



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 2026/003

Région de la capitale nationale

Évaluation des modèles portuaires de prévisions océaniques élaborés dans le cadre du Plan de protection des océans du Canada : système de fjords de Kitimat

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

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

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

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

Avant-propos

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

Publié par :

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

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



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

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

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-79957-5 N° cat. Fs70-5/2026-003F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Blanken, H., Dunphy, M., Krassovski, M., Taylor, S., Horwitz, R., St-Onge Drouin, S. et Drozdowski, A. 2026. Évaluation des modèles portuaires de prévisions océaniques élaborés dans le cadre du Plan de protection des océans du Canada : système de fjords de Kitimat. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2026/003. xiv + 147 p.

Also available in English :

Blanken, H., Dunphy, M., Krassovski, M., Taylor, S., Horwitz, R., St-Onge Drouin, S., and Drozdowski, A. 2026. Assessment of Port Ocean Prediction System Developed Under Canada's Oceans Protection Plan: Kitimat Fjord. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2026/003. xii + 142 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	xiv
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. SÉQUENCEMENT DES SIMULATIONS.....	3
2.4. FORÇAGES DE SURFACE.....	4
2.5. SUITE D'AUTOMATISATION.....	4
2.6. ROBUSTESSE ET LIMITATIONS.....	4
3. DESCRIPTION ACTUELLE DU PORT.....	5
3.1. CARACTÉRISTIQUES OCÉANOGRAPHIQUES RÉGIONALES.....	5
3.2. DOMAINE ET CONFIGURATION.....	7
3.3. INITIALISATION.....	7
3.4. FORÇAGE LIÉ AUX LIMITES OUVERTES.....	8
3.5. APPORT D'EAU DOUCE.....	8
3.6. MODÈLE DE GLACE DE MER.....	9
3.7. STABILITÉ DU SYSTÈME DE MODÉLISATION.....	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.....	15
4.1.4. Dérive.....	15
4.2. PRÉVISIONS.....	17
5. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES.....	17
5.1. INDICATEURS DE NIVEAU D'EAU.....	17
5.1.1. Hauteur moyenne de la surface de la mer.....	18
5.1.2. Composante tidale du niveau d'eau.....	18
5.1.3. Indices de comparaison globaux.....	19
5.1.4. Niveau d'eau lors d'une onde de tempête.....	20
5.2. COURANTS.....	21
5.2.1. Profileur de courant à effet Doppler horizontal.....	21
5.2.2. Courantomètres.....	21
5.2.3. ADCP ancrés.....	22
5.2.4. Transects d'ADCP.....	24
5.3. PROPRIÉTÉS DE L'EAU.....	25
5.3.1. Température de la surface de la mer.....	25
5.3.2. Sondes CTD ancrées.....	25

5.3.3.	Profils de CTD	26
5.3.4.	Traversiers	27
5.4.	COURANT DE DÉRIVE	28
6.	RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES PRÉVISIONS	29
6.1.	COMPOSANTE RÉSIDUELLE DU NIVEAU D'EAU	29
6.2.	PROFILEURS DE COURANT À EFFET DOPPLER HORIZONTAL.....	29
6.3.	TEMPÉRATURE DE LA SURFACE DE LA MER.....	30
7.	RÉSUMÉ.....	30
8.	CONCLUSIONS CLÉS	30
9.	REMERCIEMENTS.....	31
10.	RÉFÉRENCES CITÉES.....	31
11.	TABLEAUX	35
12.	FIGURES	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Paramètres du modèle portuaire de Kitimat pour les configurations à 100 m et 500 m du système NEMO.....	35
Tableau 2. Ajustement de la phase de la marée provenant de WebTide à la limite ouverte de la grille à 500 m (KIT500).	36
Tableau 3. Décalages utilisés pour déplacer les niveaux d'eau des marégraphes permanents depuis le zéro des cartes jusqu'au CGVD28.	36
Tableau 4. Statistiques sur la composante tidale du niveau d'eau à l'emplacement de marégraphes permanents en 2021.....	37
Tableau 5. Comparaison des statistiques de la composante de marée M2 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement). Les noms de stations en anglais sont utilisés pour faciliter la récupération des données.	38
Tableau 6. Comparaison des statistiques de la composante de marée S2 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement).	39
Tableau 7. Comparaison des statistiques de la composante de marée K1 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement).	40
Tableau 8. Comparaison des statistiques de la composante de marée N2 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement).	41
Tableau 9. Comparaison des statistiques de la composante de marée O1 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement).	42
Tableau 10. Comparaison des statistiques de la composante de marée P1 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement).	43
Tableau 11. Comparaison des statistiques de la composante de marée K2 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement).	43
Tableau 12. Scores de performance pour les ondes de tempête calculés avec les données des dix tempêtes les plus violentes survenues pendant la période de simulation rétrospective.	44
Tableau 13. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants de marée mesurés par les courantomètres dans le domaine de la configuration à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.	44
Tableau 14. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants de marée mesurés par les courantomètres dans le domaine de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.	44
Tableau 15. Comparaison de l'erreur d'ellipse pour les courants de marée mesurés par les courantomètres.	45
Tableau 16. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants résiduels mesurés par les courantomètres installés dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.	47
Tableau 17. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants résiduels mesurés par les courantomètres installés dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.	47
Tableau 18. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants totaux mesurés par les courantomètres installés dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.	48
Tableau 19. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants totaux mesurés par les courantomètres installés dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.	49

Tableau 20. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants de marée mesurés par profileur de courant à effet Doppler (ADCP) dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.	50
Tableau 21. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants de marée mesurés par profileur de courant à effet Doppler (ADCP) dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.	50
Tableau 22. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants résiduels mesurés par profileur de courant à effet Doppler (ADCP) dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.	51
Tableau 23. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants résiduels mesurés par profileur de courant à effet Doppler (ADCP) dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.	52
Tableau 24. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants totaux mesurés par profileur de courant à effet Doppler (ADCP) dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.	53
Tableau 25. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants totaux mesurés par profileur de courant à effet Doppler (ADCP) dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.	54
Tableau 26. Comparaison des statistiques liées à l'erreur de la température de surface de la mer pour la période de simulation rétrospective (janvier 2016 à février 2022).	56
Tableau 27. Comparaison des statistiques liées à l'erreur de température provenant des capteurs de conductivité, température et profondeur (CTD) ancrés (suite à la page suivante)..	57
Tableau 29. Comparaison des résultats du SPCOG-Ouest et de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat par rapport aux données de salinité et de température près de la surface mesurées par le traversier Bellingham-Alaska.	61
Tableau 30. Statistiques comparatives de la trajectoire du courant de dérive sur 24 heures, pour des simulations réalisées à partir de bouées dérivantes dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.	61
Tableau 31. Statistiques comparatives de la trajectoire du courant de dérive sur 24 heures, pour des simulations réalisées à partir de bouées dérivantes dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma de séquençage de la pseudo-analyse (PA, en rouge) et des 4 prévisions de 48 h (en bleu) pour une date donnée. Les lignes pointillées grises sont espacées de six heures et les flèches orange indiquent les moments où un fichier de redémarrage est généré et utilisé pour lancer l'étape suivante. La pseudo-analyse pour demain (Aujourd'hui+1) commencera avec le même fichier de redémarrage que celui utilisé pour démarrer la prévision 00Z d'aujourd'hui, et la séquence se répétera.	63
Figure 2. Tracés des domaines du modèle de Kitimat avec indication des noms des principaux chenaux.	64
Figure 3. Emplacement de cyclones toutes les 6 heures, de 2010 à 2021.	65
Figure 4. Hauteur moyenne de la surface de la mer calculée à partir des simulations rétrospectives du modèle portuaire de Kitimat, de 2016 à 2021.	66
Figure 5. Carte représentant l'emplacement des marégraphes actifs et ceux utilisés par le passé.	67
Figure 6. Indices de comparaison sommaires du niveau d'eau pour le SPCOG-Ouest (en haut), la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (au milieu) et la configuration à 100 m de ce dernier modèle (en bas). Les graphiques de gauche représentent le biais total en fonction de l'erreur CRMSE du niveau d'eau total. Les graphiques de droite représentent l'erreur CRMSE des composantes tidales et résiduelles du niveau d'eau. Chaque marqueur représente les valeurs pour une année entre 2016 et 2021. Dans tous les graphiques, un mouvement vers l'origine indique une amélioration du modèle. Les graphiques ne contiennent que les données du marégraphe de Kitimat.	68
Figure 7. Indices de comparaison sommaires du niveau d'eau pour le SPCOG-Ouest (en haut) et la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (en bas). Les graphiques de gauche représentent le biais total en fonction de l'erreur CRMSE du niveau d'eau total. Les graphiques de droite représentent l'erreur CRMSE des composantes tidales et résiduelles du niveau d'eau. Chaque marqueur représente les valeurs pour une année entre 2016 et 2021. Dans tous les graphiques, un mouvement vers l'origine indique une amélioration du modèle. Ces graphiques contiennent des données provenant des marégraphes de Kitimat (en vert), de Hartley Bay (en jaune), de l'île Bonilla (en bleu) et de Prince Rupert (en magenta).	69
Figure 8. Résumé des comparaisons entre les données modélisées et les données de marégraphes utilisées par le passé pour les composantes de marées M2 et S2.	70
Figure 9. Résumé des comparaisons entre les données modélisées et les données de marégraphes utilisées par le passé pour les composantes de marées K1 et N2.	71
Figure 10. Résumé des comparaisons entre les données modélisées et les données de marégraphes utilisées par le passé pour les composantes de marées O1 et P1.	72
Figure 11. Comparaison des prévisions du niveau d'eau résiduel à Kitimat entre la configuration à 100 m (rouge) du modèle portuaire de Kitimat, la configuration à 500 m du même modèle (bleu) et le SPCOG-Ouest (vert).	73
Figure 12. Comparaison des prévisions du niveau d'eau résiduel à Hartley Bay entre la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et le SPCOG-Ouest (vert).	74
Figure 13. Spectre de puissance du niveau d'eau total à Kitimat.	75
Figure 14. Changements du niveau d'eau à Kitimat au cours des dix tempêtes les plus violentes survenues pendant la période de simulation rétrospective.	76

Figure 15. Changements du niveau d'eau à Hartley Bay au cours des dix tempêtes les plus violentes survenues pendant la période de simulation rétrospective.....	77
Figure 16. Changements du niveau d'eau à Prince Rupert au cours des dix tempêtes les plus violentes survenues pendant la période de simulation rétrospective.....	78
Figure 17. Carte montrant l'emplacement des courantomètres et des profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) ancrés dans les domaines du modèle portuaire de Kitimat pendant la période de simulation rétrospective.	79
Figure 18. Station FOC1, cours supérieur du chenal Douglas : Comparaison des ellipses de marée entre les observations d'un courantomètre installé à 150 m de profondeur (noir), ainsi que les configurations à 100 m (rouge) et à 500 m (bleu) du modèle portuaire de Kitimat.	80
Figure 19. Station CAM2, entrée Caamaño : Comparaison des ellipses de marée entre les observations d'un courantomètre installé à 150 m de profondeur (noir), ainsi que les résultats du SPCOG-Ouest (vert) et de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu).	81
Figure 20. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 41 m de profondeur à la station KIT1 entre juillet 2020 et juillet 2021, et les résultats des domaines de 100 m et de 500 m du modèle portuaire au cours de cette période.	82
Figure 21. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 196 m de profondeur à la station KIT1 entre juillet 2020 et juillet 2021, et les résultats des domaines de 100 m et de 500 m du modèle portuaire au cours de cette période.	83
Figure 22. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 36 m de profondeur à la station FOC1 entre juillet 2020 et juillet 2021, et les résultats des domaines de 100 m et de 500 m du modèle portuaire au cours de cette période.	84
Figure 23. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 358 m de profondeur à la station FOC1 entre juillet 2020 et juillet 2021, et les résultats des domaines de 100 m et de 500 m du modèle portuaire au cours de cette période.	85
Figure 24. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 41 m de profondeur à la station KSK1 entre janvier et juillet 2016, et les résultats du domaine à 500 m du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest au cours de cette période.....	86
Figure 25. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 359 m de profondeur à la station KSK1 entre janvier et juillet 2016, et les résultats du domaine à 500 m du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest au cours de cette période.....	87
Figure 26. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 102 m de profondeur à la station DEV1 entre janvier et juillet 2016, et les résultats du domaine à 500 m du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest au cours de cette période.....	88
Figure 27. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 227 m de profondeur à la station CAM2 entre janvier et juillet 2016, et les résultats du domaine à 500 m du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest au cours de cette période.....	89

Figure 28. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 203 m de profondeur à la station SRC1 entre juillet 2016 et juillet 2017, et les résultats du domaine à 500 m du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest au cours de cette période.....	90
Figure 29. Comparaison des courants à 8 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (41 m de profondeur) à la station KIT1 (bras Kitimat) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.	91
Figure 30. Comparaison des courants à 15 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (41 m de profondeur) à la station KIT1 (bras Kitimat) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.	92
Figure 31. Comparaison des courants à 50 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (101 m de profondeur) à la station KIT1 (bras Kitimat) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.	93
Figure 32. Comparaison des courants à 100 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (196 m de profondeur) à la station KIT1 (bras Kitimat) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.	94
Figure 33. Comparaison des courants à 8 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (36 m de profondeur) à la station FOC1 (cours supérieur du chenal Douglas) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.	95
Figure 34. Comparaison des courants à 15 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (36 m de profondeur) à la station FOC1 (cours supérieur du chenal Douglas) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.	96
Figure 35. Comparaison des courants à 50 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (358 m de profondeur) à la station FOC1 (cours supérieur du chenal Douglas) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.	97
Figure 36. Comparaison des courants à 100 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (358 m de profondeur) à la station FOC1 (cours supérieur du chenal Douglas) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.	98
Figure 37. Comparaison des courants à 250 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (358 m de profondeur) à la station FOC1 (cours supérieur du chenal Douglas) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.	99
Figure 38. Spectre de puissance rotatif des courants résiduels à 8 m de profondeur à la station FOC1, mesuré par un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 36 m de profondeur.....	100
Figure 39. Résumé de l'évaluation des courants modélisés par rapport aux données du profileur de courant à effet Doppler (ADCP) recueillies dans le système de fjords de Kitimat, mais hors du domaine à 100 m du modèle portuaire, en 2016.	101
Figure 40. Résumé de l'évaluation des courants modélisés par rapport aux données du profileur de courant à effet Doppler (ADCP) recueillies dans l'entrée Caamaño en 2016.	102

Figure 41. Résumé de l'évaluation des courants modélisés par rapport aux données du profileur de courant à effet Doppler (ADCP) recueillies dans le détroit d'Hécate en 2016.	103
Figure 42. Carte montrant l'emplacement des capteurs de conductivité, température et profondeur (CTD) ancrés et des bouées munies de capteurs de la température de surface de la mer qui étaient actifs pendant la période de simulation rétrospective.	104
Figure 43. Comparaison de la température de surface de la mer mesurée à la station 46181 d'ECCC (haut-fond de Nanakwa, cours supérieur du chenal Douglas) et les résultats du SPCOG-Ouest et des domaines du modèle portuaire de Kitimat.	105
Figure 44. Comparaison de la température de la surface de la mer mesurée à la station 46185 d'ECCC (sud du détroit d'Hécate, détroit d'Hécate) et des résultats du SPCOG-Ouest et du domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.	106
Figure 45. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée KIT1, de juillet 2020 à juillet 2021. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 100 m du modèle de Kitimat (rouge), de la configuration à 500 m du même modèle (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).	107
Figure 46. Comparaison des mesures de la température et de la salinité provenant d'une sonde CTD ancrée à la station du village de Kitimaat (bras Kitimat, 46 m de profondeur) et des résultats modélisés provenant du SPCOG-Ouest et des domaines du modèle portuaire de Kitimat.	108
Figure 47. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée FOC1, de janvier à juillet 2016. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 100 m du modèle de Kitimat (rouge), de la configuration à 500 m du même modèle (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).	109
Figure 48. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée FOC1, de juillet 2020 à juillet 2021. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 100 m du modèle de Kitimat (rouge), de la configuration à 500 m du même modèle (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).	110
Figure 49. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée DEV1, de janvier à juin 2016. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).	111
Figure 50. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée KSK1, de janvier à juin 2016. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).	112
Figure 51. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée PRC1, de juillet 2019 à août 2020. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).	113
Figure 52. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée GRC1, de juillet 2019 à août 2020. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert). À une profondeur de 85 m (rangée du	

bas), l'instrument n'est pas représenté dans le modèle en raison de la faible résolution des données bathymétriques à proximité de l'ancrage.	114
Figure 53. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée CAM2, de janvier à juillet 2016. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).....	115
Figure 54. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée HEC1, de janvier à juillet 2016. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).....	116
Figure 55. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée SRC1, de juillet 2016 à juillet 2017. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).	117
Figure 56. Profils CTD (points rouges) et sous-régions (délimitées par des traits noirs pleins) utilisés pour l'analyse dans le domaine du modèle Kitimat à 100m.....	118
Figure 57. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du bras Kitimat située dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat...	119
Figure 58. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région de l'île Coste située dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat.	120
Figure 59. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région de Coste Rocks située dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat..	121
Figure 60. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du chenal Devastation située dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat.	122
Figure 61. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du cours supérieur du chenal Douglas située dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat.	123
Figure 62. Profils CTD (points rouges) et sous-régions (délimitées par des traits noirs pleins) utilisés pour l'analyse dans le domaine du modèle Kitimat à 500m.....	124
Figure 63. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du chenal Gardner située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	125
Figure 64. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du bras Kitimat située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat..	126
Figure 65. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du cours supérieur du chenal Douglas située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	127
Figure 66. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du cours inférieur du chenal Douglas située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	128
Figure 67. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du passage Verney située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	129

Figure 68. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du passage Wright située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	130
Figure 69. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du chenal Squally située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	131
Figure 70. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du chenal Whale située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	132
Figure 71. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région de l'entrée Caamaño située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	133
Figure 72. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du chenal Grenville située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	134
Figure 73. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du détroit de Chatham située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	135
Figure 74. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du nord des îles Outer située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	136
Figure 75. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du détroit d'Hécate située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	137
Figure 76. Graphique clé montrant le trajet du traversier entre Bellingham et l'Alaska dans le domaine du modèle de Kitimat à 500 m.	138
Figure 77. Comparaison entre les mesures de la température de la surface de la mer et la salinité provenant du traversier entre Bellingham et l'Alaska (premier et troisième graphique de la rangée du haut) et les valeurs modélisées à partir de la configuration à 500 m du modèle de Kitimat et du SPCOG-Ouest (rangées du milieu et du bas). Les différences entre les résultats du modèle et les observations sont indiquées dans les graphiques des deuxième et quatrième colonnes des rangées du milieu et du bas. Dans la rangée du haut, les graphiques de ces colonnes montrent les différences entre l'écart absolu des données modélisées par rapport aux observations. Dans les graphiques, le rouge indique que la configuration à 500 m du modèle de Kitimat fournit les données les plus semblables aux observations, tandis que le bleu indique que c'est le SPCOG-Ouest.	139
Figure 78. Carte des observations de bouées dérivantes dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.	140
Figure 79. Évolution des scores de Molcard associés à la trajectoire des bouées dérivantes pendant une période de 24 heures, dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat.	141
Figure 80. Évolution de la distance de séparation entre les bouées dérivantes observées et modélisées pendant une période de 24 heures, dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat.	142
Figure 81. Carte des observations de bouées dérivantes dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.	143

Figure 82. Évolution des scores de Molcard associés à la trajectoire des bouées dérivantes pendant une période de 24 heures, dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	144
Figure 83. Évolution de la distance de séparation entre les bouées dérivantes observées et modélisées pendant une période de 24 heures, dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.	145
Figure 84. Évolution de l'erreur CRMSE et du biais associés à la composante résiduelle du niveau d'eau à Kitimat. Les courbes représentent le domaine à 100 m du modèle de Kitimat (rouge), le domaine à 500 m de ce même modèle (bleu) et le SPCOG-Ouest (vert).	146
Figure 85. Évolution de l'erreur CRMSE et du biais associés à la composante résiduelle du niveau d'eau à Hartley Bay. Les courbes représentent le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et le SPCOG-Ouest (vert).	147

RÉSUMÉ

En 2016, le Canada a lancé le Plan de protection des océans (PPO) pour appuyer des initiatives visant à protéger les milieux marins du pays contre les pressions anthropiques. À cette fin, les responsables de la sous-initiative d'océanographie du PPO ont élaboré six modèles hydrodynamiques à haute résolution à l'échelle des ports afin d'améliorer la sécurité de la navigation et d'effectuer des interventions en cas d'urgence, notamment lors de déversements d'hydrocarbures en milieu marin. L'échelle des modèles a été réduite à partir des systèmes de prévision côtiers océan-glace est et ouest (SPCOG-Est et SPCOG-Ouest). Le forçage atmosphérique est issu du Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD).

Comme l'évaluation des modèles fait partie intégrante de leur élaboration, les modèles portuaires sont évalués par rapport aux données d'observation disponibles et au modèle parent à l'aide d'une simulation rétrospective pluriannuelle. Les prévisions sur 48 heures sont évaluées pendant une période de deux mois. De plus, le rendement des modèles pendant des tempêtes majeures est examiné.

Le présent rapport décrit l'évaluation du modèle hydrodynamique du port de Kitimat et des voies d'accès au port. Une simulation rétrospective a été réalisée pour les années 2016 à 2022 et évaluée par rapport à un ensemble complet d'observations sur les niveaux d'eau, les courants et les propriétés de l'eau. L'évaluation réalisée montre que le modèle portuaire de prévisions océaniques améliore considérablement la représentation des niveaux d'eau et des courants par rapport à son modèle parent, le SPCOG-Ouest. Nous avons remarqué une amélioration des prévisions du niveau d'eau allant jusqu'à 30 % en ce qui concerne la CRMSE principalement dans le domaine lié aux marées. Le modèle est demeuré stable pendant les tempêtes majeures, mais n'a pas produit d'améliorations importantes en ce qui concerne la prévision des niveaux d'eau associés à ces tempêtes. Le modèle a bien représenté les événements caractérisés par d'importants courants résiduels attribuables aux vents de fjords.

L'évaluation des propriétés de l'eau modélisées a révélé plusieurs domaines pour lesquels le modèle pourrait être amélioré dans des versions futures. Nous avons constaté que l'initialisation sous-optimale des masses d'eau profonde inhibe la représentation des événements de renouvellement des eaux profondes et pourrait aussi faire en sorte que la circulation estuarienne prévue est plus faible que celle observée. De plus, le biais persistant en faveur de l'eau chaude lié aux températures de la surface de la mer dans les tronçons inférieurs du système de fjords devra faire l'objet d'une évaluation plus poussée.

Nous avons aussi constaté que les courants de surface modélisés au moyen du modèle du système de prévision océanique portuaire entraînaient des améliorations des prévisions à court terme liées aux trajectoires d'objets à la dérive allant jusqu'à 50 % en ce qui concerne la capacité de prévision instantanée. Les courants issus du modèle parent se sont révélés mieux adaptés aux prévisions à long terme.

1. INTRODUCTION

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

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

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

2. CONCEPTION DES MODÈLES PORTUAIRES

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

2.1. SÉLECTION DU MODÈLE

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

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

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

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

2.2. STRATÉGIE DE RÉDUCTION D'ÉCHELLE

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

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

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

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

2.3. SÉQUENCEMENT DES SIMULATIONS

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

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

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

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

2.4. FORÇAGES DE SURFACE

Les forçages de surface sont dérivés du Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD) (Milbrandt *et al.* 2016), qui est exécuté opérationnellement à ECCC et fournit des prévisions météorologiques atmosphériques quatre fois par jour à une résolution de 2,5 km. C'est le produit atmosphérique opérationnel à la plus haute résolution disponible et il est choisi pour être conforme aux forçages appliqués aux SPCOG-Est et Ouest. 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-Est et Ouest. Des détails supplémentaires sont fournis dans la documentation technique pour la version 1.5 du système SPCOG-Ouest (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-Est et Ouest d'ECCC, dans laquelle nous reprenons une partie des fonctionnalités d'ECCC pour la préparation des forçages atmosphériques et la mécanique de l'exécution du modèle NEMO, y compris la gestion des fichiers de redémarrage et des données de sortie. Nous ajoutons à cette base de référence des fonctionnalités supplémentaires pour préparer le forçage aux limites, extraire les données du flux de données en temps réel, générer le forçage hydrologique de ruissellement et préparer les fichiers d'entrée sur la concentration de glace de mer pour la fonction « ice-if ». Des stratégies de secours pour les données manquantes et des stratégies de persistance pour les prévisions utilisant les données des jauges de débit sont également mises en œuvre.

2.6. ROBUSTESSE ET LIMITATIONS

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

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

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

Les modèles ont certaines limitations :

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

3. DESCRIPTION ACTUELLE DU PORT

3.1. CARACTÉRISTIQUES OCÉANOGRAPHIQUES RÉGIONALES

Le système de fjords de Kitimat s'étend sur environ 140 km, depuis le port de Kitimat jusqu'à la zone du plateau continental située dans le détroit d'Hécate (figure 2). Le port de Kitimat sert principalement de terminal de marchandises pour une usine d'aluminium locale, ainsi que pour une importante installation d'exportation de gaz naturel liquéfié, qui était en construction au moment de la rédaction du présent rapport. L'achèvement de cette installation entraînera une augmentation importante de la circulation maritime relative au port. Pour naviguer dans les principales voies de navigation commerciale donnant accès au port, qui s'étendent depuis les chenaux Principe et Squally jusqu'au chenal Douglas, il faut effectuer une multitude de manœuvres critiques. Une importante route de traversier, utilisée par des navires à passagers canadiens et américains, emprunte également le système de fjords par l'entremise du chenal Princess Royal et du chenal Grenville, dont la largeur est inférieure à 500 m au point le plus étroit. Pour ces raisons, le port a été choisi à titre de candidat principal pour la mise en œuvre de la navigation électronique et l'amélioration des interventions en cas d'urgence environnementale.

La largeur du chenal Douglas, le chenal principal du système, varie de 3 à 5 km, mais beaucoup de chenaux adjacents sont plus étroits. Les données bathymétriques indiquent que la

profondeur chute fortement près des flancs des montagnes adjacentes aux fjords. Au point le plus profond du système de fjords, situé dans la partie sud du chenal Squally, la profondeur de l'eau atteint 680 m, et des profondeurs de 300 à 400 m sont fréquentes, même à proximité immédiate des quais. Le point le moins profond du système, à l'exception des rochers isolés, se trouve à la jonction du passage Verney et du chenal Ursula, où un seuil traversant le chenal est situé à 25 m sous la surface de l'eau.

Dans l'absolu, les niveaux d'eau et les courants dans le système sont dominés par la composante de marée lunaire semi-diurne M2, dont l'amplitude est de 1,65 m à Kitimat. Par ordre d'amplitude, les autres composantes de marée les plus importantes sont S2, K1 et O1, et la combinaison de toutes les composantes donne une amplitude de marée moyenne d'environ 4 m (Webster 1980; Shan *et al.* 2020).

À l'échelle du système, les fluctuations non tidales du niveau d'eau peuvent généralement être attribuées à l'effet barométrique inverse induit par des variations de la pression atmosphérique, et aux vagues générées par le vent qui sont piégées le long de la côte et se propagent vers le nord. Cependant, à plus petite échelle, les variations importantes du niveau d'eau peuvent être causées par le vent et l'apport d'eau douce à l'échelle locale (Wan *et al.* 2017; Shan *et al.* 2020).

À l'échelle saisonnière et à plus long terme, les courants résiduels sont dominés par la circulation estuarienne découlant du mélange d'un important apport d'eau douce dans le système de fjords avec l'eau océanique qui se trouve en dessous. Selon Shan *et al.* (2019), le chenal Gardner serait la source du système estuarien; le principal apport d'eau douce proviendrait des rivières Kitlope et Kemano. La rivière Kemano et la rivière Kitimat, qui est située à la tête du bras Kitimat, sont les deux seules rivières jaugées du système de fjords. Cependant, le ruissellement de surface contribue de façon importante à l'apport d'eau douce; le ruissellement total atteignant le chenal Gardner a été estimé à 17 fois l'écoulement de la rivière Kemano et le ruissellement atteignant le chenal Douglas, à 3 fois l'écoulement de la rivière Kitimat (Webster 1980). Cette estimation a plus tard été corroborée par l'étude climatologique réalisée par Morrison *et al.* (2012). L'apport d'eau douce atteint un sommet au moment de la crue nivale en juin, et un sommet secondaire attribuable à de fortes pluies est observé en octobre (Shan *et al.* 2020). En raison du volume important d'eau douce, une couche d'eau douce à la surface (pour laquelle les valeurs de la salinité en surface sont parfois inférieures à 1 PSU à la tête du chenal Gardner) persiste jusqu'à une profondeur de 8 à 12 m dans les tronçons supérieurs du système de fjords (Wan *et al.* 2017).

À l'échelle locale, le vent est un important facteur qui détermine les courants résiduels dans les fjords sur des échelles temporelles allant de quelques heures à quelques jours. En été, les vents dominants soufflant vers l'amont (vers Kitimat) sont faibles dans le chenal Douglas et contrebalancent, voire inversent, le débit estuarien de la couche de surface. En hiver, les vents soufflent surtout vers l'aval des chenaux et se caractérisent par des épisodes importants de vents sortants catabatiques. Ces épisodes augmentent le débit sortant de surface dans le chenal Douglas et entraînent une structure de débit de retour à plusieurs couches dans les eaux plus profondes (Wan *et al.* 2017; Blanken *et al.* 2020).

Pour plus de renseignements généraux sur l'océanographie physique du système de fjords de Kitimat, le lecteur est invité à consulter les ouvrages présentés dans les études de Webster (1980) et de MacDonald (1983). La circulation subtidale dans le chenal Douglas est décrite de façon détaillée par Wan et ses collaborateurs (2017), et la circulation estuarienne dans le système est décrite davantage par Shan *et al.* (2019). Les tendances de dérive en surface sont analysées dans le document de Blanken *et al.* (2020), et Shan *et al.* (2020) fournissent une étude détaillée sur les niveaux d'eau dans le système de fjords.

3.2. DOMAINE ET CONFIGURATION

Le modèle portuaire du système de fjords de Kitimat est caractérisé par une grille d'une résolution d'environ 500 m ($1/180^{\circ}$ degré; KIT500), qui couvre les voies d'accès au port jusqu'aux limites situées à proximité de Prince Rupert, de Klemtu et du détroit d'Hécate. Le port lui-même, dans la partie supérieure du système de fjords, est couvert par une grille plus fine d'une résolution nominale de 100 m ($1/900^{\circ}$ degré; KIT100). La figure 2 présente l'étendue de ces deux domaines, KIT500 et KIT100.

Pour ces deux configurations, la grille verticale est la même; une résolution correspondant à des couches de 1 m est utilisée pour les 10 m sous la surface et cette résolution augmente jusqu'à des couches de 28 m près du fond marin. Moins de couches verticales, soit 33 plutôt que 50, sont requises pour la configuration à 100 m, car la profondeur maximale dans ce domaine (413 m) est plus faible que la profondeur maximale dans la configuration à 500 m (864 m). Le tableau 1 fournit des précisions sur les paramètres choisis dans les deux configurations KIT500 et KIT100 et ces paramètres sont abordés davantage ci-dessous.

Tous les chenaux du domaine du modèle sont associés à une résolution horizontale minimale de deux points de grille. Dans le chenal Douglas et le long d'autres parties de la voie maritime principale vers le port de Kitimat, une résolution horizontale minimale de sept cellules de grille a été conservée. Il est à noter que la résolution associée à la route de traversier empruntant les chenaux Grenville et Princess Royal n'a pas permis de produire des résultats fiables. De plus, la résolution de 2,5 km liée au forçage atmosphérique appliqué fournit au plus un point de grille complet pour la plupart des chenaux dans les tronçons supérieurs du système de fjords, ce qui limite probablement la qualité du forçage des vents, car les effets de la topographie ne sont pas bien représentés dans de nombreuses parties du domaine.

Les grilles du modèle portuaire de Kitimat sont des sous-ensembles de la grille du système côtier de prévision océan-glace ouest (SPCOG-Ouest), et les modèles portuaires utilisent beaucoup de paramètres physiques tirés du modèle parent. L'advection de la quantité de mouvement est traitée sous forme vectorielle et l'advection des traceurs est représentée à l'aide du système TVD (Zalesak 1979), au moyen d'une approche de rééchantillonnage du pas de temps (*sub-stepping*). La diffusion de la quantité de mouvement et des traceurs a été calculée à l'aide d'un système laplacien, avec une viscosité variable dans le temps en 3D selon (Smagorinsky 1993). Le frottement sur le fond est représenté de façon non linéaire, par une augmentation de la couche logarithmique, tandis que le frottement sur les parois latérales est traité à l'aide d'un glissement partiel associé à des coefficients donnés dans le tableau 1 (Madec 2016). Il est important de noter qu'en raison du rapport de forme relativement faible des fjords, le frottement sur les parois latérales a une incidence importante sur les configurations du modèle portuaire de Kitimat par rapport aux configurations habituelles du cadre de modélisation NEMO pour un plateau continental ou en haute mer.

3.3. INITIALISATION

Les valeurs initiales associées à la température, à la salinité, aux courants et aux niveaux d'eau pour la grille à 500 m du modèle de Kitimat (KIT500) ont été interpolées à partir du SPCOG-Ouest. Étant donné que la résolution du SPCOG-Ouest ne permet pas de représenter certains chenaux de petite taille dans le domaine du modèle KIT500, les valeurs initiales y sont simplement extrapolées à partir du point de grille océanique le plus proche. La grille à 100 m du modèle de Kitimat (KIT100) a été initialisée suivant la même approche à partir de la grille à 500 m.

Les simulations associées aux grilles à 500 m et à 100 m ont été initialisées les 16 et 17 décembre 2015, respectivement. Les 15 premiers jours de la simulation ont été considérés

comme une période d'ajustement initial, et l'évaluation par rapport aux données d'observation a commencé le 1^{er} janvier 2016. Il est à noter que cette période d'ajustement initial est probablement insuffisante pour initialiser complètement la circulation en profondeur dans les fjords. Il a été nécessaire de choisir une période d'ajustement initial en raison de la disponibilité du forçage atmosphérique, et une évaluation des paramètres de rendement au début de la période de simulation rétrospective a été effectuée dans ce contexte.

3.4. FORÇAGE LIÉ AUX LIMITES OUVERTES

Les conditions aux limites ouvertes de la hauteur de la surface de la mer, des courants, de la température et de la salinité près des bordures ouest, sud et est du domaine KIT500 sont calculées, à l'aide des schémas numériques cités dans le tableau 1, à partir des données horaires fournies par le SPCOG-Ouest. Le signal de marée du SPCOG-Ouest est d'abord retiré des données de hauteur de la surface de la mer et de courants fournies aux limites ouvertes, puis les valeurs résultantes sont complétées par les composantes de la marée issues de WebTide (Foreman *et al.* 2000), qui figurent dans le tableau 1. Cette approche permet de s'assurer qu'aucune erreur liée aux marées ne soit propagée dans le domaine et pour permettre un réglage précis des marées aux frontières du domaine afin d'optimiser les prévisions des marées à Kitimat. Les phases des composantes de marée appliquées ont été légèrement ajustées, au moyen des valeurs indiquées dans le tableau 2.

En raison de différences dans le système de référence altimétrique utilisé pendant la génération des données bathymétriques, la simulation rétrospective finale a été effectuée en soustrayant 20 cm du forçage de la hauteur de la surface de la mer appliqué à la limite ouverte du domaine KIT500. Ce décalage de -20 cm est une estimation de la différence entre les modèles de géoïde CGVD28 et EGM-DIR-R4 utilisés par le SPCOG-Ouest. La révision de cette estimation sera effectuée dans le cadre de travaux futurs.

Enfin, il est à noter que les courants horaires tirés du SPCOG-Ouest n'étaient pas disponibles à la limite est du domaine KIT500, et que des courants quotidiens ont été appliqués à cet endroit. L'incidence de cette modification est faible, en raison de la faible étendue d'eau de la limite est, mais l'absence des courants horaires sera corrigée dans la prochaine version du SPCOG-Ouest.

3.5. APPORT D'EAU DOUCE

Le forçage du ruissellement quotidien lié aux configurations du modèle portuaire est déterminé à partir des débitmètres installés dans la rivière Kitimat (débitmètre 08FF001 d'ECCC) et la rivière Kemano (débitmètre 08FE003 d'ECCC); cette dernière est seulement applicable au domaine KIT500. Dans les zones où il n'existe pas de données en temps réel sur le débit des cours d'eau, une climatologie du ruissellement sur la côte de la Colombie-Britannique (Morrison, Foreman et Masson 2012) a été utilisée afin d'estimer les apports d'eau douce.

Le forçage du ruissellement a été appliqué en totalité à la cellule de surface du modèle, sans mélange accru, car cela représentait le mieux la forte stratification de la salinité de surface observée à l'échelle du système de fjords. Pour le ruissellement fluvial climatologique (c.-à-d. provenant de toutes les sources à l'exception des rivières Kitimat et Kemano), l'apport d'eau douce est réparti sur un certain nombre de points de grille du modèle autour de l'emplacement central indiqué dans l'étude climatologique, étant donné que le ruissellement n'atteint généralement pas l'océan dans un courant d'eau douce défini, mais plutôt comme du ruissellement de surface (Wan *et al.* 2017). Pour déterminer le nombre de points de grille sur lesquels répartir le ruissellement, l'apport d'eau douce annuel à ce point de grille est divisé par le ruissellement moyen qui entre dans le système, puis multiplié par sept. Le facteur de sept est

un paramètre de réglage qui a été optimisé pour représenter la couche d'eau douce à la surface.

Les données sur la température liées au ruissellement entrant dans le système de fjords sont tirées d'une étude climatologique des mesures provenant du débitmètre de la rivière Kitimat et ont été appliquées uniformément dans tous les domaines du modèle. Pour les prévisions, les dernières valeurs de l'apport d'eau douce provenant des débitmètres ont été maintenues pendant toute la durée des prévisions.

3.6. MODÈLE DE GLACE DE MER

La glace de mer n'est généralement pas présente en quantité importante dans le domaine du modèle portuaire de Kitimat, mais quelques épisodes liés à la présence de glace de mer se produisent dans certains chenaux latéraux lorsque des eaux de surface très peu salées coïncident avec des températures inférieures au point de congélation. Cependant, ces épisodes peu fréquents ne justifient pas l'inclusion d'un modèle de glace de mer. Le traitement de la glace de mer se limite à la formulation « ice_if », décrite à la section 2.2.

3.7. STABILITÉ DU SYSTÈME DE MODÉLISATION

Dans la configuration décrite, nous avons utilisé les modèles pour produire une simulation rétrospective des conditions océaniques du 16 décembre 2015 au 31 janvier 2023, ainsi qu'un ensemble de prévisions aux fins d'évaluation entre le 1^{er} décembre 2021 et le 1^{er} février 2022. Ces simulations n'ont connu aucun problème de stabilité.

Au cours de l'élaboration du modèle portuaire, nous avons déterminé que les principaux aspects suivants de la configuration des domaines contrôlaient la stabilité du modèle relativement au domaine à 500 m :

1. la profondeur minimale imposée, en raison de problèmes de stabilité près des îles situées au sud-ouest du détroit de Caamaño pour les valeurs inférieures à 5 m;
2. le rééchantillonnage du pas de temps lié à l'advection de la quantité de mouvement, vu que des problèmes de stabilité ont été rencontrés au-dessus du seuil situé à la confluence du passage Verney et du chenal Ursula lorsque ce rééchantillonnage n'a pas été utilisé;
3. le frottement sur les parois latérales, en raison de problèmes de stabilité associés à la partie étroite du chenal Grenville pour les valeurs inférieures à 0,2;
4. le pas de temps et la viscosité turbulente, qui ont été optimisés pour maximiser le rendement tout en maintenant la stabilité.

Pour le domaine à 100 m, une mesure de contrôle supplémentaire a été imposée à l'entrée de la lagune Foch, qui est attenante au cours supérieur du chenal Douglas, où un léger élargissement de l'entrée et une augmentation du frottement des parois latérales jusqu'à une valeur de 0,35 ont été nécessaires pour maintenir la stabilité.

L'instabilité peut être provoquée par une vitesse élevée de l'eau ou par des épisodes de faible niveau d'eau à l'échelle locale, qui peuvent être le résultat de vents forts ou d'un important apport d'eau douce. Selon les données sur les vents consignées par la bouée 46181 d'ECCC, qui est située dans le haut-fond de Nanakwa près du port, le 9^e épisode de vent intense par ordre d'importance (depuis 1988) s'est produit pendant la période de simulation rétrospective, soit le 6 janvier 2022; la vitesse du vent mesurée était de 17,6 m/s. Cette valeur est représentative des vents de fjords courants en hiver, et est associée à une probabilité annuelle de dépassement de 24 %, d'après l'ensemble des données consignées. Toutefois, les vents de fjords hivernaux pourraient être sous-représentés dans les données, car l'anémomètre utilisé

risque de faire défaut lors des tempêtes hivernales en raison de l'accumulation de glace (Wan *et al.* 2017; Blanken *et al.* 2020).

L'apport d'eau douce jaugé entrant dans le système de fjords de Kitimat a atteint les niveaux les plus élevés jamais enregistrés pendant la période de simulation rétrospective, tant pour les rivières Kitimat que Kemano. Des débits quotidiens moyens de 1 730 m³/s et de 1 030 m³/s ont été mesurés le 24 octobre 2017 dans les rivières Kitimat et Kemano, respectivement. La consignment des données a commencé le 25 août 1964 pour la rivière Kitimat et le 20 novembre 1971 pour la rivière Kemano.

Selon les conditions environnementales ambiantes pendant la période de simulation rétrospective, le modèle portuaire est stable pendant la plupart des épisodes de vents violents et de ruissellement extrême. Au moment de la rédaction du présent rapport, aucun essai sur le stress systémique visant à mieux définir les limites de la stabilité du modèle n'ont été réalisés, mais de tels essais seront effectués à l'avenir.

4. PARAMÈTRES D'ÉVALUATION

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

4.1. SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES

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

$$ERREUR = x_m - x_o$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.1.1. Niveau d'eau

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

L'analyse harmonique des marées est effectuée à l'aide de [T_TIDE](#) sur des segments d'une année avec un intervalle d'échantillonnage d'une heure. Lorsque les données sont disponibles à une fréquence plus élevée, elles sont interpolées/sous-échantillonnées à la fréquence horaire. Les observations pour lesquelles il manque plus de 10 % de données ne sont pas analysées. L'analyse harmonique des marées permet de décomposer le niveau d'eau total entre les parties dues ou non à la marée comme suit :

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

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

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

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

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

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

4.1.1.1. Évaluation des ondes de tempête

Pour évaluer la performance des modèles lors des tempêtes, une poignée de périodes de tempête sont sélectionnées pour chaque port. La base de données sur les cyclones de Zhang *et al.* (2019), qui fournit les trajectoires mondiales des tempêtes de 1958 à 2021 (la figure 3 montre un zoom sur l'Amérique du Nord) guide la sélection. La base de données a été consultée pour sélectionner les tempêtes qui sont passées dans un rayon de quelques centaines de kilomètres du domaine de chaque modèle portuaire. Ceci fournit une liste complète des tempêtes survenues pendant la période de la simulation rétrospective pour chaque port. Cependant, cette liste est assez longue pour certains ports (en particulier Canso et Saint John) et les listes les plus longues sont réduites en prenant en compte la pression minimale au centre de la dépression, en examinant les marégraphes et les rapports des médias locaux sur les impacts des tempêtes. L'évaluation suit l'évaluation des niveaux d'eau résiduels de la simulation rétrospective pour ce qui est des scores de performance et des graphiques, mais se limite aux périodes de tempête.

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

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

4.1.2. Vitesse de courant

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

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

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

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

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

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

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

4.1.2.1. ADCPs horizontaux

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

4.1.2.2. Courantomètres et ADCPs ancrés

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

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

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

4.1.2.3. Transects d'ADCPs

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

4.1.3. Propriétés de l'eau

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

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

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

4.1.4. Dérive

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.2. PRÉVISIONS

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

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

5. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES

5.1. INDICATEURS DE NIVEAU D'EAU

Les résultats des simulations rétrospectives du niveau d'eau ont été évalués par rapport aux données de deux marégraphes actifs installés dans la région d'intérêt, l'un dans le port de Kitimat et l'autre dans le village de Hartley Bay, situé à l'embouchure du chenal Douglas, à environ 45 milles marins en aval de Kitimat. Les données d'autres marégraphes actifs situés à Prince Rupert et à l'île Bonilla ont également été examinées, mais ne font pas l'objet du présent rapport, car cette zone est très près des limites du modèle et le rendement à cet endroit n'était pas une priorité pendant l'élaboration du modèle. Les décalages utilisés pour déplacer les données des marégraphes depuis le zéro des cartes jusqu'au CGVD28 figurent dans le tableau 3.

5.1.1. Hauteur moyenne de la surface de la mer

Les moyennes modélisées de la hauteur de la surface de la mer pendant la période de simulation rétrospective sont représentées à la figure 4, aux fins d'utilisation future par le Service hydrographique du Canada pour la prestation de produits de navigation électronique. Ces résultats montrent une augmentation claire des niveaux d'eau moyens depuis le détroit d'Hécate jusque dans les tronçons supérieurs du système de fjords. Les différences peuvent atteindre 18 cm entre l'entrée des fjords et les têtes du bras Kitimat et du chenal Gardner. L'augmentation du niveau moyen de la mer dans les lagunes et les chenaux latéraux attenants aux chenaux principaux est également évidente, surtout dans la lagune Foch, qui est attenante au cours supérieur du chenal Douglas (voir le graphique situé en haut à droite de la figure 4). Ces augmentations à l'échelle locale sont très sensibles aux paramètres de frottement utilisés dans le modèle portuaire, et n'ont pas été validées en raison d'un manque de données d'observation. Les résultats connexes devraient donc être interprétés avec une extrême prudence.

5.1.2. Composante tidale du niveau d'eau

Pour plus de clarté dans la présentation de l'analyse des marées, nous avons limité la comparaison aux composantes dont l'amplitude est supérieure à 10 cm à Kitimat, à savoir M2, S2, K1, N2, O1, P1 et K2 (classées par amplitude).

Les configurations de 500 m et de 100 m du modèle portuaire de Kitimat produisent des simulations fiables des fluctuations tidales du niveau d'eau à Kitimat et à Hartley Bay (emplacements indiqués sur la figure 5). Dans la plupart des cas, les erreurs liées à l'amplitude et aux marées sont inférieures à un centimètre et les erreurs de phase, inférieures à un degré, comme l'indique le tableau 4. Il convient de noter que la configuration à 500 m, associée à une résolution plus faible, produit une représentation plus précise des composantes semi-diurnes, tandis que les composantes diurnes sont reproduites plus précisément par la configuration à 100 m. Dans l'ensemble, l'exactitude de la prévision de la composante tidale du niveau d'eau pour les deux configurations du modèle portuaire est caractérisée par une erreur CRMSE de 9 à 10 cm (graphiques de gauche des figures 6 et 7).

Les deux configurations améliorent la prévision de la composante tidale du niveau d'eau issue du modèle parent, le SPCOG-Ouest, comme le montrent le tableau 4 et les graphiques de gauche des figures 6 et 7. Il existe toutefois une exception, la composante K2, pour laquelle le modèle portuaire affiche une erreur de phase d'environ 7 degrés. Par contre, il s'agit de la plus petite composante analysée, et l'incidence globale de cette exception est mineure. En ce qui concerne le portrait global de la composante tidale du niveau d'eau, caractérisé par l'erreur CRMSE associée aux marées, les résultats du modèle portuaire montrent une amélioration d'environ 30 % par rapport à ceux du SPCOG-Ouest.

Une comparaison plus poussée de la représentation du niveau d'eau tidal par rapport aux composantes calculées à partir des jauges de niveau d'eau historiques dans le domaine du modèle portuaire montre que ce modèle fonctionne bien dans le système de fjords de Kitimat; les erreurs liées aux marées sont comprises entre des valeurs millimétriques et de faibles valeurs centimétriques pour toutes les composantes analysées (tableaux 5 à 11 et figure 8 à figure 10). Il convient de noter que beaucoup de marégraphes utilisés par le passé sont situés dans des zones de mouillage dont l'accès est limité, comme le bras Surf (Surf Inlet) et le port Barnard (Barnard Harbour). Toutes les comparaisons figurant dans les tableaux 5 à 11 sont données par rapport aux résultats du domaine à 500 m du modèle portuaire, parce que les seules données liées aux composantes disponibles dans le domaine à 100 m se trouvent à

Kitimat, ce qui a déjà été abordé précédemment. Les emplacements de tous les marégraphes utilisés par le passé sont indiqués sur la figure 5.

Les résultats de la composante tidale du niveau d'eau près de la limite du domaine ne sont pas aussi bons, notamment à proximité de Prince Rupert, au nord-ouest, et de Klemtu, au sud-est. Près de ces limites, le modèle parent SPCOG-Ouest fournit une représentation plus précise de la composante tidale du niveau d'eau.

Une importante station de marégraphe utilisée par le passé est celle d'Inlet Lowe, attenant au chenal Grenville; qui n'est pas représenté dans le SPCOG-Ouest, mais qui l'est de manière grossière dans la configuration à 500 m du modèle portuaire. Dans ce cas, les composantes de marées considérées dans la cellule d'eau la plus proche dans le SPCOG-Ouest représentent mieux les valeurs calculées à partir d'observations que celles issues du modèle portuaire. En effet, la résolution du modèle permet d'inclure le chenal Grenville, mais les prévisions du niveau d'eau sont influencées par la faible largeur de celui-ci (< 500 m au point le plus étroit) et le frottement des parois latérales nécessaire à la stabilité du modèle. En conclusion, l'exactitude des données provenant de chenaux associés à une faible résolution, comme le chenal Grenville, est probablement limitée par la résolution du modèle; ces données devraient donc être utilisées avec une extrême prudence.

5.1.3. Indices de comparaison globaux

Les cycles saisonniers et les événements associés aux plus importantes fluctuations non tidales du niveau d'eau sont bien représentés dans le modèle portuaire, à la fois à Kitimat et à Hartley Bay (figures 11 et 12). Il convient de souligner que les deux configurations du modèle portuaire n'ont pas décelé un épisode isolé d'onde de tempête qui s'est produit au début de 2019, ce qui a entraîné une sous-estimation ponctuelle du niveau d'eau d'environ 75 cm. Les raisons expliquant pourquoi cet épisode n'a pas été décelé doivent être davantage examinées. Les biais sont semblables entre le modèle SPCOG-Ouest et le modèle portuaire, ce qui indique que le décalage appliqué à la limite ouverte pour corriger les différences liées au système de référence altimétrique remplit la fonction prévue. Cependant, les modèles présentent un faible biais à Hartley Bay, qui varie de 12 à 16 cm, mais le biais est légèrement inférieur dans le modèle portuaire que dans le SPCOG-Ouest (figure 7). Ce biais indique que la pente de la surface de la mer entre Kitimat et Hartley Bay n'est pas bien représentée. Cette pente est fortement influencée par les vents locaux et la stratification de surface (Wan *et al.* 2017; Shan *et al.* 2020), et la cause de cette erreur sera examinée au moyen d'une vérification détaillée du forçage des vents appliqué par rapport aux mesures prises dans le chenal Douglas, ainsi que de la stratification de surface dans le chenal.

Le rendement des modèles portuaires par rapport aux observations du niveau d'eau à Kitimat, à Hartley Bay, à l'île Bonilla et à Prince Rupert est résumé dans les figures 6 et 7, où les graphiques de gauche montrent le biais du niveau d'eau total représenté par rapport à l'erreur CRMSE du niveau d'eau total. Les graphiques de droite montrent l'erreur CRMSE des composantes tidales et non tidales du niveau d'eau. Le résumé présenté dans ces graphiques, dont certains renseignements ont été abordés précédemment, montre que les configurations du modèle portuaire offrent une nette amélioration des prévisions du niveau d'eau à Kitimat par rapport à leur modèle parent, le SPCOG-Ouest, mais il reste encore des éléments à améliorer. Les valeurs annuelles de l'erreur CRMSE pour le niveau d'eau total varient de 11 à 14 cm, une amélioration par rapport à la plage de 15 à 17 cm associée au SPCOG-Ouest. Cette amélioration découle en grande partie d'une meilleure représentation de la composante tidale du niveau d'eau, pour lesquels l'erreur CRMSE a connu une amélioration d'environ 50 %. La valeur interannuelle de l'erreur CRMSE pour la composante non tidale du niveau d'eau est constante, variant de 5 à 7 cm pour les deux configurations du modèle portuaire et pour le

SPCOG-Ouest; une valeur aberrante (CRMSE ~ 10 cm) a été observée en 2019 pour les configurations du modèle portuaire en raison de l'épisode d'onde de tempête non décelé mentionné précédemment. Il ne s'agit pas d'un résultat inattendu, car une grande partie de la variabilité de la composante non tidale du niveau de la mer dans le domaine du modèle portuaire est forcée à distance (Shan *et al.* 2020). Le rendement du modèle portuaire à l'île Bonilla, située près de la limite ouest du modèle, est comparable à celui du modèle SPCOG-Ouest, probablement en raison de l'emplacement relativement exposé de l'île Bonilla. À Prince Rupert, une ville située plus au nord le long de la limite ouest, où le trait de côte est sinueux et la bathymétrie est complexe, le rendement du modèle portuaire est nettement inférieur à celui du SPCOG-Ouest pour toutes les mesures, sauf le biais. Il convient également de noter que la pente hydraulique de la rivière Skeena est orientée vers le bas en s'éloignant de l'océan, contrairement à celle de la rivière Kitimat. Cette situation est probablement attribuable à l'utilisation du ruissellement climatologique, réparti sur une vaste zone, et d'une profondeur minimale imposée de 5 m, ce qui a entraîné une sous-estimation des niveaux d'eau de la rivière Skeena. Par conséquent, le modèle portuaire convient bien aux prévisions du niveau d'eau dans le système de fjords de Kitimat et représente une nette amélioration par rapport aux solutions existantes, mais il ne devrait pas être utilisé pour prédire le niveau d'eau dans la région de Prince Rupert.

L'examen du spectre de puissance du niveau d'eau total à Kitimat (figure 13) indique que, même si tous les modèles représentent les sommets d'énergie aux fréquences de marée appropriées, aucun ne représente l'élargissement du sommet du spectre associé à la fréquence diurne, qui découle probablement du forçage des vents lié à des changements du niveau de la mer à l'échelle locale en raison de brises de mer estivales. Cet examen vient appuyer davantage la notion selon laquelle les changements du niveau d'eau dans le chenal Douglas causés par des vents locaux ne sont pas entièrement représentés, comme mentionné dans la section sur la pente de la surface de la mer ci-dessus. Nous avons également remarqué que le SPCOG-Ouest affiche le niveau d'énergie le plus élevé de tous les modèles près de la fréquence de Nyquist. Cette observation peut être attribuable à la bathymétrie qui devient de plus en plus complexe près de la tête du chenal dans le modèle portuaire, ainsi qu'à la résolution partielle des battures dans l'estuaire de la rivière Kitimat et dans la baie Minette, ce qui entraîne un amortissement accru des fluctuations du niveau d'eau à une fréquence élevée.

5.1.4. Niveau d'eau lors d'une onde de tempête

Les données recueillies par les marégraphes ont également été utilisées aux fins d'examen du rendement du modèle pendant les dix tempêtes les plus violentes de la période de simulation rétrospective. Ces tempêtes proviennent de la base de données mentionnée à la section 4.1.1.1 et sont les dix événements caractérisés par la pression centrale la plus faible.

Les statistiques associées à ces dix tempêtes indiquent un rendement semblable entre le SPCOG-Ouest et le modèle portuaire; l'erreur CRMSE est inférieure à 2 mm pour les trois configurations à Kitimat (tableau 12). Ces statistiques indiquent que les modèles reproduisent des ondes de tempête jusqu'à une CRMSE de 3 à 4 cm à Kitimat et à Hartley Bay et qu'il existe une forte corrélation (0,93 à 0,96) entre les niveaux d'eau modélisés et observés. Comme il a été mentionné plus haut, Prince Rupert fait exception étant donné que le modèle portuaire affiche un rendement nettement inférieur à celui du SPCOG-Ouest à cet endroit.

Un examen plus approfondi de la série chronologique montrant les augmentations du niveau de la mer associées aux dix tempêtes choisies confirme les conclusions générales susmentionnées (figures 14 à 16). À Kitimat (figure 14), les configurations du modèle portuaire de 100 m et de 500 m sont étroitement couplées et sont visuellement bien corrélées avec les observations. Cependant, la plupart des séries temporelles montrent un biais positif entre les

séries modélisées et observées, ce qui indique que des changements du niveau d'eau à grande échelle pourraient ne pas avoir été décelés. Ces décalages correspondent souvent, mais pas toujours, aux résultats du SPCOG-Ouest. Des conclusions semblables peuvent être tirées en comparant les résultats du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest avec les observations effectuées à Hartley Bay (figure 15). Cependant, à cet endroit, le biais entre les modèles et les observations est généralement négatif, probablement pour la même raison que celle décrite à la section 5.1.3. À Prince Rupert, les biais sont plus faibles que dans le système de fjords de Kitimat, mais le modèle portuaire surestime les fluctuations du niveau d'eau de fréquence élevée par rapport au SPCOG-Ouest (figure 16). Ces résultats sont probablement attribuables aux effets des limites, et illustrent davantage que, même si le modèle portuaire représente une amélioration par rapport aux prévisions actuelles des niveaux d'eau dans le système de fjords de Kitimat, il ne devrait pas être utilisé pour la prévision des niveaux d'eau à Prince Rupert.

5.2. COURANTS

Aux fins de vérification, la représentation des courants à l'échelle de la colonne d'eau par le modèle portuaire est comparée aux données d'une série de courantomètres à mesure ponctuelle et de sondeurs de profils de courants acoustiques à effet Doppler multiniveaux fixés à des ancrages sous-marins situés dans le domaine du modèle. Deux de ces ancrages (KIT1 dans le bras Kitimat et FOC1 dans la partie supérieure du chenal Douglas) étaient en place expressément à cette fin entre juillet 2020 et juillet 2021. Les autres données proviennent de la campagne d'observation liée au Système de sécurité de classe mondiale pour les navires-citernes de 2016 et de plusieurs ancrages installés dans le détroit d'Hécate pour d'autres programmes scientifiques entre 2016 et 2019 (figure 17).

Pour que l'analyse des courants de marée soit claire et raisonnablement courte, seules les composantes dont l'amplitude du grand axe est supérieure à 5 cm/s dans le chenal Douglas ont été analysées, à savoir : M2, S2, K1, N2 et O1. Les figures se limitent généralement à la composante M2, qui domine toutes les autres.

5.2.1. Profileur de courant à effet Doppler horizontal

Aucune donnée provenant d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) horizontal n'est disponible pour les domaines du modèle portuaire de Kitimat.

5.2.2. Courantomètres

Pour la plupart des stations, les données provenant de courantomètres à mesure ponctuelle sont disponibles pour des profondeurs de 150 m et de 250 m, ainsi qu'à 5 m à partir du fond marin. Dans le domaine à 100 m de Kitimat, les seuls courantomètres à mesure ponctuelle disponibles sont ceux de la station FOC1 de janvier à juillet 2016, et de juillet 2020 à juillet 2021. L'analyse harmonique des marées a été principalement effectuée pour la période de 2020 à 2021, parce qu'elle représente une année complète de données. Pour les courants de marée de cette période, la configuration à 100 m surpasse la configuration à 500 m de façon consistante (tableaux 13 et 15). Les deux configurations sous-estiment toutefois les composantes rotationnelles, c'est-à-dire le petit axe, du mouvement de marée à 150 m et à 250 m, et produisent des ellipses plus rectilignes que les valeurs observées (figure 18). Contrairement aux niveaux d'eau, la représentation des composantes de marée diurnes est cohérente entre les deux configurations. En général, l'erreur CRMSE des courants de marée s'est améliorée, passant de 6 à 7 cm/s en 2016 à 4 à 5 cm/s en 2020, et la configuration à 100 m produit une amélioration allant jusqu'à 40 % par rapport aux résultats de la configuration à 500 m.

Dans le domaine plus large de la configuration à 500 m, le modèle portuaire améliore toujours la représentation des courants de marée dans le système de fjords et produit des résultats comparables au modèle parent sur le plateau continental. Cependant, la représentation des courants de marée dans les parties les plus éloignées du système de fjords n'est pas aussi perfectionnée qu'à proximité du port. Les statistiques présentées dans le tableau 14 et illustrées dans la figure 19 indiquent des valeurs de CRMSE pour les courants de marée allant de 5 à 13 cm/s pour certaines stations des fjords (KSK1, DEV1 et CAM2), comparativement à 10 à 14 cm/s pour des stations situées sur le plateau continental (SRC1 et SRN1). Les données et les erreurs d'ellipse présentées dans le tableau 15 suggèrent que la direction et la phase des courants de marée sont généralement bien représentées, tout comme les courants des grands axes, à quelques exceptions près. Comme pour le domaine à 100 m, les valeurs du petit axe sont le principal problème avec la représentation des courants de marée. Comparativement au SPCOG-Ouest, la configuration à 500 m du modèle portuaire représente une amélioration des ellipses de marée allant jusqu'à 75 % dans les fjords. Sur le plateau continental, la comparaison est moins claire; les erreurs d'ellipse indiquent une amélioration allant jusqu'à 60 %, même si les erreurs CRMSE liées aux courants de marée à ces stations sont souvent légèrement inférieures dans le SPCOG-Ouest.

En ce qui concerne les courants résiduels, les données de la station FOC1 indiquent un rendement semblable pour les deux configurations du modèle portuaire, associé à une CRMSE de 6 à 7 cm/s. Aucun changement important n'est visible entre les déploiements de 2016 et de 2020 (tableau 16). À l'extérieur du domaine à 100 m, ces erreurs augmentent jusqu'à une plage de 5 à 18 cm/s dans les fjords et sur le plateau continental. Dans les fjords, ces données représentent une amélioration notable par rapport au modèle parent, tandis que sur le plateau continental, le rendement des modèles est semblable à celui du SPCOG-Ouest (tableau 17).

En ce qui concerne les courants totaux, ces résultats représentent une amélioration consistante entre la configuration du modèle portuaire de 100 m et celle de 500 m; en retour, ces résultats améliorent ceux du modèle parent dans le système de fjords et sur le plateau continental (tableaux 18 et 19). En général, la représentation des courants est meilleure à 150 m sous la surface qu'à des profondeurs plus importantes. La CRMSE a connu des améliorations, passant d'une plage de 8 à 9 cm/s pour la configuration à 100 m à une plage de 11 à 18 cm/s pour la configuration à 500 m, à la station FOC1 (la plage est de 10 à 20 cm/s à l'extérieur des fjords). Les biais connexes sont de l'ordre des mm/s à une profondeur de 150 m, mais augmentent jusqu'à une plage de 2 à 4 cm/s à 250 m et à 359 m (fond marin). Ces biais indiquent que le flux d'eau entrant estuarien est trop faible dans le modèle. Cependant, le biais s'améliore de façon notable (d'environ 1 cm/s) entre les déploiements de 2016 et de 2020, ce qui indique que la circulation estuarienne pourrait ne pas s'être entièrement ajustée au démarrage lors de la comparaison de 2016. En général, les biais liés aux courants dans les fjords sont plus faibles dans le modèle portuaire que dans le modèle parent, ce qui indique une meilleure représentation de la circulation moyenne.

5.2.3. ADCP ancrés

Il existe aussi des mesures des courants qui proviennent d'ADCP fixés aux mêmes ancrages, ainsi que des ancrages additionnels, que ceux présentés dans la section précédente. La plupart de ces instruments ont été installés selon la configuration suivante : un ADCP de 600 kHz à une profondeur d'environ 40 m pour capter les courants près de la surface (présentant des résultats de 8 m jusqu'à 15 m sous la surface), ainsi qu'un ou plusieurs ADCP de 150 ou de 300 kHz installés à une profondeur correspondant à 5 m à partir du fond marin, et à des profondeurs intermédiaires au besoin, pour assurer une couverture de toute la colonne d'eau. Pour les courants plus profonds, les résultats sont présentés à 50 m, à 100 m et à 250 m. Pour que la

discussion sur les courants de marée soit courte, seule la composante de marée M2, qui est de loin la plus importante dans le domaine, est abordée.

Une comparaison entre la modélisation de la structure des courants de la marée barocline et les observations correspondantes dans le domaine à 100 m du modèle portuaire (stations FOC1 et KIT1) est présentée dans les figures 20 à 23. D'après ces figures, il est évident que la configuration à 100 m donne de meilleurs résultats que la configuration à 500 m, bien que les deux fournissent des estimations raisonnablement bonnes des courants de marée dans le port. À la station KIT1, située très près du port et à la tête du chenal Douglas, les courants de marée sont très faibles; la composante M2 a seulement une amplitude d'environ 1 cm/s près de la surface. Les deux modèles surestiment cette amplitude de 2 à 4 cm/s à des profondeurs inférieures à 15 m (figure 20). Cependant, la représentation de l'amplitude des marées s'améliore lorsque la profondeur augmente, comme le montre la figure 21. Cette figure montre également que le changement de phase en fonction de la profondeur est bien représenté loin de la surface. Près de la surface, les résultats indiquent que le changement de phase en fonction de la profondeur est surestimé de 8 m à 15 m, tandis qu'un changement d'environ 10 degrés dans la direction du courant n'a pas été décelé (figure 20). Les changements observés se produisent au-dessus de l'halocline moyenne située entre la couche d'eau douce et l'eau océanique en dessous; ils doivent donc être interprétés avec une certaine prudence, car cette forte halocline pourrait également avoir une incidence sur les mesures des ADCP. La représentation des courants de marée est nettement meilleure en aval du chenal, à la station FOC1, où l'amplitude de la composante de marée M2 est beaucoup plus forte, soit de 14 à 18 cm/s entre 8 m et 15 m de profondeur. Toutefois, comme il a été mentionné dans la discussion sur les données des courantomètres, les ellipses de marée modélisées sont plus rectilignes que celles issues des observations. En résumé, selon les résultats présentés et les statistiques sommaires du tableau 20, il est évident que la configuration à 100 m représente beaucoup mieux les courants de marée que la configuration à 500 m.

En aval du domaine à 100 m, les données de la station KSK1 située dans le cours inférieur du chenal Douglas (figures 24 et 25) montrent que le modèle portuaire représente clairement la dynamique de la marée barotrope et de la marée barocline le long de cette voie maritime principale vers Kitimat, avec une précision raisonnable. L'amélioration de certains aspects des courants de marée est également évidente dans le chenal Devastation (station DEV1, figure 26), mais à cet endroit, l'amplitude des marées est sous-estimée près de la surface et la phase, bien que raisonnablement exacte à 50 m de profondeur, est erronée d'environ 180 degrés à 15 m sous la surface. De toute évidence, la dynamique de la marée barocline dans les zones éloignées du système de fjords de Kitimat doit être étudiée davantage. À l'entrée des fjords et sur le plateau continental, les courants de marée sont également bien représentés; il s'agit d'une amélioration par rapport au modèle parent (voir les figures 27 et 28 pour les résultats de l'entrée Caamaño [CAM2] et du détroit d'Hécate [SRC1]). Ces améliorations sont clairement démontrées par les statistiques sommaires présentées dans le tableau 21, qui montrent une amélioration consistante des mesures d'erreur concernant les courants de marée pour le modèle portuaire.

Ce dernier reproduit également avec habileté les épisodes caractérisés par de forts courants résiduels près de la surface dans le domaine à 100 m. La réaction du courant de surface à un épisode caractérisé par un fort vent sortant des fjords survenu en février 2021 est bien représentée jusqu'à une profondeur de 50 m aux stations KIT1 et FOC1, comme le montrent les figures 29 à 31 et 33 à 35. À une profondeur de 100 m, des indices de la présence du signal correspondant aux observations sont toujours présents à la station FOC1, mais pas à la station KIT1 (figures 32 et 36). Cependant, même si ces signaux de basse fréquence sont bien représentés, il convient de souligner que l'énergie cinétique dans les courants résiduels est trop

faible dans le modèle portuaire, par un facteur d'environ 2, comme illustré dans la série temporelle et le spectre de puissance des courants résiduels (figure 38). Le niveau d'énergie à haute fréquence s'améliore d'environ un ordre de grandeur dans la configuration à 100 m par rapport à celle de 500 m; il est donc probable que l'utilisation de configurations à plus haute résolution puisse rectifier en partie ce problème à l'avenir. En outre, ce ne sont pas tous les signaux en profondeur qui sont représentés; c'est notamment le cas d'un courant vers l'est prolongé pendant le printemps et l'été, qui est probablement associé à des événements de renouvellement des eaux profondes (figures 32 et 35 à 37). Les statistiques d'évaluation pour les courants résiduels sont plus favorables à la station FOC1 qu'à la station KIT1, et indiquent généralement un meilleur rendement du modèle pour les courants en profondeur que pour ceux près de la surface. Les statistiques sont généralement plus favorables pour les résultats de la configuration à 100 m que pour ceux de la configuration à 500 m (tableau 22).

La représentation des courants résiduels est systématiquement améliorée dans le modèle portuaire à 500 m de résolution, même si cette amélioration n'est pas aussi importante que celle des courants de marée (figures 39 à 41, tableau 23). Des améliorations sont évidentes dans les fjords ainsi que sur le plateau continental. Les faibles biais liés aux courants en profondeur, qui sont évidents aux stations KSK1, CMP1 et CAM2 (graphiques du haut des figures 39 et 40) indiquent que le flux d'eau entrant estuarien pourrait être trop faible, comme mentionné précédemment. Toutefois, ces résultats pourraient également être attribuables au biais concernant les données d'observation vers le début de la période de simulation rétrospective, qui peut entraîner une représentation excessive des erreurs d'ajustement au démarrage.

En ce qui concerne les courants totaux, les résultats susmentionnés et les statistiques sommaires présentées dans les tableaux 24 et 25 montrent que le modèle portuaire améliore considérablement la représentation des courants dans le système de fjords de Kitimat par rapport au modèle parent, le SPCOG-Ouest. De plus, la configuration à 100 m, présentant un zoom du port de Kitimat, améliore la représentation des courants par rapport à la configuration plus étendue de 500 m, pour laquelle la résolution est plus faible. Dans le bras Kitimat, près des quais, les biais sont de l'ordre des mm/s, et les erreurs CRMSE des courants de surface sont d'environ 10 cm/s. En aval du port, à la station FOC1, les données indiquent clairement que la circulation estuarienne modélisée est biaisée à la baisse, car le flux d'eau sortant est trop lent (vers le sud-ouest) près de la surface et le flux d'eau entrant est trop lent (vers le nord-est) en profondeur. Les erreurs CRMSE du modèle portuaire dans la forte halocline ou à proximité de celle-ci varient de 17 à 22 cm/s, mais elles diminuent en fonction de la profondeur, et sont inférieures à 10 cm/s à une profondeur supérieure à 50 m. Ces erreurs CRMSE sont semblables à celles observées à l'entrée du système de fjords et sur le plateau continental, où elles varient entre 12 cm/s à la station CAM2 et 25 cm/s à la station SRC1.

En résumé, les courants de marée sont généralement bien représentés le long de la voie maritime vers et dans le port de Kitimat, et les épisodes de courants résiduels importants (d'une magnitude allant jusqu'à environ 50 cm/s) ont été bien représentés. Cependant, l'énergie cinétique des petits courants résiduels plus généraux est sous-représentée par un facteur allant jusqu'à 2. Cette situation pourrait probablement être améliorée à l'avenir en augmentant davantage la résolution du modèle portuaire dans les zones critiques.

5.2.4. Transects d'ADCP

Il n'y a eu aucune prise de mesures le long de transects d'ADCP dans le domaine du modèle portuaire pendant la période de simulation rétrospective.

5.3. PROPRIÉTÉS DE L'EAU

5.3.1. Température de la surface de la mer

La comparaison entre la température modélisée de la surface de la mer et celle issue d'observations est limitée par la disponibilité des données dans les fjords. La seule station pour laquelle des données sont disponibles près du port pendant la période de simulation rétrospective est la bouée 46181 d'ECCC (haut-fond de Nanakwa), qui est située dans le chenal Douglas à environ 11 milles marins en aval de Kitimat. Sur le plateau continental, la bouée 46185 d'ECCC (sud du détroit d'Hécate) est également disponible aux fins de comparaison (figure 42).

Le modèle portuaire fournit une très bonne représentation de la température de la surface de la mer sur le haut-fond de Nanakwa. Pour la période de simulation rétrospective, la configuration à 100 m est biaisée de seulement 0,22 degré et est associée à une CRMSE de 1,10 degré, tandis que la configuration à 500 m est légèrement meilleure, avec un biais de 0,06 degré et une CRMSE de 1,09 degré. À titre de comparaison, le SPCOG-Ouest sous-estime constamment les températures estivales, ce qui entraîne un biais de -1,36 degré et une CRMSE de 2,51 degrés (tableau 26 et figure 43).

À la bouée du sud du détroit d'Hécate, située sur le plateau continental, les températures de la surface de la mer modélisées provenant de la configuration à 500 m du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest sont très semblables. Les modèles indiquent un léger biais à la baisse de -0,77 degré et de -0,68 degré pour le SPCOG-Ouest et le modèle portuaire, respectivement. Pour les deux modèles, la CRMSE est semblable, soit de 0,923 degré (SPCOG-Ouest) et de 1,054 degré (configuration à 500 m du modèle portuaire) (tableau 26). Les deux modèles représentent assez bien le cycle saisonnier de la température de la surface de la mer (figure 44).

5.3.2. Sondes CTD ancrées

Les champs de température et de salinité modélisés dans le domaine ont été évalués par rapport aux observations recueillies à beaucoup des lieux d'ancrage mentionnés à la section 5.2, ainsi qu'à quelques stations supplémentaires gérées par Ocean Networks Canada à Kitimaat Village (KVIP.C2) et à Hartley Bay (HBIP). Ces lieux d'ancrage sont indiqués à la figure 42, et les résultats de l'évaluation sont résumés dans les tableaux 27 et 28. Un ensemble de résultats représentatif est également illustré graphiquement aux figures 45 à 55.

À proximité du port, le modèle portuaire représente bien l'évolution des champs de température et de salinité, jusqu'à une profondeur d'au moins 75 m (figures 45 à 48; stations KIT1, KVIP.C2 et FOC1). Les tendances temporelles sont bien représentées à ces endroits, et les configurations du modèle portuaire ont généralement un rendement égal ou supérieur à celui du modèle parent, le SPCOG-Ouest. Cependant, à des profondeurs supérieures à 100 m, un biais principalement en faveur de l'eau salée devient évident, tout comme une sous-estimation des fluctuations saisonnières de la température. Les comparaisons effectuées avec les données de la station FOC1 en 2016 indiquent que le modèle a été initialisé avec un biais en faveur de l'eau froide et salée. Dans les données de 2020 provenant de la station FOC1, une augmentation claire de l'eau froide et salée est observée en profondeur (renouvellement probable des eaux profondes), mais cette augmentation n'est pas clairement évidente dans les résultats du modèle portuaire, même si elle est représentée dans le SPCOG-Ouest. Le modèle portuaire pourrait avoir subi une initialisation sous-optimale, ce qui pourrait également toucher la faible circulation estuarienne relevée précédemment. Toutefois, étant donné que le SPCOG-Ouest (la source des conditions initiales) a représenté avec exactitude l'épisode de renouvellement des eaux

profondes en 2020, il est peu probable qu'il s'agisse de la seule cause expliquant la représentation relativement faible des propriétés de l'eau en profondeur. Cette question fera l'objet d'une analyse plus approfondie. D'un point de vue statistique, les différences entre les configurations du modèle portuaires semblent mineures. Les indicateurs de performance d'erreur pour le SPCOG-Ouest sont généralement légèrement meilleures que celles du modèle portuaire, surtout en profondeur, comme susmentionné, mais cette différence n'est pas extrême (tableaux 27 et 28). Il convient de noter que la comparaison a été faite par rapport aux moyennes quotidiennes des champs provenant du SPCOG-Ouest, tandis que les moyennes horaires ont été utilisées pour les configurations du modèle portuaire. Cette différence pourrait avoir eu une incidence sur les valeurs de CRMSE indiquées dans les tableaux.

À l'extérieur du domaine à 100 m, une tendance semblable se présente pour la configuration à 500 m du modèle portuaire, qui fournit une représentation appropriée des masses d'eau jusqu'à une profondeur de 100 m, mais est associée à un biais en faveur de l'eau froide et salée dans les eaux profondes des fjords (figures 49 à 52). Un scénario intéressant se présente à l'entrée des fjords, où le biais susmentionné est présent au début de la comparaison (qui correspond également au début de la simulation rétrospective), mais la température et la salinité issues du modèle portuaire convergent avec les observations lorsque l'eau froide et salée augmente, comme à des profondeurs de 150 m et de 226 m à la station CAM2 (figure 53). Ce scénario indique que dans le modèle portuaire, le mécanisme de renouvellement des eaux profondes fonctionne bien sur le plateau continental, mais pas dans les fjords, ce qui peut être dû à une initialisation effectuée avec un biais en faveur de l'eau froide et salée (c.-à-d. densité élevée). Sur le plateau continental, le modèle portuaire et le SPCOG-Ouest suivent bien les masses d'eau, et lorsqu'il y a des différences, elles ne sont pas notables (figures 54 et 55; stations HEC1 et SRC1).

5.3.3. Profils de CTD

Afin de poursuivre l'évaluation des propriétés de l'eau modélisées, les profils CTD (profils de température et de salinité verticaux mesurés) sont regroupés par sous-régions pour l'ensemble des domaines du modèle, aux fins d'analyse. L'emplacement des profils est indiqué sur la figure 56 pour le domaine à 100 m du modèle portuaire et sur la figure 62 pour le domaine à 500 m.

Les graphiques représentant l'écart moyen et la CRMSE par rapport au profil vertical des données modélisées correspondantes pour le domaine à 100 m présentent un portrait cohérent des propriétés de l'eau relativement bien représentées dans la région portuaire. Pour la prévision des courants de dérive et la navigation électronique, l'élément de première importance est la représentation de la couche d'eau douce en surface (de 8 à 12 m), qui influe fortement sur les courants de surface. Les résultats montrent que les modèles portuaires ont un biais en faveur de l'eau salée de 4 à 5 PSU dans le bras Kitimat, et de 2 à 3 PSU dans le cours supérieur du chenal Douglas et le chenal Devastation. Il s'agit d'une amélioration importante par rapport au SPCOG-Ouest, qui montre des biais analogues d'environ 9 PSU dans le bras Kitimat, et d'environ 5 PSU dans le cours supérieur du chenal Douglas. En profondeur, les mesures de salinité modélisées sont assez semblables, et elles présentent toutes un léger biais en faveur de l'eau salée à une profondeur supérieure à 30 m. Les températures sont bien représentées dans la région portuaire étant donné que les biais sont généralement inférieurs à 1 degré (figures 57 à 61).

À l'extérieur du domaine à 100 m du modèle portuaire, une tendance semblable se présente à partir de la tête du système estuarien dans le chenal Gardner, où un biais de salinité de surface d'environ 4 PSU pour le modèle portuaire représente encore une fois une amélioration importante par rapport au biais de 12 PSU pour le SPCOG-Ouest (figure 63). Ce biais diminue de nouveau en fonction de la distance par rapport à la tête du chenal Gardner (figure 63),

d'abord dans le bras Kitimat, comme mentionné précédemment (figure 64), puis dans le chenal Douglas (figures 65 et 66), et finalement dans le passage Wright (figure 68), où le biais est d'environ 2 PSU. Dans les chenaux Squally et Whale qui font partie de la partie inférieure du système de fjords (figures 69 et 70), le biais diminue jusqu'à une valeur inférieure à 1 PSU. Le biais en faveur de l'eau salée persistant, qui varie de 0,2 à 0,5 PSU à une profondeur supérieure à environ 30 m, reste perceptible dans tout le système. Ce biais concorde avec les résultats des ancragements susmentionnés.

Près de la route de navigation principale, dans le passage Verney et les chenaux environnants, le biais en faveur de l'eau salée près de la surface est plus prononcé que dans le chenal Douglas. Pour le modèle portuaire, le biais moyen est d'environ 10 PSU, ce qui représente une amélioration par rapport au biais de 15 PSU associé au SPCOG-Ouest. Le biais lié au modèle portuaire est accompagné d'un biais en faveur de l'eau chaude d'environ 2 degrés dans les 20 m sous la surface, qui diminue à environ 0,2 degré par 100 m de profondeur (figure 67). Ce biais en faveur de l'eau chaude près de la surface, qui est également observé dans une moindre mesure dans le cours inférieur du chenal Douglas, demeure présent dans la majorité de la partie inférieure du système de fjords vers l'entrée Caamaño et vers Prince Rupert, au nord (figures 70 à 74). La tendance d'amélioration de la salinité dans le modèle portuaire se poursuit, et le biais en faveur de l'eau salée près de la surface diminue pour atteindre 0,25 PSU dans le détroit d'Hécate (figure 75). Ces résultats indiquent que la répartition des masses d'eau à la jonction entre le chenal Gardner, le chenal Devastation et le passage Verney (abordée de façon approfondie dans (Shan *et al.* 2019)) doit être étudiée davantage dans le modèle portuaire, tout comme les apports d'eau douce dans la partie inférieure du système de fjords.

Néanmoins, la comparaison entre les profils CTD et les résultats du modèle indique que le modèle portuaire améliore la représentation des masses d'eau par rapport au modèle parent, particulièrement près de la surface de l'océan. Ce résultat correspond au constat précédent, selon lequel le modèle portuaire représente bien avec habileté les masses d'eau dans les 100 premiers mètres de la colonne d'eau, même si la précision à des profondeurs supérieures pourrait être améliorée.

5.3.4. Traversiers

Pendant la majeure partie de 2018 et de 2019, la température et la salinité ont régulièrement été mesurées près de la surface à partir du traversier voyageant entre Bellingham (état de Washington) et des destinations en Alaska, qui fait partie du « Marine Highway System » du « Department of Transportation » des États-Unis. Les capteurs utilisés pour la prise de mesures ont été installés et entretenus par l'Institut Hakai. La portion de la route de traversier passant par le domaine à 500 m du modèle de Kitimat est illustrée à la figure 76, et la figure 77 présente les diagrammes de Hovmöller des mesures de la température et de la salinité observées par rapport aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest. Il est à noter qu'une partie du chenal Grenville n'est pas incluse dans le SPCOG-Ouest, ce qui produit un écart touchant les données entre 130° et 129,5° de longitude O, dans les graphiques de la rangée du bas de la figure 77.

La comparaison indique que les températures de la surface de la mer pendant l'été sont biaisées à la hausse d'environ 2 degrés dans les résultats de la configuration à 500 m du modèle de Kitimat, ce qui concorde avec la comparaison avec les profils CTD abordée précédemment. Entre octobre et avril, ce biais est remplacé par un biais à la baisse moins important. Les températures modélisées par le SPCOG-Ouest sont généralement un peu plus froides que les températures observées. En observant la différence entre les écarts de température absolus associés aux résultats de la configuration à 500 m du modèle de Kitimat et du SPCOG-Ouest, nous constatons qu'en hiver, la précision des températures modélisées par

les deux systèmes est semblable, tandis que pendant l'été, le SPCOG-Ouest fournit de meilleures estimations le long des parties du chenal couvertes par la grille du modèle (deuxième graphique, rangée du haut de la figure 77). Sur le plan statistique, ces résultats se traduisent par un biais général à la hausse de 0,35 degré dans la configuration à 500 m du modèle de Kitimat, et par de grandes fluctuations (CRMSE = 1,9 degré). Au contraire, le SPCOG-Ouest présente généralement un faible biais à la baisse de 0,1 degré, ainsi que des plus petites fluctuations (CRMSE = 1,1 degré) (tableau 29).

Les salinités modélisées dans la partie ouest du transect (chenal Grenville) sont généralement bien représentées par la configuration à 500 m du modèle de Kitimat, à l'exception d'importants biais à la hausse (> 3 PSU) aux printemps 2018 et 2019. Ces biais sont probablement attribuables à la crue nivale de la rivière Skeena et à une sous-représentation dans les débits d'eau climatologiques utilisés dans la formulation du modèle. Dans le chenal Princess Royal, situé à l'est du passage Wright, les salinités modélisées sont toutefois systématiquement biaisées à la baisse, ce qui indique que l'apport d'eau douce dans ce chenal long et étroit pourrait être surestimé dans la climatologie, tandis que le mélange causé par le vent pourrait être sous-estimé. Une comparaison avec le SPCOG-Ouest indique que le modèle portuaire fournit de meilleures estimations de la salinité près de la surface dans la partie du transect à l'ouest du passage Wright, alors qu'aucun des deux modèles n'est nettement supérieur à l'est du passage Wright (quatrième graphique de la rangée du haut de la figure 77). Cette observation se traduit dans les statistiques sommaires, qui montrent un biais à la baisse de 0,7 PSU dans le modèle portuaire ainsi qu'une CRMSE de 2,45 PSU, tandis que le SPCOG-Ouest montre un biais à la hausse de 0,75 PSU et une CRMSE de 2 PSU (tableau 29).

5.4. COURANT DE DÉRIVE

Pour mieux évaluer la qualité des courants de surface provenant du modèle portuaire, ils ont été utilisés pour des simulations de trajectoire de dérive visant à reproduire la trajectoire des bouées dérivantes déployées dans l'ensemble du domaine. Dans le domaine à 100 m du modèle portuaire, ces bouées ont principalement été déployées dans le cours supérieur du bras Kitimat, près des quais. Seules des bouées dérivantes de type Surface Circulation Tracker (SCT) ont été déployées dans ce domaine, mais certaines bouées dérivantes de type CODE-Davis sont entrées dans le domaine par le chenal Douglas. Toutes les trajectoires des bouées dérivantes dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat sont indiquées à la figure 78. Les divers types de bouées dérivantes utilisés dans l'analyse sont décrits dans l'étude de Hourston (2021).

En moyenne, les courants de surface du modèle portuaire ont permis d'améliorer les prévisions du courant de dérive dans le domaine à 100 m pendant les 11 premières heures, comme le montrent les graphiques de l'indice moyen de performance instantanée (score de Molcard) (figure 79) et la distance de séparation moyenne (figure 80) pour ce jeu de bouées. Les courants issus de la configuration à 100 m ont produit des prévisions de trajectoire légèrement meilleures que les courants de la configuration à 500 m. En outre, les prévisions issues de ces deux configurations représentent une amélioration allant jusqu'à 50 % par rapport aux prévisions du courant de dérive effectuées à l'aide des courants de surface du SPCOG-Ouest. Toutefois, les courants de surface du SPCOG-Ouest ont donné de meilleures prévisions de dérive au-delà de 11 heures, qui correspond bien au temps moyen écoulé avant qu'une bouée dérivante s'échoue dans cette région (Blanken *et al.* 2020). Ainsi, le modèle portuaire donne de meilleures prévisions des courants de surface habituellement rencontrés dans la région, tandis que les courants de surface à plus faible résolution issus du SPCOG-Ouest produisent de meilleures prévisions de trajectoire lors d'événements de flux d'eau sortant à plus grande échelle, où les bouées dérivantes restent à flot plus longtemps que la moyenne.

À l'extérieur du domaine à 100 m, des bouées dérivantes de type OSKER (avec et sans ancre flottante) et de type CARTHE, ainsi que des bouées de type SCT et CODE-Davis, ont été déployées. Le déploiement des bouées dérivantes de type OSKER se limite principalement au plateau continental, car ces bouées sont davantage influencées par le vent et ont tendance à s'échouer plus rapidement dans les fjords (figure 81). L'examen des scores de performance et des distances de séparation correspondant aux simulations de ces bouées dérivantes montre que les courants de surface issus du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest produisent des scores de performance relativement faibles (figures 82 et 83). Les courants du SPCOG-Ouest produisent des prévisions légèrement meilleures. Ces constats concordent avec les travaux antérieurs sur les bouées dérivantes influencées par le vent qui ont montré que, selon le degré de susceptibilité au forçage par le vent, les courants de surface issus d'un système à faible résolution peuvent générer des prévisions de trajectoire aussi bonnes, ou meilleures, que les courants de surface provenant de systèmes de prévisions à haute résolution (Dagestad et Röhrs 2019). L'examen visuel de chaque paire représentant les trajectoires modélisée et observée de bouées dérivantes indique que les courants du modèle portuaire donnent de meilleures prévisions de trajectoire dans les fjords que ceux du SPCOG-Ouest, mais ce constat n'avait pas été confirmé quantitativement au moment de la rédaction.

6. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES PRÉVISIONS

6.1. COMPOSANTE RÉSIDUELLE DU NIVEAU D'EAU

L'évolution du biais et de la CRMSE liés aux prévisions de la composante résiduelle du niveau d'eau à Kitimat est illustrée à la figure 84. Le biais associé aux prévisions demeure constant à environ -4 cm dans les configurations du modèle portuaire pendant une période de 48 heures. Le biais de la configuration à 500 m est légèrement inférieur à celui de la configuration à 100 m. De même, pour le SPCOG-Ouest, aucune tendance liée au biais n'a été observée pendant la période de prévision de 48 h, mais le biais global, soit d'environ 5 cm, est légèrement plus important que celui du modèle portuaire.

Les erreurs changeantes dans les prévisions, qui sont résumées par la CRMSE, augmentent à un taux d'environ 1 cm par 24 heures dans le modèle portuaire; les valeurs sont très semblables pour les deux configurations. Il est intéressant de noter que le SPCOG-Ouest n'affiche aucune croissance notable de la CRMSE sur une période de 48 heures (figure 84). Cette observation peut être attribuable à la fréquence plus élevée du forçage du ruissellement à proximité de la rivière Kitimat dans le modèle portuaire. Dans ce dernier, la dernière valeur mesurée persiste tout au long de la prévision, tandis que le SPCOG-Ouest est fondé sur des données climatologiques mensuelles et évite ainsi la possibilité de changements rapides de l'apport d'eau douce.

Des données analogues du marégraphe de Hartley Bay, situé dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat, montrent des patrons semblables. Dans ce cas, les biais sont plus élevés, comme mentionné à la section 5.1, même si les courbes de la CRMSE présentent très peu de changements par rapport à celles du marégraphe de Kitimat (figure 85).

6.2. PROFILEURS DE COURANT À EFFET DOPPLER HORIZONTAL

Aucune donnée issue d'un profileur de courant à effet Doppler horizontal n'est disponible dans le domaine du modèle portuaire, car il n'y a pas d'endroit approprié à l'intérieur ou autour du port pour déployer un tel instrument.

6.3. TEMPÉRATURE DE LA SURFACE DE LA MER

Les températures de la surface de la mer n'ont pas pu être évaluées, car les capteurs de température des deux bouées d'ECCC installées dans le domaine du modèle portuaire sont hors service depuis le début de 2020.

7. RÉSUMÉ

Nous avons montré que le modèle portuaire de Kitimat produit de bonnes simulations des niveaux d'eau, des courants et des propriétés de l'eau dans le port de Kitimat et dans les voies d'accès connexes. Les résultats des configurations à haute résolution de ce modèle sont meilleurs que ceux de leur modèle parent, le SPCOG-Ouest. Dans le cadre du présent document de recherche, nous avons déterminé plusieurs éléments qui pourraient être améliorés dans la prochaine version du modèle portuaire, à savoir :

1. la réinitialisation à partir d'une interpolation optimale des observations;
2. la réalisation d'une étude détaillée sur les effets du temps d'ajustement initial sur la circulation estuarienne;
3. l'évaluation, la vérification et l'ajustement du forçage atmosphérique par rapport aux données météorologiques observées dans le système de fjords;
4. la réalisation d'une enquête plus poussée sur la relation entre la résolution de la baie Minette et des zones intertidales environnantes, et les fluctuations du niveau d'eau à une fréquence élevée dans le port de Kitimat.

Même s'il est toujours possible d'apporter d'autres améliorations à un système de modélisation, les résultats présentés indiquent que le modèle SPOP pour le port de Kitimat améliore la capacité de prévoir avec précision les niveaux d'eau et les courants pour la navigation électronique et la prévision de trajectoires.

8. CONCLUSIONS CLÉS

- Les courants et les niveaux d'eau sont bien modélisés, et les résultats provenant du modèle portuaire sont meilleurs que ceux issus du SPCOG-Ouest existant.
- La représentation des courants de marée et des niveaux d'eau avec marée a connu une meilleure amélioration que les processus résiduels sans marée.
- La circulation estuarienne modélisée est trop faible à la fois dans le modèle portuaire et dans le modèle parent; il faudra donc mener une étude plus poussée sur l'initialisation des masses d'eau profonde, la répartition des masses d'eau entre les chenaux et les apports d'eau douce.
- En raison de ce qui précède, les processus de renouvellement des eaux profondes ne sont pas représentés avec exactitude, ce qui a des répercussions importantes sur la possible application des résultats aux études biophysiques.
- Les résultats pour les chenaux associés à une faible résolution doivent être interprétés avec une extrême prudence, car les effets démesurés associés au paramétrage du frottement dans le modèle entraîneront un mauvais rendement.
- L'augmentation de l'exactitude des courants de surface modélisés à proximité du port mène à de meilleures prévisions des trajectoires de dérive d'objets, dans des circonstances moyennes.

9. REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans le rapport n'aurait pas pu être réalisé sans le soutien de l'équipe des responsables des ports du Plan de protection des océans; nous tenons à remercier tout particulièrement Michael Dunphy, Stephanie Taylor et Maxim Krassovski pour leur travail de développement de la suite Maestro utilisée pour exécuter les simulations, y compris le prétraitement et le post-traitement, ainsi que de la suite logicielle utilisée pour effectuer la vérification et l'analyse décrites dans le présent rapport.

Nous remercions également Charles Hannah, David Spear et Stephen Page d'avoir coordonné et mené les campagnes d'observation ayant permis de recueillir les données utilisées pour la rédaction de ce rapport, ainsi que tous les scientifiques qui ont participé à ces campagnes, de même que le capitaine et l'équipage du NGCC *John P. Tully*, du NGCC *Vector* et du NGCC *Sir John Franklin*.

Il aurait été beaucoup plus difficile d'accéder aux données d'observation sans le travail de création et d'entretien du site Web waterproperties.ca, effectué par Roy Hourston, Di Wan, Lu Guan et l'équipe des données IOS, que nous remercions.

Nous remercions aussi Ocean Networks Canada et l'Institut Hakai (en particulier Wiley Evans) d'avoir entretenu l'infrastructure de collecte de données dans le système de fjords de Kitimat et d'avoir publié les données recueillies.

Nous tenons également à remercier Tom Juhasz pour son travail continu de création et d'amélioration des bouées dérivantes de type SCT, qui a permis la collecte de données à grande échelle dont il est question dans le rapport.

Au sujet des bouées dérivantes, nous tenons à remercier tout particulièrement les responsables de Bridgeman's Marine Transport de Kitimaat, en Colombie-Britannique, qui ont offert leur temps et leurs ressources pour déployer des bouées dérivantes dans le bras Kitimat au cours des premiers mois de la pandémie de COVID-19. Ces bouées se sont avérées essentielles à la validation du rendement du modèle dans la région portuaire.

L'évaluation des bouées a été effectuée à l'aide d'un logiciel mis au point par Nancy Soontiens et Jennifer Holden, responsables du secteur fonctionnel 3 du Plan de protection des océans, que nous remercions pour leur travail minutieux relatif à l'élaboration de cet outil.

Nous remercions aussi Glenn Cooper d'avoir travaillé sans relâche pour nous fournir des conseils et du soutien dans le cadre du développement, du déploiement et de l'entretien d'un système de stations météorologiques couvrant l'ensemble du système de fjords de Kitimat. En raison de contraintes de temps, ces données n'ont pas été utilisées dans le cadre du présent rapport, mais elles seront inestimables pour les futurs efforts d'amélioration du système présenté.

Finalement, nous tenons à remercier Jon Chamberlain, Kim Houston et tous les gestionnaires qui ont participé à la création, à l'orientation et au financement de l'initiative des modèles portuaires du Plan de protection des océans.

10. RÉFÉRENCES CITÉES

- Backhaus, Jan O. 1983. "A Semi-Implicit Scheme for the Shallow Water Equations for Application to Shelf Sea Modelling." *Continental Shelf Research* 2 (4): 243–54. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(82\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0278-4343(82)90020-6).
- . 1985. "A Three-Dimensional Model for the Simulation of Shelf Sea Dynamics." *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* 38 (4): 165–87. <https://doi.org/10.1007/BF02328975>.

-
- Blanken, Hauke, Charles Hannah, Jody Klymak M., and Tamás Juhász. 2020. "Surface Drift and Dispersion in a Multiply Connected Fjord System." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125 (2). <https://doi.org/10.1029/2019JC015425>.
- 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>.
- Dagestad, Knut-Frode, and Johannes Röhrs. 2019. "Prediction of Ocean Surface Trajectories Using Satellite Derived vs. Modeled Ocean Currents." *Remote Sensing of Environment* 223 (March):130–42. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.001>.
- Daniel, Pierre, Gwénaële Jan, Fanch Cabioc'h, Yves Landau, and Erwann Loiseau. 2002. "Drift Modeling of Cargo Containers." *Spill Science & Technology Bulletin* 7 (5–6): 279–88. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00075-0).
- Dupont, 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>.
- Foreman, M. G. G., W. R. Crawford, J. Y. Cherniawsky, R. F. Henry, and M. R. Tarbotton. 2000. "A High-Resolution Assimilating Tidal Model for the Northeast Pacific Ocean." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 105 (C12): 28629–51. <https://doi.org/10.1029/1999JC000122>.
- 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.
- MacDonald, R. W. 1983. "Proceedings of a Workshop on the Kitimat Marine Environment." Technical Report FS 97-18/18. Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences. Sidney, BC: Institute of Ocean Sciences. <https://science-catalogue.canada.ca/record=4086822~S6>.
-

-
- 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>.
- Morrison, J., M. G. G. Foreman, and D. Masson. 2012. "A Method for Estimating Monthly Freshwater Discharge Affecting British Columbia Coastal Waters." *Atmosphere-Ocean* 50 (1): 1–8. <https://doi.org/10.1080/07055900.2011.637667>.
- Niiler, Pearn P., Andrew S. Sybrandy, Kenong Bi, Pierre M. Poulain, and David Bitterman. 1995. "Measurements of the Water-Following Capability of Holey-Sock and TRISTAR Drifters." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 42 (11–12): 1951–64. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00076-3).
- Nudds, Shannon, Youyu Lu, Simon Higginson, Susan P. Haigh, Jean-Philippe Paquin, Mitchell O'Flaherty-Sproul, Stephanie Taylor, et al. 2020. "Evaluation of Structured and Unstructured Models for Application in Operational Ocean Forecasting in Nearshore Waters." *Journal of Marine Science and Engineering* 8 (7): 484. <https://doi.org/10.3390/jmse8070484>.
- Paquin, Jean-Philippe, Youyu Lu, Stephanie Taylor, Hauke Blanken, Guillaume Marcotte, Xianmin Hu, Li Zhai, et al. 2020. "High-Resolution Modelling of a Coastal Harbour in the Presence of Strong Tides and Significant River Runoff." *Ocean Dynamics* 70 (3): 365–85. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01334-7>.
- Paquin, Jean-Phillipe, 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-Phillipe, Gregory C. Smith, Frédéric Dupont, Sarah MacDermid, Yukie Hata, Oleksandr Huizy, Ji Lei, et al. 2021b. "Coastal Ice Ocean Prediction System for the West Coast of Canada (CIOPS-W): Update from Version 1.5.0 to 2.0.0." Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction Tech. Note. https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoe/product_guide/docs/tech_notes/technote_ciops-west-200_e.pdf.
- Paquin, Jean-Phillipe, Gregory C. Smith, 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, 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>.
- Shan, Shiliang, Charles G. Hannah, and Yongsheng Wu. 2019. "Coupling of Estuarine Circulations in a Network of Fjords." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 124 (10): 6809–30. <https://doi.org/10.1029/2018JC014924>.
- . 2020. "Response of Sea Level to Tide, Atmospheric Pressure, Wind Forcing and River Discharge in the Kitimat Fjord System." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 246 (November): 107025. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107025>.
- Smagorinsky, J. 1993. "Some Historical Remarks on the Use of Non-Linear Viscosities." In *Large Eddy Simulation of Complex Engineering and Geophysical Flows*, edited by Boris Galperin and Steven A. Orszag. Cambridge: Cambridge University Press.
- Smith, Stuart D. 1988. "Coefficients for Sea Surface Wind Stress, Heat Flux, and Wind Profiles as a Function of Wind Speed and Temperature." *Journal of Geophysical Research* 93 (C12): 15467. <https://doi.org/10.1029/JC093iC12p15467>.
- Soontiens, Nancy, and Jennifer Holden J. 2024. "A framework for evaluation and characterization of drift prediction in the marine environment." Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 383: ix + 45 p. <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/41252287.pdf>.
- Sutherland, Graig, Nancy Soontiens, Fraser Davidson, Gregory C. Smith, Natacha Bernier, Hauke Blanken, Douglas Schillinger, et al. 2020. "Evaluating the Leeway Coefficient of Ocean Drifters Using Operational Marine Environmental Prediction Systems." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 37 (11): 1943–54. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0013.1>.
- Wan, Di, Charles G. Hannah, Michael G. G. Foreman, and Stan Dosso. 2017. "Subtidal Circulation in a Deep-silled Fjord: Douglas Channel, British Columbia." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 122 (5): 4163–82. <https://doi.org/10.1002/2016JC012022>.
- Webster, Ian. 1980. "Kitimat Physical Oceanographic Study 1977-1978." Technical Report 80–3. Contractor Report Series. Sidney, BC: Institute of Ocean Sciences. <https://science-catalogue.canada.ca/record=1092851~S6>.
- Zalesak, Steven T. 1979. "Fully Multidimensional Flux-Corrected Transport Algorithms for Fluids." *Journal of Computational Physics* 31 (3): 335–62. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(79\)90051-2](https://doi.org/10.1016/0021-9991(79)90051-2).
- Zhang, Minghong, William Perrie, and Zhenxia Long. 2019. "Springtime North Pacific Oscillation and Summer Sea Ice in the Beaufort Sea." *Climate Dynamics* 53 (1–2): 671–86. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04627-1>.
-

11. TABLEAUX

Tableau 1. Paramètres du modèle portuaire de Kitimat pour les configurations à 100 m et 500 m du système NEMO.

Paramètre	Grille externe (KIT500)	Grille interne (KIT100)
Dimensions de la grille, NX×NY×NZ	519 × 869 × 50	899 × 639 × 33
Résolution horizontale, $\Delta X \times \Delta Y$	Environ 354 × 278 m	Environ 70 × 54 m
Résolution verticale	1 m de la surface; 28 m du fond	1 m de la surface; 24 m du fond
Pas de temps des marées barocline et barotrope	30 S / auto O / Courant = 0,75	10 S / auto O / Courant = 0,75
Fréquence de mise à jour des limites ouvertes	1 h (O, S, E, surface); 24 h (courants E 3d)	1 h
Décalage de la hauteur de la surface de la mer aux limites ouvertes	-20 cm (O, S, E)	0 cm
Source des composantes de marée	WebTide	Directement de KIT500
Forçage des composantes de marée	M2, S2, N2, K1, O1, Q1, K2, P1	S.O.
Équation d'état	EOS-80	EOS-80
Surface libre	Volume variable	Volume variable
Pénétration de la lumière	Deux bandes	Deux bandes
Condition limite latérale	Glissement partiel (shlat = 0,2)	Glissement partiel (shlat = 0,35)
Advection de la quantité de mouvement	Forme vectorielle, avec 5 sous-étapes pour l'advection verticale	Forme vectorielle, avec 5 sous-étapes pour l'advection verticale
Diffusion latérale de la quantité de mouvement	Opérateur laplacien horizontal et méthode Smagorinsky	Opérateur laplacien horizontal et méthode Smagorinsky
Advection des traceurs	Dissipation de la variance totale, avec 5 sous-étapes pour l'advection verticale	Dissipation de la variance totale, avec 5 sous-étapes pour l'advection verticale
Diffusion latérale des traceurs	Opérateur laplacien iso-neutre et méthode Smagorinsky	Opérateur laplacien iso-neutre et méthode Smagorinsky
Diffusion verticale	k- ϵ	k- ϵ
Frottement sur le fond	Couche logarithmique	Couche logarithmique

Tableau 2. Ajustement de la phase de la marée provenant de WebTide à la limite ouverte de la grille à 500 m (KIT500).

Composante de marée	Ajustement de la phase provenant de WebTide (degrés)
O2	-8
S2	-8
N2	-7
O1	-0,6
Q1	+1

Tableau 3. Décalages utilisés pour déplacer les niveaux d'eau des marégraphes permanents depuis le zéro des cartes jusqu'au CGVD28.

Station	Décalage du zéro des cartes au CGVD28 (m)
Kitimat	3,209
Hartley Bay	2,922
Île Bonilla (Bonilla Island)	3,531
Prince Rupert	3,854

Tableau 4. Statistiques sur la composante tidale du niveau d'eau à l'emplacement de marégraphes permanents en 2021.

Modèle			Erreur d'amplitude (m)			Erreur de phase (°)			Erreur de marée (m)		
			SPCOG-Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG-Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG-Ouest	KIT 500	KIT 100
Station	Ampl.	Phase									
Composante M2											
Kitimat	1,659	258,11	0,120	-0,002	-0,053	3,370	-0,270	-1,140	0,111	0,006	0,044
Hartley Bay	1,592	256,57	0,079	-0,025	S.O.	3,970	-0,130	S.O.	0,097	0,018	S.O.
Composante S2											
Kitimat	0,535	289,10	0,040	0,004	-0,013	4,650	-0,010	-0,900	0,043	0,003	0,011
Hartley Bay	0,512	287,55	0,025	-0,005	S.O.	5,060	-0,040	S.O.	0,037	0,003	S.O.
Composante K1											
Kitimat	0,484	255,22	0,009	0,012	0,006	0,600	0,670	0,410	0,008	0,009	0,005
Hartley Bay	0,476	254,92	0,007	0,009	S.O.	0,410	0,550	S.O.	0,006	0,007	S.O.
Composante N2											
Kitimat	0,341	234,36	0,021	0,002	-0,008	3,230	0,850	0,010	0,020	0,004	0,006
Hartley Bay	0,327	232,56	0,015	-0,001	S.O.	3,980	0,940	S.O.	0,020	0,004	S.O.
Composante O1											
Kitimat	0,292	239,16	0,003	0,002	-0,001	0,030	-0,450	-0,670	0,002	0,002	0,002
Hartley Bay	0,290	239,04	-0,001	-0,002	S.O.	-0,340	-0,670	S.O.	0,001	0,003	S.O.
Composante P1											
Kitimat	0,158	251,86	0,005	0,001	-0,001	-0,700	0,250	-0,050	0,004	0,001	0,001
Hartley Bay	0,153	251,030	0,006	0,002	S.O.	-0,440	0,570	S.O.	0,004	0,002	S.O.
Composante K2											
Kitimat	0,147	281,93	0,005	-0,002	-0,007	2,160	7,420	6,600	0,005	0,013	0,013
Hartley Bay	0,141	280,30	0,001	-0,005	S.O.	2,730	7,650	S.O.	0,005	0,014	S.O.

Tableau 5. Comparaison des statistiques de la composante de marée M2 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement). Les noms de stations en anglais sont utilisés pour faciliter la récupération des données.

Station	Ampl.	Phase	Erreur d'ampl. (m)		Erreur de phase (°)		Erreur de marée (m)	
			SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500
Aero Trading	1,898	267,96	+0,098	-0,212	+1,70	+8,75	0,081	0,244
Barnard Harbour	1,574	255,37	+0,079	-0,029	+3,21	-0,18	0,085	0,021
Beauchemin Channel	1,453	253,91	+0,043	-0,048	+2,55	-1,89	0,055	0,047
Block Islands	1,573	257,92	+0,032	-0,047	+2,91	-0,33	0,061	0,034
Bonilla Island	1,738	259,81	+0,070	+0,003	+3,85	-0,68	0,098	0,015
Butedale	1,558	256,44	+0,067	+0,017	+3,10	+0,40	0,077	0,015
Claxton	1,930	269,76	+0,151	-0,273	+5,59	+15,13	0,175	0,385
Clear Passage	1,733	259,12	+0,109	-0,040	+4,98	+0,76	0,134	0,032
Griffin Passage	1,333	251,52	+0,123	-0,121	+2,82	-0,66	0,100	0,086
Griffith Harbour	1,816	261,87	+0,074	-0,050	+1,98	+0,93	0,069	0,041
Haysport	1,960	282,57	+0,073	-0,434	+3,49	+17,33	0,101	0,480
Higgins Passage West	1,316	250,11	+0,029	-0,086	+3,06	-2,83	0,054	0,075
Inverness Passage	1,933	270,32	+0,072	-0,234	-0,75	+8,52	0,054	0,252
Kemano Bay	1,726	258,47	+0,145	+0,009	+3,90	-0,05	0,134	0,007
Khyex Point	1,810	302,87	+0,359	-0,770	-19,36	+26,94	0,535	0,708
Kitkatla	1,886	264,35	+0,094	-0,037	+2,48	+5,04	0,089	0,119
Klemtu	1,338	250,94	+0,069	-0,135	+4,02	-4,14	0,084	0,115
Larsen Island	1,764	260,87	+0,134	+0,006	+3,75	+3,52	0,127	0,077
Lawyer Islands	1,901	266,01	+0,098	-0,089	+3,43	+2,15	0,107	0,080
Lowe Inlet	1,669	258,77	-0,009	+0,101	+1,50	+10,68	0,031	0,237
McKenney Islands	1,378	255,07	+0,052	-0,019	+1,63	-2,73	0,047	0,048
Meyers Narrows	1,377	252,87	-0,007	-0,030	+1,04	+3,55	0,018	0,063
Milne Island	1,339	250,76	+0,021	-0,115	+3,43	-2,77	0,059	0,092
Northland Terminal	1,948	267,86	+0,069	-0,416	+2,50	+21,66	0,078	0,545
Oswald Bay	1,489	255,49	+0,035	-0,029	+3,19	-1,00	0,064	0,027
Patterson Inlet	1,673	257,94	+0,074	-0,034	+3,68	+0,43	0,094	0,025
Port Blackney	1,298	249,41	+0,045	-0,120	+3,20	-3,37	0,061	0,099
Price Island	1,300	249,96	+0,015	-0,144	+3,25	-3,11	0,053	0,112
Prince Rupert Roro	1,920	267,05	+0,081	-0,115	+2,76	+1,53	0,088	0,089
Seabreeze Point	1,886	265,76	+0,143	-0,023	+2,07	+3,72	0,113	0,088
Smithers Island	1,439	253,66	+0,049	-0,058	+3,56	-0,85	0,073	0,044
Stryker Island	1,266	248,38	+0,032	-0,118	+3,39	-14,50	0,058	0,231
Surf Inlet	1,414	255,87	+0,137	+0,034	+1,38	-1,63	0,100	0,037
Tom Bay	1,325	253,87	+0,086	-0,101	-5,55	-10,87	0,112	0,185
Wainwright Basin	1,560	292,86	+0,448	-0,217	-23,14	+21,68	0,594	0,414

Tableau 6. Comparaison des statistiques de la composante de marée S2 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement).

Station	Ampl.	Phase	Erreur d'ampl. (m)		Erreur de phase (°)		Erreur de marée (m)	
			SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500
Aero Trading	0,625	299,96	+0,042	-0,102	+2,93	+11,11	0,038	0,106
Barnard Harbour	0,482	286,87	+0,036	-0,008	+14,03	+9,44	0,090	0,056
Beauchemin Channel	0,458	284,48	+0,021	-0,006	+3,90	-1,40	0,027	0,009
Block Islands	0,477	288,20	+0,032	-0,002	+13,89	+9,33	0,087	0,055
Bonilla Island	0,567	291,04	+0,026	+0,005	+5,64	-0,23	0,044	0,004
Butedale	0,478	285,65	+0,086	+0,062	+14,55	+11,57	0,111	0,085
Claxton	0,641	303,77	+0,170	-0,032	+10,11	+23,00	0,150	0,178
Clear Passage	0,538	289,74	+0,044	-0,013	+12,31	+6,35	0,091	0,043
Griffin Passage	0,452	285,18	-0,082	-0,147	-7,67	-10,48	0,070	0,114
Griffith Harbour	0,585	292,00	+0,091	+0,018	+14,99	+13,82	0,133	0,102
Haysport	0,575	324,70	-0,092	-0,312	+5,30	+20,27	0,074	0,241
Higgins Passage West	0,399	279,82	+0,011	-0,026	+7,42	-0,26	0,038	0,018
Inverness Passage	0,610	299,91	+0,074	-0,087	+9,02	+23,49	0,089	0,174
Kemano Bay	0,554	289,00	+0,057	+0,016	+6,18	+1,52	0,060	0,015
Khyex Point	0,566	347,00	+0,217	-0,311	-11,37	-300,96	0,179	0,344
Kitkatla	0,619	295,67	+0,037	-0,004	+4,48	+6,82	0,044	0,052
Klemtu	0,422	281,00	+0,023	-0,042	+5,42	-4,50	0,033	0,037
Larsen Island	0,576	293,00	+0,019	-0,003	-6,26	-8,31	0,047	0,059
Lawyer Islands	0,608	297,24	+0,044	-0,027	+7,39	+5,05	0,065	0,042
Lowe Inlet	0,521	289,72	-0,007	+0,035	+6,65	+16,74	0,043	0,114
McKenney Islands	0,412	285,80	-0,002	-0,019	+2,28	-4,33	0,012	0,025
Meyers Narrows	0,432	285,00	-0,046	-0,057	+10,64	+12,96	0,063	0,076
Milne Island	0,395	282,55	+0,002	-0,045	+12,87	+4,11	0,063	0,037
Northland Terminal	0,644	299,81	+0,031	-0,183	+3,95	+28,27	0,039	0,229
Oswald Bay	0,452	286,31	+0,001	-0,021	+7,60	+1,59	0,042	0,017
Patterson Inlet	0,507	288,55	+0,025	-0,015	+9,72	+4,42	0,065	0,029
Port Blackney	0,387	279,09	+0,019	-0,033	+7,01	-1,72	0,037	0,024
Price Island	0,382	279,26	+0,033	-0,024	+13,72	+5,48	0,071	0,030
Prince Rupert Roro	0,644	295,13	+0,043	-0,022	+2,85	+0,84	0,038	0,017
Seabreeze Point	0,595	296,22	+0,195	+0,121	+9,90	+13,05	0,161	0,136
Smithers Island	0,435	283,93	+0,007	-0,032	+13,09	+7,24	0,071	0,044
Stryker Island	0,370	277,03	+0,037	-0,004	+13,36	-7,78	0,069	0,035
Surf Inlet	0,475	285,00	-0,035	-0,073	+14,24	+9,32	0,084	0,072
Tom Bay	0,426	285,00	+0,149	+0,070	+3,26	-1,85	0,107	0,050
Wainwright Basin	0,418	333,70	+0,166	-0,088	-35,52	+20,92	0,244	0,114

Tableau 7. Comparaison des statistiques de la composante de marée K1 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement).

Station	Ampl.	Phase	Erreur d'ampl. (m)		Erreur de phase (°)		Erreur de marée (m)	
			SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500
Aero Trading	0,509	260,27	+0,010	-0,010	-0,97	+9,70	0,009	0,061
Barnard Harbour	0,473	254,59	+0,098	+0,093	+13,86	+12,86	0,112	0,105
Beauchemin Channel	0,471	253,25	+0,003	+0,005	+0,30	+0,59	0,003	0,005
Block Islands	0,470	255,97	+0,085	+0,082	+12,08	+12,14	0,097	0,096
Bonilla Island	0,500	255,78	+0,005	+0,013	-0,08	-0,21	0,003	0,009
Butedale	0,474	254,53	+0,012	+0,011	+17,49	+16,95	0,104	0,100
Claxton	0,484	262,28	-0,098	-0,124	+11,58	+21,44	0,093	0,140
Clear Passage	0,479	256,62	+0,080	+0,078	+6,54	+6,03	0,070	0,067
Griffin Passage	0,440	253,68	+0,151	+0,125	-11,55	-4,40	0,129	0,093
Griffith Harbour	0,521	259,33	-0,006	-0,006	+17,11	+17,52	0,109	0,112
Haysport	0,458	269,53	+0,285	+0,156	-5,84	+10,72	0,206	0,131
Higgins Passage West	0,455	253,09	+0,047	+0,039	+3,42	+3,64	0,039	0,035
Inverness Passage	0,492	261,98	+0,045	+0,013	+7,94	+19,84	0,059	0,122
Kemano Bay	0,489	255,43	+0,013	+0,017	+1,39	+0,83	0,013	0,013
Khyex Point	0,448	281,33	+0,110	-0,119	+8,31	+47,99	0,093	0,236
Kitkatla	0,498	258,45	+0,018	+0,032	-0,30	+4,61	0,013	0,037
Klemtu	0,460	252,86	+0,008	-0,003	+1,01	+1,59	0,008	0,009
Larsen Island	0,484	258,33	+0,082	+0,099	-19,62	-17,78	0,139	0,136
Lawyer Islands	0,499	259,95	+0,049	+0,056	+1,71	+4,57	0,036	0,050
Lowe Inlet	0,473	255,40	+0,068	+0,097	+4,82	+11,76	0,057	0,102
McKenney Islands	0,446	253,93	+0,101	+0,101	-2,51	-2,49	0,073	0,073
Meyers Narrows	0,475	253,33	+0,128	+0,123	+10,77	+13,57	0,115	0,125
Milne Island	0,444	253,81	+0,134	+0,115	+10,80	+10,46	0,116	0,104
Northland Terminal	0,513	260,10	+0,009	-0,036	-0,47	+19,82	0,007	0,123
Oswald Bay	0,456	254,89	+0,086	+0,084	+2,64	+2,14	0,063	0,061
Patterson Inlet	0,476	255,63	+0,089	+0,089	+4,61	+4,51	0,069	0,069
Port Blackney	0,449	252,67	+0,059	+0,051	+2,82	+3,53	0,045	0,042
Price Island	0,450	253,72	+0,060	+0,045	+12,62	+12,37	0,086	0,079
Prince Rupert Roro	0,510	259,11	-0,013	-0,009	-7,55	-3,84	0,048	0,025
Seabreeze Point	0,502	258,72	-0,095	-0,091	+15,94	+19,46	0,111	0,126
Smithers Island	0,454	254,19	+0,109	+0,100	+9,79	+9,77	0,098	0,093
Stryker Island	0,444	252,62	+0,059	+0,009	+12,44	+11,79	0,084	0,065
Surf Inlet	0,454	253,33	+0,164	+0,154	+10,78	+10,61	0,135	0,129
Tom Bay	0,481	251,33	-0,165	-0,161	+10,73	+10,56	0,127	0,125
Wainwright Basin	0,413	286,07	+0,211	+0,138	-34,25	+5,33	0,259	0,102

Tableau 8. Comparaison des statistiques de la composante de marée N2 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement).

Station	Ampl.	Phase	Erreur d'ampl. (m)		Erreur de phase (°)		Erreur de marée (m)	
			SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500
Aero Trading	0,378	244,21	+0,028	-0,052	+1,97	+12,24	0,022	0,064
Barnard Harbour	0,316	230,92	+0,015	-0,005	+4,87	+3,74	0,022	0,015
Beauchemin Channel	0,295	228,41	+0,011	-0,007	+4,06	+0,88	0,017	0,006
Block Islands	0,326	232,61	+0,007	-0,006	+4,26	+3,23	0,018	0,014
Bonilla Island	0,349	235,14	+0,019	+0,006	+4,73	+1,65	0,025	0,008
Butedale	0,321	231,46	+0,009	+0,005	+5,06	+4,21	0,021	0,017
Claxton	0,327	236,66	+0,087	-0,007	+18,94	+35,72	0,106	0,140
Clear Passage	0,349	235,12	+0,027	-0,001	+5,66	+3,97	0,032	0,017
Griffin Passage	0,377	242,52	+0,006	-0,013	-1,04	+1,84	0,006	0,012
Griffith Harbour	0,246	232,63	+0,032	+0,009	-3,10	-7,32	0,025	0,024
Haysport	0,386	246,73	+0,021	-0,065	+0,41	+17,46	0,015	0,088
Higgins Passage West	0,357	236,42	+0,024	-0,002	+2,27	+0,08	0,020	0,001
Inverness Passage	0,371	286,52	+0,068	-0,169	-16,24	+66,67	0,094	0,244
Kemano Bay	0,382	240,02	+0,018	-0,010	+3,72	+7,21	0,022	0,034
Khyex Point	0,277	225,64	+0,013	-0,028	+5,72	-1,00	0,022	0,020
Kitkatla	0,353	235,52	+0,025	+0,003	+5,42	+6,72	0,030	0,029
Klemtu	0,378	242,23	+0,026	-0,018	+4,53	+5,19	0,029	0,027
Larsen Island	0,340	235,37	-0,002	+0,021	+1,22	+14,07	0,005	0,062
Lawyer Islands	0,281	229,12	+0,009	-0,004	+4,09	+1,61	0,016	0,006
Lowe Inlet	0,310	227,52	-0,029	-0,033	+2,02	+7,24	0,022	0,035
McKenney Islands	0,277	226,27	+0,006	-0,021	+3,92	-0,54	0,014	0,015
Meyers Narrows	0,386	244,21	+0,023	-0,095	+2,80	+28,24	0,021	0,134
Milne Island	0,297	231,77	+0,015	+0,005	+3,13	+0,43	0,016	0,004
Northland Terminal	0,333	234,58	+0,024	+0,003	+3,67	+2,60	0,023	0,011
Oswald Bay	0,260	225,22	+0,015	-0,017	+3,54	-1,29	0,016	0,013
Patterson Inlet	0,261	226,17	+0,012	-0,019	+3,33	-1,16	0,014	0,014
Port Blackney	0,349	242,07	+0,064	+0,010	+3,96	+3,50	0,049	0,017
Price Island	0,389	237,11	+0,024	-0,018	+7,31	+14,21	0,040	0,068
Prince Rupert Roro	0,294	228,94	+0,009	-0,011	+4,38	+2,28	0,017	0,011
Seabreeze Point	0,269	224,06	-0,004	-0,032	+4,78	-12,35	0,016	0,045
Smithers Island	0,323	231,52	-0,003	-0,025	+1,81	+0,28	0,008	0,018
Stryker Island	0,284	270,37	+0,126	-0,031	-23,73	+34,17	0,133	0,113
Surf Inlet	0,378	244,21	+0,028	-0,052	+1,97	+12,24	0,022	0,064
Tom Bay	0,316	230,92	+0,015	-0,005	+4,87	+3,74	0,022	0,015
Wainwright Basin	0,295	228,41	+0,011	-0,007	+4,06	+0,88	0,017	0,006

Tableau 9. Comparaison des statistiques de la composante de marée O1 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement).

Station	Ampl.	Phase	Erreur d'ampl. (m)		Erreur de phase (°)		Erreur de marée (m)	
			SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500
Aero Trading	0,308	244,54	+0,001	-0,016	-0,66	+12,92	0,003	0,049
Barnard Harbour	0,299	238,70	-0,009	-0,008	-0,14	-1,02	0,007	0,007
Beauchemin Channel	0,290	237,86	-0,004	-0,007	-0,19	+0,33	0,003	0,005
Block Islands	0,293	239,05	-0,003	-0,003	-0,35	-0,06	0,002	0,002
Bonilla Island	0,305	240,07	-0,001	0	+0,60	+0,15	0,002	0,001
Butedale	0,294	238,28	+0,002	+0,002	+0,76	+0,74	0,003	0,003
Claxton	0,300	247,09	+0,032	+0,019	-1,55	+14,06	0,024	0,055
Clear Passage	0,301	239,54	-0,003	-0,004	+1,04	+0,05	0,004	0,003
Griffin Passage	0,289	236,46	+0,003	-0,017	-2,48	+6,43	0,009	0,025
Griffith Harbour	0,295	240,55	+0,021	+0,018	-2,70	-1,36	0,018	0,014
Haysport	0,313	256,25	+0,036	-0,024	+5,23	+33,29	0,033	0,123
Higgins Passage West	0,282	237,06	+0,004	+0,002	-0,01	+0,41	0,003	0,002
Inverness Passage	0,311	245,66	+0,001	+0,011	-1,59	+15,38	0,006	0,060
Kemano Bay	0,299	240,95	-0,001	-0,002	+0,36	0	0,002	0,001
Khyex Point	0,313	272,55	+0,085	-0,001	-25,02	+29,07	0,124	0,111
Kitkatla	0,310	241,44	+0,001	+0,004	+0,15	+5,82	0,001	0,023
Klemtu	0,281	236,56	+0,002	-0,005	+1,50	+1,99	0,005	0,008
Larsen Island	0,301	244,55	+0,018	+0,022	-3,59	-3,17	0,019	0,020
Lawyer Islands	0,310	243,81	-0,003	+0,001	+0,16	+3,33	0,002	0,013
Lowe Inlet	0,300	238,34	-0,004	+0,014	+2,58	+9,44	0,010	0,037
McKenney Islands	0,276	238,05	+0,013	+0,015	-1,77	-2,35	0,011	0,013
Meyers Narrows	0,277	236,55	+0,014	+0,018	-0,41	+3,62	0,010	0,018
Milne Island	0,288	236,60	-0,015	-0,019	-0,53	-0,78	0,011	0,013
Northland Terminal	0,311	244,44	0	-0,025	-0,26	+24,89	0,001	0,093
Oswald Bay	0,288	238,65	0	0	-0,55	-1,46	0,002	0,005
Patterson Inlet	0,299	239,95	+0,002	+0,002	0	-0,56	0,001	0,002
Port Blackney	0,276	236,23	+0,001	-0,001	+1,74	+2,06	0,006	0,007
Price Island	0,289	237,16	-0,011	-0,015	-1,70	-1,57	0,010	0,012
Prince Rupert Roro	0,308	244,08	-0,003	-0,001	-0,89	+3,26	0,004	0,012
Seabreeze Point	0,303	243,97	+0,007	+0,007	-1,93	+3,06	0,009	0,013
Smithers Island	0,288	238,30	-0,005	-0,008	-0,26	-0,16	0,004	0,005
Stryker Island	0,282	236,00	+0,001	-0,025	+2,05	+2,77	0,007	0,020
Surf Inlet	0,277	237,55	+0,022	+0,022	+0,13	-0,34	0,016	0,016
Tom Bay	0,262	242,55	+0,037	+0,032	-8,02	-6,38	0,038	0,032
Wainwright Basin	0,243	278,19	+0,070	+0,035	-37,23	+7,70	0,134	0,035

Tableau 10. Comparaison des statistiques de la composante de marée P1 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement).

Station	Ampl.	Phase	Erreur d'ampl. (m)		Erreur de phase (°)		Erreur de marée (m)	
			SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500
Aero Trading	0,160	257,63	+0,006	-0,014	-2,12	+11,11	0,006	0,023
Beauchemin Channel	0,147	249,47	+0,005	-0,002	-0,73	+0,72	0,004	0,002
Bonilla Island	0,159	251,84	+0,001	-0,002	-0,98	-0,10	0,002	0,001
Kemano Bay	0,151	251,57	+0,009	+0,004	-0,03	+0,56	0,007	0,003
Kitkatla	0,155	255,93	+0,009	+0,007	-2,42	+3,55	0,008	0,009
Klemtu	0,142	247,98	+0,006	-0,002	+0,45	+1,40	0,004	0,003
Northland Terminal	0,161	257,42	+0,005	-0,022	-1,83	+22,63	0,005	0,044

Tableau 11. Comparaison des statistiques de la composante de marée K2 aux emplacements des marégraphes utilisés par le passé (composante uniquement).

Station	Ampl.	Phase	Erreur d'ampl. (m)		Erreur de phase (°)		Erreur de marée (m)	
			SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500
Aero Trading	0,166	292,92	+0,014	-0,014	-0,12	+15,63	0,010	0,032
Beauchemin Channel	0,127	277,84	+0,001	-0,004	+0,46	+4,53	0,001	0,007
Bonilla Island	0,155	284,07	+0,006	+0,005	+1,67	+5,05	0,005	0,010
Kemano Bay	0,158	281,46	+0,006	-0,002	+3,28	+8,77	0,008	0,017
Kitkatla	0,172	288,66	+0,004	-0,007	+1,22	+14,14	0,004	0,030
Klemtu	0,116	275,37	+0,003	-0,013	+0,96	+1,57	0,002	0,009
Northland Terminal	0,172	292,64	+0,010	-0,036	+0,95	+33,49	0,008	0,067

Tableau 12. Scores de performance pour les ondes de tempête calculés avec les données des dix tempêtes les plus violentes survenues pendant la période de simulation rétrospective.

Mesure	CRMSE (m)			Y2			Corrélation de Pearson		
Modèle	SPCOG -Ouest	KIT500	KIT100	SPCOG -Ouest	KIT500	KIT100	SPCOG -Ouest	KIT500	KIT100
Station									
Hartley Bay	0,028	0,031	S.O.	0,073	0,094	S.O.	0,967	0,964	S.O.
Kitimat	0,037	0,039	0,038	0,158	0,188	0,174	0,933	0,933	0,937
Prince Rupert	0,033	0,067	S.O.	0,111	0,464	S.O.	0,946	0,82	S.O.

Tableau 13. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants de marée mesurés par les courantomètres dans le domaine de la configuration à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.

Station	Période	Profondeur (m)	CRMSE (m/s)		Y2	
			KIT500	KIT100	KIT500	KIT100
FOC1	2016-01 à 2016-06	150	0,071	0,070	0,771	0,75
		250	0,068	0,056	0,597	0,405
	2020-08 à 2021-06	150	0,049	0,042	0,331	0,24
		250	0,057	0,051	0,352	0,281
		359	0,055	0,051	0,427	0,371

Tableau 14. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants de marée mesurés par les courantomètres dans le domaine de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.

Station	Période	Profondeur (m)	CRMSE (m/s)		Y2	
			SPCOG- Ouest	KIT500	SPCOG- Ouest	KIT500
CAM2	2016-01-01 à 2016-07-08	150	0,105	0,136	0,469	0,782
CMP1	2016-01-27 à 2016-05-20	250	0,191	0,129	1	0,455
DEV1	2016-01-01 à 2016-05-17	152	0,152	0,107	1,691	0,844
KSK1	2016-01-01 à 2016-05-19	150	0,135	0,049	2,354	0,312
SRC1	2016-07-09 à 2017-07-10	150	0,103	0,122	0,753	0,8
		204	0,276	0,284	0,652	0,918
	2017-07-11 à 2018-08-21	153	0,09	0,138	0,439	1,025
		205	0,09	0,106	0,379	0,522
SRN1	2017-07-09 à 2018-08-22	150	0,086	0,098	0,304	0,263
		192	0,095	0,088	0,272	0,358

Tableau 15. Comparaison de l'erreur d'ellipse pour les courants de marée mesurés par les courantomètres.

Station	Période	Profondeur (m)	Composante	Erreur d'ellipse		
				SPCOG- Ouest	KIT500	KIT100
FOC1	2016-01-01 à 2016-06-08	150	M2	S.O.	0,048	0,047
			S2	S.O.	0,017	0,016
			K1	S.O.	0,009	0,010
			N2	S.O.	0,007	0,006
			O1	S.O.	0,003	0,003
		250	M2	S.O.	0,046	0,032
			S2	S.O.	0,018	0,010
			K1	S.O.	0,005	0,005
			N2	S.O.	0,009	0,005
			O1	S.O.	0,003	0,002
	2020-08 à 2021-06	150	M2	S.O.	0,032	0,021
			S2	S.O.	0,013	0,009
			K1	S.O.	0,005	0,004
			N2	S.O.	0,007	0,005
			O1	S.O.	0,004	0,004
		250	M2	S.O.	0,037	0,030
			S2	S.O.	0,016	0,012
			K1	S.O.	0,010	0,007
			N2	S.O.	0,010	0,008
			O1	S.O.	0,008	0,006
		359	M2	S.O.	0,034	0,029
			S2	S.O.	0,016	0,012
			K1	S.O.	0,010	0,009
			N2	S.O.	0,008	0,005
			O1	S.O.	0,008	0,008
CAM2	2016-01-01 à 2016-07-08	150	M2	0,132	0,091	S.O.
			S2	0,045	0,037	S.O.
			K1	0,034	0,023	S.O.
			N2	0,030	0,014	S.O.
			O1	0,023	0,021	S.O.
CMP1	2016-01-27 à 2016-05-20	250	M2	0,157	0,078	S.O.
			S2	0,052	0,039	S.O.
			K1	0,036	0,034	S.O.
			N2	0,030	0,018	S.O.
			O1	0,015	0,016	S.O.
DEV1	2016-01-01 à 2016-05-17	152	M2	0,162	0,053	S.O.
			S2	0,059	0,013	S.O.
			K1	0,038	0,012	S.O.

Station	Période	Profondeur (m)	Composante	Erreur d'ellipse		
				SPCOG- Ouest	KIT500	KIT100
KSK1	2016-01-01 à 2016-05-19	150	N2	0,032	0,009	S.O.
			O1	0,024	0,008	S.O.
			M2	0,097	0,034	S.O.
			S2	0,038	0,011	S.O.
			K1	0,025	0,009	S.O.
			N2	0,021	0,010	S.O.
			O1	0,018	0,006	S.O.
SRC1	2016-07-09 à 2017-07-10	150	M2	0,108	0,073	S.O.
			S2	0,041	0,018	S.O.
			K1	0,028	0,018	S.O.
			N2	0,021	0,016	S.O.
			O1	0,017	0,011	S.O.
	2017-07-11 à 2018-08-21	204	M2	0,086	0,099	S.O.
			S2	0,040	0,030	S.O.
			K1	0,036	0,036	S.O.
			N2	0,019	0,027	S.O.
			O1	0,021	0,028	S.O.
		153	M2	0,122	0,093	S.O.
			S2	0,045	0,017	S.O.
			K1	0,028	0,017	S.O.
			N2	0,021	0,018	S.O.
			O1	0,019	0,010	S.O.
		205	M2	0,103	0,064	S.O.
			S2	0,038	0,030	S.O.
			K1	0,019	0,013	S.O.
			N2	0,011	0,009	S.O.
			O1	0,013	0,009	S.O.
SRN1	2017-07-09 à 2018-08-22	150	M2	0,044	0,057	S.O.
			S2	0,020	0,024	S.O.
			K1	0,012	0,016	S.O.
			N2	0,010	0,011	S.O.
			O1	0,011	0,012	S.O.
		192	M2	0,053	0,043	S.O.
			S2	0,019	0,015	S.O.
			K1	0,009	0,019	S.O.
			N2	0,011	0,008	S.O.
			O1	0,004	0,011	S.O.

Tableau 16. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants résiduels mesurés par les courantomètres installés dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.

Station	Période	Profondeur (m)	CRMSE (m/s)		Y2		Corrélation vectorielle (grandeur; orientation)	
			KIT 500	KIT 100	KIT 500	KIT 100	KIT 500	KIT 100
FOC1	2016-01-01 à 2016-06-08	150 m	0,057	0,060	1,122	1,273	0,422; 0,3	0,365; 3,4
		250 m	0,062	0,067	0,848	0,870	0,022; -62,4	0,027; -87,9
	2020-08 à 2021-06	150 m	0,065	0,065	0,917	0,915	0,291; 2,6	0,320; 3,0
		250 m	0,065	0,064	0,893	0,867	0,327; 1,9	0,373; -3,0
		359 m	0,069	0,068	0,960	0,954	0,212; 10,4	0,214; 3,1

Tableau 17. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants résiduels mesurés par les courantomètres installés dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.

Station	Période	Profondeur (m)	CRMSE (m/s)		Y2		Corrélation vectorielle (grandeur; orientation)	
			SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500
CAM2	2016-01-01 à 2016-07-08	150	0,239	0,14	2,973	1,017	0,373; 119,6	0,351; 2,5
CMP1	2016-01-27 à 2016-05-20	250	S.O.	0,175	S.O.	0,953	S.O.	0,228; 14,4
DEV1	2016-01-01 à 2016-05-17	152	0,171	0,163	1,786	1,051	0,171; -14,0	0,057; -166,4
KSK1	2016-01-01 à 2016-05-19	150	0,178	0,049	8,133	0,919	0,224; -160,8	0,317; 24,1
SRC1	2016-07-09 à 2017-07-10 2017-07-11 à 2018-08-21	150	0,129	0,144	0,985	1,207	0,047; 53,7	0,183; 22,3
		204	0,641	0,634	1,002	0,981	0,444; 25,5	0,458; 54,8
		153	0,104	0,117	0,838	1,068	0,433; 16,5	0,212; -17,1
SRN1	2017-07-09 à 2018-08-22	205	0,085	0,094	0,827	0,97	0,501; 17,7	0,352; 40,7
		150	0,078	0,098	0,964	1,43	0,232; 9,3	0,074; -21,7
		192	0,064	0,073	0,766	0,994	0,511; 17,1	0,202; 18,1

Tableau 18. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants totaux mesurés par les courantomètres installés dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.

Station	Période	Profondeur de l'instrument (m)	Biais (m/s, u + vj)		CRMSE (m/s)		Y2		Corrélation vectorielle (grandeur; orientation)	
			KIT 500	KIT 100	KIT 500	KIT 100	KIT 500	KIT 100	KIT 500	KIT 100
FOC1	2016-01 à 2016-06	150 m	-0,0058-0,0086j	-0,0002-0,0013j	0,178	0,093	3,301	0,912	S.O.	0,727; 9,6
		250 m	-0,0028-0,0120j	-0,0208-0,0302j	0,108	0,089	S.O.	0,561	0,57; -39,5	0,676; 20,1
	2020-08 à 2021-06	150 m	0,0086-0,0287j	0,0058-0,0028j	0,183	0,078	2,715	0,502	0,538; -45,2	0,725; 11,7
		250 m	-0,0101-0,0188j	-0,0089-0,0213j	0,12	0,085	S.O.	0,481	S.O.	0,743; 13,9
		359 m	-0,0210-0,0305j	-0,0176-0,0271j	0,112	0,087	S.O.	0,595	S.O.	0,661; -4,7

Tableau 19. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants totaux mesurés par les courantomètres installés dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.

Station	Période	Profondeur de l'instrument (m)	Biais (m/s, u + vj)		CRMSE (m/s)		Y2		Corrélation vectorielle (grandeur; orientation)	
			SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500
CAM2	2016-01 à 2016-07	150 m	-0,0229-0,184j	-0,0600-0,0899j	0,262	0,196	1,088	0,846	0,511; 26,9	0,714; 16,5
CMP1	2016-01 à 2016-05	250 m	0,0072-0,1218j	0,0191-0,125j	0,259	0,219	1,000	0,608	S.O.	0,694; 24,7
DEV1	2016-01 à 2016-05	152 m	0,0816+0,0190j	0,0410+0,108j	0,230	0,196	1,736	0,945	0,297; 21,3	0,308; 35,8
KSK1	2016-01 à 2016-05	150 m	0,0293-0,104j	0,0045-0,0110j	0,224	0,070	3,759	0,464	0,382; 54,2	0,811; 22,4
SRC1	2016-01 à 2016-07	204 m	0,267+0,0476j	0,259+0,0675j	0,702	0,699	0,946	0,940	0,245; 17,2	0,278; -12,3
	2016-07 à 2017-07	150 m	0,0008-0,0155j	-0,0091+0,0223j	0,168	0,192	0,827	1,072	0,626; 23,9	0,549; 11,4
	2017-07 à 2018-06	205 m	0,0044+0,0042j	-0,0042+0,0223j	0,126	0,144	0,517	0,658	0,750; 22,1	0,636; -21,4
		153 m	-0,0042-0,0284j	-0,0183+0,0251j	0,140	0,183	0,607	1,050	0,731; 18,5	0,568; -5,8
SRN1	2017-07 à 2018-08	150 m	0,0173-0,0125j	0,0244-0,0246j	0,118	0,141	0,406	0,561	0,802; 12,6	0,739; 10,3
		192 m	0,0093+0,0038j	0,0089-0,0088j	0,116	0,116	0,379	0,379	0,857; 22,1	0,798; -3,6

Tableau 20. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants de marée mesurés par profileur de courant à effet Doppler (ADCP) dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.

Station	Période	Profondeur de l'ADCP (m)	Profondeur (m)	CRMSE (m/s)		Y2	
				KIT500	KIT100	KIT500	KIT100
FOC1	2016-01 à 2016-06	37	8	0,148	0,133	1,472	1,192
			15	0,104	0,104	0,954	0,938
		356	50	0,056	0,054	0,676	0,625
			100	0,053	0,050	0,543	0,493
			250	0,056	0,048	0,299	0,214
FOC1	2020-08 à 2021-06	36	8	0,104	0,096	0,367	0,312
			15	0,096	0,087	0,490	0,405
		358	50	0,058	0,052	0,423	0,339
			100	0,046	0,041	0,311	0,253
			250	0,043	0,039	0,210	0,173
KIT1	2020-08 à 2021-06	41	8	0,054	0,051	1,303	1,164
			15	0,035	0,034	1,024	0,993
		101	50	0,019	0,019	0,923	0,915
		196	100	0,013	0,013	0,688	0,672

Tableau 21. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants de marée mesurés par profileur de courant à effet Doppler (ADCP) dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.

Station	Période	Profondeur de l'ADCP (m)	Profondeur (m)	CRMSE (m/s)		Y2	
				SPCOG-Ouest	KIT500	SPCOG-Ouest	KIT500
CAM2	2016-01 à 2016-07	227	50	0,237	0,069	1,619	0,138
			100	0,223	0,084	1,288	0,181
CMP1	2016-01 à 2016-05	355	100	0,151	0,088	0,483	0,163
			250	0,172	0,092	S.O.	0,286
DEV1	2016-01 à 2016-04	102	15	0,258	0,113	9,334	1,803
			50	0,269	0,061	8,683	0,447
HEC1	2016-01 à 2016-07	39	15	0,209	0,088	1,703	0,299
			50	0,188	0,074	1,782	0,275
			100	0,195	0,073	1,726	0,239
KSK1	2016-01 à 2016-05	41	15	0,171	0,084	1,343	0,319
		359	50	0,197	0,048	7,293	0,427
			100	0,186	0,039	5,590	0,241
			250	0,064	0,029	S.O.	0,209
SRC1	2016-07 à 2017-07	203	50	0,170	0,106	0,611	0,237
			100	0,147	0,117	0,639	0,404
SRN1	2019-08 à 2019-09	41	8	0,093	0,109	0,092	0,126
			15	0,078	0,088	0,068	0,087
		190	50	0,068	0,100	0,097	0,213
			100	0,070	0,114	0,178	0,474

Tableau 22. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants résiduels mesurés par profileur de courant à effet Doppler (ADCP) dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.

Station	Période	Profondeur de l'ADCP (m)	Profondeur (m)	CRMSE (m/s)		Y2		Corrélation vectorielle (grandeur; orientation)	
				KIT 500	KIT 100	KIT 500	KIT 100	KIT 500	KIT 100
FOC1	2016-01 à 2016-07	37	8	0,152	0,144	0,977	1,071	0,305; 0,0	0,358; 6,7
			15	0,145	0,124	0,900	0,969	0,345; -9,0	0,369; 0,8
		356	50	0,060	0,060	0,931	1,113	0,324; -13,3	0,274; -14,8
			100	0,064	0,072	0,948	1,005	0,240; -12,9	0,188; -18,3
			250	0,069	0,073	0,797	0,780	0,557; -22,1	0,497; -17,8
	2020-08 à 2021-06	36	8	0,195	0,181	0,776	0,867	0,51; -1,6	0,568; 4,7
			15	0,153	0,145	0,944	1,11	0,358; 2,0	0,403; 8,2
		358	50	0,079	0,075	1,03	1,051	0,244; 0,2	0,331; 0,6
			100	0,069	0,068	0,862	0,883	0,383; -9,0	0,395; -9,6
			250	0,059	0,059	0,9	0,902	0,337; -19,3	0,383; -22,7
KIT1	2020-08 à 2021-06	41	8	0,077	0,083	1,138	1,313	0,173; 3,6	0,234; -3,4
			15	0,055	0,059	1,097	1,272	0,203; 6,0	0,211; 12,6
		101	50	0,033	0,033	1,036	1,072	0,137; -8,0	0,155; -12,5
		196	100	0,027	0,026	0,986	0,952	0,181; -29,1	0,283; -24,6

Tableau 23. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants résiduels mesurés par profileur de courant à effet Doppler (ADCP) dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.

Station	Période	Profondeur de l'ADCP (m)	Profondeur (m)	CRMSE (m/s)		Y2		Corrélation vectorielle (grandeur; orientation)	
				SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500
CAM2	2016-01 à 2016-07	227	50	0,114	0,094	1,140	0,896	0,381; -49,7	0,442; 22,9
			100	0,105	0,101	1,054	1,130	0,215; 14,3	0,270; 38,2
CMP1	2016-01 à 2016-05	355	100	0,118	0,119	0,974	1,114	0,416; -52,8	0,238; 6,2
			250	0,150	0,149	S.O.	0,922	S.O.	0,284; -9,5
DEV1	2016-01 à 2016-04	102	15	0,131	0,092	1,678	1,127	0,078; -35,6	0,087; 38,3
			50	0,096	0,077	1,586	1,038	0,068; -24,1	0,046; 80,4
HEC1	2016-01 à 2016-07	39	15	0,183	0,180	0,891	0,870	0,346; -8,5	0,414; -5,7
			50	0,147	0,139	0,921	0,816	0,335; -21,2	0,490; -0,6
			100	0,128	0,129	0,966	0,882	0,251; -25,6	0,418; -12,3
KSK1	2016-01 à 2016-05	41	15	0,204	0,145	1,532	0,978	0,038; -125,9	0,226; -7,1
			50	0,103	0,079	1,975	1,065	0,192; -75,9	0,046; -82,1
			100	0,071	0,061	1,328	1,039	0,343; -56,9	0,057; -17,0
			250	0,038	0,037	S.O.	0,996	S.O.	0,133; -7,2
SRC1	2016-07 à 2017-07	203	50	0,221	0,223	0,839	0,977	0,413; -12,8	0,267; 13,6
			100	0,192	0,173	0,900	0,842	0,384; -34,6	0,470; 27,9
SRN1	2019-08 à 2019-09	41	8	0,124	0,149	0,866	1,106	0,408; -5,2	0,359; -14,8
			15	0,124	0,143	0,991	1,249	0,316; -13,5	0,240; -22,2
		190	50	0,107	0,098	1,136	1,164	0,301; 56,0	0,136; 58,0
			100	0,064	0,076	1,009	1,376	0,134; -32,7	0,166; 158,3

Tableau 24. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants totaux mesurés par profileur de courant à effet Doppler (ADCP) dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.

Station	Période	Profondeur de l'ADCP (m)	Profondeur (m)	Biais (m/s, u+vj)		CRMSE (m/s)		Y2		Corrélation vectorielle (grandeur; orientation)	
				KIT 500	KIT 100	KIT 500	KIT 100	KIT 500	KIT 100	KIT 500	KIT 100
FOC1	2016-01 à 2016-07	37	8	0,0694+0,0153j	0,0274-0,0085j	0,214	0,198	1,191	1,123	0,508; -10,6	0,521; -8,5
			15	0,0916+0,0352j	0,0514+0,0212j	0,18	0,163	0,93	0,961	0,497; -6,8	0,485; -2,3
		356	50	-0,0282-0,0094j	-0,0182-0,0060j	0,083	0,082	0,777	0,816	0,61; -3,9	0,585; -5,6
			100	0,0113+0,0177j	0,0260+0,0253j	0,083	0,088	0,72	0,716	0,644; -5,1	0,625; -6,5
			250	-0,0219-0,0258j	-0,0255-0,0330j	0,089	0,087	0,452	0,389	0,786; -9,8	0,793; -6,8
	2020-08 à 2021-06	36	8	0,0992+0,0680j	0,0619+0,0526j	0,223	0,207	0,584	0,603	0,662; -1,6	0,671; 0,6
			15	0,0881+0,0362j	0,0591+0,0269j	0,182	0,172	0,699	0,729	0,604; -2,4	0,598; 1,5
		358	50	-0,0370-0,0166j	-0,0283-0,0123j	0,099	0,092	0,647	0,602	0,717; -2,3	0,722; -2,9
			100	-0,0180-0,0049j	-0,0114-0,0037j	0,084	0,081	0,554	0,531	0,713; -0,6	0,712; -1,7
			250	-0,0050-0,0111j	-0,0057-0,0113j	0,074	0,072	0,415	0,39	0,78; -2,8	0,785; -4,8
KIT1	2020-08 à 2021-06	41	8	0,0098+0,000,8j	0,0075+0,0119j	0,096	0,099	1,188	1,269	0,299; 0,2	0,334; -3,1
			15	-0,0012-0,0026j	0,0025+0,0023j	0,066	0,07	1,08	1,197	0,313; 1,0	0,31; 4,4
		101	50	-0,0053+0,0020j	-0,0039+0,0024j	0,038	0,039	1,008	1,033	0,217; 0,0	0,219; -5,2
		196	100	0,0049+0,0043j	0,0049+0,0037j	0,03	0,03	0,908	0,882	0,375; 1,9	0,405; -2,2

Tableau 25. Comparaison des statistiques d'erreur pour les courants totaux mesurés par profileur de courant à effet Doppler (ADCP) dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.

Station	Période	Profondeur de l'ADCP (m)	Profondeur (m)	Biais (m/s, u+vj)		CRMSE (m/s)		Y2		Corrélation vectorielle (grandeur; orientation)	
				SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest	KIT 500
CAM2	2016-01 à 2016-07	227	50	-0,0059+ 0,0406j	-0,0068+ 0,0066j	0,264	0,119	1,51	0,311	0,831; -60,6	0,839; -5,7
			100	-0,0486- 0,0182j	-0,0280- 0,0200j	0,247	0,133	1,246	0,349	0,767; -56,6	0,815; 0,7
CMP1	2016-01 à 2016-05	355	100	-0,0157+ 0,054j	-0,0189+ 0,0358j	0,193	0,149	0,582	0,351	0,842; -34,1	0,814; 0,6
			250	-0,0243- 0,0873j	-0,013- 0,0943j	0,228	0,176	S.O.	0,498	S.O.	0,712; 3,8
DEV1	2016-01 à 2016-04	102	15	-0,0446+ 0,0535j	0,0026+ 0,0066j	0,29	0,147	5,327	1,449	0,258; -93,2	0,139; 143,2
			50	-0,0108+ 0,0342j	0,0157- 0,0230j	0,286	0,1	5,948	0,672	0,612; -101,8	0,594; 9,0
HEC1	2016-01 à 2016-07	39	15	-0,0131- 0,0234j	-0,0113- 0,0178j	0,28	0,203	1,222	0,64	0,546; -39,8	0,638; -8,0
		125	50	0,0059- 0,0083j	-0,003-0,007j	0,241	0,159	1,318	0,576	0,619; -36,9	0,702; -5,2
			100	-0,0066+ 0,0035j	-0,0392+ 0,0155j	0,234	0,15	1,394	0,526	0,647; -49,6	0,741; -1,1
KSK1	2016-01 à 2016-05	41	15	-0,0183+ 0,138j	-0,0034+ 0,0815j	0,268	0,169	1,422	0,59	0,620; -33,9	0,647; -0,2
		359	50	-0,0217- 0,0231j	-0,0119- 0,0291j	0,223	0,093	4,7	0,738	0,632; -39,2	0,580; -5,3
			100	-0,0102- 0,0166j	-0,0053+ 0,0045j	0,199	0,073	4,033	0,537	0,721; -41,9	0,705; -8,1
			250	-0,0013- 0,0065j	-0,0037- 0,002j	0,075	0,048	S.O.	0,415	S.O.	0,781; -5,7
SRC1	2016-07 à 2017-07	203	50	-0,0740+ 0,0672j	0,0060+ 0,0667j	0,281	0,249	0,726	0,608	0,685; -30,9	0,653; -9,1
			100	-0,054+ 0,0619j	0,0027+ 0,0416j	0,244	0,212	0,774	0,631	0,660; -29,8	0,634; -4,7
SRN1	2019-08 à 2019-09	41	8	0,0657+ 0,0235j	0,0861+ 0,0405j	0,158	0,188	0,187	0,245	0,897; -0,2	0,885; -1,0

Station	Période	Profondeur de l'ADCP (m)	Biais (m/s, u+vj)		CRMSE (m/s)		Y2		Corrélation vectorielle (grandeur; orientation)	
			Profondeur (m)	SPCOG-Ouest	KIT 500	SPCOG -Ouest	KIT 500	SPCOG -Ouest	KIT 500	SPCOG-Ouest
	190	15	0,0688+ 0,0232j	0,0838+ 0,0282j	0,148	0,171	0,168	0,214	0,909; 0,3	0,898; -1,7
		50	0,0652+ 0,0408j	0,0494+ 0,0394j	0,128	0,142	0,2	0,309	0,909; 1,3	0,902; -7,7
		100	0,0005+ 0,0282j	0,0238+ 0,0269j	0,097	0,139	0,276	0,573	0,892; 2,7	0,871; 8,0

Tableau 26. Comparaison des statistiques liées à l'erreur de la température de surface de la mer pour la période de simulation rétrospective (janvier 2016 à février 2022).

Station	Biais (°)			CRMSE (°)			Y2			Pearson		
	SPCOG-Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG-Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG-Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG-Ouest	KIT 500	KIT 100
46181	-1,361	0,055	0,221	2,51	1,091	1,102	0,283	0,054	0,055	0,947	0,978	0,978
46185	-0,772	-0,68	S.O.	0,923	1,054	S.O.	0,097	0,127	S.O.	0,951	0,937	S.O.

Tableau 27. Comparaison des statistiques liées à l'erreur de température provenant des capteurs de conductivité, température et profondeur (CTD) ancrés (suite à la page suivante).

Station	Période	Profondeur (m)	Biais (°)			CRMSE (°)			Y2			Pearson		
			SPCOG -Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG -Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG -Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG -Ouest	KIT 500	KIT 100
KIT1	2020-08 à 2021-06	40	S.O.	0,123	0,189	S.O.	0,403	0,344	S.O.	0,326	0,237	S.O.	0,838	0,882
		100	S.O.	-0,018	0,160	S.O.	0,385	0,365	S.O.	1,035	0,932	S.O.	0,343	0,420
KVIP.C2	2018-10 à 2020-02	46	0,956	-0,393	-0,521	0,317	0,535	0,625	0,716	1,367	1,866	0,825	0,618	0,688
FOC1	2016-01 à 2016-07	15	0,074	-0,061	-0,060	0,313	0,396	0,439	0,151	0,222	0,273	0,953	0,903	0,891
		40	0,291	0,315	0,303	0,265	0,425	0,398	1,225	2,717	2,38	0,397	-0,274	-0,284
		51	0,11	0,211	0,207	0,322	0,401	0,388	2,415	3,07	2,875	0,065	-0,299	-0,279
		150	-0,652	-0,576	-0,530	0,183	0,435	0,404	0,756	3,848	3,322	0,548	-0,7	-0,616
		250	-0,815	-0,982	-0,975	0,102	0,219	0,222	0,321	1,058	1,086	0,837	0,413	0,410
		300	-0,786	-1,214	-1,155	0,091	0,025	0,027	4,137	0,25	0,294	0,979	0,872	0,857
		350	-0,632	-1,26	-1,233	0,108	0,143	0,145	0,503	0,875	0,900	0,875	0,36	0,324
	2020-08 à 2021-06	15	S.O.	0,302	0,257	S.O.	1,013	1,011	S.O.	0,786	0,783	S.O.	0,923	0,925
		40	S.O.	0,225	0,243	S.O.	0,574	0,481	S.O.	0,422	0,296	S.O.	0,818	0,873
		75	S.O.	0,404	0,414	S.O.	0,365	0,391	S.O.	0,686	0,789	S.O.	0,692	0,655
		250	S.O.	0,04	0,056	S.O.	0,281	0,265	S.O.	0,827	0,739	S.O.	0,459	0,583
		356	S.O.	0,13	0,123	S.O.	0,25	0,249	S.O.	1,035	1,032	S.O.	0,054	0,058
KSK1	2016-01 à 2016-05	15	0,029	-0,315	S.O.	0,247	0,339	S.O.	0,19	0,331	S.O.	0,905	0,86	S.O.
		40	-0,002	0,285	S.O.	0,457	0,682	S.O.	1,98	4,315	S.O.	-0,39	-0,857	S.O.
		150	-0,681	-0,671	S.O.	0,144	0,284	S.O.	0,725	2,675	S.O.	0,533	-0,794	S.O.
		362	-1,201	-1,793	S.O.	0,064	0,132	S.O.	0,141	0,605	S.O.	0,972	0,789	S.O.
Dev1	2016-01 à 2016-04	15	-0,314	-0,213	S.O.	0,274	0,52	S.O.	0,989	3,238	S.O.	0,841	0,805	S.O.
		100	-0,042	0,213	S.O.	0,152	0,212	S.O.	0,364	0,689	S.O.	0,798	0,56	S.O.
		110	0,01	0,053	S.O.	0,182	0,313	S.O.	0,349	1,008	S.O.	0,947	0,136	S.O.
		152	-0,123	-0,103	S.O.	0,164	0,307	S.O.	0,461	1,534	S.O.	0,756	-0,744	S.O.
HBIP	2020-10 à 2021-06	95	S.O.	-0,165	S.O.	S.O.	0,394	S.O.	S.O.	3,953	S.O.	S.O.	0,71	S.O.
GRC1	2019-08 à 2020-08	20	S.O.	0,645	S.O.	S.O.	1,017	S.O.	S.O.	1,379	S.O.	S.O.	0,859	S.O.
PRC1	2019-08 à 2020-08	15	0,339	0,324	S.O.	0,44	1,444	S.O.	0,103	0,913	S.O.	0,981	0,906	S.O.
		150	-0,382	-0,167	S.O.	0,131	0,296	S.O.	0,153	0,711	S.O.	0,976	0,622	S.O.
		439	S.O.	-0,492	S.O.	S.O.	0,303	S.O.	S.O.	1,042	S.O.	S.O.	-0,014	S.O.

Station	Période	Profondeur (m)	Biais (°)			CRMSE (°)			Y2			Pearson		
			SPCOG -Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG -Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG -Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG -Ouest	KIT 500	KIT 100
CAM1	2016-01 à 2016-07	15	-0,02	-0,04	S.O.	0,394	0,543	S.O.	0,205	0,359	S.O.	0,925	0,881	S.O.
		40	-0,092	-0,24	S.O.	0,25	0,316	S.O.	0,318	0,459	S.O.	0,865	0,754	S.O.
		150	-0,603	-0,436	S.O.	0,278	0,469	S.O.	0,182	0,516	S.O.	0,906	0,782	S.O.
		417	S.O.	-0,906	S.O.	S.O.	0,858	S.O.	S.O.	1,232	S.O.	S.O.	-0,458	S.O.
CAM2	2016-01 à 2016-07	40	-0,089	-0,239	S.O.	0,282	0,395	S.O.	0,255	0,463	S.O.	0,89	0,735	S.O.
		150	-0,635	-0,636	S.O.	0,221	0,414	S.O.	0,264	0,886	S.O.	0,858	0,338	S.O.
		227	-0,715	-0,712	S.O.	0,358	0,624	S.O.	0,507	1,543	S.O.	0,704	-0,672	S.O.
CMP1	2016-01 à 2016-05	150	-0,602	-0,664	S.O.	0,17	0,207	S.O.	1,368	1,702	S.O.	0,883	0,26	S.O.
		355	-1,448	-1,983	S.O.	0,324	0,21	S.O.	2,709	1,006	S.O.	-0,003	0,118	S.O.
HEC1	2016-01 à 2016-07	15	-0,181	-0,195	S.O.	0,31	0,584	S.O.	0,05	0,176	S.O.	0,976	0,91	S.O.
		39	-0,052	-0,212	S.O.	0,41	0,379	S.O.	0,663	0,511	S.O.	0,825	0,713	S.O.
		52	-0,047	-0,184	S.O.	0,386	0,297	S.O.	1,667	0,868	S.O.	0,638	0,569	S.O.
		126	-0,212	-0,039	S.O.	0,297	0,612	S.O.	0,087	0,336	S.O.	0,965	0,883	S.O.
SRC1	2016-07 à 2017-07	40	0,632	0,217	S.O.	1,017	0,901	S.O.	0,943	0,703	S.O.	0,776	0,754	S.O.
		150	-0,049	-0,409	S.O.	0,545	0,733	S.O.	0,279	0,488	S.O.	0,866	0,716	S.O.
		202	0,055	0,019	S.O.	0,314	0,393	S.O.	0,224	0,344	S.O.	0,881	0,819	S.O.
SRC1	2017-07 à 2018-08	43	0,007	-0,452	S.O.	0,422	0,808	S.O.	0,123	0,402	S.O.	0,938	0,778	S.O.
		153	0,021	-0,281	S.O.	0,481	0,483	S.O.	0,72	0,691	S.O.	0,547	0,624	S.O.
SRN1	2017-07 à 2018-08	40	S.O.	-0,546	S.O.	S.O.	0,752	S.O.	S.O.	0,356	S.O.	S.O.	0,814	S.O.
		150	S.O.	-0,145	S.O.	S.O.	0,442	S.O.	S.O.	0,406	S.O.	S.O.	0,772	S.O.
		189	S.O.	0,373	S.O.	S.O.	0,558	S.O.	S.O.	0,669	S.O.	S.O.	0,578	S.O.
SRN1	2018-08 à 2019-08	50	S.O.	-0,339	S.O.	S.O.	0,368	S.O.	S.O.	0,14	S.O.	S.O.	0,934	S.O.
		150	S.O.	-0,325	S.O.	S.O.	0,649	S.O.	S.O.	0,513	S.O.	S.O.	0,771	S.O.
		189	S.O.	0,389	S.O.	S.O.	0,33	S.O.	S.O.	0,791	S.O.	S.O.	0,626	S.O.
CHAT1	2018-08 à 2018-12	50	0,152	0,164	S.O.	0,205	0,339	S.O.	0,078	0,211	S.O.	0,981	0,894	S.O.
		103	S.O.	0,412	S.O.	S.O.	0,298	S.O.	S.O.	0,094	S.O.	S.O.	0,959	S.O.

Tableau 28. Comparaison des statistiques liées à l'erreur de salinité provenant des capteurs de conductivité, température et profondeur (CTD) ancrés (suite à la page suivante).

Station	Période	Profondeur (m)	Biais (PSU)			CRMSE (PSU)			Y2			Pearson		
			SPCOG- Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG- Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG- Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG- Ouest	KIT 500	KIT 100
KIT1	2020-08 à 2021-06	40	S.O.	0,495	0,492	S.O.	0,236	0,262	S.O.	0,351	0,433	S.O.	0,809	0,755
		100	S.O.	0,564	0,586	S.O.	0,228	0,23	S.O.	0,246	0,25	S.O.	0,935	0,951
KVIP.C2	2018-10 à 2020-02	46	0,308	0,35	0,326	0,176	0,251	0,284	0,345	0,552	0,705	0,819	0,674	0,565
FOC1	2016-01 à 2016-07	15	0,495	0,358	0,434	0,708	0,878	0,888	0,719	0,693	0,709	0,554	0,573	0,556
		40	0,455	0,571	0,541	0,165	0,178	0,183	0,296	0,275	0,288	0,882	0,886	0,879
		51	0,28	0,403	0,386	0,15	0,249	0,253	0,18	0,439	0,45	0,953	0,753	0,747
		150	0,342	0,657	0,624	0,231	0,333	0,327	0,599	1,129	1,093	0,655	0,208	0,227
		250	0,546	0,72	0,728	0,098	0,198	0,195	0,32	1,011	0,977	0,846	0,342	0,371
		300	0,581	0,833	0,83	0,067	0,02	0,019	6,273	0,428	0,427	0,98	0,785	0,779
		350	0,434	0,919	0,918	0,111	0,111	0,107	1,16	1,159	1,063	0,88	-0,167	0,068
		350	0,434	0,919	0,918	0,111	0,111	0,107	1,16	1,159	1,063	0,88	-0,167	0,068
FOC1	2020-08 à 2021-06	15	S.O.	0,59	0,622	S.O.	1,306	1,306	S.O.	0,8	0,8	S.O.	0,611	0,606
		40	S.O.	0,626	0,615	S.O.	0,339	0,335	S.O.	0,54	0,527	S.O.	0,684	0,694
		75	S.O.	-0,048	-0,066	S.O.	0,125	0,129	S.O.	0,109	0,116	S.O.	0,948	0,946
		250	S.O.	0,414	0,411	S.O.	0,183	0,179	S.O.	0,76	0,723	S.O.	0,682	0,735
		356	S.O.	0,32	0,329	S.O.	0,142	0,145	S.O.	0,927	0,968	S.O.	0,305	0,179
KSK1	2016-01 à 2016-05	15	0,992	0,587	S.O.	0,875	0,909	S.O.	1,037	0,827	S.O.	0,006	0,416	S.O.
		40	0,455	0,594	S.O.	0,141	0,142	S.O.	0,497	0,443	S.O.	0,823	0,752	S.O.
		150	0,528	0,844	S.O.	0,08	0,206	S.O.	0,108	0,685	S.O.	0,951	0,572	S.O.
		362	0,657	1,041	S.O.	0,077	0,115	S.O.	0,305	0,682	S.O.	0,984	0,957	S.O.
Dev1	2016-01 à 2016-04	15	0,333	-0,136	S.O.	0,54	0,617	S.O.	0,654	0,692	S.O.	0,694	0,616	S.O.
		100	0,341	0,699	S.O.	0,09	0,129	S.O.	0,186	0,369	S.O.	0,904	0,795	S.O.
		110	0,265	0,696	S.O.	0,048	0,075	S.O.	0,253	0,573	S.O.	0,948	0,728	S.O.
		152	0,362	0,929	S.O.	0,091	0,155	S.O.	0,206	0,581	S.O.	0,894	0,656	S.O.
HBIP	2020-10 à 2021-06	95	S.O.	0,844	S.O.	S.O.	0,209	S.O.	S.O.	0,574	S.O.	S.O.	0,712	S.O.
GRC1	2019-08 à 2020-08	20	S.O.	-1,479	S.O.	S.O.	0,666	S.O.	S.O.	2,192	S.O.	S.O.	0,176	S.O.
PRC1	2019-08 à 2020-08	15	0,876	0,663	S.O.	0,507	0,929	S.O.	0,478	0,924	S.O.	0,782	0,378	S.O.
		150	0,333	0,48	S.O.	0,034	0,259	S.O.	0,06	0,815	S.O.	0,973	0,521	S.O.
		439	S.O.	0,487	S.O.	S.O.	0,116	S.O.	S.O.	0,843	S.O.	S.O.	0,633	S.O.
CAM1		15	0,196	0,056	S.O.	0,226	0,355	S.O.	0,655	1,551	S.O.	0,588	0,251	S.O.

Station	Période	Profondeur (m)	Biais (PSU)			CRMSE (PSU)			Y2			Pearson		
			SPCOG- Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG- Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG- Ouest	KIT 500	KIT 100	SPCOG- Ouest	KIT 500	KIT 100
	2016-01 à 2016-07	40	0,24	0,232	S.O.	0,206	0,197	S.O.	0,491	0,439	S.O.	0,809	0,768	S.O.
		150	0,456	0,44	S.O.	0,117	0,456	S.O.	0,033	0,5	S.O.	0,983	0,796	S.O.
		417	S.O.	0,79	S.O.	S.O.	0,718	S.O.	S.O.	1,281	S.O.	S.O.	-0,649	S.O.
CAM2	2016-01 à 2016-07	40	0,43	0,404	S.O.	0,2	0,22	S.O.	0,502	0,531	S.O.	0,772	0,685	S.O.
		150	0,441	0,572	S.O.	0,088	0,395	S.O.	0,029	0,583	S.O.	0,986	0,693	S.O.
		227	0,47	0,531	S.O.	0,142	0,439	S.O.	0,111	1,055	S.O.	0,954	0,071	S.O.
CMP1	2016-01 à 2016-05	150	0,288	0,552	S.O.	0,063	0,234	S.O.	0,134	1,397	S.O.	0,981	0,289	S.O.
		355	0,851	1,144	S.O.	0,195	0,179	S.O.	1,55	1,015	S.O.	0,136	0,033	S.O.
HEC1	2016-01 à 2016-07	15	0,293	0,166	S.O.	0,231	0,356	S.O.	0,524	1,217	S.O.	0,72	0,46	S.O.
		39	-0,006	-0,001	S.O.	0,24	0,258	S.O.	0,847	0,912	S.O.	0,403	0,4	S.O.
		52	0,084	0,135	S.O.	0,247	0,236	S.O.	0,793	0,687	S.O.	0,455	0,563	S.O.
		126	0,069	0,03	S.O.	0,173	0,415	S.O.	0,063	0,34	S.O.	0,968	0,856	S.O.
SRC1	2016-07 à 2017-07	40	-0,066	-0,097	S.O.	0,28	0,257	S.O.	0,747	0,607	S.O.	0,505	0,629	S.O.
		150	0,169	0,239	S.O.	0,281	0,31	S.O.	0,72	0,819	S.O.	0,539	0,425	S.O.
		202	0,046	0,063	S.O.	0,102	0,12	S.O.	0,707	0,926	S.O.	0,553	0,33	S.O.
SRC1	2017-07 à 2018-08	43	0,145	0,185	S.O.	0,194	0,211	S.O.	0,928	0,92	S.O.	0,39	0,418	S.O.
		153	0,119	0,18	S.O.	0,222	0,204	S.O.	0,85	0,665	S.O.	0,389	0,579	S.O.
SRN1	2017-07 à 2018-08	40	S.O.	0,209	S.O.	S.O.	0,207	S.O.	S.O.	1,283	S.O.	S.O.	0,434	S.O.
		150	S.O.	0,207	S.O.	S.O.	0,296	S.O.	S.O.	0,434	S.O.	S.O.	0,806	S.O.
		189	S.O.	-0,008	S.O.	S.O.	0,244	S.O.	S.O.	0,601	S.O.	S.O.	0,66	S.O.
SRN1	2018-08 à 2019-08	50	S.O.	0,238	S.O.	S.O.	0,157	S.O.	S.O.	0,446	S.O.	S.O.	0,841	S.O.
		150	S.O.	0,282	S.O.	S.O.	0,397	S.O.	S.O.	0,885	S.O.	S.O.	0,353	S.O.
		189	S.O.	0,016	S.O.	S.O.	0,1	S.O.	S.O.	0,822	S.O.	S.O.	0,442	S.O.
CHAT1	2018-08 à 2018-12	50	0,058	0,032	S.O.	0,087	0,104	S.O.	0,244	0,331	S.O.	0,952	0,896	S.O.
		103	S.O.	-0,041	S.O.	S.O.	0,107	S.O.	S.O.	0,176	S.O.	S.O.	0,925	S.O.

Tableau 28. Comparaison des résultats du SPCOG-Ouest et de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat par rapport aux données de salinité et de température près de la surface mesurées par le traversier Bellingham-Alaska.

Mesure	Période	T (°)		S (PSU)	
		SPCOG-Ouest	KIT500	SPCOG-Ouest	KIT500
Biais	Exécution complète	-0,091	0,349	0,759	-0,719
	2017	0,105	-0,508	0,517	-1,158
	2018	0,064	0,656	0,825	-0,661
	2019	-0,385	0,316	0,792	-0,595
CRMSE	Exécution complète	1,073	1,908	1,987	2,45
	2017	0,595	0,78	1,739	1,709
	2018	1,155	2,046	2,03	2,548
	2019	1,045	1,895	2,014	2,566

Tableau 29. Statistiques comparatives de la trajectoire du courant de dérive sur 24 heures, pour des simulations réalisées à partir de bouées dérivantes dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.

Heure	Indice de comparaison de Molcard			Distance de séparation (km)		
	SPCOG-Ouest	KIT500	KIT100	SPCOG-Ouest	KIT500	KIT100
1	0,2	0,31	0,32	0,9	0,7	0,67
2	0,21	0,32	0,33	1,68	1,27	1,21
3	0,22	0,33	0,34	2,37	1,85	1,77
4	0,23	0,33	0,34	3	2,36	2,27
5	0,2	0,33	0,33	3,69	2,88	2,78
6	0,2	0,33	0,33	4,33	3,43	3,32
7	0,21	0,34	0,34	4,96	3,85	3,7
8	0,21	0,34	0,34	5,51	4,35	4,18
9	0,28	0,31	0,32	5,71	5,51	5,19
10	0,29	0,3	0,32	6,12	6,04	5,69
11	0,3	0,28	0,3	6,65	6,67	6,22
12	0,28	0,25	0,26	5,7	5,57	5,54
13	0,31	0,27	0,27	5,73	5,8	5,73
14	0,3	0,28	0,27	6,03	6,03	6
15	0,35	0,32	0,32	6,08	6,56	6,54
16	0,36	0,34	0,32	6,25	6,76	6,88
17	0,37	0,35	0,33	6,32	6,92	7,12
18	0,38	0,34	0,33	6,33	7,06	7,28
19	0,39	0,34	0,32	6,3	7,2	7,53
20	0,4	0,33	0,3	6,29	7,38	7,78
21	0,41	0,33	0,29	6,32	7,58	8,07
22	0,42	0,32	0,27	6,41	7,83	8,48
23	0,42	0,3	0,26	6,58	8,18	8,83
24	0,41	0,29	0,25	6,78	8,58	9,16

Tableau 30. Statistiques comparatives de la trajectoire du courant de dérive sur 24 heures, pour des simulations réalisées à partir de bouées dérivantes dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.

Heure	Indice de comparaison de Molcard		Distance de séparation (km)	
	SPCOG-Ouest	KIT500	SPCOG-Ouest	KIT500
1	0,25	0,24	0,91	0,95
2	0,26	0,24	1,73	1,79
3	0,26	0,25	2,54	2,64
4	0,27	0,24	3,27	3,45
5	0,32	0,28	3,46	3,87
6	0,32	0,28	3,94	4,48
7	0,32	0,28	4,28	4,89
8	0,31	0,27	4,7	5,4
9	0,3	0,25	4,91	5,81
10	0,3	0,25	5,27	6,31
11	0,29	0,25	5,62	6,73
12	0,29	0,25	5,98	7,16
13	0,3	0,25	6,36	7,62
14	0,3	0,25	6,76	8,1
15	0,32	0,26	7,04	8,42
16	0,33	0,27	7,22	8,86
17	0,33	0,27	7,63	9,3
18	0,33	0,28	7,95	9,58
19	0,33	0,28	8,34	9,97
20	0,33	0,29	8,74	10,34
21	0,33	0,29	9,12	10,69
22	0,32	0,29	9,49	11,08
23	0,32	0,29	9,86	11,44
24	0,27	0,19	8,21	9,59

12. FIGURES

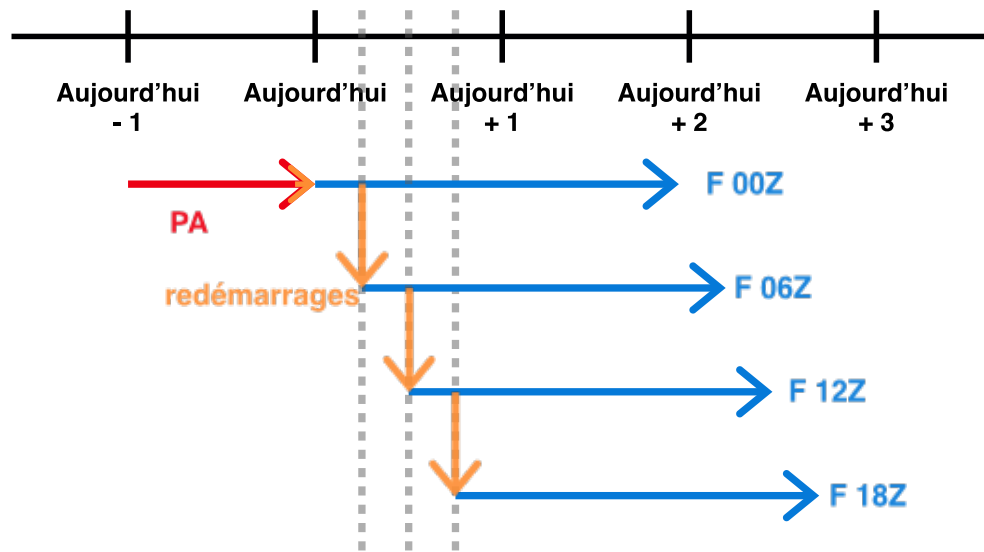


Figure 1. Schéma de séquençage de la pseudo-analyse (PA, en rouge) et des 4 prévisions de 48 h (en bleu) pour une date donnée. Les lignes pointillées grises sont espacées de six heures et les flèches orange indiquent les moments où un fichier de redémarrage est généré et utilisé pour lancer l'étape suivante.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

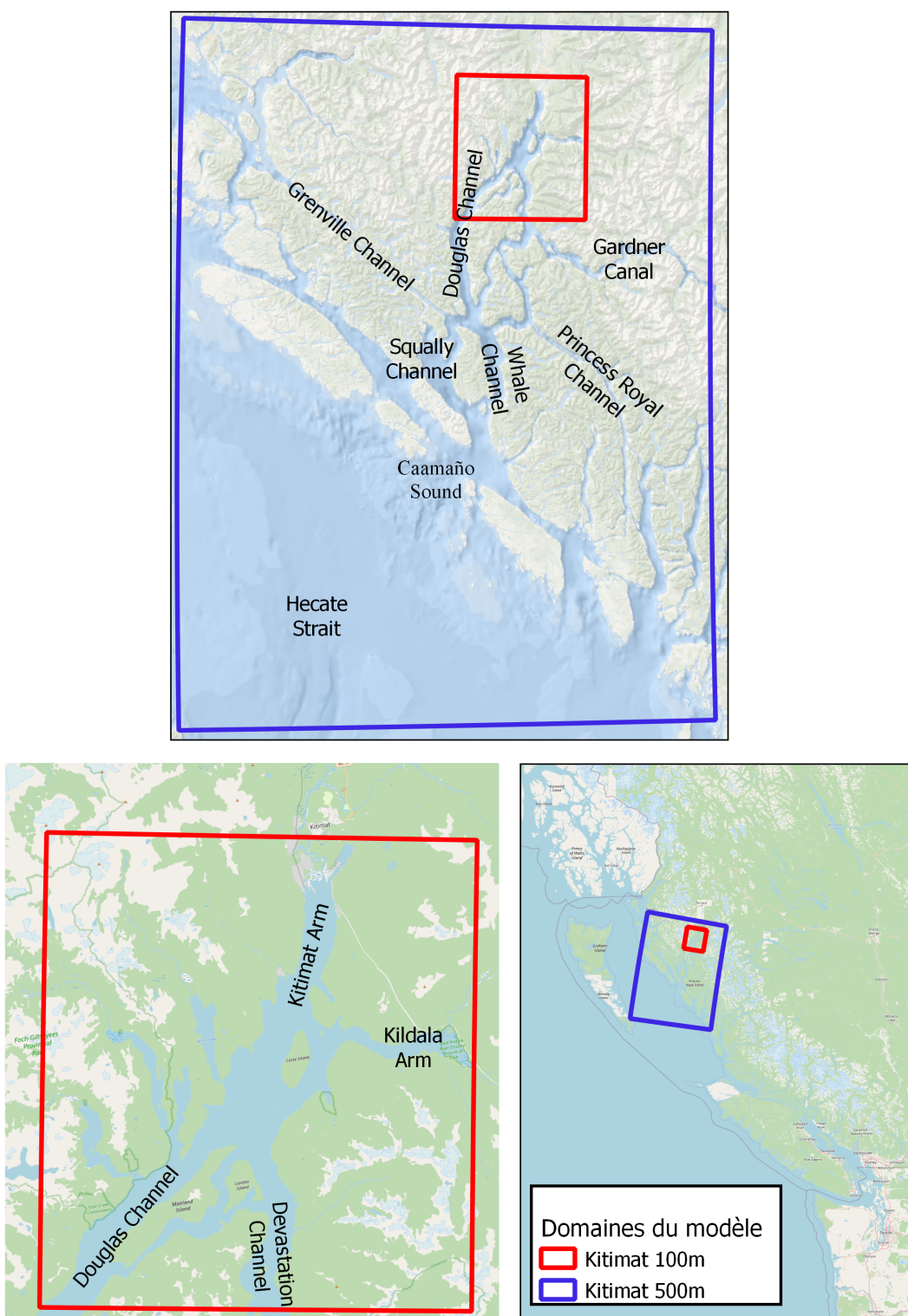


Figure 2. Tracés des domaines du modèle de Kitimat avec indication des noms des principaux chenaux.

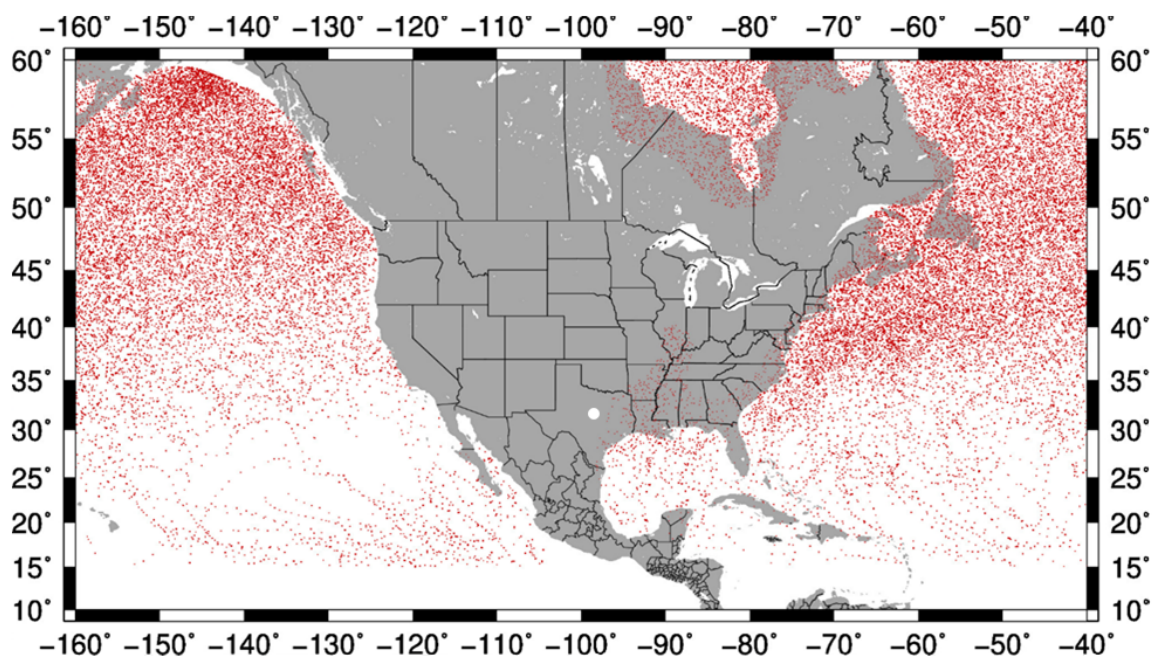


Figure 3. Emplacement de cyclones toutes les 6 heures, de 2010 à 2021.

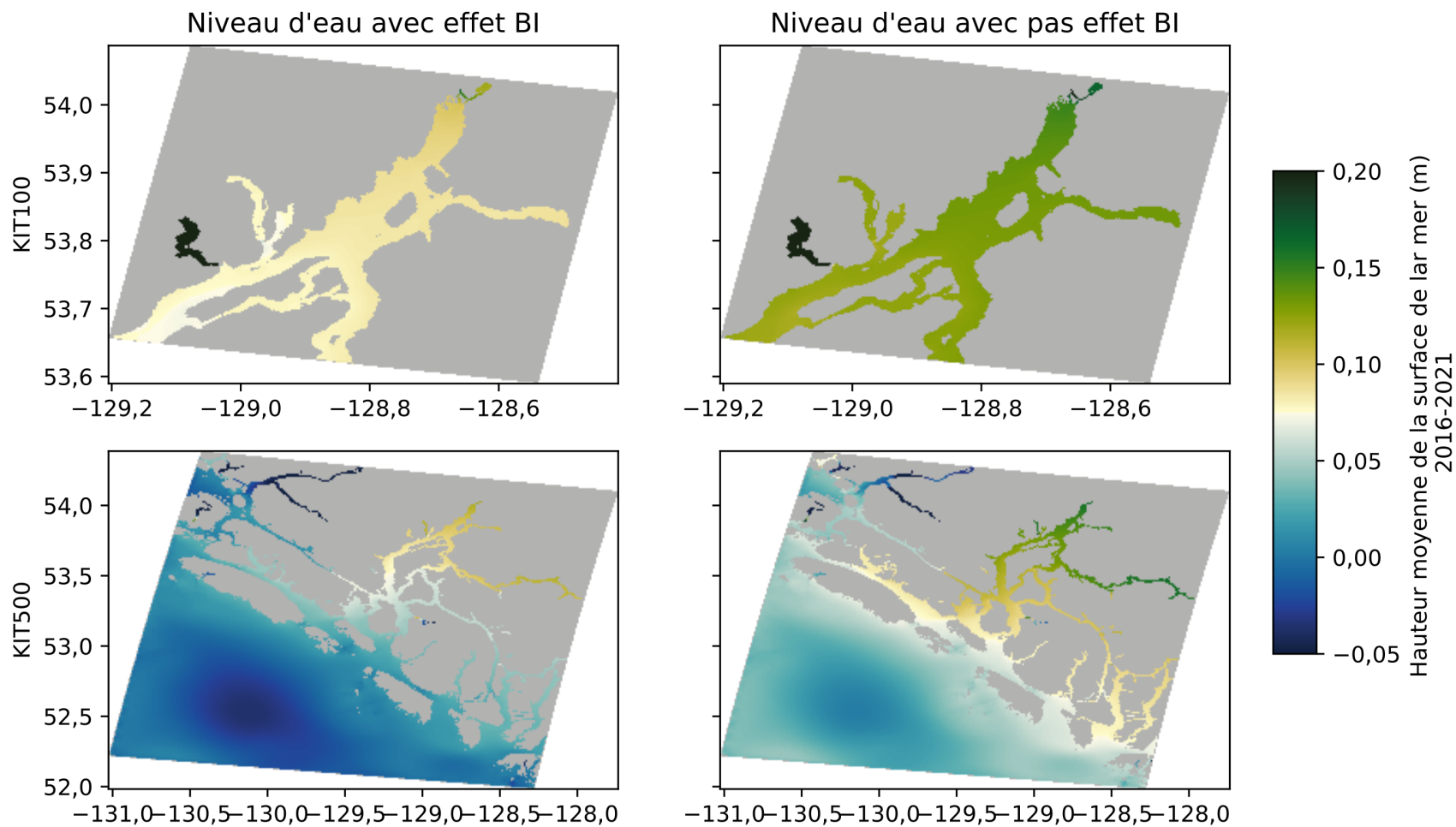


Figure 4. Hauteur moyenne de la surface de la mer calculée à partir des simulations rétrospectives du modèle portuaire de Kitimat, de 2016 à 2021.

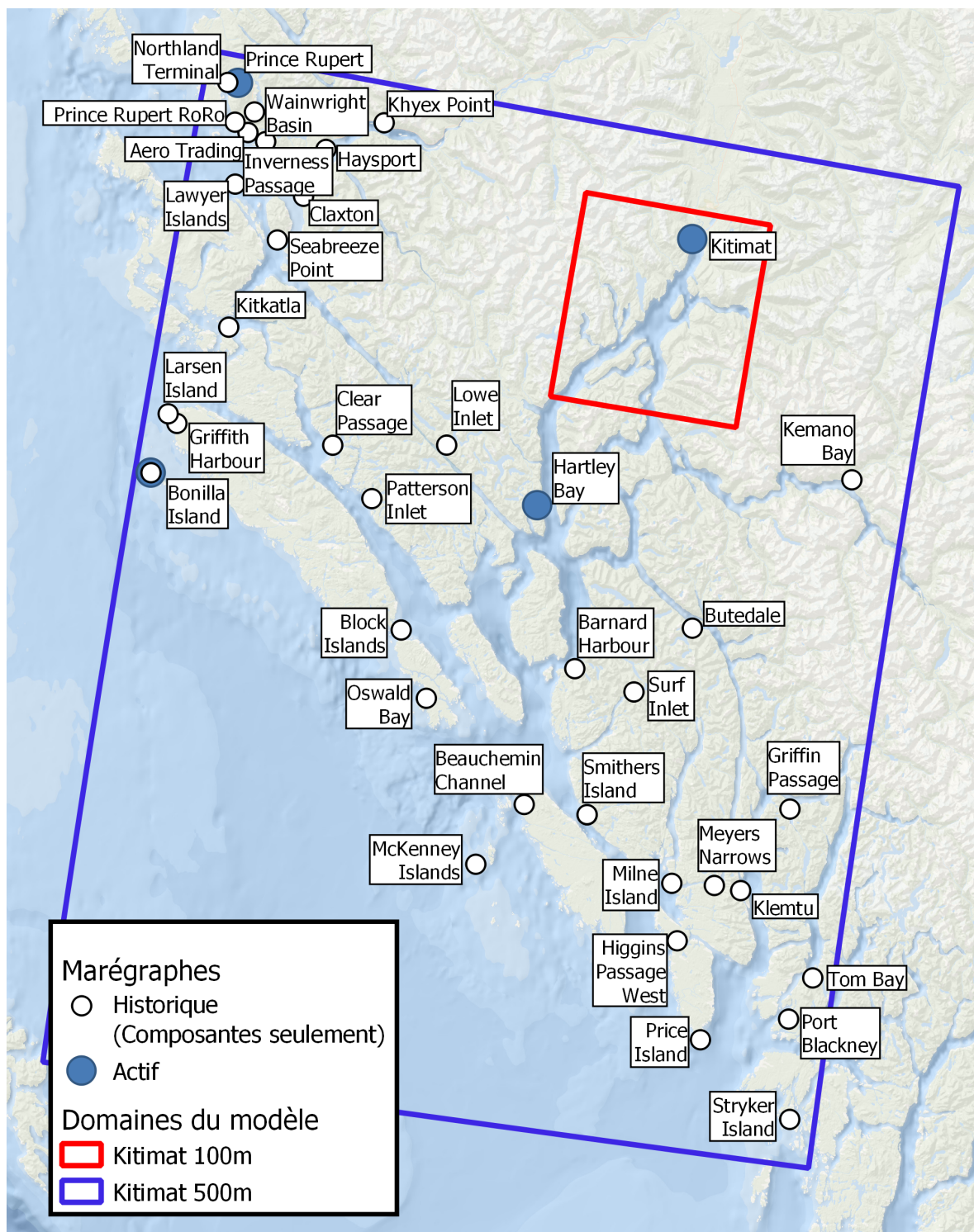


Figure 5. Carte représentant l'emplacement des marégraphes actifs et ceux utilisés par le passé.

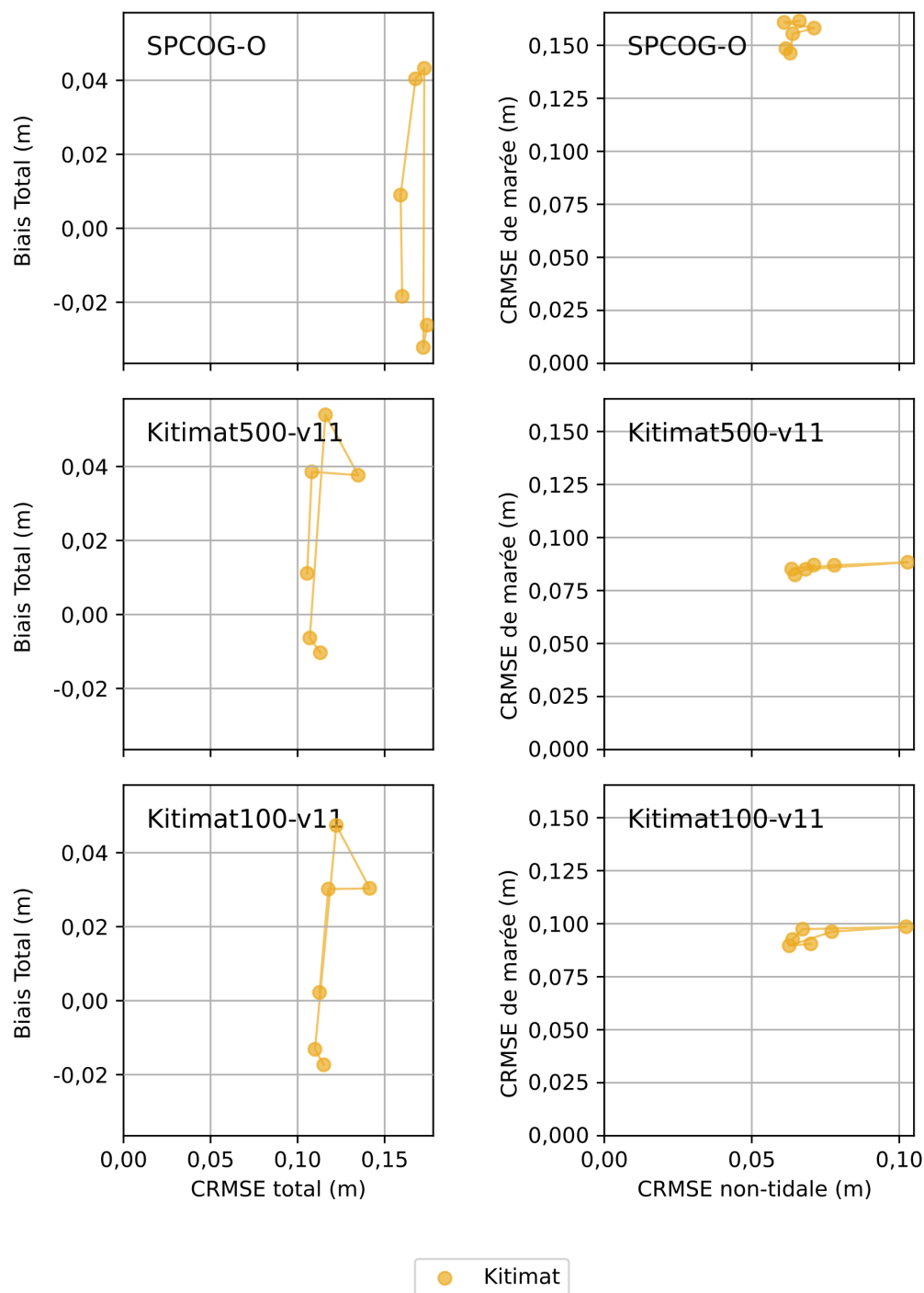


Figure 6. Indices de comparaison sommaires du niveau d'eau pour le SPCOG-Ouest (en haut), la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (au milieu) et la configuration à 100 m de ce dernier modèle (en bas). Les graphiques de gauche représentent le biais total en fonction de l'erreur CRMSE du niveau d'eau total. Les graphiques de droite représentent l'erreur CRMSE des composantes tidales et résiduelles du niveau d'eau. Chaque marqueur représente les valeurs pour une année entre 2016 et 2021. Dans tous les graphiques, un mouvement vers l'origine indique une amélioration du modèle. Les graphiques ne contiennent que les données du marégraphe de Kitimat.

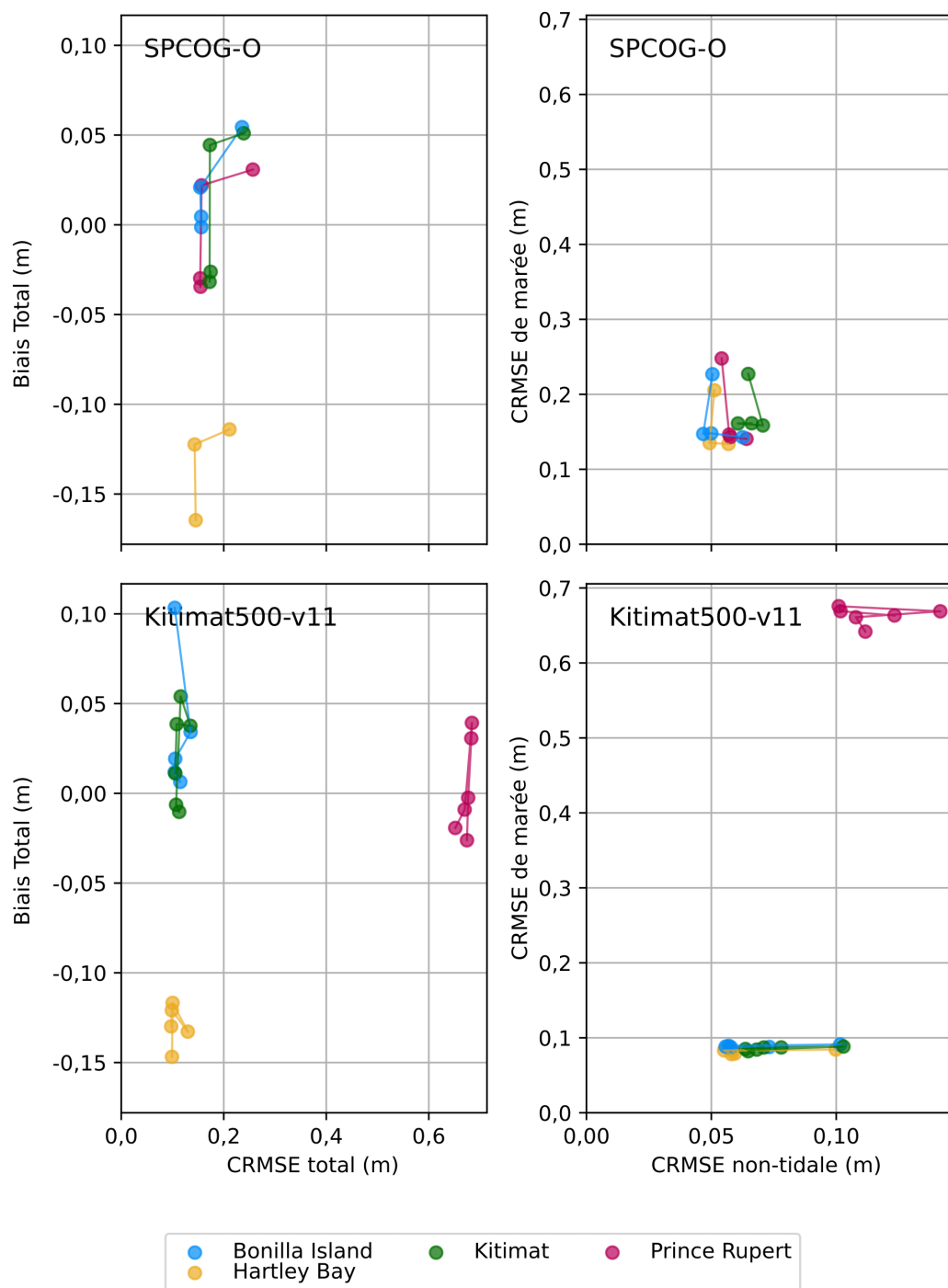


Figure 7. Indices de comparaison sommaires du niveau d'eau pour le SPCOG-Ouest (en haut) et la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (en bas). Les graphiques de gauche représentent le biais total en fonction de l'erreur CRMSE du niveau d'eau total. Les graphiques de droite représentent l'erreur CRMSE des composantes tidales et résiduelles du niveau d'eau. Chaque marqueur représente les valeurs pour une année entre 2016 et 2021. Dans tous les graphiques, un mouvement vers l'origine indique une amélioration du modèle. Ces graphiques contiennent des données provenant des marégraphes de Kitimat (en vert), de Hartley Bay (en jaune), de l'île Bonilla (en bleu) et de Prince Rupert (en magenta).

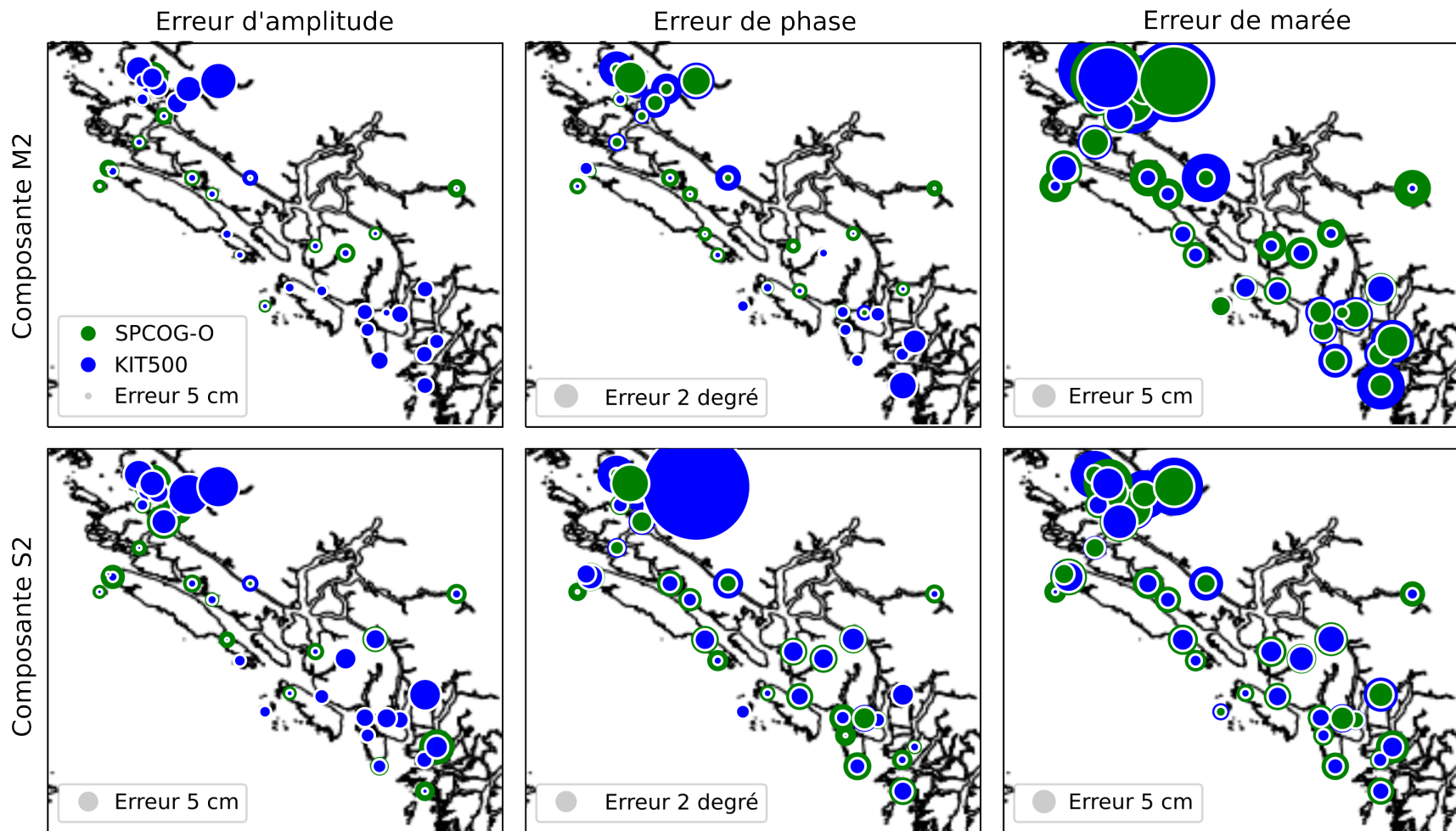


Figure 8. Résumé des comparaisons entre les données modélisées et les données de marégraphes utilisées par le passé pour les composantes de marées M2 et S2.

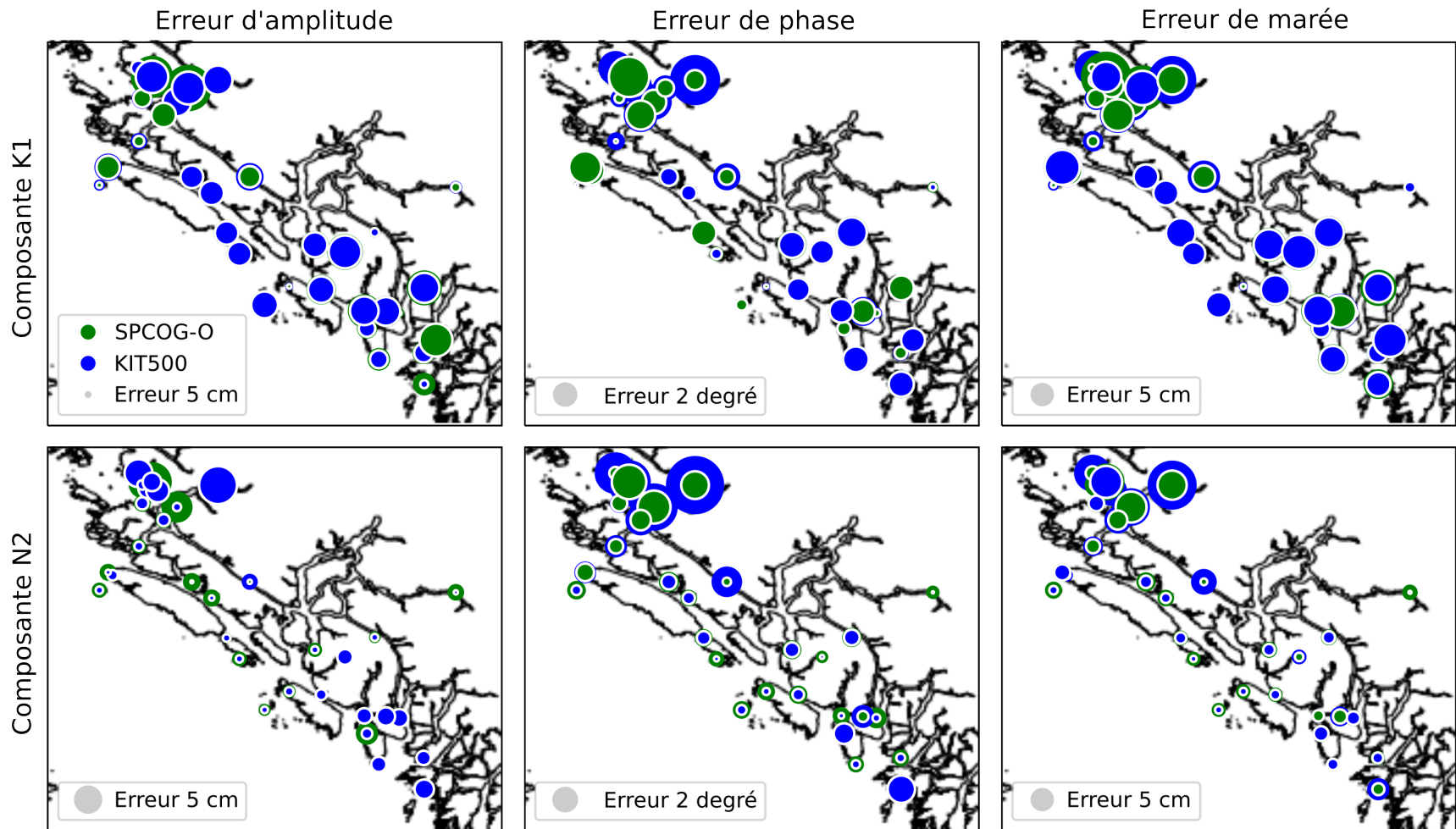


Figure 9. Résumé des comparaisons entre les données modélisées et les données de marégraphes utilisées par le passé pour les composantes de marées K1 et N2.

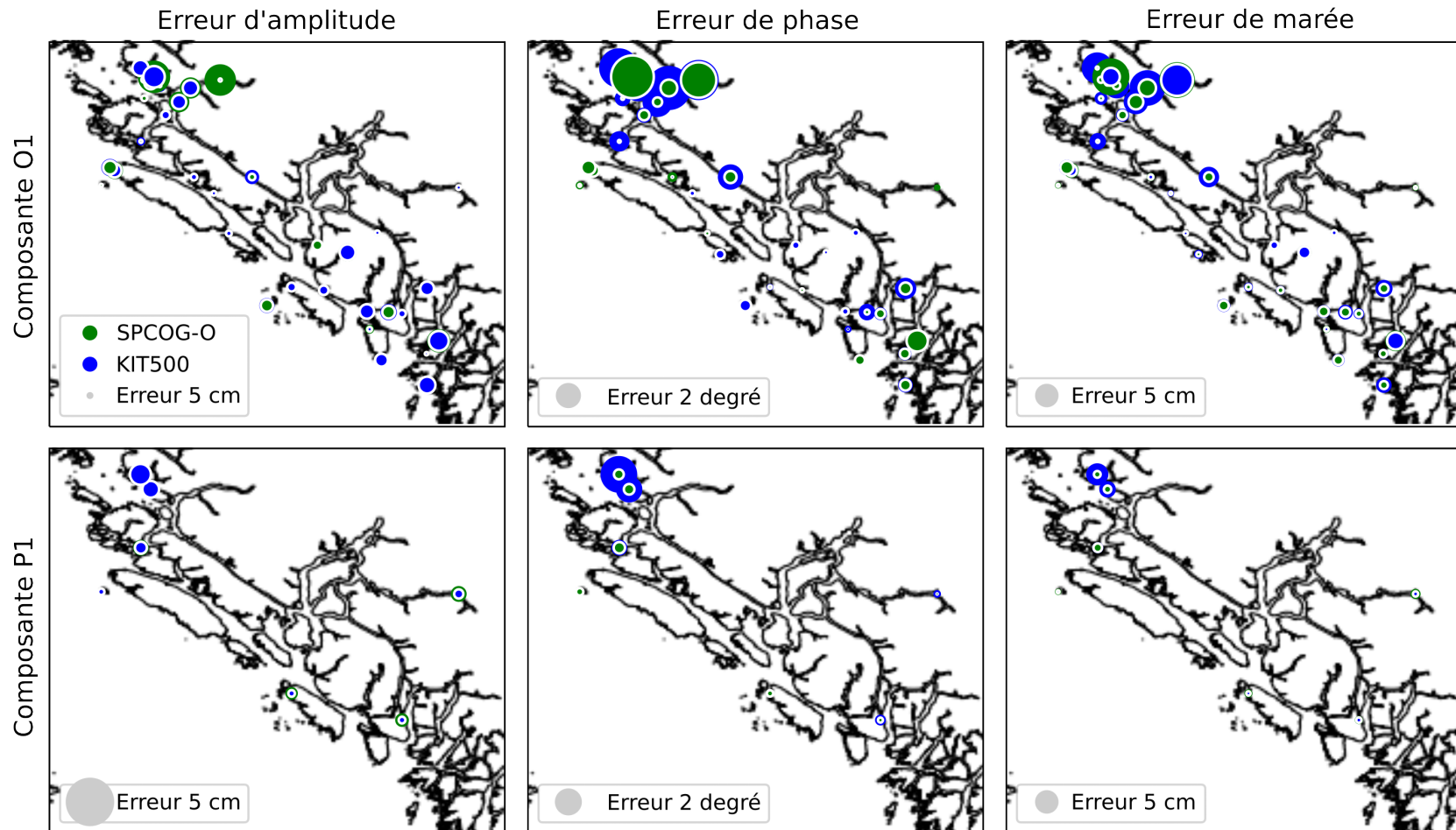


Figure 10. Résumé des comparaisons entre les données modélisées et les données de marégraphes utilisées par le passé pour les composantes de marées O1 et P1.

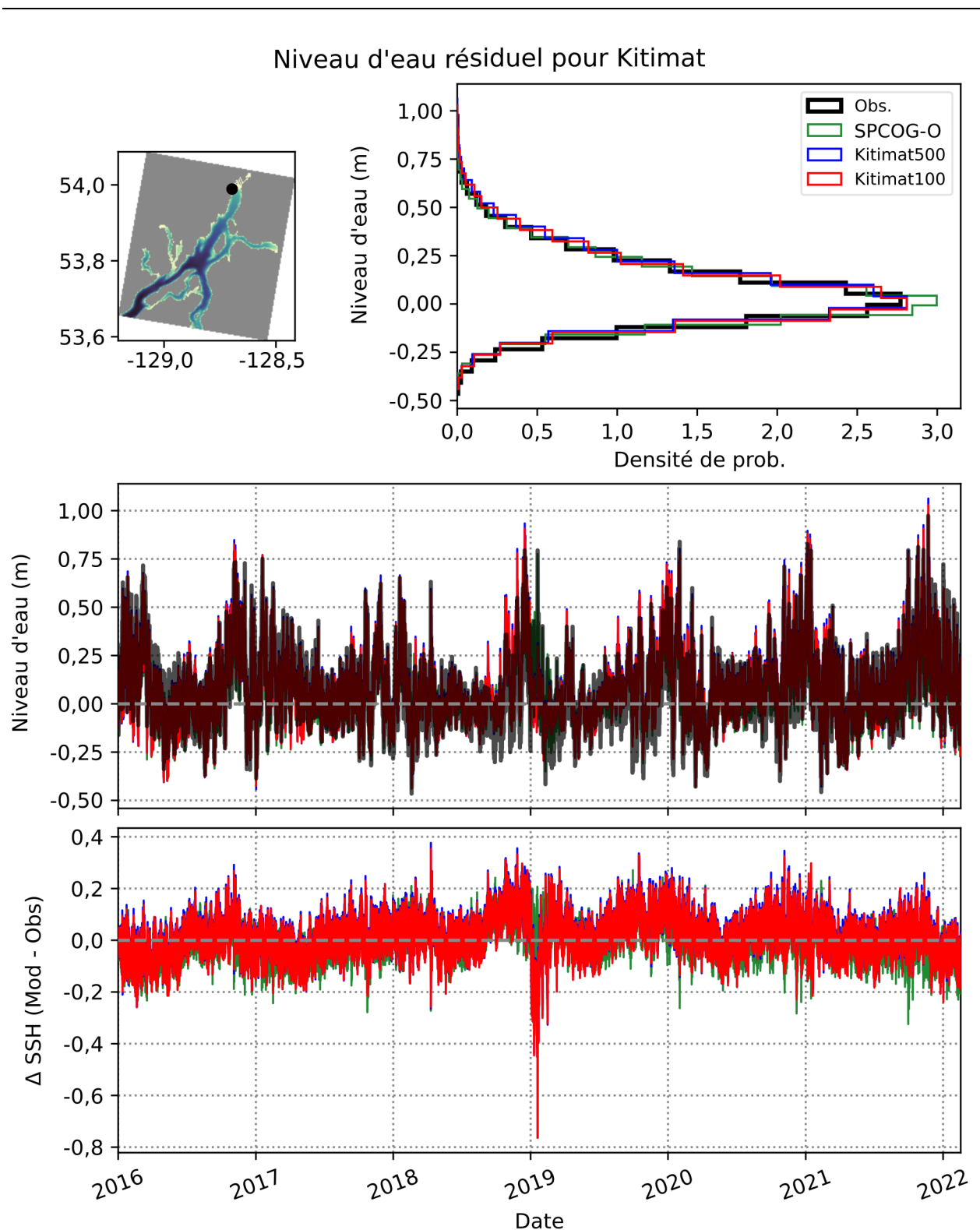


Figure 11. Comparaison des prévisions du niveau d'eau résiduel à Kitimat entre la configuration à 100 m (rouge) du modèle portuaire de Kitimat, la configuration à 500 m du même modèle (bleu) et le SPCOG-Ouest (vert).

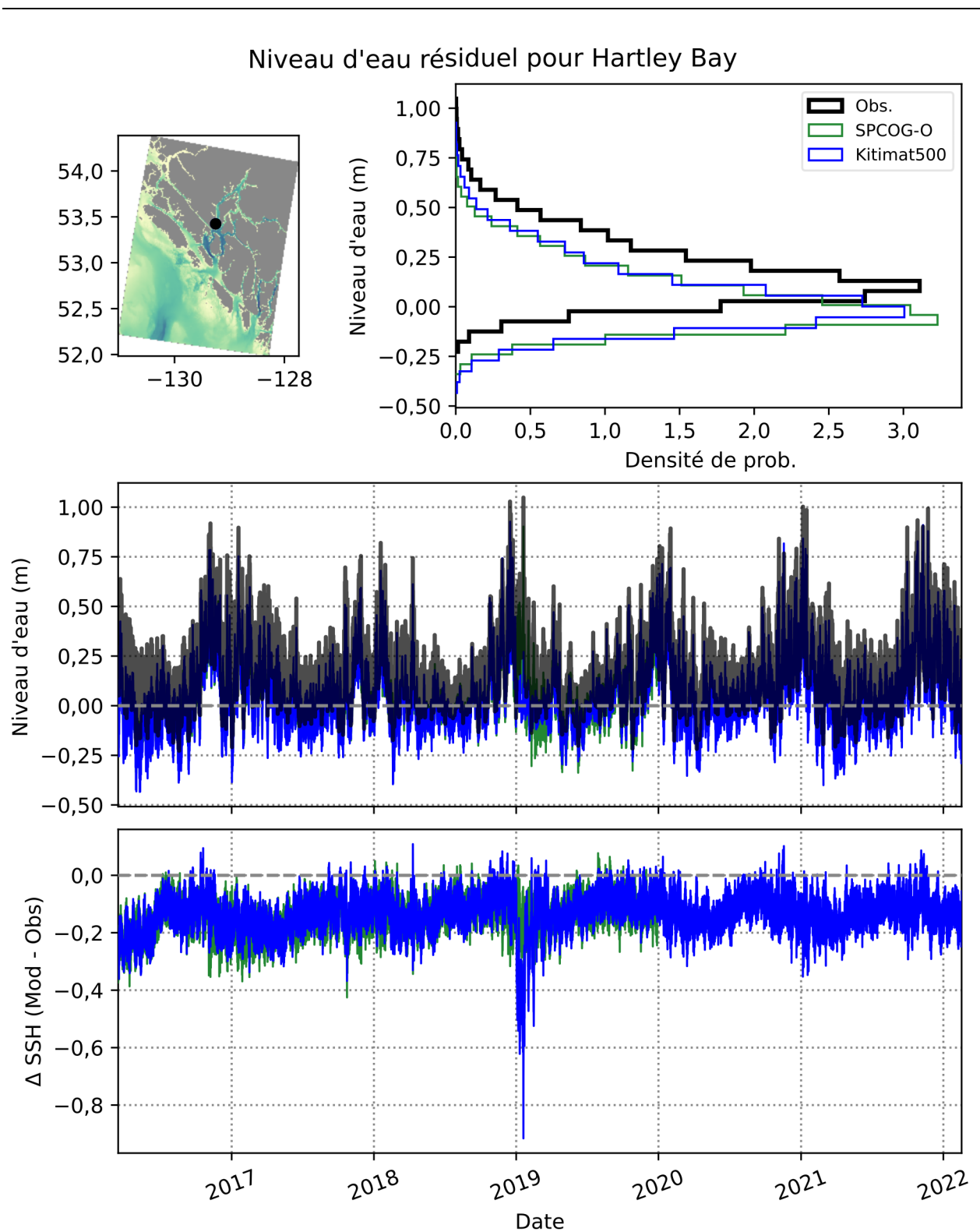


Figure 12. Comparaison des prévisions du niveau d'eau résiduel à Hartley Bay entre la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et le SPCOG-Ouest (vert).

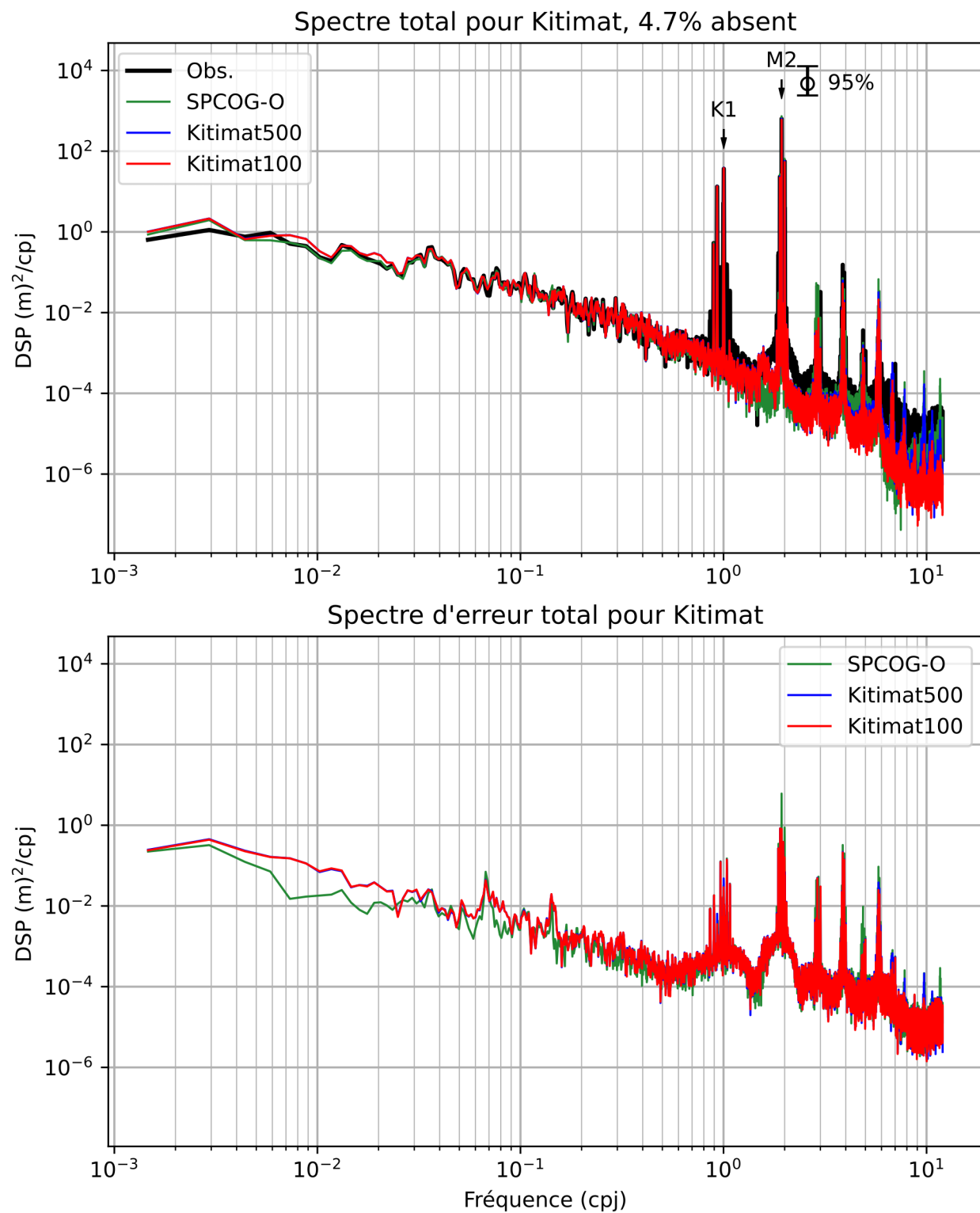


Figure 13. Spectre de puissance du niveau d'eau total à Kitimat.

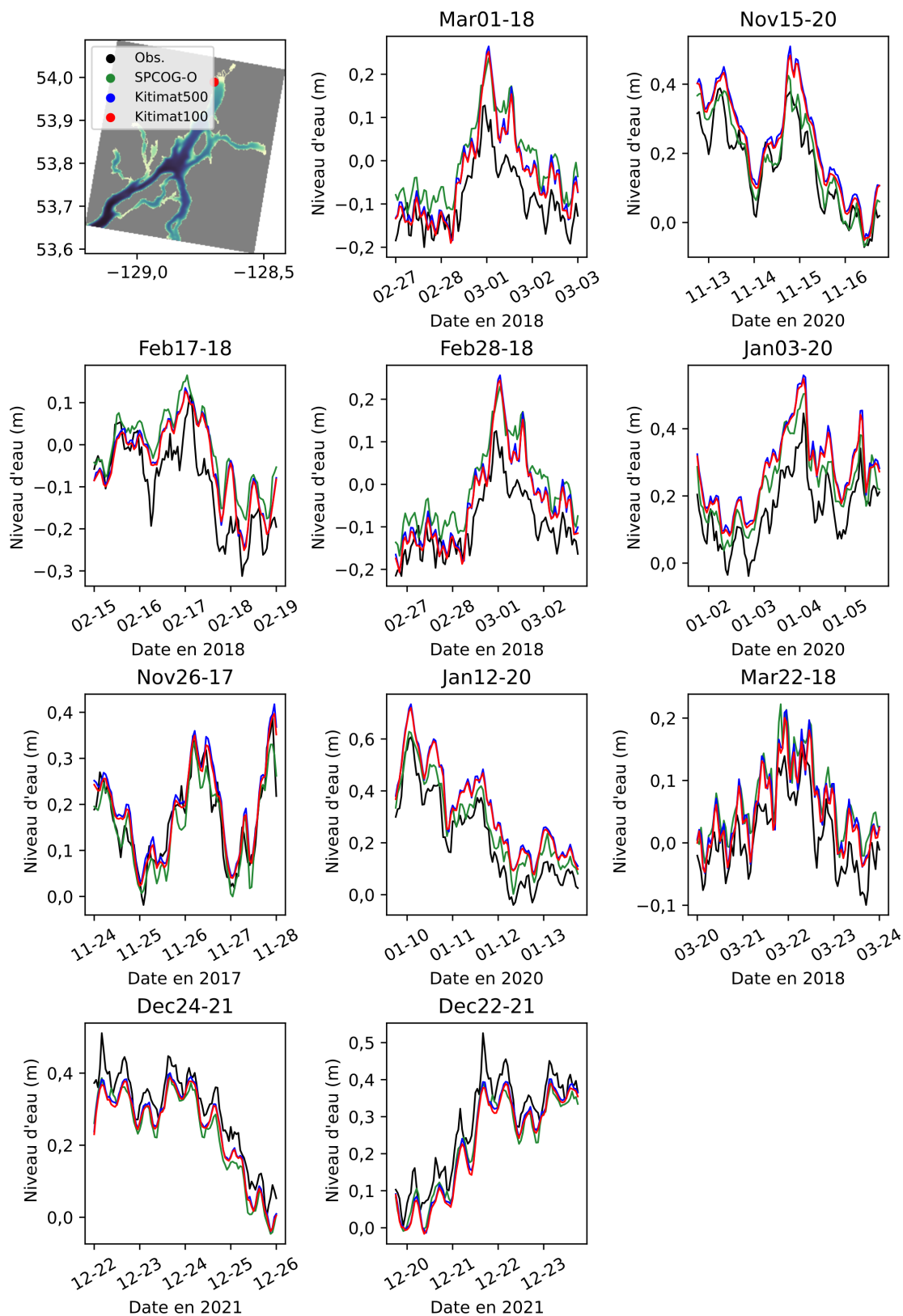


Figure 14. Changements du niveau d'eau à Kitimat au cours des dix tempêtes les plus violentes survenues pendant la période de simulation rétrospective.

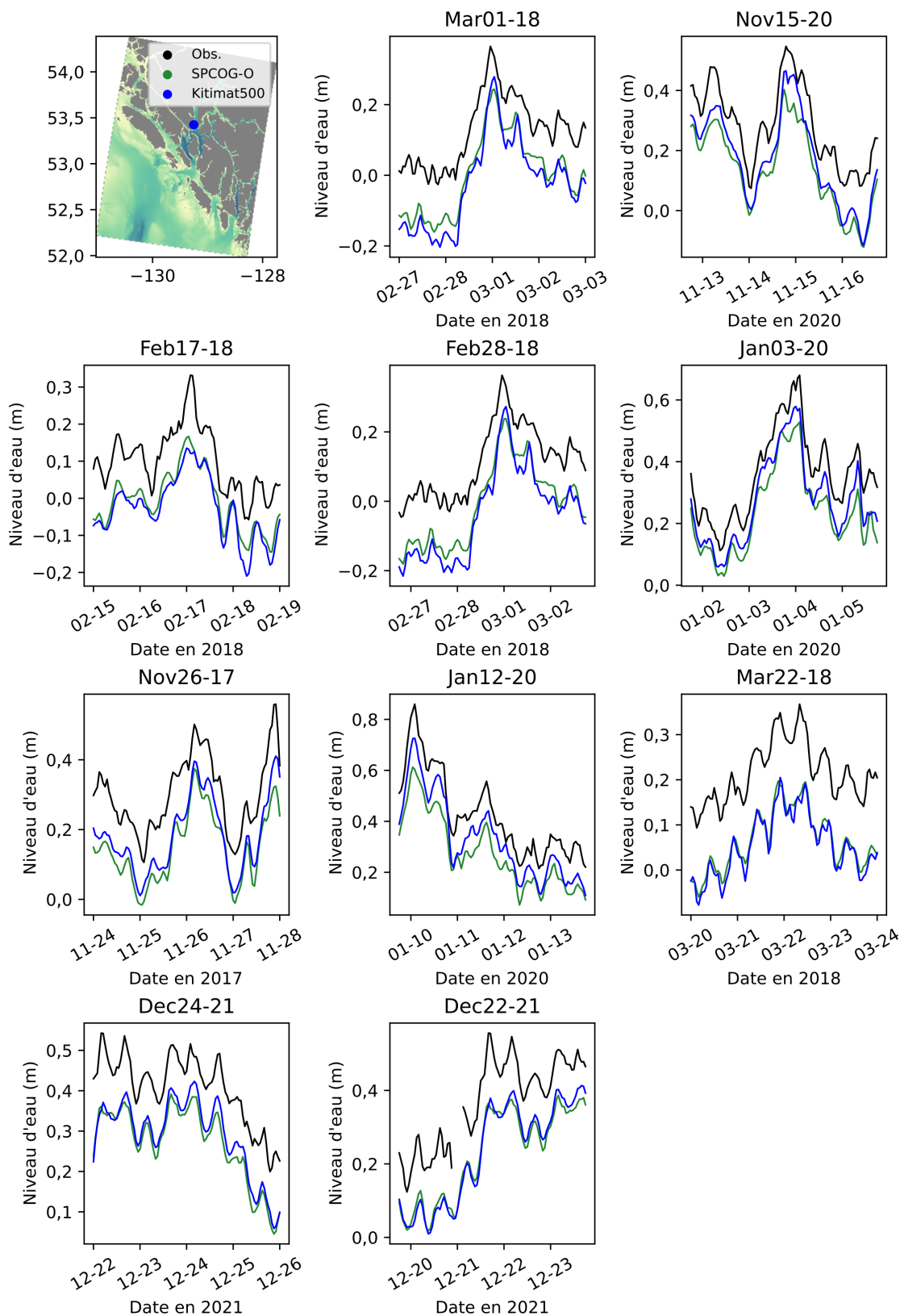


Figure 15. Changements du niveau d'eau à Hartley Bay au cours des dix tempêtes les plus violentes survenues pendant la période de simulation rétrospective.

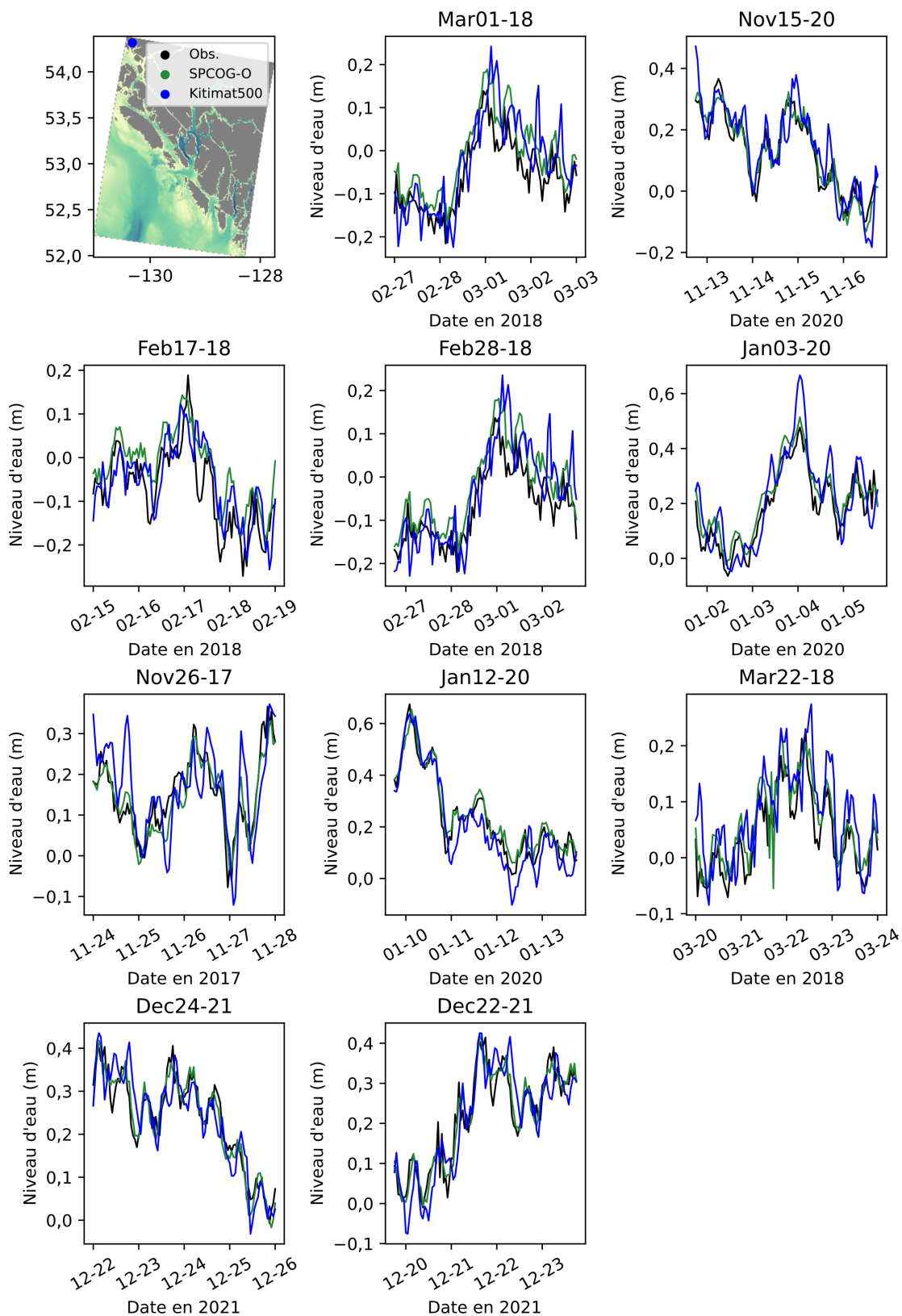


Figure 16. Changements du niveau d'eau à Prince Rupert au cours des dix tempêtes les plus violentes survenues pendant la période de simulation rétrospective.

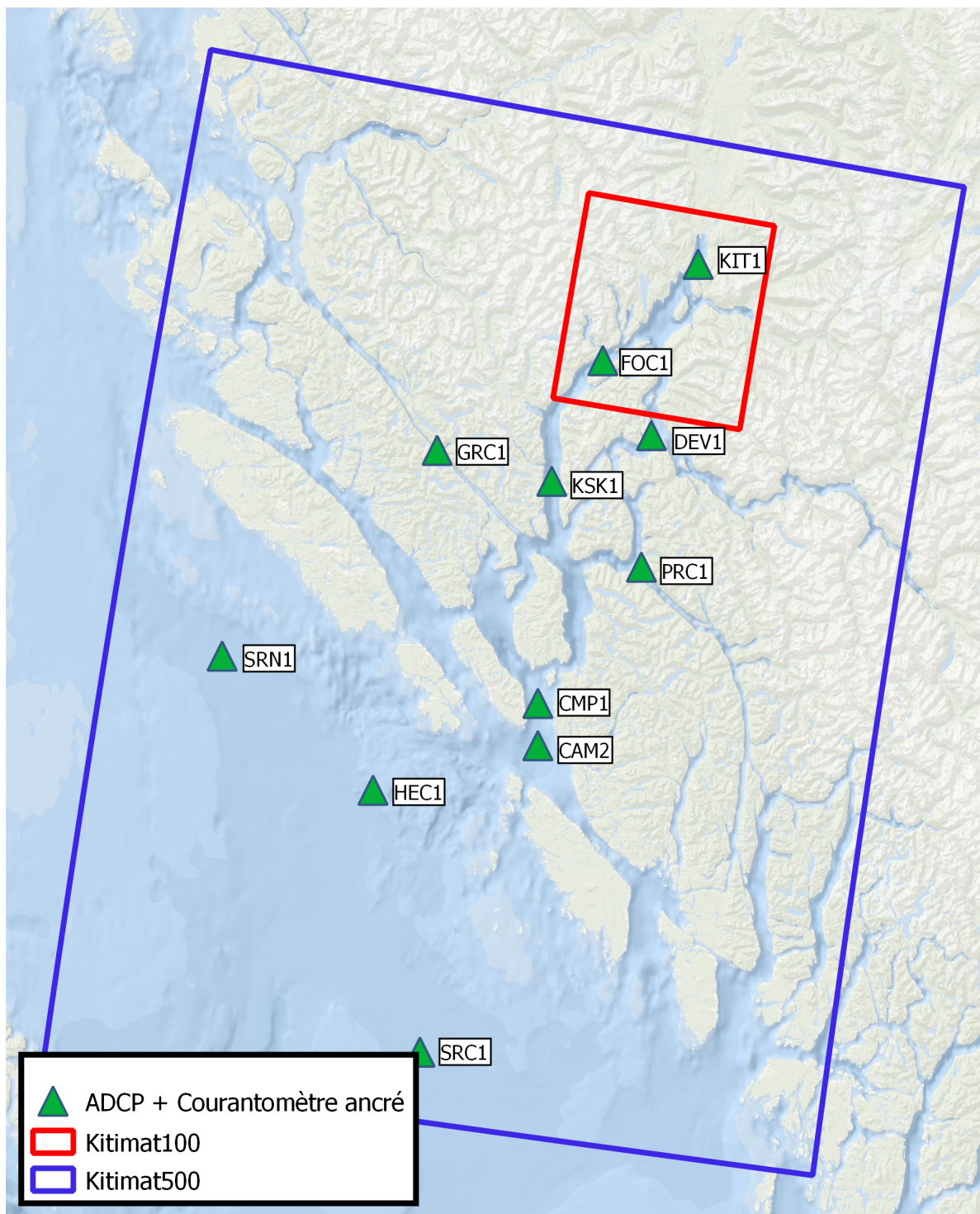


Figure 17. Carte montrant l'emplacement des courantomètres et des profilers de courant à effet Doppler (ADCP) ancrés dans les domaines du modèle portuaire de Kitimat pendant la période de simulation rétrospective.

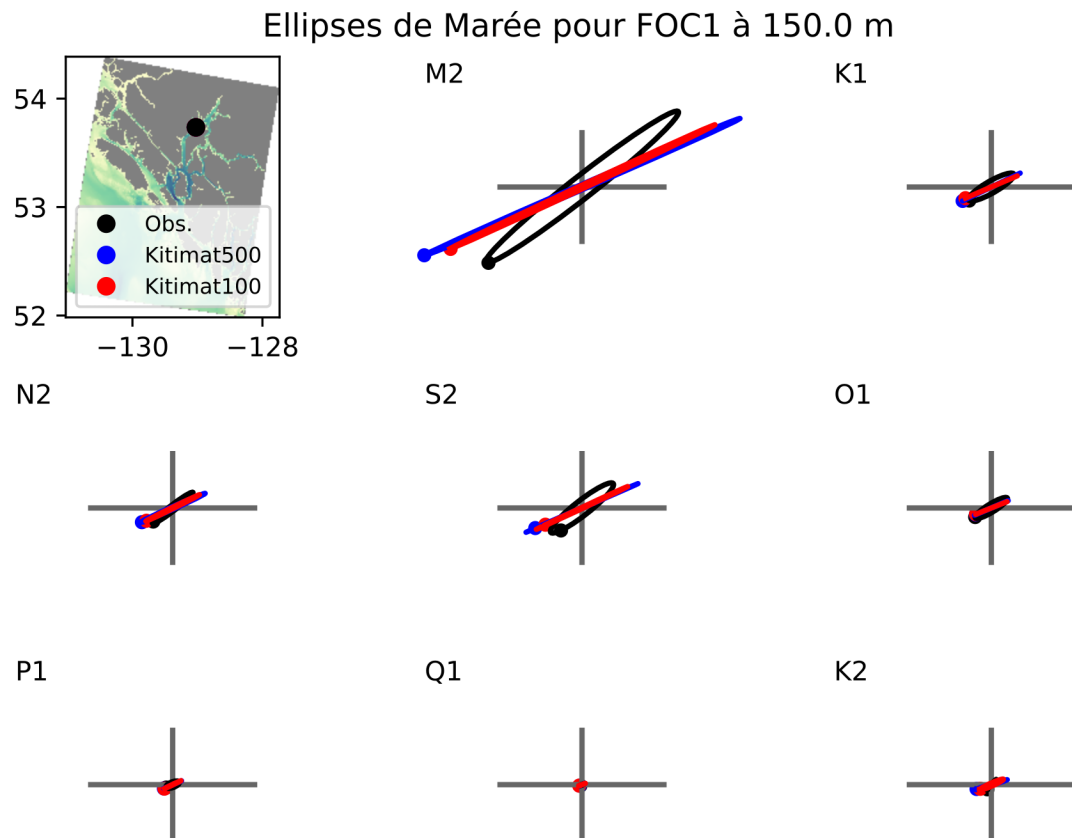


Figure 18. Station FOC1, cours supérieur du chenal Douglas : Comparaison des ellipses de marée entre les observations d'un courantomètre installé à 150 m de profondeur (noir), ainsi que les configurations à 100 m (rouge) et à 500 m (bleu) du modèle portuaire de Kitimat.

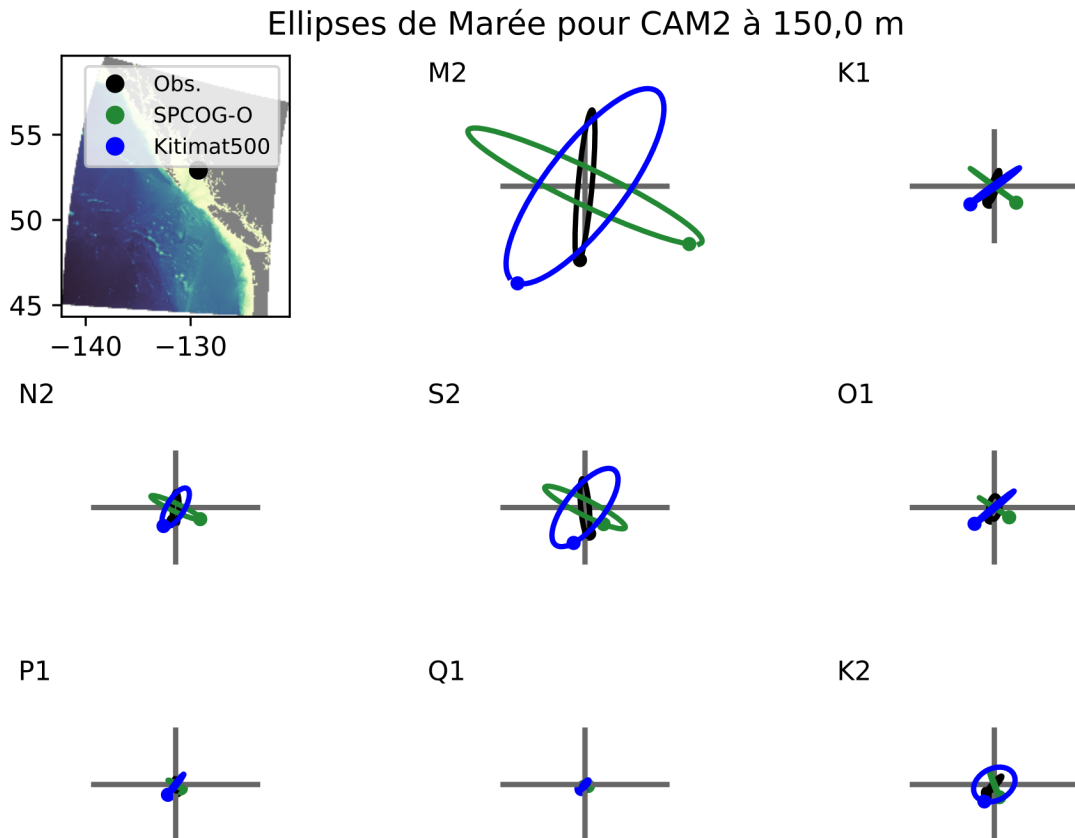


Figure 19. Station CAM2, entrée Caamaño : Comparaison des ellipses de marée entre les observations d'un courantomètre installé à 150 m de profondeur (noir), ainsi que les résultats du SPCOG-Ouest (vert) et de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu).

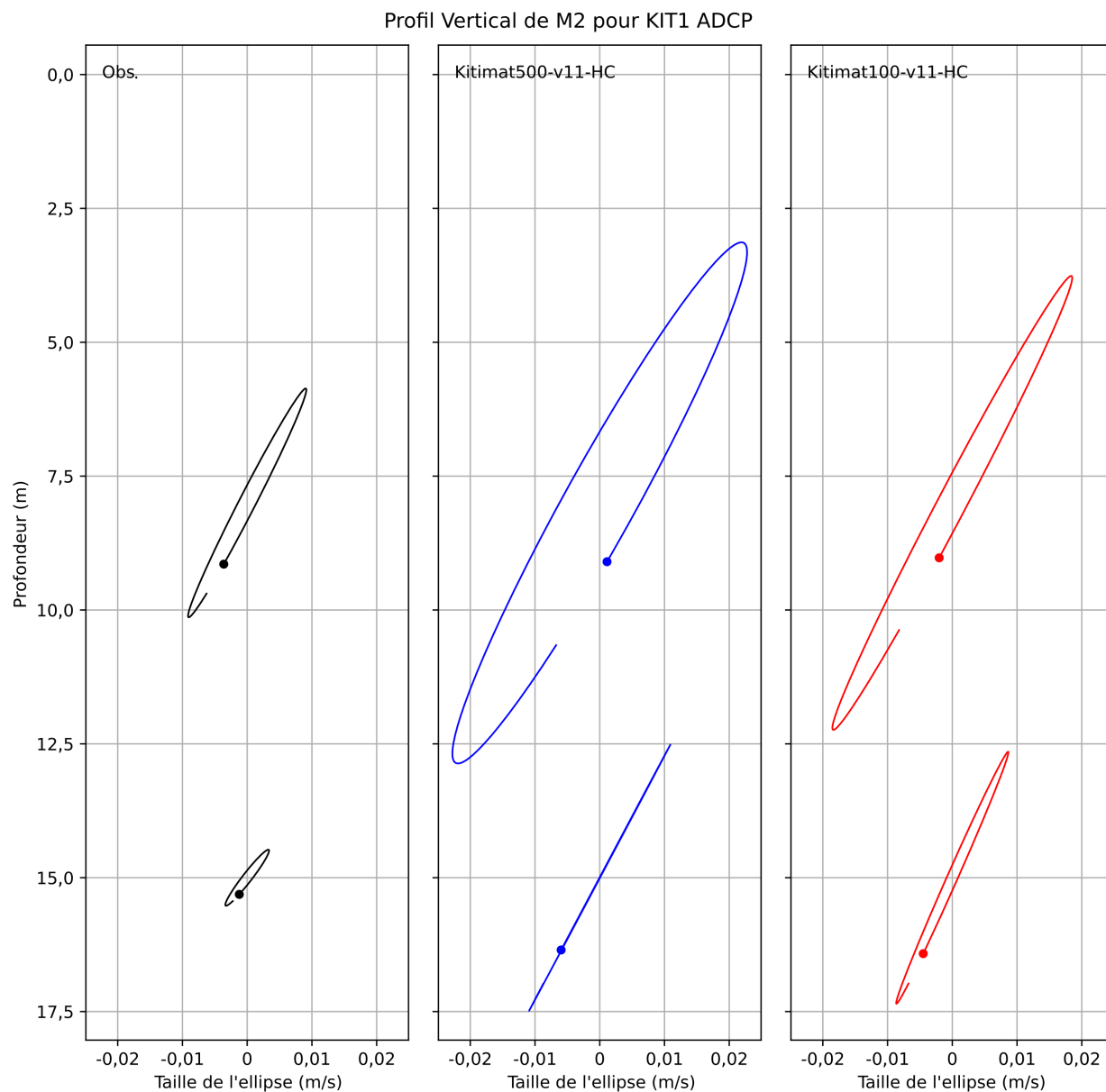


Figure 20. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 41 m de profondeur à la station KIT1 entre juillet 2020 et juillet 2021, et les résultats des domaines de 100 m et de 500 m du modèle portuaire au cours de cette période.

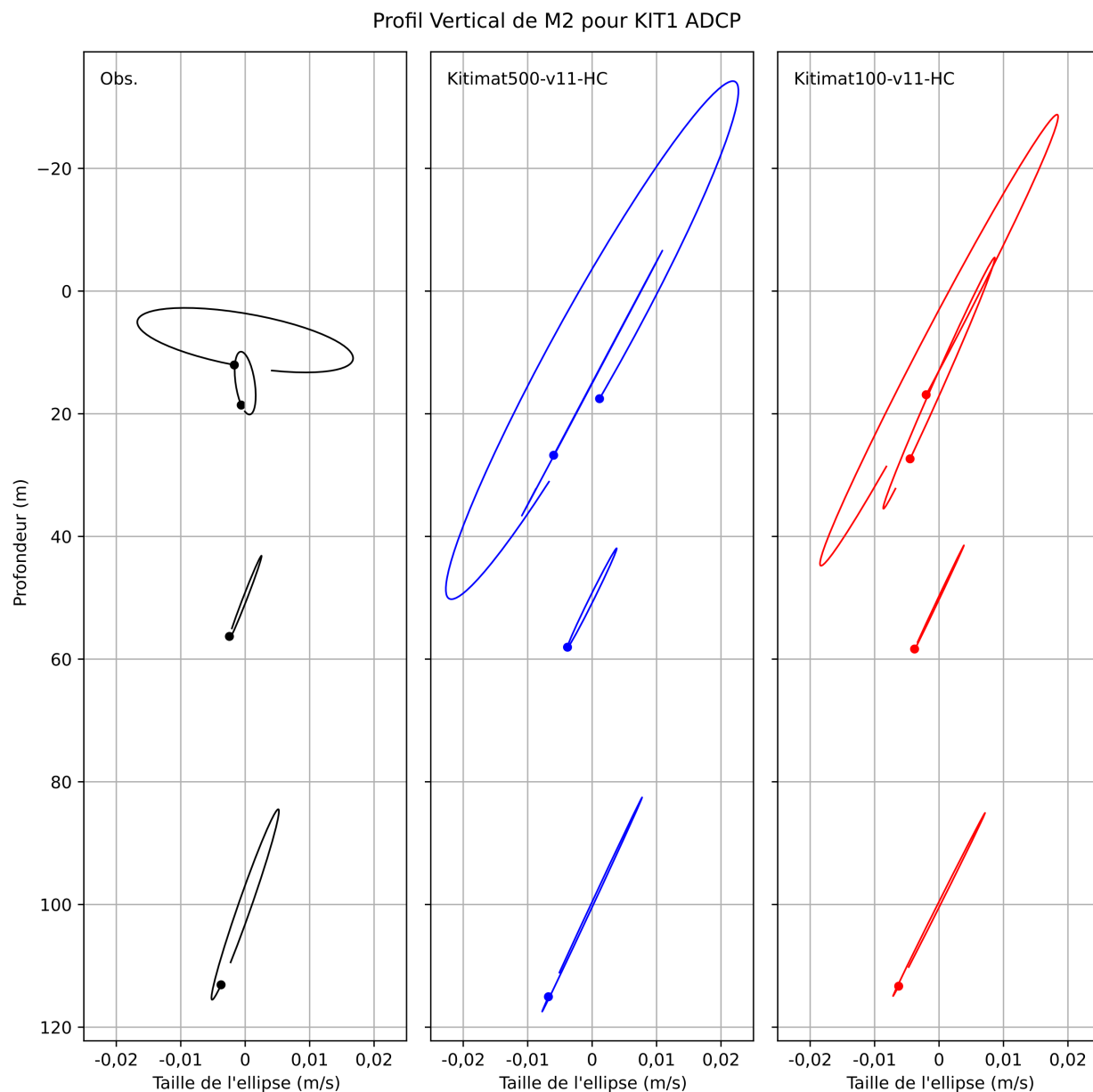


Figure 21. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 196 m de profondeur à la station KIT1 entre juillet 2020 et juillet 2021, et les résultats des domaines de 100 m et de 500 m du modèle portuaire au cours de cette période.

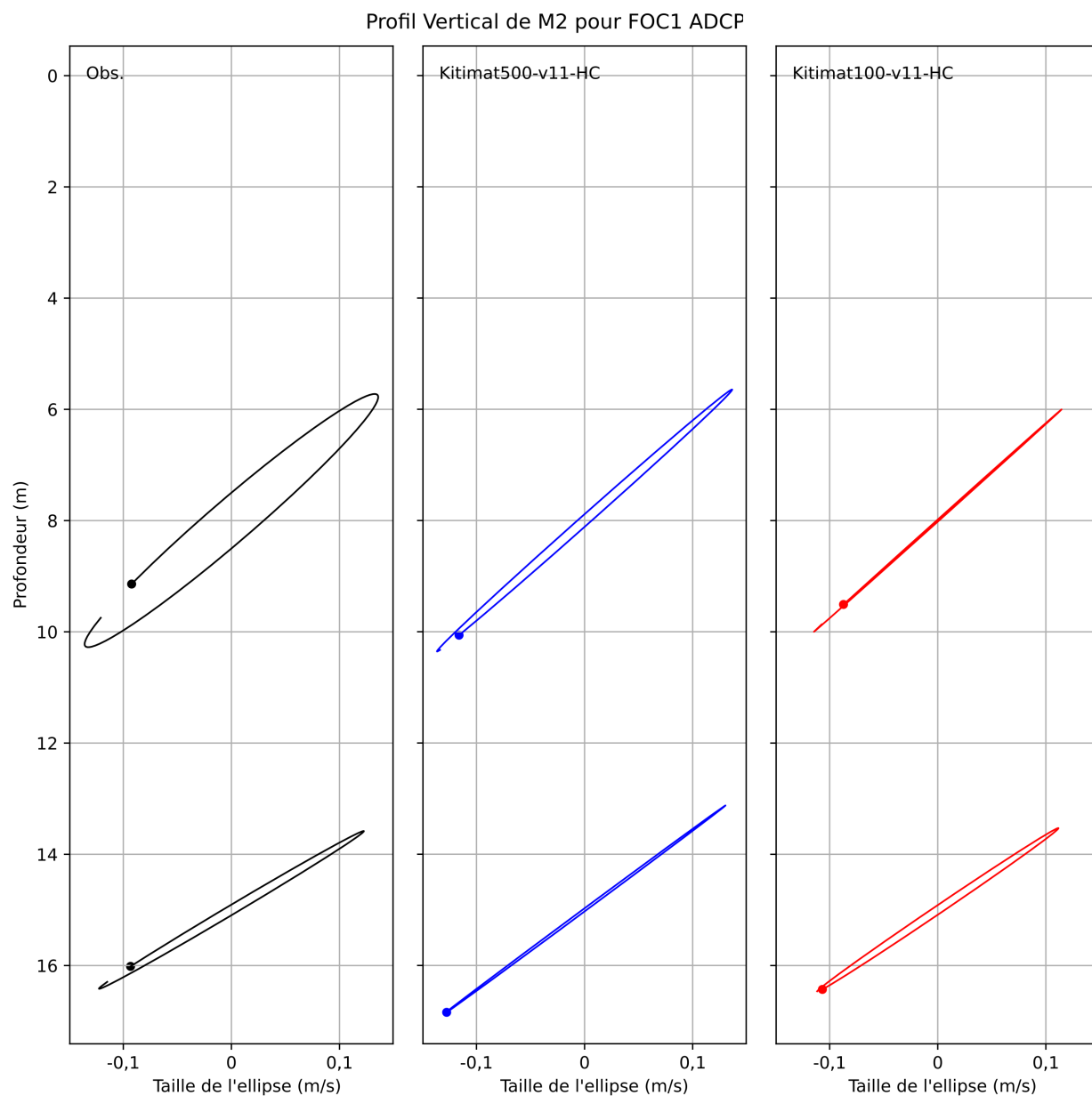


Figure 22. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 36 m de profondeur à la station FOC1 entre juillet 2020 et juillet 2021, et les résultats des domaines de 100 m et de 500 m du modèle portuaire au cours de cette période.

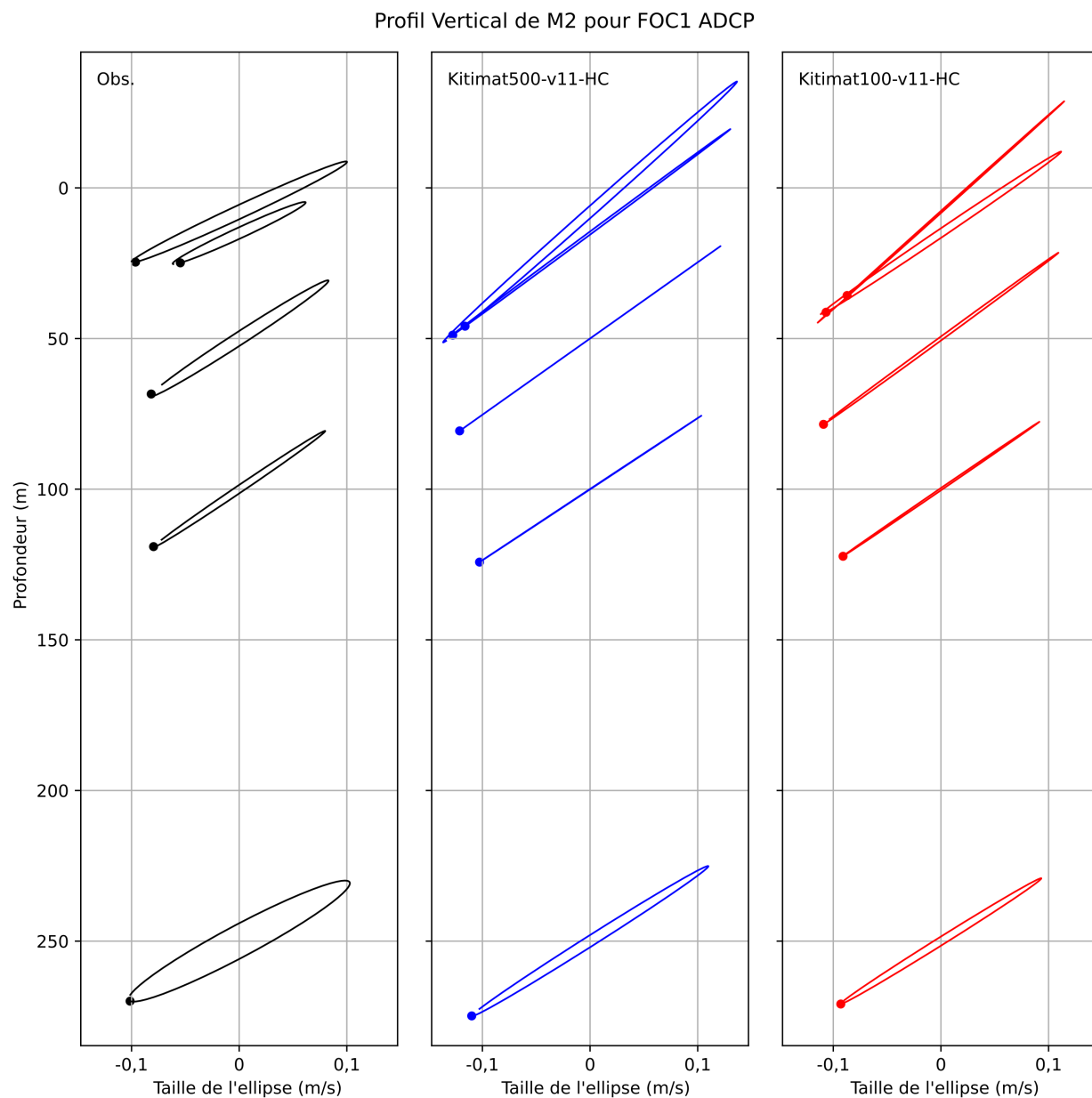


Figure 23. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 358 m de profondeur à la station FOC1 entre juillet 2020 et juillet 2021, et les résultats des domaines de 100 m et de 500 m du modèle portuaire au cours de cette période.

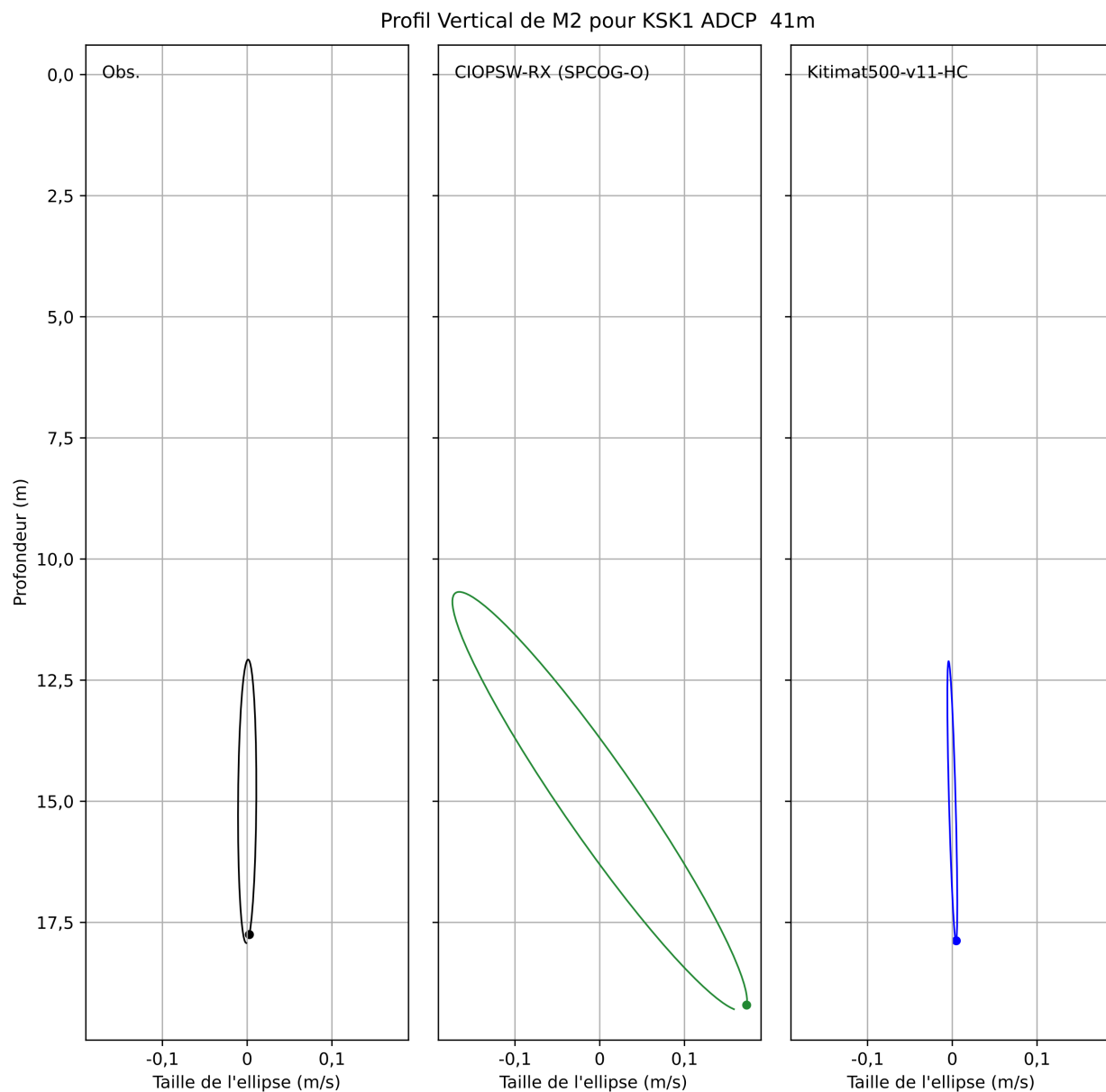


Figure 24. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 41 m de profondeur à la station KSK1 entre janvier et juillet 2016, et les résultats du domaine à 500 m du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest au cours de cette période.

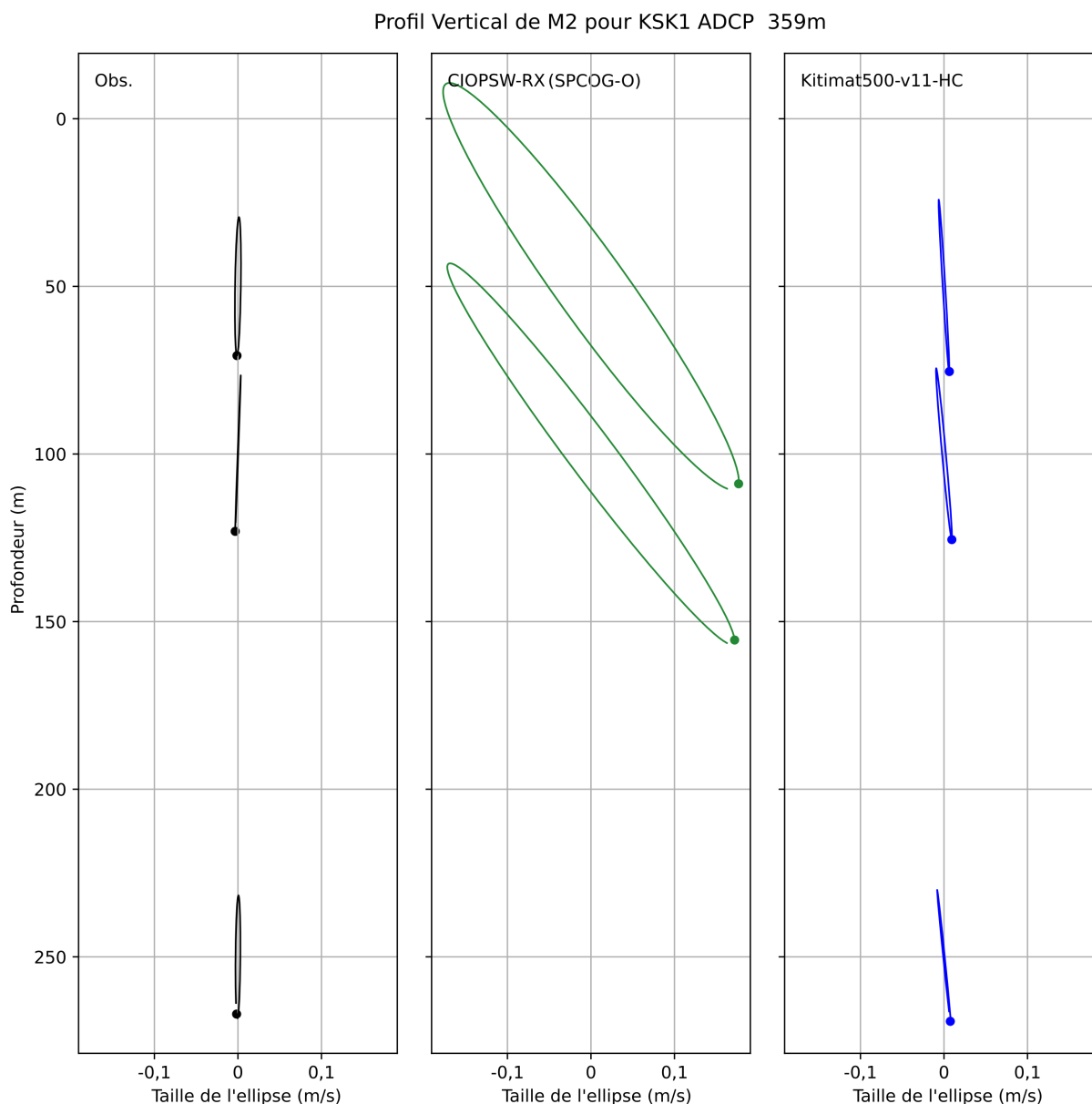


Figure 25. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 359 m de profondeur à la station KSK1 entre janvier et juillet 2016, et les résultats du domaine à 500 m du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest au cours de cette période.

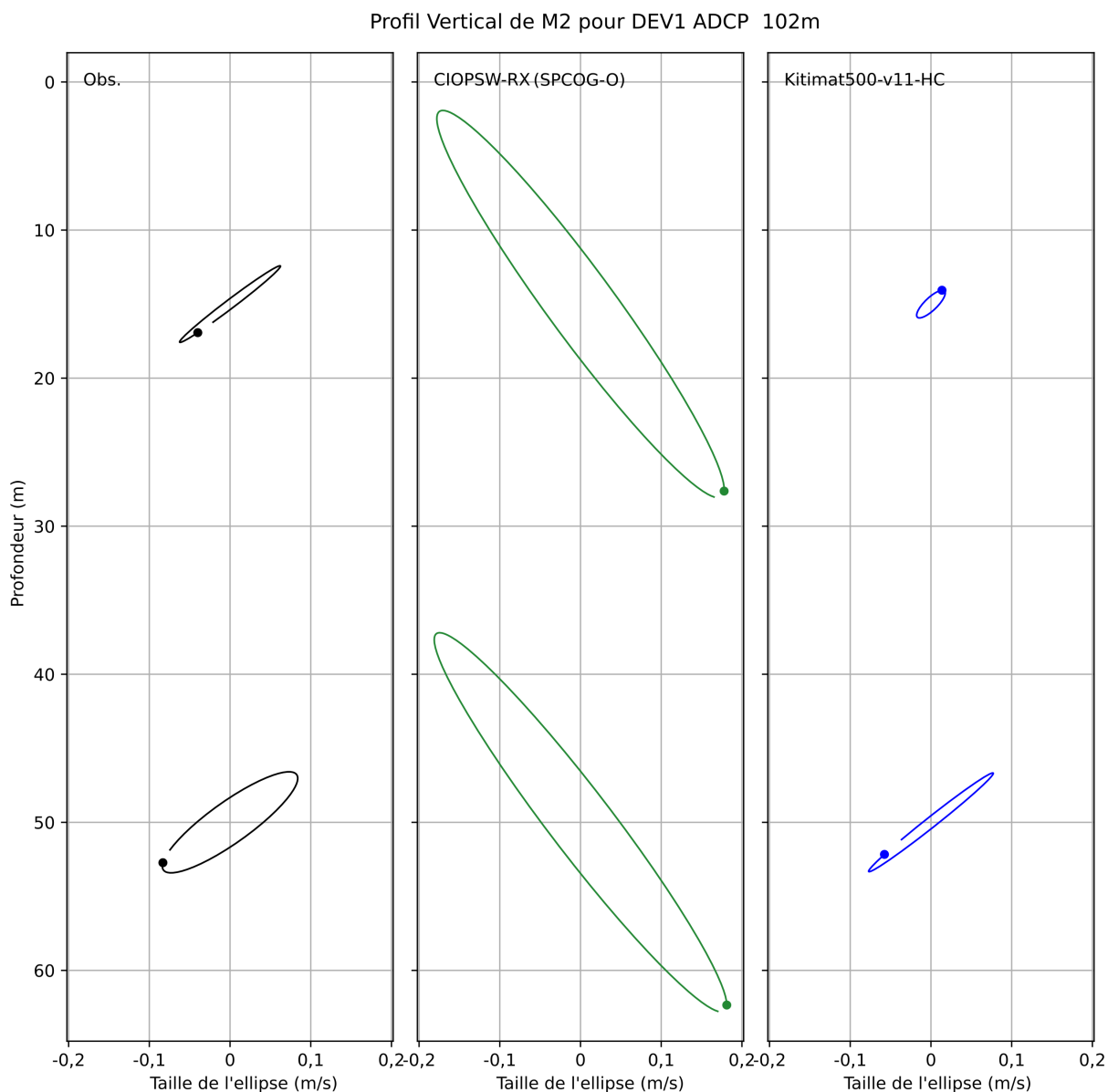


Figure 26. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 102 m de profondeur à la station DEV1 entre janvier et juillet 2016, et les résultats du domaine à 500 m du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest au cours de cette période.

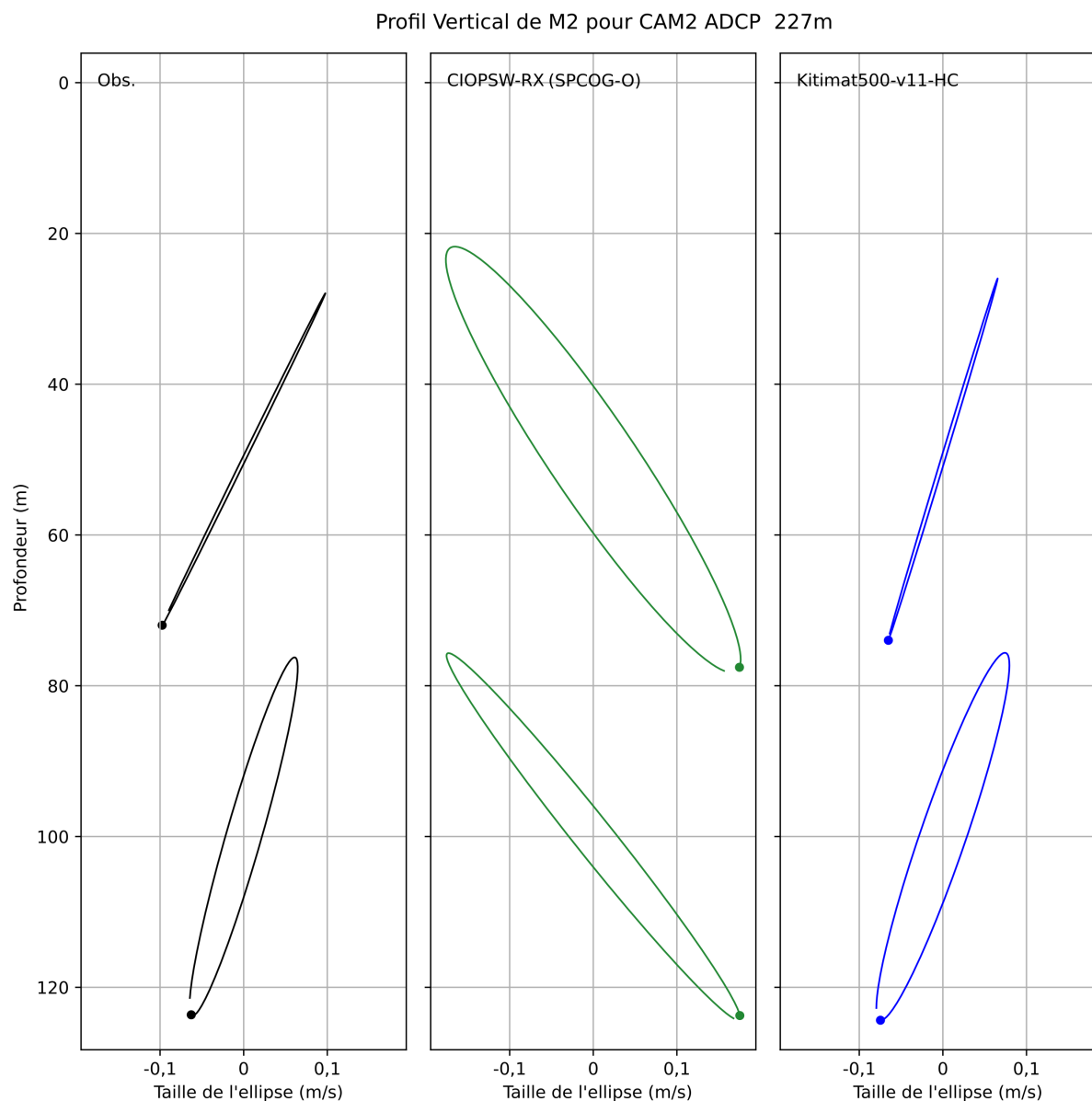


Figure 27. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 227 m de profondeur à la station CAM2 entre janvier et juillet 2016, et les résultats du domaine à 500 m du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest au cours de cette période.

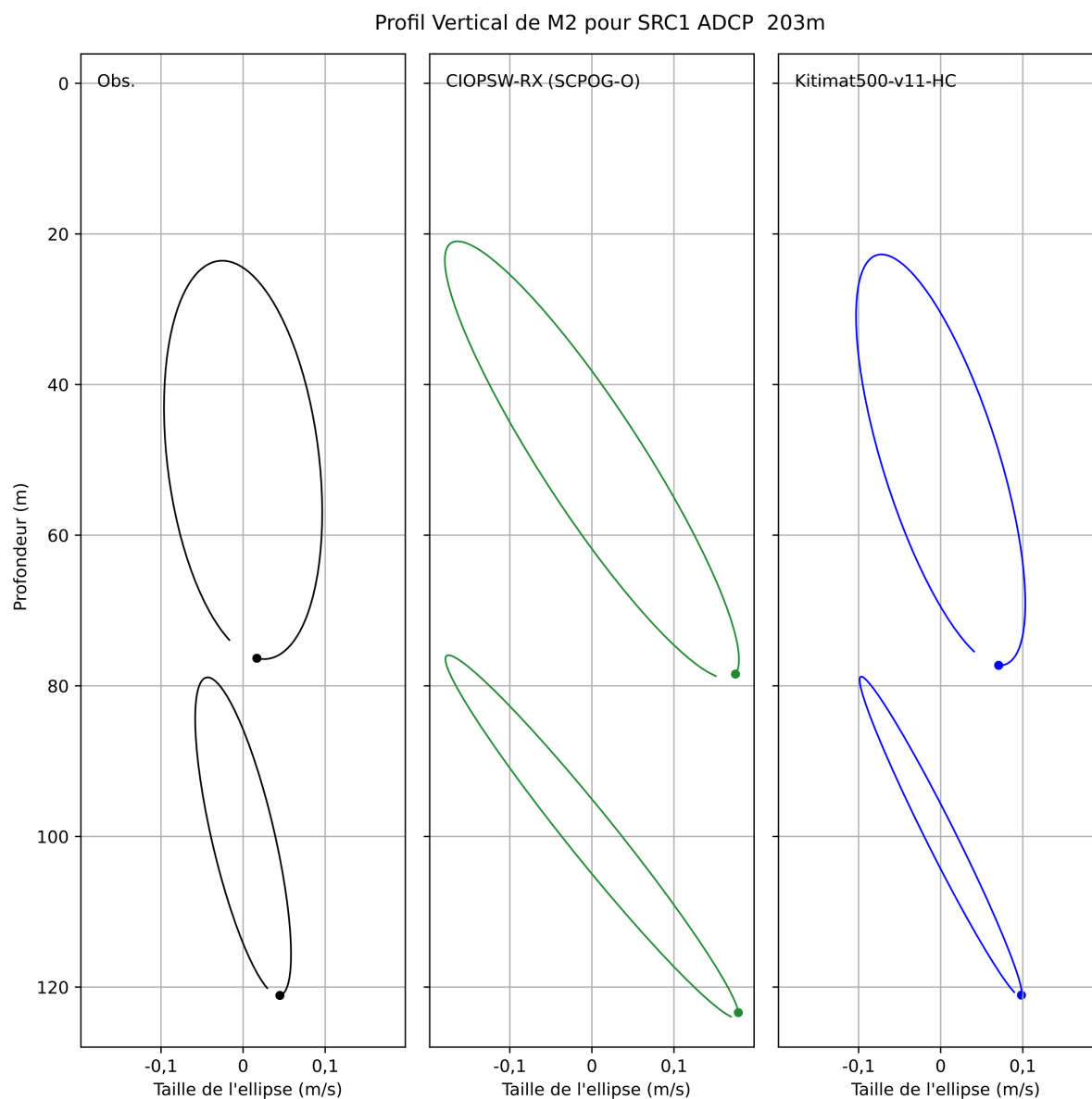


Figure 28. Comparaison des ellipses de la composante de marée M2 d'après les données d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 203 m de profondeur à la station SRC1 entre juillet 2016 et juillet 2017, et les résultats du domaine à 500 m du modèle portuaire et du SPCOG-Ouest au cours de cette période.

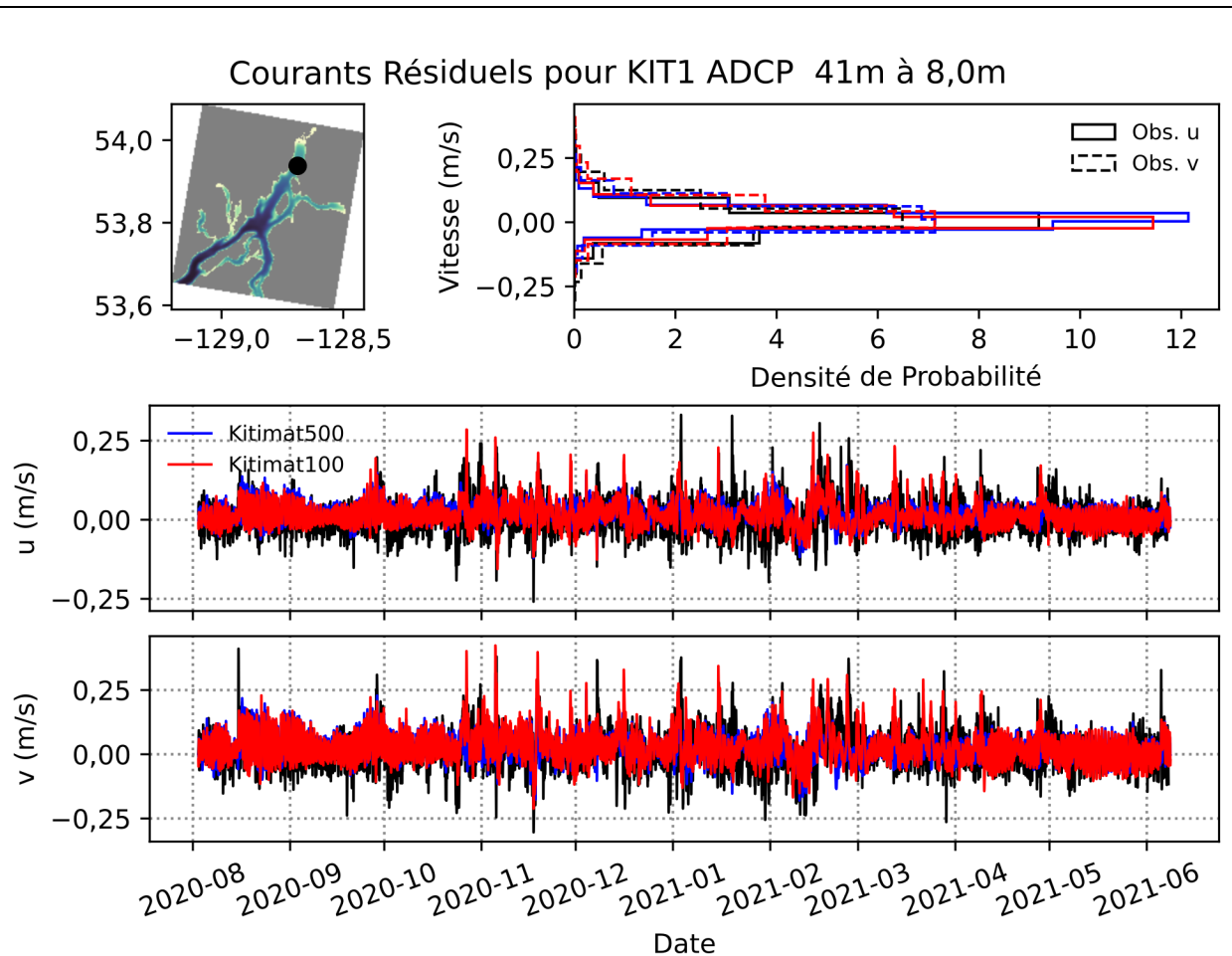


Figure 29. Comparaison des courants à 8 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (41 m de profondeur) à la station KIT1 (bras Kitimat) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.

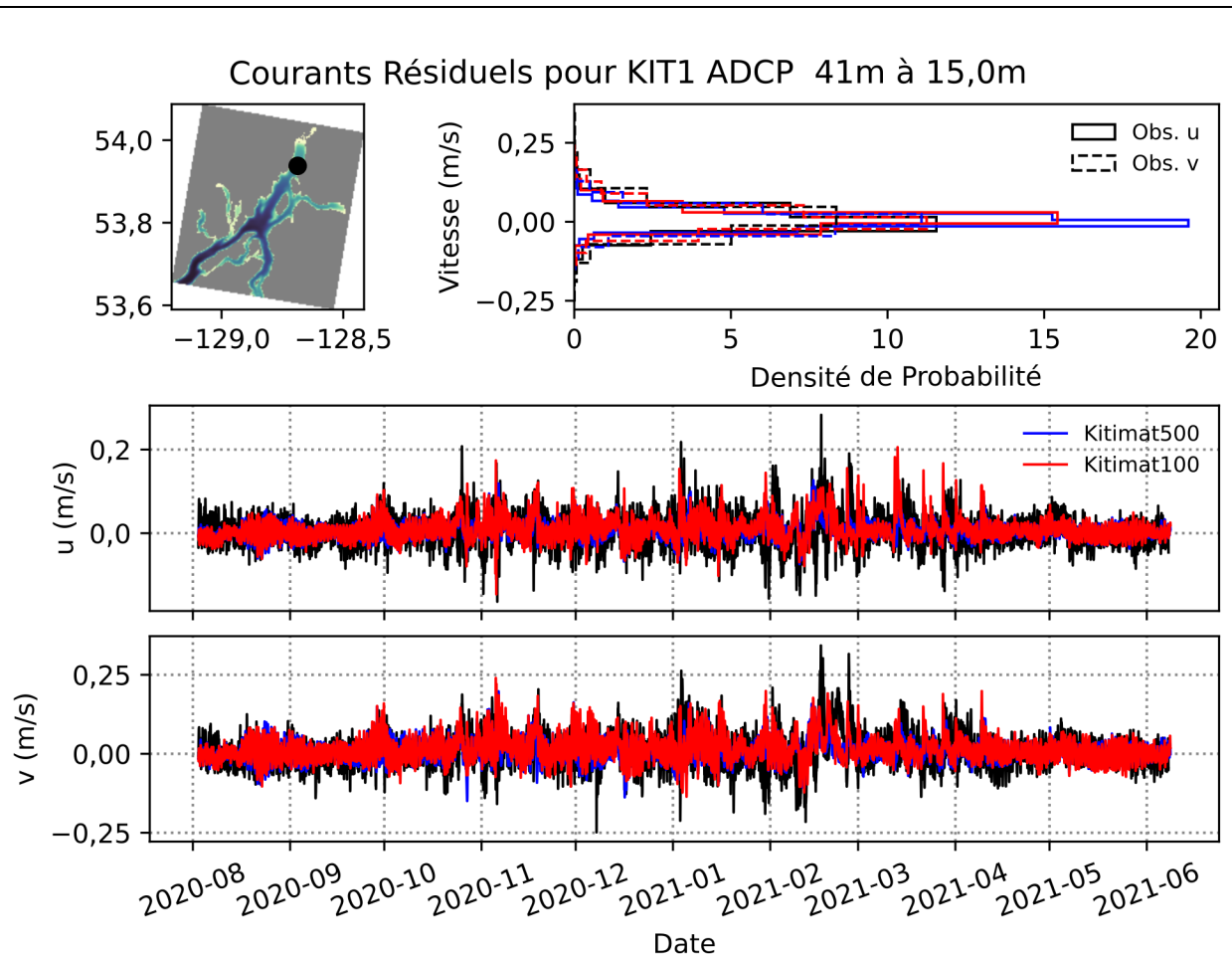


Figure 30. Comparaison des courants à 15 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (41 m de profondeur) à la station KIT1 (bras Kitimat) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.

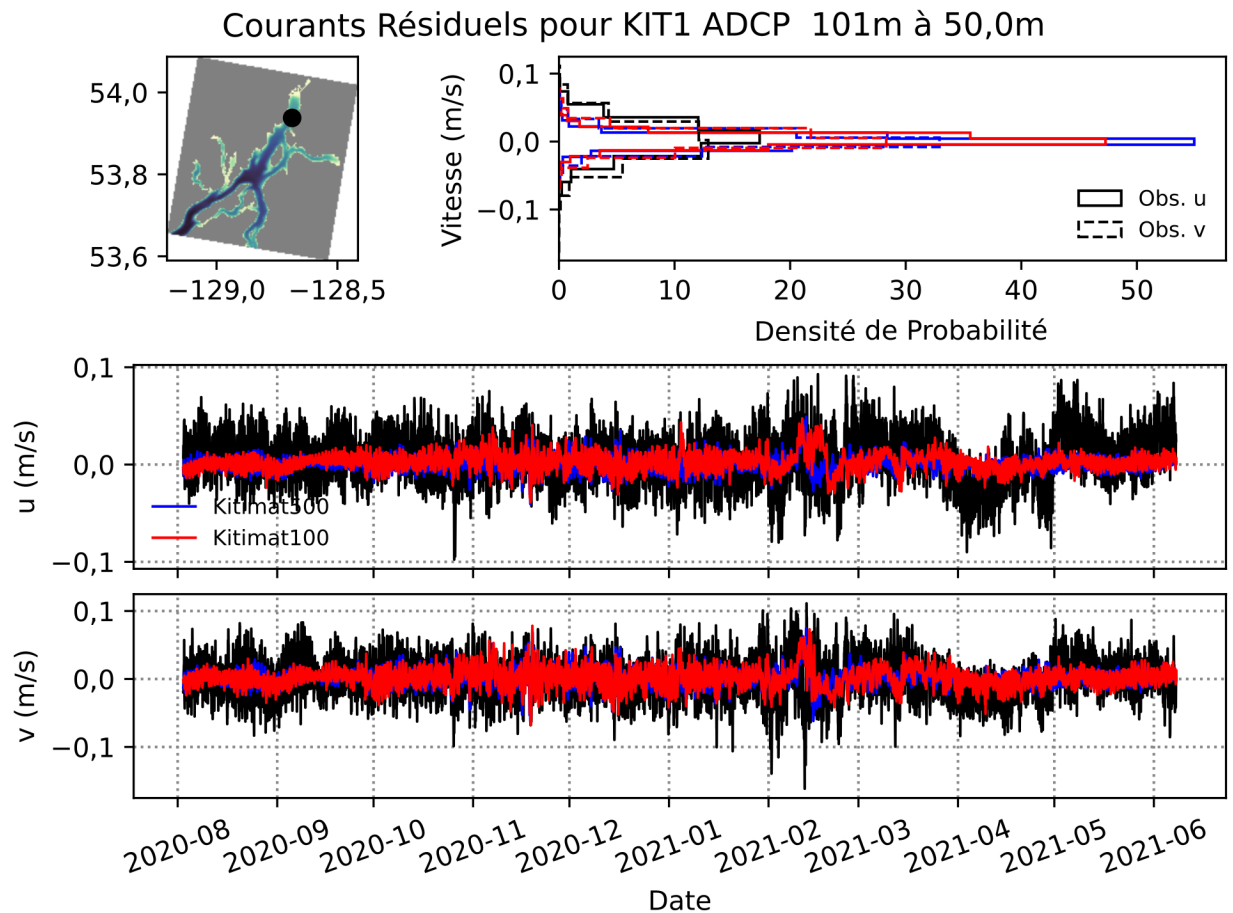


Figure 31. Comparaison des courants à 50 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (101 m de profondeur) à la station KIT1 (bras Kitimat) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.

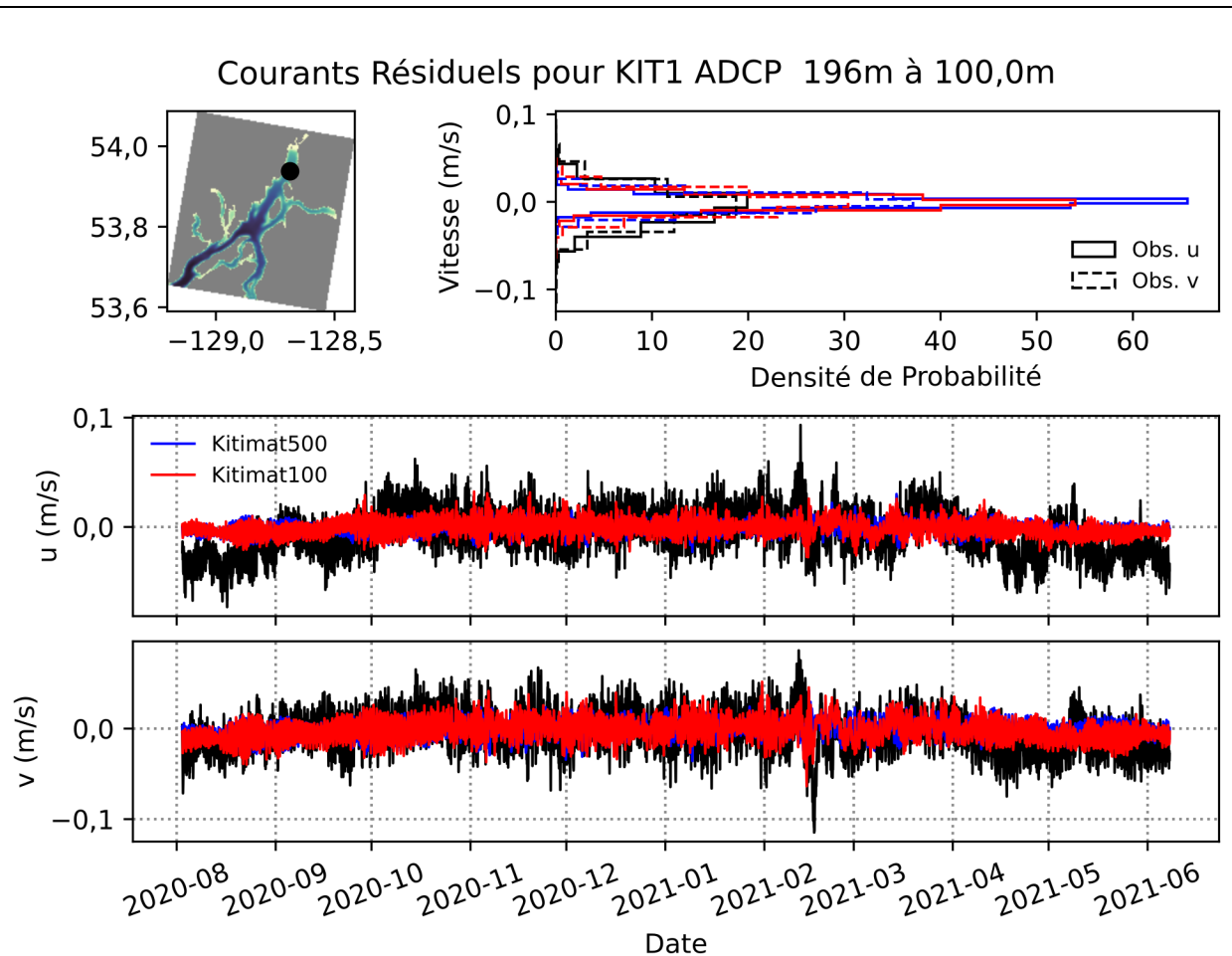


Figure 32. Comparaison des courants à 100 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (196 m de profondeur) à la station KIT1 (bras Kitimat) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.

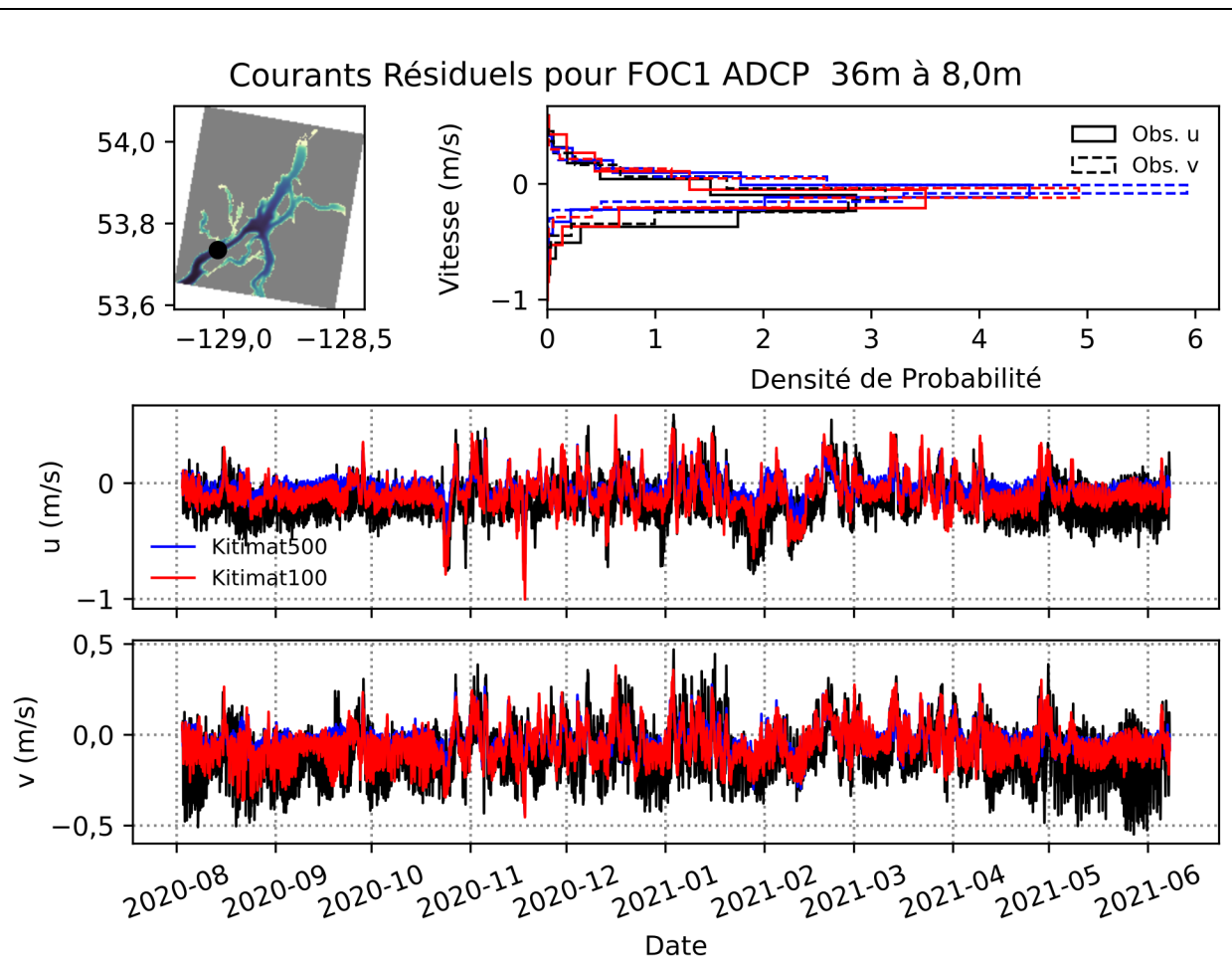


Figure 33. Comparaison des courants à 8 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (36 m de profondeur) à la station FOC1 (cours supérieur du chenal Douglas) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.

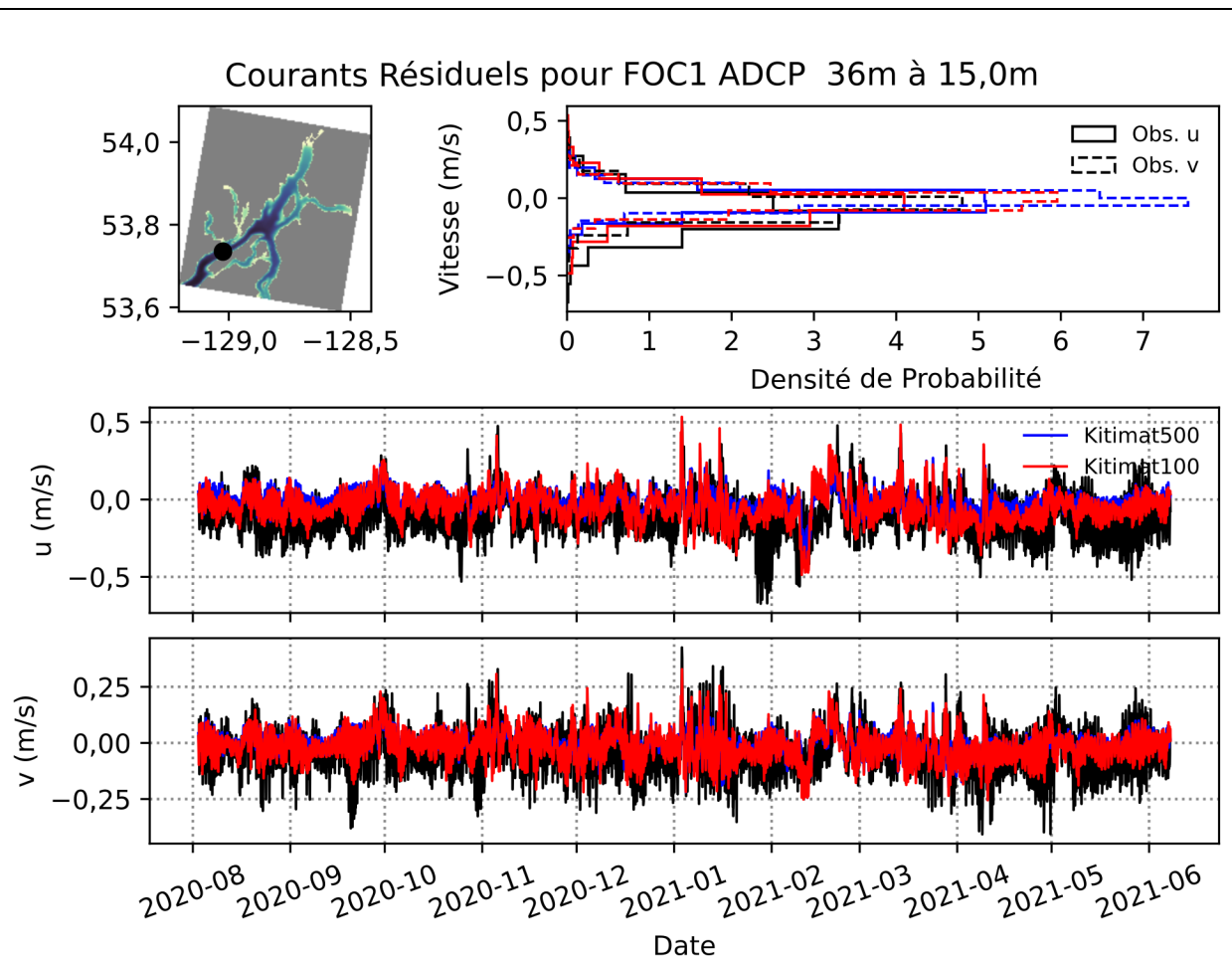


Figure 34. Comparaison des courants à 15 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (36 m de profondeur) à la station FOC1 (cours supérieur du chenal Douglas) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.

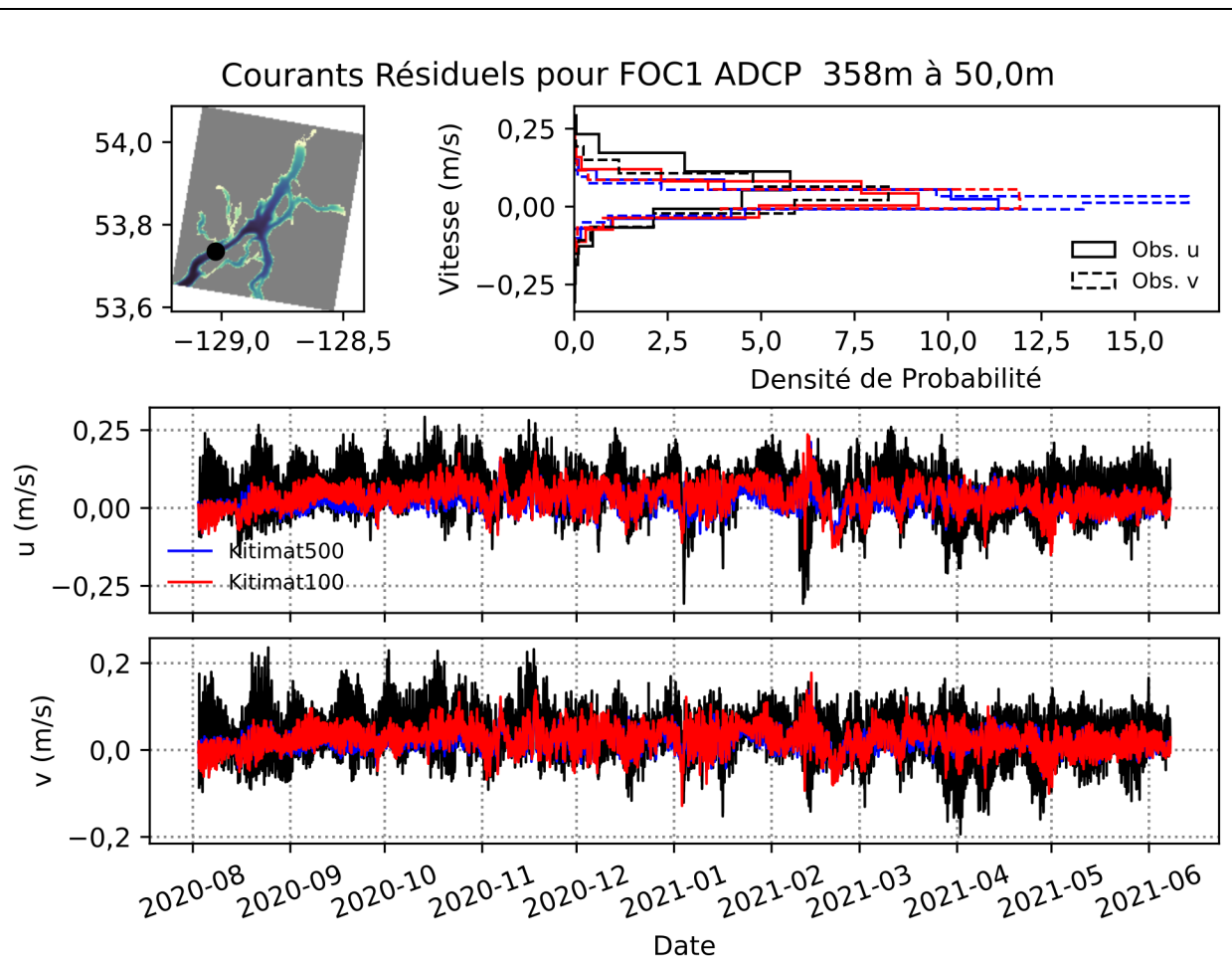


Figure 35. Comparaison des courants à 50 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (358 m de profondeur) à la station FOC1 (cours supérieur du chenal Douglas) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.

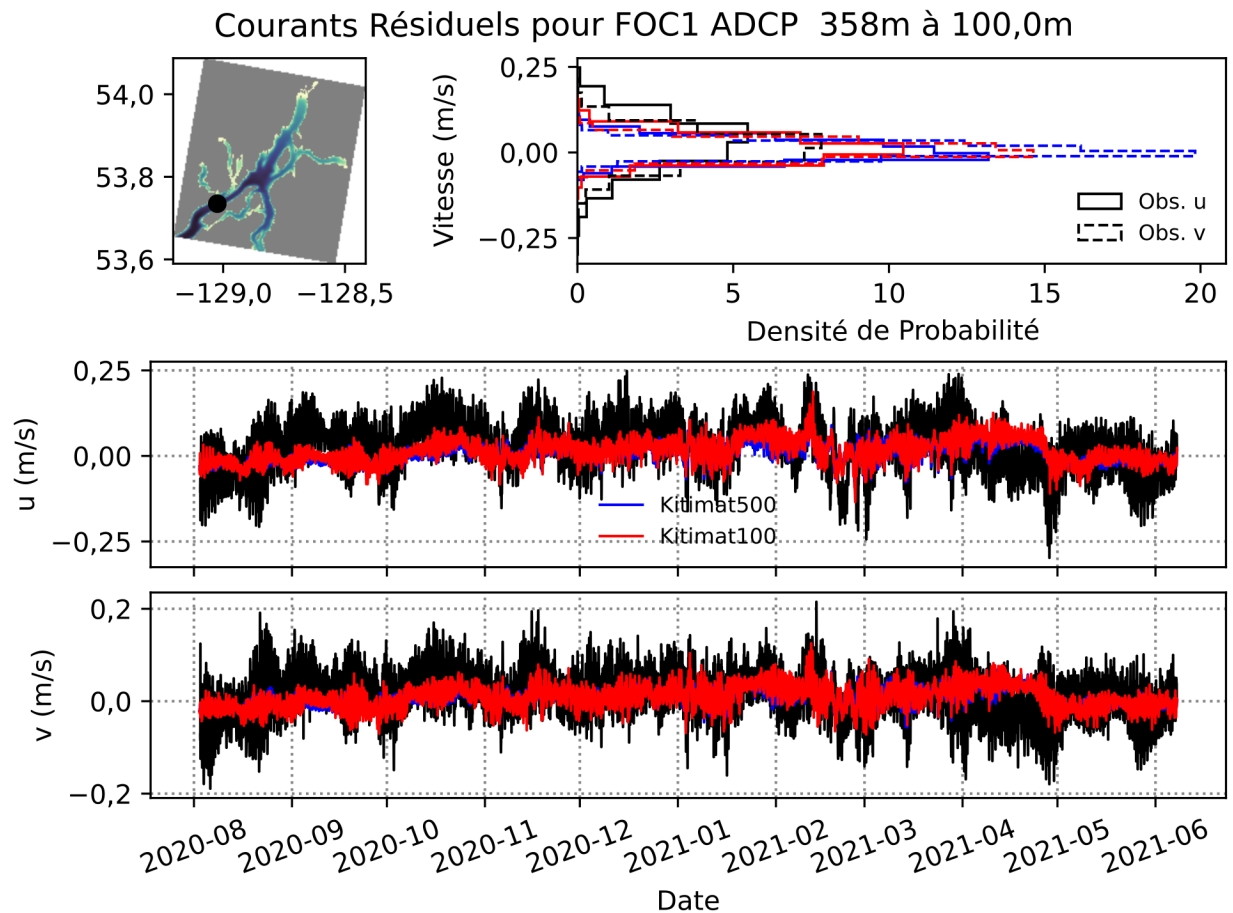


Figure 36. Comparaison des courants à 100 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (358 m de profondeur) à la station FOC1 (cours supérieur du chenal Douglas) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.

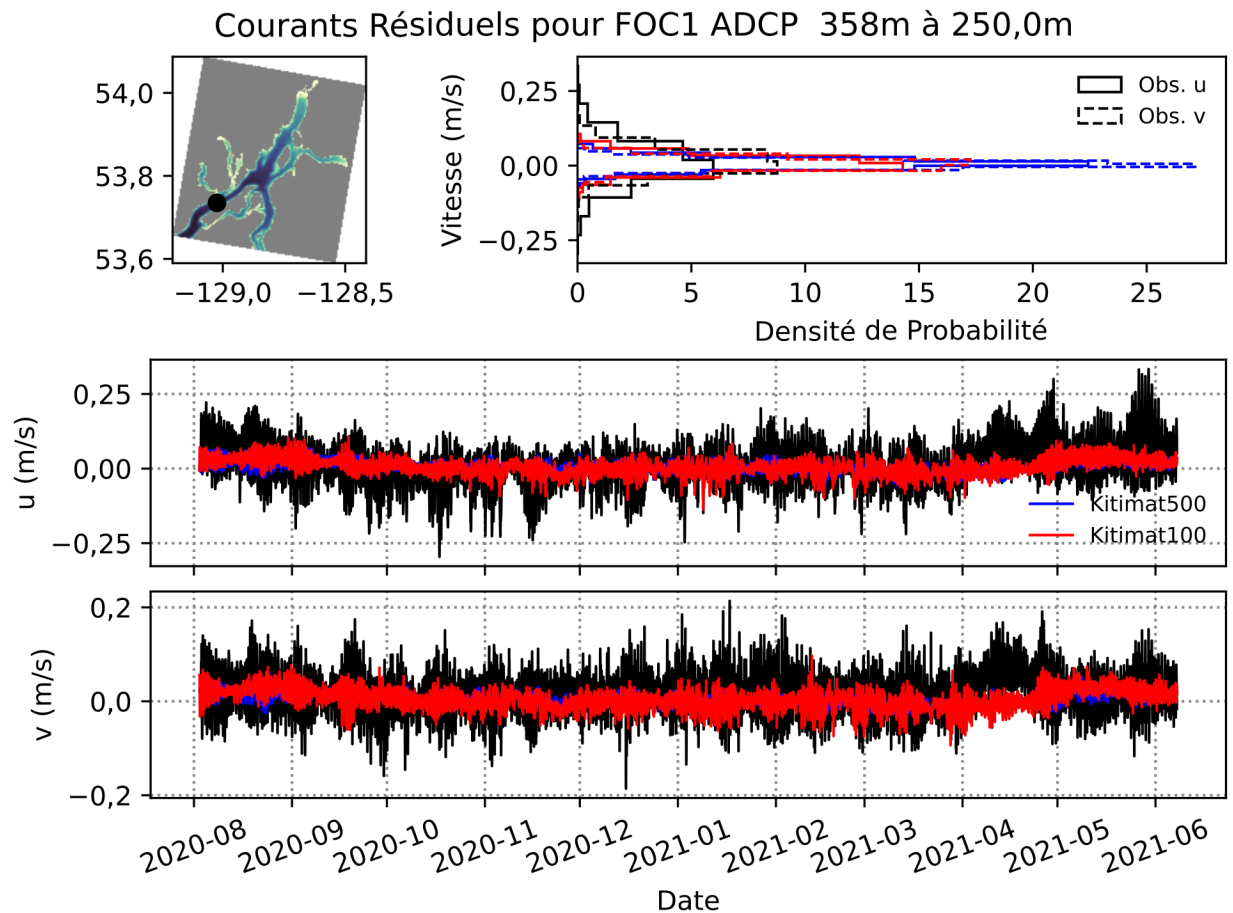


Figure 37. Comparaison des courants à 250 m sous la surface entre les observations provenant de profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) (358 m de profondeur) à la station FOC1 (cours supérieur du chenal Douglas) et les résultats des configurations du modèle portuaire de Kitimat.

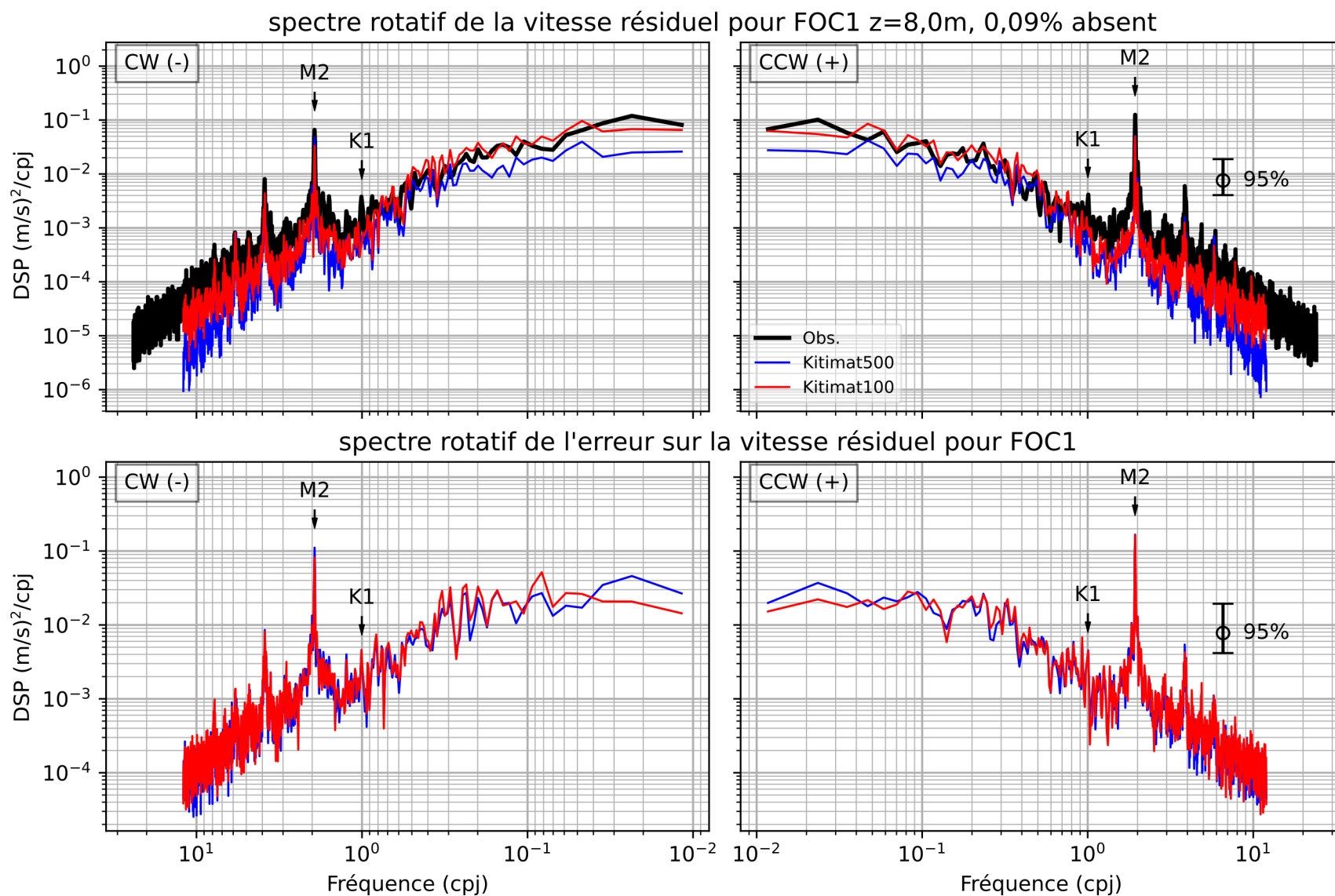


Figure 38. Spectre de puissance rotatif des courants résiduels à 8 m de profondeur à la station FOC1, mesuré par un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) ancré à 36 m de profondeur.

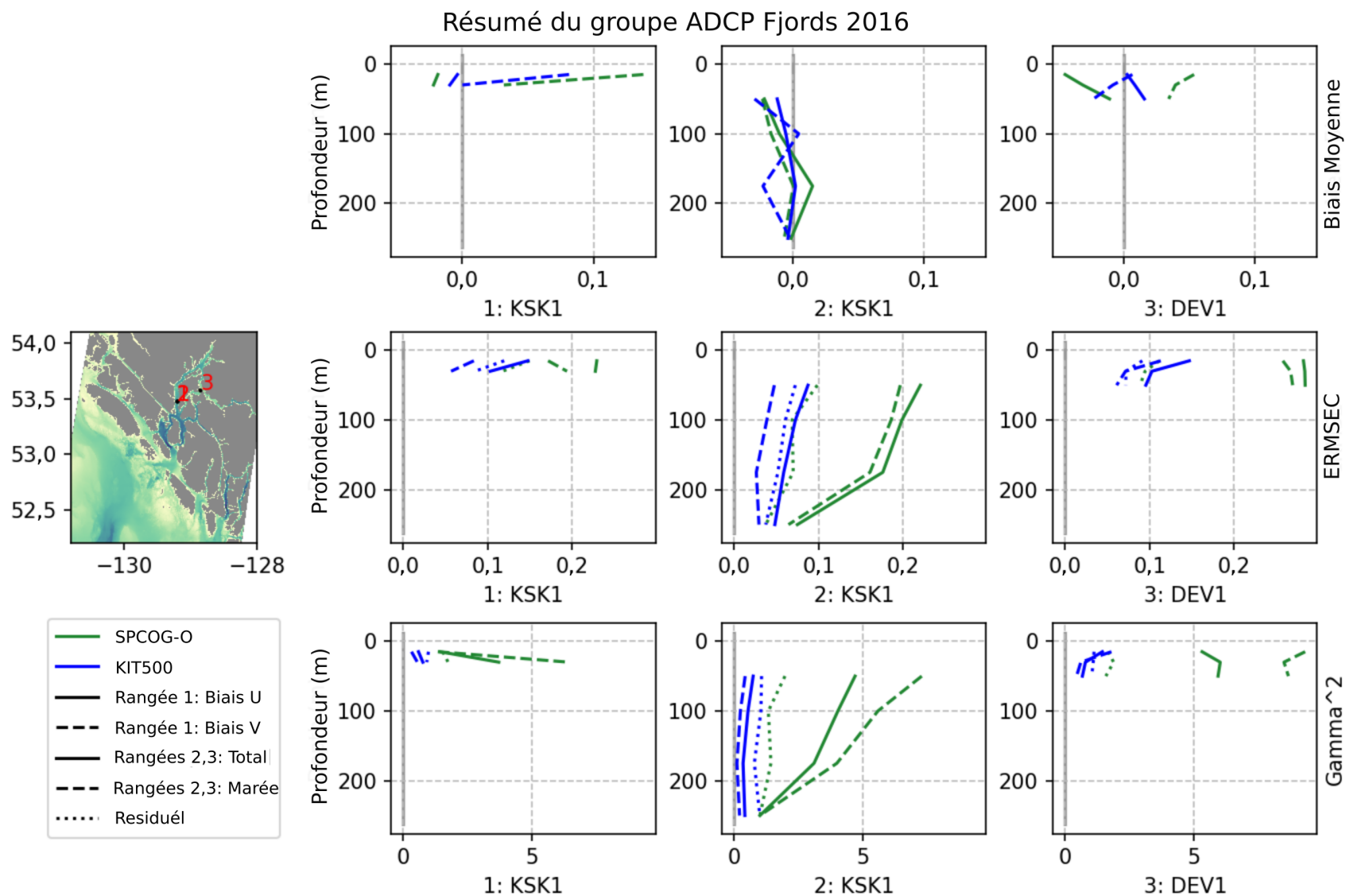


Figure 39. Résumé de l'évaluation des courants modélisés par rapport aux données du profileur de courant à effet Doppler (ADCP) recueillies dans le système de fjords de Kitimat, mais hors du domaine à 100 m du modèle portuaire, en 2016.

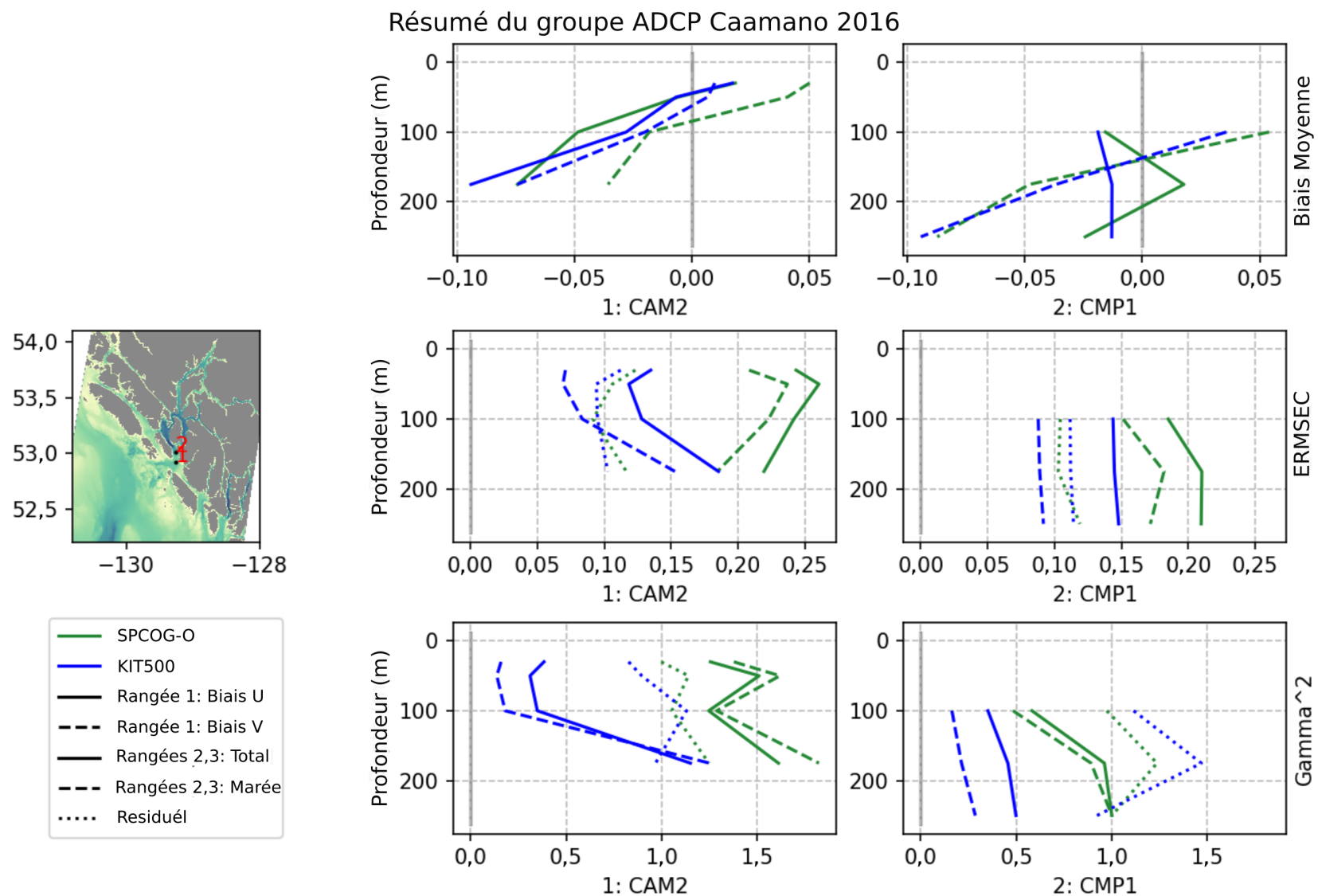


Figure 40. Résumé de l'évaluation des courants modélisés par rapport aux données du profileur de courant à effet Doppler (ADCP) recueillies dans l'entrée Caamaño en 2016.

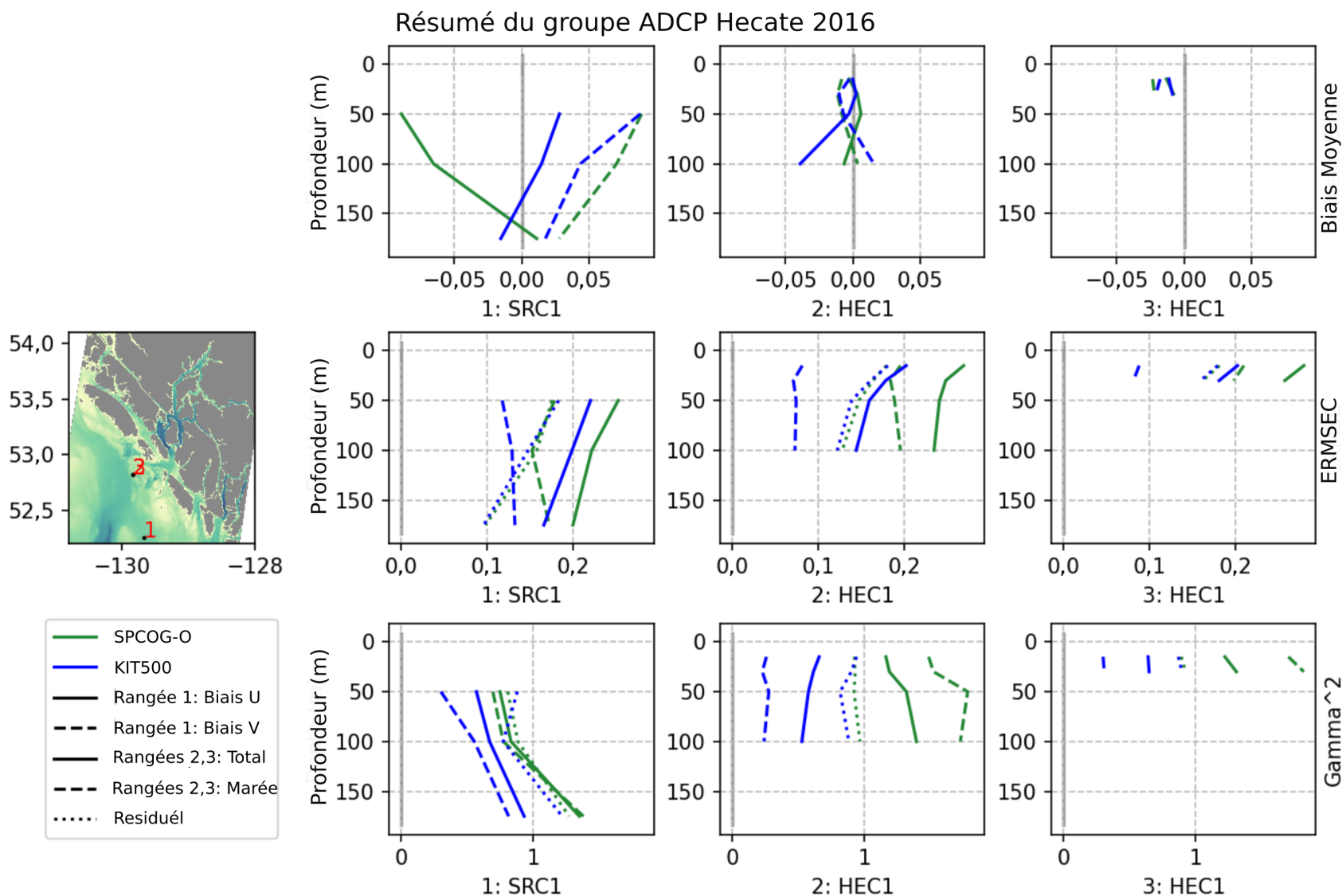


Figure 41. Résumé de l'évaluation des courants modélisés par rapport aux données du profileur de courant à effet Doppler (ADCP) recueillies dans le détroit d'Hécaté en 2016.

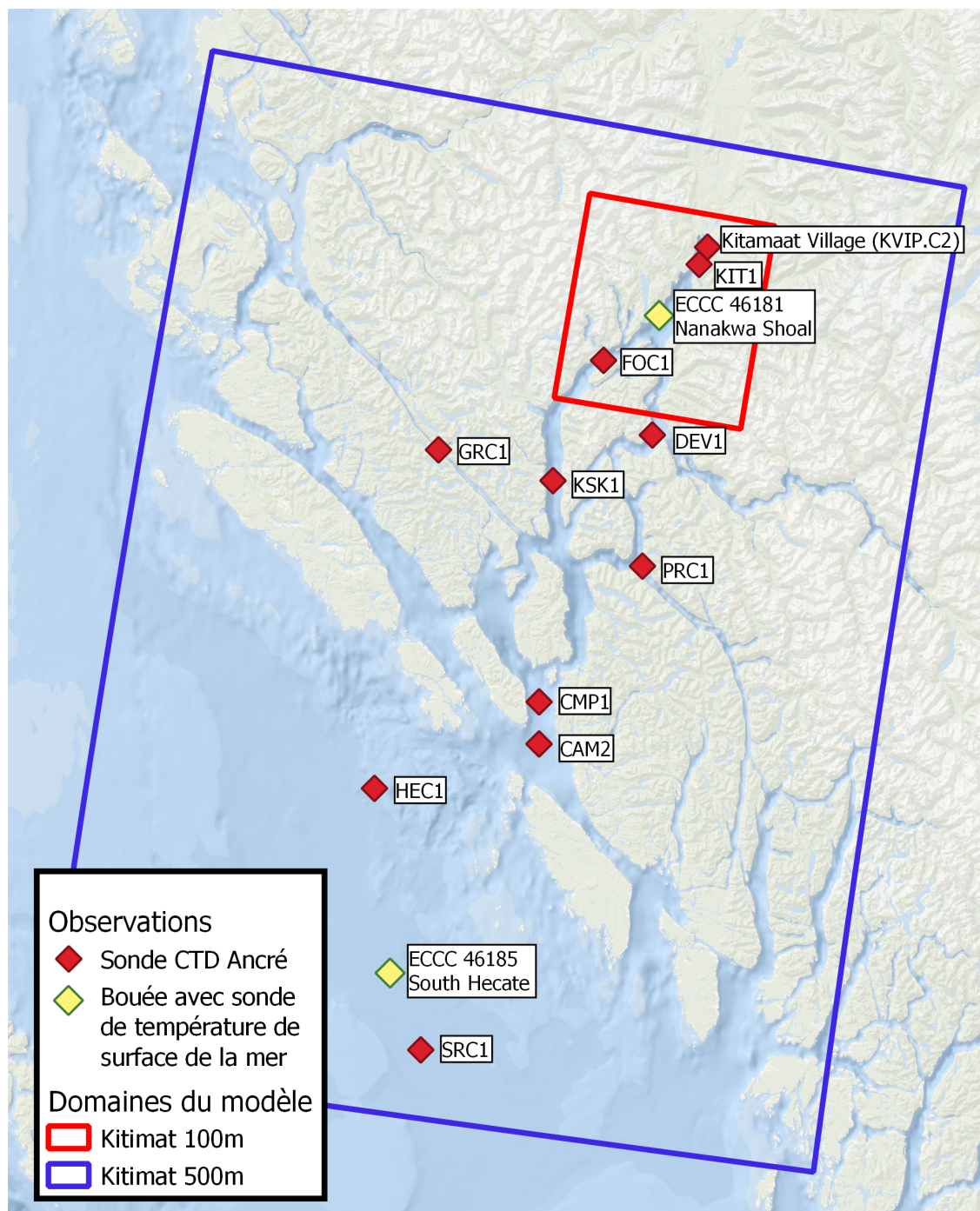


Figure 42. Carte montrant l'emplacement des capteurs de conductivité, température et profondeur (CTD) ancrés et des bouées munies de capteurs de la température de surface de la mer qui étaient actifs pendant la période de simulation rétrospective.

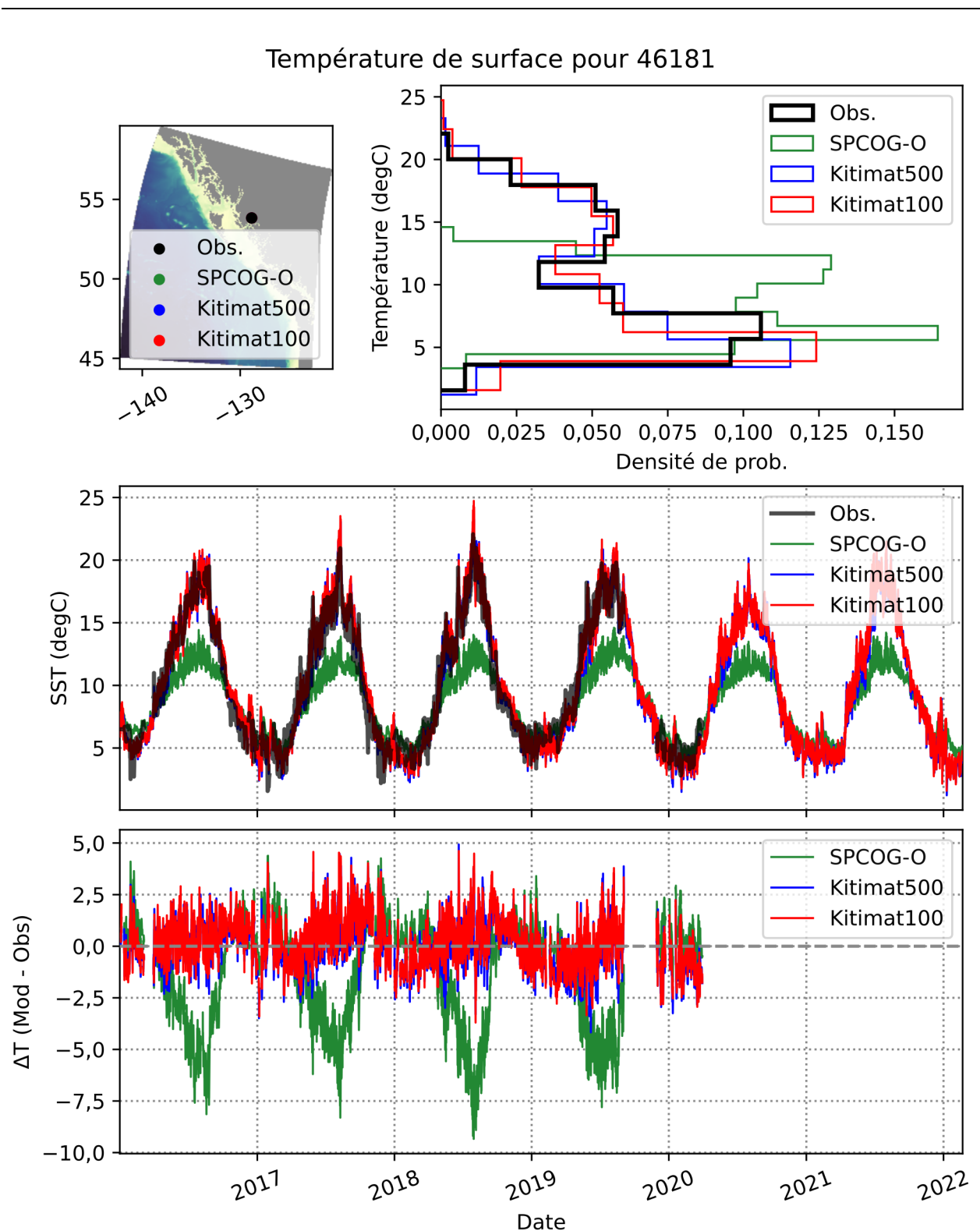


Figure 43. Comparaison de la température de surface de la mer mesurée à la station 46181 d'ECCC (haut-fond de Nanakwa, cours supérieur du chenal Douglas) et les résultats du SPCOG-Ouest et des domaines du modèle portuaire de Kitimat.

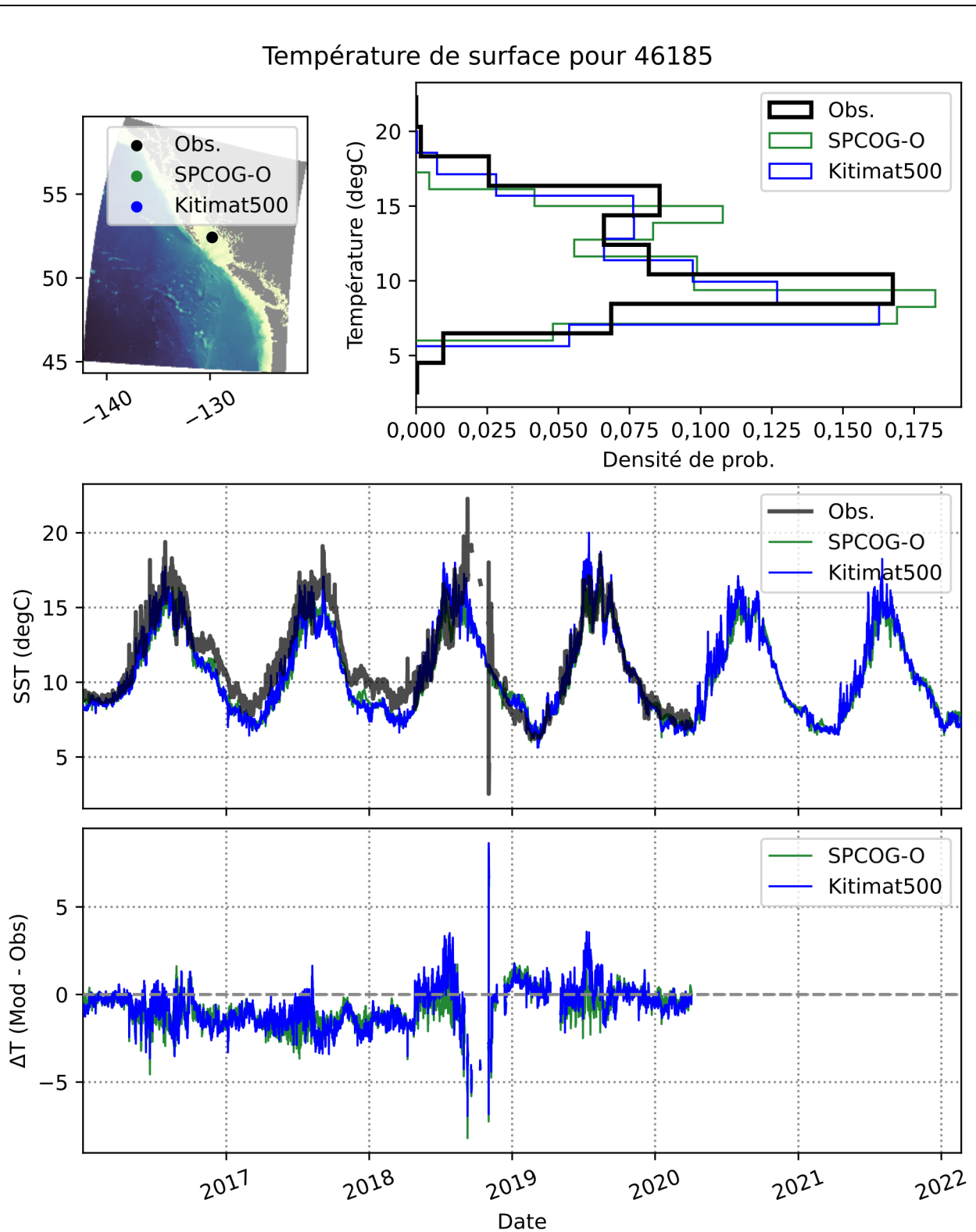


Figure 44. Comparaison de la température de la surface de la mer mesurée à la station 46185 d'ECCC (sud du détroit d'Hécaté, détroit d'Hécaté) et des résultats du SPCOG-Ouest et du domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.

Résumé de la validation par rapport aux mesures issues de la station KIT1, 2020

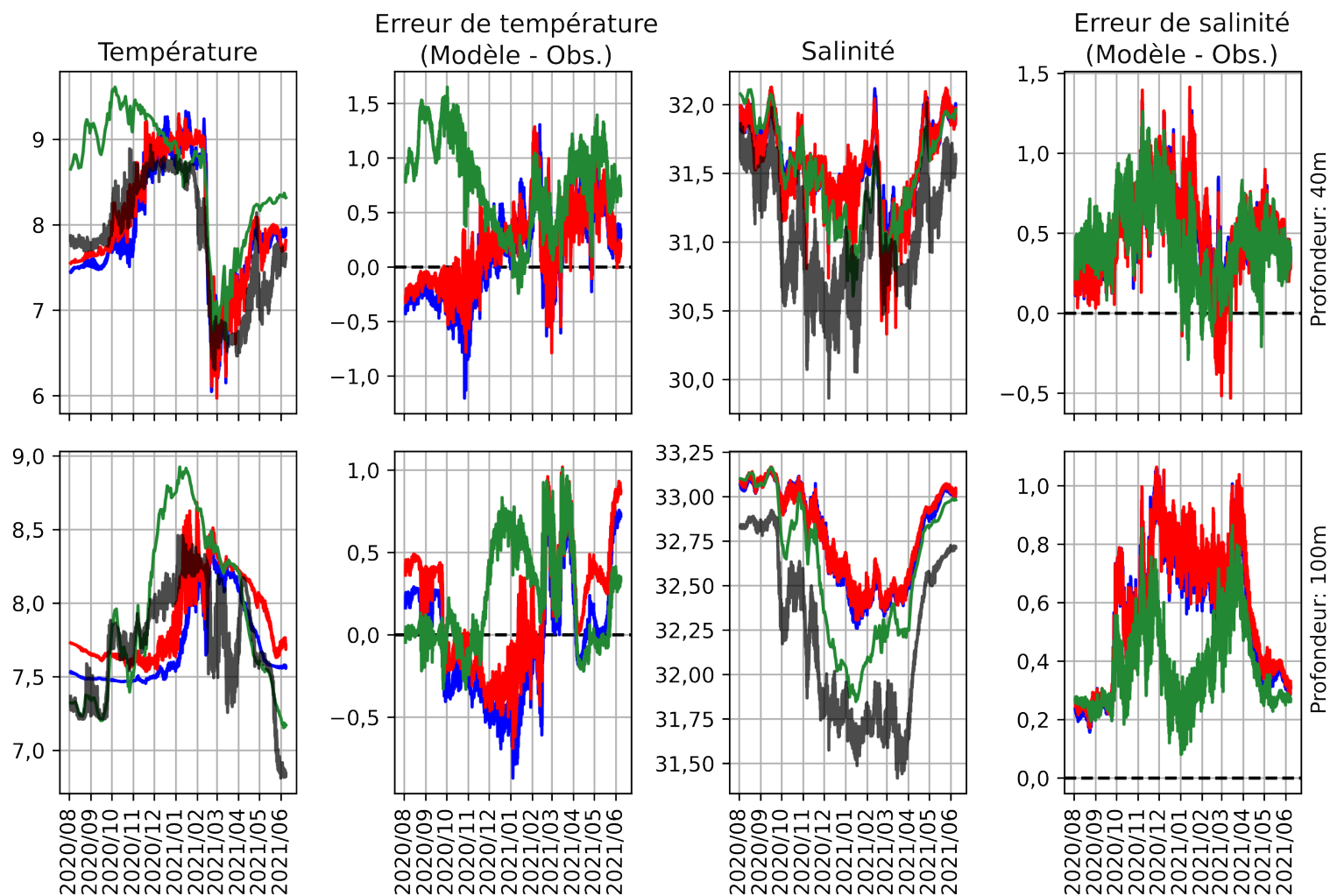


Figure 45. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancree KIT1, de juillet 2020 à juillet 2021. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 100 m du modèle de Kitimat (rouge), de la configuration à 500 m du même modèle (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).

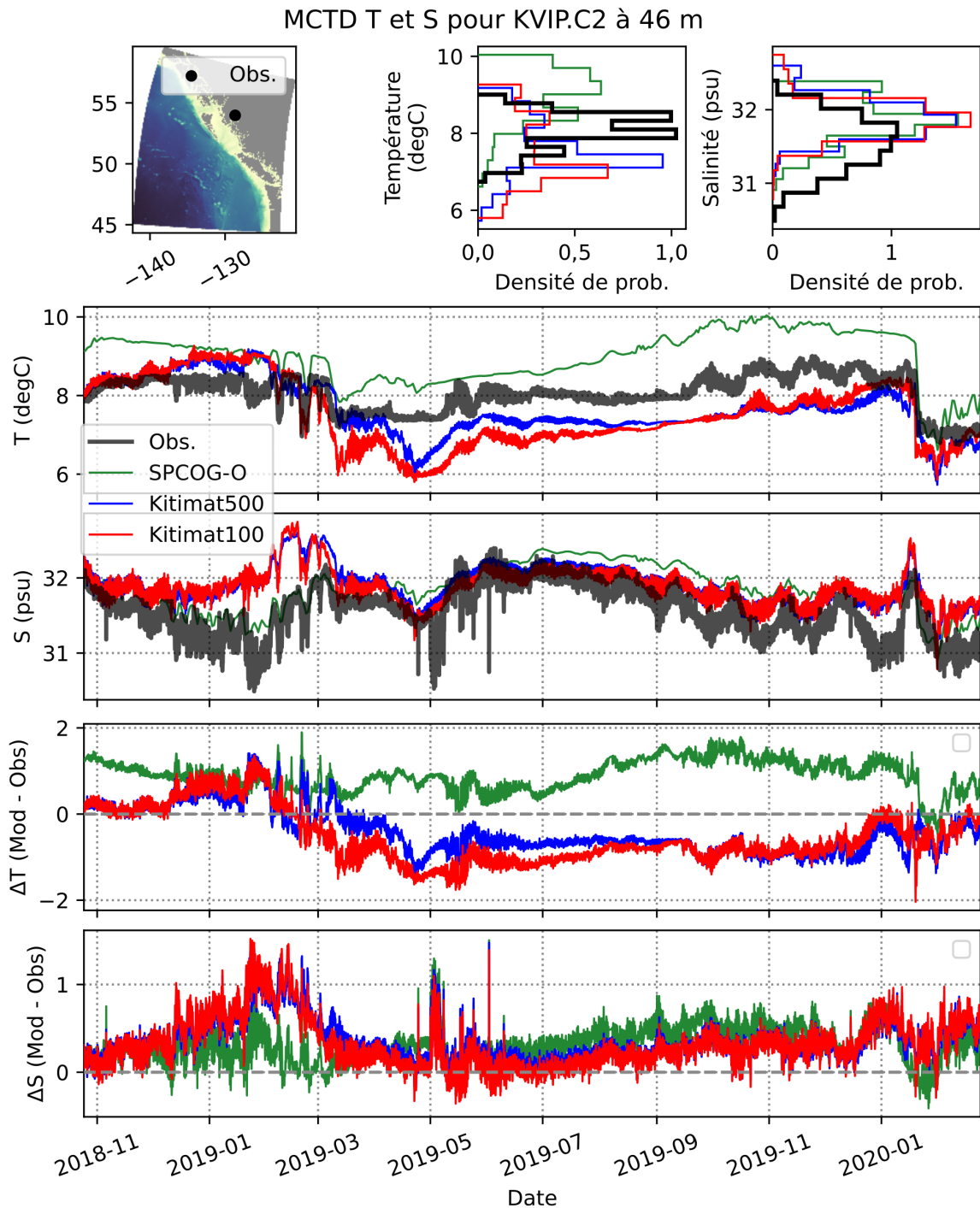


Figure 46. Comparaison des mesures de la température et de la salinité provenant d'une sonde CTD ancrée à la station du village de Kitimaat (bras Kitimat, 46 m de profondeur) et des résultats modélisés provenant du SPCOG-Ouest et des domaines du modèle portuaire de Kitimat.

Résumé de la validation par rapport aux mesures issues de la station FOC1, 2016

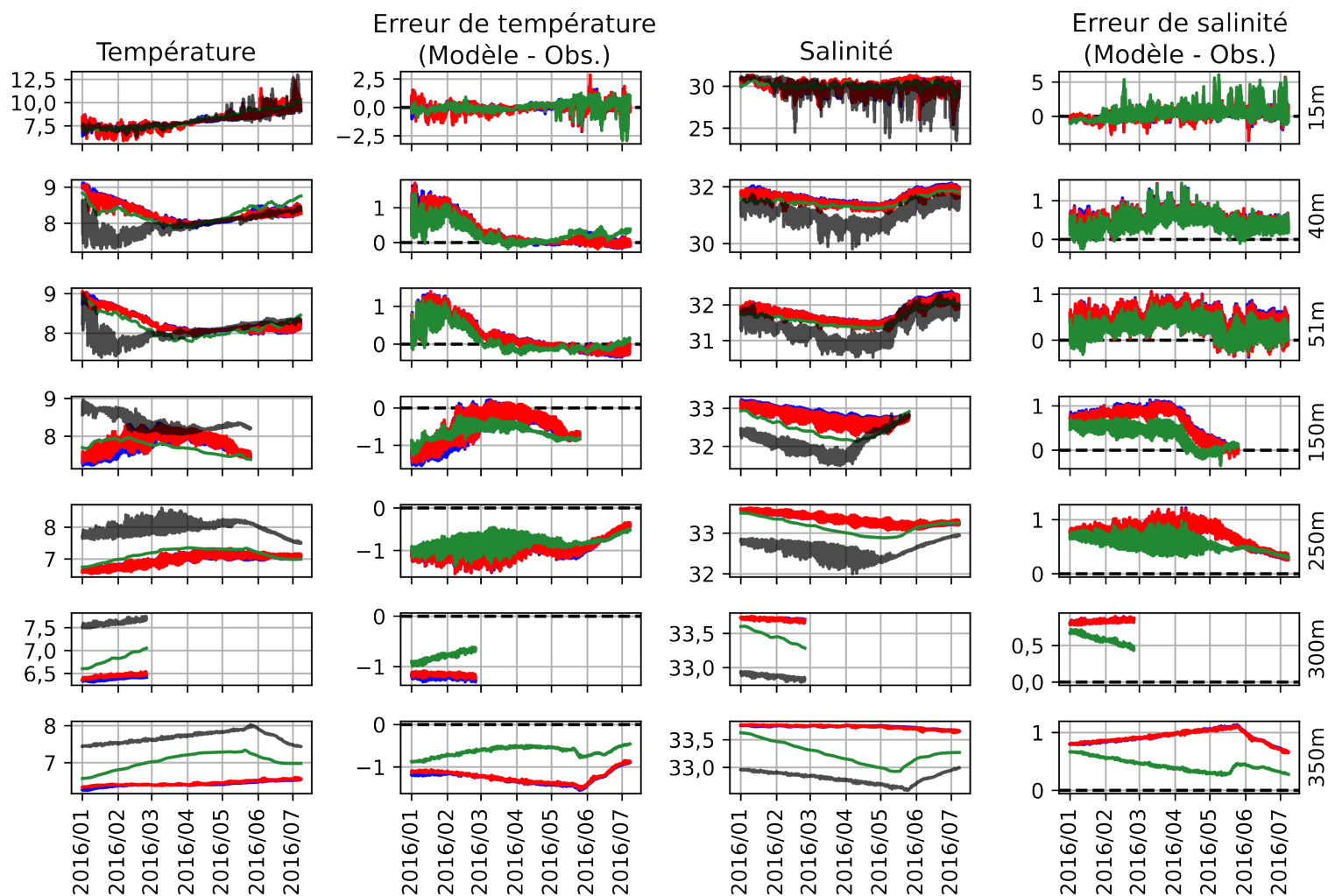


Figure 47. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée FOC1, de janvier à juillet 2016. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 100 m du modèle de Kitimat (rouge), de la configuration à 500 m du même modèle (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).

Résumé de la validation par rapport aux mesures issues de la station FOC1, 2020

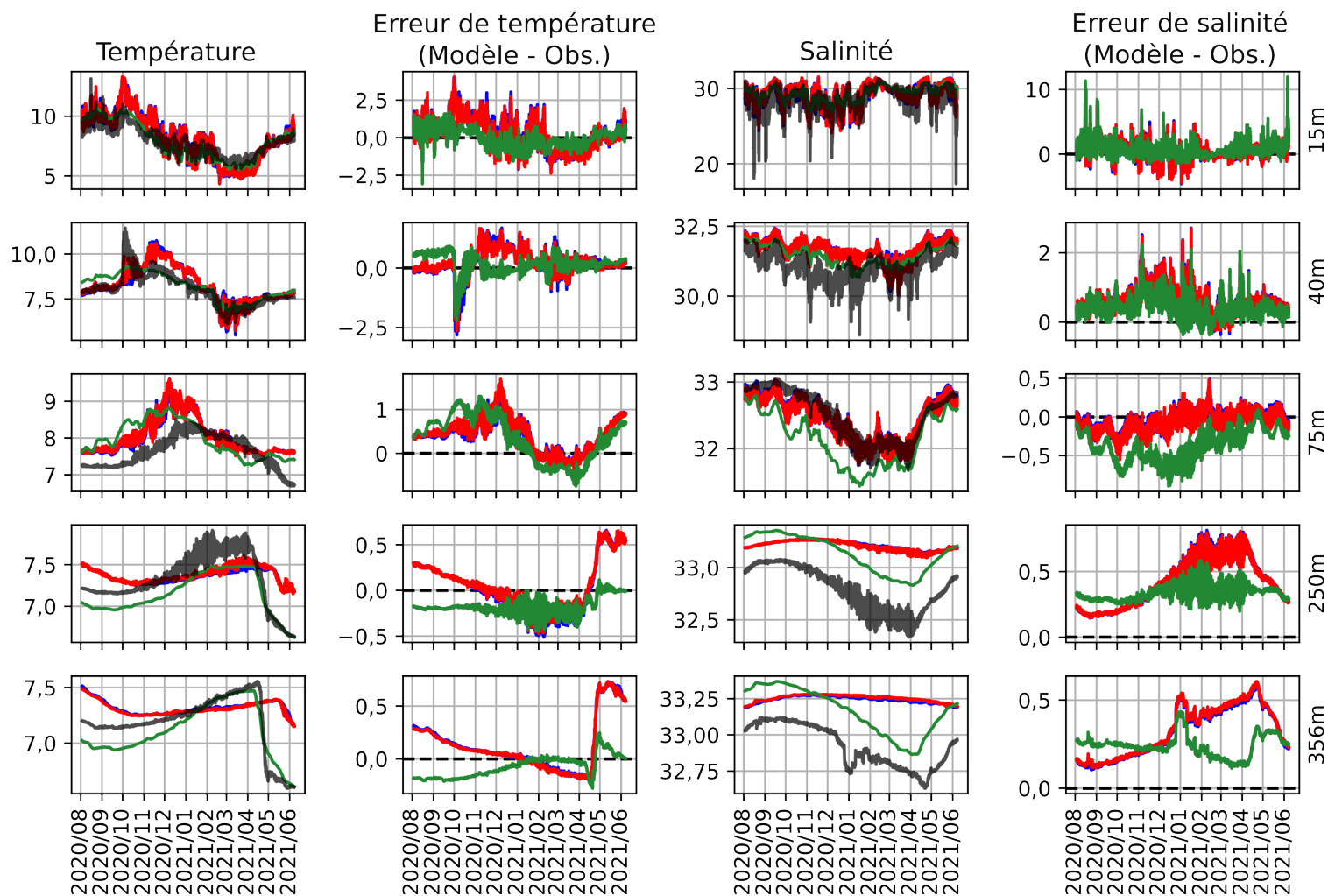


Figure 48. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancree FOC1, de juillet 2020 à juillet 2021. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 100 m du modèle de Kitimat (rouge), de la configuration à 500 m du même modèle (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).

Résumé de la validation par rapport aux mesures issues de la station DEV1, 2016

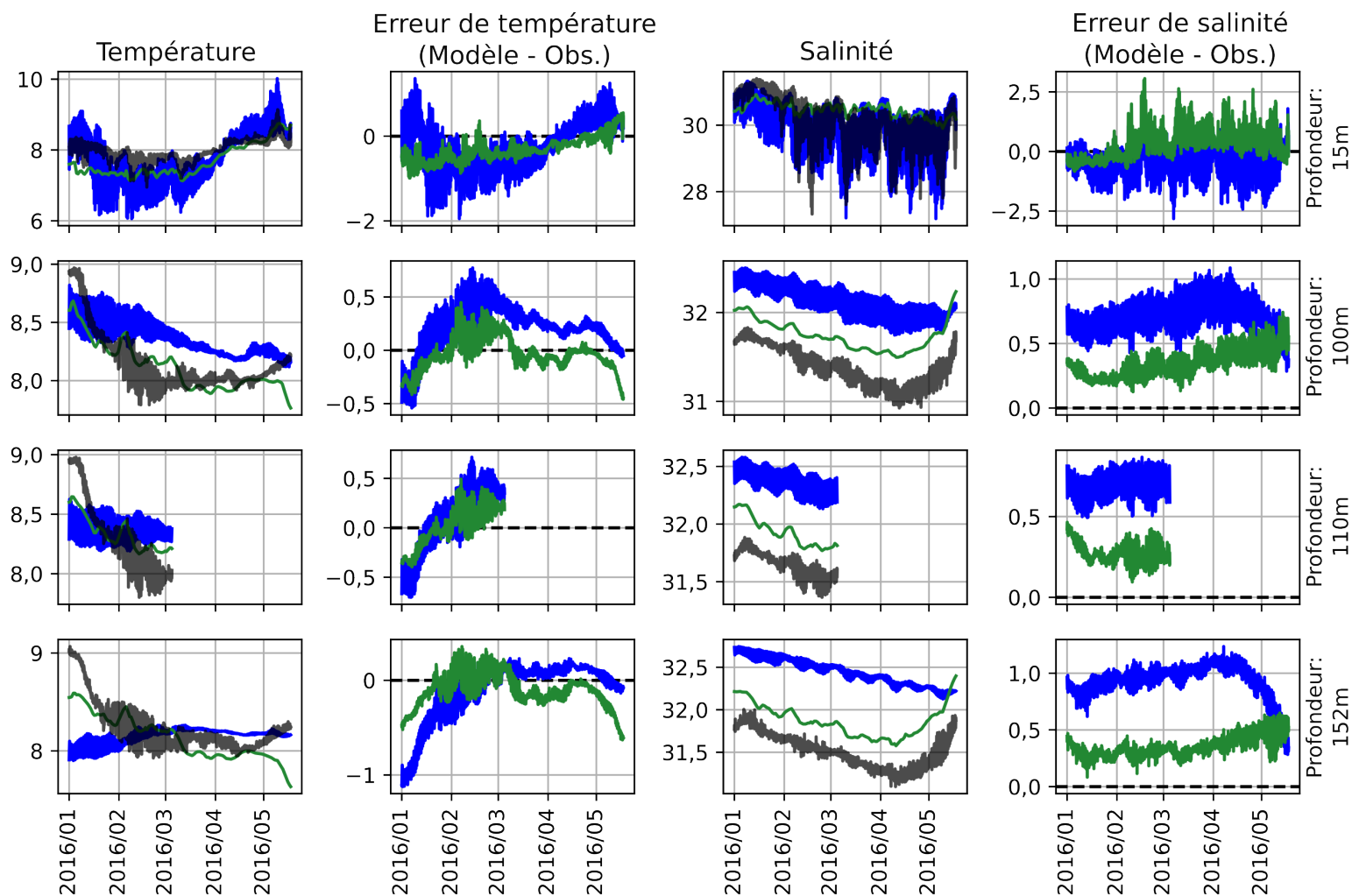


Figure 49. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancree DEV1, de janvier à juin 2016. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).

Résumé de la validation par rapport aux mesures issues de la station KSK1, 2016

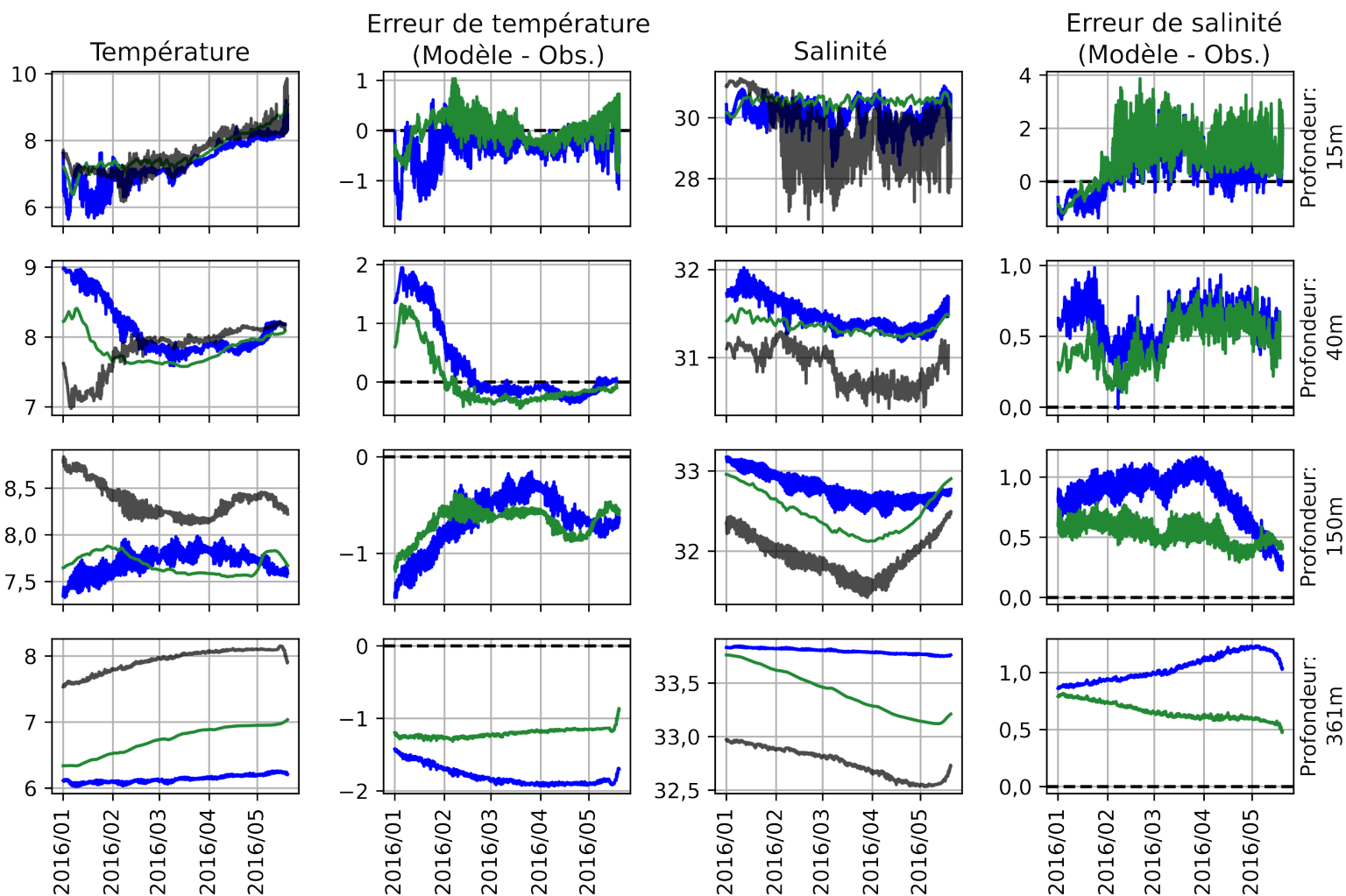


Figure 50. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée KSK1, de janvier à juin 2016. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).

Résumé de la validation par rapport aux mesures issues de la station PRC1, 2019

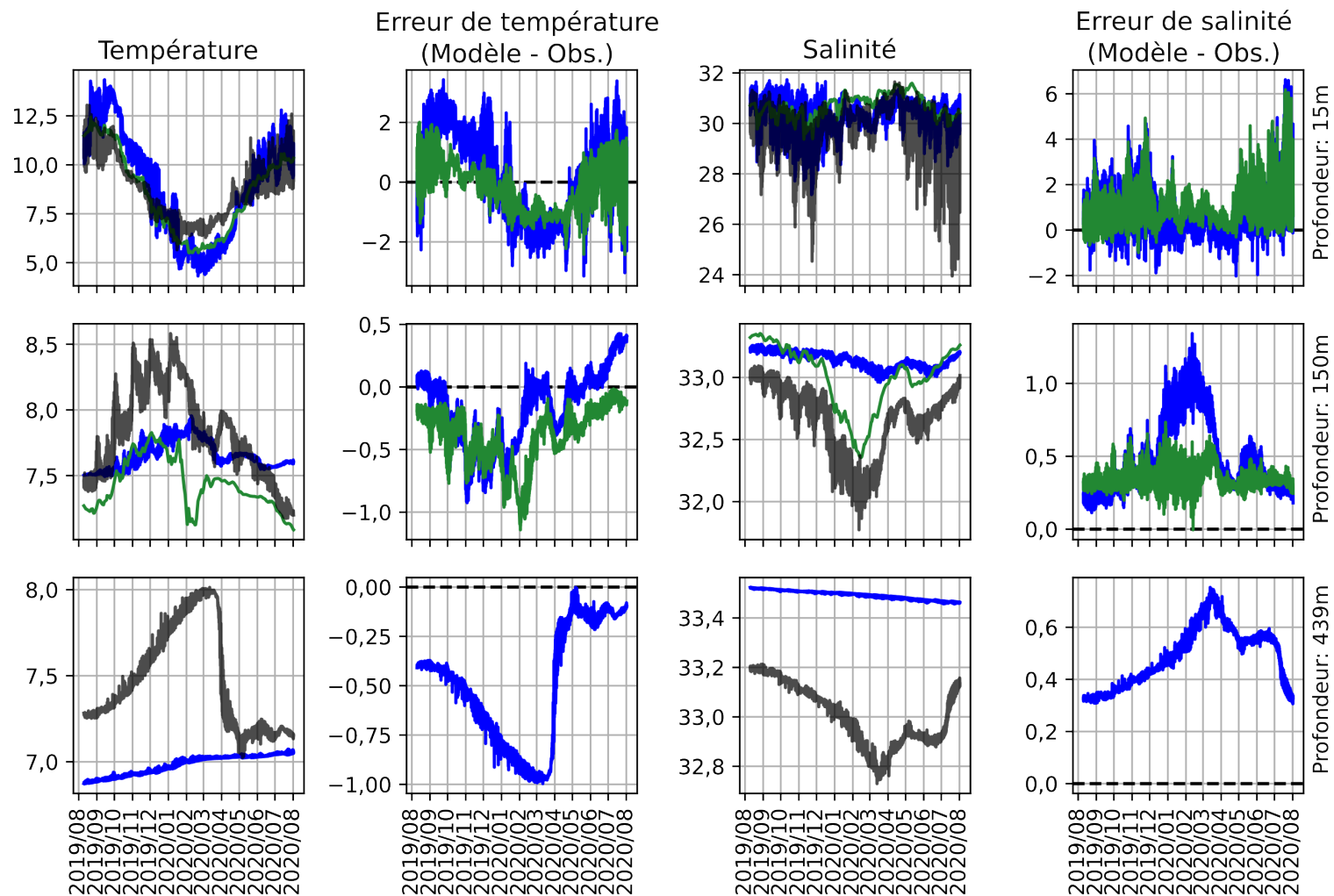


Figure 51. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée PRC1, de juillet 2019 à août 2020. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).

Résumé de la validation par rapport aux mesures issues de la station GRC1, 2019

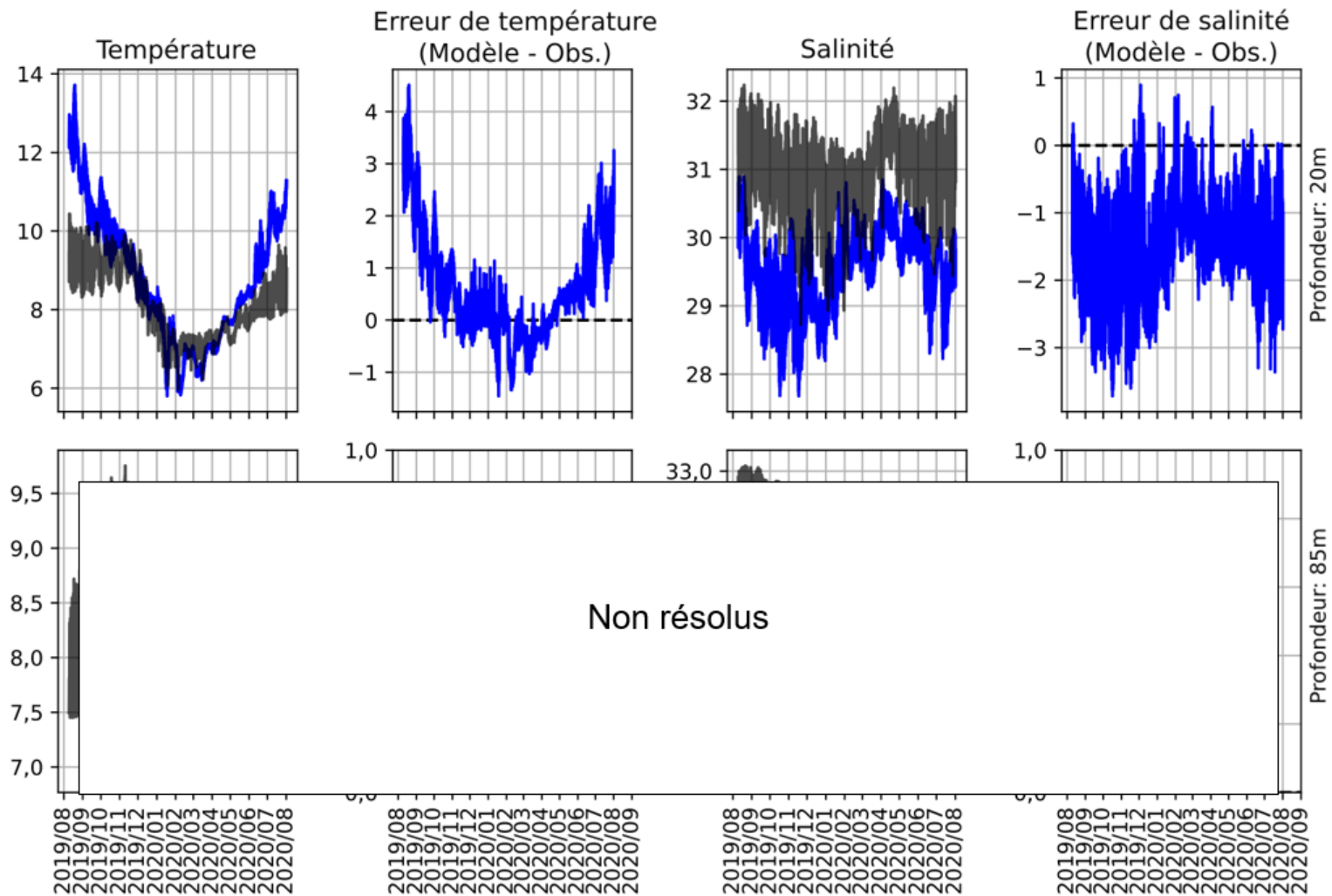


Figure 52. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée GRC1, de juillet 2019 à août 2020. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert). À une profondeur de 85 m (rangée du bas), l'instrument n'est pas représenté dans le modèle en raison de la faible résolution des données bathymétriques à proximité de l'ancrage.

Résumé de la validation par rapport aux mesures issues de la station CAM2, 2016

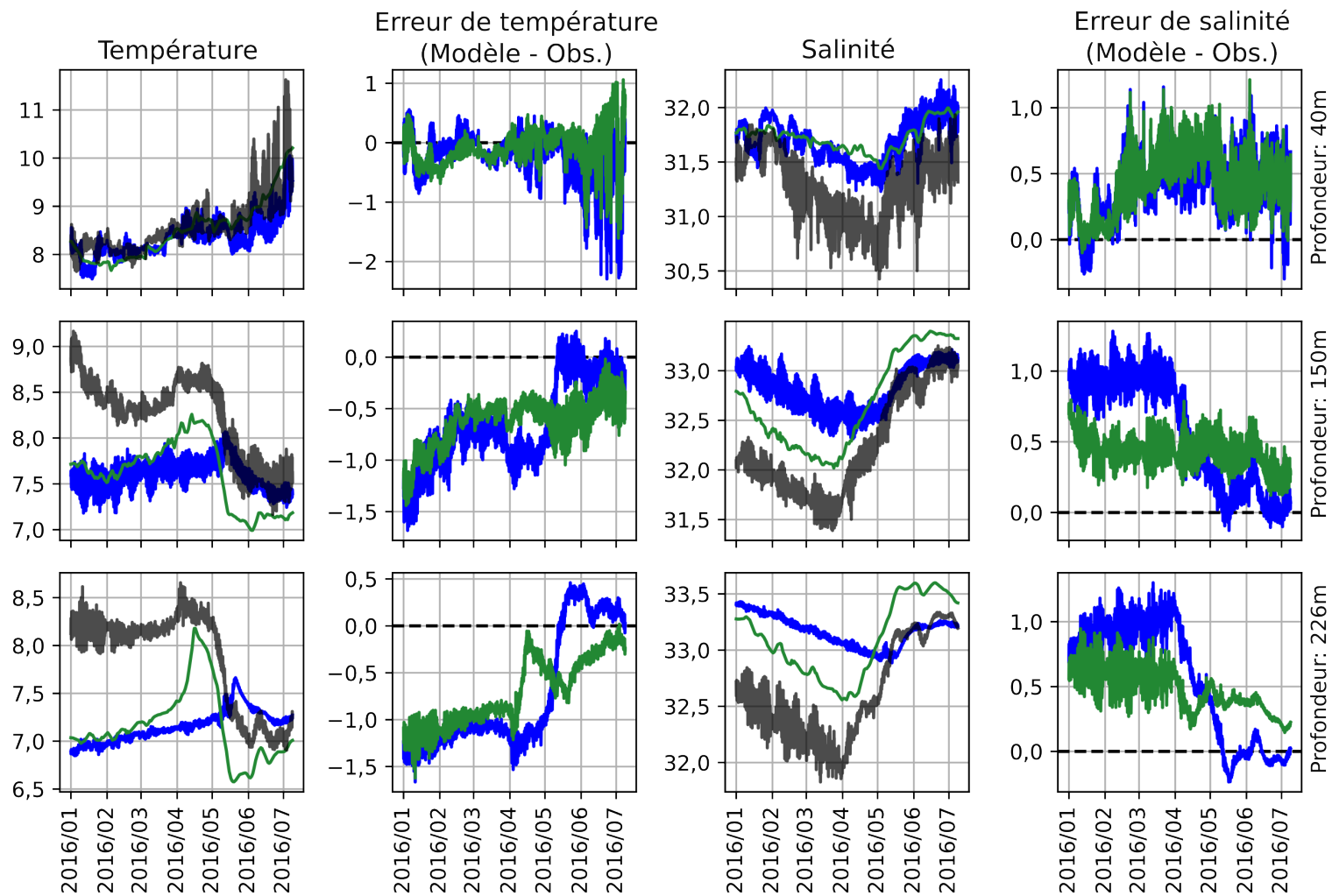


Figure 53. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée CAM2, de janvier à juillet 2016. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).

Résumé de la validation par rapport aux mesures issues de la station HEC1, 2016

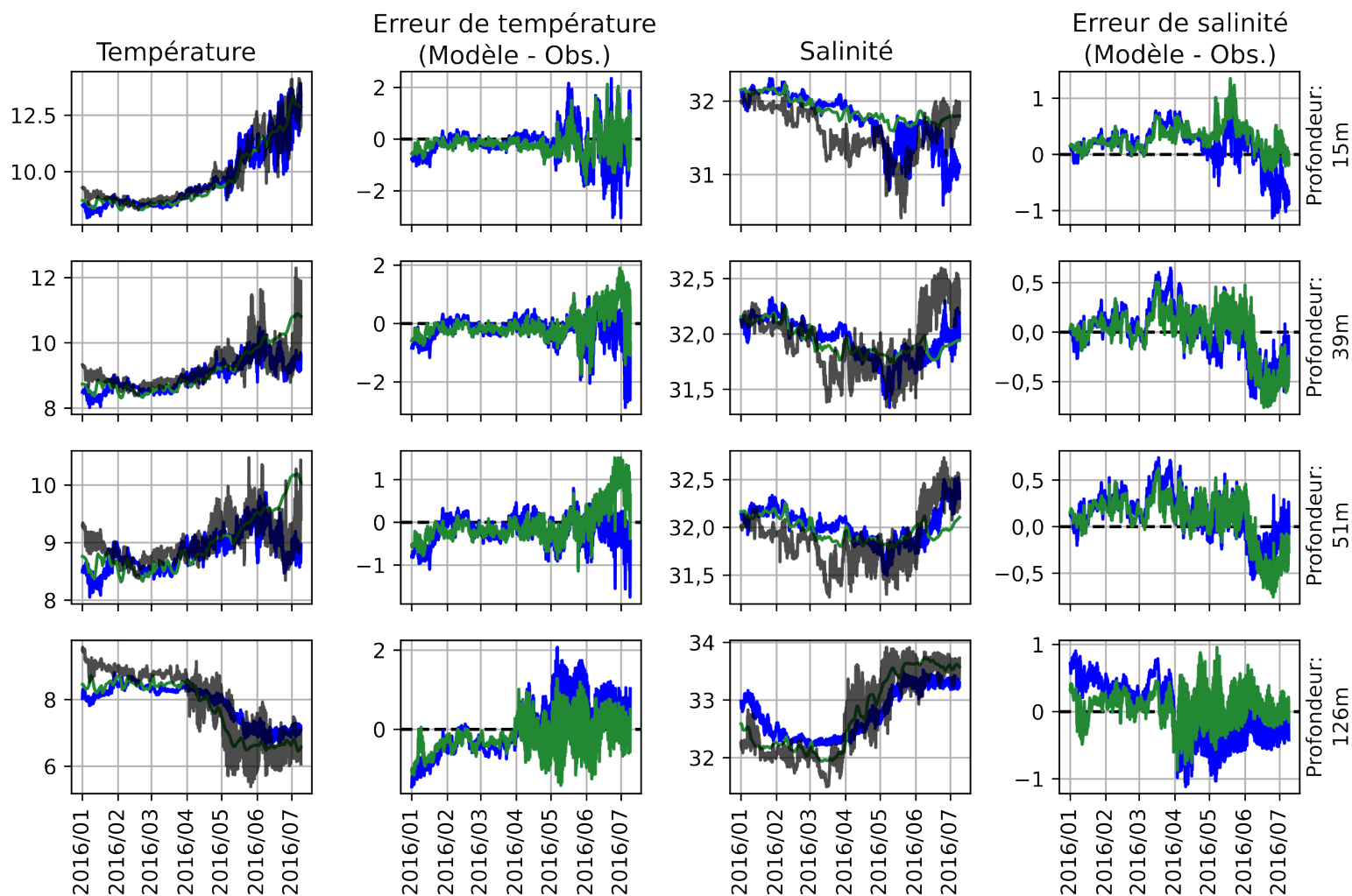


Figure 54. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée HEC1, de janvier à juillet 2016. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).

Résumé de la validation par rapport aux mesures issues de la station SRC1, 2016

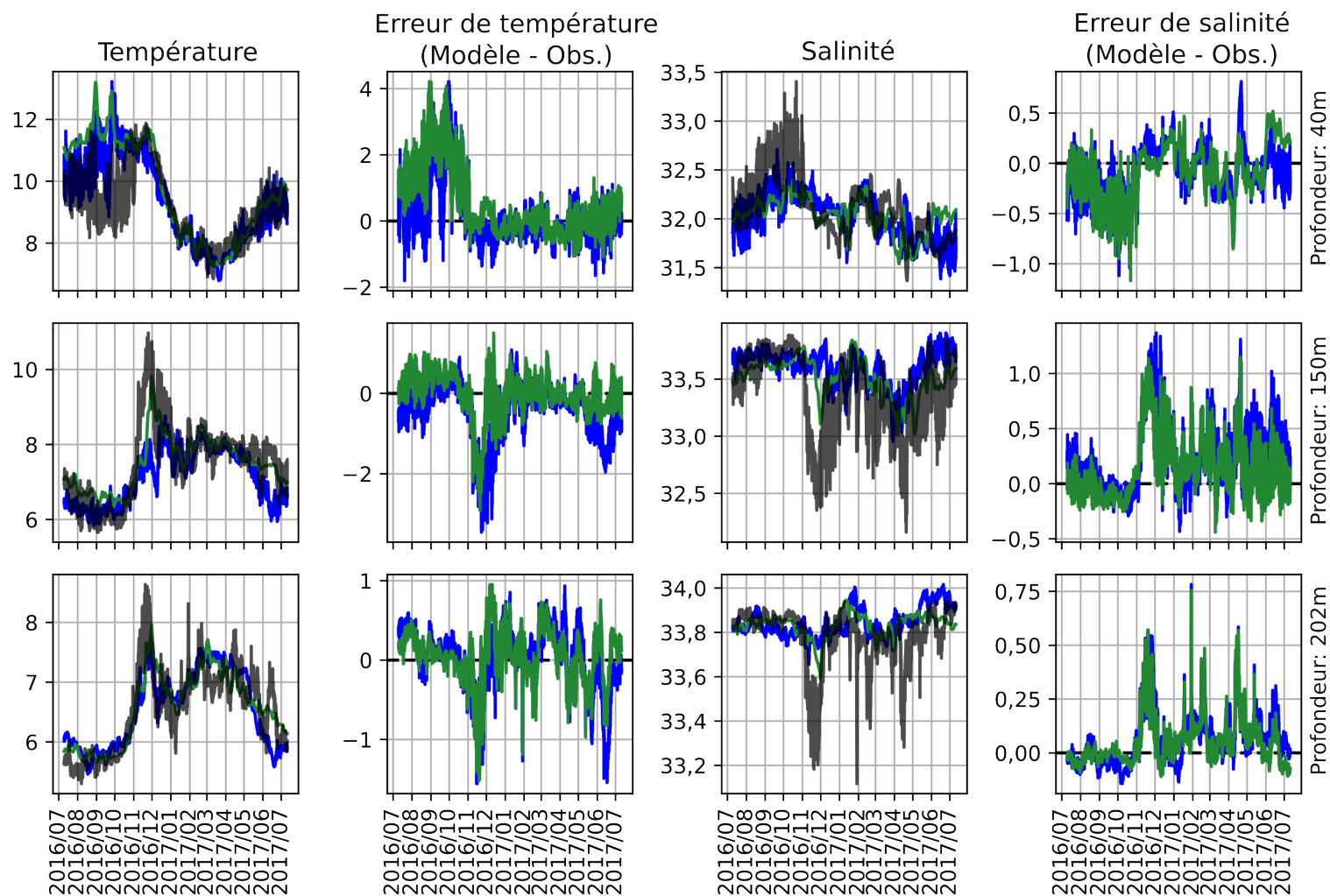


Figure 55. Résumé de la validation des résultats par rapport aux mesures de température et de salinité issues de la station ancrée SRC1, de juillet 2016 à juillet 2017. Les observations, indiquées en noir, sont comparées aux résultats de la configuration à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et du SPCOG-Ouest (vert).

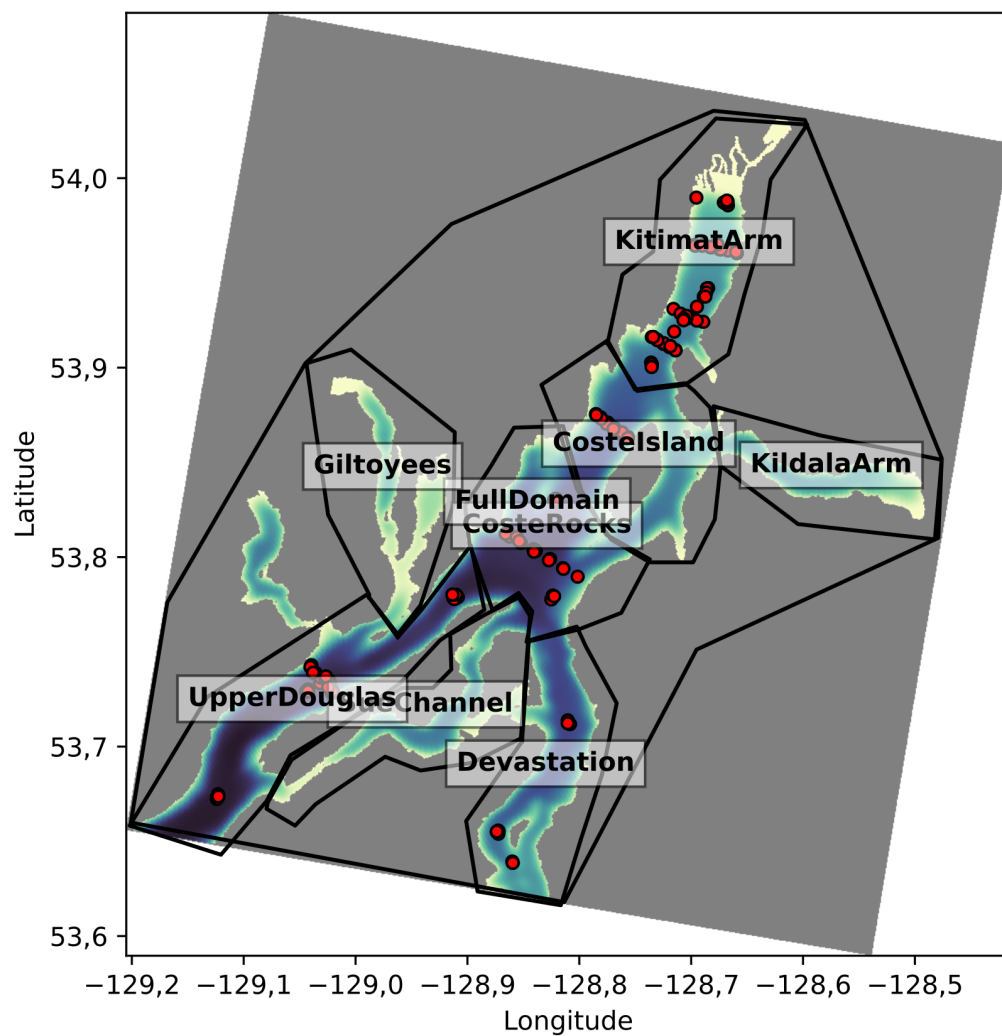


Figure 56. Profils CTD (points rouges) et sous-régions (délimitées par des traits noirs pleins) utilisés pour l'analyse dans le domaine du modèle Kitimat à 100m.

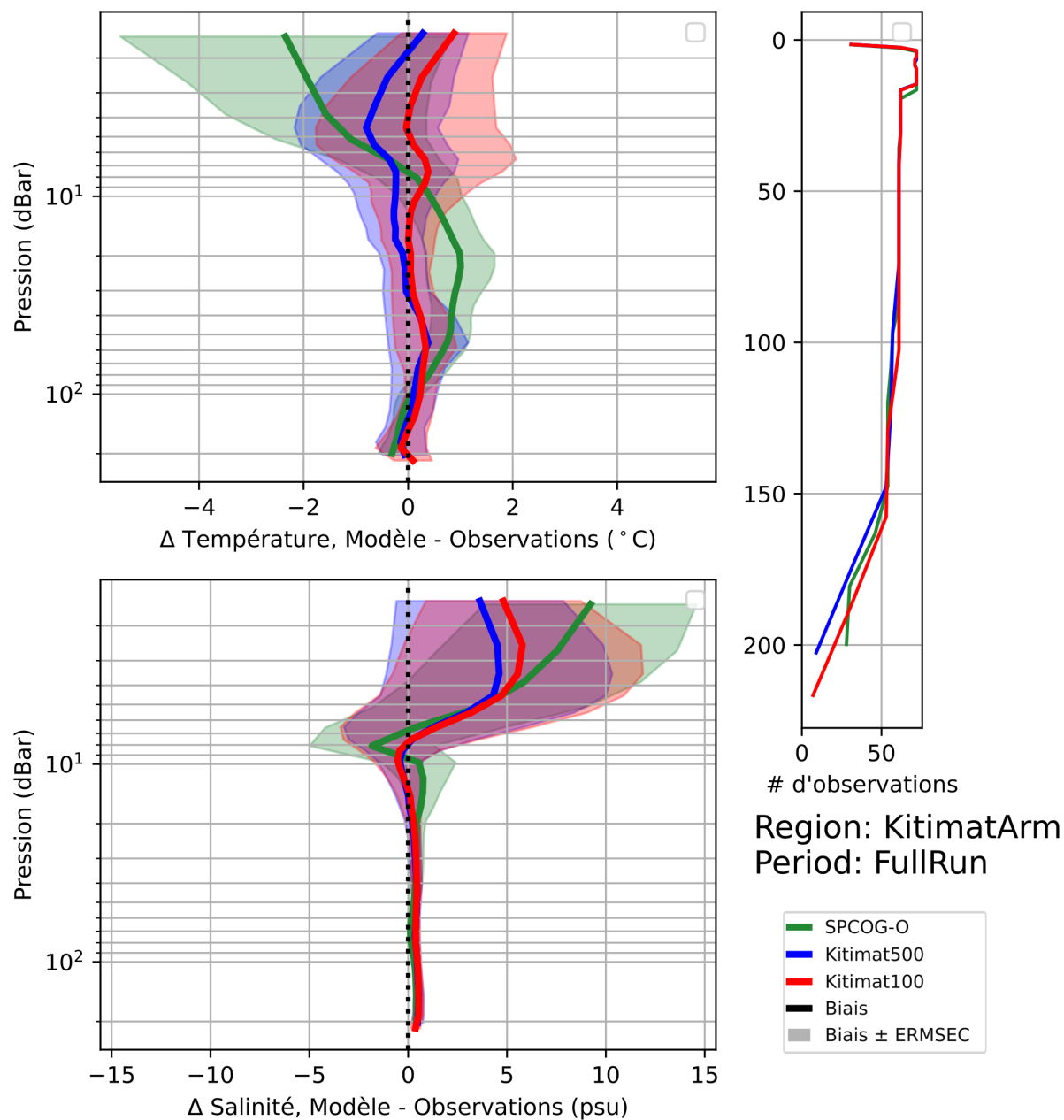


Figure 57. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du bras Kitimat située dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat.

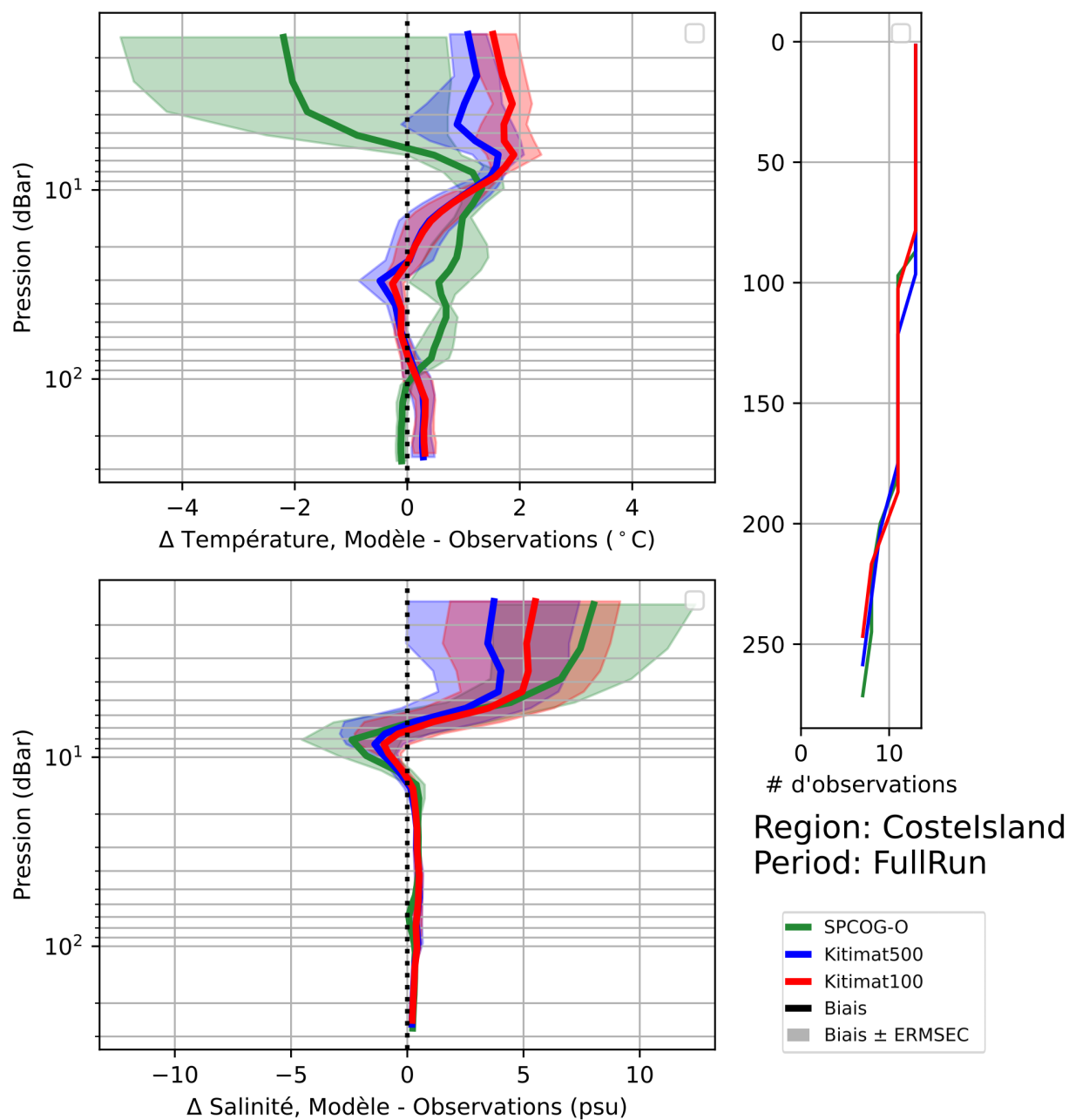


Figure 58. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région de l'île Coste située dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat.

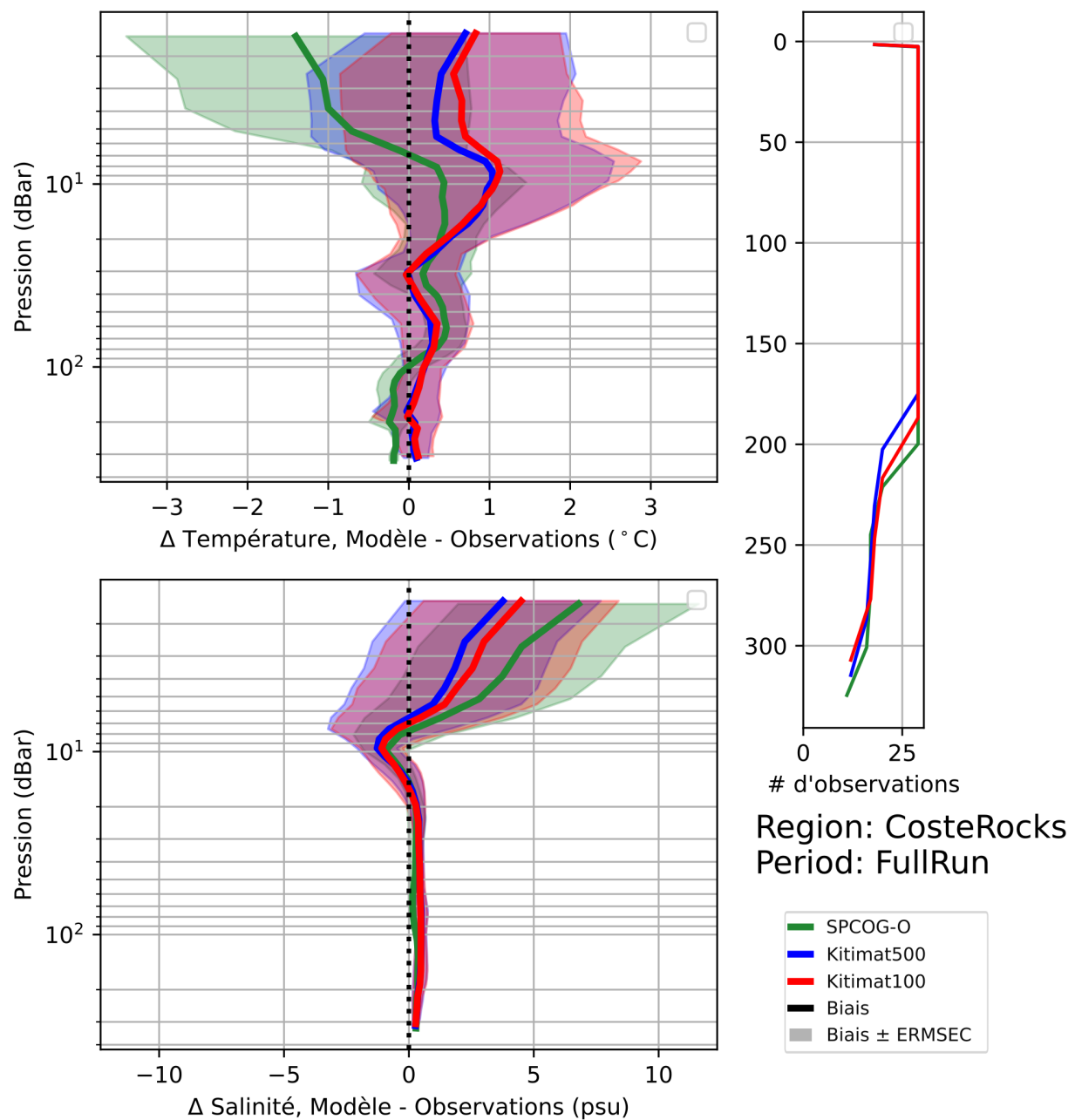


Figure 59. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région de Coste Rocks située dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat.

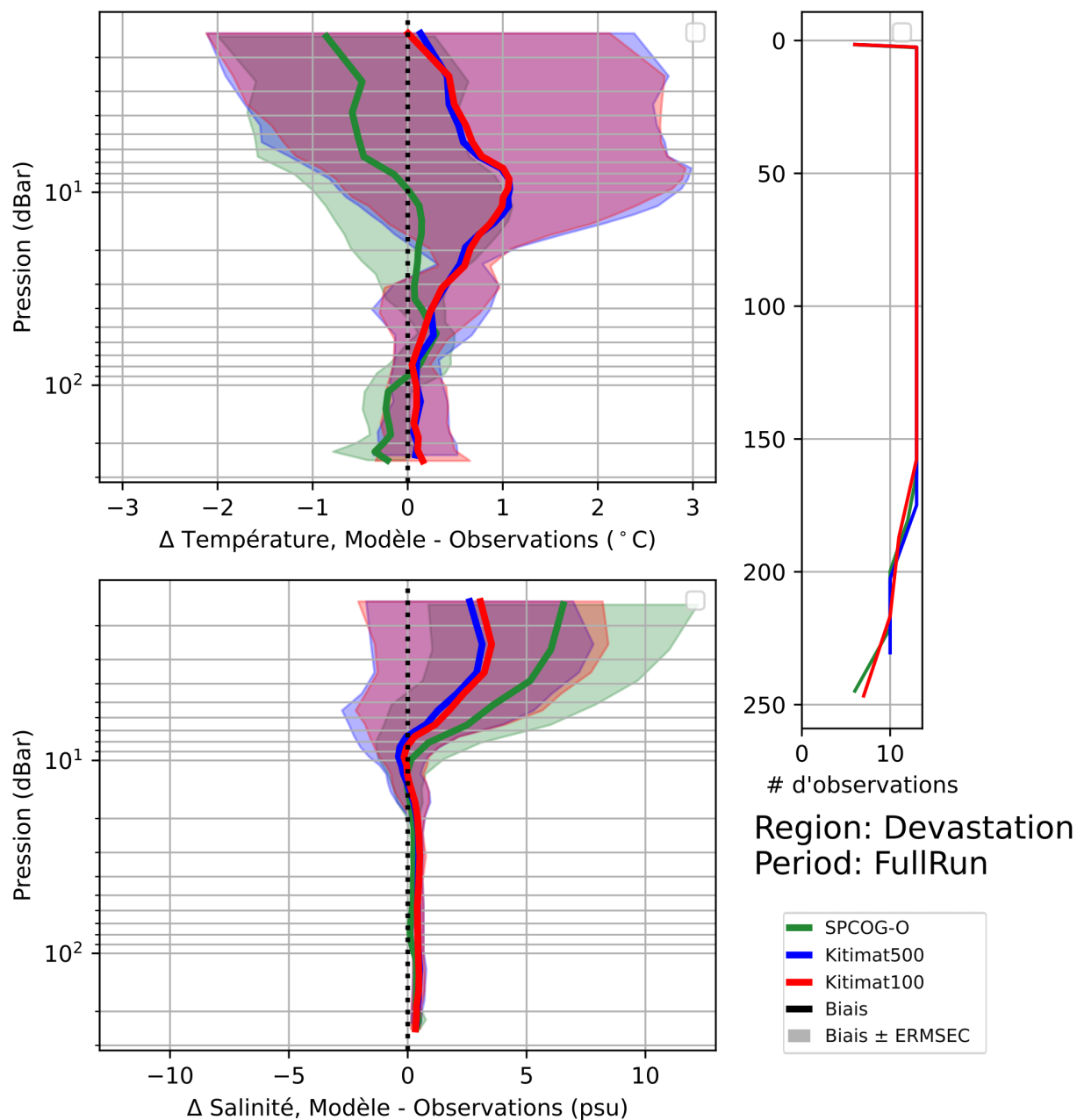


Figure 60. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du chenal Devastation située dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat.

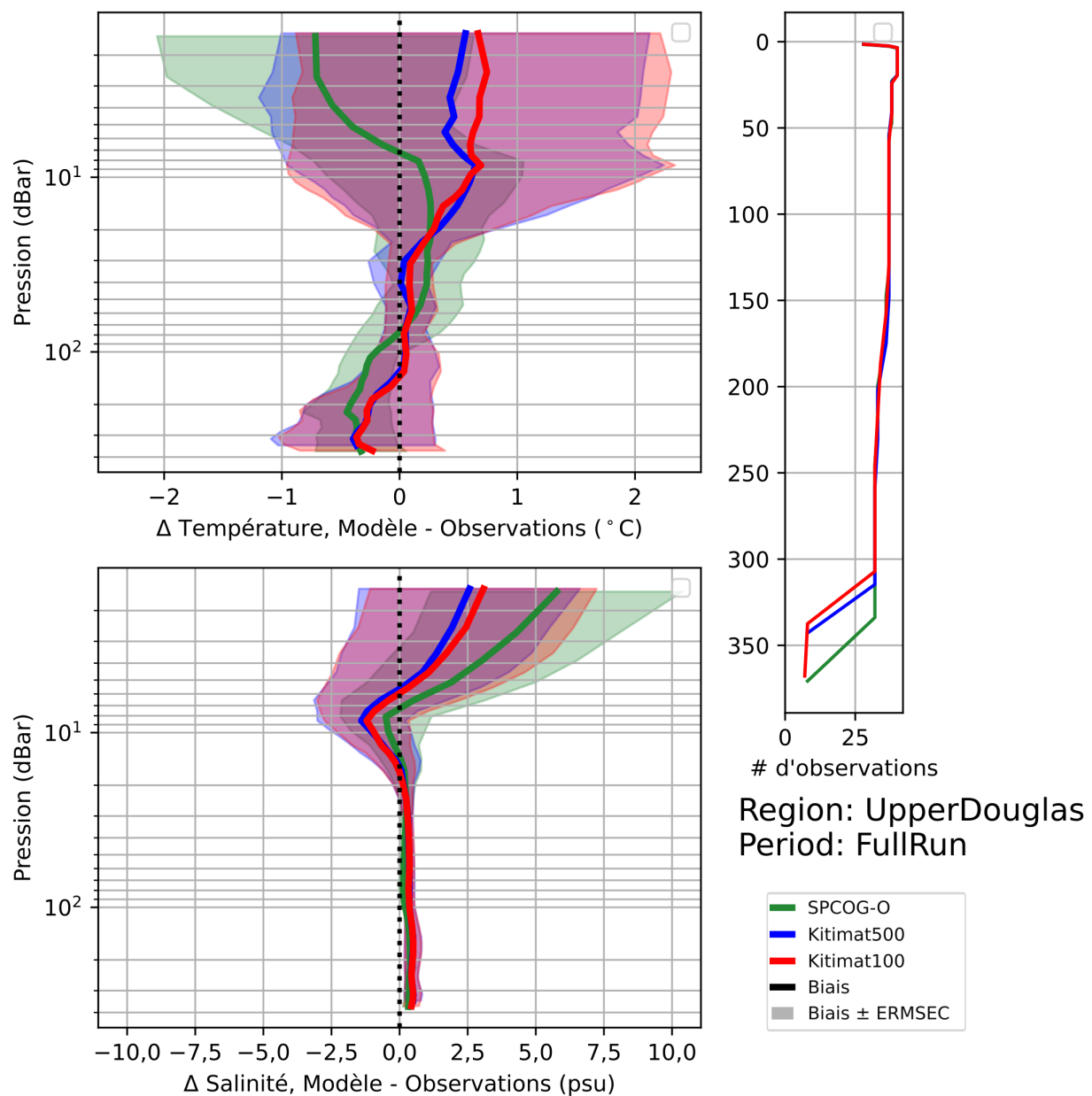


Figure 61. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du cours supérieur du chenal Douglas située dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat.

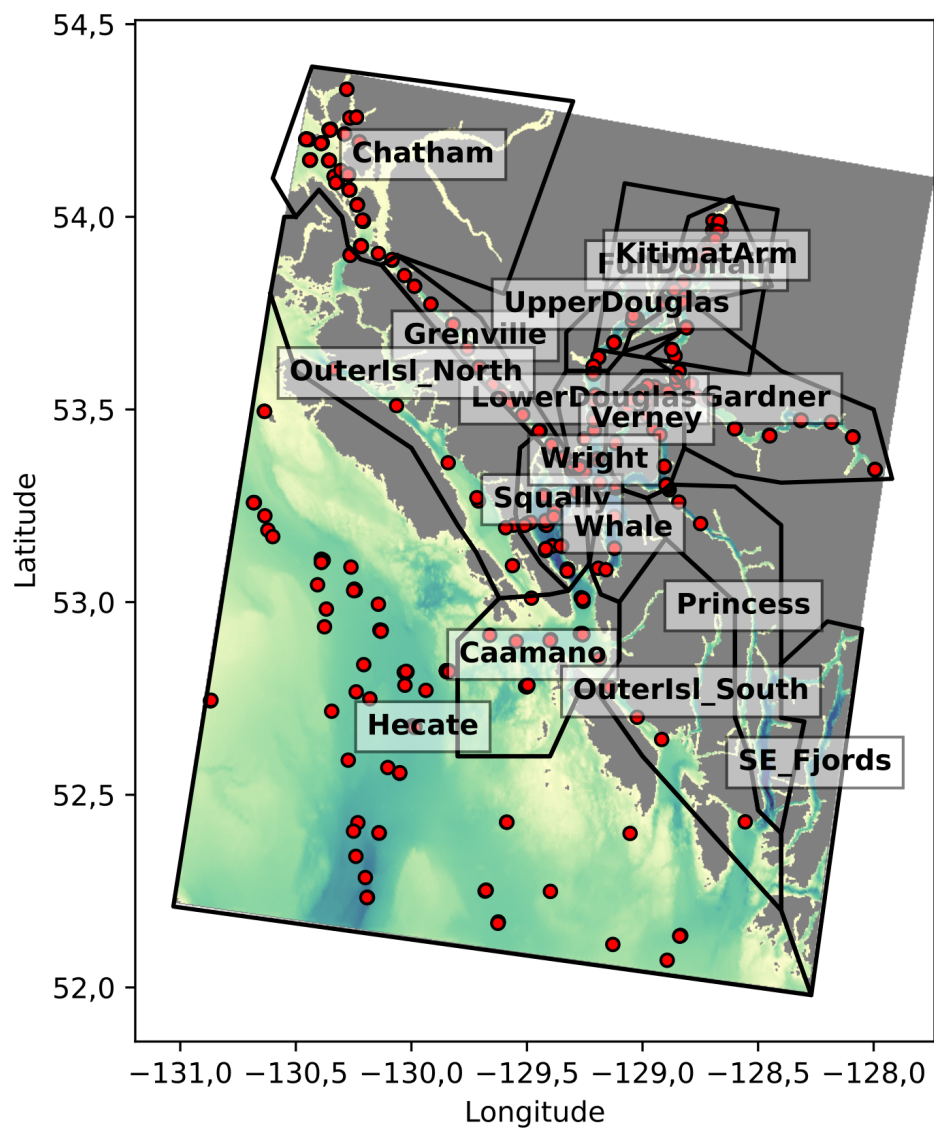


Figure 62. Profils CTD (points rouges) et sous-régions (délimitées par des traits noirs pleins) utilisés pour l'analyse dans le domaine du modèle Kitimat à 500m.

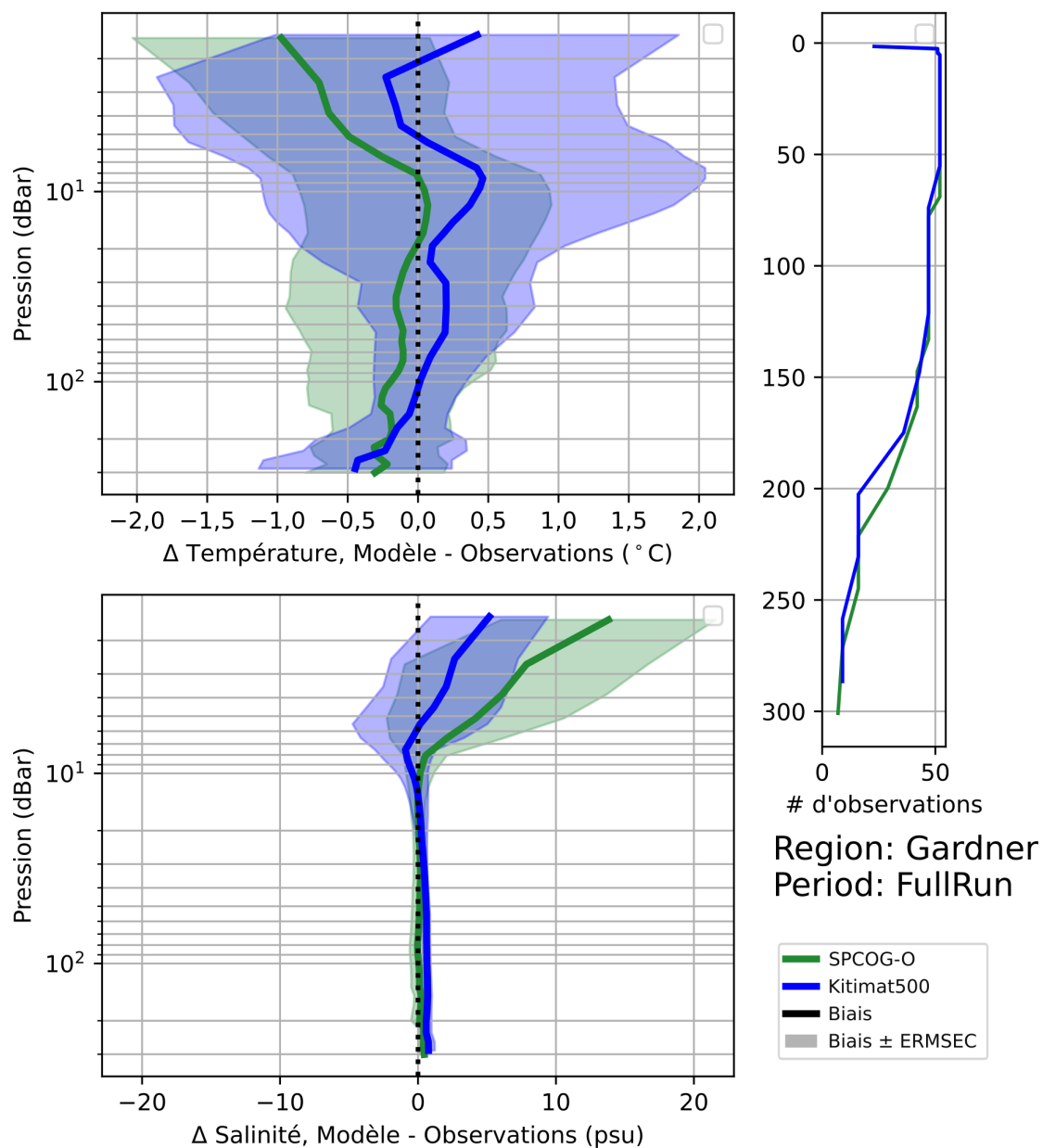


Figure 63. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du chenal Gardner située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

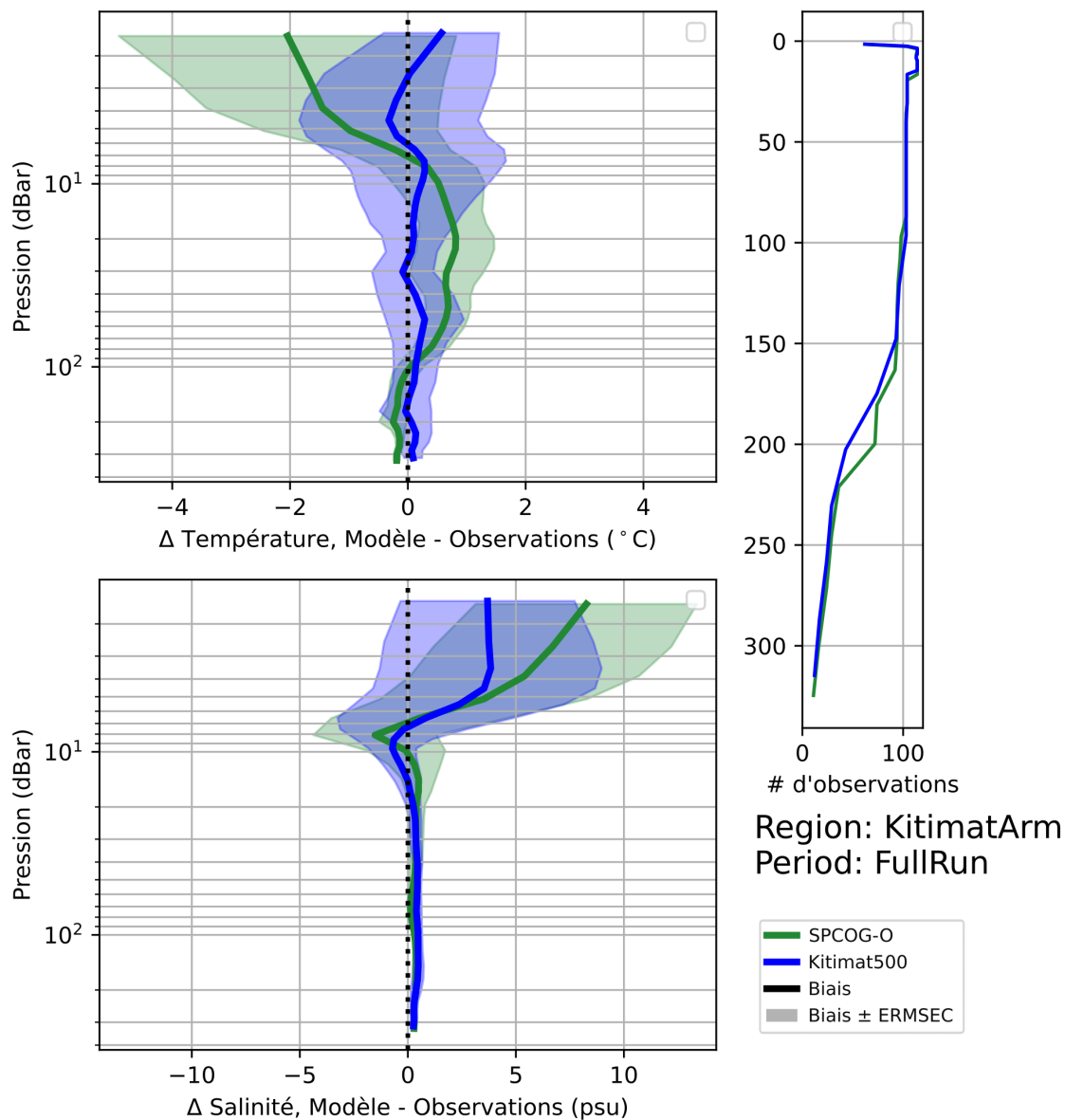


Figure 64. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du bras Kitimat située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

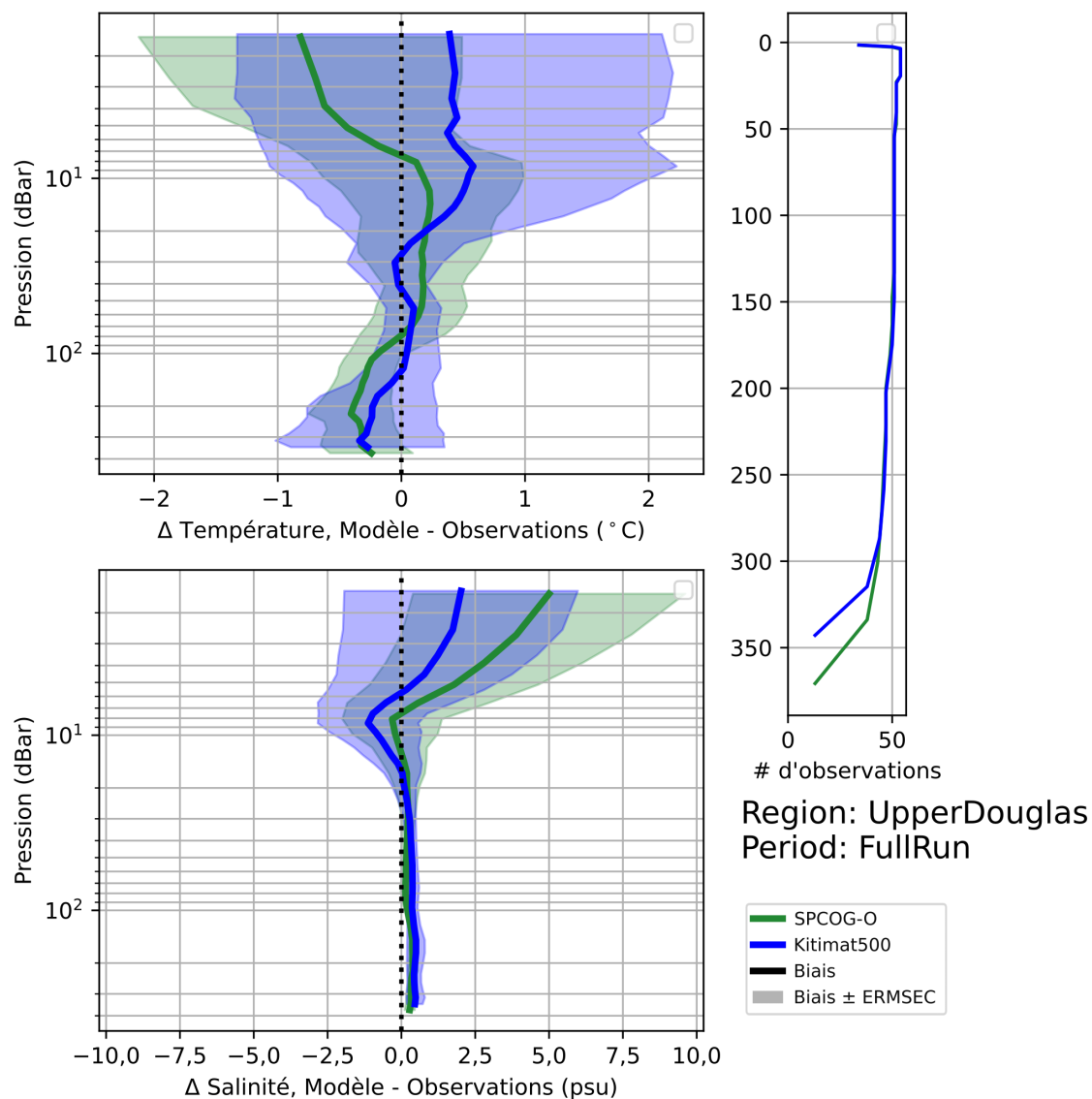


Figure 65. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du cours supérieur du chenal Douglas située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

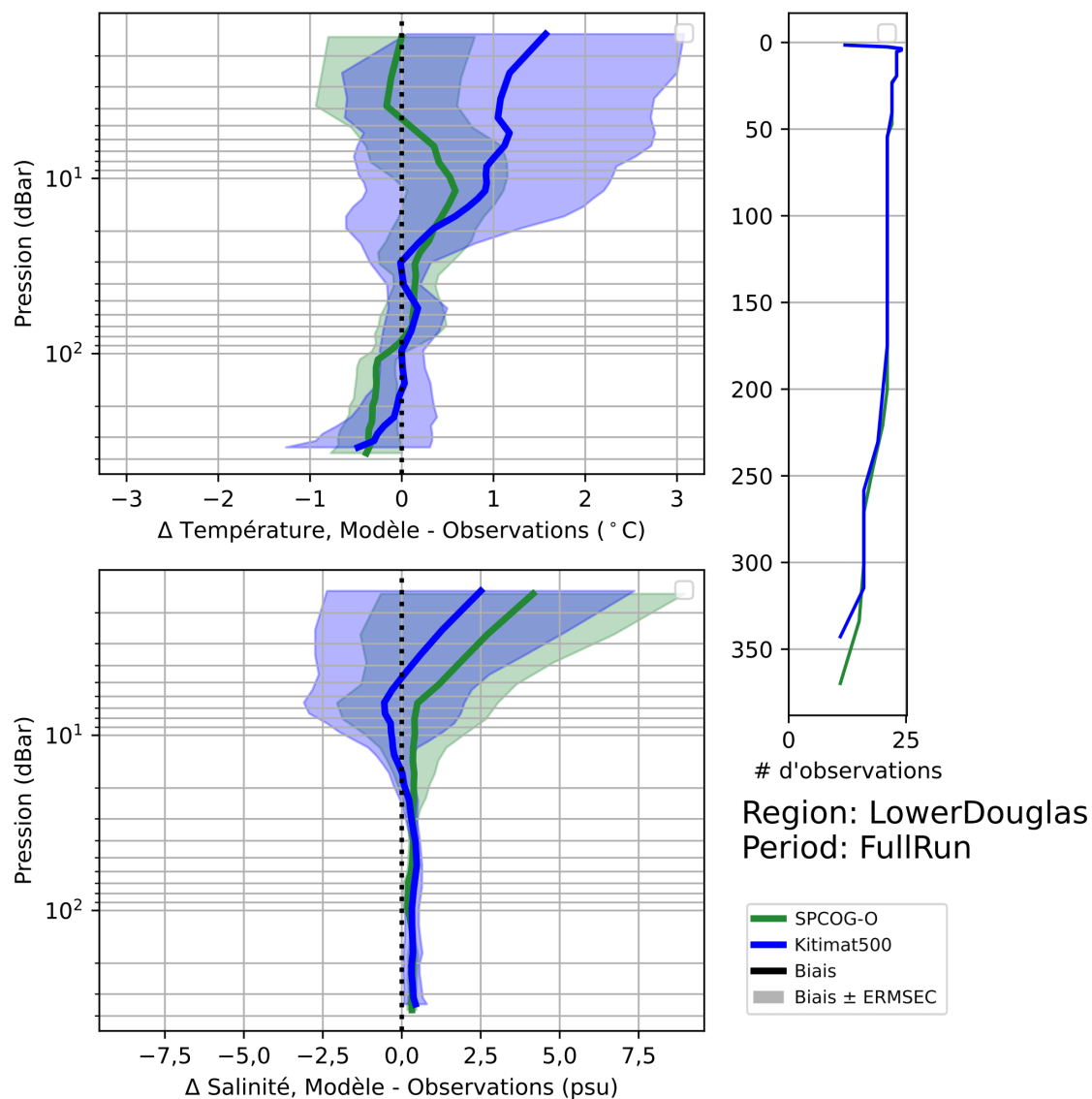


Figure 66. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du cours inférieur du chenal Douglas située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

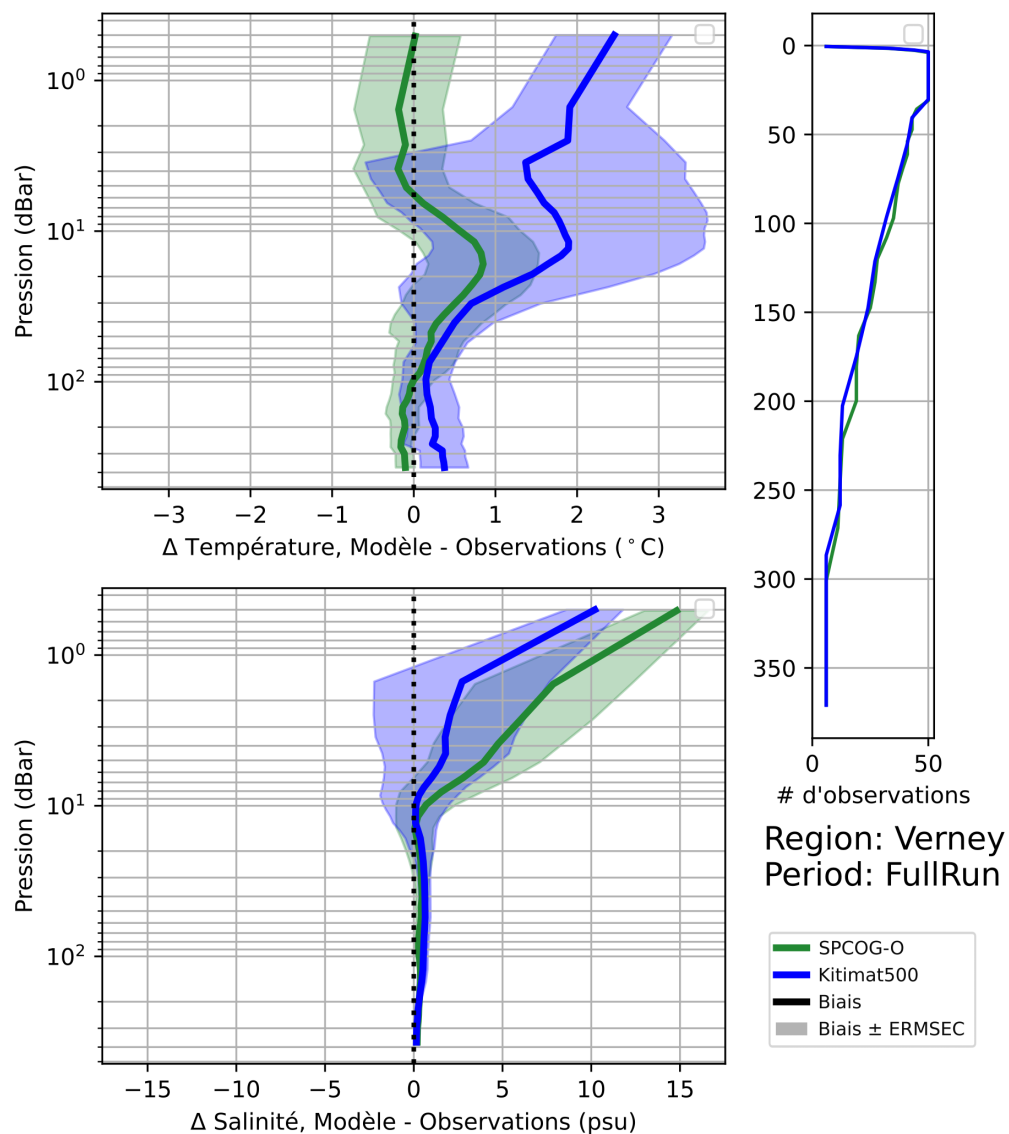


Figure 67. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du passage Verney située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

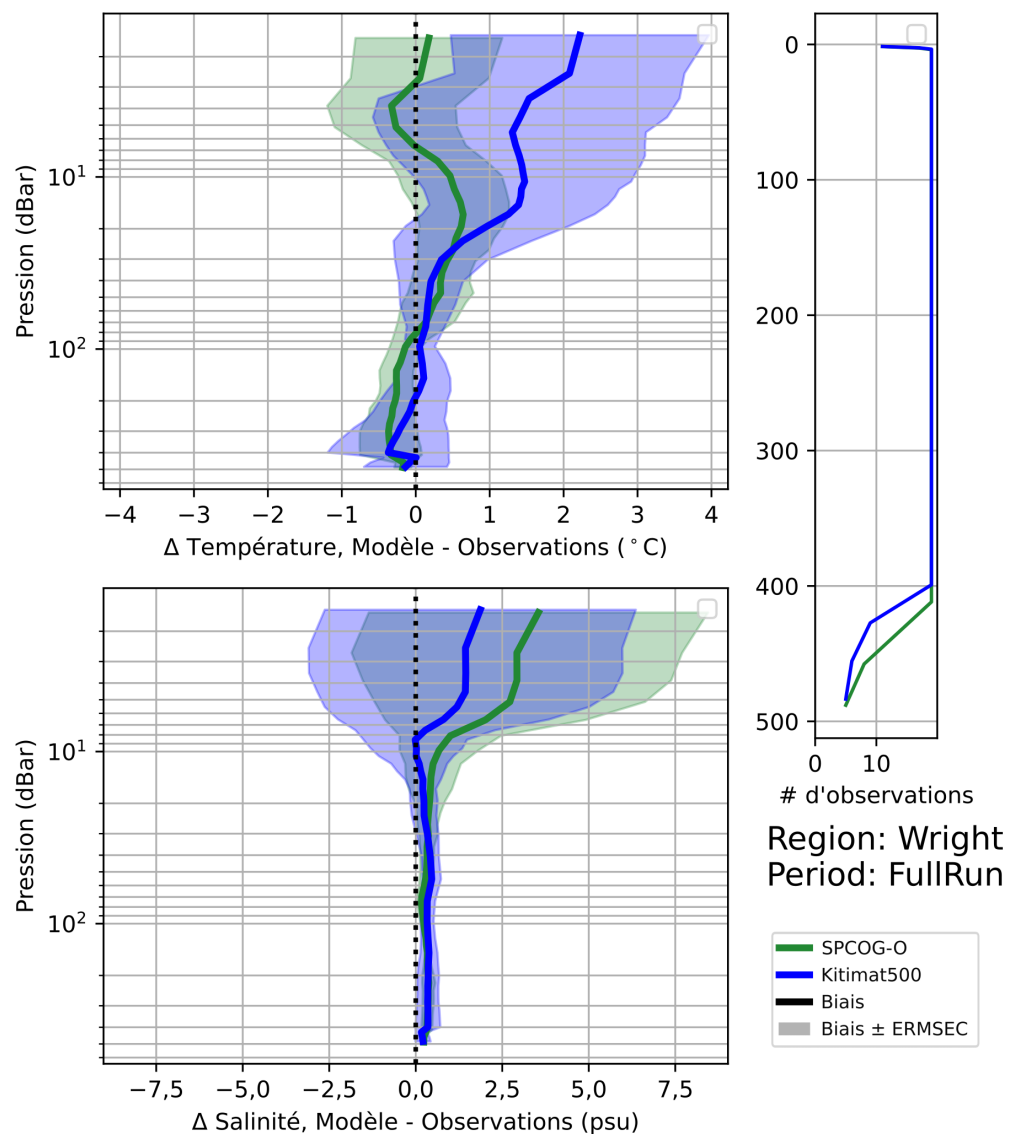


Figure 68. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du passage Wright située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

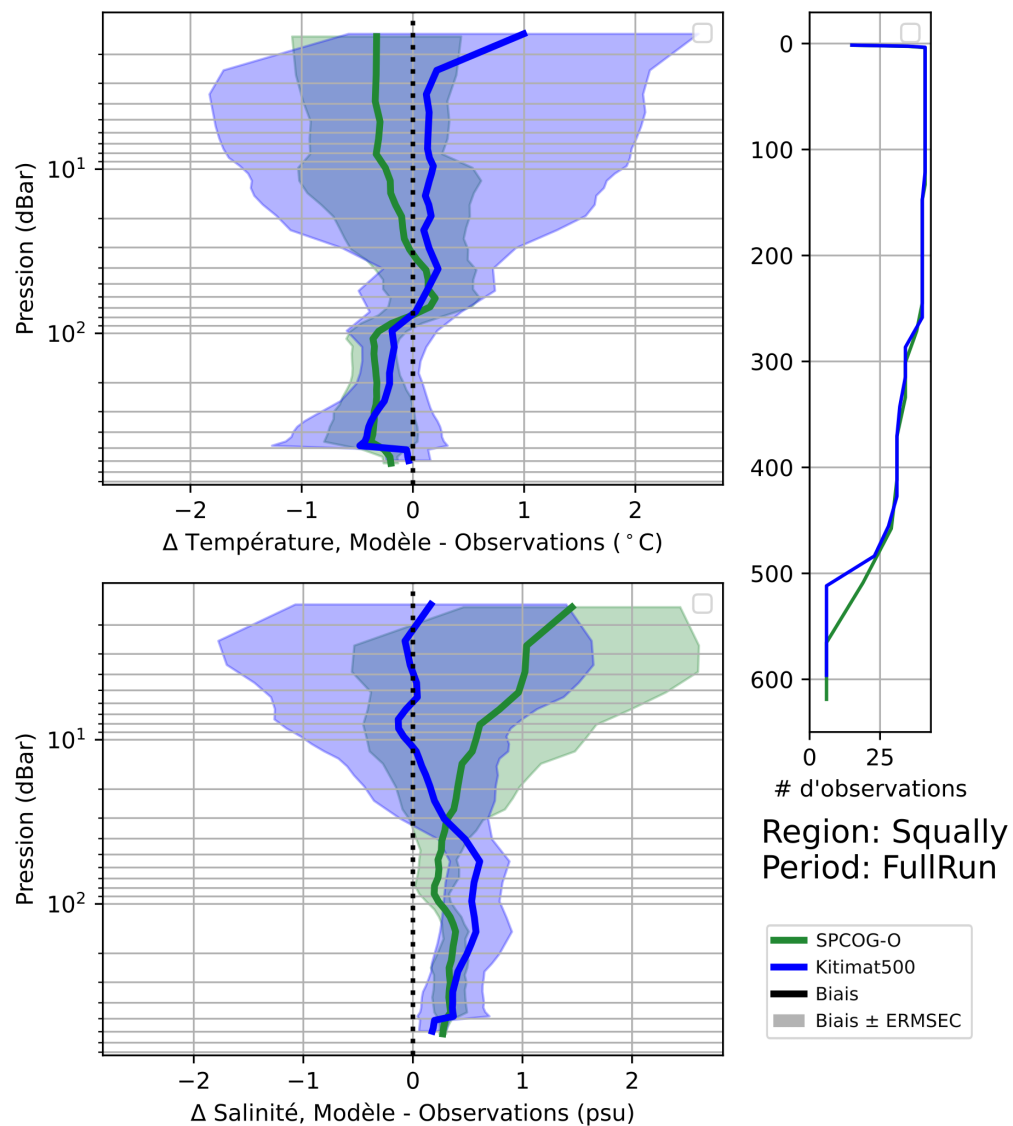


Figure 69. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du chenal Squally située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

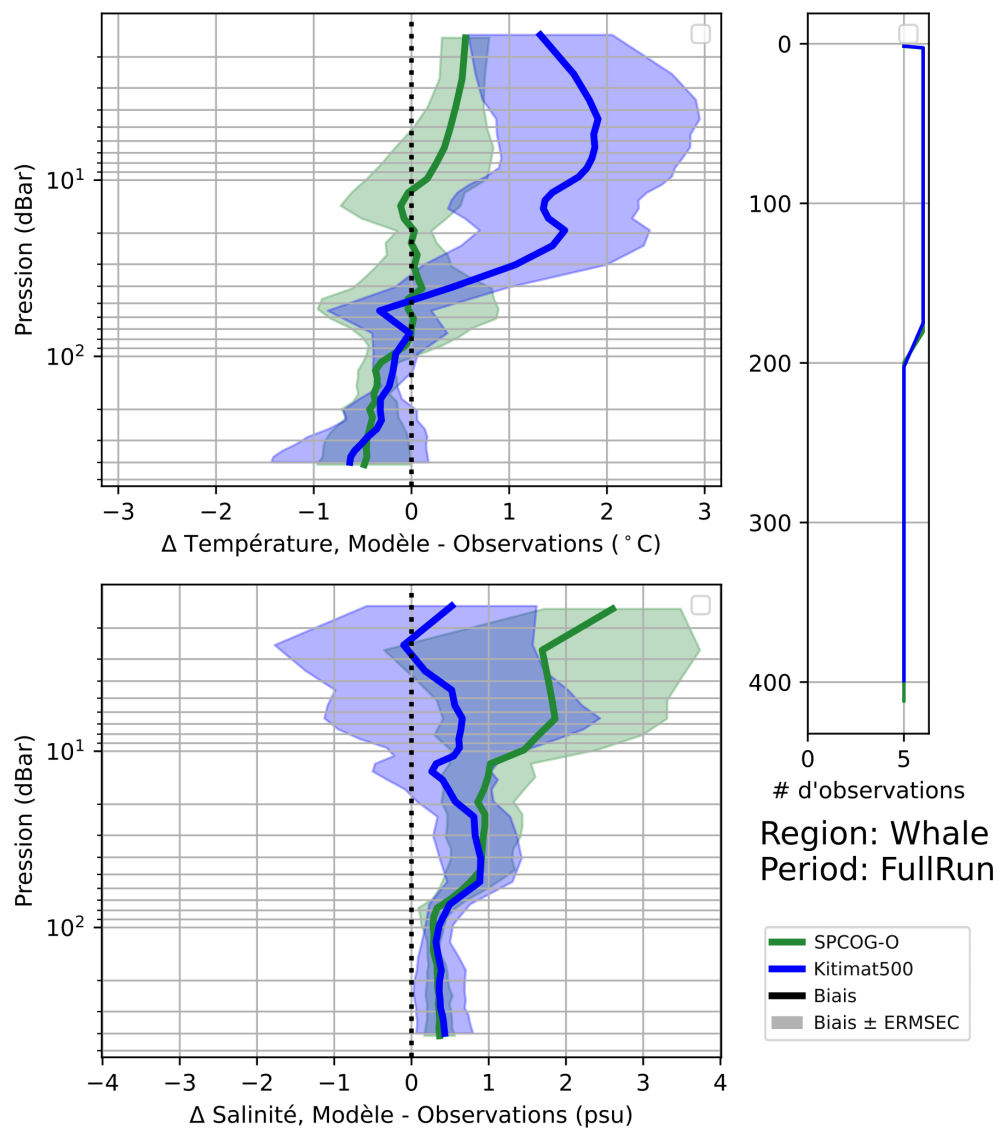


Figure 70. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du chenal Whale située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

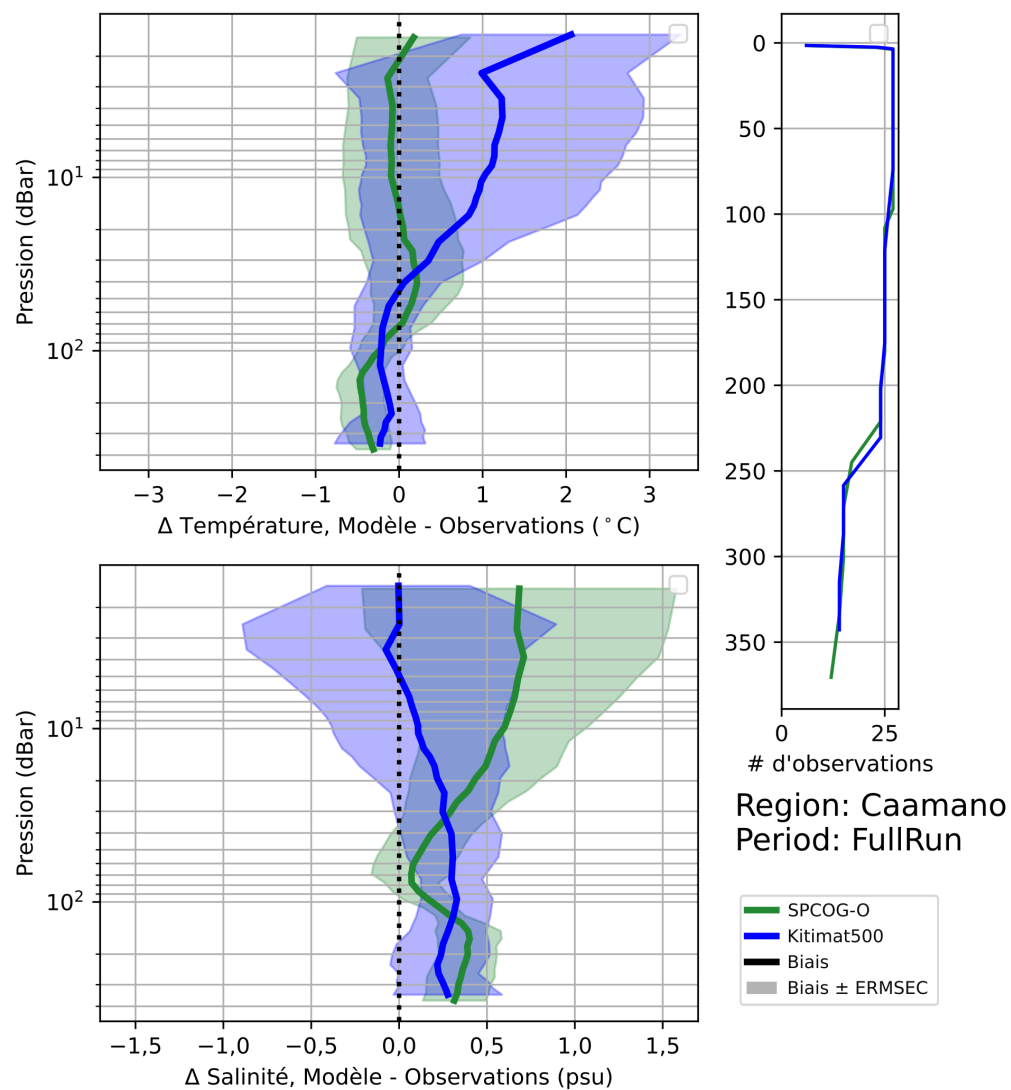


Figure 71. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région de l'entrée Caamaño située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

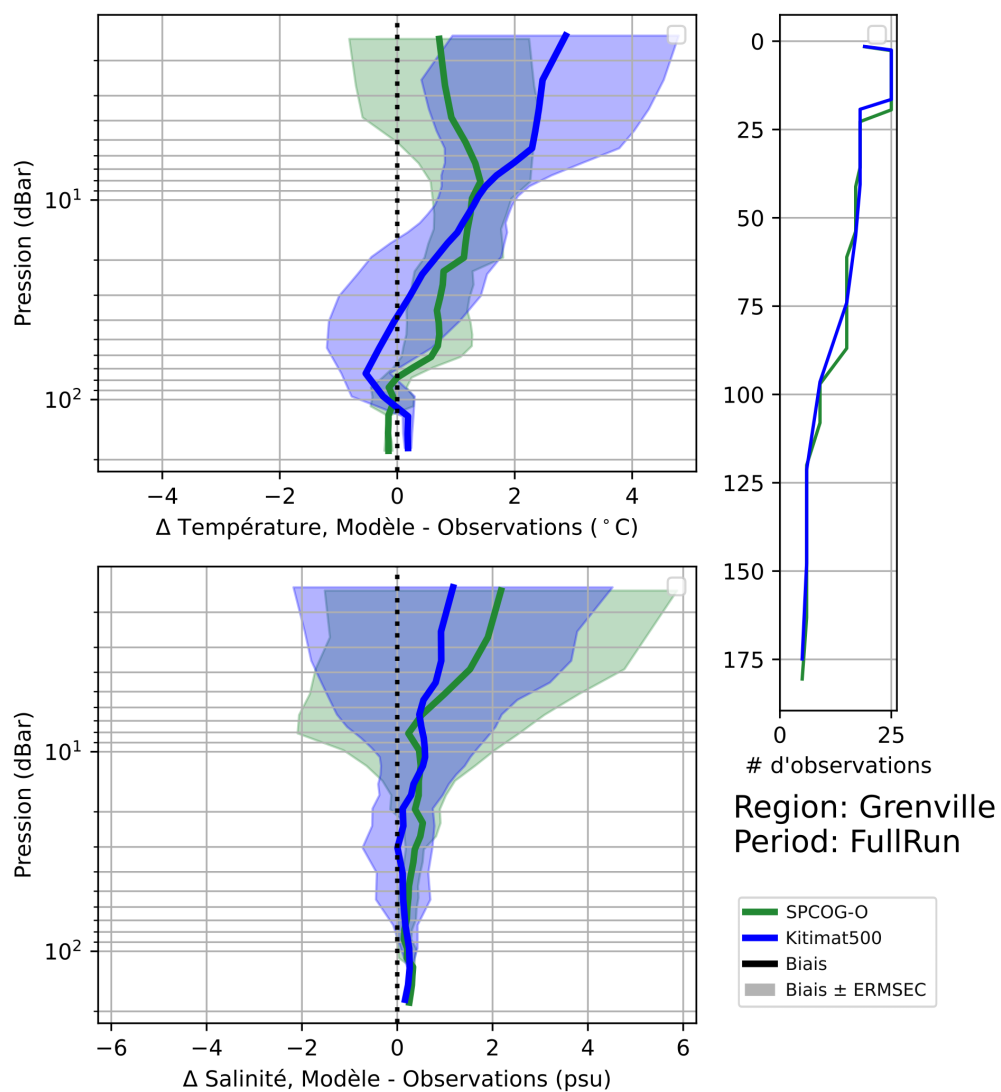


Figure 72. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du chenal Grenville située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

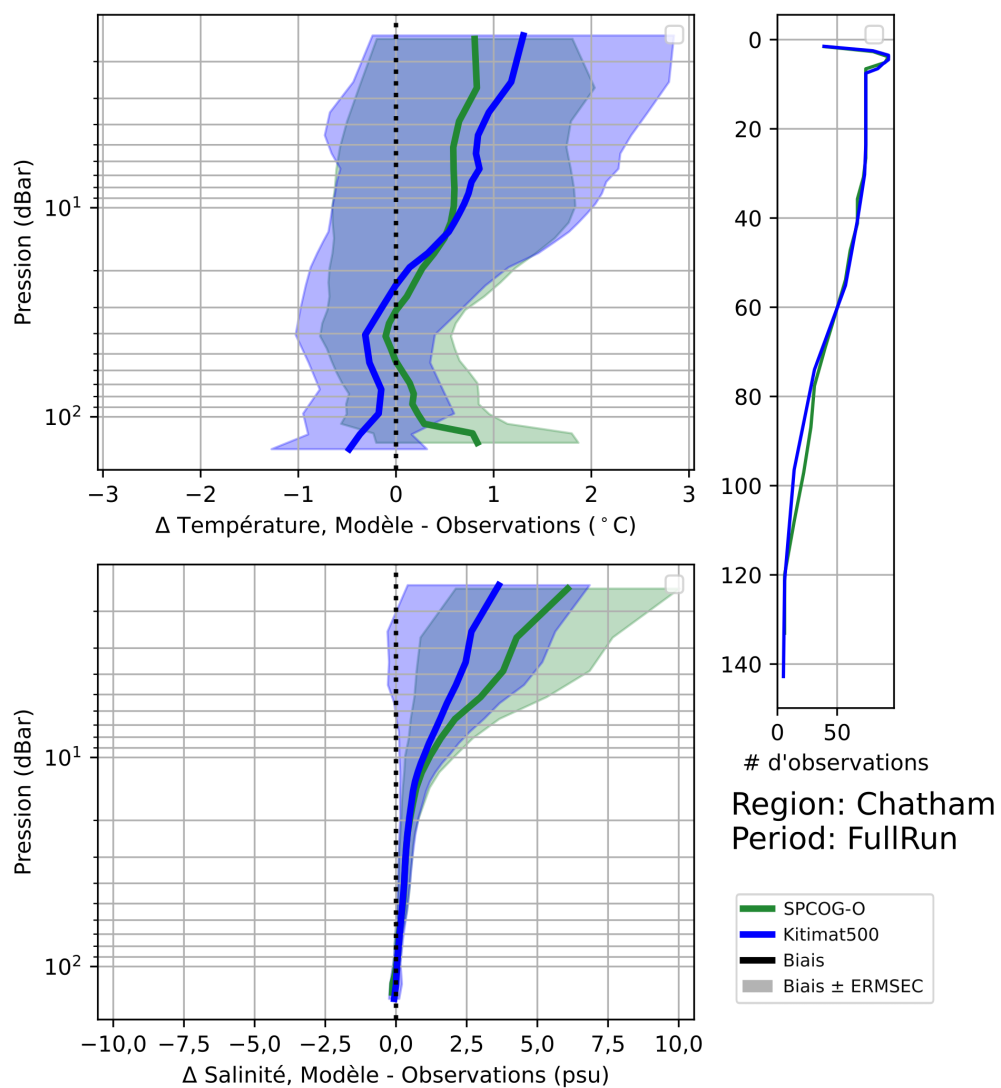


Figure 73. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du détroit de Chatham située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

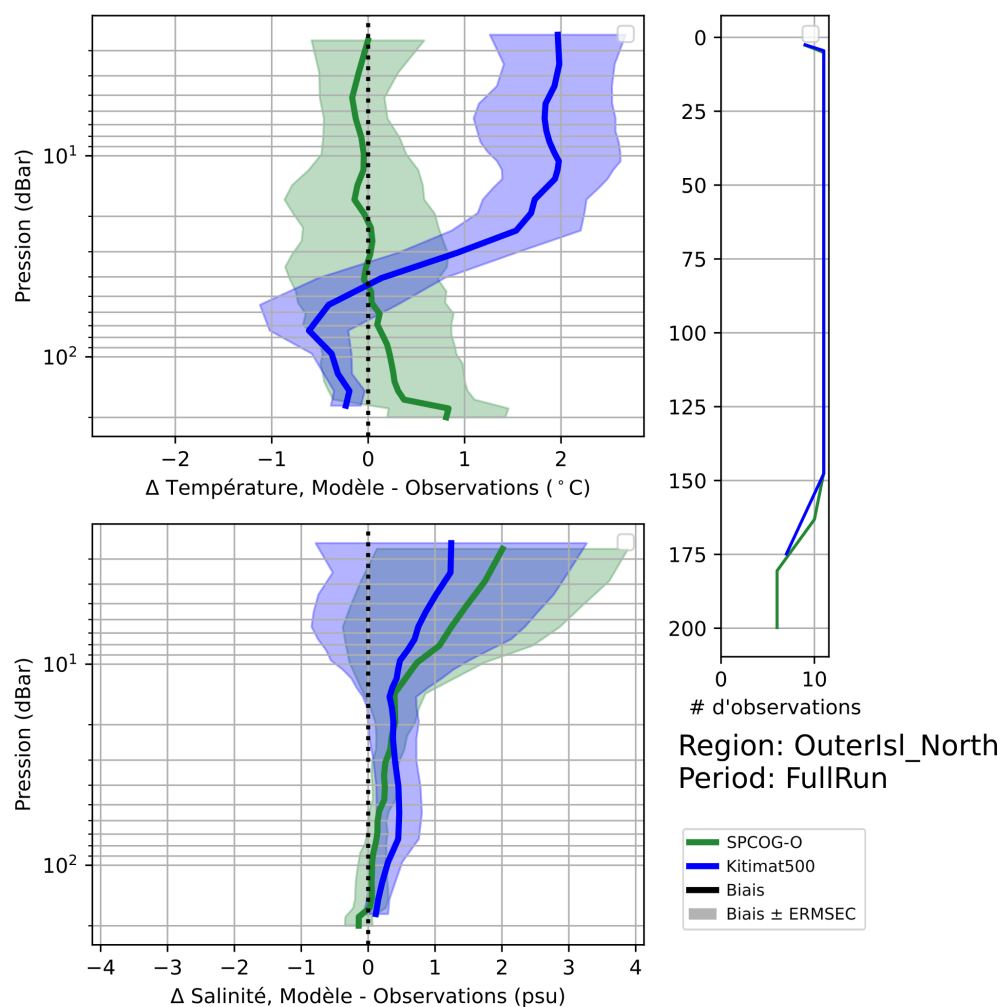


Figure 74. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du nord des îles Outer située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

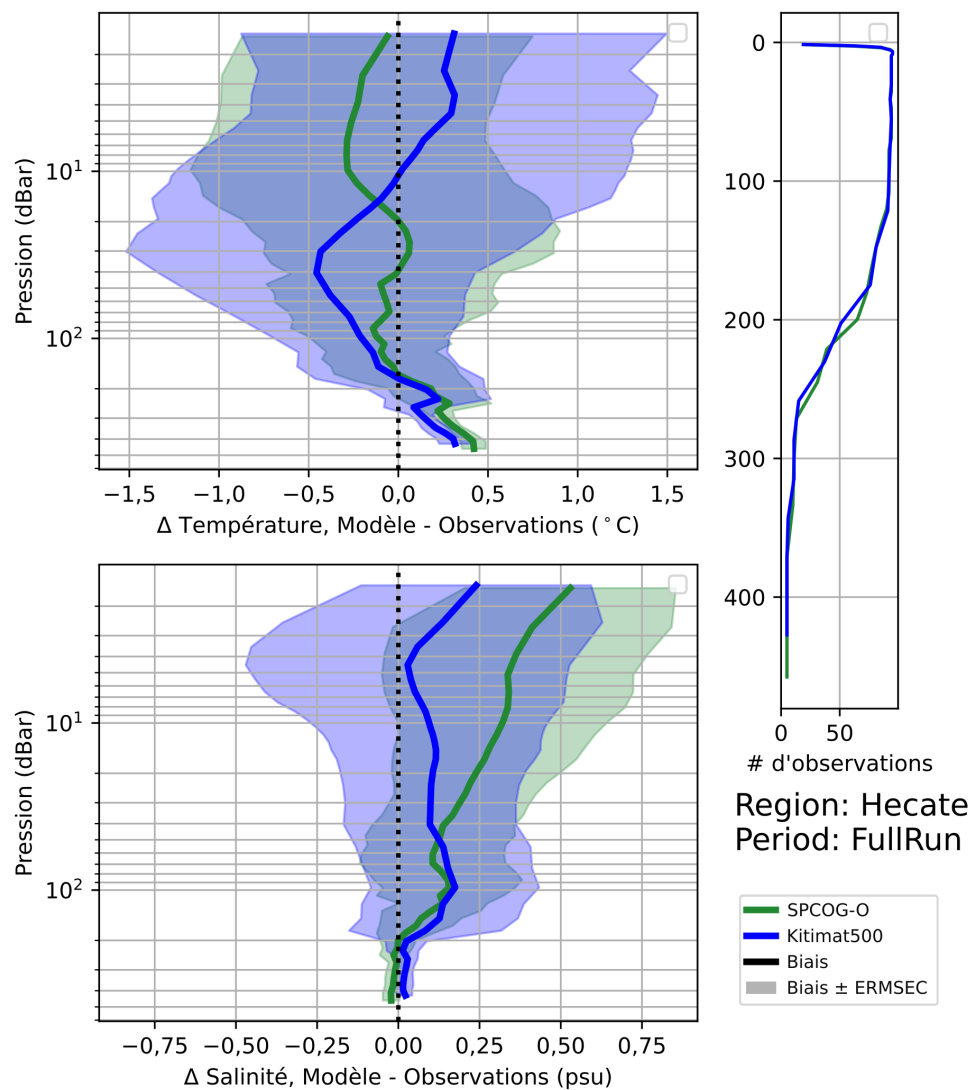


Figure 75. Comparaison des erreurs de température et de salinité par rapport aux profils CTD dans la sous-région du détroit d'Hécate située dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

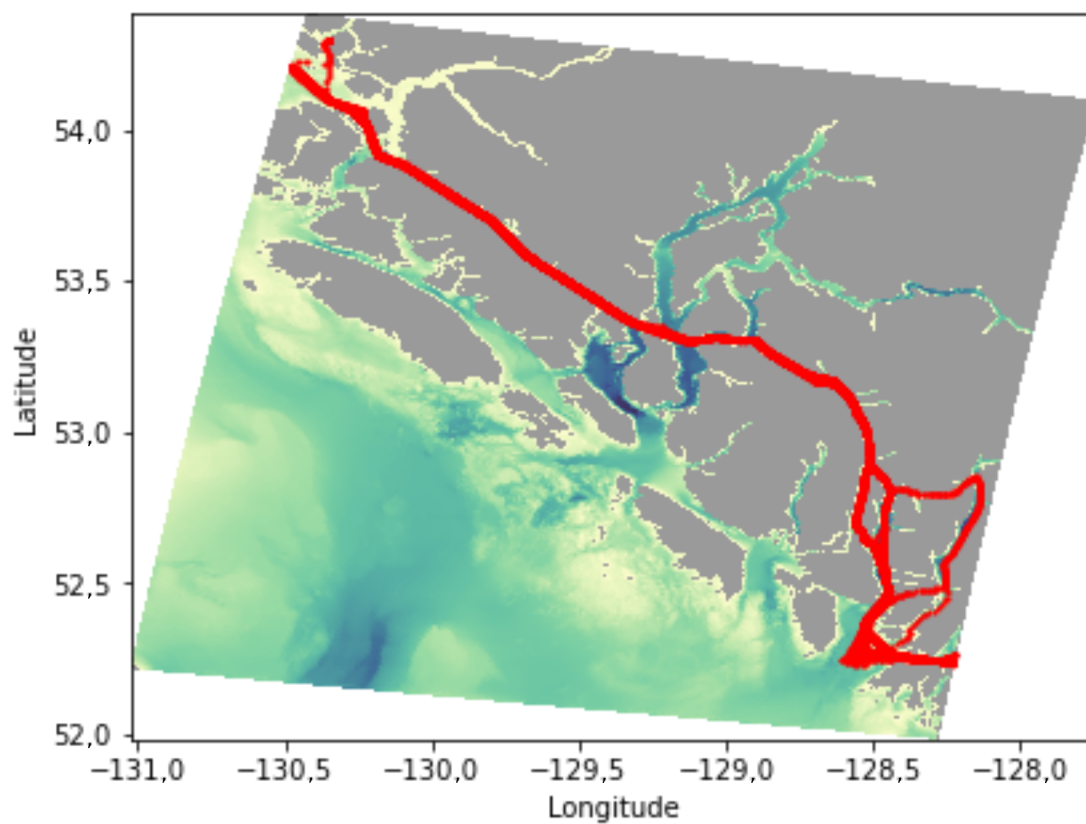


Figure 76. Graphique clé montrant le trajet du traversier entre Bellingham et l'Alaska dans le domaine du modèle de Kitimat à 500 m.

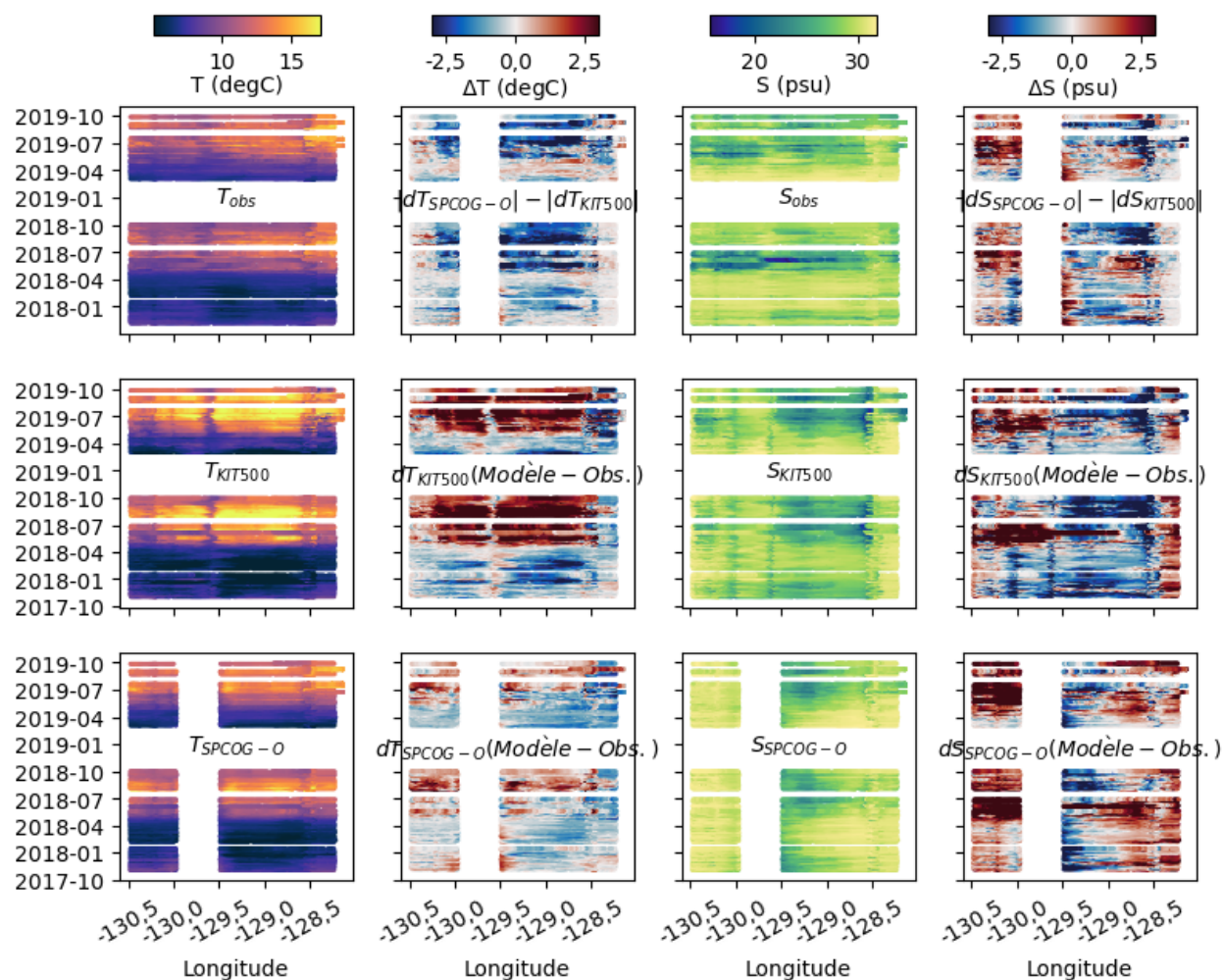


Figure 77. Comparaison entre les mesures de la température de la surface de la mer et la salinité provenant du traversier entre Bellingham et l'Alaska (premier et troisième graphique de la rangée du haut) et les valeurs modélisées à partir de la configuration à 500 m du modèle de Kitimat et du SPCOG-Ouest (rangées du milieu et du bas). Les différences entre les résultats du modèle et les observations sont indiquées dans les graphiques des deuxième et quatrième colonnes des rangées du milieu et du bas. Dans la rangée du haut, les graphiques de ces colonnes montrent les différences entre l'écart absolu des données modélisées par rapport aux observations. Dans les graphiques, le rouge indique que la configuration à 500 m du modèle de Kitimat fournit les données les plus semblables aux observations, tandis que le bleu indique que c'est le SPCOG-Ouest.

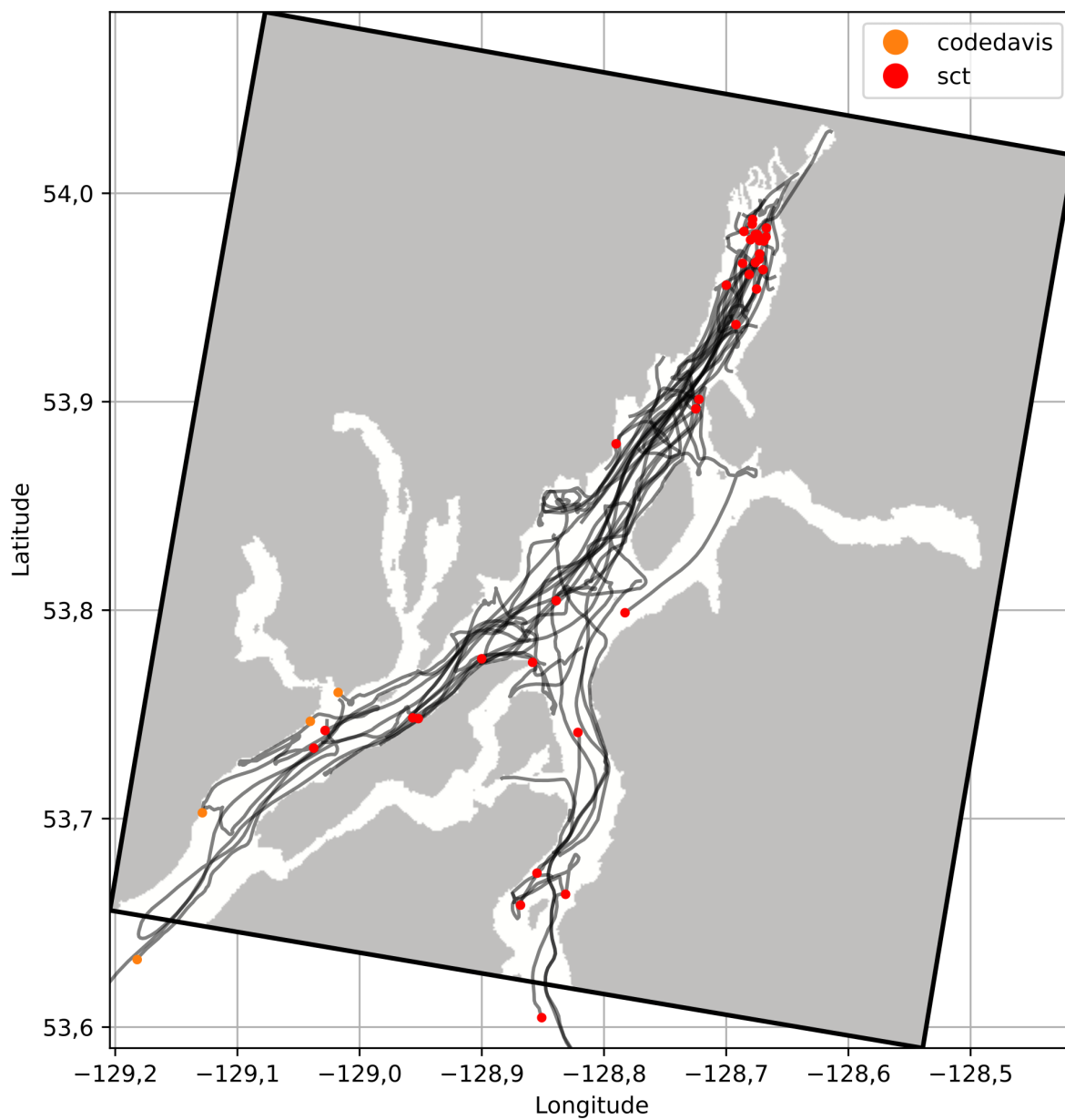


Figure 78. Carte des observations de bouées dérivantes dans le domaine à 100 m du modèle portuaire de Kitimat.

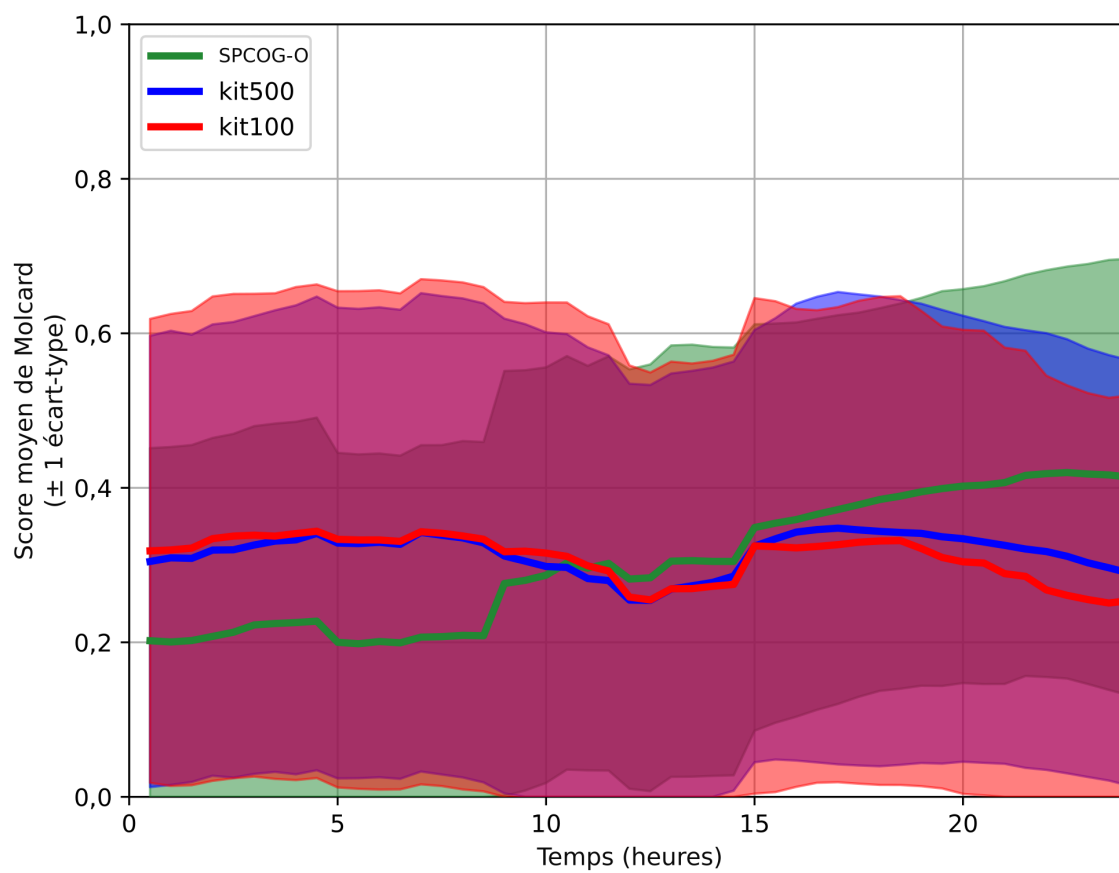


Figure 79. Évolution des scores de Molcard associés à la trajectoire des bouées dérivantes pendant une période de 24 heures, dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat.

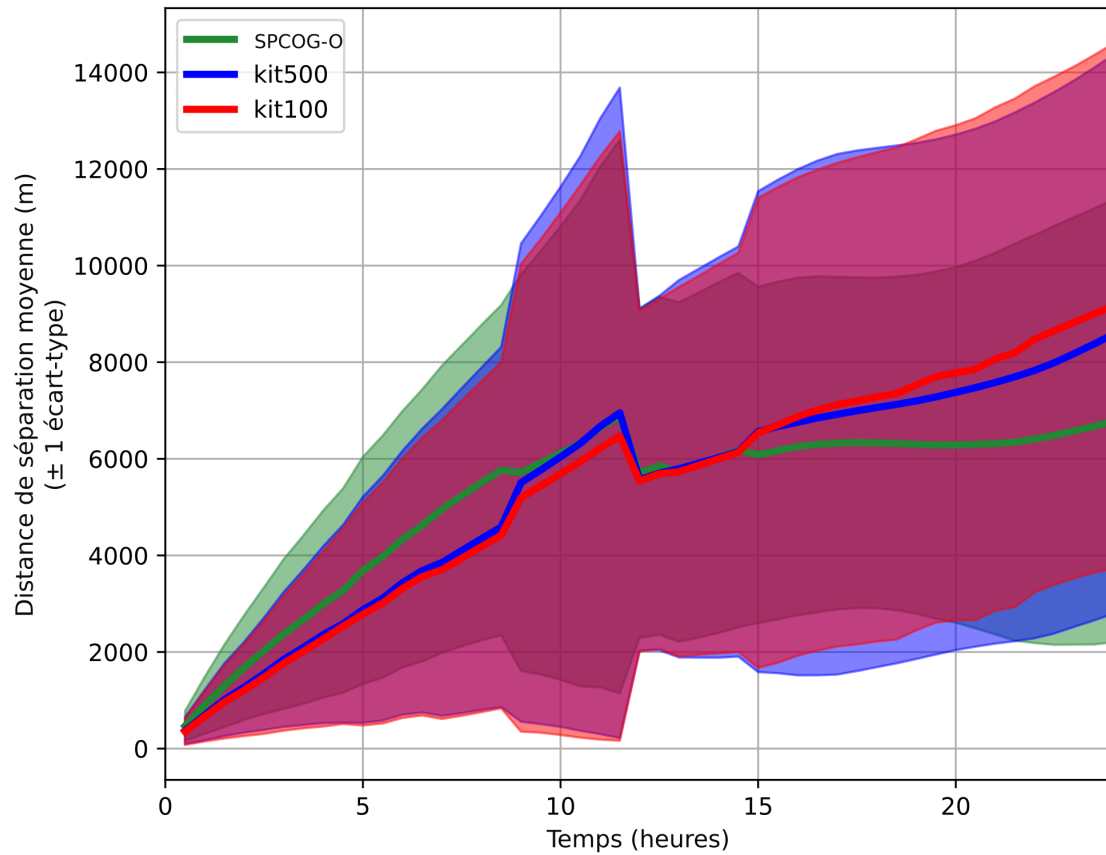


Figure 80. Évolution de la distance de séparation entre les bouées dérivantes observées et modélisées pendant une période de 24 heures, dans le domaine à 100 m du modèle de Kitimat.

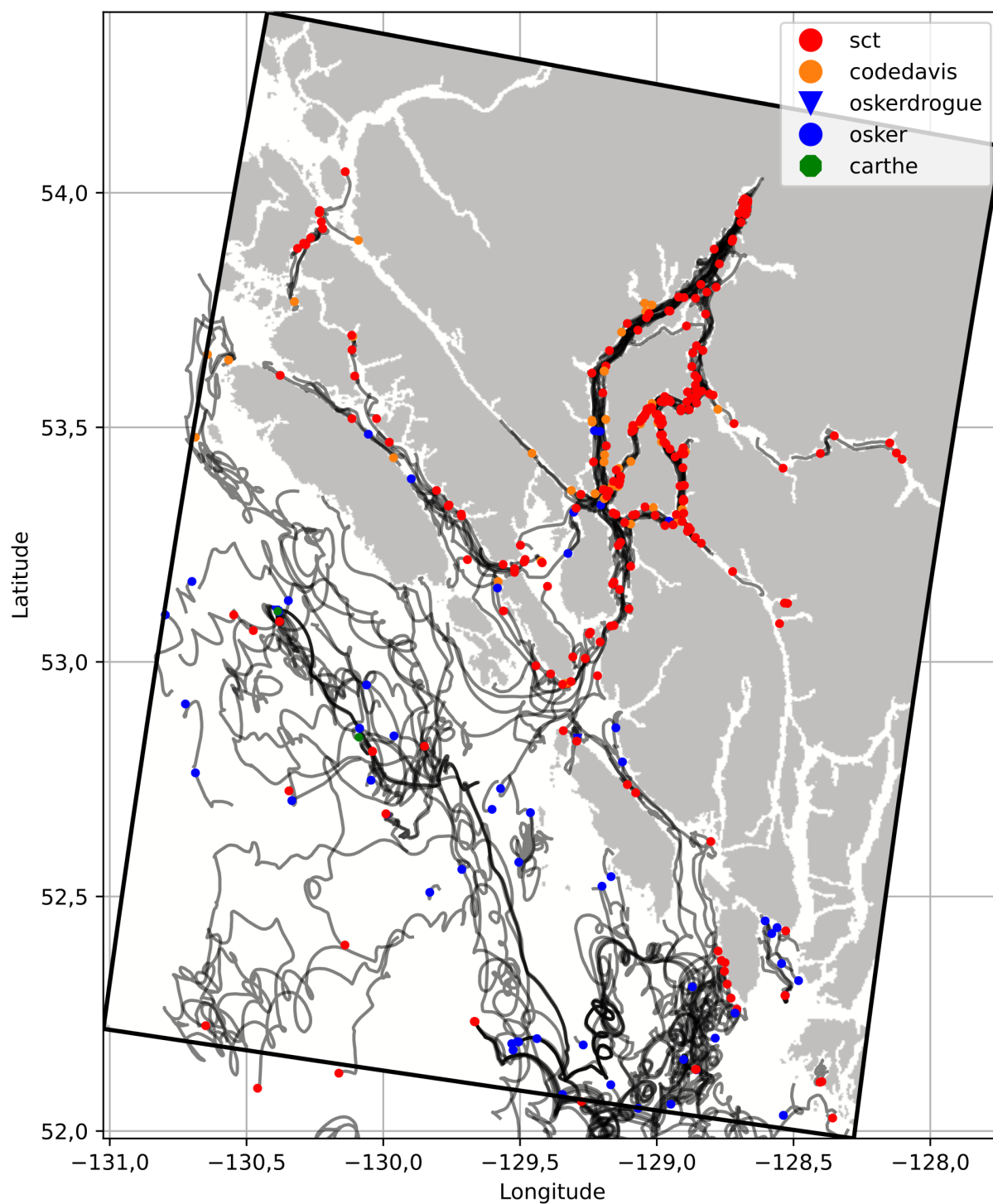


Figure 81. Carte des observations de bouées dérivantes dans le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat.

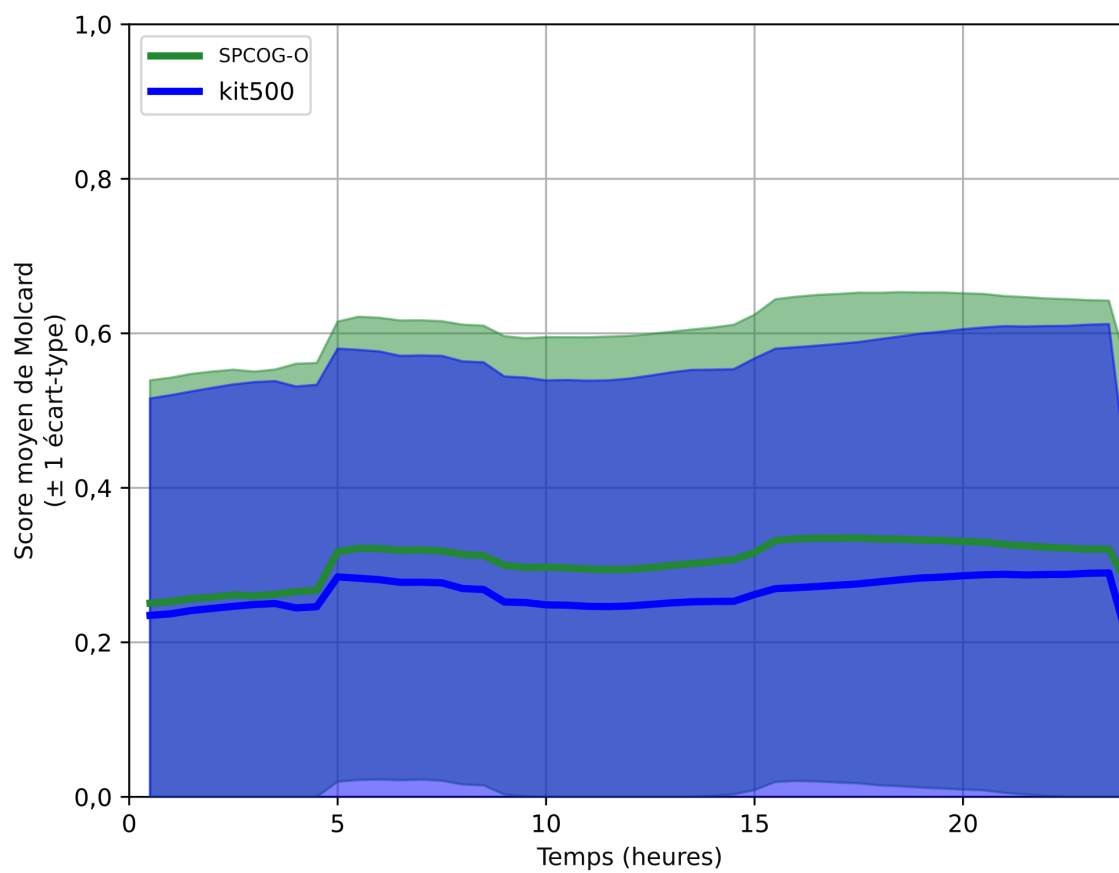


Figure 82. Évolution des scores de Molcard associés à la trajectoire des bouées dérivantes pendant une période de 24 heures, dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

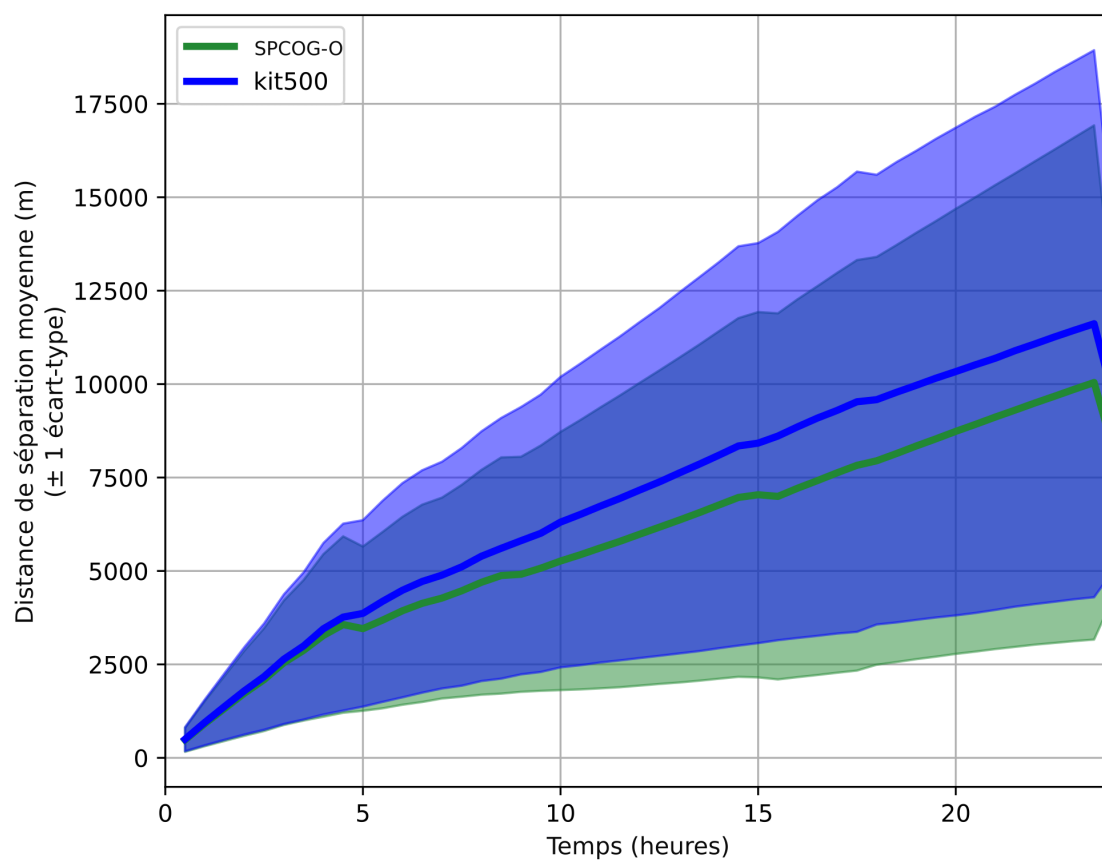


Figure 83. Évolution de la distance de séparation entre les bouées dérivantes observées et modélisées pendant une période de 24 heures, dans le domaine à 500 m du modèle de Kitimat.

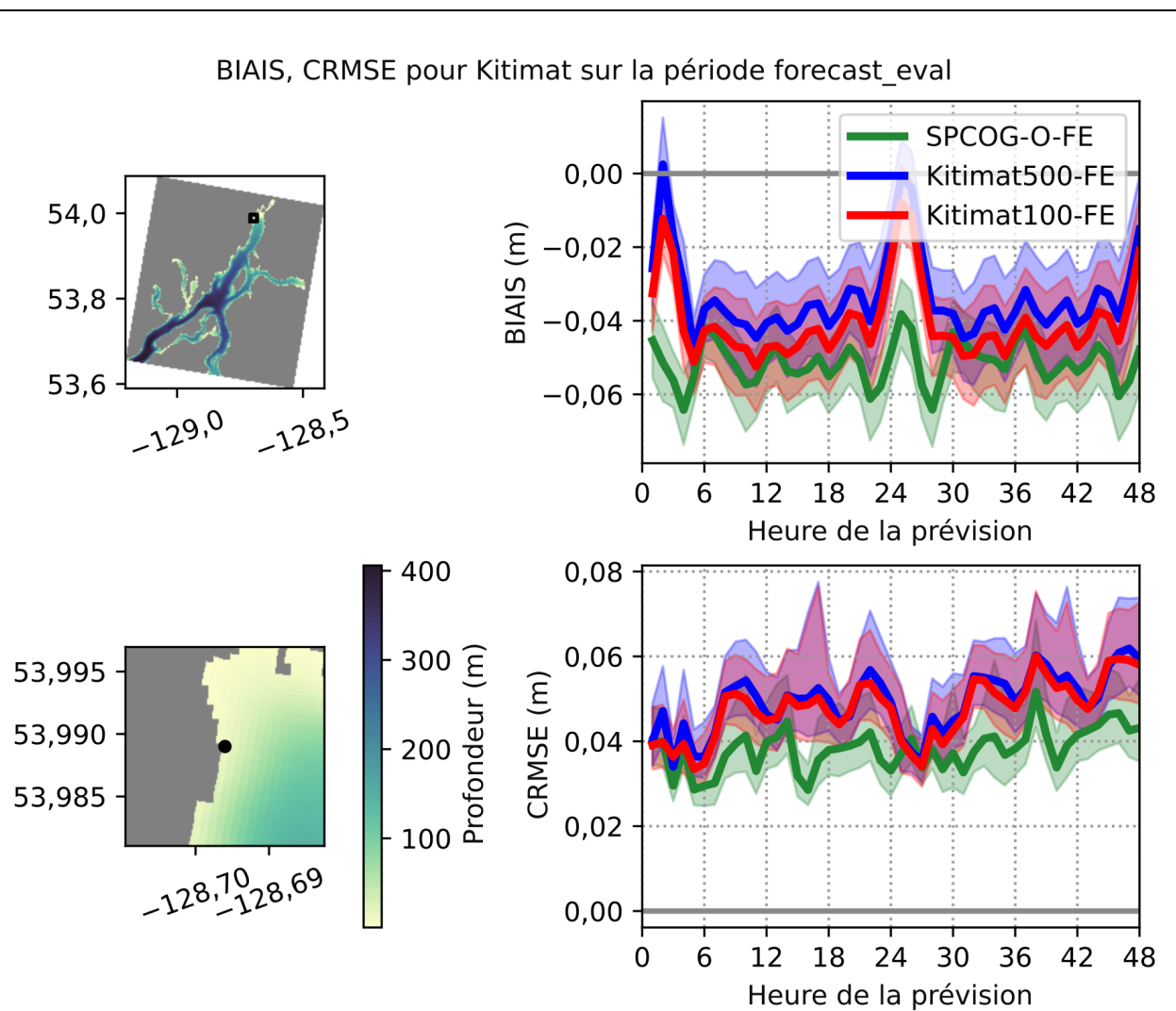


Figure 84. Évolution de l'erreur CRMSE et du biais associés à la composante résiduelle du niveau d'eau à Kitimat. Les courbes représentent le domaine à 100 m du modèle de Kitimat (rouge), le domaine à 500 m de ce même modèle (bleu) et le SPCOG-Ouest (vert).

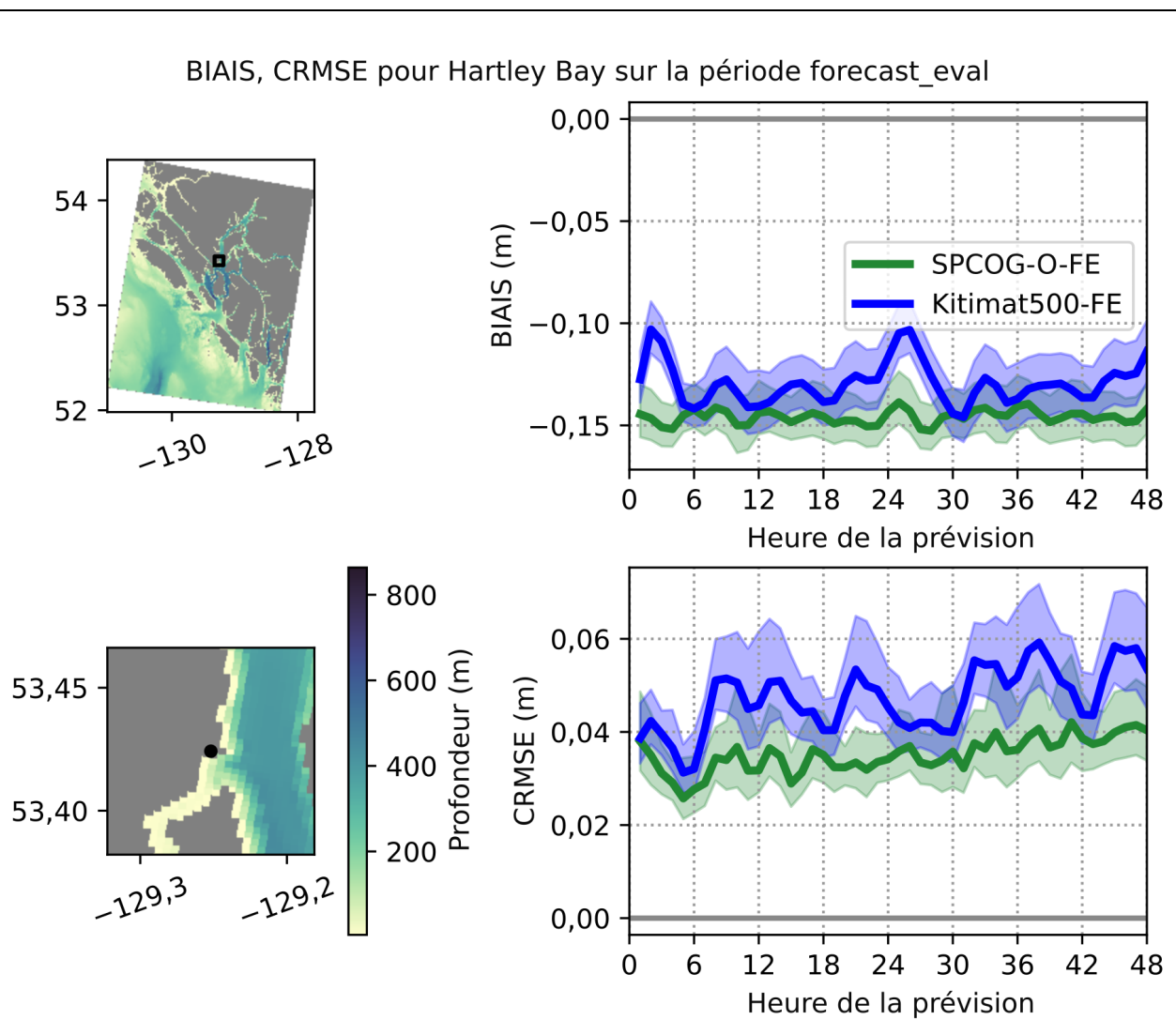


Figure 85. Évolution de l'erreur CRMSE et du biais associés à la composante résiduelle du niveau d'eau à Hartley Bay. Les courbes représentent le domaine à 500 m du modèle portuaire de Kitimat (bleu) et le SPCOG-Ouest (vert).