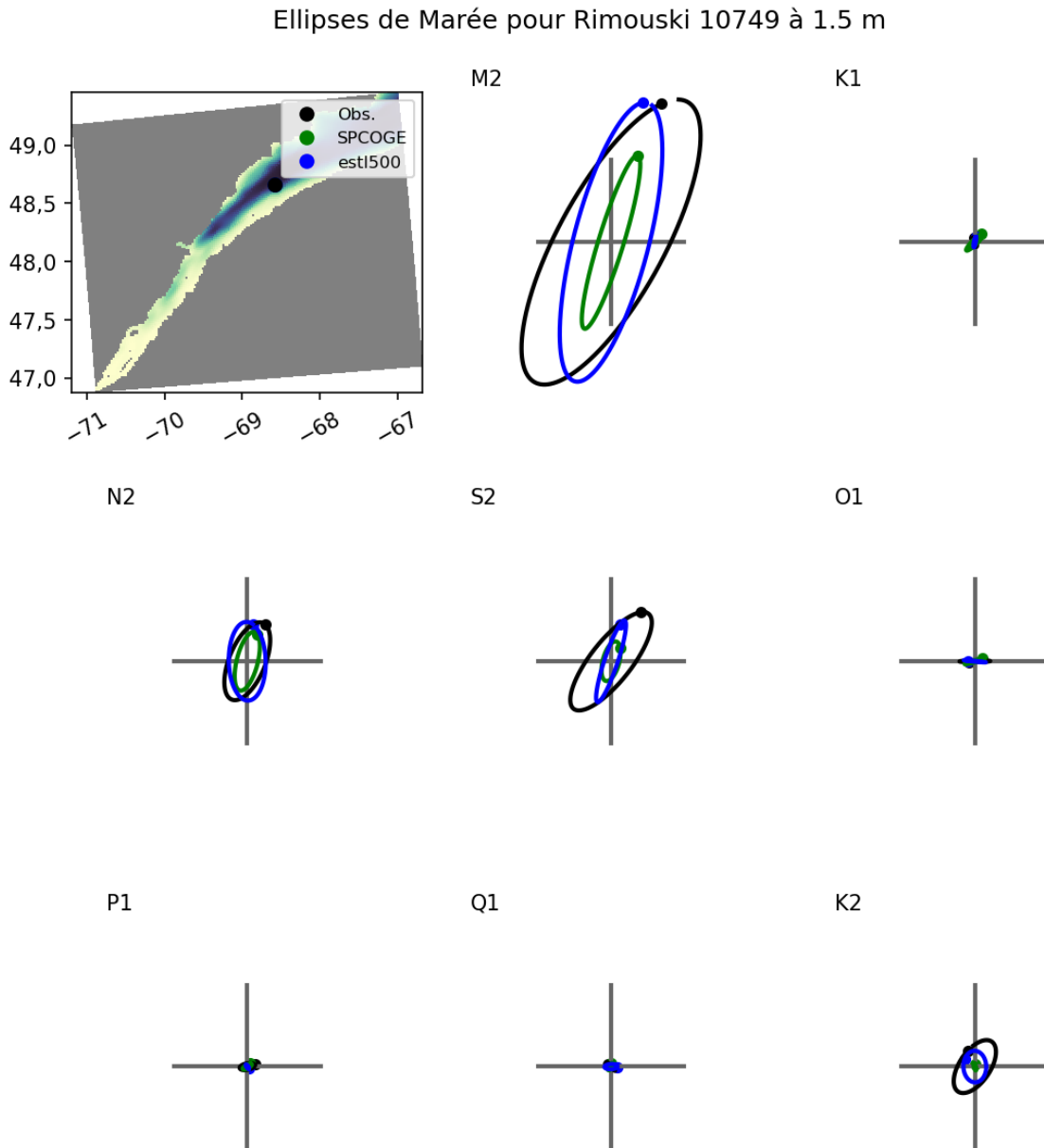


Figure 44. Ellipses de marée d'après l'ADCP à la bouée IML-4 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500) pour les composantes M2, K1, N2, S2, O1, P1, Q1 et K2, à une profondeur de 1,5 mètre.

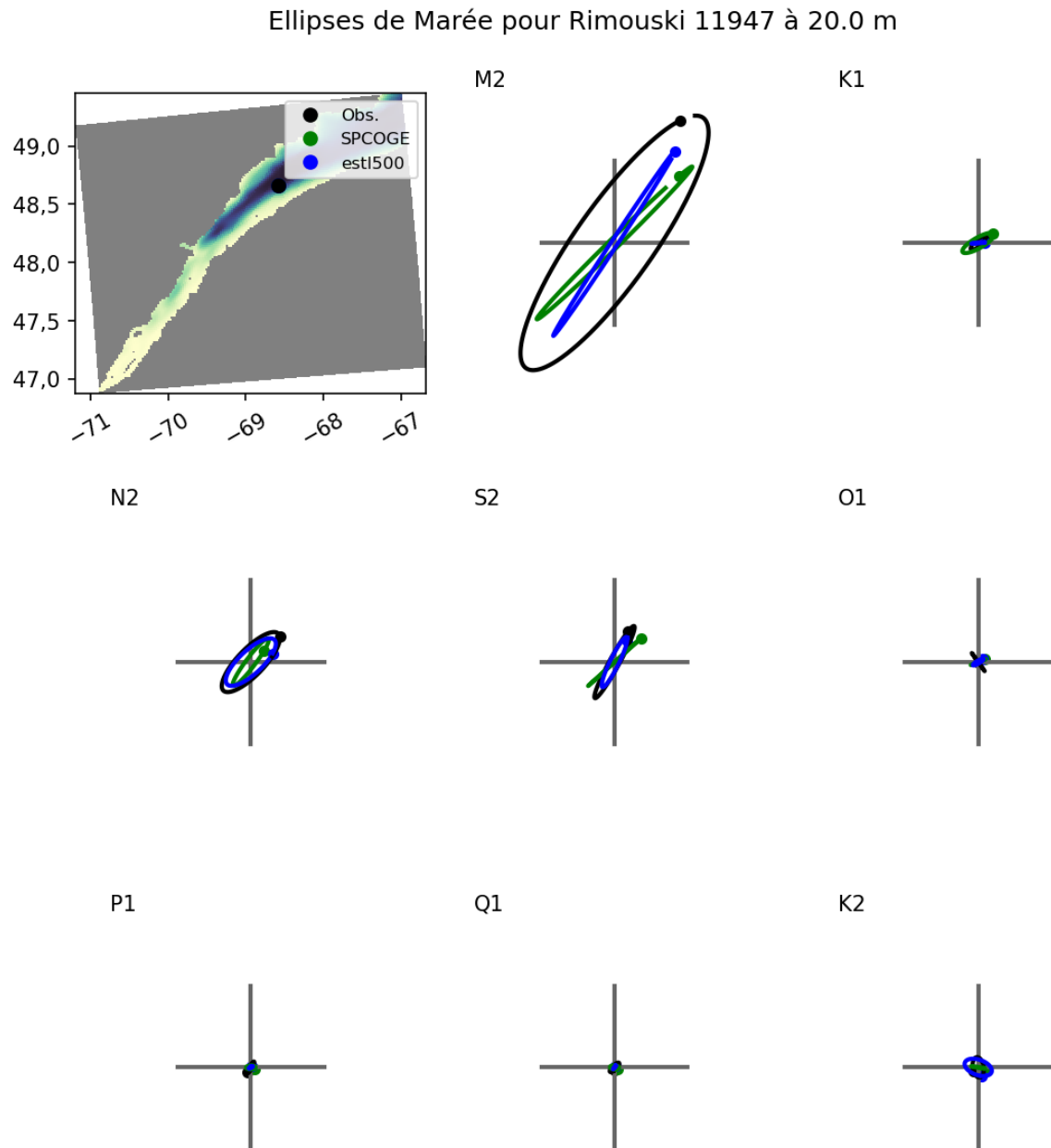


Figure 45. Ellipses de marée d'après l'ADCP à la bouée IML-4 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500) pour les composantes M2, K1, N2, S2, O1, P1, Q1 et K2, à une profondeur de 20 mètres.

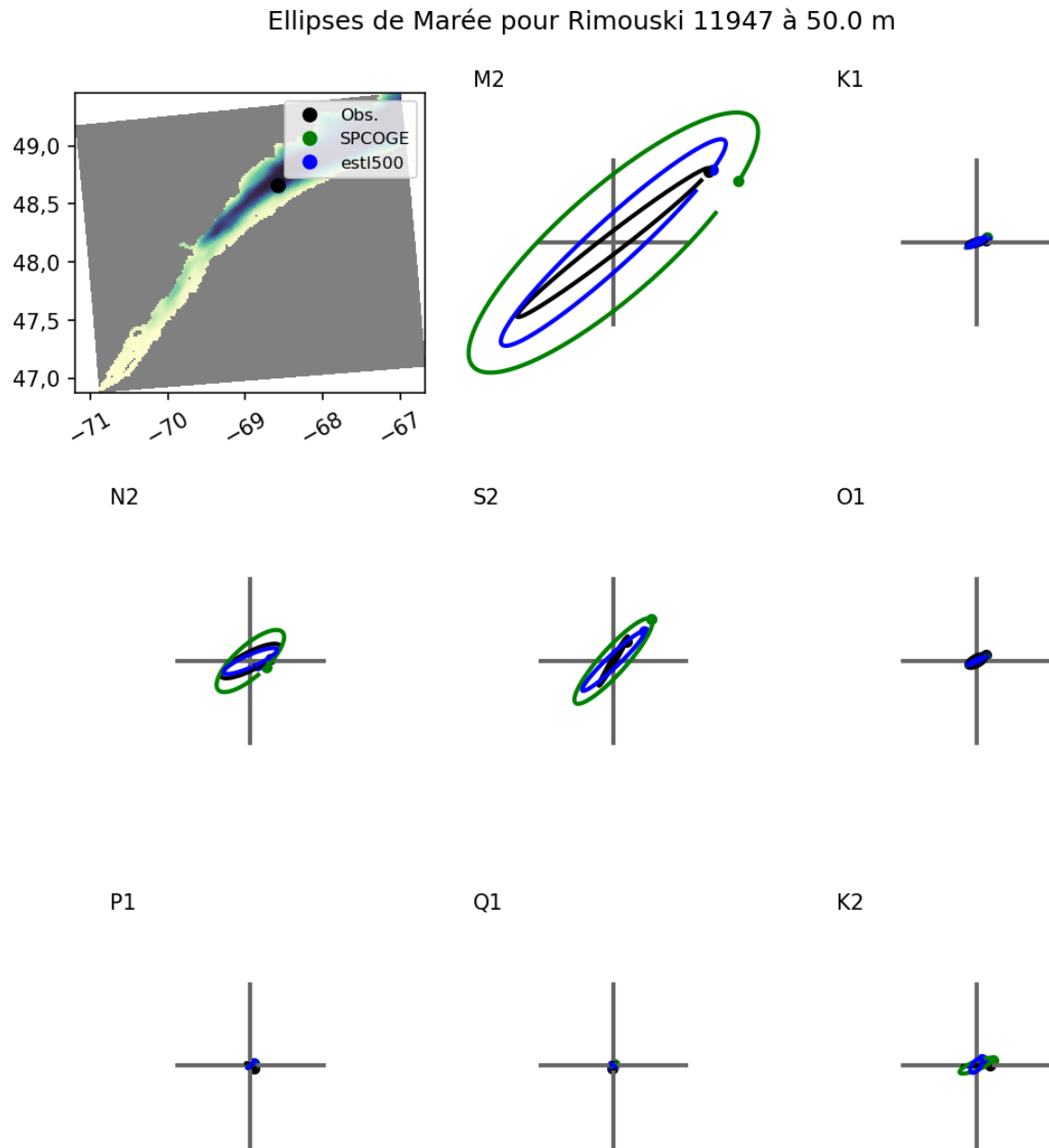


Figure 46. Ellipses de marée d'après l'ADCP à la bouée IML-4 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500) pour les composantes M2, K1, N2, S2, O1, P1, Q1 et K2, à une profondeur de 50 mètres.

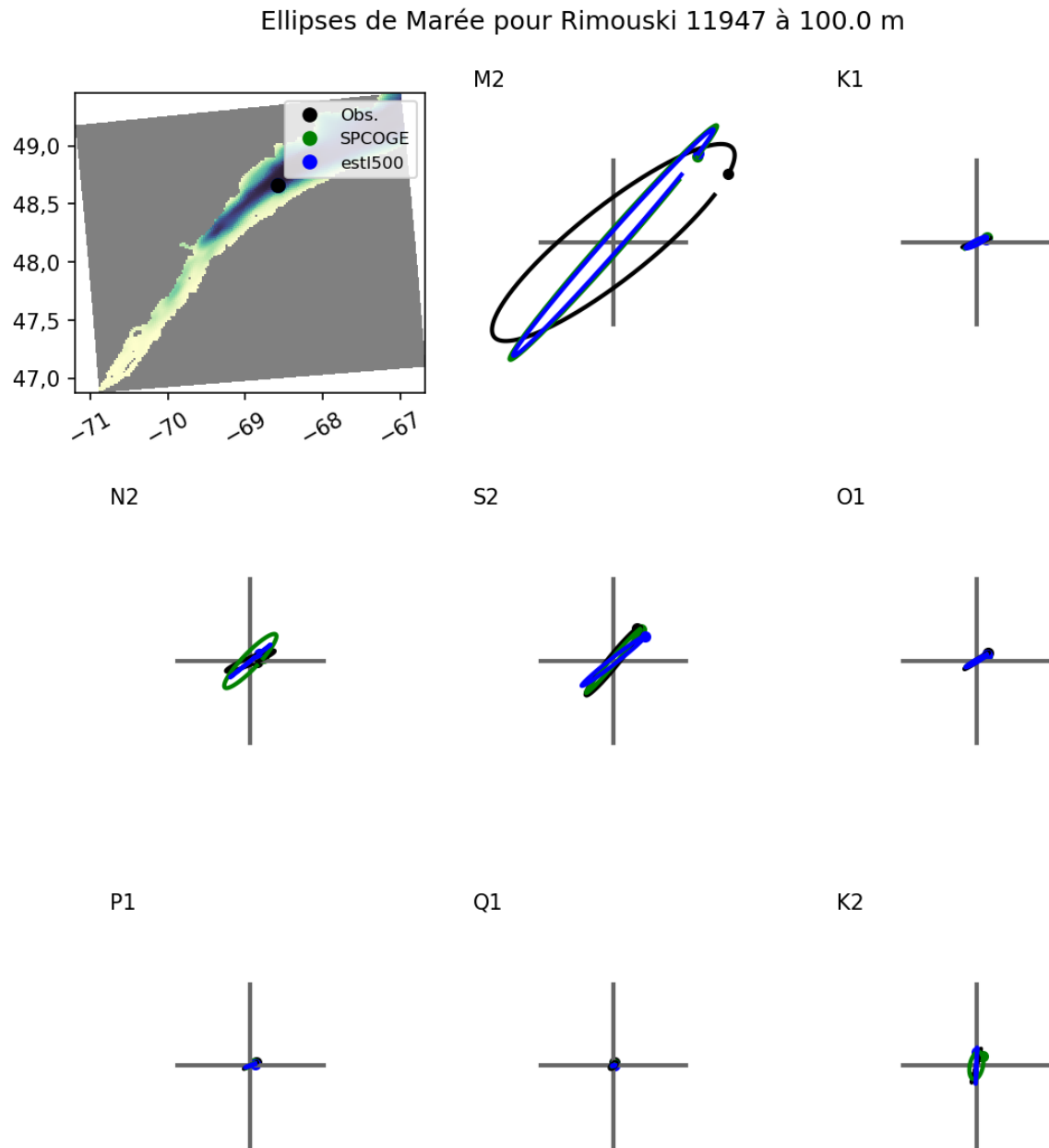


Figure 47. Ellipses de marée d'après l'ADCP à la bouée IML-4 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500) pour les composantes M2, K1, N2, S2, O1, P1, Q1 et K2, à une profondeur de 100 mètres.

Profil Vertical de M2 pour Rimouski 10749 ADCP 11m

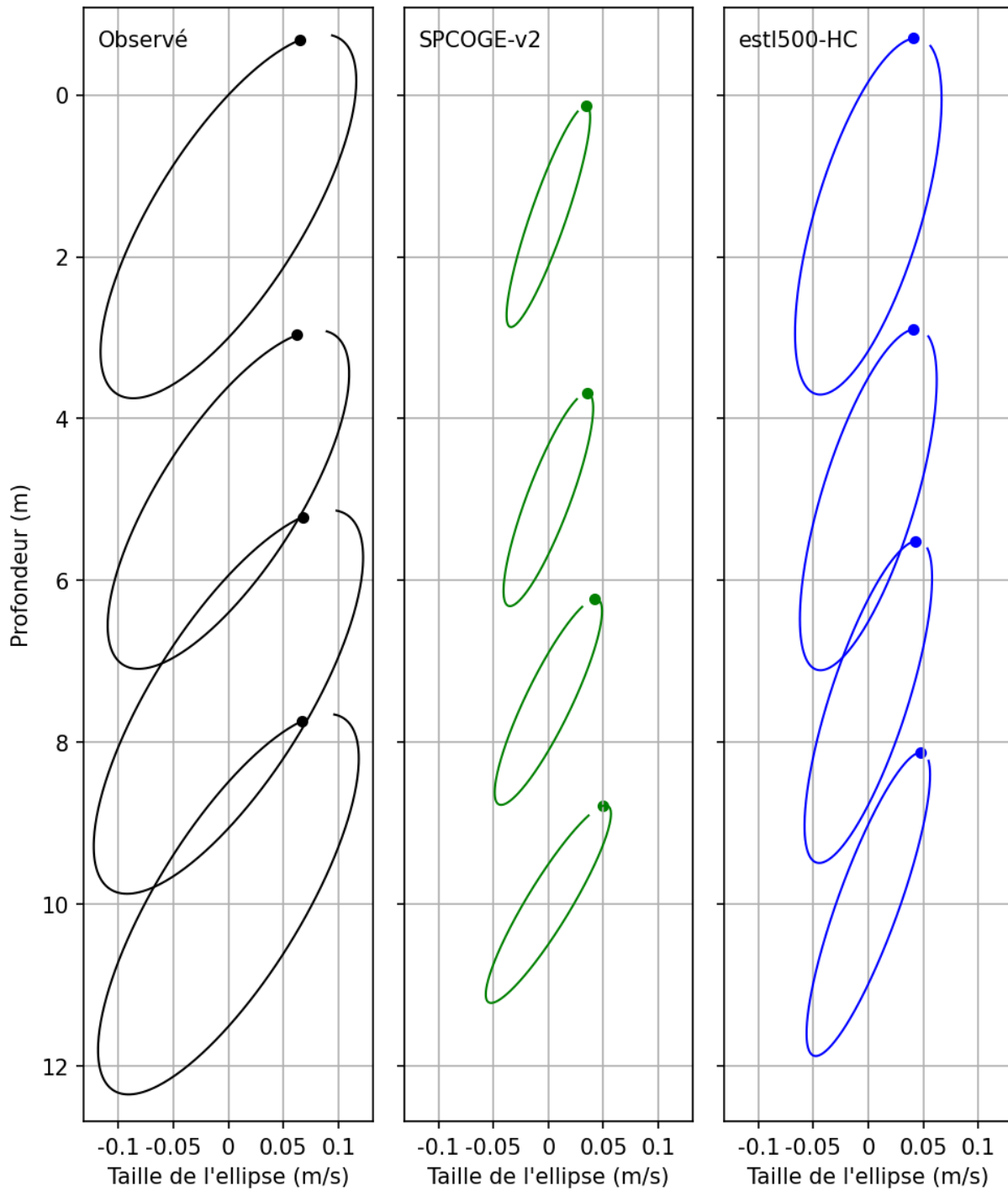


Figure 48. Ellipses de marée d'après l'ADCP à la bouée IML-4 en 2016 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500) pour la composante M2.

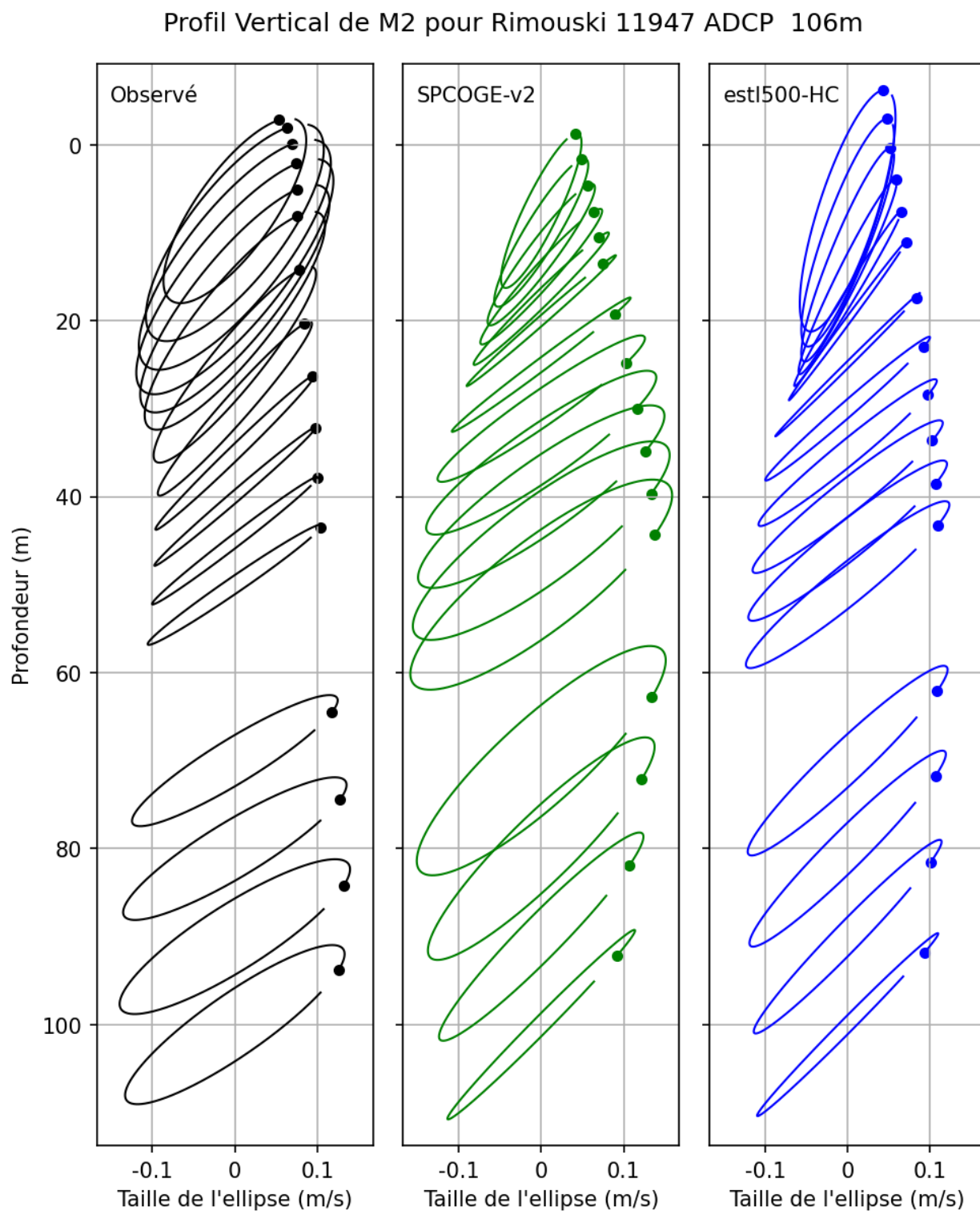


Figure 49. Ellipses de marée d'après l'ADCP à la bouée IML-4 en 2016 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500) pour la composante M2.

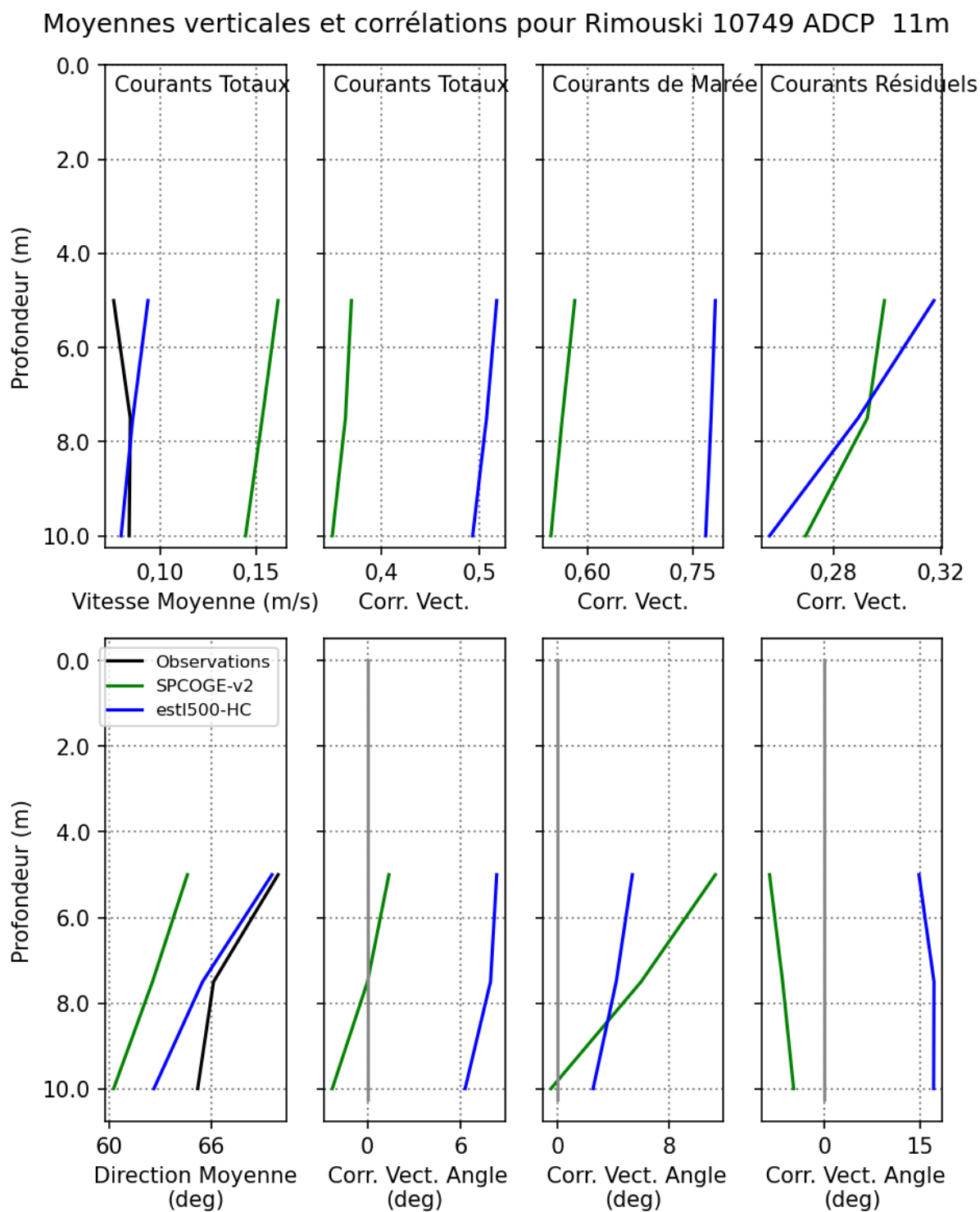


Figure 50. Vitesse et direction totales moyennes (colonne 1), amplitude et angle de corrélation vectorielle pour les courants totaux (colonne 2), courants de marée (colonne 3) et courants résiduels (colonne 4), d'après l'ADCP à fréquence plus élevée à la bouée IML-4 en 2016 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500).

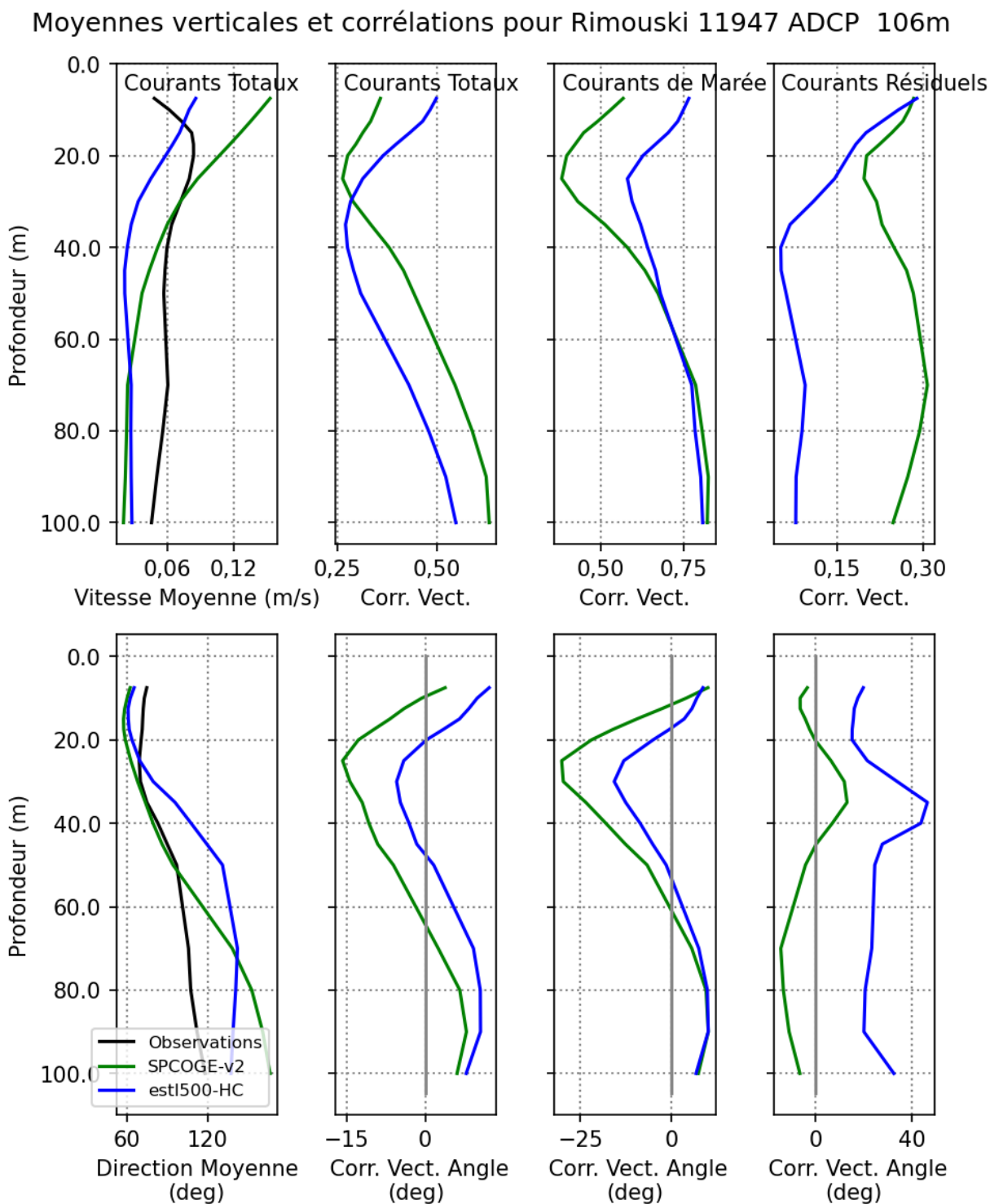


Figure 51. Vitesse et direction totales moyennes (colonne 1), amplitude et angle de corrélation vectorielle pour les courants totaux (colonne 2), courants de marée (colonne 3) et courants résiduels (colonne 4), d'après l'ADCP à fréquence plus basse à la bouée IML-4 en 2016 et pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500).

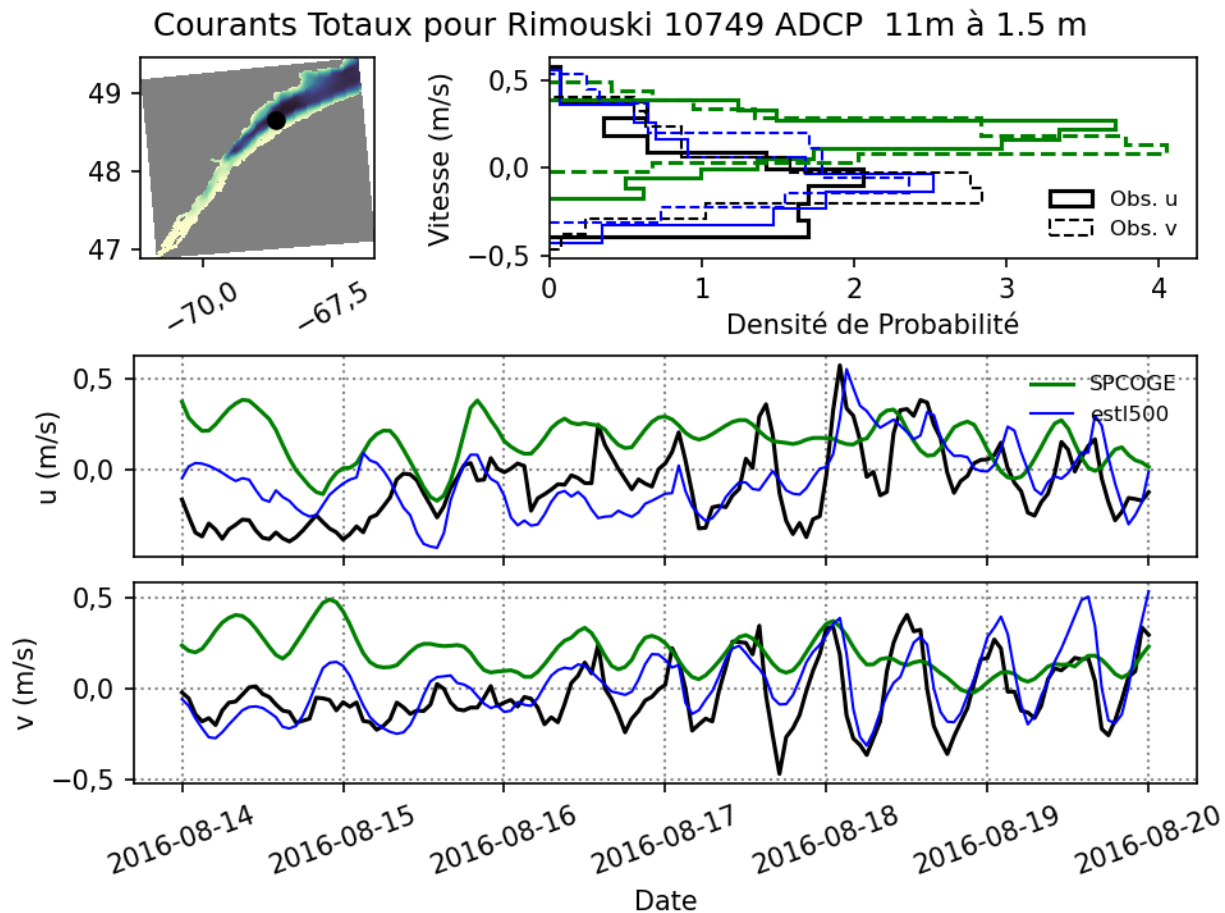


Figure 52. Courte série chronologique (1 semaine) des courants totaux u et v à une profondeur de 1,5 mètre d'après l'ADCP à fréquence plus élevée à la bouée IML-4 en 2016 pour les deux modèles plus grossiers (SPCOG-E et ESTL500).

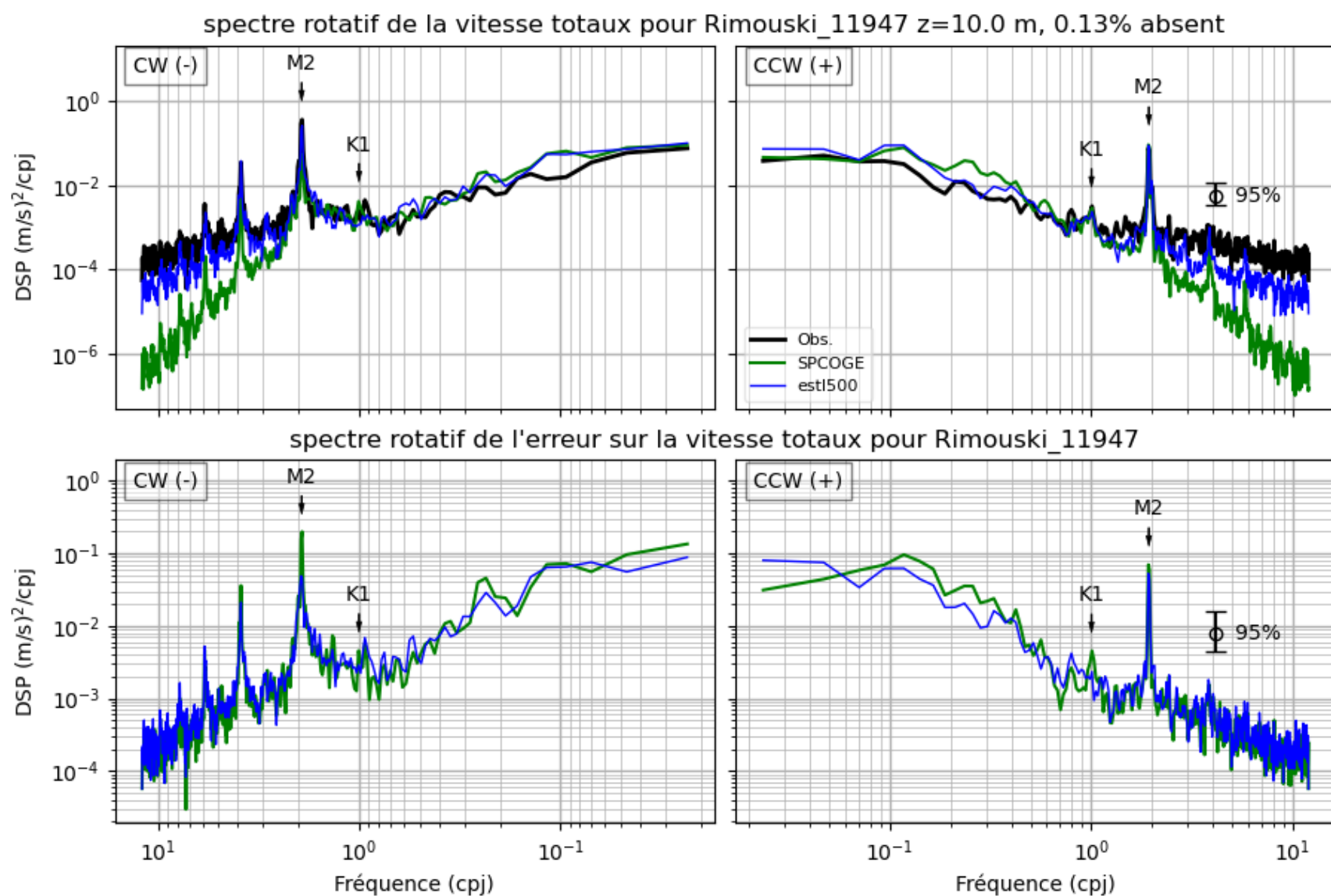


Figure 53. Spectre rotatif du courant total (en haut) et de l'erreur de courant (en bas) pour l'ADCP 11947 à 10 m. Rotation dans le sens horaire sur les panneaux de gauche et rotation antihoraire sur les panneaux de droite.

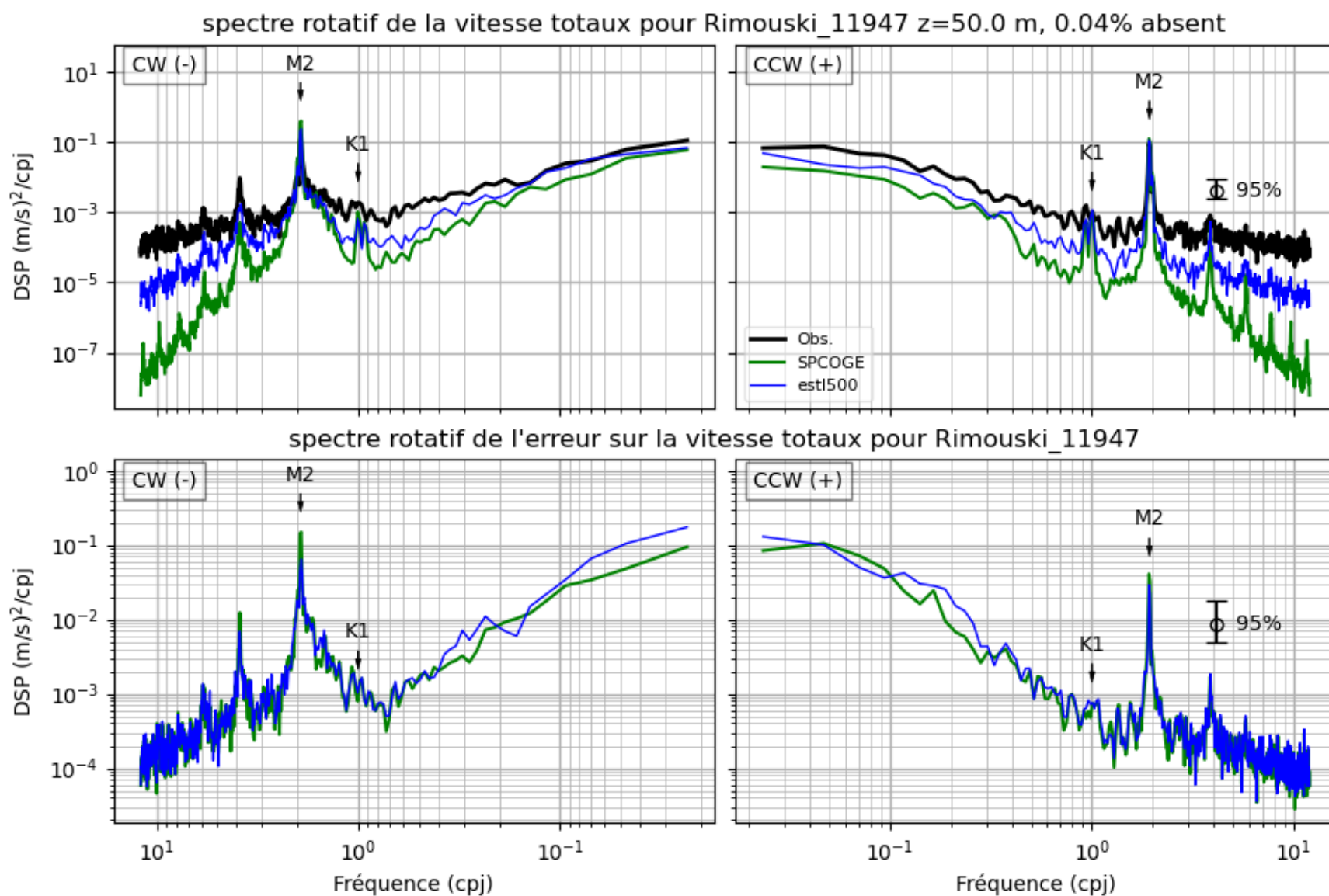


Figure 54. Spectre rotatif du courant total (en haut) et de l'erreur de courant (en bas) pour l'ADCP 11947 à 50 m. Rotation dans le sens horaire sur les panneaux de gauche et rotation antihoraire sur les panneaux de droite.

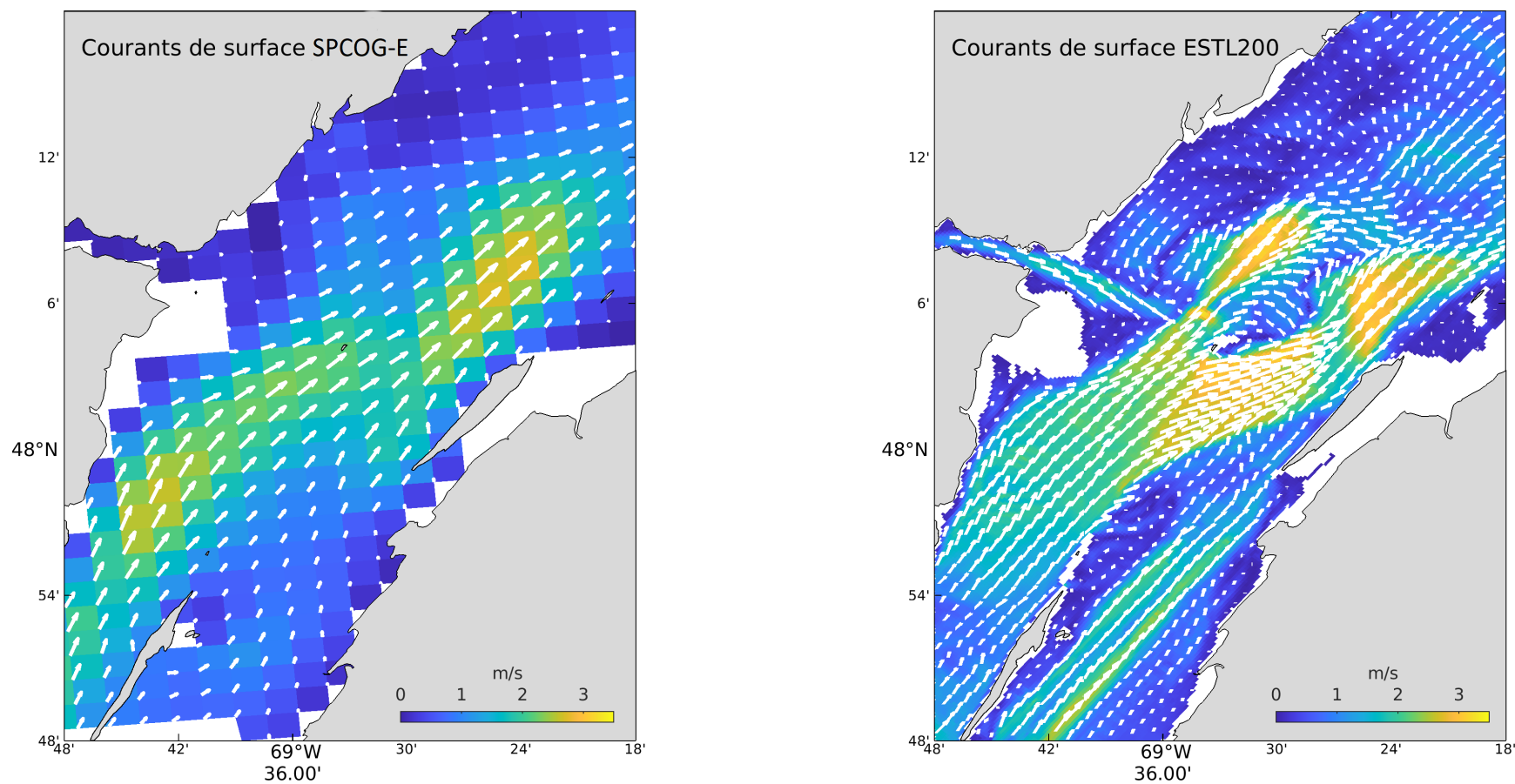


Figure 55. Instantanés des courants de surface pour le SPCOG-E (panneau de gauche) et le ESTL200 (panneau de droite), le 8 juin 2017, à 13 h (UTC), correspondant aux courants de jusant et à la basse mer. L'amplitude du courant de surface est représentée par l'échelle de couleur sur l'arrière-plan des flèches blanches. Toutes les cellules du SPCOG-E sont affichées, mais seulement 1 cellule sur 25 est indiquée pour les flèches du ESTL200 (pour des raisons de clarté).

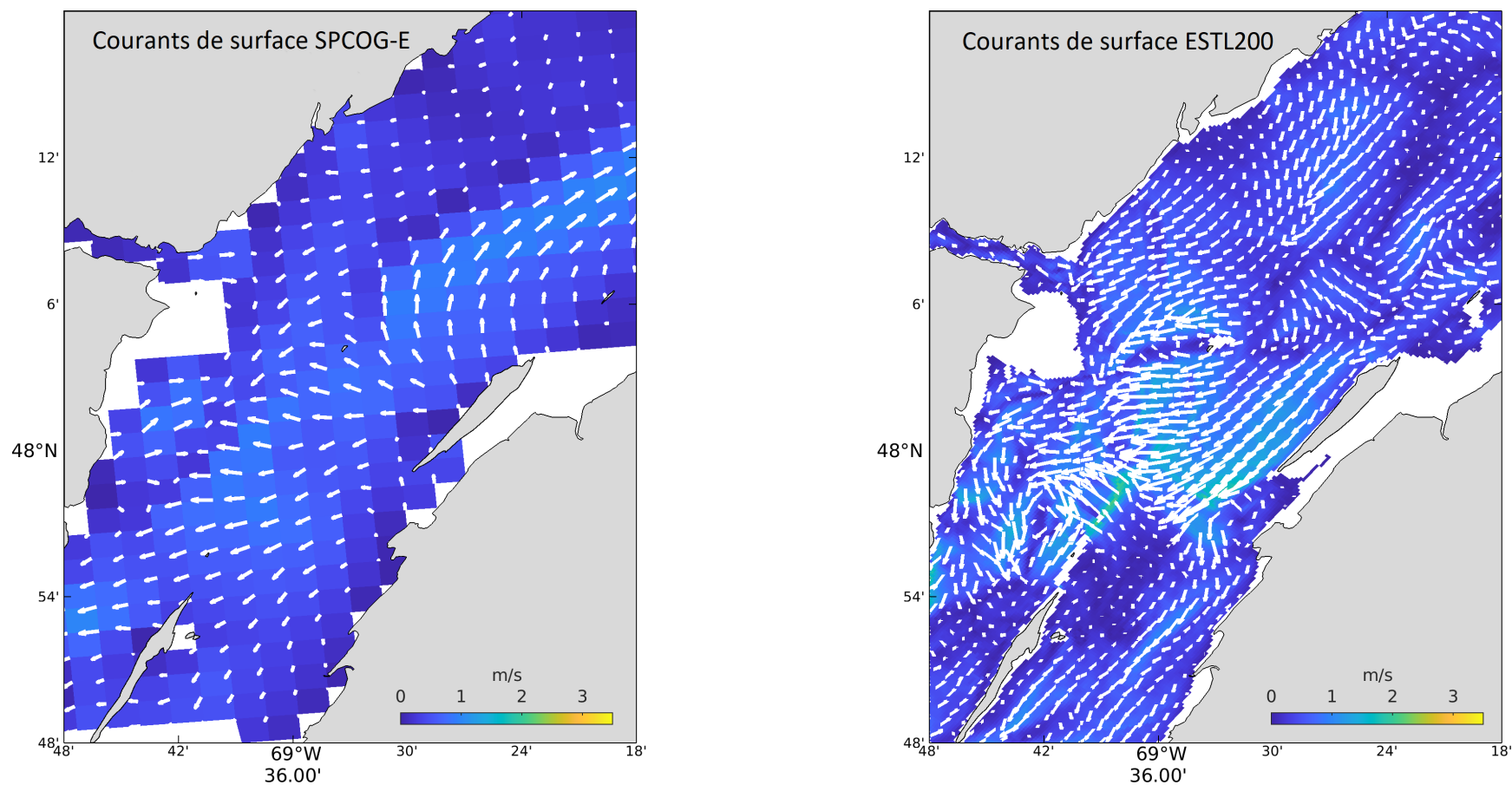


Figure 56. Instantanés des courants de surface pour le SPCOG-E (panneau de gauche) et le ESTL200 (panneau de droite), le 8 juin 2017, à 19 h (UTC), correspondant aux courants de flot et aux hautes eaux. L'amplitude du courant de surface est représentée par l'échelle de couleur sur l'arrière-plan des flèches blanches. Toutes les cellules du SPCOG-E sont affichées, mais seulement 1 cellule sur 25 est affichée pour les flèches du ESTL200 (pour des raisons de clarté).

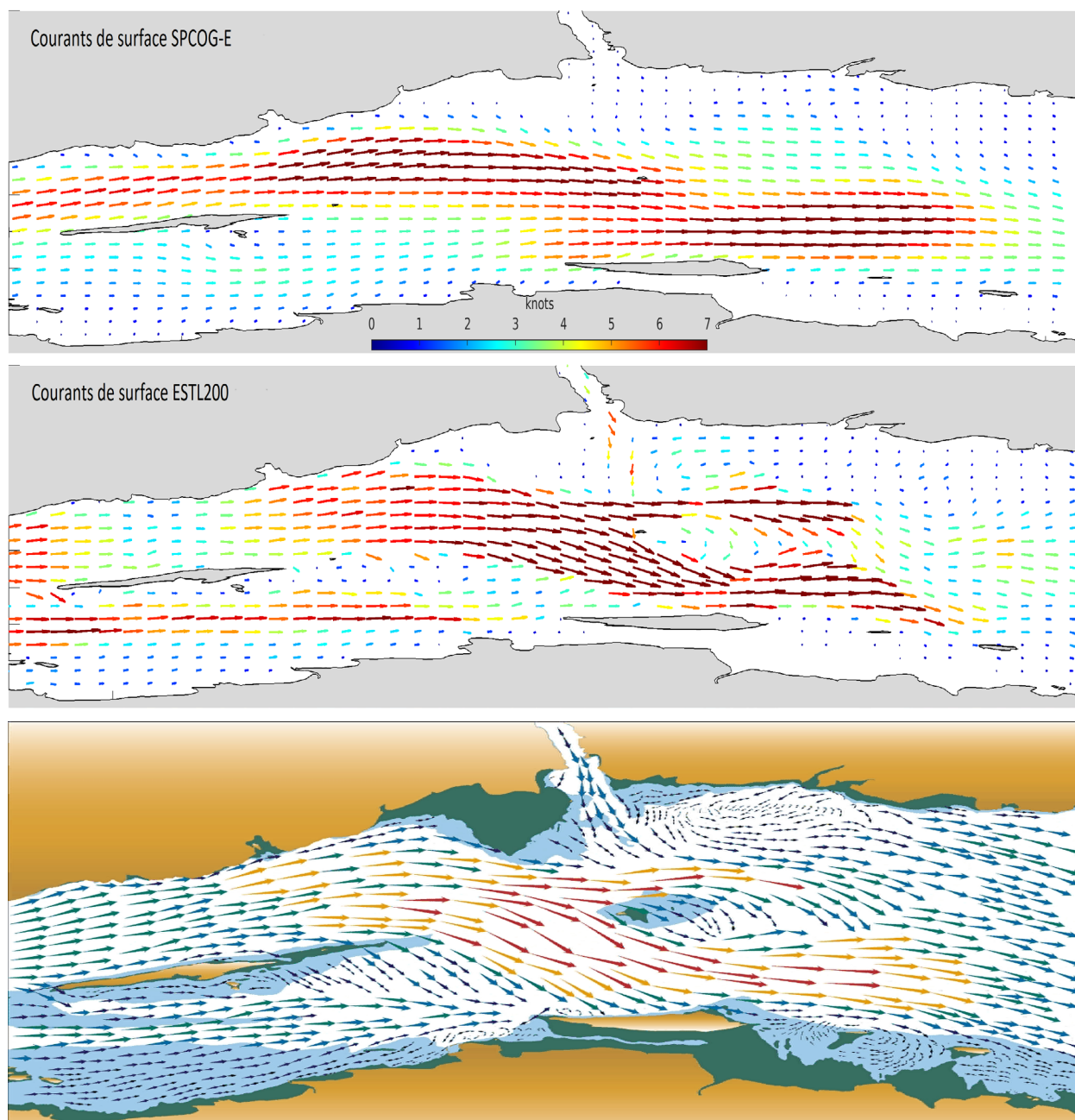


Figure 57. Instantanés des courants de surface pour le SPCOG-E (panneau supérieur) et le ESTL200 (deuxième panneau) le 8 juin 2017, à 13 h (UTC), correspondant aux courants de jusant et à la basse mer pour le ESTL200 et le SPCOG-E. L'amplitude du courant de surface est représentée par la longueur des flèches et par l'échelle de couleur des flèches. Les courants de surface du SPCOG-E sont interpolés sur la grille du ESTL200 et 1 cellule sur 49 est indiquée sur la figure (pour des raisons de clarté). Le panneau inférieur représente les courants de surface d'après l'atlas des courants de marée, pour la période allant de 0 à 1 heure après la basse mer. L'échelle de couleur est commune aux trois panneaux et les nœuds sont utilisés au lieu de l'unité m/s pour correspondre à l'échelle de couleur de l'atlas des courants marées.

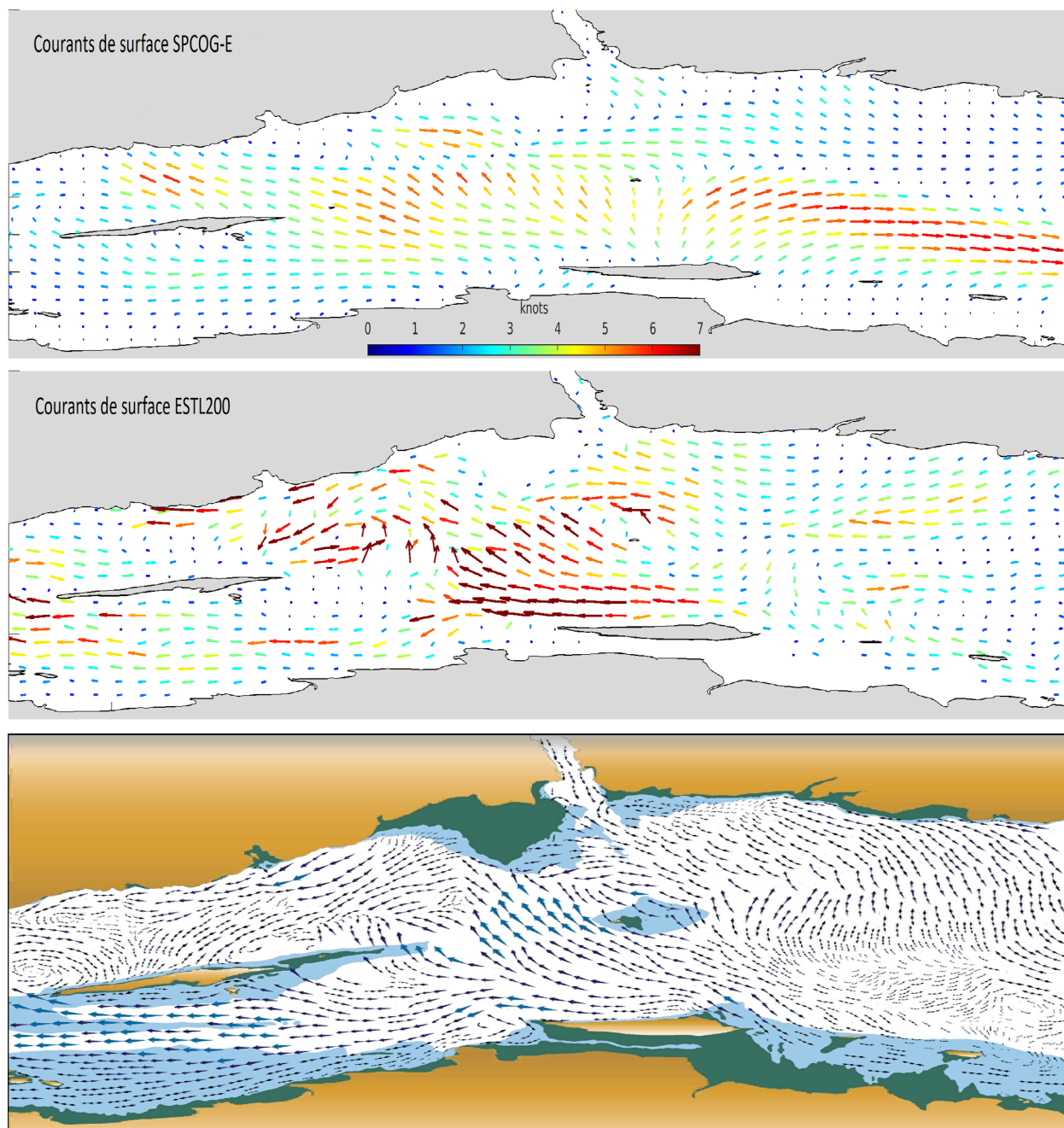


Figure 58. Instantanés des courants de surface pour le SPCOG-E (panneau supérieur) et le ESTL200 (deuxième panneau) le 8 juin 2017, à 19 h (UTC), correspondant aux courants de flot et aux hautes eaux pour le ESTL200 et le SPCOG-E. L'amplitude du courant de surface est représentée par la longueur des flèches et par l'échelle de couleur des flèches. Les courants de surface du SPCOG-E sont interpolés sur la grille du ESTL200 et 1 cellule sur 49 est indiquée sur la figure (pour des raisons de clarté). Le panneau inférieur représente les courants de surface d'après l'atlas des courants de marée, pour la période allant de 0 à 1 heure après la basse mer. L'échelle de couleur est commune aux trois panneaux et les nœuds sont utilisés au lieu de l'unité m/s pour correspondre à l'échelle de couleur de l'atlas des courants de marées.

MCTD T et S pour MTR SINECO2017 02985 900 à 6 m

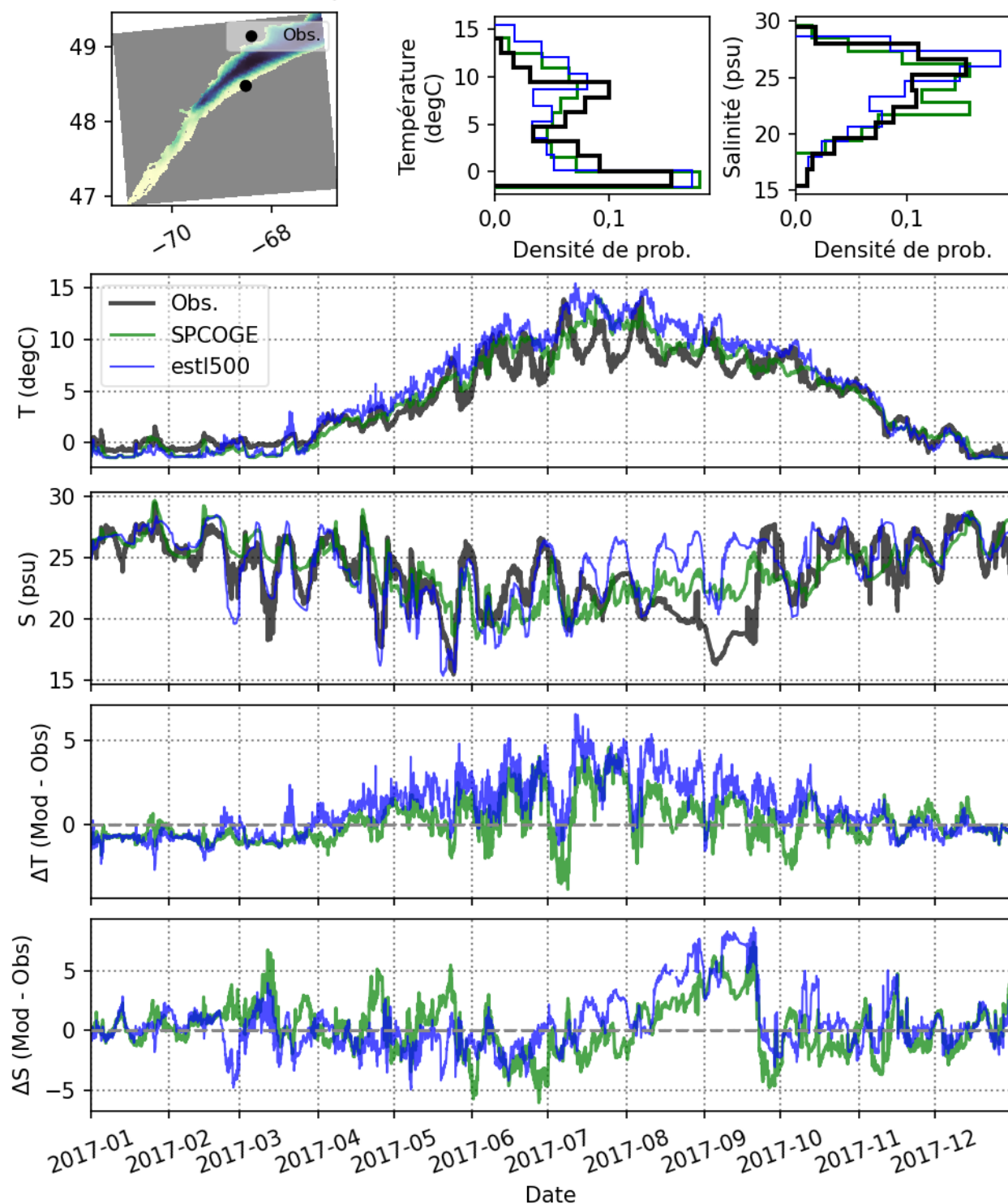


Figure 59. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 2985 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

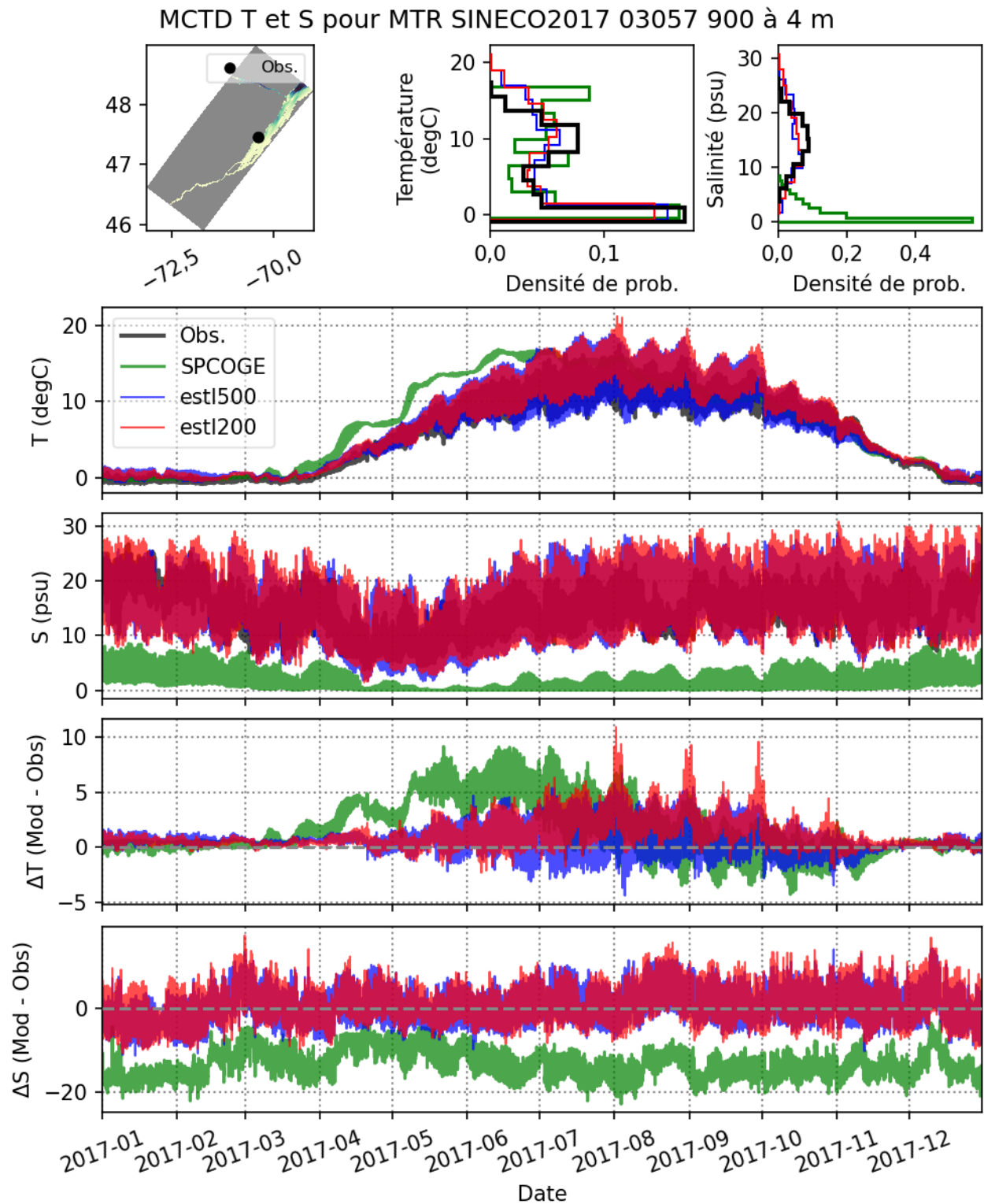


Figure 60. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3057 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

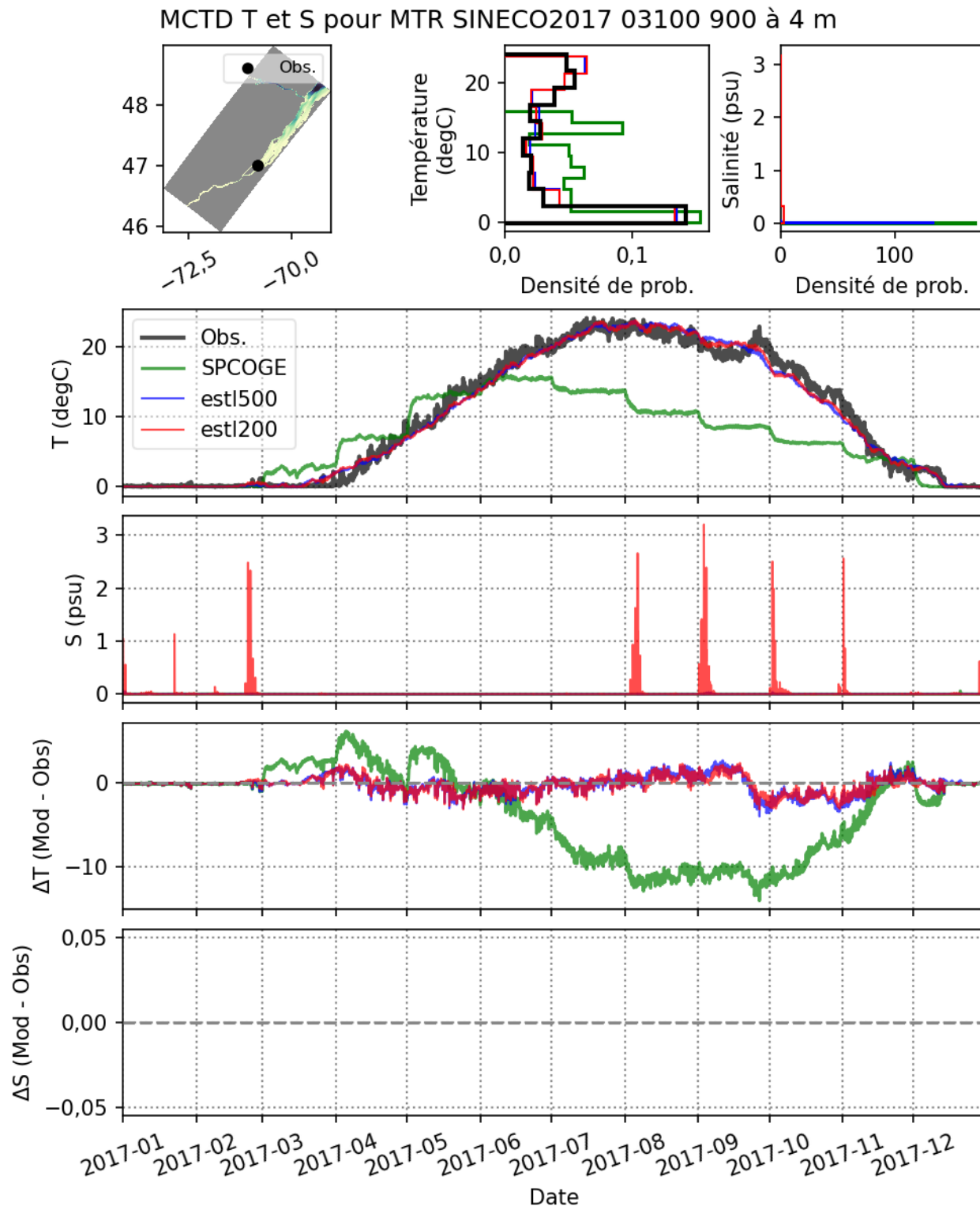


Figure 61. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3100 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

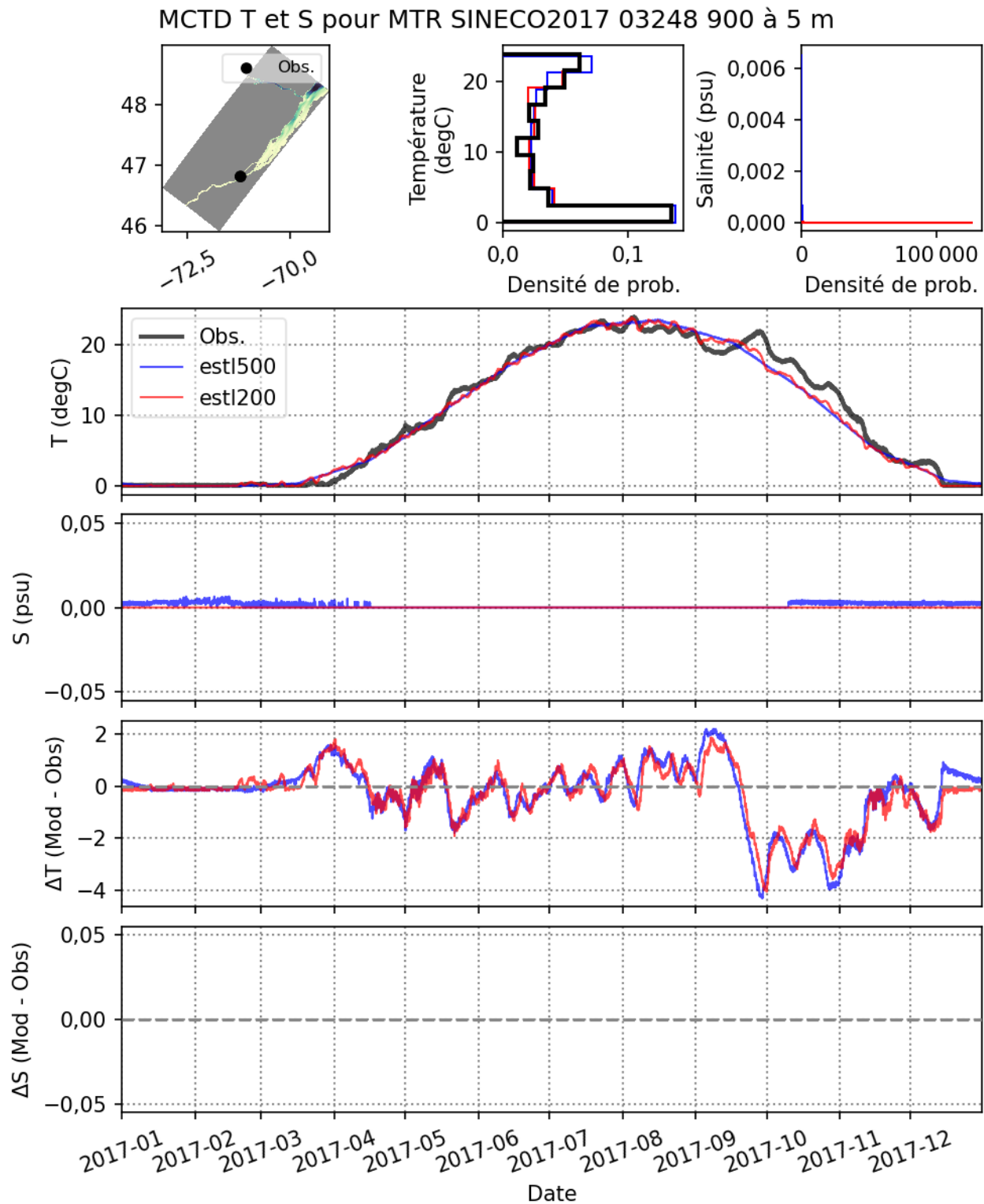


Figure 62. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3248 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

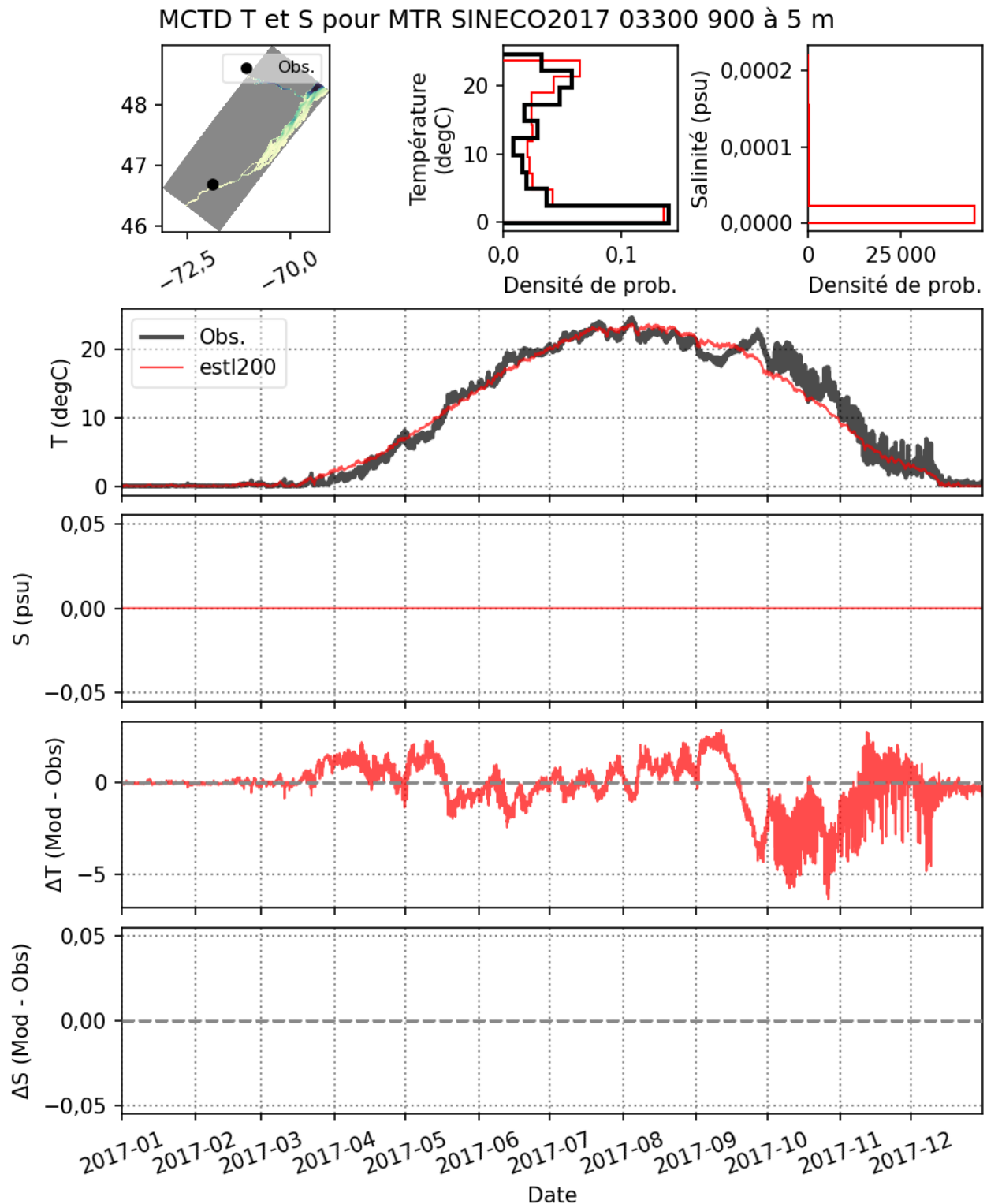


Figure 63. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3300 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

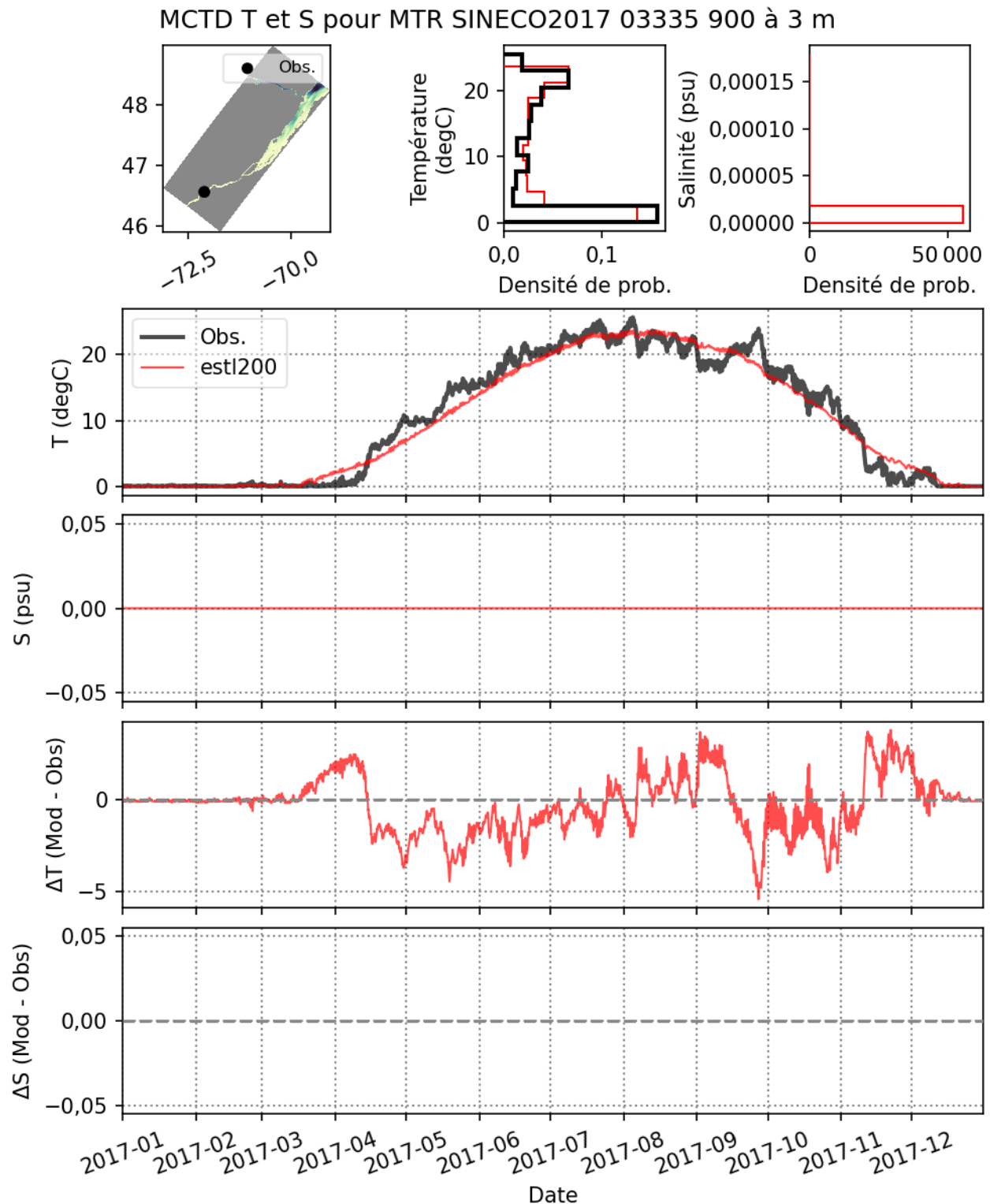


Figure 64. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3335 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

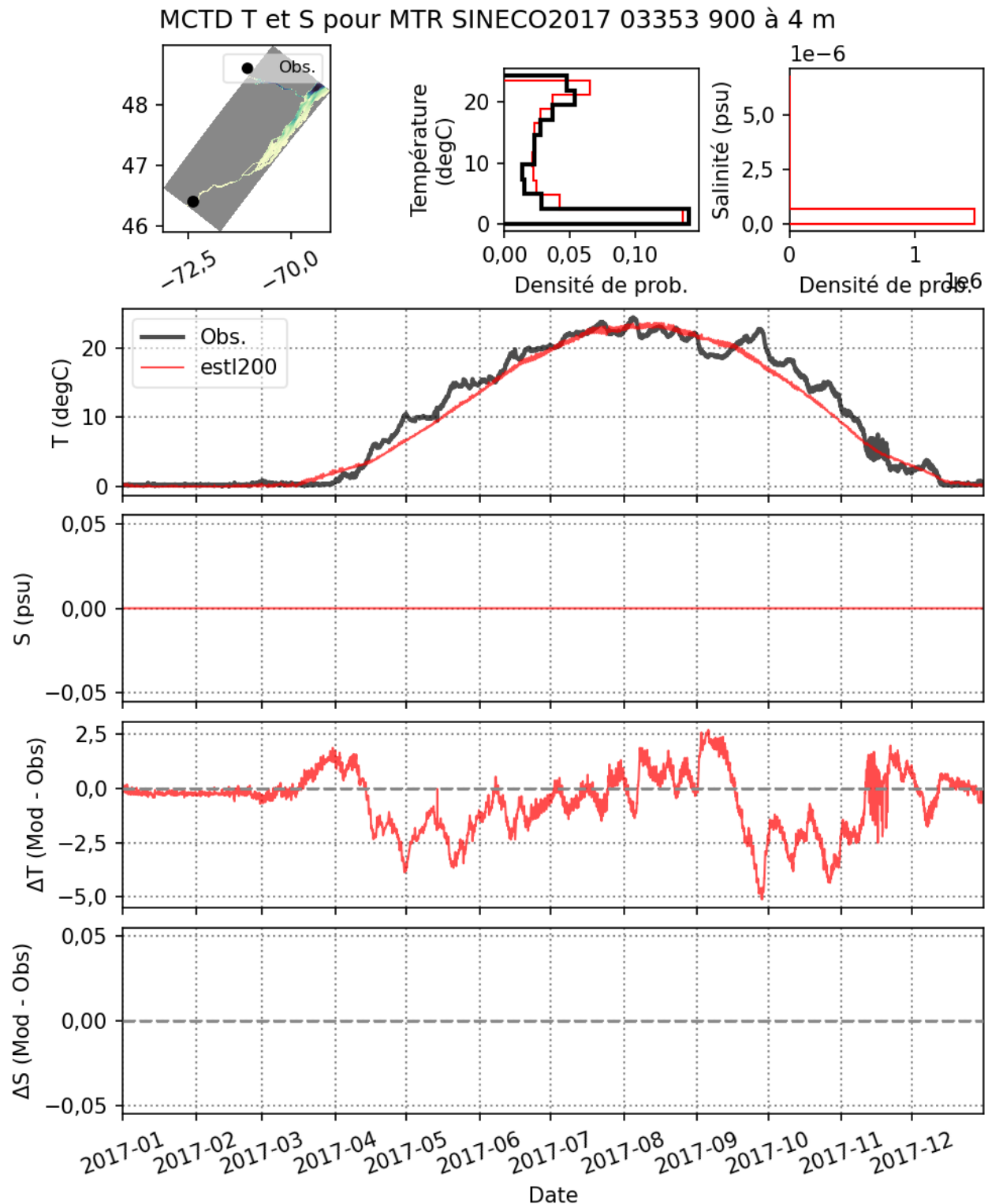


Figure 65. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3353 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

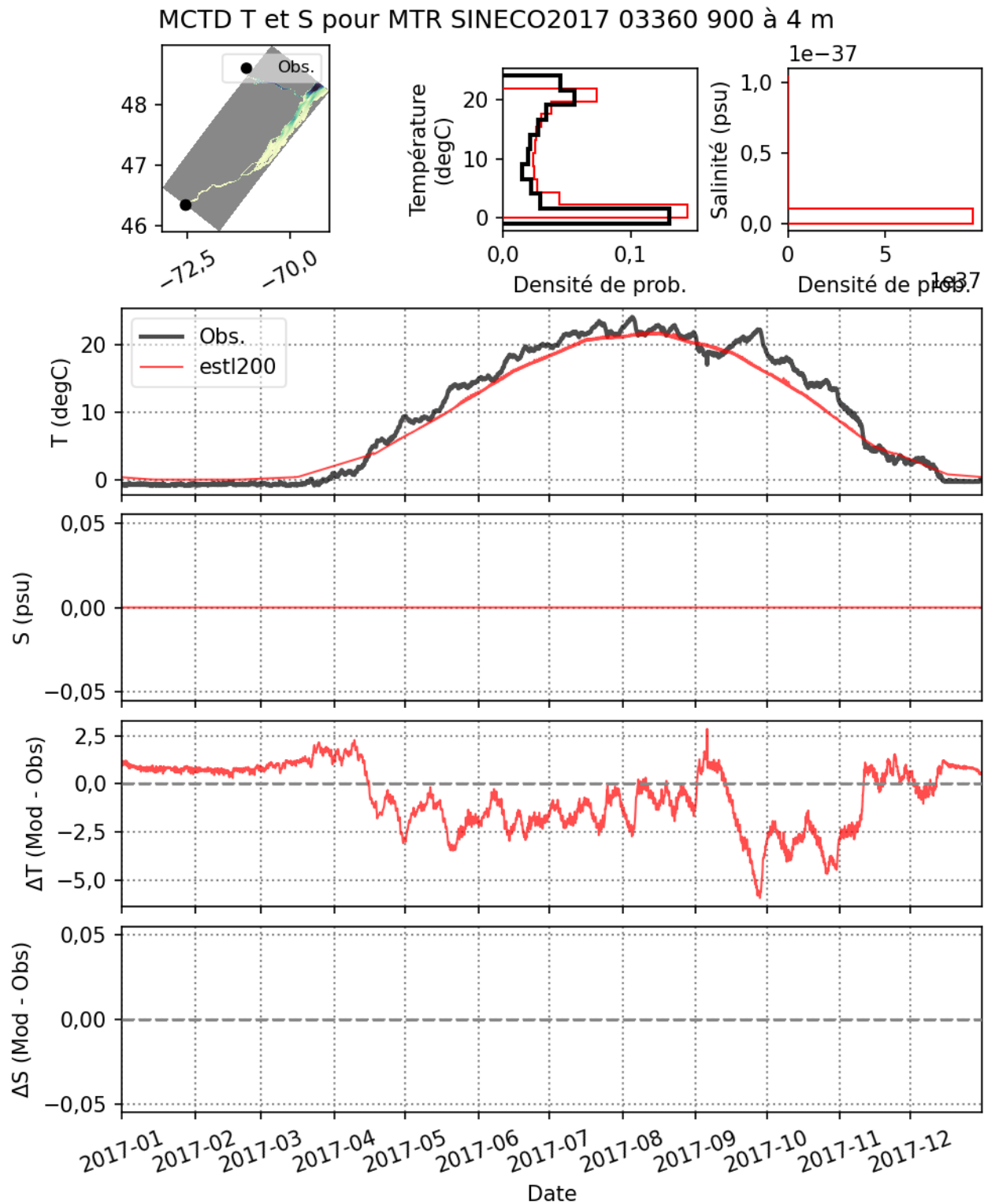


Figure 66. Température et salinité près de la surface pour les trois modèles et les observations provenant des sondes CTD fixées aux stations marégraphiques pour l'année 2017, à la station 3360 (voir la carte des stations marégraphiques à la figure 5 et à la figure 6).

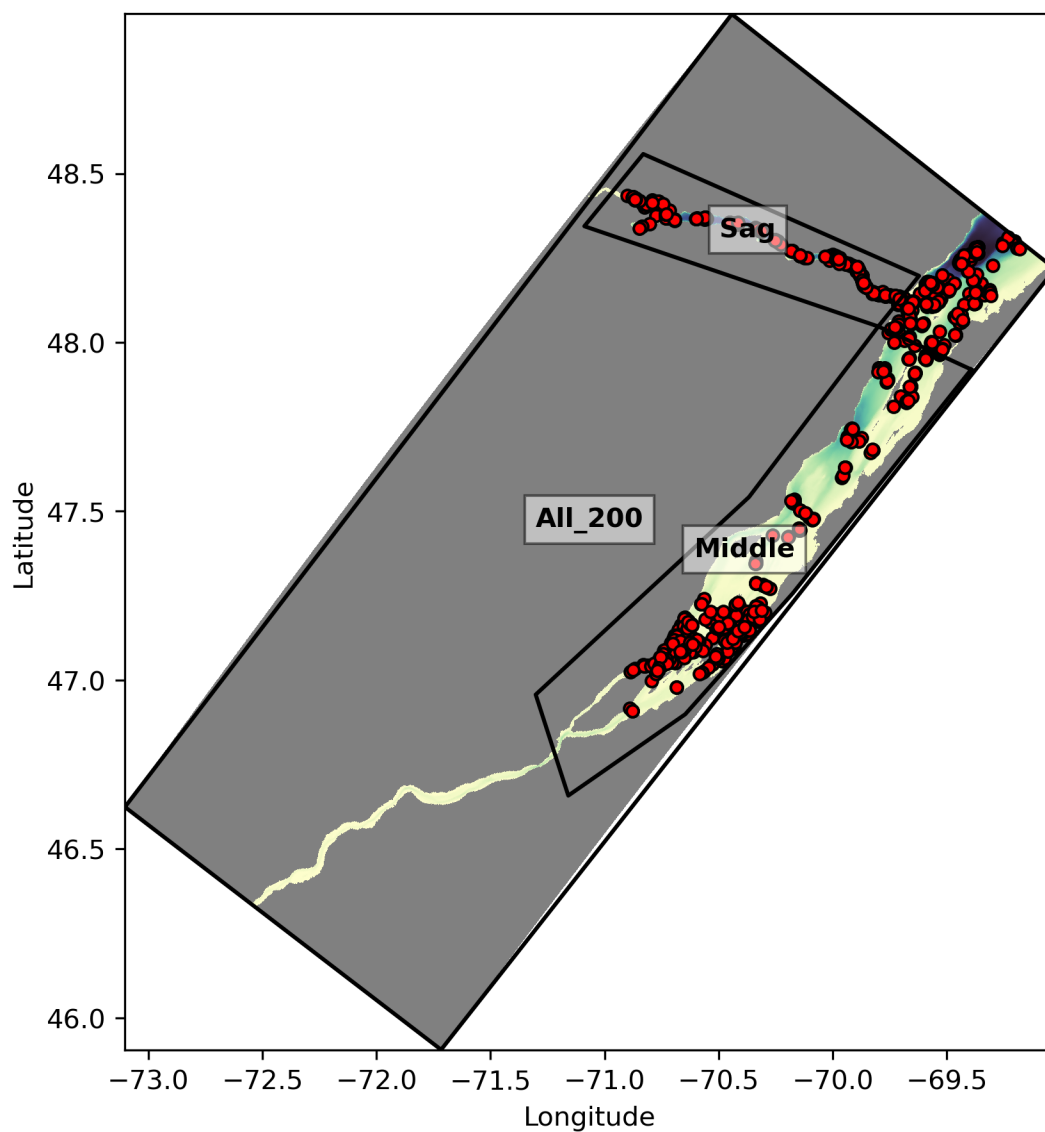


Figure 67. Profils CTD et définition des polygones sur le domaine du ESTL200.

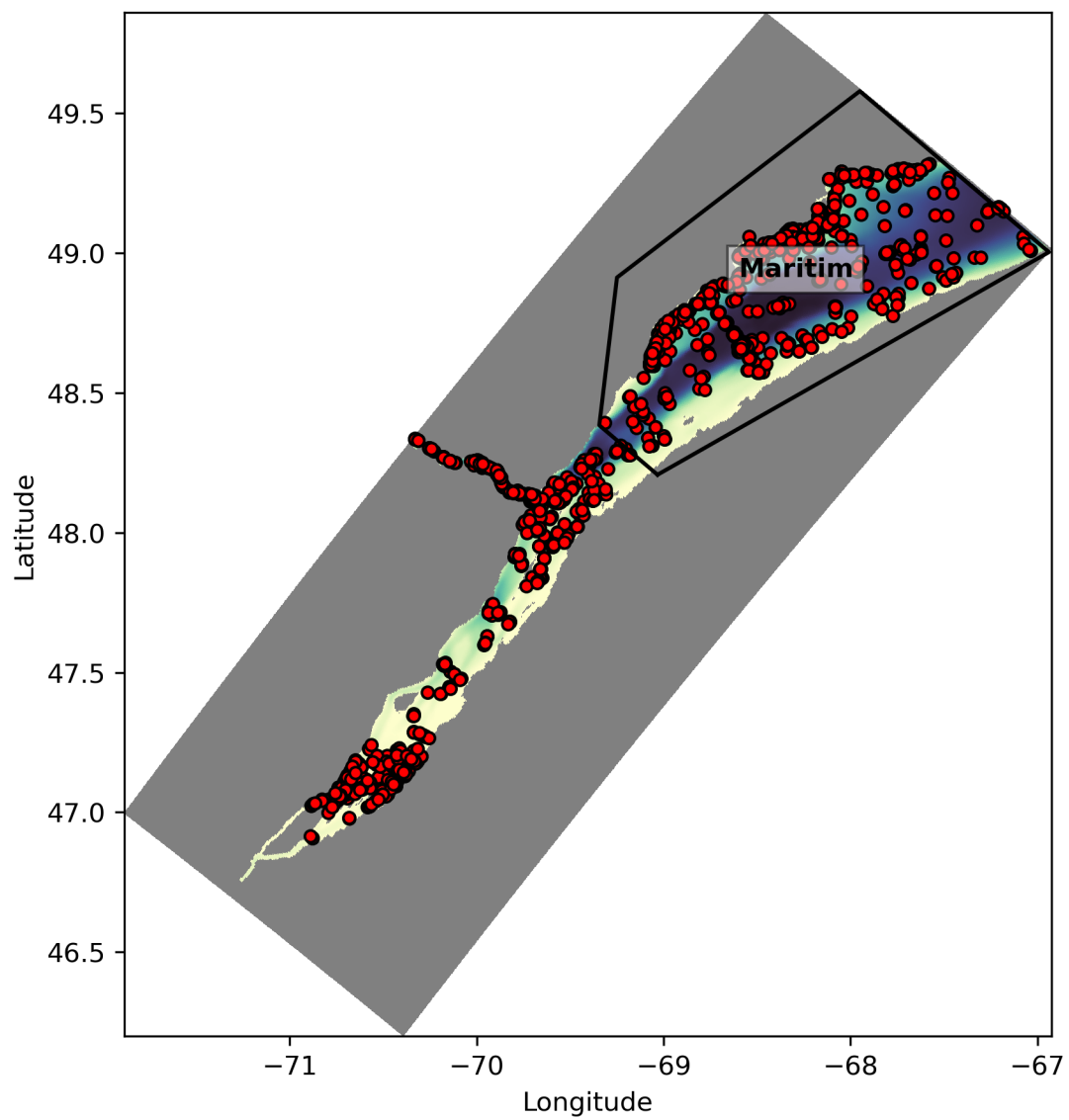


Figure 68. Profiles CTD et définition des polygones sur le domaine du ESTL500 non couvert par le ESTL200.

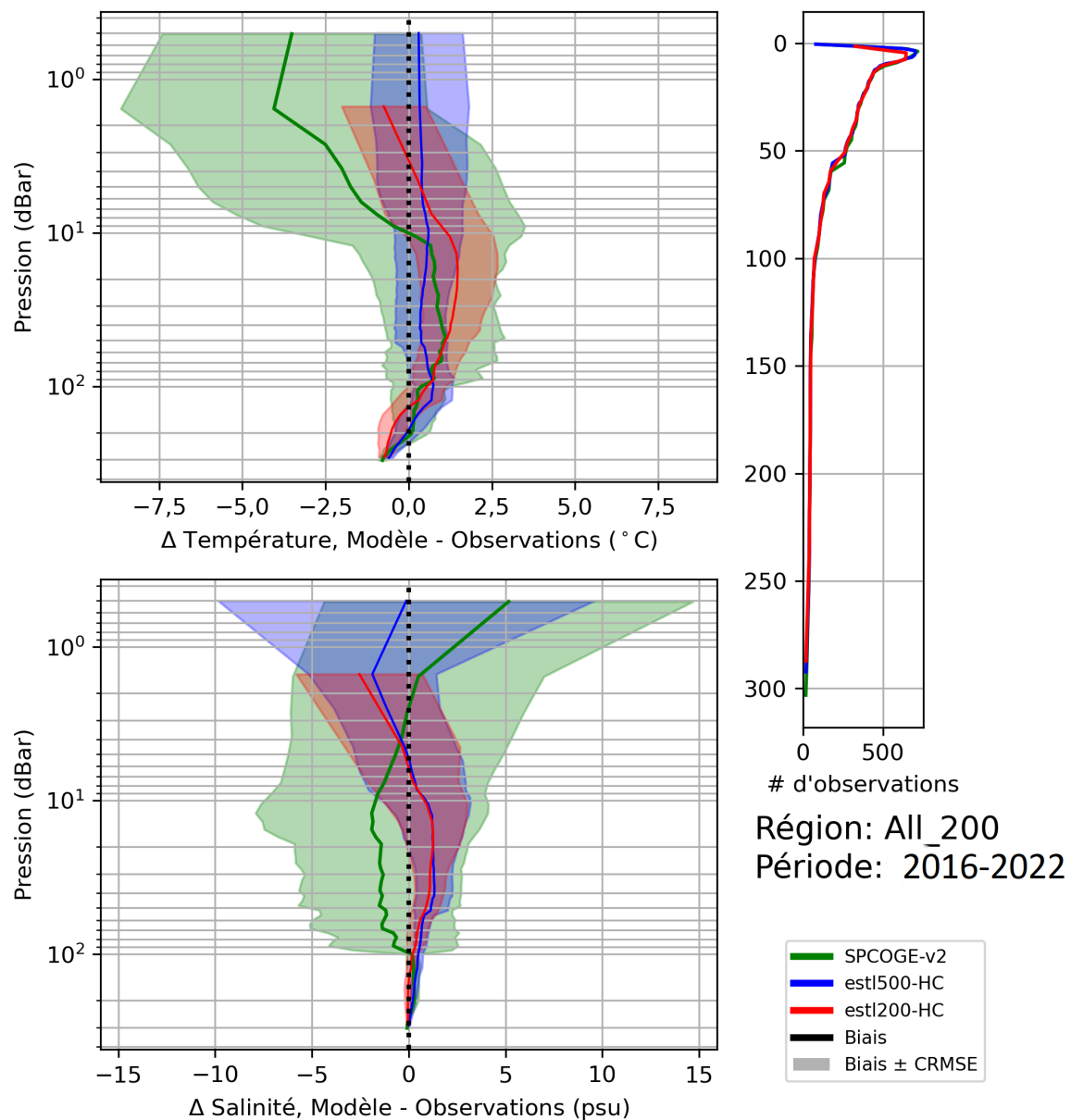


Figure 69. Comparaison des profils CTD compris dans l'ensemble du domaine à 200 m de résolution (ESTL200). Voir la définition de la région All_200 sur la Figure 67. Noter l'échelle logarithmique sur les axes verticaux pour bien illustrer les différences sur les 10 premiers mètres.

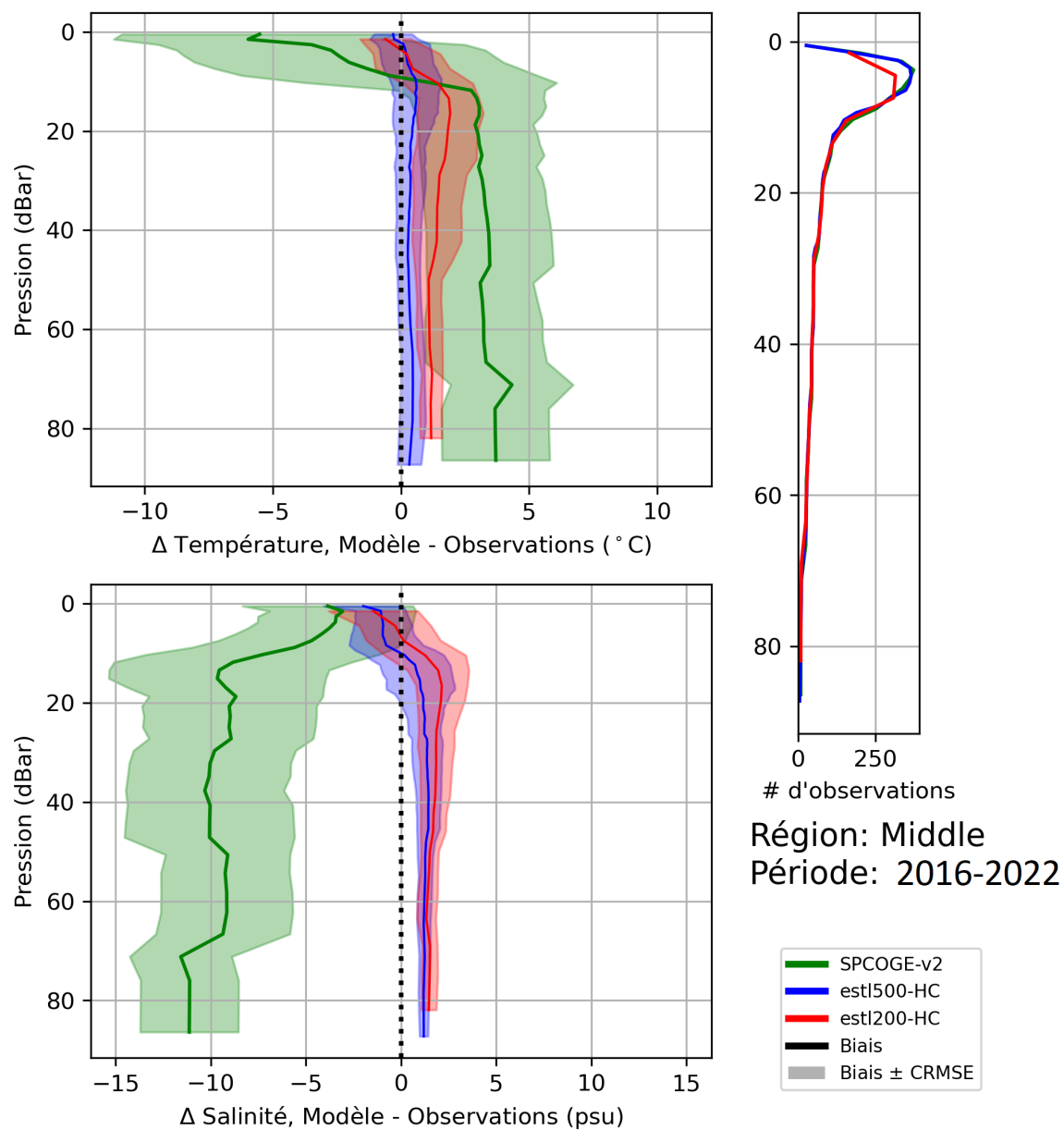


Figure 70. Comparaison du profil CTD pour la région de l'estuaire moyen. Voir la définition de la région Moyen sur la figure 30.

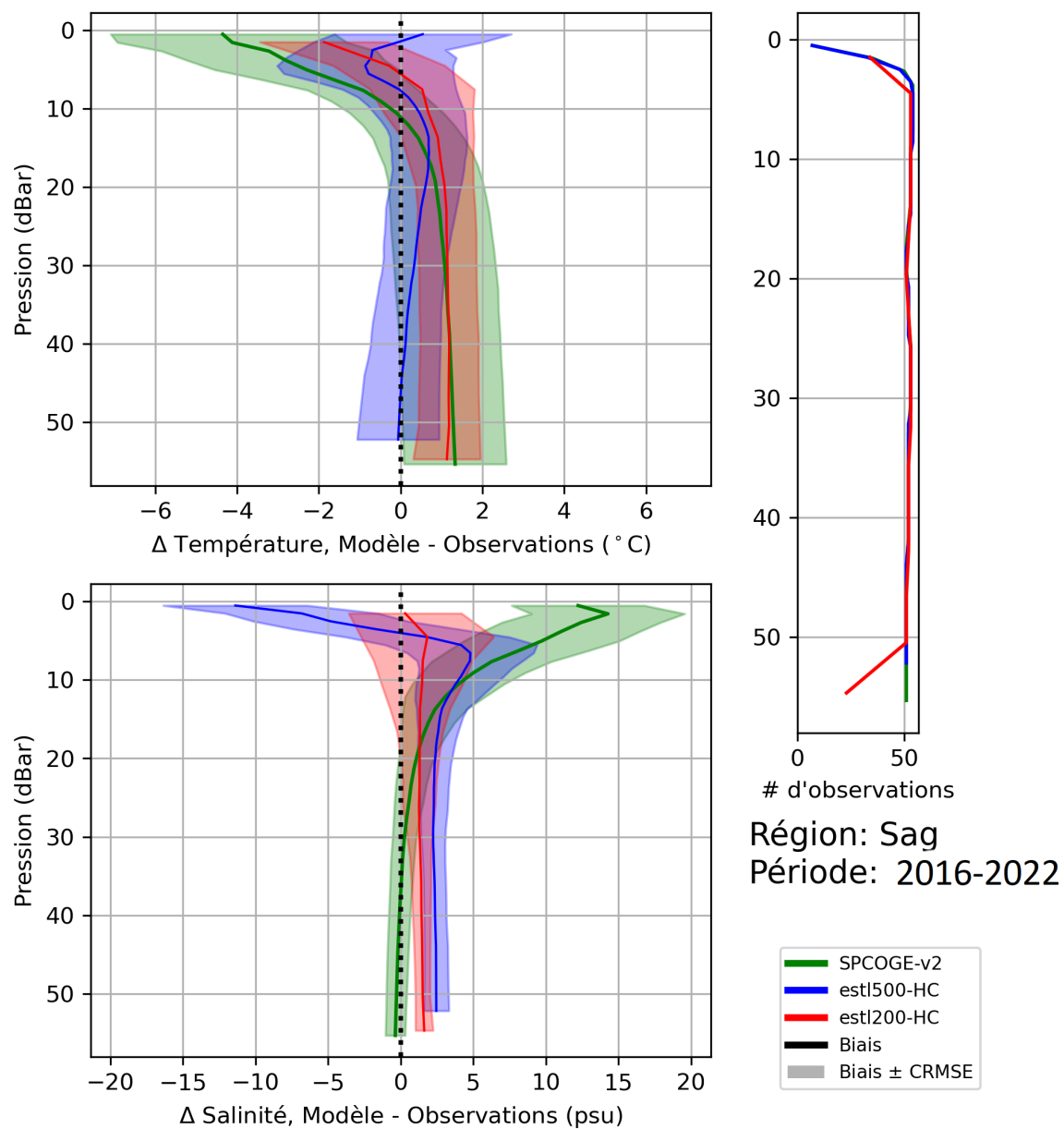


Figure 71. Comparaison du profil CTD pour la région du fjord du Saguenay. Voir la définition de la région Sag sur la figure 30.

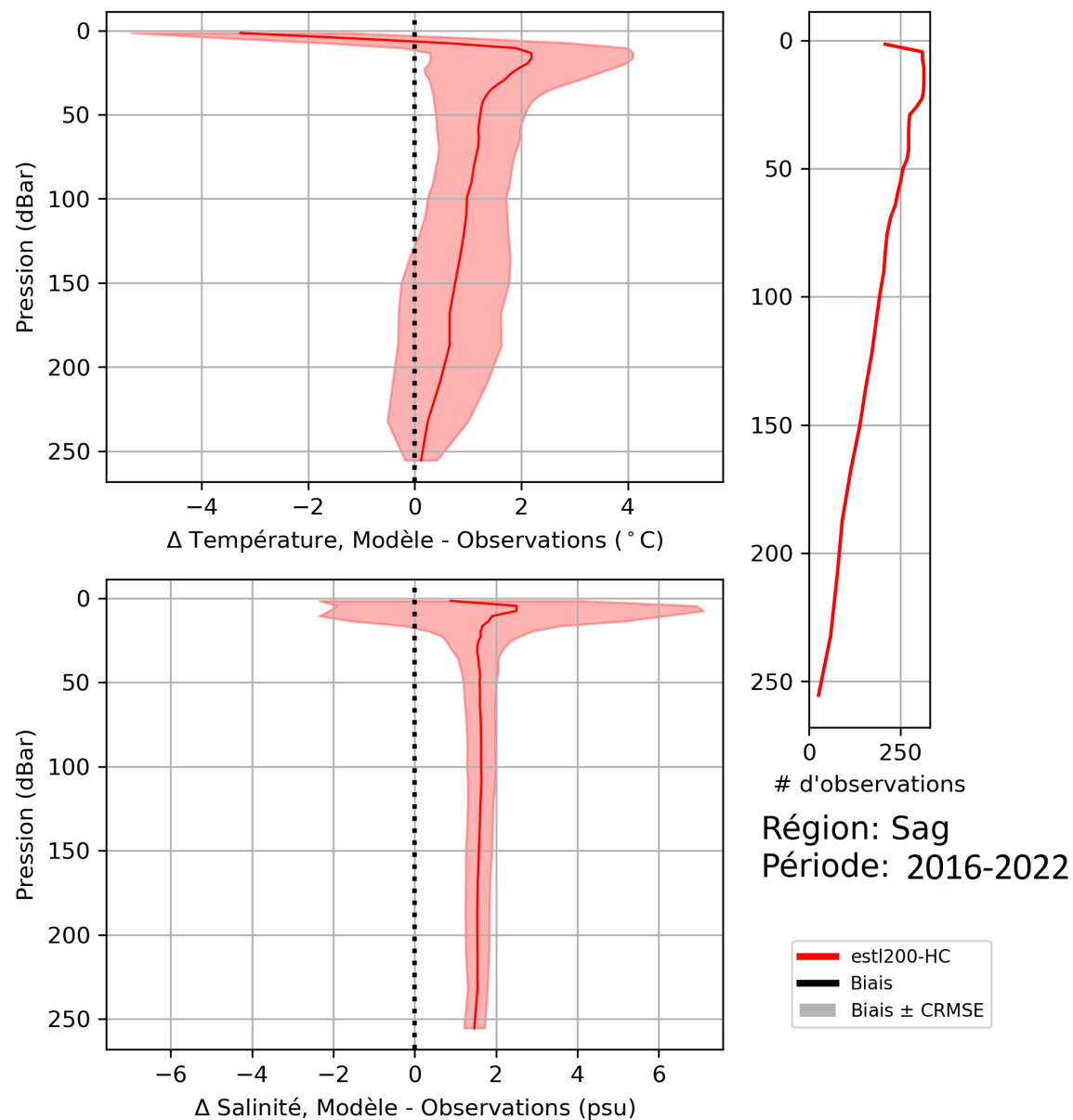


Figure 72. Profils CTD pour la région du fjord du Saguenay, seulement pour le ESTL200. Voir la définition de la région Sag sur la figure 30.

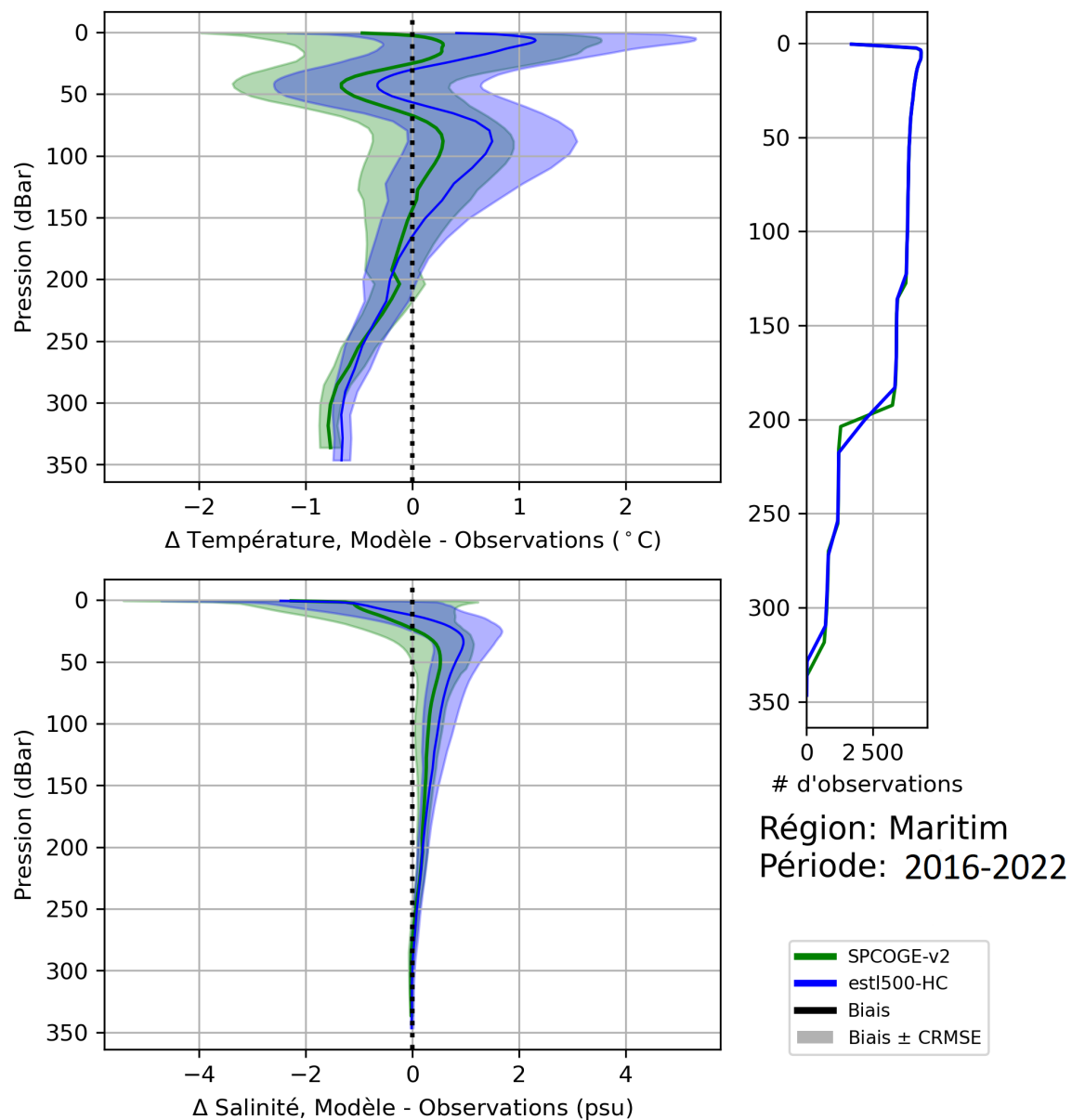


Figure 73. Comparaison du profil CTD pour la région de l'estuaire maritime. Voir la définition de la région Maritim sur la figure 30

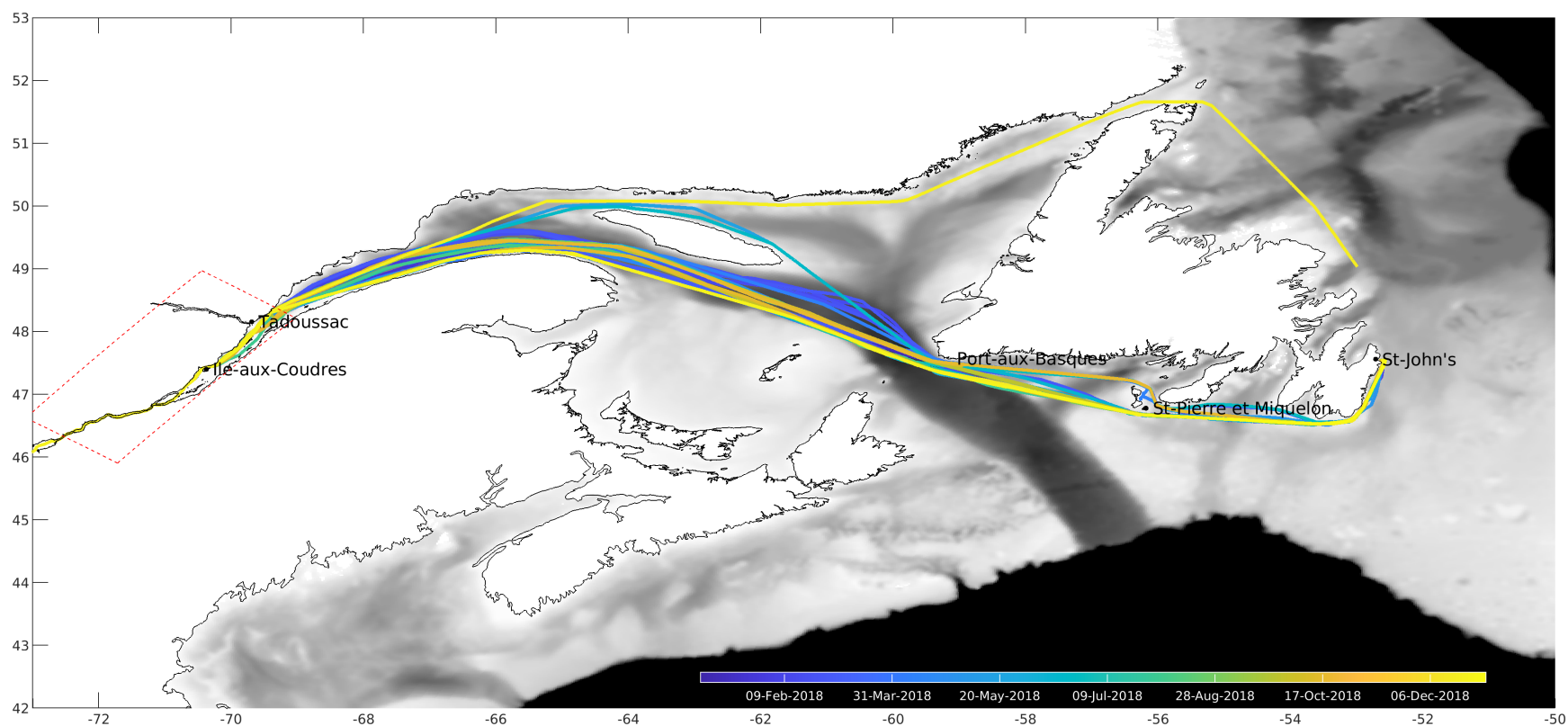


Figure 74. Trajectoires de l'Oceanex Connaigra pour l'année 2018. Le moment de la position du navire est représenté par l'échelle de couleur. Le rectangle rouge en pointillés représente les limites du domaine du ESTL200.

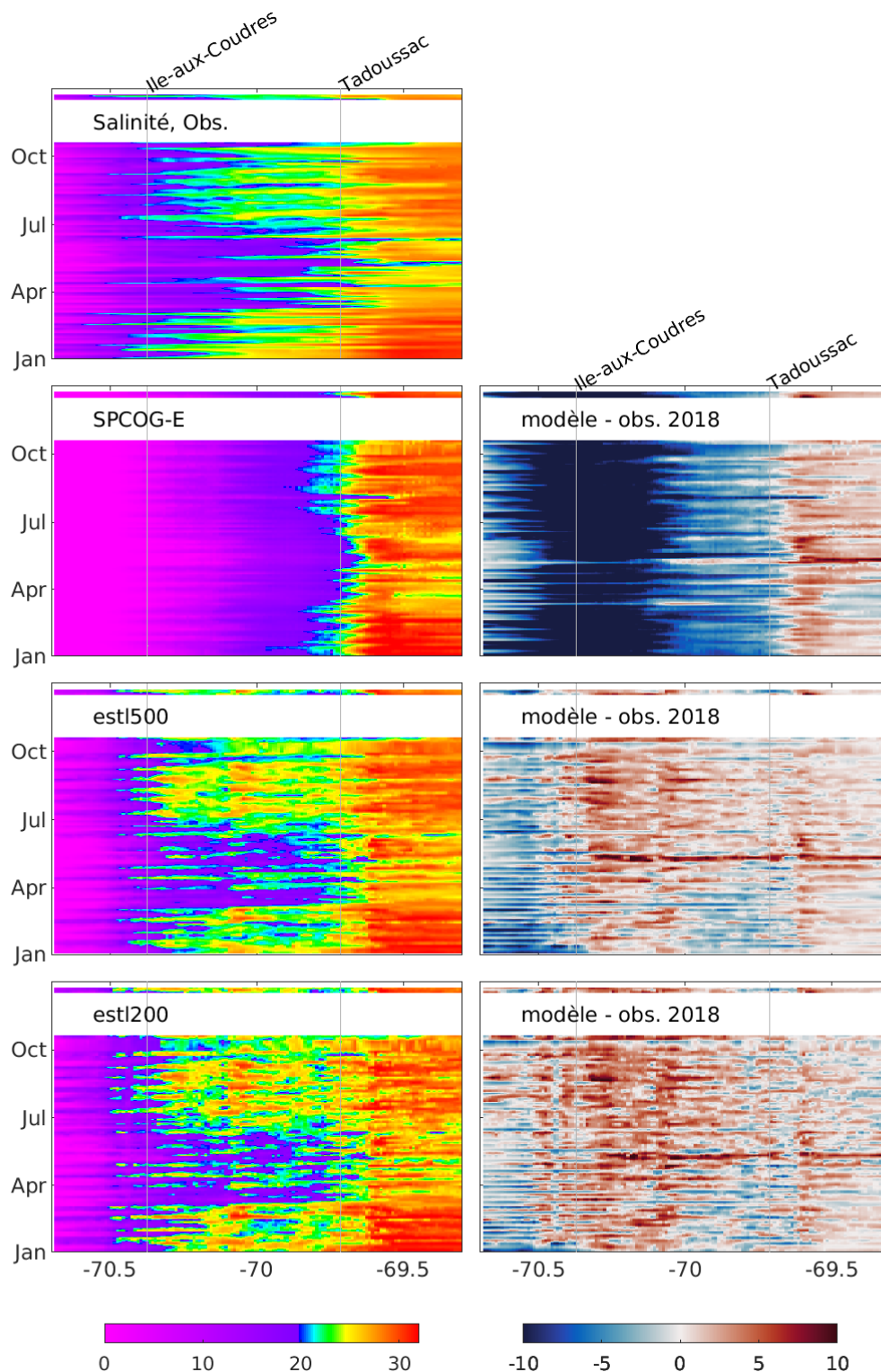


Figure 75. Salinité à 8 m recueillie par le navire sur la section commune aux trois modèles dans l'estuaire moyen. L'axe horizontal est la longitude, l'Île-aux-Coudres et la ville de Tadoussac étant marquées pour servir de points de repère (voir la Figure 74). L'axe vertical est le mois de l'année 2018. La rangée 1 représente les observations, les rangées 2 à 4, les résultats du modèle dans la colonne 1 et les différences avec les observations dans la colonne 2.

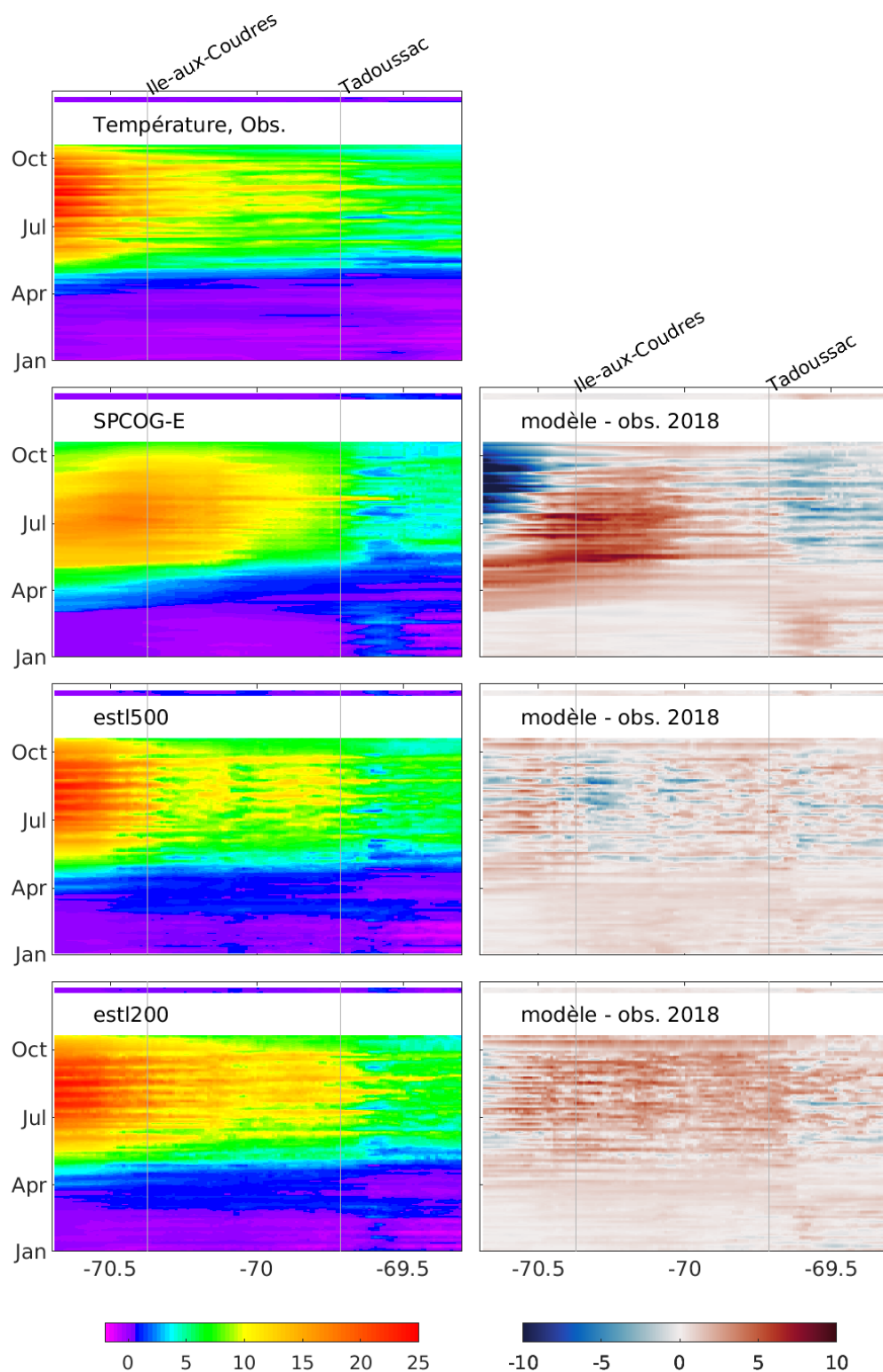


Figure 76. Température à 8 m recueillie par le navire sur la section commune aux trois modèles dans l'estuaire moyen. L'axe horizontal est la longitude, l'Île-aux-Coudres et la ville de Tadoussac étant marquées pour servir de points de repère (voir la Figure 74). L'axe vertical est le mois de l'année 2018. La rangée 1 représente les observations, les rangées 2 à 4, les résultats du modèle dans la colonne 1 et les différences avec les observations dans la colonne 2.

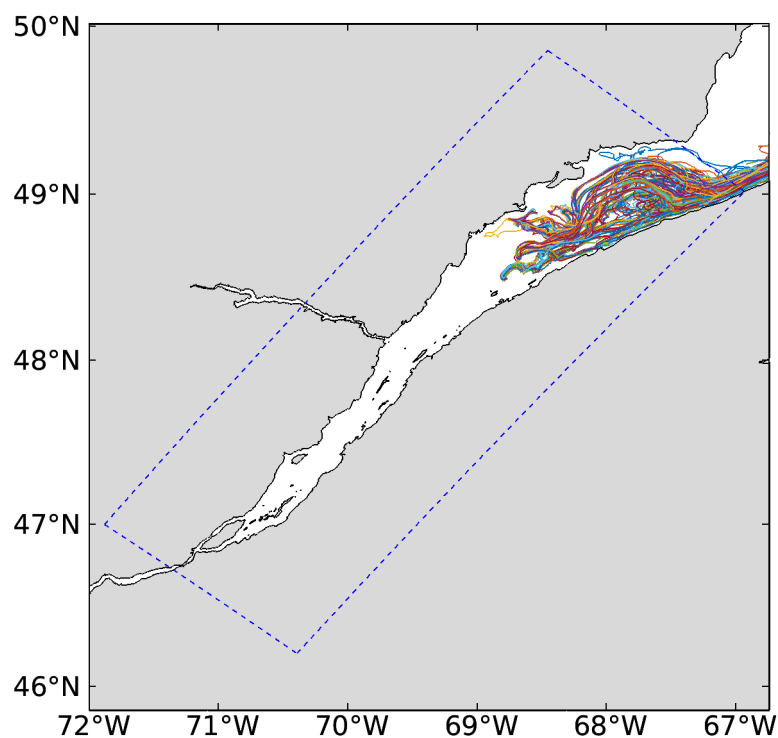


Figure 77. Carte de la trajectoire des bouées dérivantes pour le projet TReX, 2020. Le rectangle en pointillés bleus correspond au domaine du ESTL500.

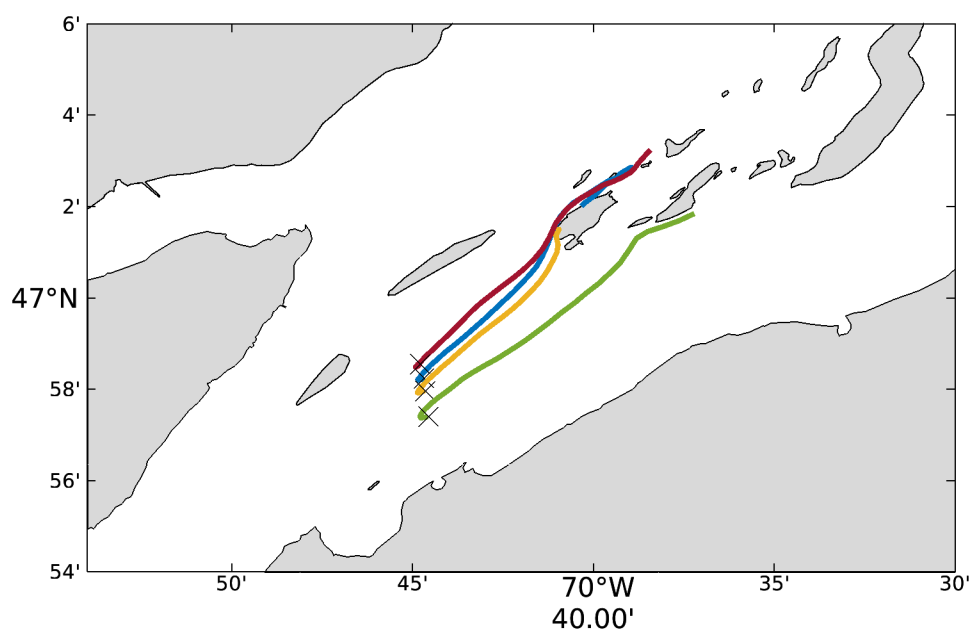


Figure 78. Carte de la trajectoire des bouées dérivantes près de Saint-François, île d'Orléans. Les positions initiales de déploiement sont marquées d'une croix noire.

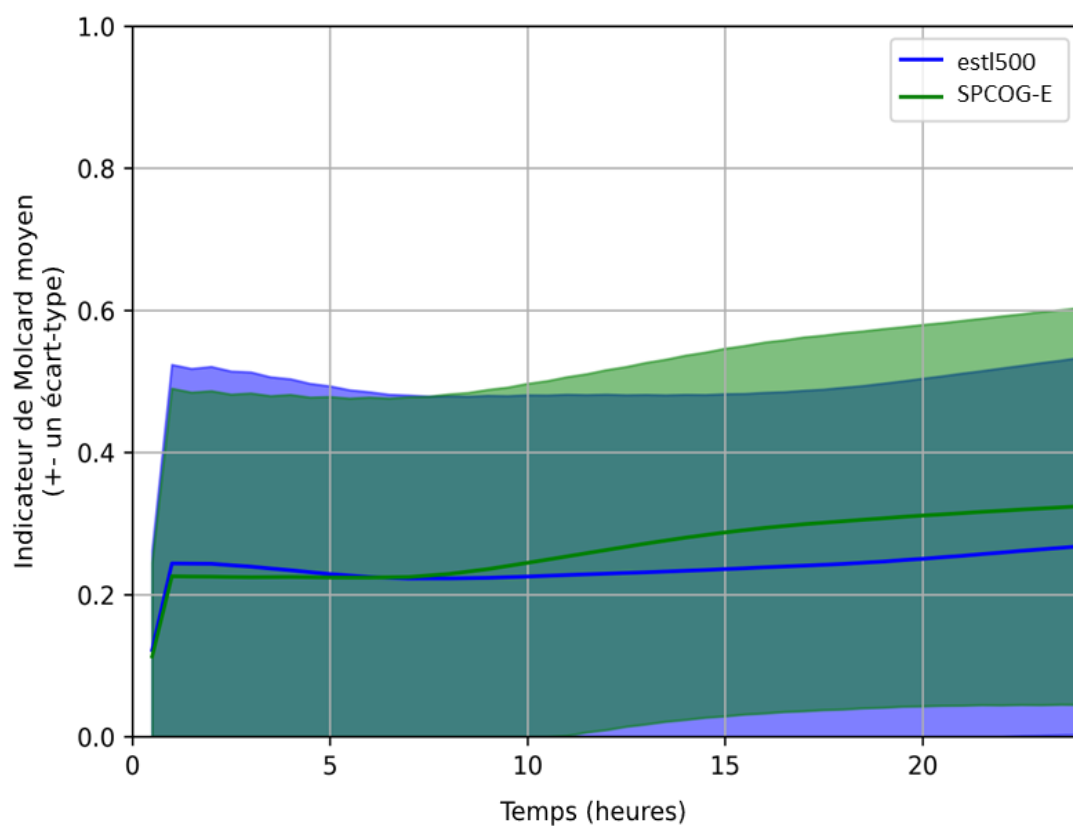


Figure 79. Indice de comparaison de Molcard pour la base de données des bouées dérivantes du projet TReX en 2020.

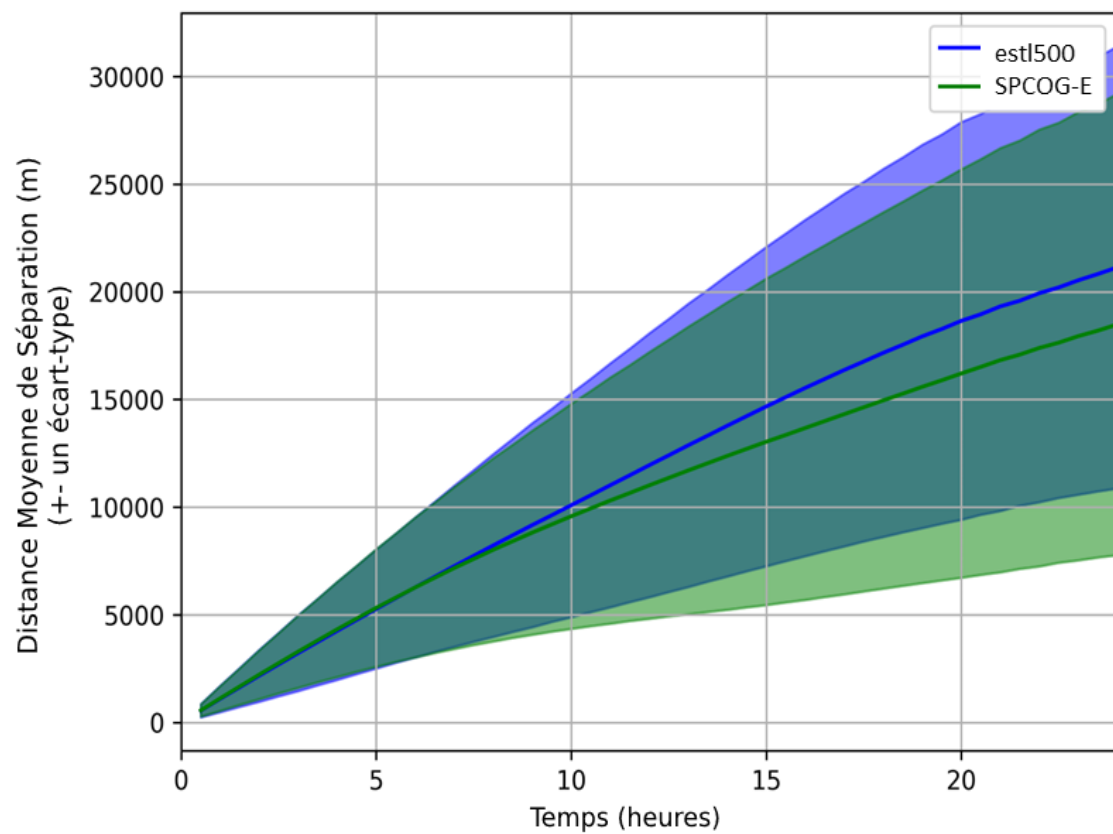


Figure 80. Distance moyenne de séparation pour la base de données des bouées dérivantes du projet TReX en 2020.

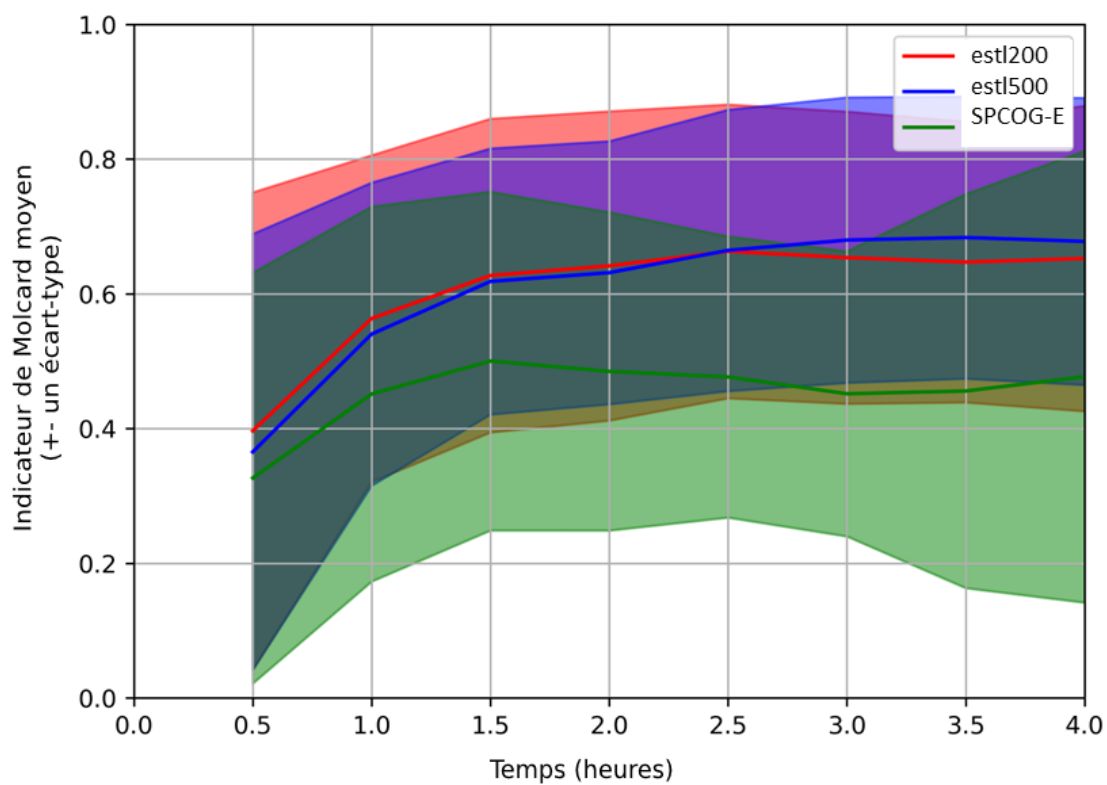


Figure 81. Indice de comparaison de Molcard pour les bouées dérivantes déployées dans le secteur de Saint-François, île d'Orléans, en juillet 2019.

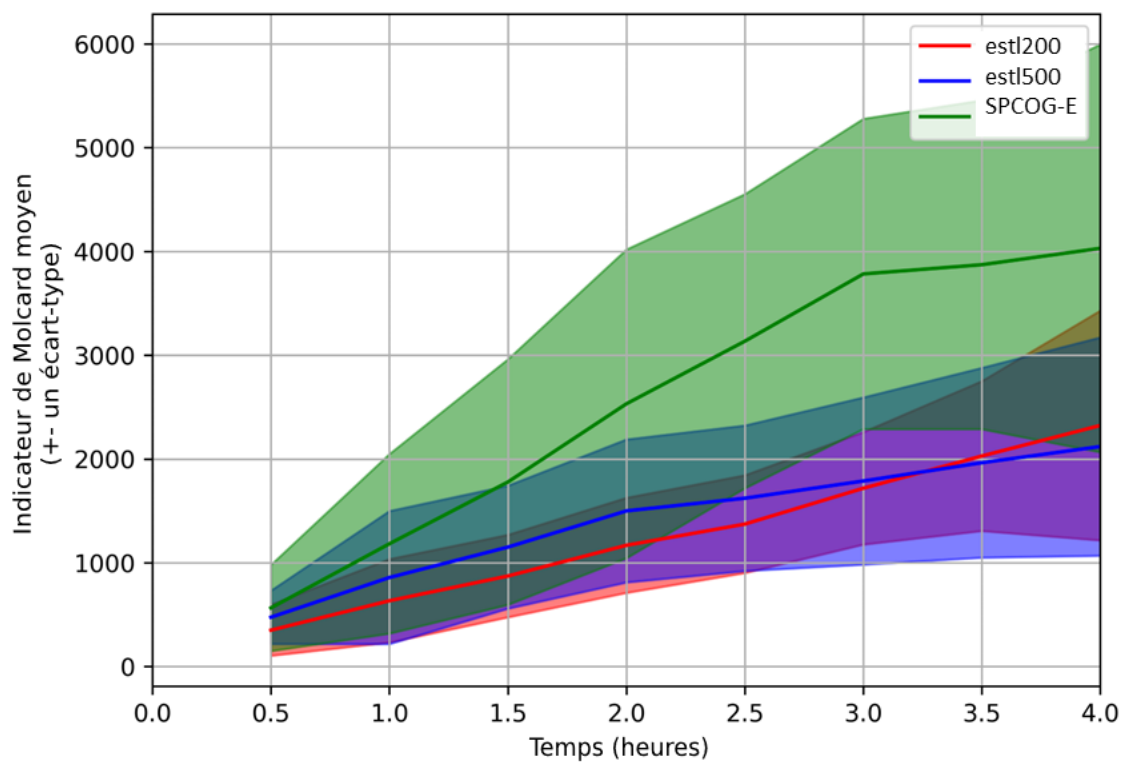


Figure 82. Distance moyenne de séparation pour les bouées dérivantes déployées dans le secteur de Saint-François, île d'Orléans, en juillet 2019.

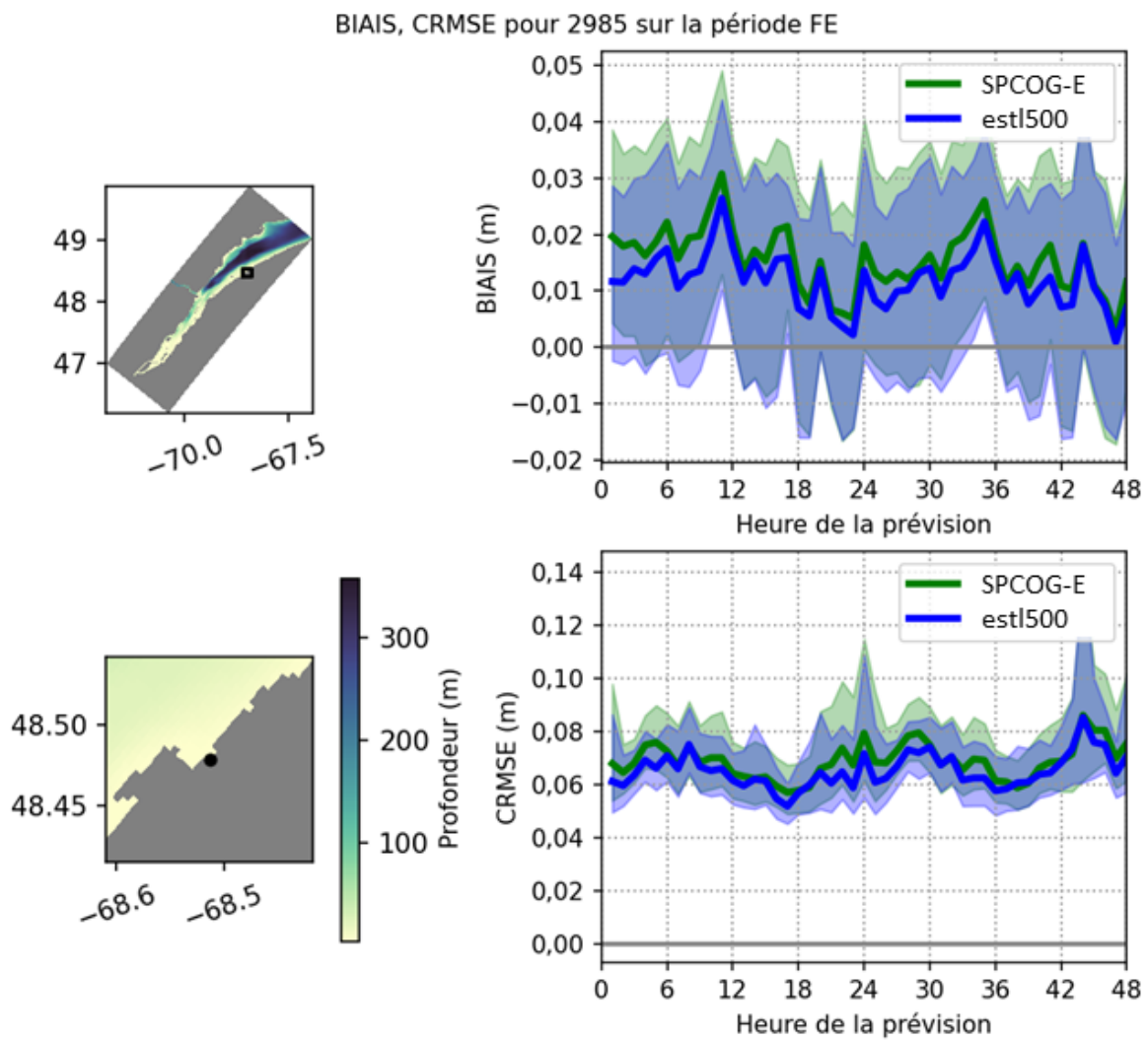


Figure 83. Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel à la station 2985.

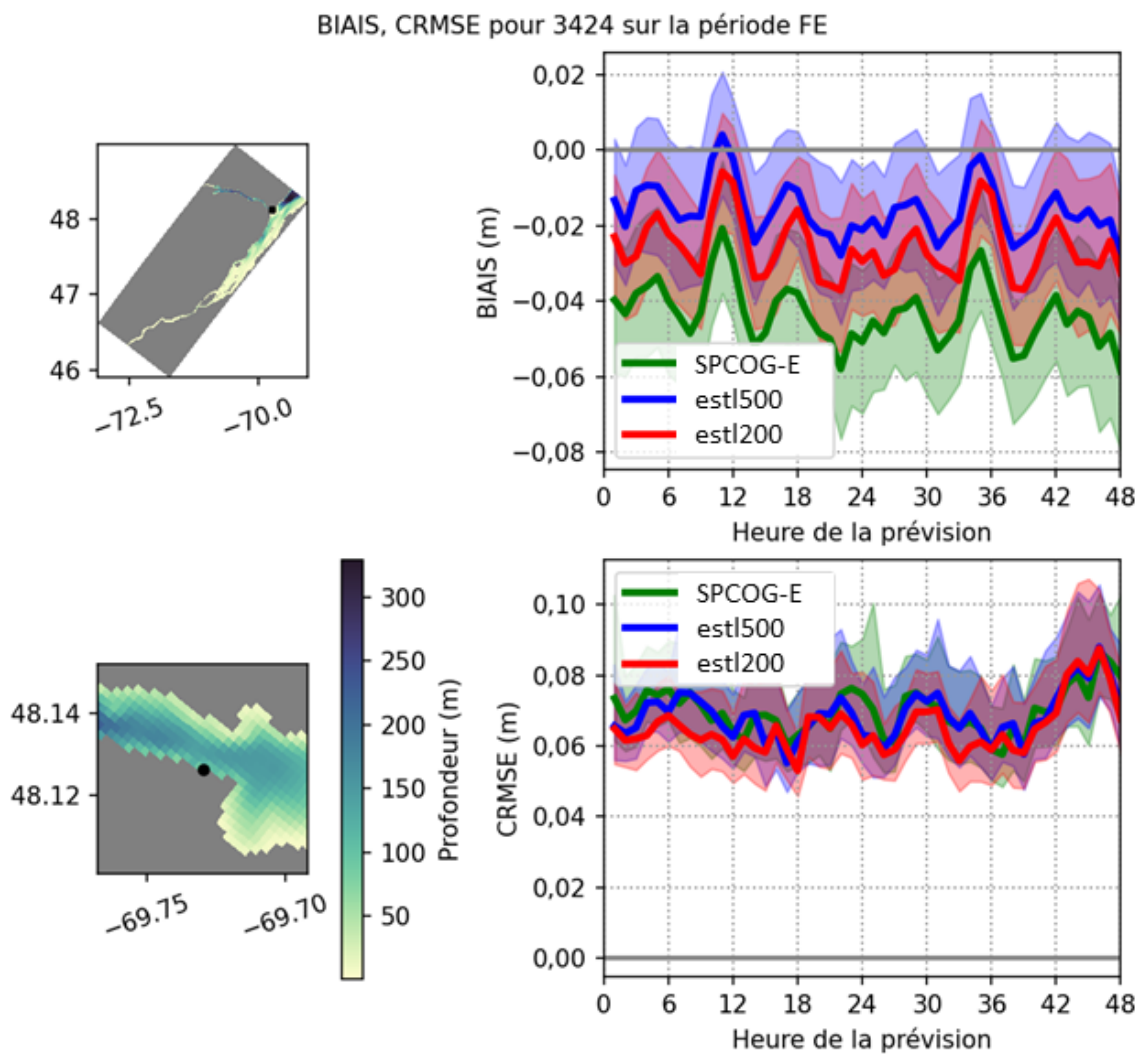


Figure 84. Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel à la station 3424.

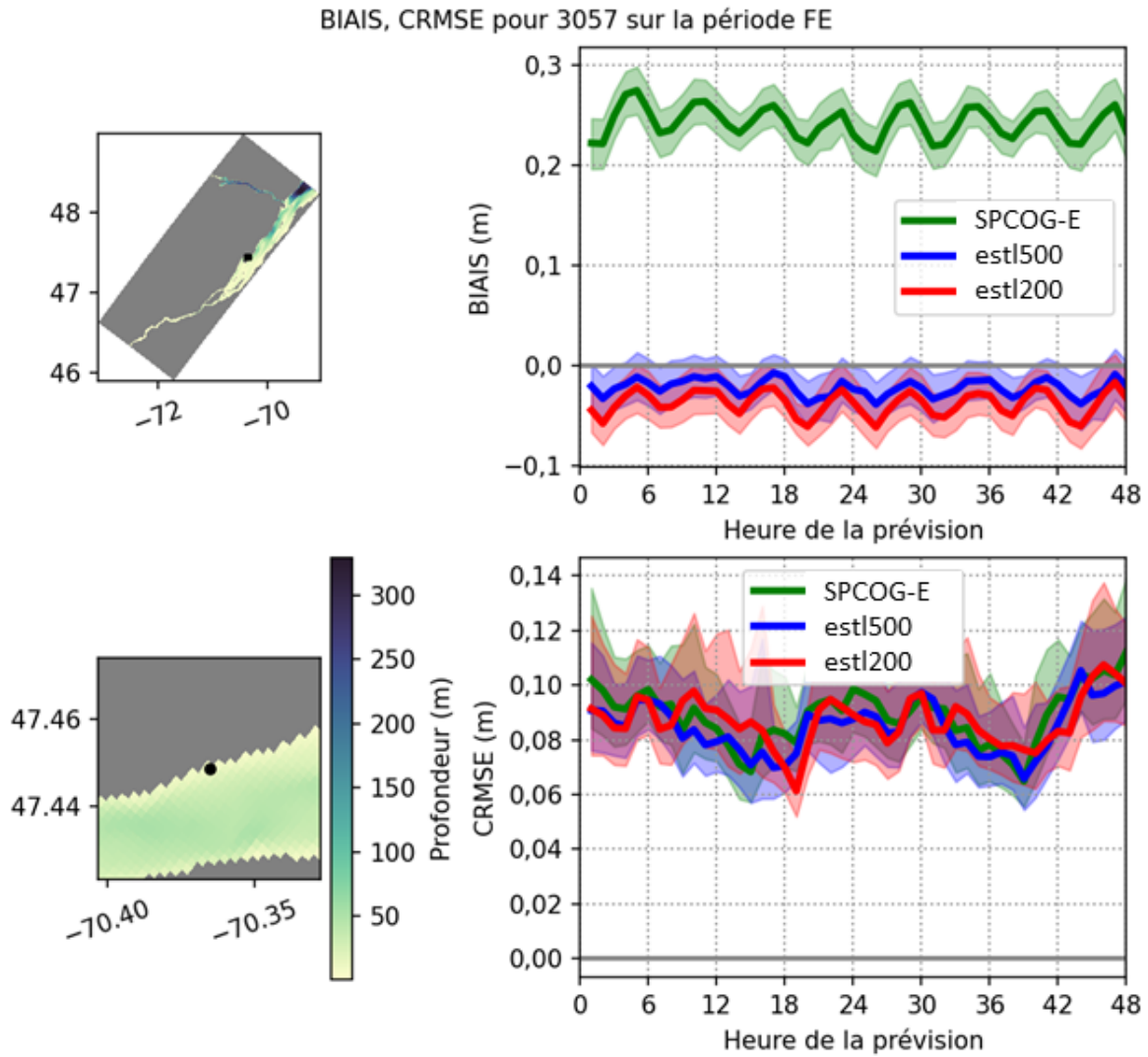


Figure 85. Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel à la station 3057.

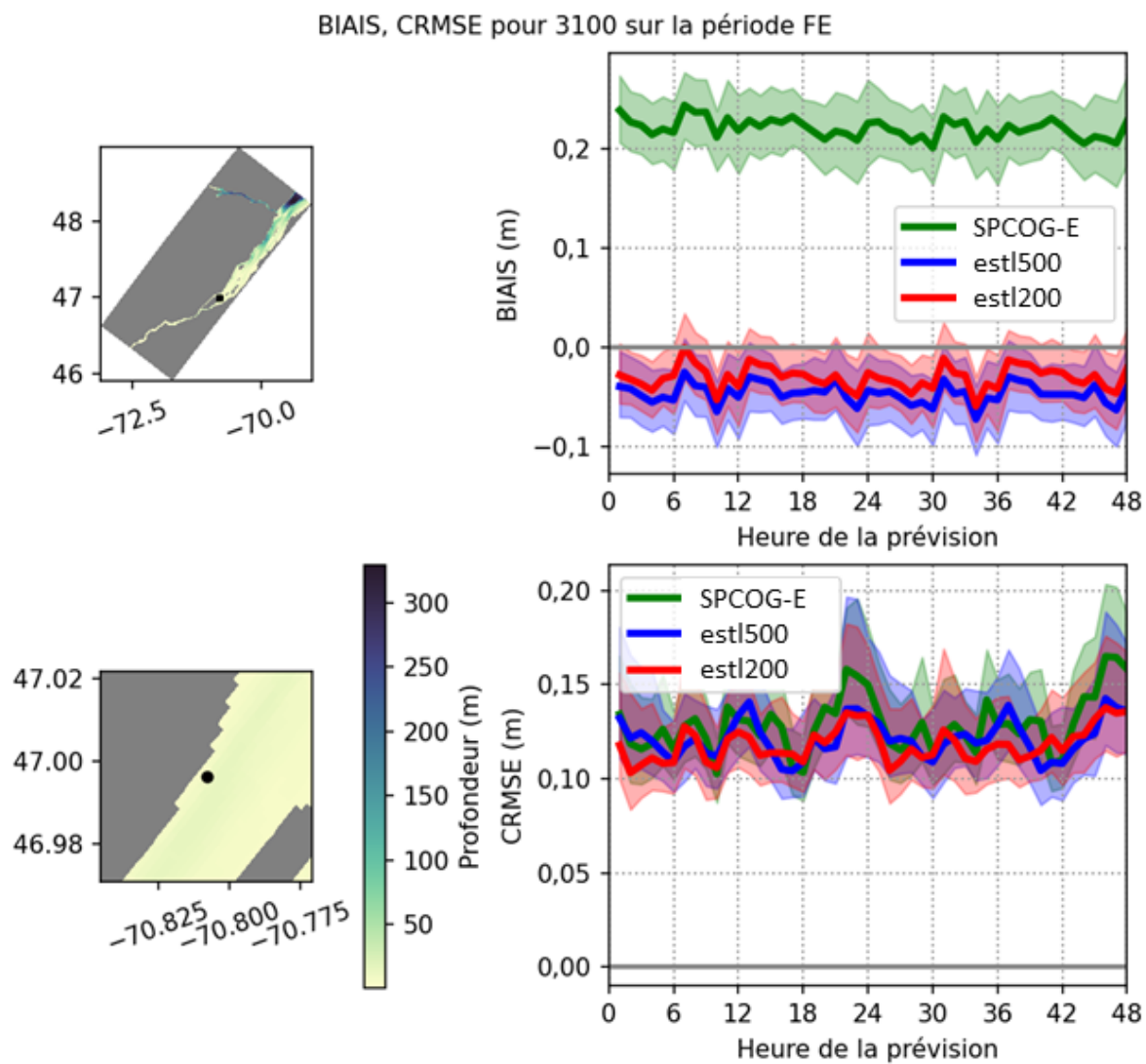


Figure 86. Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel à la station 3100.

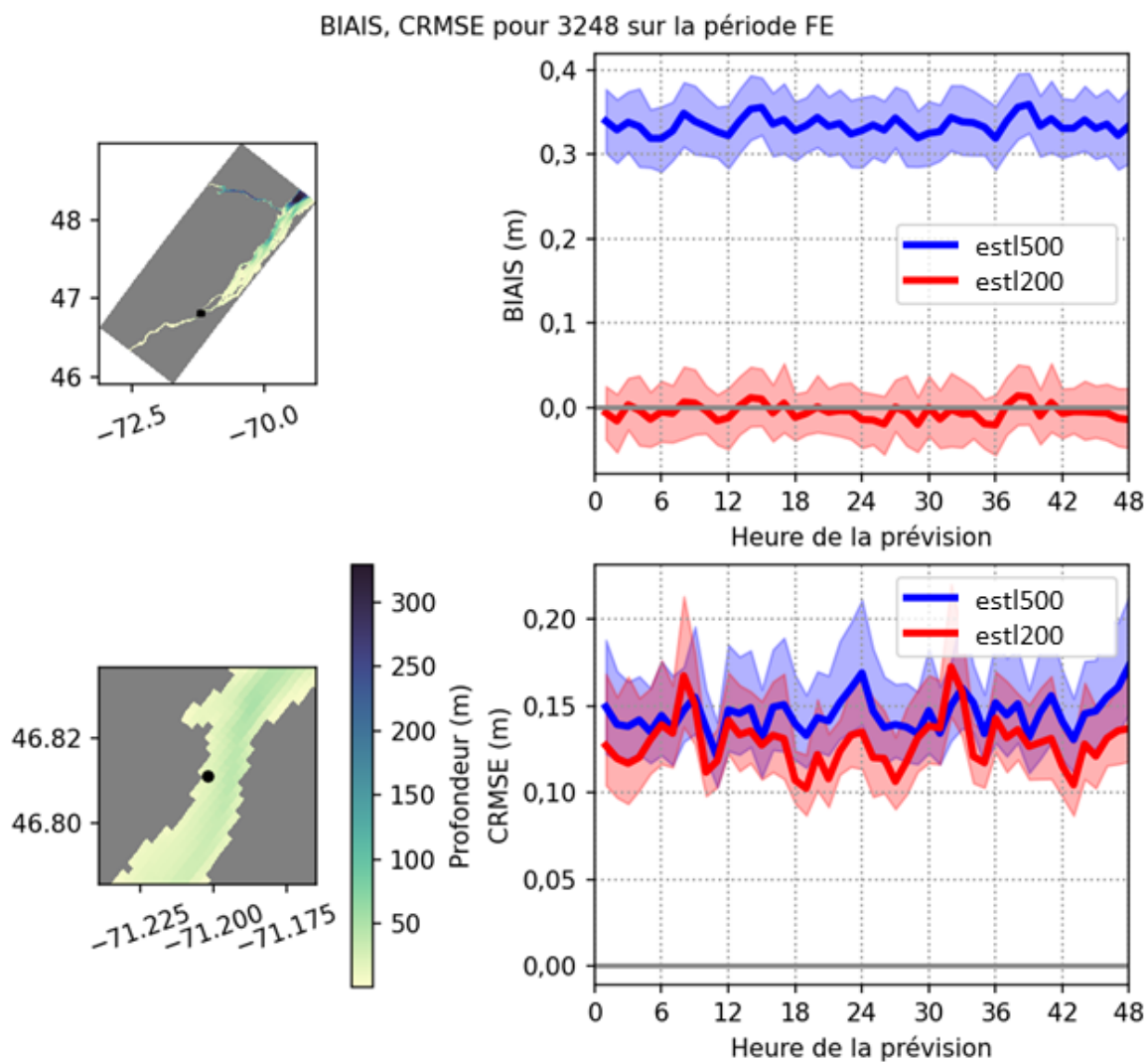


Figure 87. Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel à la station 3248.