



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 2026/005

Région de la capitale nationale

Évaluation du système de prévisions océaniques portuaires élaboré dans le cadre du Plan de Protection des océans du Canada : Détroit de Canso

A. Drozdowski², M. Dunphy¹, S. Taylor², M. Krassovski¹, H. Blanken¹, S. St-Onge Drouin³,
R. Horwitz²

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

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

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

Avant-propos

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

Publié par :

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

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



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

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

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-97521-4 N° cat. Fs70-5/2026-005F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Drozdowski, A., Dunphy, M., Taylor, S., Krassovski, M., Blanken, H., St-Onge Drouin, S. et Horwitz, R. 2026. Évaluation du système de prévisions océaniques portuaires élaboré dans le cadre du Plan de Protection des océans du Canada : Détroit de Canso. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2026/005. viii + 87 p

Also available in English:

Drozdowski, A., Dunphy, M., Taylor, S., Krassovski, M., Blanken, H., St-Onge Drouin, S., and Horwitz, R. 2026. Assessment of Port Ocean Prediction System Developed Under Canada's Oceans Protection Plan: Strait of Canso. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2026/005. viii + 83 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	viii
1. INTRODUCTION.....	1
2. CONCEPTION DES MODÈLES PORTUAIRES.....	1
2.1. SÉLECTION DU MODÈLE.....	1
2.2. STRATÉGIE DE RÉDUCTION D'ÉCHELLE.....	2
2.3. SÉQUENCÉMENT DES SIMULATIONS.....	3
2.4. FORÇAGES DE SURFACE.....	4
2.5. SUITE D'AUTOMATISATION.....	4
2.6. ROBUSTESSE ET LIMITATIONS.....	4
3. DÉTROIT DE CANSO.....	5
3.1. OCÉANOGRAPHIE RÉGIONALE.....	5
3.2. DOMAINE ET CONFIGURATION.....	7
3.3. INITIALISATION.....	7
3.4. FORÇAGE AUX LIMITES OUVERTES.....	7
3.5. APPORT EN EAU DOUCE.....	8
3.6. MODÈLE DE GLACE.....	8
3.7. STABILITÉ DU SYSTÈME DE MODÉLISATION.....	8
4. PARAMÈTRES D'ÉVALUATION.....	9
4.1. SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES.....	9
4.1.1. Niveau d'eau.....	10
4.1.2. Vitesse de courant.....	11
4.1.3. Propriétés de l'eau.....	13
4.1.4. Dérive.....	14
4.2. PRÉVISIONS.....	15
5. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES.....	16
5.1. NIVEAU D'EAU.....	16
5.1.1. Hauteur moyenne de la surface de la mer.....	16
5.1.2. Niveau d'eau de la marée.....	16
5.1.3. Niveau d'eau résiduel.....	17
5.1.4. Scores globaux.....	18
5.1.5. Niveau d'eau des ondes de tempête.....	18
5.2. COURANT.....	19
5.2.1. ADCPs ancrés.....	19
5.3. PROPRIÉTÉS DE L'EAU.....	21
5.3.1. Température de la surface de la mer.....	21
5.3.2. Sondes CTD ancrées.....	21
5.3.3. Profils CTD.....	22
5.4. DÉRIVE.....	22

6.	RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES PRÉVISIONS	23
6.1.	NIVEAU D'EAU RÉSIDUEL	23
7.	RÉSUMÉ	23
8.	PRINCIPAUX RÉSULTATS	27
9.	REMERCIEMENTS.....	28
10.	RÉFÉRENCES CITÉES.....	28
11.	TABLEAUX	33
12.	FIGURES	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Principaux paramètres de configuration des modèles.	33
Tableau 2. Comparaison des composantes tidales à la station du quai de Port Hawkesbury. Pour chaque composante, les valeurs modélisées obtenues avec le SPCOG-E, le STC500 et le STC100 sont indiquées dans cet ordre, de haut en bas.	34
Tableau 3 : Emplacements des marégraphes historiques.	34
Tableau 4. Comparaison des composantes tidales en fonction des données des marégraphes historiques.	35
Tableau 5. Indices pour les niveaux d'eau à Port Hawkesbury.	36
Tableau 6. Indices pour les niveaux d'eau non tidaux pendant six périodes de tempête.	36
Tableau 7. Indices d'efficacité totaux pour les ADCP à des profondeurs standard (ensemble complet des observations; les stations représentatives sont surlignées).	37
Tableau 8. Indices d'efficacité non tidaux pour les ADCP à des profondeurs standard (ensemble complet des observations; les stations représentatives sont surlignées).	39
Tableau 9. Indices d'efficacité tidaux pour les ADCP à des profondeurs standard (ensemble complet des observations; les stations représentatives sont surlignées).	42
Tableau 10. Indices d'efficacité des modèles pour les stations d'instruments de mesure de la température à la surface de la mer et de sondes CTD.	44
Tableau 11. Scores horaires moyens pour la prédiction de dérive.	45

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma de séquençage de la pseudo-analyse (PA, en rouge) et des 4 prévisions de 48 h (en bleu) pour une date donnée. Les lignes pointillées grises sont espacées de six heures et les flèches oranges indiquent les moments où un fichier de redémarrage est généré et utilisé pour lancer l'étape suivante. La pseudo-analyse pour demain (Aujourd'hui+1) commencera avec le même fichier de redémarrage que celui utilisé pour démarrer la prévision 00Z d'aujourd'hui, et la séquence se répétera.	46
Figure 2. Domaines des modèles portuaires : (a) L'encadré STC500 montre l'emboîtement dans le SPCOG-E et la bathymétrie du SPCOG-E; (b) l'encadré STC100 montre l'emboîtement dans le domaine du STC500 et la bathymétrie du STC500. Reproduit de DH22.	46
Figure 3. Carte détaillée de la zone intérieure du port.	47
Figure 4. Sources de données originales du SHC tronquées horizontalement à 200 m. Reproduit de DH22.	47
Figure 5. Emplacements des cyclones toutes les 6 heures de 2010 à 2021.	48
Figure 6. Hauteur moyenne de la surface de la mer (m) en 2016-2021 d'après le STC500.	49
Figure 7. Variation interannuelle de la variance non modélisée ($CRSME^2$).	50
Figure 8. Niveau d'eau résiduel (non tidal) observé et modélisé (2017) et erreur à la station de mesure de Port Hawkesbury (Emplacement de la station indiqué sur la carte en encart).	51
Figure 9. Spectres de puissance du niveau d'eau total à la station de mesure de Port Hawkesbury, selon les données de 2017.	52
Figure 10. Niveau d'eau résiduel (non tidal) à la station de mesure de Port Hawkesbury pendant six tempêtes documentées.	53
Figure 11. Profil vertical du courant moyen à la station M2087.	54
Figure 12. Profil vertical du courant moyen à la station M2088.	55
Figure 13. Profil de corrélation vectorielle à la station CM1_May2016.	56
Figure 14. Profil de corrélation vectorielle à la station CM7_May2016.	57
Figure 15. Profil de corrélation vectorielle à la station M2086.	58
Figure 16. Profil de corrélation vectorielle à la station M2087.	59
Figure 17. Profil de corrélation vectorielle à la station M2088.	60
Figure 18. Profil des composantes elliptiques de M2 à la station CM1_May2016.	61
Figure 19. Profil des composantes elliptiques de M2 à la station CM7_May2016.	62
Figure 20. Profil des composantes elliptiques de M2 à la station M2086.	63
Figure 21. Profil des composantes elliptiques de M2 à la station M2087.	64
Figure 22. Profil des composantes elliptiques de M2 à la station M2088.	65
Figure 23. Profil des composantes elliptiques de K1 à la station M2087.	66
Figure 24. Profil des composantes elliptiques de K1 à la station M2088.	67
Figure 25. Courant résiduel (non tidal) à une profondeur de 10 m à la station CM1_May2016.	68
Figure 26. Courant résiduel (non tidal) à une profondeur de 10 m à la station CM7_May2016.	68

Figure 27. Courant résiduel (non tidal) à une profondeur de 10 m à la station M2086.....	69
Figure 28. Courant résiduel (non tidal) à une profondeur de 10 m à la station M2087.....	69
Figure 29. Courant résiduel (non tidal) à une profondeur de 10 m à la station M2088.....	70
Figure 30. Spectres de puissance rotatifs des courants résiduels (non tidaux) à la station CM1_May2016, à une profondeur de 10 m.	70
Figure 31. Spectres de puissance rotatifs des courants résiduels (non tidaux) à la station CM7_May2016, à une profondeur de 10 m.	71
Figure 32. Spectres de puissance rotatifs des courants résiduels (non tidaux) à la station M2086, à une profondeur de 10 m.....	72
Figure 33. Spectres de puissance rotatifs des courants résiduels (non tidaux) à la station M2087, à une profondeur de 10 m.....	73
Figure 34. Spectres de puissance rotatifs des courants résiduels (non tidaux) à la station M2088, à une profondeur de 10 m.....	74
Figure 35. Température à la surface de la mer observée et modélisée à la station est de la baie de Chedabucto.....	75
Figure 36. Température à la surface de la mer observée et modélisée à la station ouest de la baie de Chedabucto.....	76
Figure 37. Température et salinité observées et modélisées à la station CB_10m.	77
Figure 38. Température et salinité observées et modélisées à la station CB_48m.	78
Figure 39. Température et salinité observées et modélisées à la station CW_55m.	79
Figure 40. Emplacements des profils CTD. Les lignes noires indiquent les régions intérieur (STC100_dom) et extérieure (STC500-100_dom) utilisées dans l'analyse.	80
Figure 41. Profils verticaux du biais $\pm$ la CRSME pour la température et la salinité pour les profils CTD dans la région intérieure (STC100_dom).	81
Figure 42. Profils verticaux du biais $\pm$ la CRSME pour la température et la salinité pour les profils CTD dans la région extérieure (STC500-100_dom).	82
Figure 43. Trajectoires des bouées dérivantes observées. Les points rouges indiquent les lieux de largage.	83
Figure 44. Indice d'efficacité de Molcard selon l'analyse de la dérive.	84
Figure 45. Distance de séparation moyenne selon l'analyse de la dérive.	85
Figure 46. Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel moyen selon l'échéance de la prédiction en heures à la station de Port Hawkesbury. Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.	86

RÉSUMÉ

Le Plan de protection des océans (PPO) du Canada a été lancé en 2016 pour appuyer des initiatives visant à protéger notre environnement marin contre les pressions anthropiques. À cette fin, dans le cadre de la sous-initiative « Amélioration de la prévision des courants de dérive et de la modélisation près des côtes » du PPO, six modèles hydrodynamiques à haute résolution ont été élaborés à l'échelle des ports en vue d'améliorer la sécurité des activités de navigation et d'assurer une intervention opérationnelle en cas d'urgence environnementale, comme les déversements d'hydrocarbures en milieu marin. Les modèles ont été conçus à une échelle plus fine à partir des Systèmes de prévision côtiers océan-glace pour les côtes est et ouest (SPCOG-E et SPCOG-O). Les forçages atmosphériques ont été tirés du Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD). La performance des modèles est évaluée par comparaison avec les données d'observation disponibles et avec le modèle parent SPCOG-E à l'aide d'une simulation rétrospective pluriannuelle. Les évaluations des prévisions de 48 heures sont effectuées sur une période de deux mois.

Le présent document fait état de l'évaluation des modèles portuaires imbriqués du détroit de Canso (STC500 et STC100). Le niveau de l'eau était bien modélisé par les trois modèles examinés, les indices étant meilleurs d'environ 10 % dans le cas du modèle portuaire à la résolution la plus fine (STC100). L'analyse a montré qu'il ne reste que 2,2 % de variance non modélisée, dont la majeure partie se trouve dans la composante non tidale. La stabilité des modèles a été démontrée par la constance des scores et des composantes tidales pour chacune des cinq années examinées. Les scores obtenus durant les phénomènes météorologiques extrêmes (six grosses tempêtes) se situaient dans la plage attendue, sauf dans le cas de deux tempêtes pour lesquelles les modèles sous-estimaient l'oscillation de seiche des eaux du port. L'évaluation de la prévision des niveaux d'eau a révélé que les scores des modèles se situaient dans la plage acceptable au cours de la période de prévision de 48 heures. Pour ce qui est de l'évaluation des courants, les modèles portuaires ont donné de bien meilleurs résultats par rapport au SPCOG-E dans les zones côtières et là où la topographie a joué un rôle, particulièrement près du fond. Aucune amélioration importante n'a été constatée pour les stations examinées sur le plateau continental. Cependant, l'analyse des bouées dérivantes a révélé une amélioration modérée des scores de dérive par rapport au SPCOG-E. En général, les scores pour la température et la salinité des modèles portuaires étaient proches de ceux du SPCOG-E, mais présentaient des améliorations importantes près du fond dans les régions côtières, là où la résolution de la bathymétrie exerce une influence. Les modèles portuaires ont permis, plus particulièrement, de modéliser le renouvellement des eaux profondes par-dessus le seuil, un processus non résolu par le SPCOG-E.

1. INTRODUCTION

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

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

Le présent document a pour objectif de présenter les performances du modèle portuaire (« système de prévisions océaniques portuaire », ou SPOP) développé pour le détroit de Canso et son approche. La conception commune à tous les systèmes est présentée en section 2, tandis que la section 3 décrit les éléments spécifiques au modèle du détroit de Canso. 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 détroit de Canso. Les performances du SPOP du détroit de Canso sont ensuite 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, Liu et Beardsley 2003) dans le cadre du programme du système de sécurité de classe mondiale pour les navires-citernes (SSCMNC), qui a produit les prototypes des modèles pour les ports de Canso, de Kitimat et de Vancouver. Auparavant, des modèles, fondés sur les travaux de Backhaus (Backhaus 1983; 1985), ont été élaborés pour l'estuaire du Saint-Laurent (Saucier and Chassé 2000) et le golfe du Saint-Laurent (GSL) (Saucier 2003). Ces travaux ont

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

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

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

2.2. STRATÉGIE DE RÉDUCTION D'ÉCHELLE

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

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

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

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

2.3. SÉQUENCEMENT DES SIMULATIONS

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

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

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

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

2.4. FORÇAGES DE SURFACE

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

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

2.5. SUITE D'AUTOMATISATION

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

2.6. ROBUSTESSE ET LIMITATIONS

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

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

- Une longue simulation rétrospective a été réalisée pour évaluer la performance du modèle. Cette longue simulation démontre que le modèle est stable pour un ensemble de conditions météorologiques et de forçages qui varient sur plusieurs années. Dans certains cas, la période rétrospective échantillonne certains événements extrêmes, 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. DÉTROIT DE CANSO

3.1. OCÉANOGRAPHIE RÉGIONALE

Des cartes de la zone portuaire se trouvent à la figure 2 et à la figure 3. Une brève description du port est tirée de Drozdowski et Horne (2022), ci-après DH22 :

« Le détroit de Canso est en fait un fjord de 20 km de long et de 2 à 3 km de large formé de parois abruptes et d'un chenal principal de 35 à 55 m de profondeur au-delà d'un seuil de 30 m près de son embouchure. On a conservé le nom du détroit d'origine qui séparait l'île du Cap-Breton du continent et qui a été bloqué par un pont-jetée dans les années 1950. Le pont-jetée, muni d'une petite écluse pour la circulation des petits et moyens navires pendant les mois sans glace, sépare la tête du détroit du golfe du Saint-Laurent. Le modèle actuel a traité le pont-jetée comme une limite terrestre fermée, car le débit y est négligeable (Bugden et al., 2020). Le détroit est relié au plateau ouvert par la baie de Chedabucto, une grande baie d'environ 20 km sur 30 km et d'une profondeur pouvant atteindre 150 m. La région compte deux rivières, Guysborough et Inhabitants, dont les débits mensuels climatologiques moyens culminent en avril à 17 et à 33 m³ s⁻¹ respectivement. La totalité de la zone côtière de Canso-Chedabucto a un bassin hydrographique de 2 148,4 km² pour un débit maximal de 155 m³ s⁻¹ (Gregory, 1993). Les propriétés des eaux de la région sont représentatives de la partie intérieure de l'est

du plateau néo-écossais (B. Petrie et al., 1996), en grande partie influencée par les eaux provenant du golfe du Saint-Laurent. » [Traduction libre].

Le cycle saisonnier de la température et de la salinité et de la stratification dans la région sont résumés dans Drozdowski et Jiang (2020), ci-après DJ20 :

« La salinité augmente depuis la surface jusqu'à une profondeur d'environ 100 m (couche supérieure) de façon quasi linéaire pour toutes les saisons; elle est presque constante en dessous (couche inférieure). La salinité en surface atteint un maximum de 30,5 pendant l'hiver et le printemps et un minimum d'environ 29,7 à l'automne, ce qui concorde avec le débit sortant du golfe du Saint-Laurent et du courant de la Nouvelle-Écosse (Drinkwater et al., 1979). La salinité de la couche inférieure atteint un maximum d'environ 33 en été et baisse à 32,3 en hiver. Les profils de température sont également presque linéaires dans la couche supérieure et presque constants dans la couche inférieure. Les températures de surface varient considérablement tout au long de l'année, de près de 0 °C en hiver à un maximum de 15 °C en été. Les températures de fond ne varient pas de façon significative durant l'année, demeurant entre 0,5 °C et 2 °C. Le profil de salinité est le principal facteur de stratification menant à des fréquences d'oscillation liée à la flottabilité supérieures à 0,01 s⁻¹ dans la couche supérieure tout au long de l'année. C'est seulement en été que la température contribue de façon importante à la stratification, lorsqu'elle pousse la fréquence d'oscillation liée à la flottabilité à sa valeur saisonnière la plus élevée, autour de 0,025 s⁻¹. » [Traduction libre].

L'amplitude moyenne des (grandes) marées dans le détroit est de 1,40 (2,00) m, comme indiqué dans Gregory (1993). Celui-ci signale des courants de marée moyens (maximums) de 0,02 (0,03) m/s dans la partie intérieure du détroit et de 0,05 (0,08) m/s dans la partie extérieure du détroit et ses approches. Les courants de marée barotropes les plus forts se trouvent à l'entrée de la baie de Chedabucto et s'élèvent à 0,2 m/s (DJ20). De plus, le détroit a une marée interne M2 active, comme indiqué dans DJ20, qui varie de façon saisonnière selon la stratification, et peut produire à son maximum des courants de marée baroclines près de la surface et du fond, qui dépassent la marée barotrope et entraînent un mélange accru par dissipation.

Le complexe du détroit de Canso et de la baie de Chedabucto présente une seiche active qui peut modifier le niveau de l'eau de dizaines de centimètres sur une période de deux à quatre heures. Barber et Taylor (1977) ont étudié la réponse de résonance de l'échancrure côtière à l'aide d'un modèle de circulation bidimensionnel et découvert que le modèle reproduisait la forte réponse de résonance observée dans la bande de deux à quatre heures des spectres de niveau d'eau. Les seiches du port sont créées par le passage des tempêtes et la présence de forçage océanique externe dans la bande de résonance (Petrie, 2022).

Le renouvellement des eaux profondes dans le détroit est limité par un seuil. DH22 mentionnent des renouvellements épisodiques des eaux profondes du type souvent observé dans les fjords :

« Comme il s'agit d'une station dans les eaux littorales profondes, isolée derrière un seuil, les caractéristiques T-S observées près du fond (CW2016-57m) sont très différentes de celles de la station CB-49m située à l'extérieur. La salinité demeure entre 30,5 et 31,5 g kg⁻¹ pendant la période d'observation. L'eau reste fraîche tout l'été, atteignant 8 °C en octobre. Il n'y avait pas de fluctuations synoptiques, et les tendances globales indiquaient une augmentation (diminution) linéaire de la température (salinité), interrompue par des événements épisodiques en escalier indiquant des intrusions d'eau de l'extérieur au-dessus d'un seuil. On sait que ce procédé contribue au renouvellement de l'eau stagnante dans les fjords (Farmer et Freeland, 1983). » [Traduction libre].

3.2. DOMAINE ET CONFIGURATION

La stratégie de conception de la grille pour les modèles portuaires visait à amener le domaine du SPCOG-E à l'échelle de la zone du port par une réduction en deux étapes de la dimension des mailles de la grille à 1/5e de celle du modèle parent. Les deux domaines modélisés du port du détroit de Canso qui en résultent ont une résolution horizontale nominale de 500 m et de 100 m (l'emboîtement et la bathymétrie sont présentés à la figure 2). Les deux grilles sont basées sur la grille ORCA tripolaire provenant du groupe Drakkar (2007). Celle du détroit de Canso à maille de 500 m (ci-après le STC500 ou Canso500) englobe le détroit de Canso, la baie de Chedabucto et les bandes côtières ainsi qu'une partie de l'intérieur de l'est du plateau néo-écossais. La grille ayant la plus fine résolution, à maille de 100 m (ci-après STC100 ou Canso100), se limite aux régions côtières du port. Les parties les plus étroites du détroit sont résolues par quatre cellules de grille dans le modèle à 500 m et vingt cellules de grille dans le modèle à 100 m. La résolution de 2,5 km du produit de forçage atmosphérique HRDPS est similaire à la largeur du détroit. Ces domaines s'étendent bien au-delà du détroit proprement dit car il y a des terminaux industriels et des points de déchargement le long du détroit et juste à l'extérieur, qui attirent un trafic maritime à haut risque dans toute la zone. La discrétisation verticale du modèle STC500 (STC100) comprend 47 (39) niveaux z avec des cellules partielles et une formulation à volume variable (Levier *et al.* 2007). La résolution verticale des deux modèles varie entre 1 m à la surface et environ 18 m dans les cellules les plus profondes. La profondeur de l'eau dans le modèle STC500 (STC100) ne dépasse pas 353 (197) m. La bathymétrie pour les deux grilles a été générée par une interpolation des fichiers de données assemblés à partir de diverses demandes (2015-2017) faites au Service hydrographique du Canada (SHC). Avant l'interpolation, la bathymétrie a été tronquée à 200 m pour le STC500 et à 50 m pour le STC100, à l'aide d'un filtre médian. L'objectif était de créer un produit plus uniforme avant l'interpolation, car les données d'origine comportaient des zones de données denses (p. ex. multifaisceaux) mélangées à des régions disposant de peu de données. La bathymétrie tronquée à 200 m est illustrée à la figure 4. La bathymétrie du modèle utilise des profondeurs rapportées au zéro des cartes (CD). Le produit CanCoast sur le littoral maritime du Canada (Atkinson *et al.* 2016) a servi à délimiter la terre de l'océan. Étant donné que le système de modélisation NEMO 3.6 ne comporte pas de formulation du processus périodique d'inondation et d'assèchement du littoral, les profondeurs d'eau de moins de 5 m ont été fixées à 5 m pour assurer la stabilité du modèle. Les principales caractéristiques de configuration du modèle figurent dans le tableau 1.

3.3. INITIALISATION

Chaque modèle portuaire a été initialisé (« démarré dynamiquement ») à l'aide des champs de température, de salinité, de hauteur de la surface de la mer et de courants enregistrés et fournis par le modèle parent. Une extrapolation de type inondation horizontale près des côtes et une extrapolation verticale près du fond ont été effectuées au besoin pour assurer l'initialisation de tous les points de la grille. Le STC500 a été initialisé le 5 février 2016, et le STC100, le 9 février 2016.

3.4. FORÇAGE AUX LIMITES OUVERTES

Les deux modèles portuaires employaient les conditions aux limites ouvertes spécifiées dans NEMO 3.6 pour les champs 3D, et suivant Flather (Flather, 1976) pour les champs 2D. Les limites du STC500 sont ouvertes à l'est, au sud et à l'ouest, tandis que celles du STC100 sont ouvertes à l'est et au sud. Les champs de température, de salinité, de hauteur de la surface de la mer et de courants aux limites ouvertes pour chaque modèle portuaire sont fournis par le modèle parent, à intervalles d'une heure. Aucun filtrage n'a été nécessaire pour corriger les

marées; ce signal était issu directement de chaque modèle parent par l'intermédiaire des champs de hauteur de la surface de la mer et des vitesses établis pour les limites ouvertes. La hauteur de la surface de la mer a été transférée du SPCOG-E au STC500 sans aucun ajustement pour le référentiel vertical, de sorte que les hauteurs de la surface de la mer du STC500 et du STC100 héritent du référentiel associé au modèle de géoïde EGM-DIR-R4 utilisé par SPCOG-E. Le référentiel vertical utilisé par le SPCOG-E n'était pas connu au moment de l'élaboration du modèle. La différence entre le zéro des cartes utilisé pour la bathymétrie et le zéro du modèle EGM-DIR-R4 utilisé pour le forçage des hauteurs de mer pourrait conduire à une petite erreur (~1,6 m) dans la profondeur totale, qui ne devrait avoir qu'un impact négligeable sur la dynamique.

Un lissage de la bathymétrie a été appliqué dans les dix premières mailles des limites ouvertes pour assurer une transition en douceur à partir du modèle parent. Pour le STC500, il a fallu appliquer un lissage supplémentaire à la limite est afin d'améliorer l'advection du signal d'eau douce côtière associé à l'écoulement des eaux du golfe du Saint-Laurent dans le domaine du port.

3.5. APPORT EN EAU DOUCE

Les apports des rivières dans la région sont peu importants. Le débit mensuel climatologique moyen combiné des deux plus grands cours d'eau, les rivières Guysborough et Inhabitants, culmine à $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en avril. Cependant, les premiers essais ont révélé que le ruissellement printanier local avait une faible incidence sur la température de la surface de la mer, laquelle était efficacement modélisée par le SPCOG-E à l'aide des apports climatologiques mensuels du ruissellement, qui déversait l'eau douce sur une grande zone littorale. Le déversement était réparti sur les sept premiers mètres et ne modifiait pas la température. La même stratégie a été adoptée pour les modèles portuaires par une interpolation de la zone de décharge du SPCOG-E à chacune des grilles des modèles portuaires.

3.6. MODÈLE DE GLACE

Aucun, mais la présence de glace sert de facteur limitant la température (section 2.2).

3.7. STABILITÉ DU SYSTÈME DE MODÉLISATION

La robustesse du système actuel de modélisation du port a été démontrée par la capacité d'effectuer un « démarrage dynamique » et d'exécuter une simulation rétrospective stable sur six ans sans que les modèles deviennent instables ou dérivent (section 5, p. ex. figure 7). La période de simulation rétrospective comprenait plusieurs événements météorologiques, parmi lesquels six ont été choisis pour une étude approfondie qui n'a révélé aucune faille dans le système de modélisation. De plus, un ensemble de 60 prévisions de 48 heures à 00Z ont été effectuées et évaluées au cours de cette période.

En plus de l'évaluation de la simulation rétrospective et des prévisions dont il est question dans le présent rapport, les modèles du détroit de Canso ont été exécutés en mode démonstration (démo) sur la grappe de calcul générique pour la science (GCGS) à l'aide d'un système d'automatisation (suite Maestro « port_models »), qui effectue les pseudo-analyses et les prévisions quotidiennes. Les modèles du détroit de Canso ont été mis en service en mode démonstration à l'été 2021 et leur exécution s'est poursuivie jusqu'à ce qu'elle soit interrompue par la migration de l'infrastructure de la GCGS en 2022.

Des essais sous contrainte systématiques, notamment l'application d'un forçage excessif, visant à sonder les limites de stabilité n'ont pas été effectués au moment de la rédaction du présent rapport et sont réservés pour des travaux futurs.

4. PARAMÈTRES D'ÉVALUATION

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

4.1. SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.1.1. Niveau d'eau

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

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

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

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

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

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

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

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

4.1.1.1. Évaluation des ondes de tempête

Pour évaluer la performance des modèles lors des tempêtes, une poignée de périodes de tempête sont sélectionnées pour chaque port. La base de données sur les cyclones de Zhang, Perrie et Long (2019), qui fournit les trajectoires mondiales des tempêtes de 1958 à 2021 (la figure 5 montre un zoom sur l'Amérique du Nord) guide la sélection. La base de données a été consultée pour sélectionner les tempêtes qui sont passées dans un rayon de quelques centaines de kilomètres du domaine de chaque modèle portuaire. Ceci fournit une liste complète des tempêtes survenues pendant la période de la simulation rétrospective pour chaque port. Cependant, cette liste est assez longue pour certains ports (en particulier Canso et Saint John) et les listes les plus longues sont réduites en prenant en compte la pression minimale au centre de la dépression, en examinant les marégraphes et les rapports des médias locaux sur les impacts des tempêtes. L'évaluation suit l'évaluation des niveaux d'eau résiduels de la simulation rétrospective pour ce qui est des scores de performance et des graphiques, mais se limite aux périodes de tempête.

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

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

4.1.2. Vitesse de courant

Les données de courant sont tirées des profileurs acoustiques de courant par effet Doppler acoustique (ADCP) et de quelques courantomètres installés selon l'une des quatre configurations suivantes : monté sur un mouillage de fond, monté sur une bouée (i.e., flottant), dans un flotteur remorqué par un navire ou monté horizontalement sur une structure côtière (ADCP horizontal). Seules les composantes horizontales (est-ouest/nord-sud, u/v) des courants sont prises en compte ici. La décomposition en vitesse/direction du courant horizontal est également considérée et les directions sont calculées comme positives dans le sens horaire à partir du nord.

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

Les mesures de courants sont plus bruitées, ont tendance à avoir plus de données manquantes, sont moins stationnaires et sont influencés par plus de processus non linéaires

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

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

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

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

4.1.2.1. ADCPs horizontaux

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

4.1.2.2. Courantomètres et ADCPs ancrés

Les courantmètres enregistrent le courant à une seule profondeur, de sorte que ces courants sont évalués à la profondeur propre à chaque instrument. Dans le cas des ADCPs installés sur des mouillages de fond ou des bouées, un ensemble standard de profondeurs est sélectionné pour chaque port pour évaluer les courants, en tenant compte de la bathymétrie locale et de la disponibilité des données; par souci de concision, les statistiques ne peuvent être fournies qu'à

certaines profondeurs pour chaque instrument considéré. Ces niveaux sont définis soit par rapport à une surface nominale (i.e., une surface sans variation de la hauteur de la surface de la mer), soit par rapport à la surface de la mer variable dans le temps. Pour les régions où les ADCPs sont installés dans des eaux relativement profondes sans grande amplitude des marées, il suffit d'utiliser la surface nominale. Pour les régions peu profondes ou celles où l'amplitude des marées est importante, l'évaluation est effectuée par rapport à la surface de la mer variable dans le temps, en utilisant la profondeur totale observée pour traiter les observations et la surface de la mer modélisée pour traiter les courants modélisés.

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

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

4.1.2.3. Transects d'ADCPs

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

4.1.3. Propriétés de l'eau

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

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

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

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

4.1.4. Dérive

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.2. PRÉVISIONS

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

modèle aux données de marégraphes, aux températures de surface de la mer et aux enregistrements des ADCPs horizontaux. Pour des raisons logistiques, l'ensemble des prévisions ont été réalisées lors de l'hiver 2021/22. La performance des prévisions a été évaluée comme étant l'écart (biais et erreur 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

La simulation rétrospective du modèle STC500 couvre la période du 5 février 2016 au 31 janvier 2022 pour un total de 2 187 jours. La simulation rétrospective du modèle STC100 couvre la période du 9 février 2016 au 30 janvier 2022 pour un total de 2 182 jours. L'évaluation a été effectuée à partir des données d'observation disponibles pendant la période de simulation, et les résultats sont présentés ci-dessous pour les deux modèles portuaires et le SPCOG-E. Les données d'observation disponibles sont résumées dans chacune des sous-sections ci-dessous, qui sont divisées par catégorie d'instruments.

5.1. NIVEAU D'EAU

Le niveau d'eau modélisé a été validé au moyen de la seule station de mesure du niveau d'eau du SHC qui est présente dans le domaine modélisé. La station ([ID=00575](#)) est située à Port Hawkesbury, en Nouvelle-Écosse (45,6167° N, 61,3667° O; son emplacement est indiqué en encart sur la figure 8) et fournit des données horaires. La série chronologique a été rapportée du zéro des cartes au système CGVD28, comme indiqué à la section 4.1.1. Le décalage entre le zéro des cartes et le CGVD28 pour cette station était de -0,884 m. De plus, le niveau d'eau du modèle a été adapté à partir du référentiel EGM-DIR-R4 hérité de SPCOG-E au système CGVD28 par l'application d'un décalage constant de -0,622 m pendant l'analyse.

5.1.1. Hauteur moyenne de la surface de la mer

La carte de la hauteur moyenne de la surface de la mer pour la période de 2016 à 2021, tirée des données du modèle STC500, est présentée à la figure 6. La hauteur moyenne varie de -0,42 à -0,35 m dans le domaine, avec un gradient positif en direction du littoral et le long de celui-ci. L'échelle absolue de hauteur provient du système de référence vertical du modèle parent, et la carte servira à convertir l'élévation modélisée au référentiel CGVD28. Les gradients d'élévation reflètent l'ajustement de la hauteur stérique relatif au courant de la Nouvelle-Écosse (Nova Scotia Current (NSC) ; Drinkwater *et al.* 1979), qui est entraîné par le flux d'eaux plus fraîches et plus légères en provenance du golfe du Saint-Laurent (GSL).

5.1.2. Niveau d'eau de la marée

Le tableau 2 présente une comparaison des composantes individuelles de la marée provenant des stations de mesure de niveau d'eau et des trois modèles pour 2017. Seules les

composantes diurnes et semi-diurnes ont été étudiées, car elles constituent la partie dominante du signal de marée. M2 était la composante la plus dominante avec une amplitude de près de 0,6 m. Les autres contributions les plus importantes provenaient des composantes N2 et S2, dont les amplitudes représentaient un cinquième de celle de M2, tandis que les amplitudes des composantes K1, O1 et K2 représentaient un dixième de celle de M2. Les contributions des composantes P1 et Q1 étaient relativement mineures.

Tous les modèles ont obtenu de bons résultats lors des comparaisons par composante individuelle, avec des erreurs d'amplitude généralement inférieures à 0,01 m et des erreurs de phase inférieures à six degrés. L'erreur totale, qui comprend l'effet combiné de l'amplitude et de la phase (distance complexe), était généralement inférieure à 0,01 m, la plus importante étant de 0,017 m pour la composante M2 de SPCOG -Est. Les modèles portuaires tendaient à présenter des erreurs plus petites, tendance plus visible pour la composante M2, pour laquelle l'erreur d'amplitude a chuté à 0,008 m pour le modèle STC500 et à 0,004 m pour le modèle STC100.

La performance pour les composantes de la marée était constante d'une année à l'autre, comme l'indique l'indice de CRMSE² totale qui leur est associé (figure 7). Par conséquent, les résultats de l'analyse des marées pour les autres années ne sont pas présentés, mais peuvent être résumés comme suit. Les fluctuations d'amplitude d'une année sur l'autre étaient inférieures ou égales à 5 mm, à la fois dans les deux modèles et dans les observations (les données d'observation pour M2 présentaient la plus grande fluctuation). Les phases modélisées de M2 variaient à l'intérieur d'une plage de 0,2 degré, et celles des composantes N2 et S2, à l'intérieur d'une plage de 1 degré. La modulation de phase augmentait progressivement avec la diminution de l'amplitude des composantes. La fluctuation des composantes O1, K1 et K2 était de quelques degrés, tandis que celle de P1 et Q1 a atteint 20 degrés. Les fluctuations importantes des phases de ces composantes mineures étaient cependant présentes à la fois dans les données d'observation et le modèle, ce qui suggère que le problème est lié à la résolution de l'analyse des marées plutôt qu'à la performance du modèle.

Deux enregistrements marégraphiques historiques situés à l'intérieur du détroit de Canso (leurs emplacements et d'autres métadonnées figurent dans le tableau 3) étaient suffisamment longs (>29 jours) pour une analyse dans le domaine STC100. Afin que la comparaison soit aussi objective que possible, l'analyse des marées a été effectuée sur une série de longueur équivalente, et comme les composantes pour les données historiques des marégraphes provenaient d'une période antérieure à la période d'analyse des simulations rétrospectives, la date du début de notre analyse a été fixée au premier jour du même mois que les marégraphes. Par exemple, si l'analyse des marégraphes a été effectuée en juin 1999, le début de l'analyse est fixé au 1er juin 2016. Les composantes disponibles dont les amplitudes dépassent 0,04 m et les composantes modélisées correspondantes issues de l'analyse des marées des simulations rétrospectives sont présentées dans le tableau 4. Dans l'ensemble, la concordance est similaire à celle obtenue avec les données marégraphiques à long terme (tableau 2), mais légèrement moins bonne. Ceci est prévisible, car l'analyse repose sur des périodes plutôt courtes dont les dates de début diffèrent et dont certaines composantes pourraient ne pas être résolues avec autant de précision que lors de l'analyse précédente basée sur la série chronologique d'un an. Aucune représentation graphique n'a été incluse ici en raison du petit nombre de stations.

5.1.3. Niveau d'eau résiduel

La figure 8 montre une série temporelle d'un an du niveau d'eau résiduel observé et modélisés par chaque modèle, ainsi que les différences pour chacun. Les scores de performance pour les niveaux d'eau résiduels sont décrits en comparaison avec les résultats pour les niveaux d'eau de la marée et totaux dans la section 5.1.4.

5.1.4. Scores globaux

Les scores pour les niveaux d'eau modélisés à la station de Port Hawkesbury pour les deux résolutions du modèle portuaire ainsi que le modèle parent sont présentés dans le tableau 5. Les scores associés au niveau d'eau total ainsi qu'aux contributions tidales et non tidales y figurent pour chaque année complète de données pour chacun des modèles disponibles. Le biais était faible et allait de -0,01 à 0,02 m au cours des cinq années. L'erreur quadratique moyenne centrée (CRMSE) variait de 0,071 à 0,083 m pour le niveau d'eau total, de 0,061 à 0,071 m pour le niveau résiduel (non tidal) et de 0,039 à 0,046 m pour le niveau de la marée (tidal). Ce n'est pas montré dans le tableau, mais l'erreur CRMSE allait dans la direction d'une sous-estimation de la composante non tidale d'environ 25 % (voir la figure 5 de DH22). Les scores du coefficient de corrélation de Pearson (PEARSONR) étaient supérieurs à 0,984 pour le niveau d'eau total, allaient de 0,828 à 0,882 pour le niveau non tidal et étaient supérieurs à 0,995 pour le niveau tidal, ce qui montre clairement que la composante tidale a été mieux modélisée que celle non tidale. De plus, l'indice γ^2 , qui peut être interprété comme un pourcentage de la variance non modélisée, indique que dans le modèle STC100, la possibilité d'amélioration est inférieure à 1 % pour la composante tidale et s'établit entre 22 et 30 % pour la composante non tidale. Cependant, comme le signal tidal est plus important que le signal non tidal (le ratio entre la variance tidale et la variance non tidale était de 12,4 dans les observations), le niveau d'eau total ne pourrait être amélioré que de 2,2 à 2,8 %. Dans l'ensemble, les scores indiquent une légère amélioration dans les modèles portuaires par rapport au modèle parent, en particulier pour le STC100, qui a constamment surpassé les autres modèles (voir plus loin).

La figure 7 résume la performance des modèles au cours des cinq années examinées. La mesure illustrée est la CRMSE², qui représente la variance non modélisée absolue et qui a pour propriété que l'on peut additionner les composantes tidale et non tidale pour obtenir le total (c'est pourquoi il s'agit d'un diagramme à barres superposées). La figure montre que la performance du modèle est stable d'une année à l'autre, la fluctuation étant d'environ 10 %. L'erreur liée à la composante non tidale représentait environ les deux tiers du total de la CRMSE², ce qui indique qu'il s'agissait de la principale source d'erreurs. Le modèle STC100 a constamment surpassé les deux autres modèles de 10 à 20 % en ce qui concerne le total de la CRMSE². Les composantes tidales et non tidales ont contribué à l'amélioration de la performance du modèle à la plus haute résolution.

La figure 9 montre les spectres de puissance du niveau d'eau observé et modélisé à Port Hawkesbury. Il y a une grande concordance entre tous les modèles et les données d'observation pour les basses fréquences. Les pics de marée et de surcote sont bien modélisés, bien qu'il y ait un large épaulement autour du pic semi-diurne que les modèles ne reproduisent pas. La bande des seiches (5 à 10 cycles par jour [c/j]) semble présenter un double pic. Un pic prononcé apparaît à 5 c/j et un autre plus large à 7-10 c/j. Le second pic est celui identifié par Barber et Taylor (1977), mais la nature de celui à 5 c/j n'est pas claire. Les modèles reproduisent les deux pics comme des caractéristiques, mais la puissance modélisée ne représente qu'environ 1/10e de la puissance observée.

5.1.5. Niveau d'eau des ondes de tempête

Au total, six tempêtes ont été choisies, soit la plus importante de chaque année de simulation rétrospective. Les scores de performance associés au niveau d'eau résiduel (non tidal) pour la période de tempête (y compris les deux jours précédant et les deux jours suivant le point culminant) sont présentés dans le tableau 6. L'erreur CRMSE dépasse légèrement la plage des scores annuels compilés et décrits dans la section 5.1.4, atteignant 0,095 pour la tempête « Christmas ». Seule la tempête « Teddy » avait une erreur CRMSE dans la plage annuelle

normale, peut-être parce qu'elle était plutôt faible comparativement aux autres. En général, un signal plus fort entraîne une erreur CRMSE plus importante, comme DH22 l'ont constaté dans une analyse semblable en fonction des saisons. De plus, les indices γ^2 et PEARSONR de la tempête « Christmas » se situaient dans la plage annuelle normale, ce qui suggère que ces indices normalisés sont plus appropriés ici, car la CRMSE reflète en grande partie l'intensité de la tempête. Ceci pris en compte, seules les tempêtes du 23 octobre 2016 et du 24 novembre 2021 avaient des indices γ^2 et PEARSONR en dehors de la plage annuelle. Les séries chronologiques des tempêtes sont illustrées à la figure 10. Il s'est produit un phénomène de seiche important pendant cette tempête que les modèles ne reproduisent pas et qui est manifestement la source des grandes erreurs. La série chronologique de la deuxième tempête mal modélisée présentait aussi un fort effet de seiche. Dans l'ensemble, les indices des modèles à haute résolution étaient légèrement meilleurs.

5.2. COURANT

5.2.1. ADCPs ancrés

Dix-sept profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) étaient disponibles pour l'évaluation. Les données rassemblées comprenaient des observations recueillies en 2015-2017 dans le cadre du système de sécurité de classe mondiale pour les navires-citernes (SSCMNC). De plus, trois déploiements ont été effectués en 2018-2019 pour l'initiative du PPO. Pour connaître les emplacements et des métadonnées supplémentaires, voir Drozdowski *et al.* (2018) en ce qui concerne le SSCMNC, et Schillinger (2022) en ce qui concerne les instruments du PPO. L'ensemble des données a été évalué en fonction des scores pour le courant total et pour les composantes tidale et non tidale à des profondeurs standard que les modèles peuvent résoudre (tableau 7 à tableau 9). Les profondeurs non résolues ont été laissées en blanc. Les profondeurs standard ont été choisies pour représenter la colonne d'eau (10, 20, 30, 40, 50, 60 et 70 m). Un sous-ensemble représentatif de toutes les données (mis en évidence dans les tableaux des scores) a été retenue aux fins de l'analyse approfondie et des graphiques. Parmi les données du SSCMNC, ce sous-ensemble comprenait le détroit principal (CM1_May2016; ci-après CM1) et l'entrée du détroit (CM7_May2016; ci-après CM7). Parmi les données du PPO, il comprenait la baie de Chedabucto (M2086) ainsi que le flanc nord (M2087) et le flanc sud (M2088) du banc de Canso. Comme les deux dernières stations se trouvaient sur le plateau néo-écossais, seuls le STC500 et le SPCOG-E ont été évalués à ces emplacements.

5.2.1.1. Scores de performance

Dans l'ensemble, les indices γ^2 pour le courant total étaient inférieurs à 1,0 et s'amélioraient avec la profondeur. La station CM7 était la mieux modélisée des stations représentatives avec un indice γ^2 pour le courant total égal à 0,75 pour le SPCOG-E, inférieur à 0,45 pour le STC500 et inférieur à 0,38 pour le STC100. Les erreurs RMSE étaient d'environ 0,07 m/s à la station CM1 et se situaient entre 0,09 et 0,12 m/s à la station CM7, entre 0,09 et 0,14 m/s à la station M2086 et entre 0,11 et 0,21 m/s aux stations M2087 et M2088. L'augmentation progressive de l'erreur RMSE vers le large reflète les courants de plus en plus forts.

5.2.1.2. Profils verticaux

Les profils du courant total moyen sont indiqués dans les figure 11 et figure 12 pour les stations de l'extérieur (M2087 et M2088). Il y a un écoulement vers le sud-ouest d'environ 0,1 m/s. À la station M2087, le flux moyen est raisonnablement bien reproduit par les deux modèles. À la station M2088 cependant, il est sous-estimé par les deux modèles, mais plus fortement par le STC500. De plus, la direction du flux moyen est décalée d'environ 20° dans le STC500 et

d'environ 30° dans le SPCOG-E. Les stations à l'intérieur de l'échancrure côtière (intérieures) avaient des courants moyens négligeables et sont omises.

Les figure 13 à figure 17 montrent les profils de corrélation vectorielle pour les cinq stations représentatives. Pour la station CM1, les corrélations variaient entre 0,4 et 0,6 avec des angles proches de zéro. Le STC100 a constamment surpassé le STC500 de 0,05 à 0,1. Il y avait très peu de différence entre le total et la composante non tidale, ce qui témoigne de la faiblesse des marées barotropes à cet endroit et de la domination de l'écoulement résiduel non tidal. Les corrélations à la station CM7 sont élevées (~0,8) pour les modèles portuaires, tandis que le SPCOG-E affiche une performance inférieure en raison d'une mauvaise résolution. À cette station, la comparaison des profils de courants totaux et non tidaux montre le rôle plus important joué par les marées qui ajoutent entre 0,1 et 0,5 de magnitude à la solution non tidale, particulièrement à une profondeur de 12 à 16 m. À la station M2086, les corrélations sont plutôt faibles près de la surface (~0,4), mais augmentent graduellement pour atteindre des valeurs raisonnables d'environ 0,65 près du fond. L'influence des marées est faible ici, comme l'indique la similitude entre les scores pour le courant total et ceux pour la composante non tidale. Aux stations M2087 et M2088, les corrélations pour le courant total (courant résiduel non tidal) se situent généralement entre 0,6 et 0,7 (entre 0,5 et 0,6).

Les figure 18 à figure 24 montrent les profils des constituants elliptiques des composantes de la marée. Seule la plus grande composante (M2) est illustrée (les autres composantes sont petites) pour les stations CM1, CM7 et M2086. Pour les stations M2087 et M2088, les composantes M2 et K1 sont comprises, car elles sont toutes deux grandes. À la station CM1, l'amplitude de grand axe de la composante M2 est d'environ 0,03 m/s et est légèrement surestimée par les modèles. Les phases varient d'environ 50 degrés entre la surface et le fond, ce qui indique la présence de marées internes. La variation de phase est partiellement modélisée par le STC100. À la station CM7, l'amplitude de grand axe augmente à 0,15 m/s et est bien modélisée par le STC100. Le STC500 a obtenu de bons résultats près de la surface, mais ceux-ci se dégradent vers le fond, tandis que le SPCOG-E a donné de mauvais résultats. À cette station, la variation de phase de 50 degrés entre la surface et le fond est également présente, et bien modélisée par les deux modèles portuaires. À la station M2086, l'amplitude de grand axe de la composante M2 est d'environ 0,05 m/s et est globalement bien modélisée par tous les modèles, mais les résultats du SPCOG-E se dégradent près du fond. Aux stations M2087 et M2088, les amplitudes de grand axe des composantes M2 et K1 vont de 0,03 à 0,09 m/s et ont été raisonnablement bien modélisées par les deux modèles.

5.2.1.3. Séries chronologiques et spectres rotatifs

Les séries chronologiques montrant environ 1,5 mois de courants non tidaux près de la surface (10 m) à chacune des cinq stations représentatives sont présentées aux figure 25 à figure 29. En ce qui a trait aux stations intérieures, les modèles portuaires constituent une amélioration par rapport au SPCOG-E, en particulier à la station CM7, où ils modélisent efficacement bon nombre des grands événements de flux entrants ou sortants. En ce qui concerne les stations extérieures, le STC500 et le SPCOG-E résolvent tout aussi bien l'un que l'autre une grande partie de la variabilité observée.

Les spectres rotatifs des courants non tidaux sont illustrés aux figure 30 à figure 34. Les spectres des composantes tournant en sens horaire (CW) et en sens antihoraire (CCW) sont très similaires, et aucun signe d'oscillations inertielles n'est visible. Dans l'ensemble, les niveaux de puissance des modèles sont inférieurs aux niveaux observés, en particulier aux fréquences élevées. Pour les stations intérieures, les niveaux de puissance des modèles portuaires étaient plus près des niveaux observés que ceux du SPCOG-E à toutes les fréquences. Pour les stations extérieures, le STC500 représentait mieux la puissance aux

hautes fréquences, mais avait une performance semblable à celle du SPCOG-E pour les basses fréquences.

5.3. PROPRIÉTÉS DE L'EAU

5.3.1. Température de la surface de la mer

Nous présentons ici une comparaison entre les modèles et les observations de thermographes qui enregistrent les températures en surface. Des séries chronologiques de deux ans, provenant de deux stations météorologiques marines dans la baie de Chedabucto, à l'est (44488) et à l'ouest (44489), étaient disponibles. Les comparaisons sont présentées aux figure 35 et figure 36. Les graphiques montrent également les emplacements des mouillages. Tous les modèles ont reproduit les deux cycles saisonniers survenus durant la période d'observation, ainsi que la répartition des températures observées. Les erreurs les plus importantes tendaient à survenir durant les mois d'été, où il y avait une variabilité accrue de la remontée et de la plongée d'eau et où les modèles sous-estimaient les températures maximales. Les erreurs atteignent 5 °C, mais ne dépassent généralement pas 1 °C. Ces observations sont résumées dans le tableau 10, qui montre un biais léger (inférieur à 0,5 °C) et une CRMSE d'environ 1 °C. L'indice Υ^2 est proche de zéro et l'indice PEARSONR, proche de 1, ce qui témoigne de la forte concordance dans la représentation du cycle saisonnier. Les scores des modèles portuaires sont légèrement meilleurs que ceux du SPCOG-E.

5.3.2. Sondes CTD ancrées

Nous présentons ici une comparaison entre les modèles et les observations de la température et de la salinité (T-S) enregistrées par des sondes CTD ancrées. Les données étaient disponibles pour deux sites (montrés sur les figures; pour des métadonnées supplémentaires, voir DH22), dont l'un se trouvait dans la baie de Chedabucto où des instruments étaient ancrés à 10 m et à 48 m (CB_10m et CB_48m). L'autre instrument se trouvait près du pont-jetée dans le détroit (CW_55m), mais comme le SPCOG-E ne résout pas du tout la zone et que le STC500 y est trop peu profond pour que l'on puisse extraire une série chronologique pour l'analyse, seuls les résultats du STC100 sont présentés.

À l'emplacement CB_10m (figure 37), la température présente des caractéristiques semblables à celles observées à proximité pour la température de la surface de la mer discutées au point précédent, mais comme la série est plus courte, la sous-estimation des températures maximales en été est plus évidente. À cet emplacement, la salinité suit un cycle saisonnier qui atteint son minimum au printemps, à environ 31 PSU, et chute à 29,5 PSU à l'automne. Les modèles reproduisent ce cycle et bon nombre des fluctuations, mais il y a un biais plus salé global de 0,4 PSU (tableau 10), qui atteignait 1 PSU pour la période automnale de faible salinité. Les modèles ont toutefois représenté une grande partie de la covariance du signal de salinité, comme le montrent l'indice Υ^2 faible (~0,19) et l'indice PEARSONR élevé (~0,91). Les modèles portuaires ne constituent pas une amélioration par rapport au SPCOG-E à cet emplacement.

À l'emplacement CB_48m (figure 38), soit dans l'enregistrement près du fond, la température a suivi un cycle saisonnier semblable à celui observé dans l'enregistrement près de la surface, mais avec un retard de quelques mois et des températures un peu plus froides. Les fluctuations synoptiques étaient importantes pendant l'été et l'automne. Les modèles reproduisent bien le cycle saisonnier et les fluctuations, leurs indices Υ^2 variant entre 0,1 et 0,12 et leurs indices PEARSONR, entre 0,94 et 0,95. De plus, il y a une légère amélioration par rapport au SPCOG-E à cet endroit. La salinité près du fond était dominée par des fluctuations synoptiques qui ont été bien modélisées avec un indice Υ^2 entre 0,17 et 0,4 et un indice PEARSONR entre

0,78 et 0,91. L'amélioration dans les modèles portuaires est importante ici, car l'indice γ^2 a diminué de plus de la moitié entre le SPCOG-E et le STC100.

5.3.3. Profils CTD

Dans la présente section, nous examinons les comparaisons entre les modèles et les profils CTD disponibles. La comparaison comprend les données recueillies de 22 sondes CTD du SSCMNC (14 à l'intérieur du détroit de Canso et 8 à l'extérieur; voir DH22) ainsi que d'autres sondes disponibles dans la région extérieure pendant la période de simulation rétrospective (~ 70) qui ont été utilisées principalement sur la partie est du plateau néo-écossais dans le domaine du STC500. La collecte de données des sondes CTD du SSCMNC a eu lieu principalement en mai et en novembre, tandis que les données des sondes extérieures ont été recueillies entre mai et novembre, mais surtout en juillet et en août. Une carte des emplacements des sondes et des régions utilisés dans l'analyse ci-dessous est présentée à la figure 40.

Les résultats sont résumés dans les figure 41 et figure 42, qui montrent les profils du biais $\pm$ la CRMSE relatifs à la température et à la salinité pour l'ensemble des sondes CTD disponibles dans chacune des deux régions. La première région correspond à la zone intérieure du port et au domaine du STC100, qui comprend un plus petit nombre de sondes surtout situées à l'intérieur du détroit, tandis que la seconde région correspond au domaine du STC500 moins celui du STC100 (c.-à-d. la région extérieure seulement). La figure comprend également le nombre total d'observations à chaque profondeur, qui tend à diminuer avec la profondeur.

Dans la région intérieure, tous les modèles présentaient un biais chaud d'environ 0,5 °C dans toute la colonne d'eau (aucune observation inférieure à 60 m). Les modèles portuaires présentaient également un biais plus salé de 0,5 PSU, qui diminuait avec la profondeur. Les erreurs CRMSE étaient d'environ 0,5 °C et 0,25 PSU. Le SPCOG-E n'a pas été examiné dans cette région, car il ne résout pas le détroit.

Dans la région extérieure, un biais froid de 0,8 °C est observé dans les 10 premiers mètres. Ce biais s'inverse pour un biais chaud de la même ampleur à environ 100 m, qui continue d'augmenter avec la profondeur; cela dit, les statistiques deviennent peu fiables aux profondeurs inférieures à 200 m, car le nombre d'échantillons devient petit. Le biais salé était également présent dans cette région, mais il a atteint un maximum de 0,75 PSU à environ 15 m, puis a diminué à zéro à environ 200 m. L'augmentation subséquente aux profondeurs inférieures à 200 m n'est pas fiable sur le plan statistique. Les erreurs CRMSE étaient supérieures dans la région extérieure, atteignant un maximum d'environ 2 °C et 0,75 PSU. Le STC500 et le SPCOG-E ont produit des résultats très semblables.

5.4. DÉRIVE

Seize trajectoires de dérive de surface de bouées CODE/Davis étaient disponibles pour l'analyse de la dérive. Elles se trouvaient toutes sur le plateau néo-écossais (figure 43); par conséquent, seuls le STC500 et le SPCOG-E ont pu être évalués. Les trajectoires ont été parcourues sur plusieurs jours et offraient de nombreux segments de 24 heures permettant un calcul fiable des scores moyens. Une valeur de coefficient de prise au vent standard, tirée de la littérature, de 1,36 % a été appliquée au suivi de la dérive (Sutherland *et al.* 2020). La figure 44 indique l'indice de Molcard moyen (sur tous les segments de 24 heures disponibles) en fonction du temps de dérive, tandis que la figure 45 indique la distance de séparation moyenne. Le STC500 présente un indice de Molcard qui atteint un sommet légèrement en dessous de 0,4 après 10 heures, tandis que le SPCOG-E affiche une performance un peu plus faible; son indice commence à 0,35 et se dégrade par la suite. L'enveloppe de l'écart-type de l'indice est

assez large (~0,6), ce qui indique une grande variation de l'efficacité pour des segments individuels de 24 heures. La distance de séparation moyenne augmente de façon linéaire jusqu'à la valeur maximale de 10 (8) km pour le SPCOG-E (STC500). Les distances de séparation et l'indice d'efficacité de Molcard sont présentés pour chaque heure dans le tableau 11.

6. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES PRÉVISIONS

L'évaluation des prévisions a été effectuée entre le 27 novembre 2021 et le 27 janvier 2022. Seules les données sur le niveau d'eau (station de mesure de Port Hawkesbury) étaient disponibles pour l'évaluation au cours de cette période.

6.1. NIVEAU D'EAU RÉSIDUEL

La figure 46 indique la croissance de l'erreur moyenne des composantes non tidales (biais et CRMSE) pendant la période de prévision de 48 heures. Comme ces statistiques ont été calculées à partir d'un échantillon relativement petit de 60 prévisions, une enveloppe ombrée est illustrée pour montrer les limites de confiance à 95 % fondées sur la méthode bootstrap. Le biais varie entre -0,08 et 0,03 m avec ce qui semble être une période de cinq heures. La proximité avec la bande de fréquence de seiche suggère un lien possible avec ce phénomène, mais le mécanisme de génération n'est pas clair. En outre, le calcul de la moyenne sur un ensemble de 60 prévisions tendrait à éliminer les fluctuations non cohérentes et rend ce lien peu probable. La CRMSE demeure entre 0,05 et 0,12 m, avec une petite tendance, qui correspond à la croissance avec le temps de l'erreur de prévision. Ces erreurs sont légèrement plus importantes que les scores annuels figurant dans le tableau 2, mais elles sont raisonnables compte tenu de la petite taille de l'échantillon et de l'erreur de prévision que l'on retrouve ici.

7. RÉSUMÉ

Les données d'observation disponibles, qui comprenaient les données de stations de mesure de niveau d'eau, de courantomètres à niveaux multiples (ADCP), de température de surface de la mer d'après des bouées météorologiques, de sondes CTD ancrées, de profils CTD et de bouées dérivantes en surface, ont été utilisées pour évaluer les modèles à l'échelle du port du détroit de Canso. L'évaluation a été effectuée en comparant, dans la mesure où ils s'appliquent (section 4), les indices de performance, les séries chronologiques et les composantes tidales de chacun des deux modèles portuaires et du SPCOG-E (lorsque cela était possible). Une simulation rétrospective de 2016-2021, réalisée à une échelle réduite à partir du système côtier de prédiction SPCOG-E, a été utilisée à cette fin. De plus, l'évaluation comprenait pour le niveau de l'eau une vérification de la stabilité de la simulation rétrospective sur cinq ans, une évaluation des scores pendant les périodes de fortes tempêtes historiques, et une analyse des prévisions en fonction de l'échéance de la prédiction (à l'aide d'environ 60 prévisions à 00Z). La performance des modèles a été résumée et l'accent a été mis sur la détermination des améliorations à apporter aux modèles à plus petite échelle, ainsi que leurs limitations.

Une station de mesure de niveau d'eau à long terme (Port Hawkesbury) était disponible pour l'évaluation. Les scores associés au niveau d'eau prédit à cette station par tous les modèles étaient très bons, l'erreur CRMSE totale variant entre 0,071 et 0,083 m. Environ le tiers de ce score a été attribué aux marées, tandis que les deux tiers restants ont été attribués à la composante non tidale. L'examen de cet indice sur cinq ans (calculé annuellement) indique une fluctuation de l'indice d'environ 10 % seulement, ce qui démontre la stabilité des modèles (figure 7). De plus, les marées ont été beaucoup mieux modélisées que la composante non tidale; l'indice γ^2 (ici, le pourcentage de variance non modélisée) était inférieur à 1 % pour la

composante tidale, tandis qu'il atteignait 22 à 30 % pour la composante non tidale. Cependant, comme le signal tidal est supérieur au signal non tidal (le ratio entre la variance tidale et la variance non tidale était de 12,4 dans les observations), l'indice total ne comprend que de 2,2 à 2,8 % de variance non modélisée. Dans l'ensemble, les scores de performance indiquent une amélioration importante dans les modèles portuaires par rapport au modèle parent, en particulier pour le modèle STC100, qui a constamment surpassé les autres modèles de 10 à 20 % en ce qui concerne la CRMSE. L'excellente performance quant aux marées se manifeste également par la petite erreur de la marée ($< 0,01$ m) pour les différentes composantes tidales (tableau 2) issues de l'analyse harmonique des marées. Les résultats relatifs à la performance quant aux niveaux d'eau à la station de Port Hawkesbury peuvent être généralisés à l'ensemble du domaine des modèles portuaires, qui est petit (environ 150×150 km pour le STC500). Par exemple, la composante M2 présente une variation d'amplitude de 0,1 m seulement et de quelques degrés en phase dans tout le domaine du STC500 (WebTide; Dupont *et al.* 2002). La performance quant aux marées a également été vérifiée à deux stations marégraphiques historiques à l'intérieur du détroit de Canso et s'est avérée correspondre de manière raisonnable aux résultats ci-dessus.

Six tempêtes ont été analysées pendant la période de simulation rétrospective par une comparaison des scores associés à une période de tempête de quatre jours avec les scores annuels. Les indices de CRMSE des tempêtes étaient généralement supérieurs à la plage annuelle, mais ce résultat a été attribué à la variance globale accrue pendant la période de tempête. Un indice normalisé s'est avéré plus approprié; l'indice γ^2 se situait dans la plage normale pour toutes les tempêtes, sauf deux. Les deux résultats hors norme ont été attribués à un phénomène d'onde de seiche non résolu (Barber et Taylor, 1977), qui a été particulièrement important pendant ces tempêtes (p. ex. figure 10). De plus, l'analyse spectrale a révélé que l'énergie des fréquences élevées, en particulier dans la bande associée aux ondes de seiche (5 à 10 c/j), n'était pas reproduite dans les modèles.

L'évaluation des prévisions de niveau d'eau a été effectuée entre le 27 novembre 2021 et le 27 janvier 2022 pour la station de mesure de Port Hawkesbury. Le biais fluctue entre -0,08 et 0,03 m avec ce qui semble être une période de cinq heures. L'erreur CRMSE demeure entre 0,05 et 0,12, avec une petite tendance à la hausse, qui correspond à la croissance avec le temps de l'erreur de prévision. Ces erreurs sont légèrement plus importantes que les erreurs annuelles rapportées dans le tableau 5, mais elles sont raisonnables compte tenu de la petite taille de l'échantillon et de l'erreur de prévision que l'on retrouve ici.

Les données recueillies de 17 courantomètres ADCP étaient disponibles pour l'évaluation. Les indices associés à tous les instruments ont été présentés aux tableau 7 à tableau 9, mais l'analyse s'est limitée à un sous-ensemble représentatif de cinq emplacements (trois à l'intérieur de l'échancrure côtière, et deux sur le plateau ouvert) à des profondeurs standards (section 5.2.1). Dans l'ensemble, les indices γ^2 totaux étaient inférieurs à 1,0. Pour les stations situées dans l'échancrure côtière, les indices s'améliorent avec la profondeur et la résolution du modèle (surtout là où il y a une contrainte topographique). En particulier, la station située à l'entrée du détroit (CM7), qui est la station de l'échancrure côtière où l'énergie enregistrée est la plus grande et où l'écoulement est très contraint par la topographie, était la mieux modélisée des stations; son indice γ^2 pour le courant total s'élevait à 0,75 pour le SPCOG-E et était inférieur à 0,45 pour le STC500 et inférieur à 0,38 pour le STC100. Une série chronologique du courant résiduel non tidal provenant de cette station (figure 26) montre que les modèles portuaires (en particulier le STC100) ont été en mesure de modéliser efficacement la plus grande partie de la variabilité du champ d'écoulement et représentent une amélioration par rapport au SPCOG-E.

Une grande amélioration des scores associés aux ADCP avec la profondeur a été observée à la station M2086, où, pour le modèle STC500, l'indice γ^2 total est passé de 0,97 près de la surface à 0,62 près du fond (70 m). Sur le plateau ouvert, les scores ont eu tendance à se dégrader près de la surface et près du fond, ce qui porte à croire à une résolution inadéquate de ces couches limites. De plus, l'amélioration par rapport au SPCOG-E n'était pas évidente dans les scores du STC500 sur le plateau ouvert.

Le flux moyen à l'intérieur de la zone de l'échancrure était négligeable, mais sur le plateau ouvert, un courant moyen du sud-ouest de 0,1 m/s, associé au courant de la Nouvelle-Écosse (Drinkwater et al., 1979), a été bien modélisé par le STC500 et le SPCOG-E.

L'évaluation des composantes tidales des courants a révélé que dans la partie principale du détroit de Canso, la marée barotrope est faible (amplitudes d'environ 0,03 m/s du courant associé à la composante M2; les autres composantes sont négligeables), tandis que dans l'entrée du détroit, l'amplitude du courant lié à la composante M2 augmente à 0,15 m/s. Une différence de phase de 50 degrés, associée aux marées internes (DJ20; DH22) est présente partout. Ces caractéristiques ont été bien modélisées par le STC100 (RMSE pour toutes les composantes tidales résolues variant entre 0,014 et 0,024 m/s), modérément bien modélisées par le STC500 (RMSE entre 0,021 et 0,053 m/s) et mal modélisées (non résolues) par le SPCOG-E. Dans la baie Chedabucto, les amplitudes de courant lié à la composante M2 diminuent à environ 0,05 m/s et ont été bien modélisées par tous les modèles (RMSE entre 0,018 et 0,035 m/s), les modèles portuaires offrant une petite amélioration près du fond. Sur le plateau ouvert, la composante K1 est aussi importante que la composante M2 (amplitudes de courant entre 0,03 et 0,09 m/s), et toutes deux ont été bien modélisées (RMSE entre 0,26 et 0,053 m/s).

Les spectres rotatifs aux cinq stations représentatives ne montraient aucun signe d'oscillations inertielles ou de toute autre asymétrie de type Coriolis entre les spectres en sens horaire et en sens antihoraire. Dans l'ensemble, les niveaux de puissance dans les modèles sont inférieurs aux niveaux observés, en particulier aux fréquences élevées. Pour les stations intérieures, les niveaux de puissance dans les modèles portuaires étaient plus près des niveaux observés que ceux du SPCOG-E à toutes les fréquences. Pour les stations extérieures, le STC500 représentait mieux la puissance aux hautes fréquences, mais avait une performance semblable à celle du SPCOG-E aux basses fréquences.

Les courants sur le plateau ouvert ont également été évalués à l'aide d'une analyse de dérive de seize bouées dérivantes CODE/Davis de surface (section 5.4). L'indice d'efficacité de Molcard du STC500 atteint un maximum tout juste inférieur à 0,4 à une échéance de 10 heures, tandis que le SPCOG-E affiche une performance un peu plus faible avec un indice commençant à 0,35 pour se dégrader par la suite. La variation de l'efficacité pour chaque segment de dérive de 24 heures était importante, l'écart-type s'élevant à environ 0,3. Pour mettre les choses en contexte, du fait de sa conception, toute valeur supérieure à zéro de l'indice de Molcard témoigne d'une certaine capacité de prédiction du modèle (par rapport à une situation où la position initiale de largage serait conservée). De plus, les indices obtenus ici se situent dans la plage entre 0,2 et 0,6 rapportée par Paquin *et al.* (2020), bien que leur étude comprenne des indices issus d'une analyse de la sensibilité au coefficient de prise au vent et que, par conséquent, les indices les plus faibles correspondent en fait à des valeurs de coefficient inappropriées, comme une valeur de 3 % pour une bouée dérivante CODE/Davis. En outre, leur zone d'étude était la baie de Fundy, dont l'écoulement est fortement influencé par les marées, tandis qu'ici, l'écoulement est principalement dominé par un courant résiduel dû au vent; ce qui affaiblit l'analogie entre les deux études. L'évaluation présentée par Soontiens et Holden (2022), qui portait sur le SPCOG-E et ses modèles parents dans la région non tidale du bonnet Flamand dans l'Atlantique Nord-Ouest, est peut-être plus utile (en ce qui concerne le type

d'écoulement dominant). Ils ont obtenu des indices de Molcard entre 0,2 et 0,25, et constaté que le SPCOG-E ne surpassait pas les modèles parents à moins que l'on élimine par filtrage spatial les structures présentes aux échelles non contraintes.

Des séries chronologiques pluriannuelles de température de surface de la mer provenant de deux stations météorologiques marines étaient disponibles dans la baie de Chedabucto. Le cycle saisonnier de cette propriété a été bien modélisé par les trois modèles (p. ex. figure 35). La CRMSE était d'environ 1 °C, les plus grandes erreurs ponctuelles étant associées à la variabilité des remontées et des plongées d'eau en été et en automne. Les modèles portuaires n'ont offert qu'une amélioration très modeste par rapport au SPCOG-E.

Des observations de la température et de la salinité enregistrées par des sondes CTD ancrées étaient disponibles pour la baie de Chedabucto (CB) et l'intérieur du détroit vers le pont-jetée (CW; voir la section 5.3.2). Près de la surface, l'évaluation de la température était comparable à celle de la température de surface de la mer présentée plus haut. La salinité a suivi un cycle saisonnier, atteignant son maximum au printemps, à environ 31 PSU, et chutant à 29,5 PSU à l'automne. Il s'agit du faible signal de salinité associé au flux d'eau sortant du golfe du Saint-Laurent (Drinkwater *et al.* 1979; Petrie *et al.* 1996). Les modèles reproduisent le cycle saisonnier et bon nombre des fluctuations (indice Υ^2 d'environ 0,19), mais il y a un biais général plus salé de 0,4 PSU (1 PSU pendant la période de faible salinité). Les modèles portuaires ne constituent pas une amélioration par rapport au SPCOG-E à cet emplacement.

À la station CB, la température près du fond a suivi un cycle saisonnier semblable à celui de la température près de la surface, mais avec un retard de quelques mois et des températures un peu plus froides. Les fluctuations synoptiques associées aux remontées et plongées d'eau étaient importantes pendant l'été et l'automne. Tous les modèles ont raisonnablement bien reproduit ces caractéristiques (Υ^2 entre 0,1 et 0,12), les modèles portuaires présentant une légère amélioration par rapport au SPCOG-E. La salinité près du fond était dominée par des fluctuations synoptiques qui ont été bien modélisées, l'indice Υ^2 se situant entre 0,17 et 0,4. L'amélioration des scores dans les modèles portuaires était plus prononcée pour la salinité que pour la température, l'indice Υ^2 étant plus de deux fois inférieur pour le STC100 que le SPCOG-E. L'amélioration des valeurs de température et de salinité près du fond était attendue dans les modèles portuaires, puisqu'ils résolvent mieux la bathymétrie, qui est un facteur important de la circulation près du fond.

La station CW a été incluse dans l'évaluation pour montrer la capacité du modèle portuaire à modéliser l'intrusion en eau profonde dans le détroit, décrite pour la première fois dans DH22. Les intrusions se caractérisent par une modification soudaine des propriétés de température et salinité correspondant au remplacement de l'eau stagnante par de l'eau provenant d'au-delà du seuil (Farmer et Freeland, 1983). Cinq événements de ce type ont été relevés dans les observations, et trois d'entre eux ont été représentés par le STC100 (figure 39). L'événement le plus important survenu à la fin octobre a été particulièrement bien reproduit, la salinité (température) augmentant (diminuant) de 1 PSU (5 °C). Ces caractéristiques n'ont pas été résolues par le SPCOG-E et mal résolues par le STC500.

Un ensemble de données provenant d'environ 90 profils CTD était disponible pour l'évaluation (section 3.3). L'évaluation a été divisée en deux parties : la région intérieure (domaine du STC100) et la région extérieure (domaine du STC500 moins celui du STC100). La région intérieure comptait peu de sondages, et ceux-ci se trouvaient surtout à l'intérieur du détroit. Dans la région intérieure, les modèles portuaires présentaient un biais chaud d'environ 0,5 °C dans la colonne d'eau (aucune observation inférieure à 60 m). De plus, un biais plus salé de 0,5 PSU (même caractéristique que celle mentionnée ci-dessus en ce qui concerne les séries chronologiques de salinité près de la surface) était présent, et il diminuait avec la profondeur.

Pour la région d'évaluation extérieure, la température présentait un biais froid de 0,8 °C dans les premiers 10 m, qui s'est inversé pour devenir un biais chaud de la même ampleur à environ 100 m. Le biais salé était également présent dans cette région, mais a atteint un maximum de 0,75 PSU à environ 15 m, puis a diminué pour atteindre zéro à environ 200 m. Le STC500 et le SPCOG-E ont produit des résultats très semblables. Cette situation n'est pas inattendue, car la région est une zone d'écoulement pour le courant de la Nouvelle-Écosse (Drinkwater *et al.* 1979), qui apporte de l'eau plus fraîche du golfe du Saint-Laurent. La persistance du biais plus salé porte à croire qu'il est hérité du modèle parent. Les résultats suggèrent également que la source du biais chaud dans la région intérieure (cette caractéristique était plus prononcée plus près de la côte dans l'analyse de DH22) est le biais chaud dans la couche inférieure extracôtière, qui se propage dans les régions côtières par la remontée d'eau d'Ekman près des limites topographiques (Petrie *et al.* 1987).

8. PRINCIPAUX RÉSULTATS

- Le détroit de Canso n'est actuellement pas résolu par les modèles opérationnels. Les modèles portuaires évalués ici sont les premiers à le résoudre.
- Tous les modèles présentent une très bonne performance en ce qui concerne les indices liés au niveau d'eau total, mais le STC100 a constamment surpassé les autres de 10 à 20 % pour ce qui est de la CRMSE du niveau d'eau total.
- L'examen sur cinq ans de la CRMSE (calculée annuellement) indique une fluctuation d'environ 10 % seulement, ce qui montre la stabilité des modèles.
- L'exécution des modèles s'est bien déroulée pendant les six tempêtes analysées. Les indices étaient raisonnables, sauf pendant deux tempêtes, durant lesquelles les erreurs étaient un peu plus élevées en raison d'un phénomène d'onde de seiche non résolu. Le mécanisme à l'origine de l'erreur est inconnu. Aucune amélioration n'a été constatée par rapport au modèle parent.
- L'évaluation des prévisions du niveau d'eau a révélé que les modèles portuaires fonctionnaient raisonnablement bien, mais ne montraient pas d'amélioration par rapport au SPCOG-E.
- Pour les stations ADCP côtières, les scores étaient améliorés avec la profondeur et avec la résolution du modèle, en particulier lorsqu'il y avait un guidage topographique.
- Sur le plateau ouvert, les scores liés aux ADCP avaient tendance à se dégrader près de la surface et près du fond, ce qui laisse supposer une résolution inadéquate de ces couches limites. De plus, aucune amélioration claire n'a été observée dans le STC500 par rapport au SPCOG-E.
- Sur le plateau ouvert, un courant moyen du sud-ouest de 0,1 m/s, associé au courant de la Nouvelle-Écosse, a été bien modélisé par le STC500 et le SPCOG-E. Aucune amélioration claire n'a été observée dans le STC500 par rapport au SPCOG-E.
- Les courants de marée à l'intérieur (et près de l'entrée) du détroit de Canso étaient bien modélisés par les modèles portuaires, mais non résolus (ou mal modélisés) par le SPCOG-E.
- L'analyse des bouées dérivantes a révélé une légère amélioration de l'indice d'efficacité de Molcard pour le STC500 par rapport au SPCOG-E. Cependant, ces résultats ne concernent que le plateau ouvert en raison d'un manque de données de bouées dérivantes à l'intérieur de la région portuaire.

-
- Dans la baie de Chedabucto, le cycle saisonnier de température à la surface de la mer a été bien modélisé par les trois modèles. Aucune amélioration claire n'a été observée par rapport au SPCOG-E.
 - La salinité à la surface de la mer a suivi le bon cycle saisonnier, mais il y avait un biais plus salé de 0,4 PSU persistant dans les trois modèles. Aucune amélioration claire n'a été observée par rapport au SPCOG-E.
 - Les température et salinité près du fond ont été bien modélisées en ce qui concerne le cycle saisonnier et les fluctuations saisonnières. Les modèles portuaires constituent une amélioration par rapport au SPCOG-E, en particulier pour la salinité.
 - Le STC100 a été en mesure de modéliser l'intrusion ou le renouvellement en eau profonde au-dessus du seuil avec une efficacité raisonnable. Cette caractéristique n'a pas été modélisée ni résolue par le SPCOG-E.
 - Les profils CTD côtiers ont été bien modélisés par les modèles portuaires, mais n'ont pas été résolus par le SPCOG-E.
 - Aucune amélioration claire n'a été observée par rapport au SPCOG-E pour les profils CTD extracôtiers.

9. REMERCIEMENTS

L'élaboration initiale des modèles du détroit de Canso basés sur NEMO a été facilitée par les contributions de Li Zhai et de Xianmin Hu. La collecte de données sur le terrain était et demeure essentielle à la réussite de ce projet. Les auteurs remercient Doug Schillinger et Ed Horne, qui ont joué et continuent de jouer un rôle déterminant dans l'effort de collecte de données. Nancy Soontiens et Jennifer Holden ont fourni le code pour l'analyse de la dérive (et des conseils pendant toute cette analyse). De nombreux gestionnaires du MPO participant au projet, en particulier Joël Chassé et Youyu Lu, ont fourni des conseils utiles. Nous remercions le comité d'approbation des modèles océaniques opérationnels (CAMO) du MPO et les représentants du SCAS pour leurs révisions constructives visant à améliorer ce manuscrit. Nous remercions également les nombreuses autres personnes au MPO, à ECCC et à SPC qui ont contribué à faire de ces systèmes de modélisation ce qu'ils sont. Ce travail a été appuyé par le Plan de protection des océans du Canada.

10. RÉFÉRENCES CITÉES

- Atkinson, David E, Donald L Forbes, Thomas S James, Nicole J Couture, and Gavin K Manson. 2016. "DYNAMIC COASTS IN A CHANGING CLIMATE," 27–68.
- 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>.
- Barber, F. G., and J. Taylor. 1977. "A Note on Free Oscillations of Chedabucto Bay." <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/53791.pdf>.

-
- 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>.
- Bugden, Gary, B. A. Law, Edward P. W. Horne, and Shawn E. Roach. 2020. "Flow through the Canso Causeway." <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/40884533.pdf>.
- Chen, Changsheng, Hedong Liu, and Robert C. Beardsley. 2003. "An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20 (1): 159–86. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<0159:AUGFVT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<0159:AUGFVT>2.0.CO;2).
- Cummins, Patrick F., and Lie-Yauw Oey. 1997. "Simulation of Barotropic and Baroclinic Tides off Northern British Columbia." *Journal of Physical Oceanography* 27 (5): 762–81. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<0762:SOBAPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<0762:SOBAPT>2.0.CO;2).
- Cummins, Patrick F., and Pramod Thupaki. 2018. "A Note on Evaluating Model Tidal Currents against Observations." *Continental Shelf Research* 152 (January): 35–37. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.10.007>.
- Daniel, Pierre, Gwénaële Jan, Fanch Cabioc'h, Yves Landau, and Erwann Loiseau. 2002. "Drift Modeling of Cargo Containers." *Spill Science & Technology Bulletin* 7 (5–6): 279–88. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00075-0).
- Drakkar Group. 2007. "Eddy-Permitting Ocean Circulation Hindcasts of Past Decades." *Clivar Exchanges* 42 (12 (3)): 8–10.
- Drinkwater, K., B. Petrie, and W. H. Jr Sutcliffe. 1979. "Seasonal Geostrophic Volume Transports along the Scotian Shelf." *Estuarine and Coastal Marine Science* 9 (1): 17–27.
- Drozdowski, A., and E. Horne. 2022. "Strait of Canso Port Model Hindcast Evaluation." <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/41073095.pdf>.
- Drozdowski, A., E. Horne, and F. Page. 2018. "Seasonal Current Statistics and Tidal Constituents from Canso Strait and Eastern Nova Scotia." <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/4073495x.pdf>.
- Drozdowski, A., and D. Jiang. 2020. "Modelling Internal Tides in the Strait of Canso." *Atmosphere-Ocean*, 1–18. <https://doi.org/10.1080/07055900.2020.1744511>.
- Dupont, F, CG Hannah, DA Greenberg, JY Cherniawsky, and CE Naimie. 2002. "Modelling System for Tides for the Northwest Atlantic Coastal Ocean." *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean. Sci. Department of Fisheries and Oceans* 221. <http://www.dfo-mpo.gc.ca/Library/265855.pdf>.
- 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>.
- Farmer, David M, and Howard J Freeland. 1983. "The Physical Oceanography of Fjords." *Progress in Oceanography* 12 (2): 147–219.
- Flather, RA. 1976. "A Tidal Model of the North-West European Continental Shelf." *Mem Soc R Sci Liege* 10(6): 141–64.
-

-
- Gregory, D. 1993. "Oceanographic, Geographic and Hydrological Parameters of Scotia-Fundy and Southern Gulf of St. Lawrence Inlets." *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean. Sci.* No. 143: viii + 248 pp. <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/143396.pdf>.
- Hourston, Roy A.S. 2021. *Surface Ocean Circulation Tracking Drifter Data from the Northeastern Pacific and Western Arctic Oceans, 2014-2020*. Sidney, B.C.: Fisheries and Oceans Canada = Pêches et Océans Canada.
- Kundu, Pijush K. 1976. "Ekman Veering Observed near the Ocean Bottom." *Journal of Physical Oceanography* 6 (2): 238–42. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1976\)006<0238:EVONTO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1976)006<0238:EVONTO>2.0.CO;2).
- Large, William George, and Stephen G. Yeager. 2004. "Diurnal to Decadal Global Forcing for Ocean and Sea-Ice Models: The Data Sets and Flux Climatologies." NCAR Technical Note NCAR/TN-460+STR. Boulder, CO: Climate and Global Dynamics Division: National Center for Atmospheric Research.
- Levier, B, AM Tréguier, G Madec, and V Garnier. 2007. "Free Surface and Variable Volume in the NEMO Code." *MERSEA IP Report WP09-CNRS-STR03-1A*. https://zenodo.org/record/3244182/files/NEMO_vvl_report.pdf.
- 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>.
- 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: 365–85.
- Paquin, Jean-Philippe, François Roy, Gregory C. Smith, Frédéric Dupont, Sarah MacDermid, Yukie Hata, Oleksandr Huizy, Ji Lei, Yosvany Martinez, Hauke Blanken, Jennifer Holden, Nancy Soontiens. 2021a. "Coastal Ice Ocean Prediction System for the East Coast of Canada (CIOPS-E): Update from version 1.50 to 2.0.0." Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction Tech. Note. https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoe/product_guide/docs/tech_notes/technote_ciops-east-200_e.pdf.
-

-
- Paquin, Jean-Phillipe, Gregory C. Smith, Frederic Dupont, Sarah MacDermid, Yukie Hata, Oleksandr Huizy, Ji Lei, Yosvany Martinez, Michael Dunphy, Maxim Krassovski, Stephanie Taylor, Hauke Blanken, Jennifer Holden, Nancy Soontiens, Susan E. Allen, and Doug Latornell. 2021b. "Coastal Ice Ocean Prediction System for the West Coast of Canada (CIOPS-W): Update from version 1.5.0 and 2.0.0." Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction Tech. Note.
https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmci/product_guide/docs/tech_notes/technote_ciops-west-200_e.pdf.
- Paquin, Jean-Phillipe, Gregory C. Smith, Francois Roy, Frederic Dupont, Sarah MacDermid, Ji Lei, Youyu Lu, Stephanie Taylor, Hauke Blanken, and Li Zhai. 2022. "Coastal Ice Ocean Prediction System for the West Coast of Canada (CIOPS-W): System Description for Versions 1.0.0 and 1.5.0." Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction.
https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmci/product_guide/docs/tech_notes/technote_ciops-west-100_e.pdf.
- Petrie, B., K. Drinkwater, D. Gregory, R. Pettipas, and A. Sandstrom. 1996. "Temperature and Salinity Atlas for the Scotian Shelf and the Gulf of Maine." <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/193505.pdf>.
- Petrie, B., B. Topliss, and D. Wright. 1987. "Coastal Upwelling and Eddy Development off Nova Scotia." *Journal of Geophysical Research* 29: 12979–91.
- Petrie, Brian. 2022. "Sydney Harbour: Seiches, Tides and Mean Circulation." *Proceedings of the Nova Scotian Institute of Science (NSIS)* 52 (2): 225.
- Röhrs, Johannes, and Kai H. Christensen. 2015. "Drift in the Uppermost Part of the Ocean." *Geophysical Research Letters* 42 (23). <https://doi.org/10.1002/2015GL066733>.
- Röhrs, Johannes, Kai Håkon Christensen, Lars Robert Hole, Göran Broström, Magnus Drivdal, and Svein Sundby. 2012. "Observation-Based Evaluation of Surface Wave Effects on Currents and Trajectory Forecasts." *Ocean Dynamics* 62 (10–12): 1519–33.
<https://doi.org/10.1007/s10236-012-0576-y>.
- Saucier, François J. 2003. "Modeling the Formation and Circulation Processes of Water Masses and Sea Ice in the Gulf of St. Lawrence, Canada." *Journal of Geophysical Research* 108 (C8): 3269. <https://doi.org/10.1029/2000JC000686>.
- Saucier, François J., and Joël Chassé. 2000. "Tidal Circulation and Buoyancy Effects in the St. Lawrence Estuary." *Atmosphere-Ocean* 38 (4): 505–56.
<https://doi.org/10.1080/07055900.2000.9649658>.
- Schillinger, Douglas J. 2022. "ADCP and Drifter Measurements on a Shallow Plateau (80m Depth) on the Eastern Scotian Shelf: 1 November 2018 - 27 March 2019." <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/41081833.pdf>.
- 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, N., and J. Holden. 2022. "The Impact of Ocean Model Resolution on the Accuracy of Drift Predictions." Presented at the 56th Annual Canadian Meteorological and Oceanographic Society Congress, Virtual, June.

-
- Soontiens, Nancy, and Jennifer Holden J. 2024. "A framework for evaluation and characterization of drift prediction in the marine environment." Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 383: ix + 45 p. <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/41252287.pdf>.
- Sutherland, Graig, Nancy Soontiens, Fraser Davidson, Gregory C. Smith, Natacha Bernier, Hauke Blanken, Douglas Schillinger, et al. 2020. "Evaluating the Leeway Coefficient of Ocean Drifters Using Operational Marine Environmental Prediction Systems." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 37 (11): 1943–54. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0013.1>.
- Zhang, Minghong, William Perrie, and Zhenxia Long. 2019. "Springtime North Pacific Oscillation and Summer Sea Ice in the Beaufort Sea." *Climate Dynamics* 53 (1–2): 671–86. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04627-1>.

11. TABLEAUX

Tableau 1. Principaux paramètres de configuration des modèles.

Paramètre	Grille extérieure (STC500)	Grille intérieure (STC100)
Dimensions de la grille, NX x NY x NZ	379 x 374 x 47	714 x 479 x 39
Résolution horizontale	Nominale : 500 m; réelle : 407-422 m	Nominale : 100 m; réelle : 82-83 m
Résolution verticale	1 m à la surface, 18,5 m au fond	1 m à la surface, 18,2 m au fond
Intervalle de temps; barocline /barotrope	90 s / 3 s	18 s / 0,6 s
Fréquence de mise à jour aux limites ouvertes	1 h (O, S, E)	1 h (S, E)
Décalage de la hauteur de la surface de la mer aux limites ouvertes	0 cm	0 cm
Source de forçage tidal	SPCOG-E	STC500
Composantes tidales forcées	Du modèle parent à la frontière ouverte	Du modèle parent à la frontière ouverte
Équation d'état	EOS-80	EOS-80
Surface libre	Volume variable	Volume variable
Pénétration de la lumière	RGB	RGB
Condition aux limites latérales	Glissement partiel (shlat=0,1)	Glissement partiel (shlat=0,1)
Advection de la quantité de mouvement	Forme vectorielle, 5 sous-étapes pour l'advection verticale	Forme vectorielle, 5 sous-étapes pour l'advection verticale
Diffusion latérale de la quantité de mouvement	Laplacien horizontal et méthode de Smagorinsky	Laplacien horizontal et méthode de Smagorinsky
Advection des traceurs	Dissipation de la variance totale, 5 sous-étapes pour l'advection verticale	Dissipation de la variance totale, 5 sous-étapes pour l'advection verticale
Diffusion latérale des traceurs	Laplacien iso-neutre et méthode de Smagorinsky	Laplacien iso-neutre et méthode de Smagorinsky
Diffusion verticale	k-ε	k-ε
Frottement sur le fond	Couche logarithmique	Couche logarithmique

Tableau 2. Comparaison des composantes tidales à la station du quai de Port Hawkesbury. Pour chaque composante, les valeurs modélisées obtenues avec le SPCOG-E, le STC500 et le STC100 sont indiquées dans cet ordre, de haut en bas.

Constituent	Amplitude (A; m)			Phase (φ ; °GMT)			Erreur de la marée (m)
	Observé	Modélisé	Différence	Observé	Modélisé	Différence	
M2	0.593	0.591	-0.002	345.6	343.3	-2.3	0.017
		0.594	0.001	345.6	344.6	-1.1	0.008
		0.598	0.005	345.6	346.0	0.3	0.004
N2	0.127	0.128	0.001	322.9	321.8	-1.1	0.002
		0.128	0.001	322.9	323.5	0.6	0.001
		0.129	0.002	322.9	324.8	1.9	0.003
S2	0.140	0.128	-0.011	24.5	18.1	-6.4	0.013
		0.130	-0.009	24.5	19.2	-5.3	0.011
		0.131	-0.009	24.5	21.1	-3.4	0.008
K1	0.072	0.085	0.014	50.7	46.7	-4.0	0.010
		0.083	0.011	50.7	46.7	-4.0	0.009
		0.085	0.013	50.7	47.7	-3.0	0.010
O1	0.050	0.057	0.007	343.4	344.4	0.9	0.005
		0.056	0.005	343.4	343.8	0.3	0.004
		0.056	0.006	343.4	345.0	1.6	0.004
K2	0.041	0.038	-0.003	23.5	16.8	-6.7	0.004
		0.039	-0.002	23.5	18.3	-5.2	0.003
		0.039	-0.002	23.5	20.2	-3.3	0.002
P1	0.022	0.026	0.004	37.5	35.3	-2.2	0.003
		0.026	0.004	37.5	35.1	-2.4	0.003
		0.026	0.004	37.5	36.6	-0.9	0.003
Q1	0.007	0.006	-0.000	328.7	331.9	3.2	0.000
		0.006	-0.000	328.7	332.2	3.5	0.000
		0.007	-0.000	328.7	334.9	6.3	0.001

Tableau 3 : Emplacements des marégraphes historiques.

Nom de la station	Nom commun	Longitude (°N)	Latitude (°E)	Durée (jours)	Début
00563const	Sand Point	-61,2667	45,5167	43	1999-02-11
00570const	Port Hastings	-61,4000	45,6500	29	1999-02-11

Tableau 4. Comparaison des composantes tidales en fonction des données des marégraphes historiques.

Nom de la station	Amp. Obs. (m)	Phase Obs. (deg)	Amp. Modèle (m)			Amp (mod.-obs.) (m)			Phase Modèle (deg)			Phase (mod.-obs.) (deg)			Erreur de la marée (m)		
			SPCOG-E	STC 500	STC 100	SPCOG-E	STC 500	STC 100	SPCOG-E	STC 500	STC 100	SPCOG-E	STC 500	STC 100	SPCOG-E	STC 500	STC 100
M2																	
00563const	0.596	344.3	0.589	0.597	0.573	-0.007	0.001	-0.023	342.8	344.7	344.7	-1.6	0.4	0.4	0.012	0.003	0.016
00570const	0.597	344.9	0.591	0.593	0.600	-0.006	-0.004	0.003	343.3	344.5	346.0	-1.6	-0.4	1.1	0.012	0.004	0.008
N2																	
00563const	0.119	317.9	0.129	0.130	0.126	0.010	0.011	0.007	321.7	323.3	323.5	3.8	5.5	5.6	0.009	0.012	0.010
00570const	0.134	319.8	0.128	0.128	0.130	-0.006	-0.006	-0.004	321.8	323.5	324.8	2.1	3.7	5.0	0.006	0.007	0.009
S2																	
00563const	0.135	28.3	0.105	0.108	0.104	-0.029	-0.027	-0.031	14.7	17.3	16.8	-13.6	-11.1	-11.5	0.029	0.025	0.028
00570const	0.149	26.0	0.128	0.130	0.131	-0.021	-0.019	-0.018	18.1	19.1	21.2	-7.9	-6.9	-4.8	0.020	0.018	0.015
O1																	
00563const	0.043	343.7	0.053	0.054	0.054	0.010	0.011	0.011	340.6	340.7	340.8	-3.0	-3.0	-2.9	0.008	0.008	0.008
00570const	0.039	330.8	0.057	0.055	0.056	0.018	0.016	0.017	344.3	343.7	345.0	13.5	12.9	14.2	0.015	0.014	0.014
K1																	
00563const	0.072	52.9	0.118	0.120	0.118	0.046	0.048	0.046	39.1	39.3	39.8	-13.8	-13.6	-13.0	0.036	0.037	0.036
00570const	0.064	51.2	0.085	0.083	0.085	0.021	0.019	0.021	46.7	46.8	47.9	-4.5	-4.4	-3.3	0.016	0.014	0.015

Tableau 5. Indices pour les niveaux d'eau à Port Hawkesbury.

Année	Modèle	Total				Non-tidal			Tidal		
		biais (m)	CRMSE (m)	γ^2	Pearson	CRMSE (m)	γ^2	Pearson	CRMSE (m)	γ^2	Pearson
2017	SPCOG-E	0.022	0.081	0.029	0.985	0.067	0.314	0.833	0.046	0.010	0.995
	STC500	0.022	0.081	0.029	0.986	0.068	0.322	0.828	0.044	0.009	0.996
	STC100	0.020	0.076	0.025	0.987	0.065	0.295	0.842	0.039	0.007	0.997
2018	SPCOG-E	0.000	0.080	0.028	0.986	0.067	0.245	0.871	0.045	0.010	0.995
	STC500	-0.001	0.080	0.028	0.986	0.068	0.255	0.865	0.043	0.009	0.996
	STC100	-0.002	0.075	0.025	0.988	0.065	0.231	0.878	0.039	0.007	0.996
2019	SPCOG-E	-0.006	0.083	0.031	0.984	0.070	0.275	0.854	0.046	0.011	0.995
	STC500	-0.007	0.083	0.031	0.984	0.071	0.284	0.849	0.044	0.010	0.995
	STC100	-0.009	0.079	0.028	0.986	0.068	0.262	0.860	0.042	0.009	0.996
2020	SPCOG-E	0.000	0.082	0.031	0.984	0.068	0.309	0.834	0.045	0.010	0.995
	STC500	-0.002	0.081	0.030	0.985	0.069	0.319	0.829	0.043	0.009	0.995
	STC100	-0.003	0.076	0.027	0.987	0.066	0.290	0.844	0.038	0.007	0.996
2021	SPCOG-E	-0.012	0.077	0.028	0.986	0.064	0.241	0.872	0.044	0.010	0.995
	STC500	-0.013	0.077	0.028	0.986	0.065	0.253	0.866	0.043	0.009	0.995
	STC100	-0.014	0.071	0.024	0.988	0.061	0.222	0.882	0.037	0.007	0.997

Tableau 6. Indices pour les niveaux d'eau non tidaux pendant six périodes de tempête.

Date de la tempête	Nom de la tempête	SPCOG -E			STC500			STC100		
		CRMSE (m)	γ^2	Pearson	CRMSE (m)	γ^2	Pearson	CRMSE (m)	γ^2	Pearson
Oct-23-2016	-	0.087	0.399	0.776	0.090	0.420	0.762	0.089	0.412	0.768
Dec-25-2017	Christmas	0.095	0.229	0.879	0.098	0.240	0.873	0.094	0.223	0.885
Jan-05-2018	-	0.085	0.151	0.922	0.087	0.159	0.917	0.083	0.145	0.925
Sep-08-2019	Dorian	0.090	0.341	0.823	0.086	0.313	0.830	0.084	0.303	0.836
Sep-23-2020	Teddy	0.069	0.136	0.931	0.065	0.120	0.942	0.062	0.112	0.947
Nov-24-2021	-	0.081	0.427	0.759	0.087	0.490	0.718	0.081	0.423	0.759

Tableau 7. Indices d'efficacité totaux pour les ADCP à des profondeurs standard (ensemble complet des observations; les stations représentatives sont surlignées).

Score		biais U (m/s)			biais V (m/s)			χ^2			corrélation vectorielle (mag.)			corrélation vectorielle (deg)		
Nom du cas		SPCOG-E	STC 500	STC 100	SPCOG-E	STC 500	STC 100	SPCOG-E	STC 500	STC 100	SPCO-E	STC 500	STC 100	SPCOG-E	STC 500	STC 100
Nom de station	Prof. (m)															
CM1_23 _088 _Nov2016	10	-	0.002	-0.005	-	-0.015	0.012	-	1.195	1.099	-	0.260	0.257	-	-13.0	5.9
	20	-	-0.019	0.005	-	0.002	-0.009	-	0.934	0.874	-	0.428	0.454	-	4.8	1.2
	30	-	-0.032	0.013	-	0.007	-0.017	-	0.716	0.610	-	0.542	0.631	-	10.4	-0.8
CM1_M _ay2016 _23091	10	-	-0.005	0.002	-	0.001	0.001	-	1.064	0.953	-	0.349	0.388	-	9.4	0.7
	20	-	-0.012	0.003	-	0.004	-0.005	-	1.001	0.803	-	0.542	0.570	-	-16.9	-4.5
	30	-	-0.010	0.004	-	-0.002	-0.005	-	0.777	0.739	-	0.519	0.615	-	-15.6	-2.1
CM1_N _ov2015 _23088	10	-	0.007	-0.013	-	-0.017	0.012	-	1.086	1.027	-	0.324	0.285	-	14.4	5.8
	20	-	-0.022	-0.002	-	0.002	-0.007	-	0.912	0.847	-	0.429	0.448	-	-14.7	-2.3
	30	-	-0.030	0.005	-	0.003	-0.012	-	0.654	0.461	-	0.612	0.739	-	-12.7	0.1
CM2_23113 _Mar2017	10	-	0.009	0.003	-	-0.004	0.003	-	0.649	0.584	-	0.610	0.674	-	-4.7	0.4
	20	-	-0.003	0.010	-	0.014	-0.008	-	0.659	0.755	-	0.626	0.640	-	6.2	3.4
	30	-	0.004	0.010	-	0.007	-0.003	-	0.471	0.371	-	0.748	0.797	-	-1.0	4.9
	40	-	0.002	-0.007	-	-0.001	-0.004	-	0.812	0.580	-	0.574	0.652	-	-11.7	0.0
CM2_M _ay2016 _waves2 3092	20	-	-0.002	0.010	-	0.012	-0.006	-	0.519	0.594	-	0.722	0.738	-	-0.6	-3.8
	30	-	0.004	0.007	-	0.002	0.001	-	0.442	0.333	-	0.773	0.817	-	-7.2	0.8
	40	-	0.001	-0.009	-	-0.002	-0.005	-	0.797	0.558	-	0.632	0.669	-	-19.7	-4.9
CM2_Sep2016 _waves2311 3	10	-	0.015	-0.011	-	-0.016	0.012	-	0.645	0.583	-	0.609	0.670	-	-6.3	-1.1
	20	-	-0.008	0.024	-	0.025	-0.013	-	0.695	0.882	-	0.598	0.562	-	10.5	6.3
	30	-	0.001	0.020	-	0.019	-0.010	-	0.501	0.387	-	0.722	0.787	-	-1.6	5.1
	40	-	0.002	-0.013	-	-0.011	0.000	-	0.826	0.557	-	0.557	0.667	-	-13.6	-2.9
CM3_N _ov2015 _23091	10	0.014	-0.014	-0.003	-0.013	0.001	-0.011	0.747	0.903	0.885	0.511	0.471	0.480	5.1	2.3	-1.6
	20	-	-0.043	0.011	-	0.014	-0.020	-	0.572	0.603	-	0.659	0.638	-	-6.2	-4.3
	30	-	-0.030	0.011	-	0.004	-0.006	-	0.450	0.381	-	0.770	0.791	-	11.1	0.0
CM4_M _Ma _r2016 23	10	0.005	-0.002	-0.009	-0.001	-0.011	0.000	0.721	0.642	0.677	0.533	0.632	0.612	-5.3	-2.0	-1.4
	20	-0.003	-0.019	-0.009	-0.011	-0.011	-0.012	0.636	0.496	0.512	0.619	0.713	0.703	-1.0	-4.9	-4.2

Score		biais U (m/s)			biais V (m/s)			γ^2			corrélation vectorielle (mag.)			corrélation vectorielle (deg)		
Nom du cas		SPCOG-E	STC 500	STC 100	SPCOG-E	STC 500	STC 100	SPCOG-E	STC 500	STC 100	SPCO-E	STC 500	STC 100	SPCOG-E	STC 500	STC 100
Nom de station	Prof. (m)															
CM5_Nov2015_23089	10	-0.018	0.015	-0.017	0.020	-0.016	0.013	0.703	0.762	0.712	0.546	0.515	0.551	2.8	-4.8	-5.2
	20	-0.009	-0.004	-0.006	0.002	-0.007	-0.003	0.730	0.768	0.733	0.522	0.527	0.555	-4.6	-4.8	-6.5
	30	-0.004	-0.015	-0.003	-0.006	-0.005	-0.010	0.743	0.680	0.690	0.511	0.581	0.574	-4.9	-3.9	-2.0
	40	-0.005	-0.011	-0.007	0.002	-0.007	-0.004	0.718	0.710	0.707	0.548	0.569	0.569	-12.2	-5.1	0.1
	50	-0.002	-0.021	-0.009	-0.003	-0.007	-0.006	0.789	0.738	0.692	0.528	0.564	0.587	-22.7	-5.3	-4.1
	60	0.015	-0.016	0.006	-0.005	0.006	-0.005	0.948	0.569	0.549	0.512	0.668	0.680	-50.3	-4.8	-6.8
CM7_23_089_Nov2016	10	0.009	0.037	-0.004	0.048	0.000	0.042	0.671	0.519	0.494	0.663	0.708	0.726	2.4	-3.2	-6.6
	20	-	-0.012	0.014	-	0.012	-0.004	-	0.377	0.357	-	0.793	0.802	-	5.5	-0.1
	30	-	-0.040	0.030	-	0.017	-0.026	-	0.396	0.320	-	0.815	0.825	-	15.3	0.4
CM7_May2016_23088	10	0.022	-0.001	0.000	0.019	0.003	0.012	0.746	0.358	0.343	0.551	0.802	0.811	2.9	-1.2	-1.5
	20	-	-0.007	0.008	-	0.003	-0.004	-	0.403	0.381	-	0.795	0.797	-	-13.1	1.0
	30	-	0.020	0.000	-	-0.010	0.013	-	0.442	0.303	-	0.834	0.836	-	-9.3	-0.3
CM8_23_091_Nov2016	10	-0.001	0.027	0.011	0.006	0.010	0.009	0.695	0.406	0.414	0.623	0.773	0.776	3.0	-4.0	-1.8
	20	-	-0.018	0.013	-	0.016	-0.023	-	0.549	0.435	-	0.759	0.753	-	0.4	2.6
CM8_23_091_May2016	10	-0.001	0.027	0.011	0.006	0.010	0.009	0.695	0.406	0.414	0.623	0.773	0.776	3.0	-4.0	-1.8
	20	-	-0.018	0.013	-	0.016	-0.023	-	0.549	0.435	-	0.759	0.753	-	0.4	2.6
Canso_23089_May2017	10	-0.024	-0.018	-0.021	-0.020	-0.025	-0.027	0.613	0.652	0.675	0.656	0.666	0.660	-11.8	-4.1	-4.5
	20	-0.024	-0.010	-0.020	-0.025	-0.018	-0.026	0.566	0.641	0.658	0.685	0.700	0.690	-9.8	-1.6	-3.5
	30	-0.013	0.006	-0.006	-0.001	0.003	0.001	0.544	0.579	0.580	0.713	0.739	0.727	-6.8	-2.5	-3.6
	40	0.021	-0.001	0.009	0.035	0.014	0.048	0.474	0.416	0.415	0.759	0.806	0.790	-1.8	-16.2	-12.3
M2086	10	-0.005	0.019	-0.003	0.023	0.004	0.035	0.846	0.966	1.142	0.419	0.393	0.352	6.0	-0.8	-6.5
	20	-0.004	0.009	0.000	0.011	0.006	0.023	0.863	0.946	1.126	0.405	0.428	0.373	4.2	-4.6	-7.0
	30	-0.002	-0.001	0.001	-0.004	0.007	0.008	0.907	0.999	1.168	0.372	0.417	0.357	0.7	-9.2	-5.8
	40	0.001	0.001	0.006	-0.005	0.012	0.006	0.839	1.053	1.138	0.451	0.408	0.394	1.2	-6.2	-2.4
	50	0.006	-0.004	0.012	-0.012	0.014	-0.004	0.813	1.039	1.104	0.508	0.416	0.409	4.6	6.0	4.5
	60	0.016	-0.019	0.010	-0.015	0.007	-0.011	0.773	0.883	0.951	0.565	0.527	0.525	0.6	4.1	1.7
	70	0.042	-0.026	0.014	-0.014	0.013	-0.021	0.826	0.626	0.667	0.637	0.671	0.664	-16.4	3.7	3.4
M2087	10	0.037	-0.034	-	0.019	-0.030	-	0.775	0.763	-	0.606	0.600	-	1.3	2.9	-
	20	0.034	-0.037	-	0.020	-0.032	-	0.721	0.699	-	0.627	0.628	-	-1.1	-0.4	-

Score		biais U (m/s)			biais V (m/s)			γ^2			corrélation vectorielle (mag.)			corrélation vectorielle (deg)		
Nom du cas		SPCOG-E	STC 500	STC 100	SPCOG-E	STC 500	STC 100	SPCOG-E	STC 500	STC 100	SPCO-E	STC 500	STC 100	SPCOG-E	STC 500	STC 100
Nom de station	Prof. (m)															
	30	0.026	-0.037	-	0.016	-0.033	-	0.722	0.680	-	0.635	0.652	-	-2.1	-1.2	-
	40	0.020	-0.037	-	0.013	-0.032	-	0.747	0.753	-	0.622	0.628	-	-0.4	1.4	-
	50	0.013	-0.035	-	0.012	-0.030	-	0.722	0.697	-	0.631	0.641	-	2.9	3.4	-
	60	0.006	-0.036	-	0.013	-0.034	-	0.640	0.570	-	0.671	0.693	-	3.9	1.5	-
	70	-0.003	-0.039	-	0.011	-0.037	-	0.748	0.643	-	0.609	0.640	-	7.4	3.9	-
M2088	10	0.057	-0.049	-	0.074	-0.014	-	0.552	0.587	-	0.717	0.690	-	-3.8	-1.4	-
	20	0.052	-0.053	-	0.073	-0.018	-	0.512	0.543	-	0.734	0.711	-	-3.7	-2.1	-
	30	0.044	-0.053	-	0.066	-0.024	-	0.519	0.538	-	0.739	0.727	-	-5.1	-2.9	-
	40	0.039	-0.044	-	0.056	-0.021	-	0.615	0.631	-	0.694	0.684	-	-5.8	-2.4	-
	50	0.042	-0.023	-	0.049	-0.010	-	0.595	0.531	-	0.727	0.728	-	2.2	2.5	-
	60	0.045	-0.017	-	0.049	-0.002	-	0.705	0.510	-	0.721	0.728	-	5.1	0.5	-
	70	0.047	-0.001	-	0.042	0.016	-	0.843	0.549	-	0.625	0.684	-	9.1	-0.5	-

Tableau 8. Indices d'efficacité non tidaux pour les ADCP à des profondeurs standard (ensemble complet des observations; les stations représentatives sont surlignées).

Score		RMSE (m/s)			γ^2			corrélation vectorielle (mag.)			corrélation vectorielle (deg)		
Nom du cas		SPCOG-E	STC500	STC100	SPCOG-E	STC500	STC100	SPCOG-E	STC500	STC100	SPCOG-E	STC500	STC100
Nom de station	Prof. (m)												
CM1_23088 _Nov2016	10	-	0.062	0.066	-	1.121	1.174	-	0.103	0.095	-	-78.4	13.3
	20	-	0.059	0.059	-	0.905	0.921	-	0.363	0.383	-	9.2	1.9
	30	-	0.073	0.067	-	0.732	0.642	-	0.556	0.603	-	12.4	-1.3
CM1_May2016 _23091	10	-	0.070	0.071	-	0.995	1.020	-	0.281	0.307	-	11.3	1.8
	20	-	0.069	0.065	-	0.941	0.845	-	0.498	0.525	-	-17.9	-4.7
	30	-	0.069	0.065	-	0.763	0.693	-	0.504	0.597	-	-14.9	-2.4
CM1_Nov2015 _23088	10	-	0.065	0.070	-	0.991	1.088	-	0.232	0.168	-	37.6	9.2
	20	-	0.066	0.066	-	0.853	0.875	-	0.408	0.394	-	-19.2	-3.5
	30	-	0.072	0.058	-	0.683	0.477	-	0.619	0.725	-	-12.6	0.0
CM2_23113 _Mar2017	10	-	0.073	0.070	-	0.731	0.673	-	0.524	0.592	-	-8.3	0.0
	20	-	0.065	0.071	-	0.746	0.876	-	0.545	0.561	-	6.1	3.0
	30	-	0.086	0.076	-	0.492	0.393	-	0.736	0.784	-	-1.8	5.0

Score		RMSE (m/s)			γ^2			corrélation vectorielle (mag.)			corrélation vectorielle (deg)		
Nom du cas		SPCOG-E	STC500	STC100	SPCOG-E	STC500	STC100	SPCOG-E	STC500	STC100	SPCOG-E	STC500	STC100
Nom de station	Prof. (m)												
	40	-	0.095	0.081	-	0.842	0.623	-	0.528	0.619	-	-12.5	0.5
CM2_May2016_waves23092	20	-	0.059	0.064	-	0.609	0.703	-	0.652	0.675	-	-1.3	-4.1
	30	-	0.078	0.068	-	0.457	0.357	-	0.769	0.802	-	-7.8	0.8
	40	-	0.088	0.074	-	0.815	0.571	-	0.643	0.657	-	-19.9	-4.8
	40	-	0.088	0.074	-	0.815	0.571	-	0.643	0.657	-	-19.9	-4.8
CM2_Sep2016_waves23113	10	-	0.077	0.076	-	0.710	0.667	-	0.550	0.589	-	-6.7	1.1
	20	-	0.071	0.081	-	0.852	1.103	-	0.445	0.388	-	13.6	5.3
	30	-	0.089	0.077	-	0.457	0.334	-	0.776	0.819	-	-2.1	4.9
	40	-	0.095	0.077	-	0.814	0.534	-	0.587	0.684	-	-15.0	-2.7
CM3_Nov2015_23091	10	0.066	0.072	0.072	1.003	1.267	1.265	0.161	0.176	0.171	12.9	25.6	13.8
	20	-	0.074	0.076	-	0.737	0.791	-	0.526	0.484	-	-10.8	-4.8
	30	-	0.079	0.073	-	0.514	0.442	-	0.733	0.752	-	11.6	-0.2
CM4_Mar2016_23113	10	0.067	0.066	0.069	1.007	0.935	0.975	0.276	0.420	0.407	14.4	1.1	-0.1
	20	0.075	0.068	0.070	0.719	0.599	0.620	0.539	0.636	0.621	7.9	-4.8	-3.9
CM5_Nov2015_23089	10	0.093	0.097	0.095	0.755	0.810	0.787	0.500	0.460	0.485	7.5	-5.5	-8.3
	20	0.077	0.077	0.077	0.825	0.830	0.835	0.421	0.462	0.475	-5.8	-8.9	-14.4
	30	0.086	0.080	0.082	0.862	0.754	0.793	0.386	0.516	0.485	-7.1	-5.5	-5.3
	40	0.081	0.080	0.080	0.834	0.823	0.819	0.437	0.476	0.470	-15.3	-8.9	-0.9
	50	0.076	0.074	0.072	0.880	0.883	0.827	0.387	0.449	0.483	-24.9	-11.7	-9.3
	60	0.074	0.061	0.060	0.971	0.711	0.679	0.355	0.570	0.589	-53.0	-3.5	-6.9
CM7_23089_Nov2016	10	0.096	0.104	0.100	1.014	1.110	1.062	0.221	0.087	0.193	71.4	12.6	-6.2
	20	-	0.082	0.081	-	0.993	0.964	-	0.270	0.313	-	12.4	2.9
	30	-	0.098	0.095	-	0.674	0.635	-	0.585	0.605	-	10.6	-1.7
CM7_May2016_23088	10	0.106	0.087	0.084	1.126	0.763	0.736	0.107	0.488	0.527	-167.0	3.0	-2.4
	20	-	0.082	0.084	-	0.802	0.850	-	0.529	0.547	-	-11.9	1.7
	30	-	0.108	0.095	-	0.597	0.475	-	0.723	0.725	-	-8.6	-2.4
CM8_23091_Nov2016	10	0.088	0.079	0.081	1.110	0.953	0.999	0.087	0.278	0.240	148.0	3.1	-2.7
	20	-	0.085	0.088	-	0.945	1.002	-	0.235	0.203	-	0.7	6.9
CM8_May2016_23099	10	0.088	0.079	0.081	1.110	0.953	0.999	0.087	0.278	0.240	148.0	3.1	-2.7
	20	-	0.085	0.088	-	0.945	1.002	-	0.235	0.203	-	0.7	6.9
Canso_23089_May2017	10	0.167	0.171	0.176	0.691	0.725	0.752	0.601	0.612	0.604	-14.4	-5.7	-6.2
	20	0.153	0.160	0.162	0.666	0.722	0.744	0.616	0.641	0.631	-14.3	-4.2	-6.5

Score		RMSE (m/s)			γ^2			corrélation vectorielle (mag.)			corrélation vectorielle (deg)		
Nom du cas		SPCOG-E	STC500	STC100	SPCOG-E	STC500	STC100	SPCOG-E	STC500	STC100	SPCOG-E	STC500	STC100
Nom de station	Prof. (m)												
	30	0.147	0.150	0.151	0.622	0.648	0.663	0.656	0.675	0.661	-12.4	-2.6	-3.9
	40	0.128	0.122	0.129	0.632	0.538	0.558	0.682	0.712	0.683	-15.1	-14.7	-9.3
M2086	10	0.121	0.129	0.140	0.918	1.044	1.183	0.332	0.310	0.306	10.6	4.7	-5.5
	20	0.107	0.112	0.122	0.971	1.063	1.244	0.279	0.320	0.283	11.3	-0.4	-4.6
	30	0.099	0.104	0.112	1.020	1.129	1.277	0.241	0.308	0.280	5.8	-6.4	-1.1
	40	0.091	0.101	0.104	0.947	1.163	1.221	0.344	0.315	0.335	3.7	-3.4	2.0
	50	0.085	0.095	0.097	0.900	1.102	1.168	0.436	0.356	0.364	8.1	9.5	7.8
	60	0.090	0.094	0.097	0.850	0.958	1.039	0.522	0.478	0.471	3.1	6.4	2.9
	70	0.108	0.087	0.091	0.890	0.702	0.742	0.630	0.627	0.616	-17.8	3.7	3.3
	70	0.108	0.087	0.091	0.890	0.702	0.742	0.630	0.627	0.616	-17.8	3.7	3.3
M2087	10	0.205	0.200	-	0.870	0.853	-	0.548	0.532	-	1.8	3.6	-
	20	0.193	0.187	-	0.836	0.802	-	0.555	0.553	-	-1.0	-0.1	-
	30	0.173	0.165	-	0.865	0.806	-	0.551	0.569	-	-3.2	-1.8	-
	40	0.163	0.162	-	0.959	0.960	-	0.503	0.511	-	-1.6	0.4	-
	50	0.162	0.158	-	0.901	0.876	-	0.513	0.519	-	2.2	2.7	-
	60	0.156	0.149	-	0.831	0.755	-	0.552	0.571	-	3.3	3.9	-
	70	0.138	0.132	-	0.909	0.822	-	0.504	0.515	-	5.0	6.8	-
	70	0.138	0.132	-	0.909	0.822	-	0.504	0.515	-	5.0	6.8	-
M2088	10	0.172	0.174	-	0.679	0.702	-	0.652	0.609	-	-5.4	-3.9	-
	20	0.163	0.167	-	0.648	0.676	-	0.663	0.622	-	-5.2	-4.9	-
	30	0.146	0.150	-	0.696	0.729	-	0.658	0.616	-	-7.9	-7.5	-
	40	0.144	0.146	-	0.877	0.892	-	0.562	0.524	-	-9.9	-6.8	-
	50	0.134	0.128	-	0.765	0.688	-	0.621	0.614	-	1.6	3.6	-
	60	0.130	0.117	-	0.816	0.629	-	0.639	0.643	-	3.7	0.7	-
	70	0.125	0.108	-	0.934	0.669	-	0.552	0.594	-	9.6	0.0	-
	70	0.125	0.108	-	0.934	0.669	-	0.552	0.594	-	9.6	0.0	-

Tableau 9. Indices d'efficacité tidaux pour les ADCP à des profondeurs standard (ensemble complet des observations; les stations représentatives sont surlignées).

score		RMSE (m/s)			χ^2		
Nom de cas		SPOGC-E	STC500	STC100	SPOGC-E	STC500	STC100
Nom de station	Prof. (m)						
CM1_23088 _Nov2016	10	-	0.026	0.013	-	1.657	0.444
	20	-	0.021	0.013	-	0.958	0.377
	30	-	0.017	0.013	-	0.458	0.261
CM1_May2016 _23091	10	-	0.030	0.015	-	1.452	0.365
	20	-	0.027	0.014	-	1.270	0.350
	30	-	0.021	0.024	-	0.802	1.016
CM1_Nov2015 _23088	10	-	0.034	0.023	-	1.375	0.658
	20	-	0.026	0.016	-	1.218	0.463
	30	-	0.024	0.020	-	0.471	0.336
CM2_23113 _Mar2017	10	-	0.028	0.024	-	0.363	0.275
	20	-	0.022	0.021	-	0.327	0.292
	30	-	0.029	0.024	-	0.338	0.237
	40	-	0.036	0.026	-	0.655	0.348
CM2_May2016_ waves23092	20	-	0.015	0.014	-	0.153	0.144
	30	-	0.024	0.017	-	0.325	0.154
	40	-	0.025	0.020	-	0.647	0.427
CM2_Sep2016_ waves23113	10	-	0.030	0.026	-	0.379	0.288
	20	-	0.028	0.029	-	0.333	0.359
	30	-	0.043	0.041	-	0.754	0.690
	40	-	0.053	0.044	-	0.868	0.603
CM3_Nov2015 _23091	10	0.028	0.025	0.023	0.310	0.252	0.222
	20	-	0.022	0.021	-	0.169	0.163
	30	-	0.029	0.024	-	0.228	0.160
CM4_Mar2016 _23113	10	0.041	0.036	0.038	0.408	0.316	0.347
	20	0.045	0.036	0.036	0.496	0.318	0.324
CM5_Nov2015 _23089	10	0.033	0.035	0.029	0.467	0.531	0.347
	20	0.028	0.031	0.025	0.388	0.480	0.307
	30	0.022	0.027	0.022	0.244	0.368	0.249
	40	0.022	0.022	0.022	0.247	0.248	0.246
	50	0.032	0.023	0.022	0.510	0.274	0.252
	60	0.043	0.021	0.021	0.893	0.217	0.221
CM7_23089 _Nov2016	10	0.064	0.023	0.022	0.407	0.052	0.050
	20	-	0.029	0.026	-	0.060	0.050
	30	-	0.048	0.025	-	0.153	0.041
CM7_May2016 _23088	10	0.077	0.022	0.020	0.465	0.037	0.033
	20	-	0.037	0.023	-	0.118	0.046
	30	-	0.053	0.022	-	0.221	0.037

score		RMSE (m/s)			γ^2		
Nom de cas		SPOGC-E	STC500	STC100	SPOGC-E	STC500	STC100
Nom de station	Prof. (m)						
CM8_23091_Nov2016	10	0.067	0.022	0.019	0.440	0.049	0.037
	20	-	0.054	0.019	-	0.282	0.037
CM8_May2016_23099	10	0.067	0.022	0.019	0.440	0.049	0.037
	20	-	0.054	0.019	-	0.282	0.037
Canso_23089_May2017	10	0.044	0.050	0.050	0.237	0.305	0.311
	20	0.037	0.050	0.049	0.157	0.291	0.280
	30	0.045	0.051	0.045	0.227	0.288	0.222
	40	0.052	0.053	0.046	0.193	0.195	0.146
M2086	10	0.024	0.024	0.035	0.265	0.271	0.587
	20	0.023	0.022	0.033	0.264	0.249	0.543
	30	0.025	0.025	0.033	0.308	0.328	0.553
	40	0.022	0.028	0.032	0.292	0.462	0.605
	50	0.020	0.029	0.030	0.282	0.582	0.608
	60	0.022	0.026	0.025	0.289	0.410	0.381
	70	0.028	0.018	0.018	0.405	0.176	0.177
M2087	10	0.052	0.053	-	0.304	0.327	-
	20	0.046	0.048	-	0.225	0.245	-
	30	0.044	0.046	-	0.214	0.237	-
	40	0.040	0.042	-	0.168	0.186	-
	50	0.043	0.039	-	0.185	0.159	-
	60	0.037	0.028	-	0.127	0.074	-
	70	0.041	0.026	-	0.257	0.101	-
M2088	10	0.031	0.041	-	0.102	0.171	-
	20	0.031	0.036	-	0.093	0.123	-
	30	0.033	0.030	-	0.100	0.087	-
	40	0.030	0.031	-	0.090	0.094	-
	50	0.036	0.033	-	0.157	0.130	-
	60	0.050	0.033	-	0.396	0.169	-
	70	0.049	0.028	-	0.531	0.173	-

Tableau 10. Indices d'efficacité des modèles pour les stations d'instruments de mesure de la température à la surface de la mer et de sondes CTD.

Station	biais (°C ; PSU)			CRMSE (°C ; PSU)			χ^2			Pearson		
	SPOGC-E	STC500	STC100	SPOGC-E	STC500	STC100	SPOGC-E	STC500	STC100	SPOGC-E	STC500	STC100
SST												
44488	-0.519	-0.281	-0.278	1.042	0.932	0.940	0.025	0.020	0.021	0.989	0.990	0.990
44489	-0.359	-0.243	-0.188	0.815	0.813	0.806	0.016	0.016	0.016	0.993	0.992	0.992
MCTD Température												
CW_55m	-	-	1.603	-	-	0.880	-	-	0.212	-	-	0.970
CB_10m	-0.722	-0.428	-0.357	1.457	1.239	1.256	0.063	0.045	0.046	0.971	0.980	0.979
CB_48m	0.062	0.303	0.362	1.117	0.988	1.022	0.120	0.097	0.104	0.938	0.953	0.948
MCTD Salinité												
CW_55m	-	-	0.198	-	-	0.158	-	-	0.454	-	-	0.751
CB_10m	0.418	0.406	0.405	0.178	0.174	0.179	0.192	0.187	0.198	0.912	0.915	0.910
CB_48m	0.290	0.202	0.225	0.318	0.202	0.205	0.395	0.169	0.175	0.779	0.913	0.910

Tableau 11. Scores horaires moyens pour la prédiction de dérive.

Heure	Indice d'efficacité de Molcard		Distance de séparation (km)	
	SPOGC-E	STC500	SPOGC-E	STC500
1	0.35	0.37	0.47	0.43
2	0.35	0.37	0.94	0.85
3	0.35	0.38	1.38	1.25
4	0.35	0.38	1.82	1.63
5	0.35	0.38	2.24	1.99
6	0.34	0.38	2.66	2.32
7	0.34	0.39	3.06	2.64
8	0.33	0.39	3.47	2.95
9	0.33	0.39	3.87	3.24
10	0.32	0.39	4.27	3.54
11	0.31	0.38	4.67	3.84
12	0.31	0.38	5.07	4.14
13	0.3	0.38	5.46	4.44
14	0.29	0.37	5.86	4.74
15	0.29	0.37	6.25	5.04
16	0.28	0.37	6.64	5.34
17	0.28	0.36	7.03	5.65
18	0.28	0.36	7.42	5.95
19	0.27	0.36	7.81	6.26
20	0.27	0.35	8.21	6.56
21	0.27	0.35	8.6	6.87
22	0.27	0.35	8.99	7.17
23	0.27	0.34	9.39	7.46
24	0.27	0.34	9.81	7.75

12. FIGURES

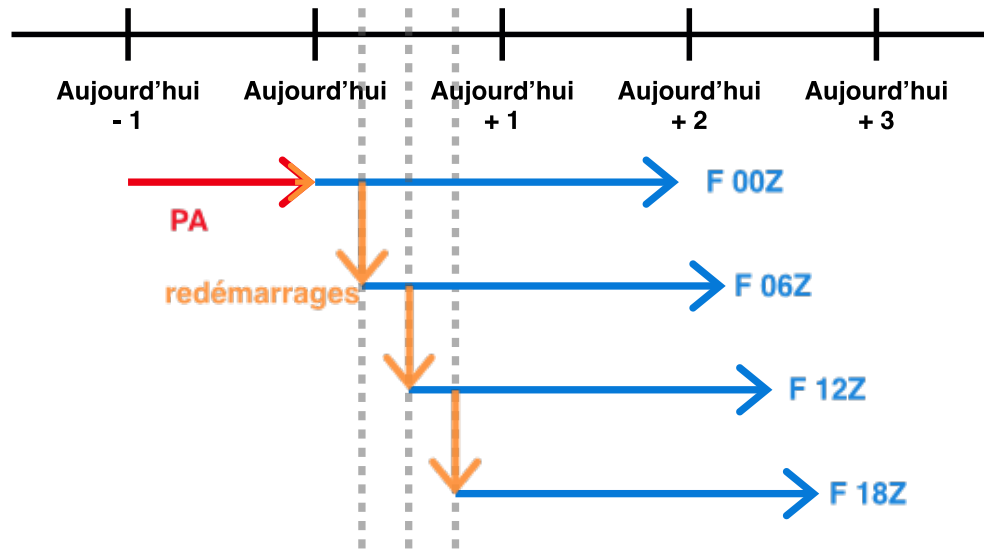


Figure 1. Schéma de séquençage de la pseudo-analyse (PA, en rouge) et des 4 prévisions de 48 h (en bleu) pour une date donnée. Les lignes pointillées grises sont espacées de six heures et les flèches oranges indiquent les moments où un fichier de redémarrage est généré et utilisé pour lancer l'étape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

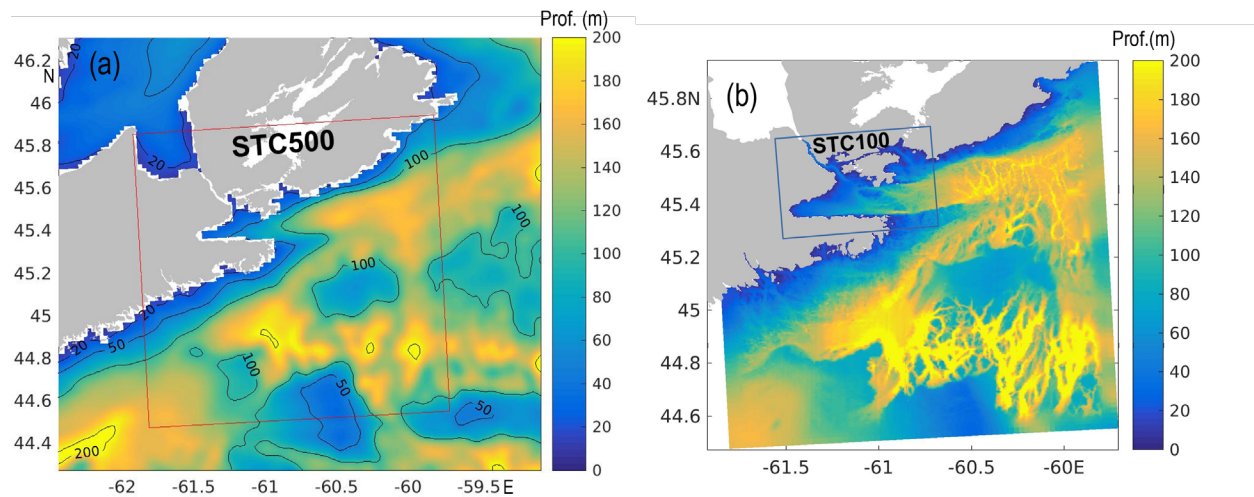


Figure 2. Domaines des modèles portuaires : (a) L'encadré STC500 montre l'emboîtement dans le SPCOG-E et la bathymétrie du SPCOG-E; (b) l'encadré STC100 montre l'emboîtement dans le domaine du STC500 et la bathymétrie du STC500. Reproduit de DH22.

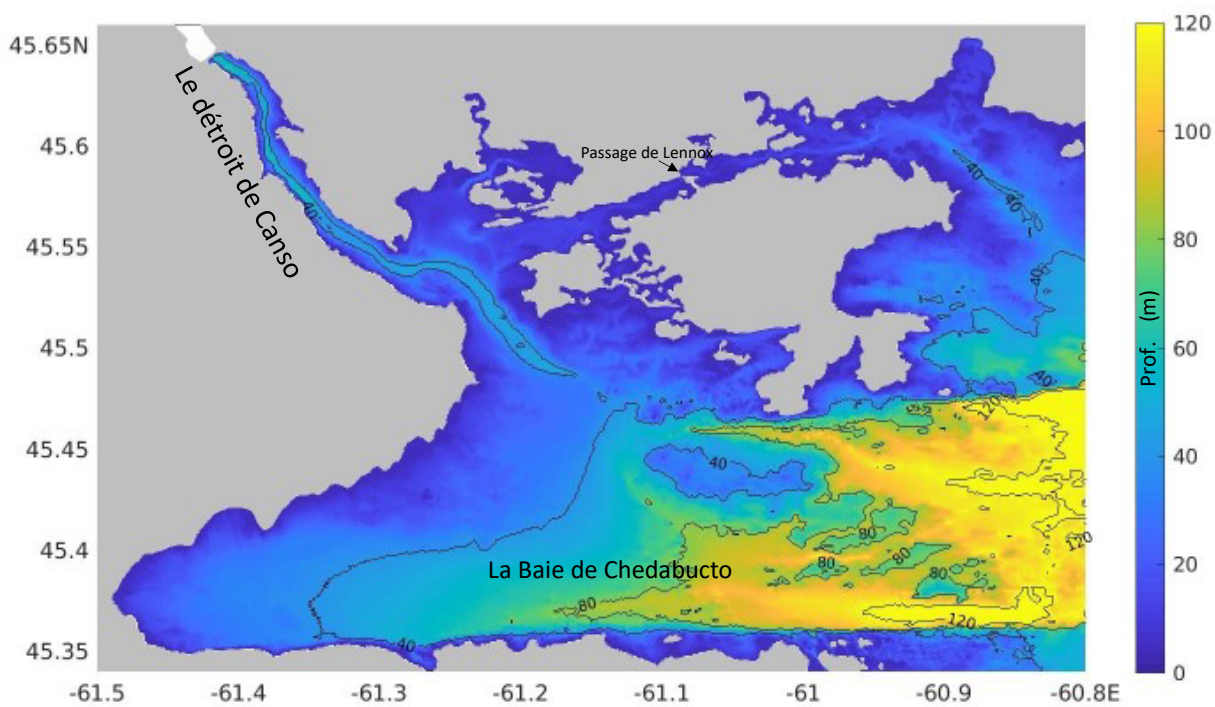


Figure 3. Carte détaillée de la zone intérieure du port.

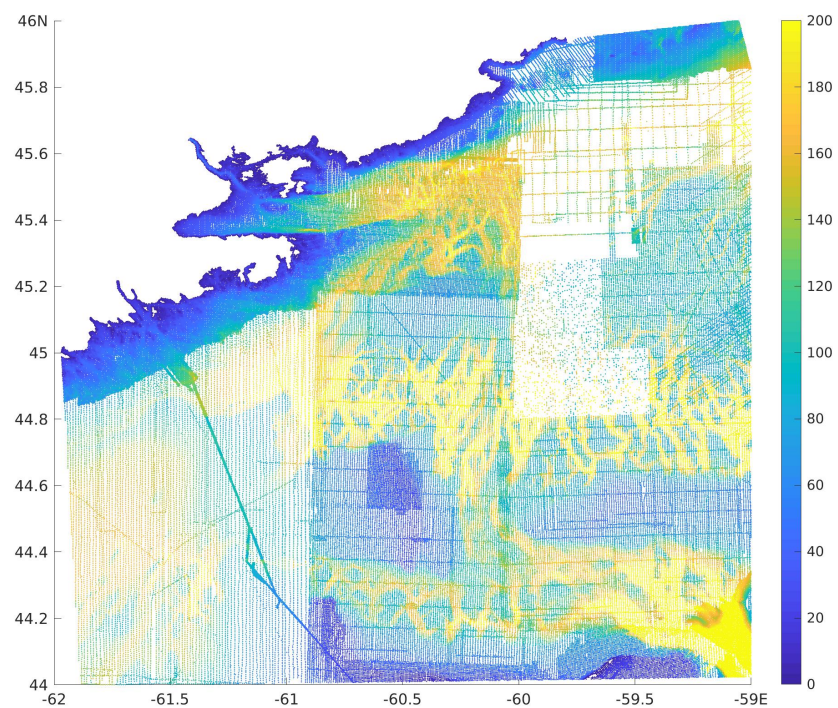


Figure 4. Sources de données originales du SHC tronquées horizontalement à 200 m. Reproduit de DH22.

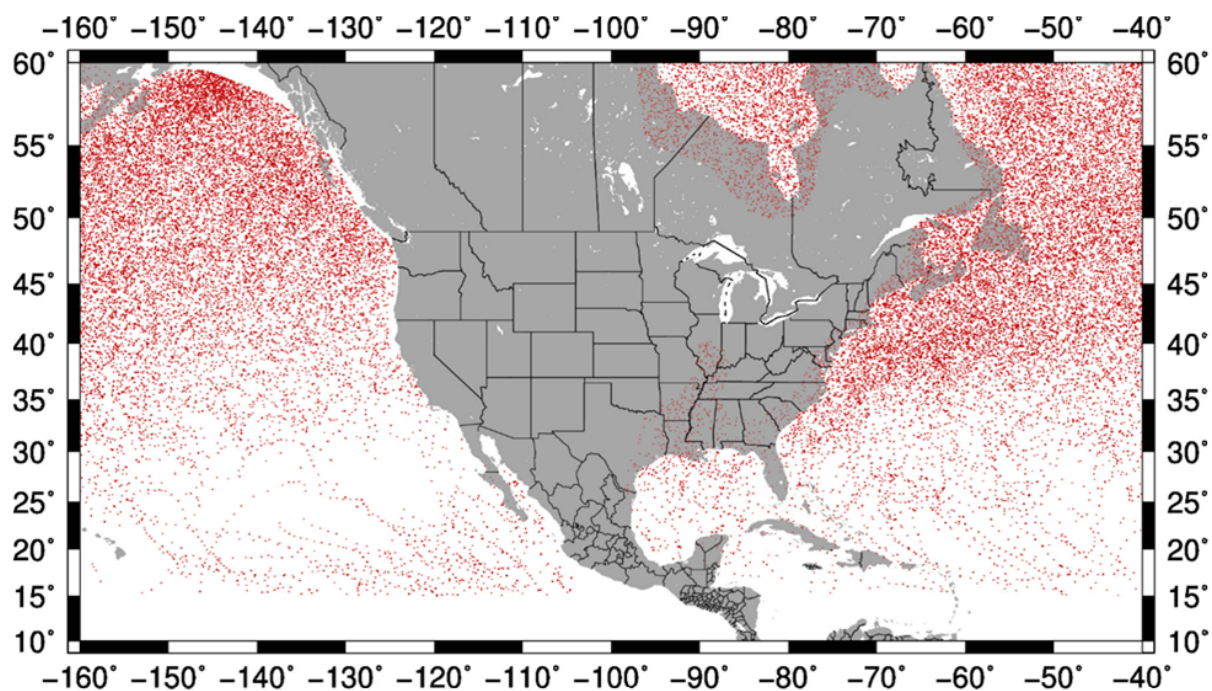


Figure 5. Emplacements des cyclones toutes les 6 heures de 2010 à 2021.

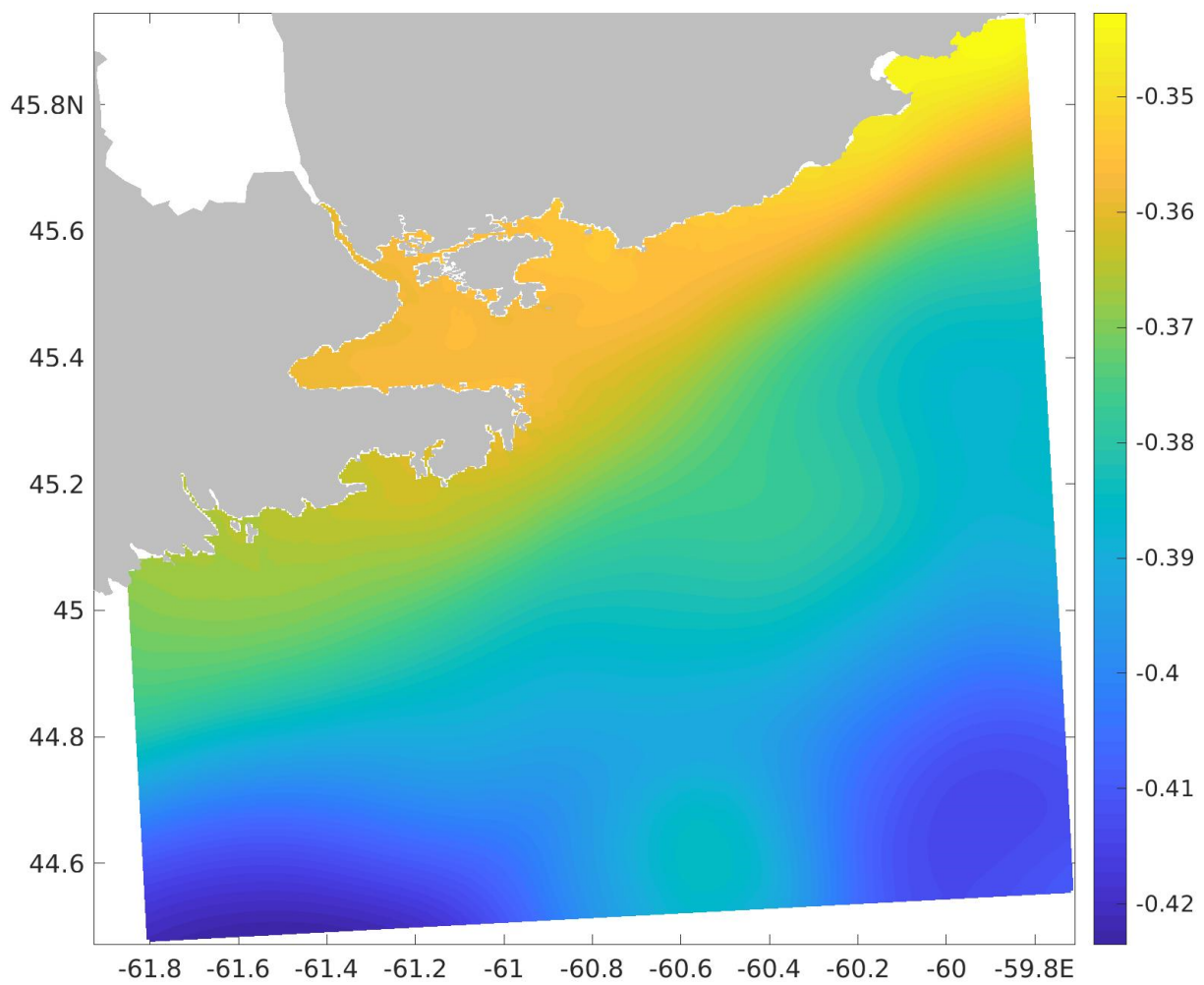


Figure 6. Hauteur moyenne de la surface de la mer (m) en 2016-2021 d'après le STC500.



Figure 7. Variation interannuelle de la variance non modélisée ($CRMSE^2$).

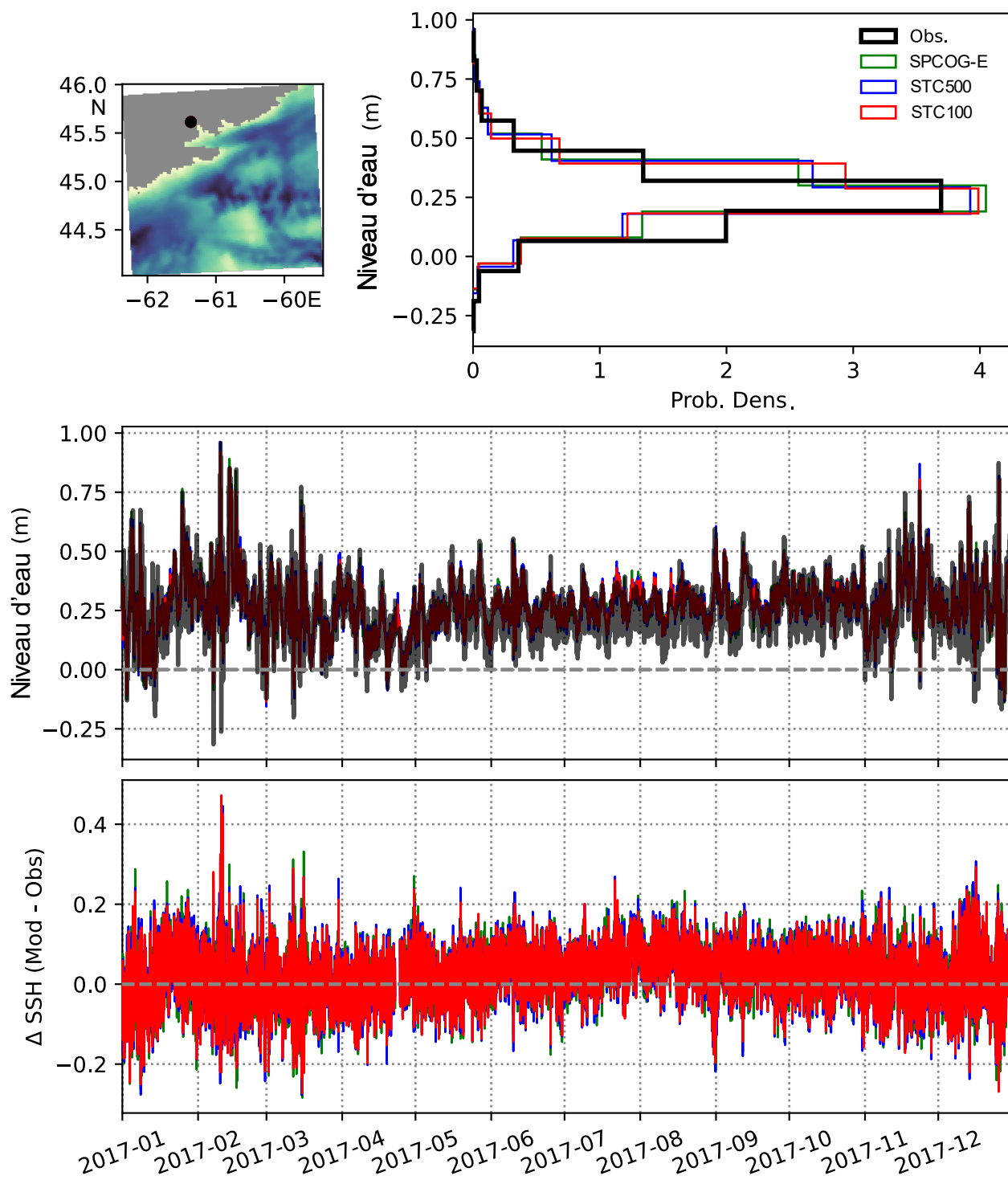


Figure 8. Niveau d'eau résiduel (non tidal) observé et modélisé (2017) et erreur à la station de mesure de Port Hawkesbury (Emplacement de la station indiqué sur la carte en encart).

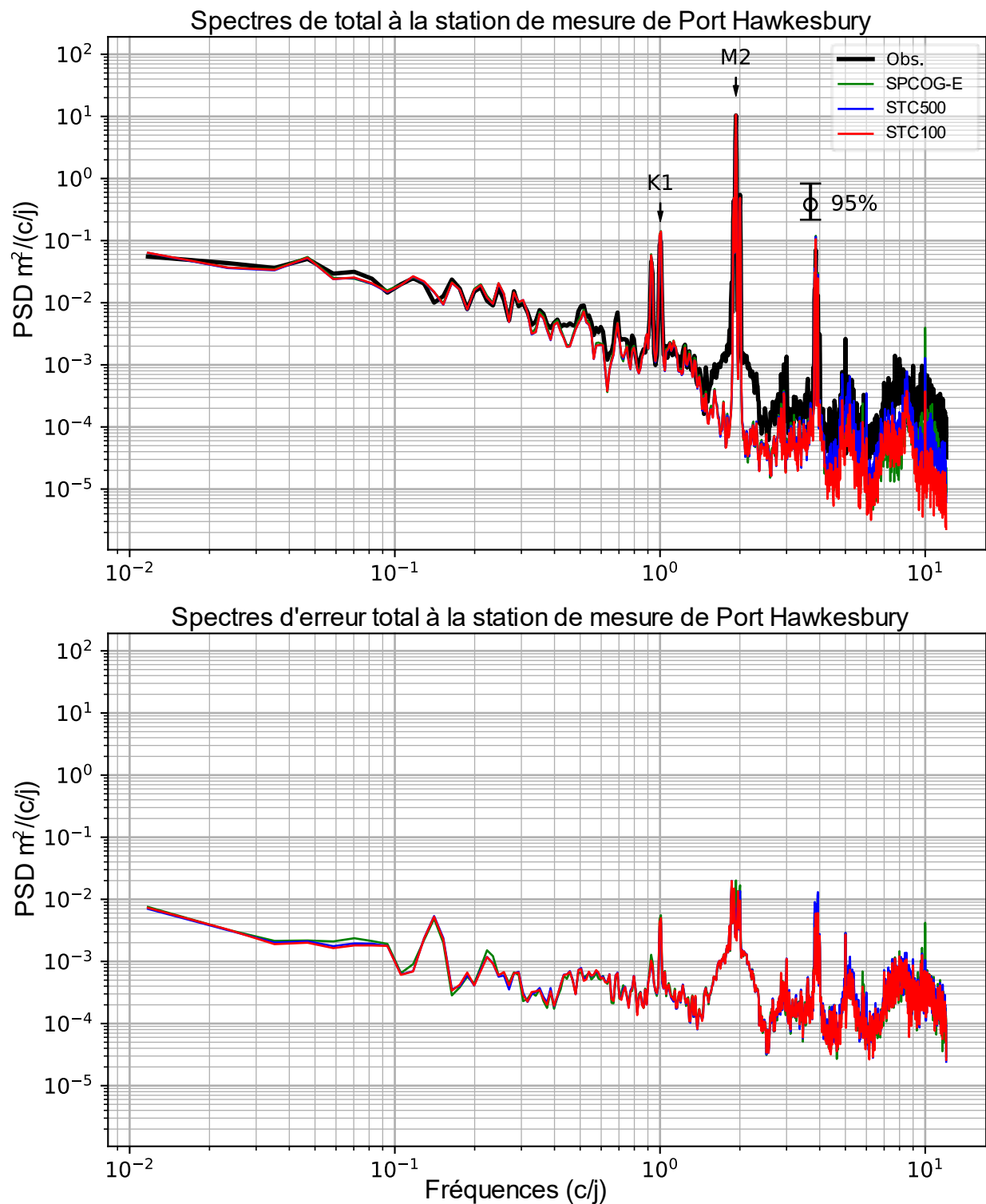


Figure 9. Spectres de puissance du niveau d'eau total à la station de mesure de Port Hawkesbury, selon les données de 2017.

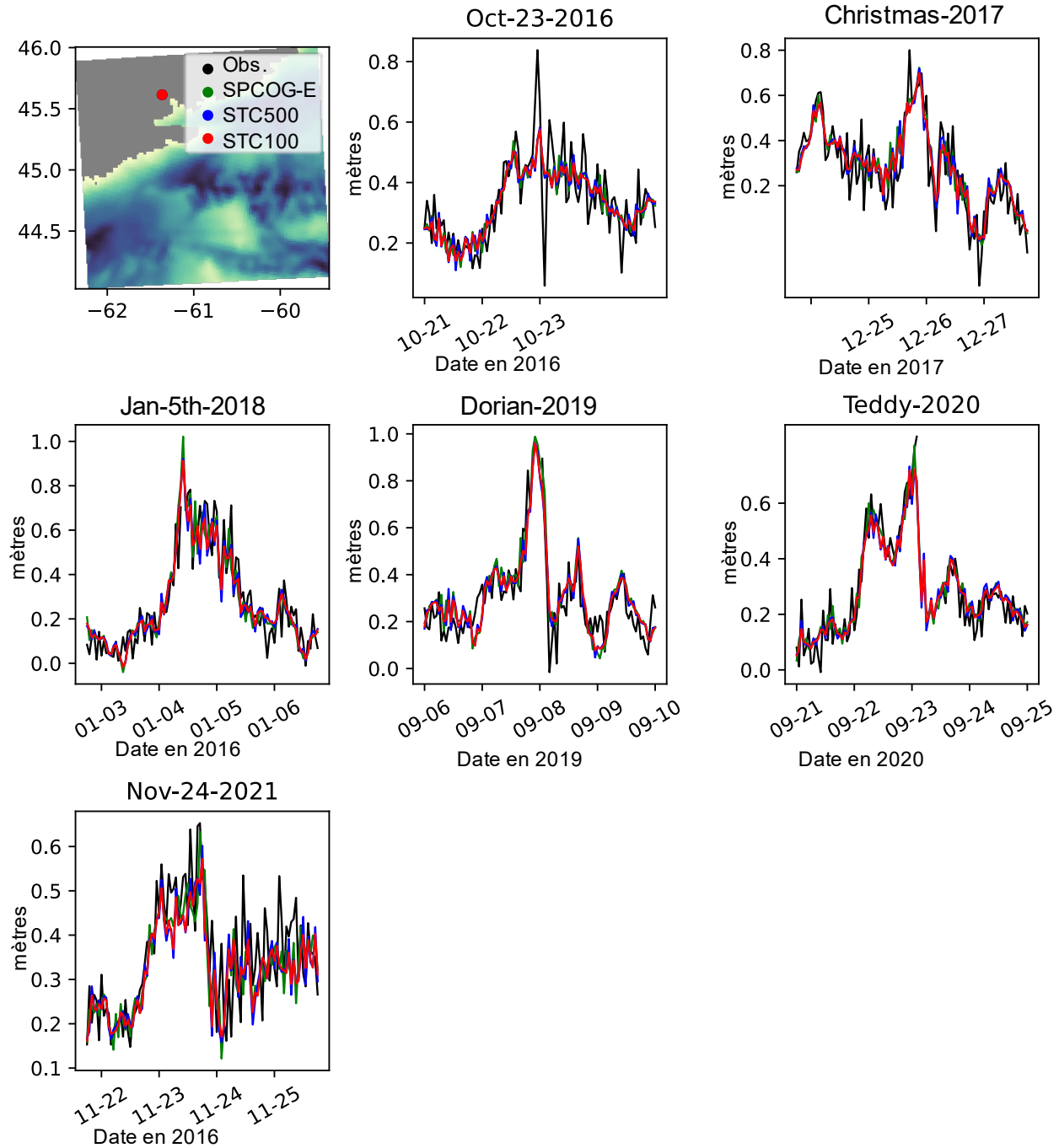


Figure 10. Niveau d'eau résiduel (non tidal) à la station de mesure de Port Hawkesbury pendant six tempêtes documentées.

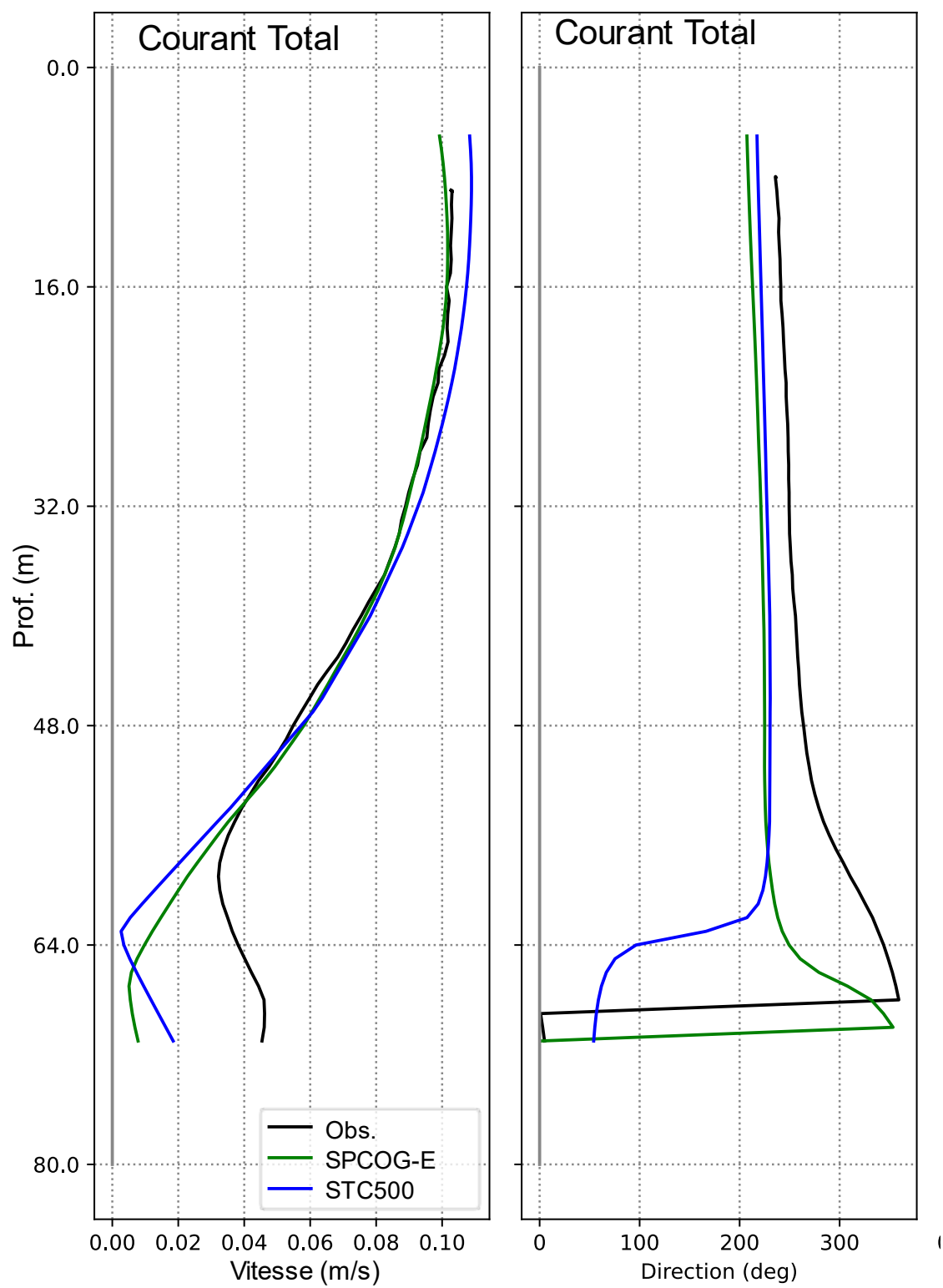


Figure 11. Profil vertical du courant moyen à la station M2087.

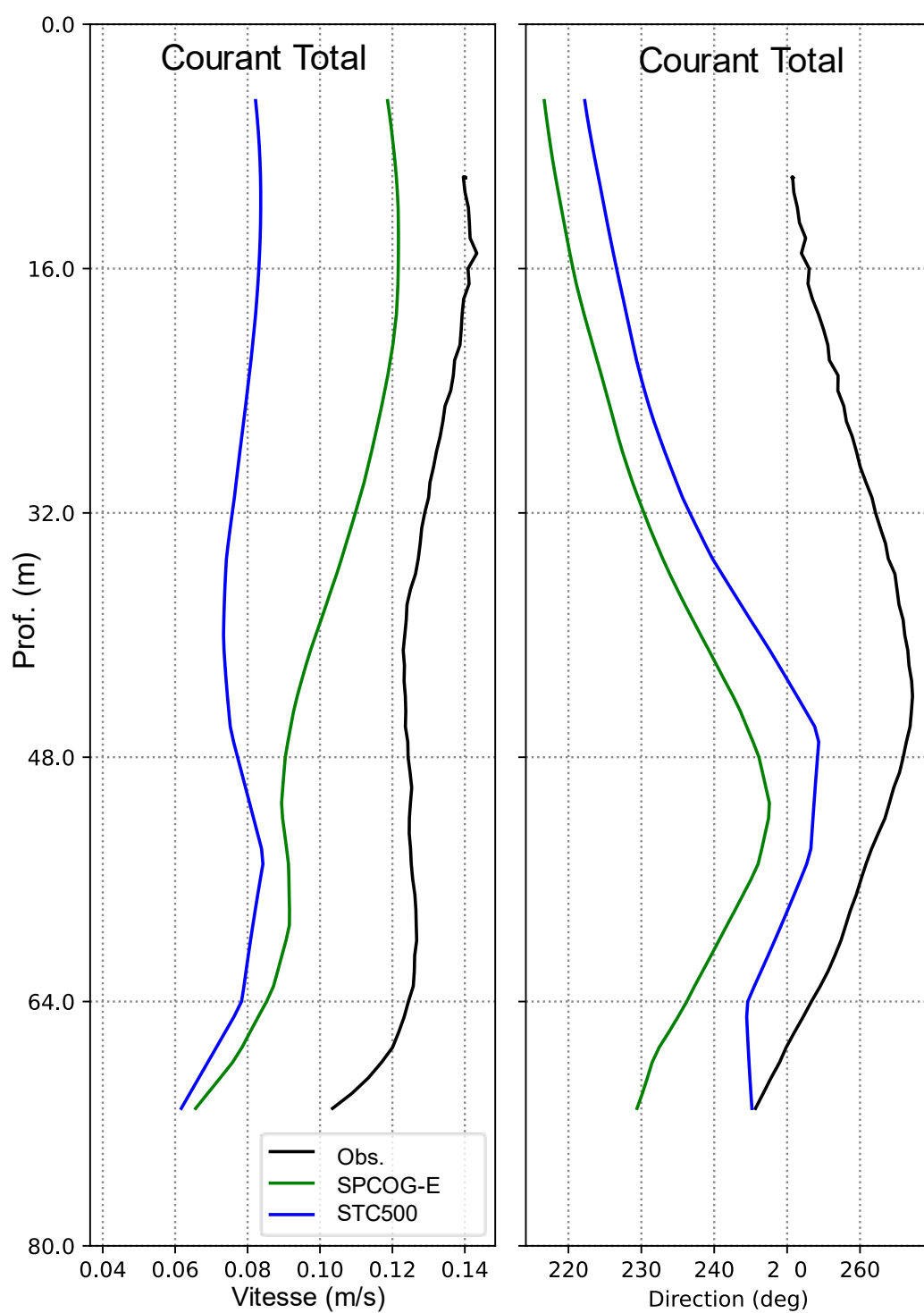


Figure 12. Profil vertical du courant moyen à la station M2088.

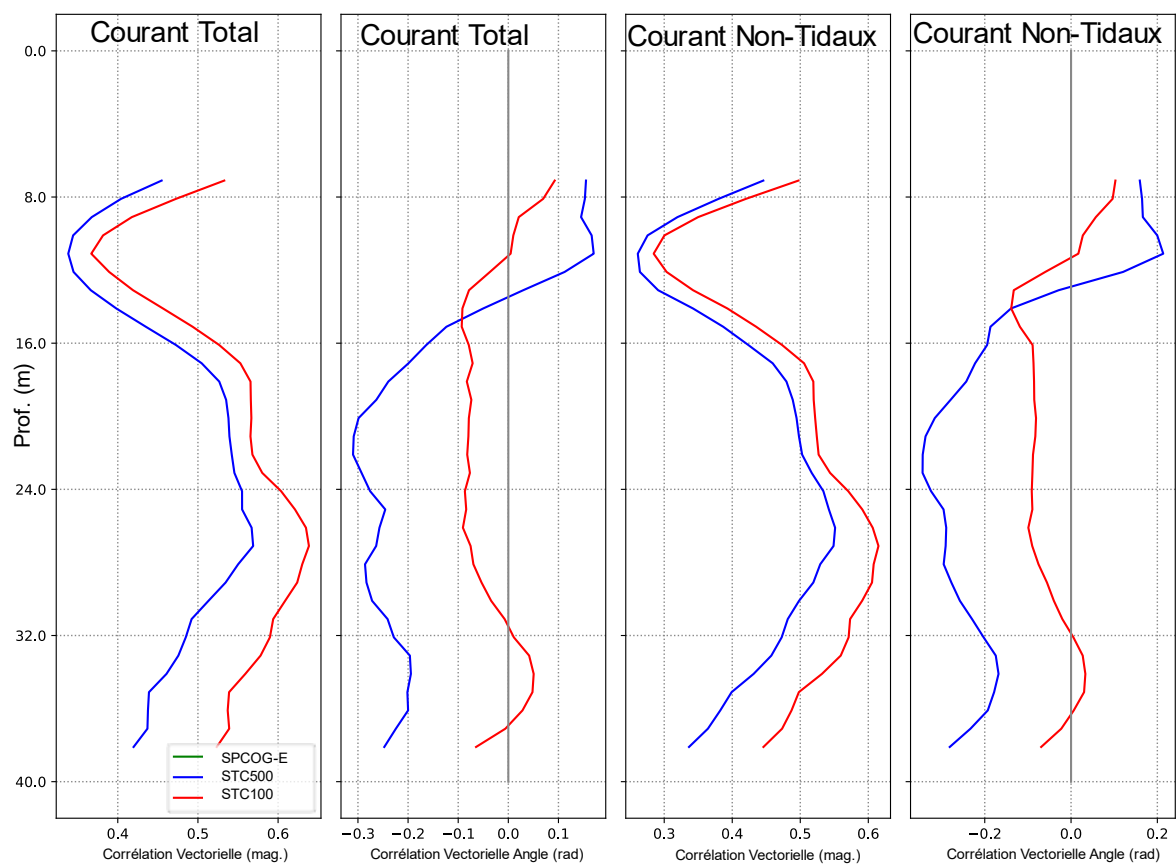


Figure 13. Profil de corrélation vectorielle à la station CM1_May2016.

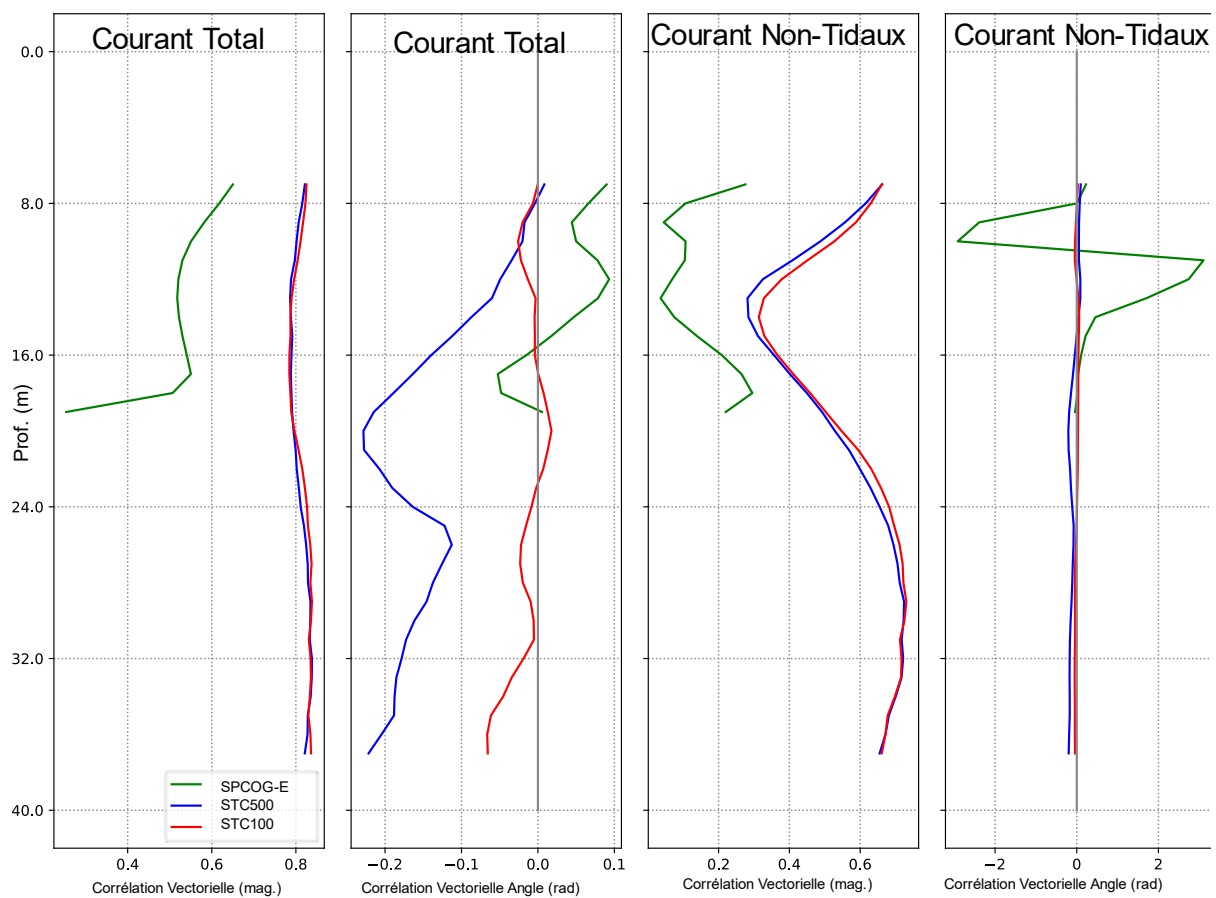


Figure 14. Profil de corrélation vectorielle à la station CM7_May2016.

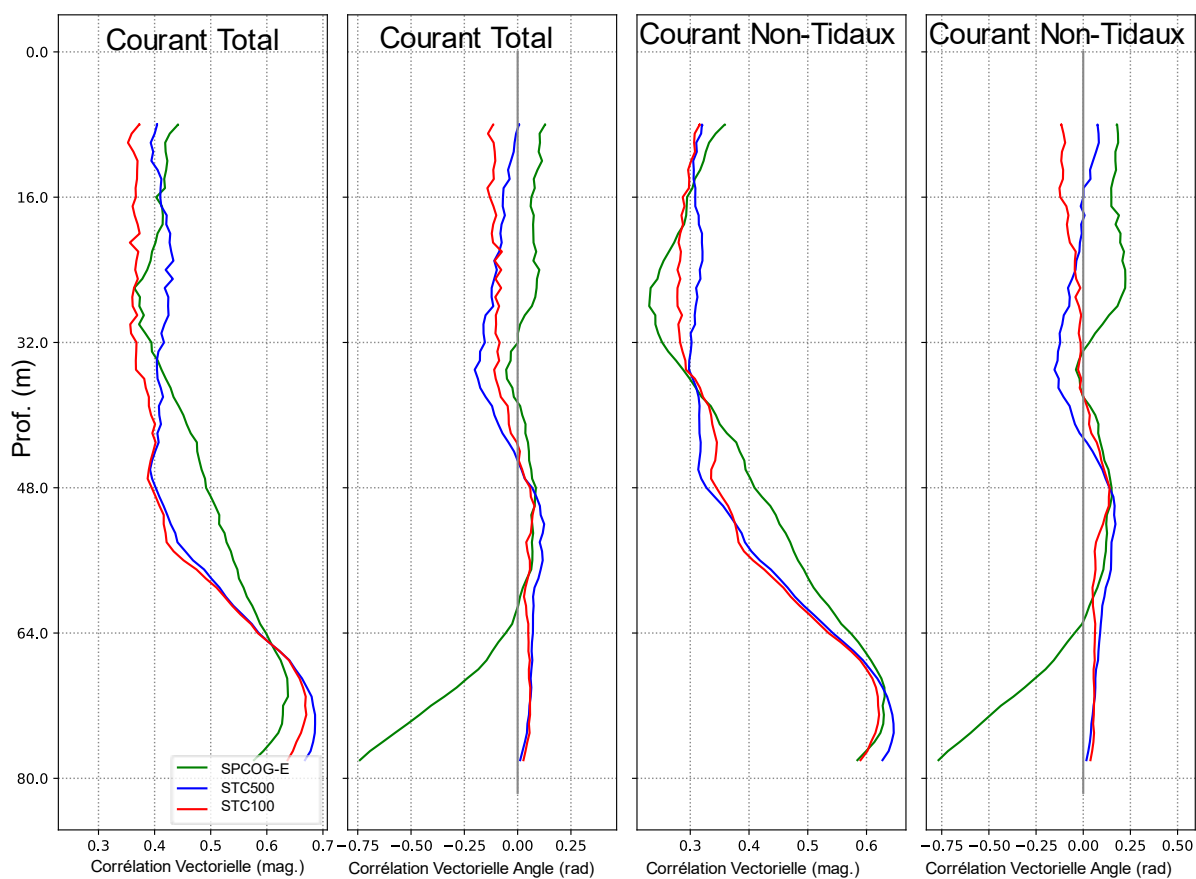


Figure 15. Profil de corrélation vectorielle à la station M2086.

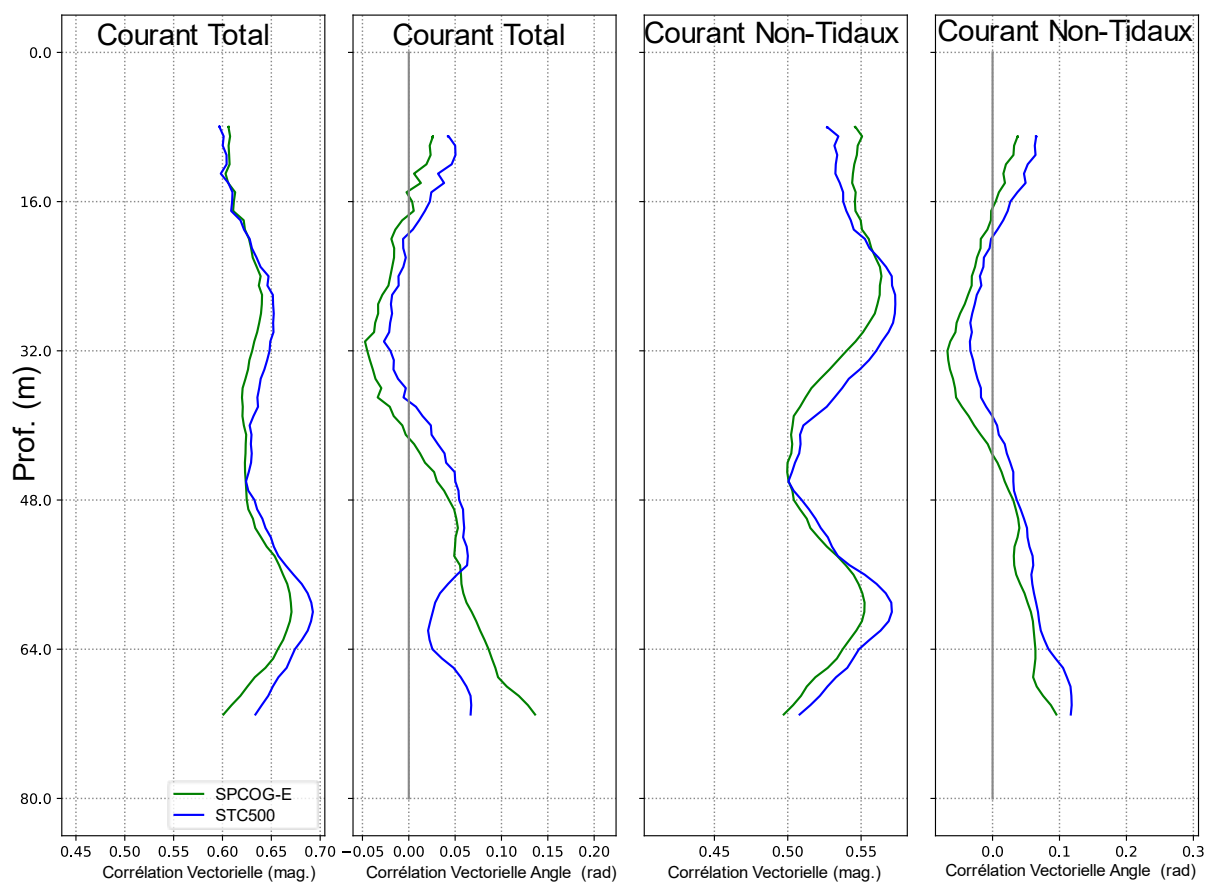


Figure 16. Profil de corrélation vectorielle à la station M2087.

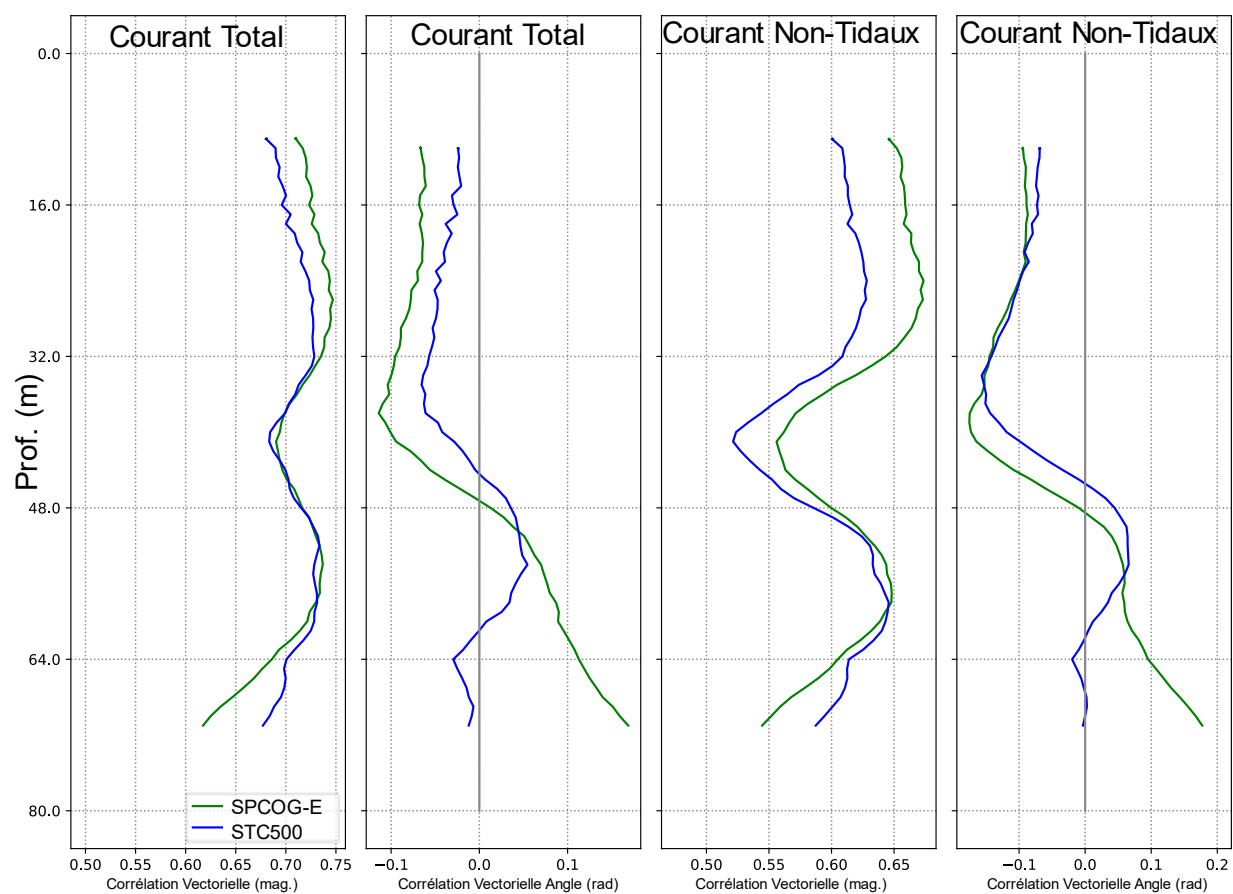


Figure 17. Profil de corrélation vectorielle à la station M2088.

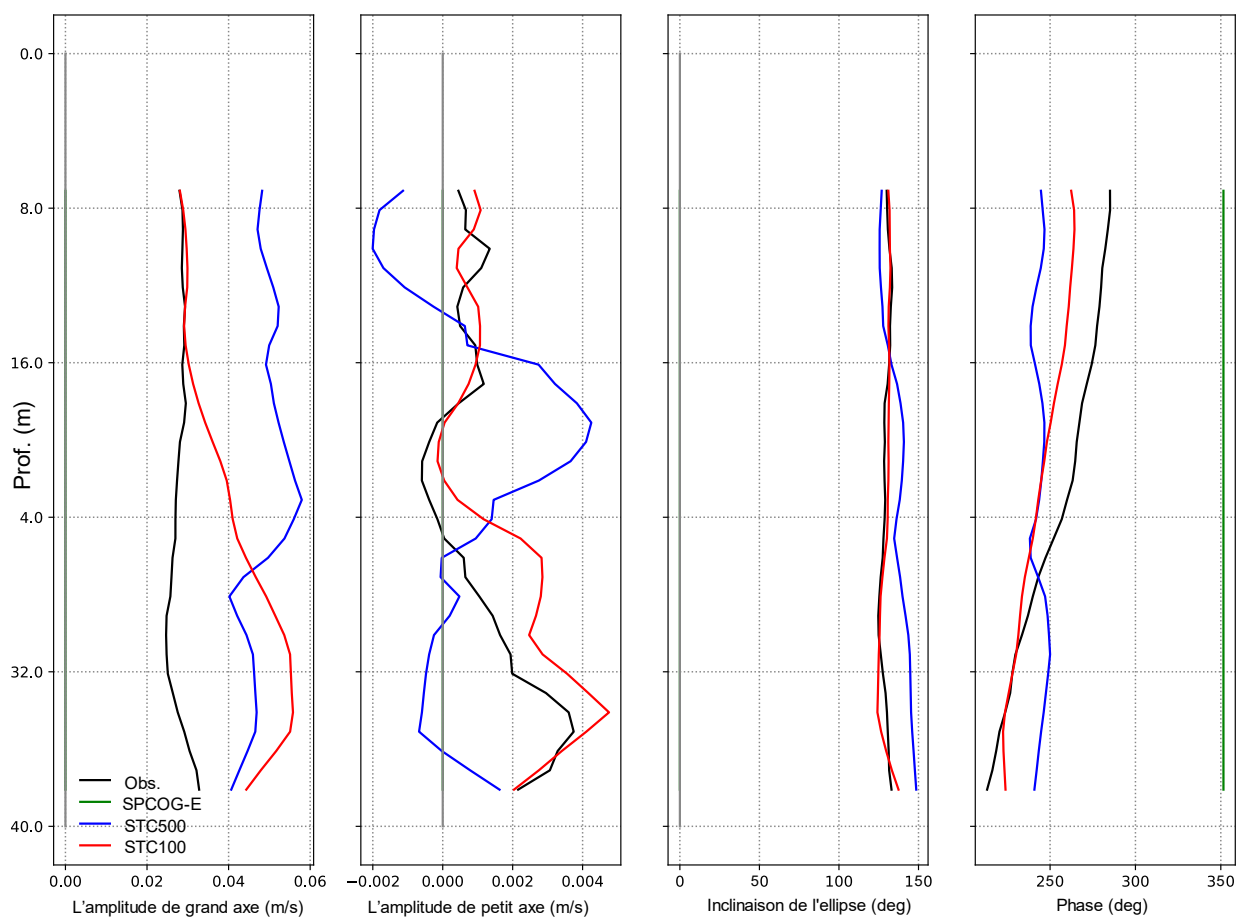


Figure 18. Profil des composantes elliptiques de M2 à la station CM1_May2016.

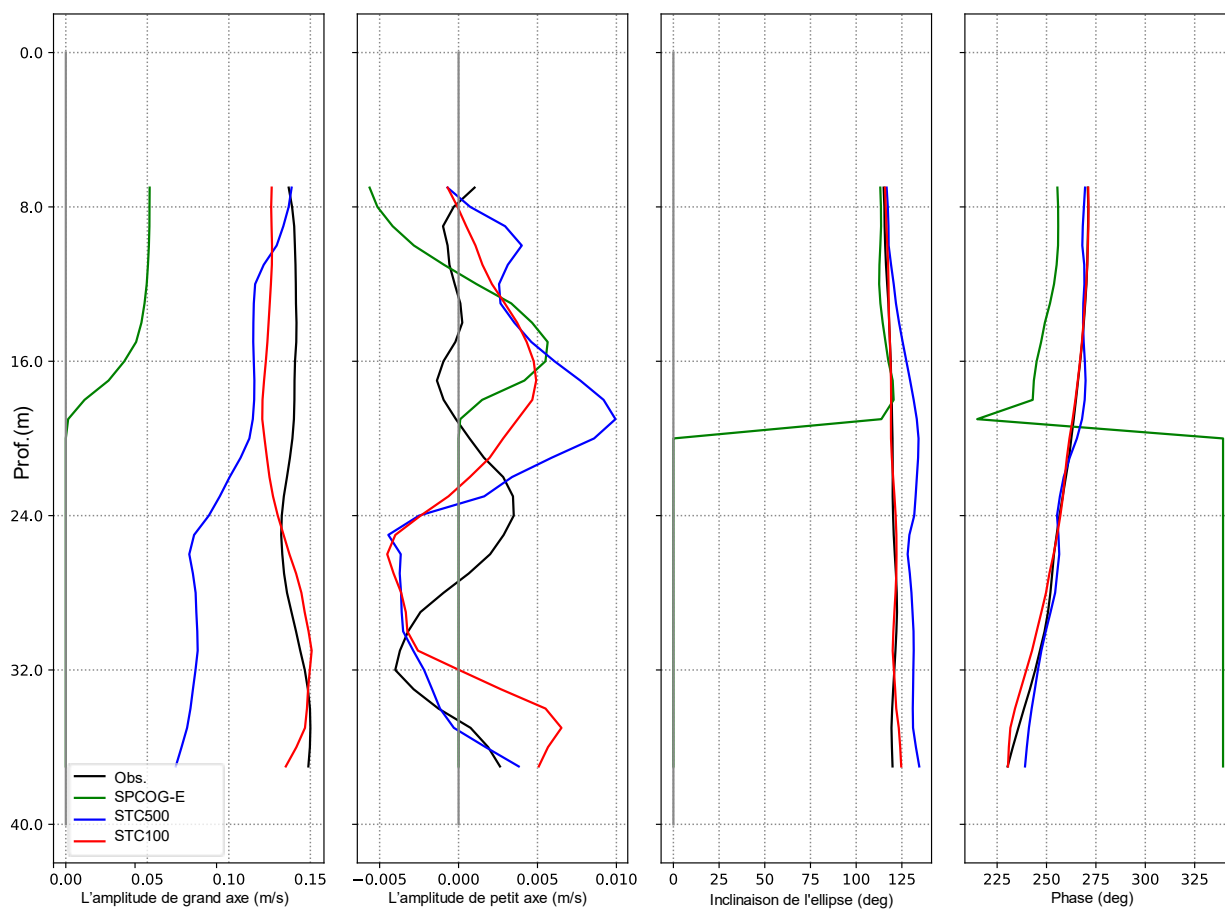


Figure 19. Profil des composantes elliptiques de M2 à la station CM7_May2016.

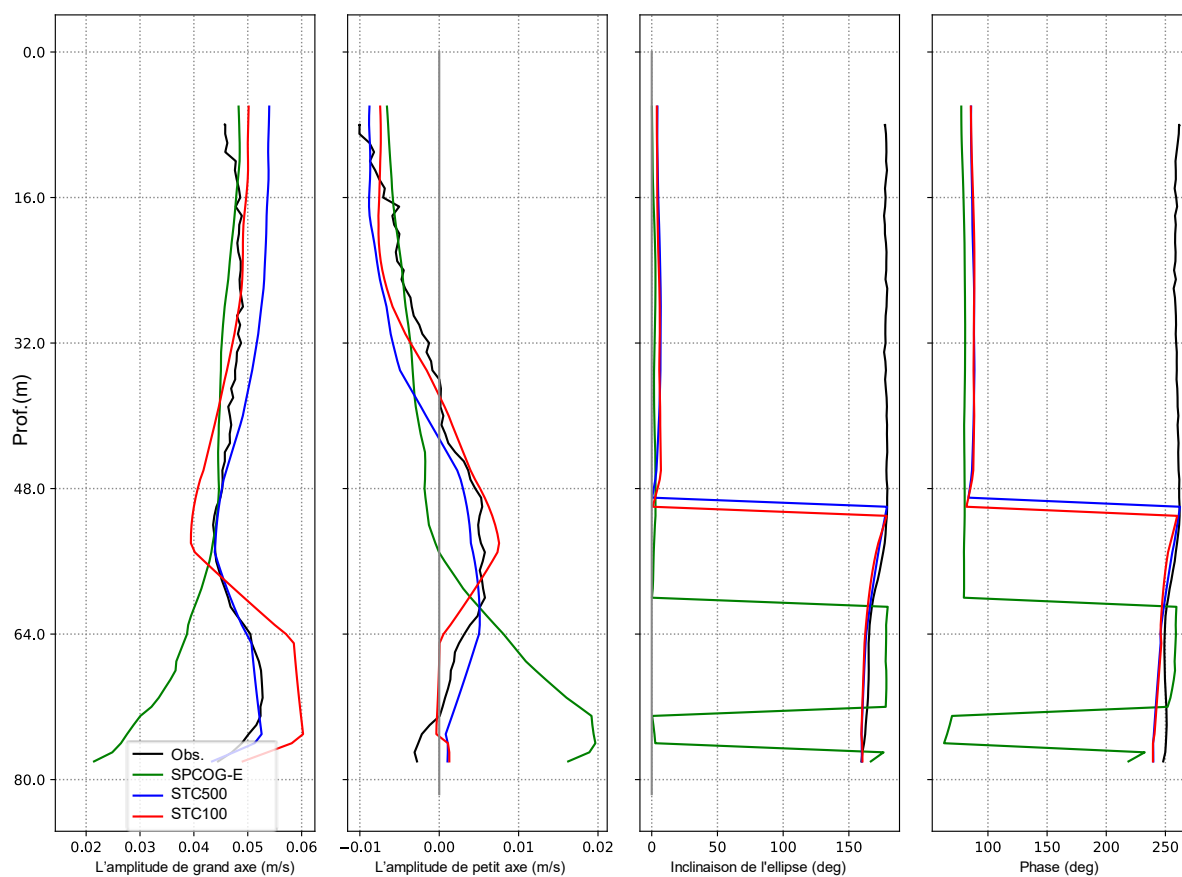


Figure 20. Profil des composantes elliptiques de M2 à la station M2086.

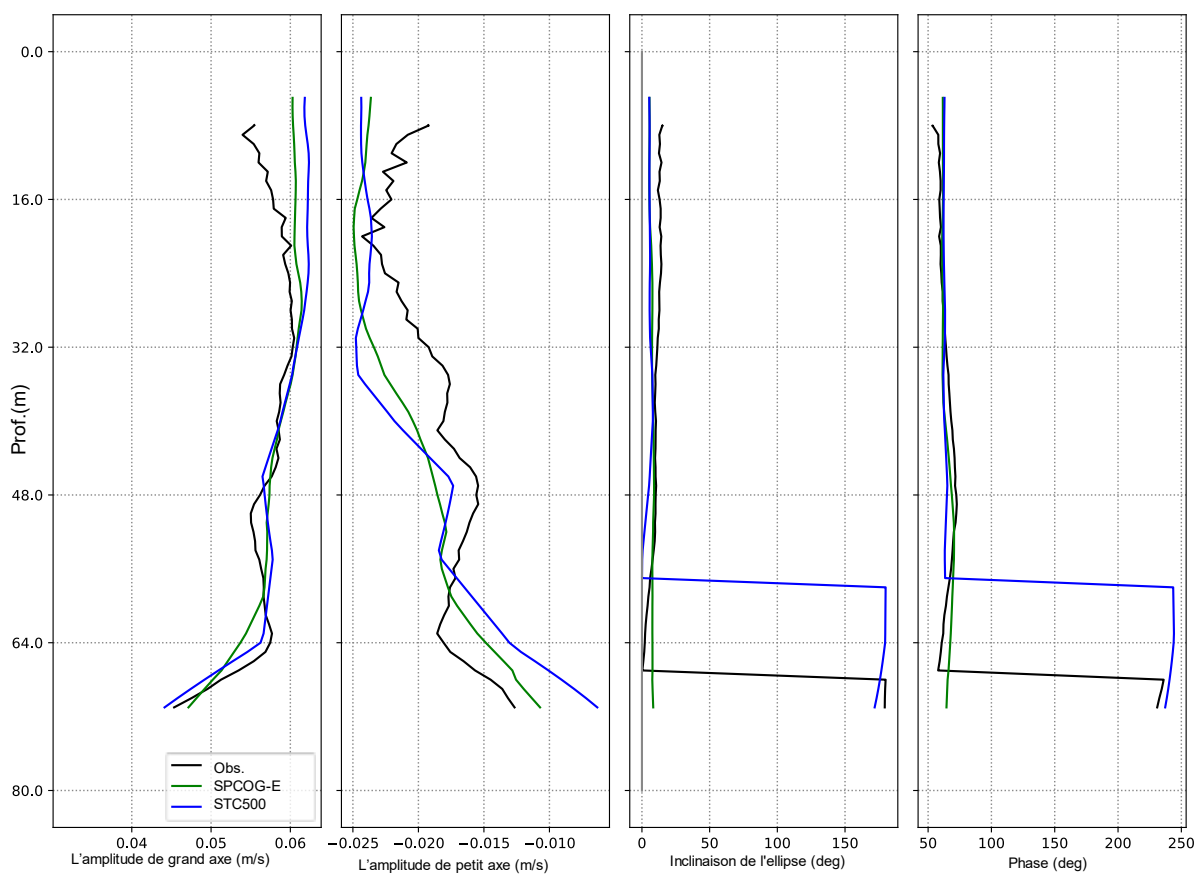


Figure 21. Profil des composantes elliptiques de M2 à la station M2087.

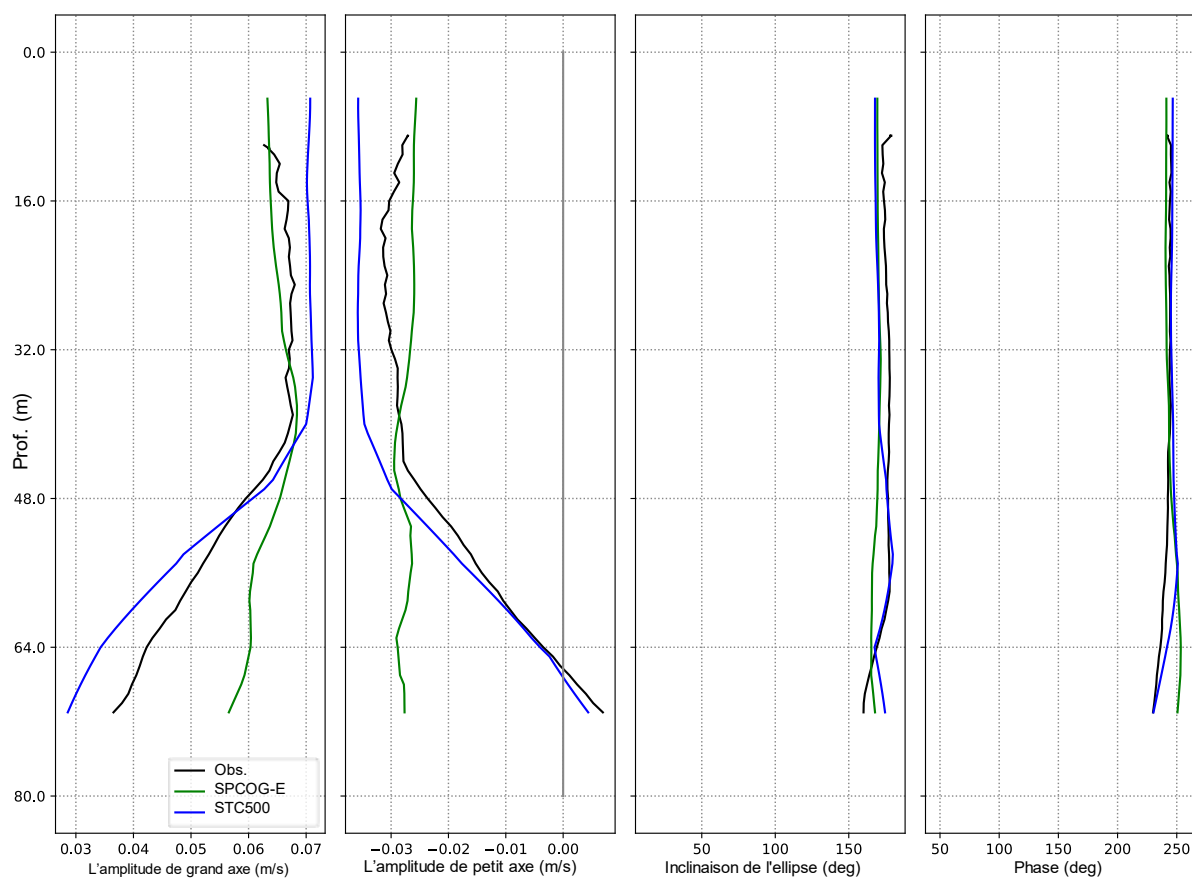


Figure 22. Profil des composantes elliptiques de M2 à la station M2088.

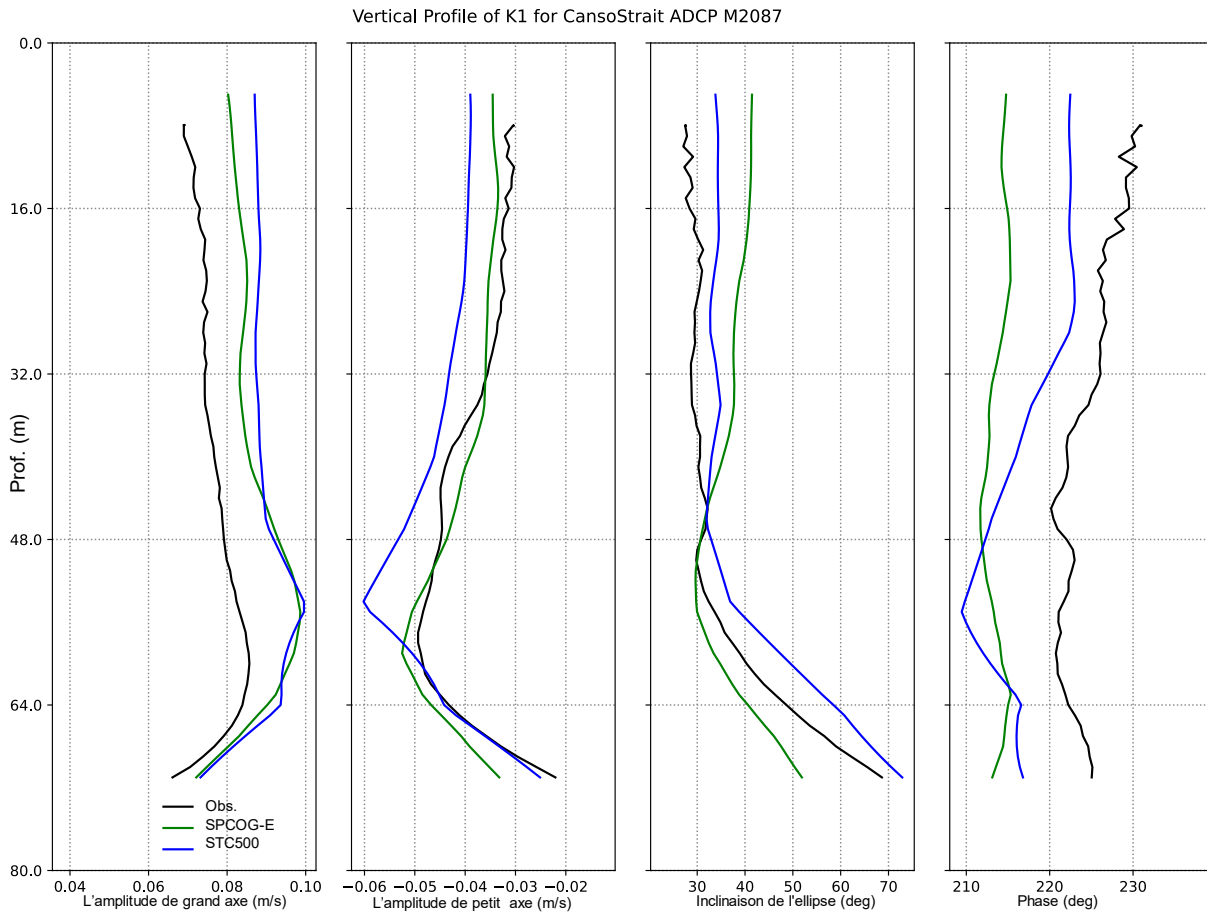


Figure 23. Profil des composantes elliptiques de K1 à la station M2087.

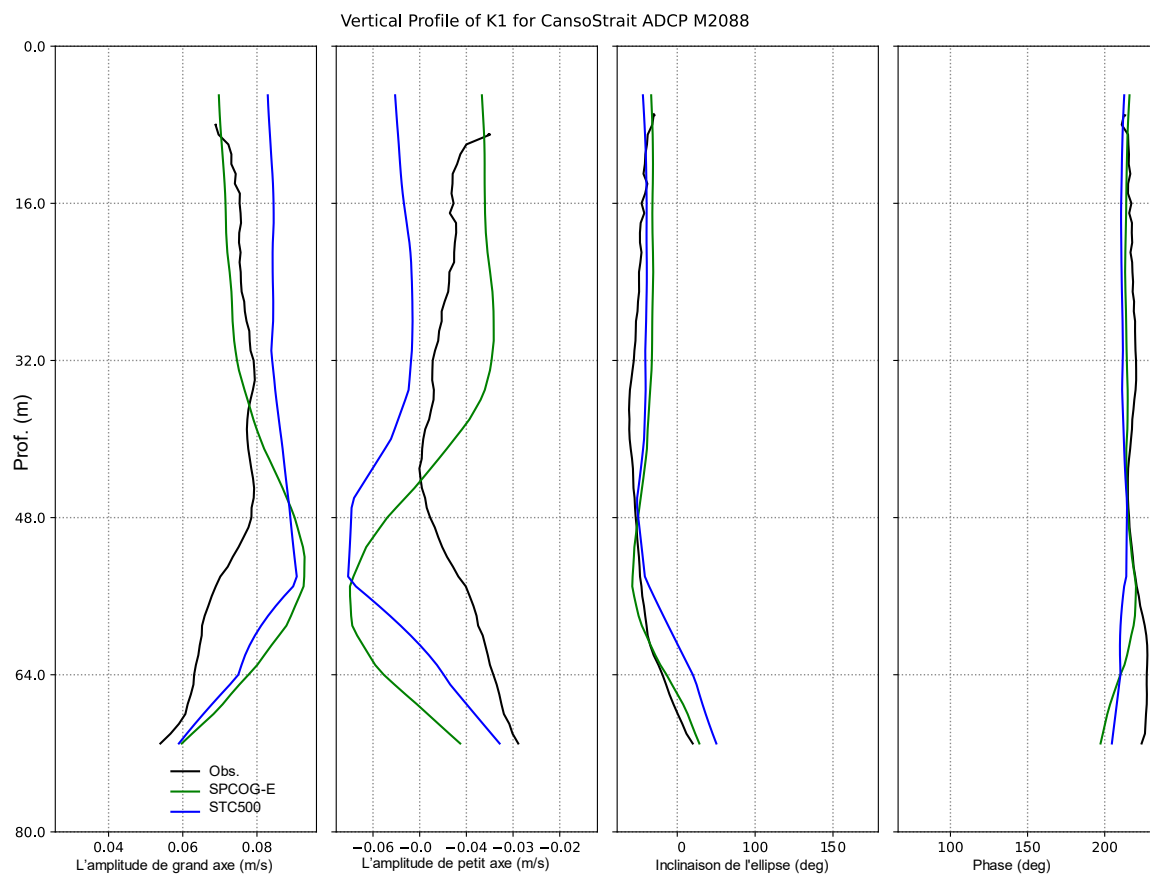


Figure 24. Profil des composantes elliptiques de K1 à la station M2088.

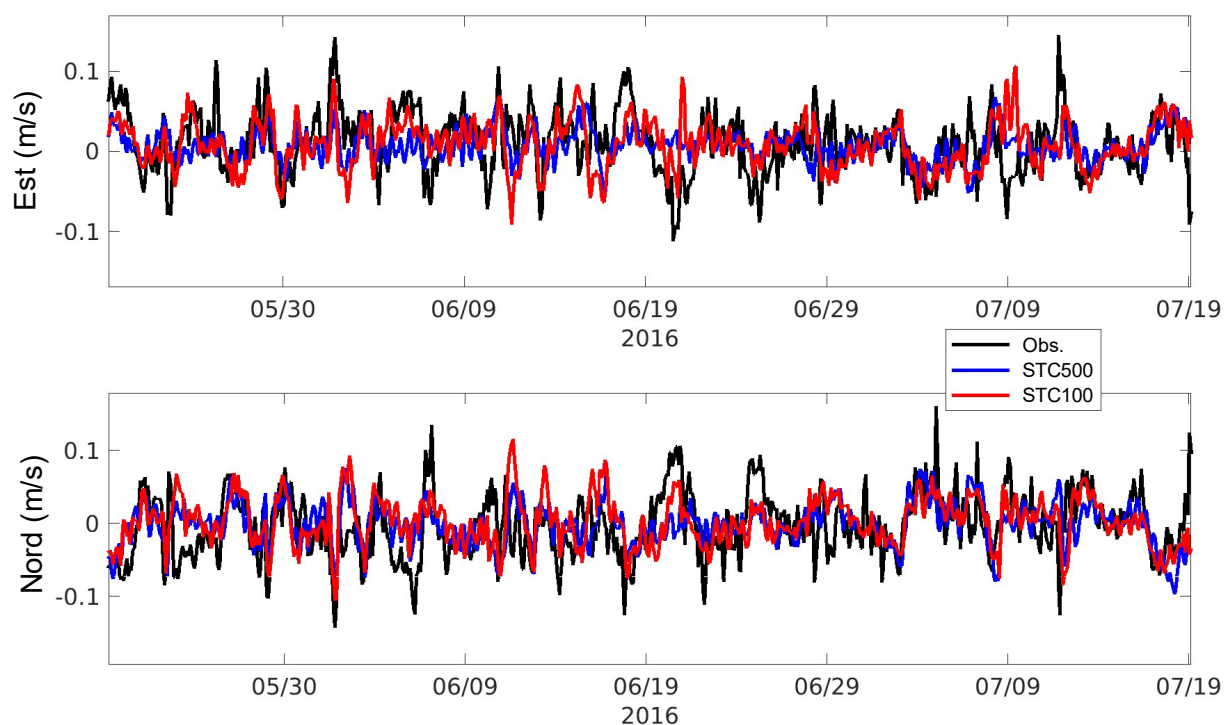


Figure 25. Courant résiduel (non tidal) à une profondeur de 10 m à la station CM1_May2016.

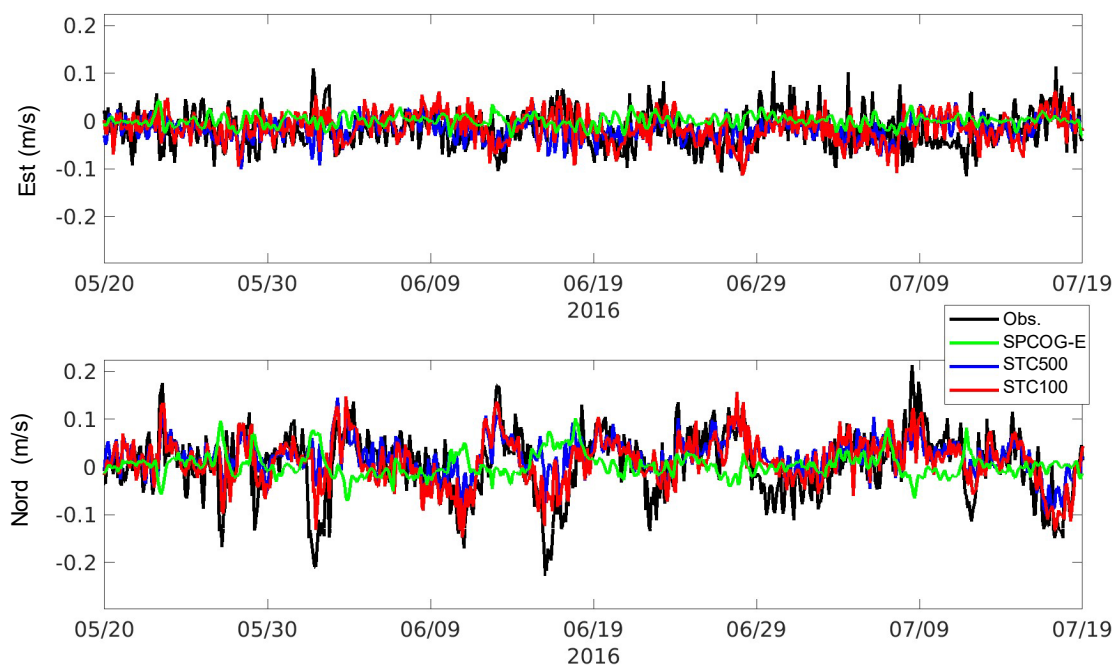


Figure 26. Courant résiduel (non tidal) à une profondeur de 10 m à la station CM7_May2016.

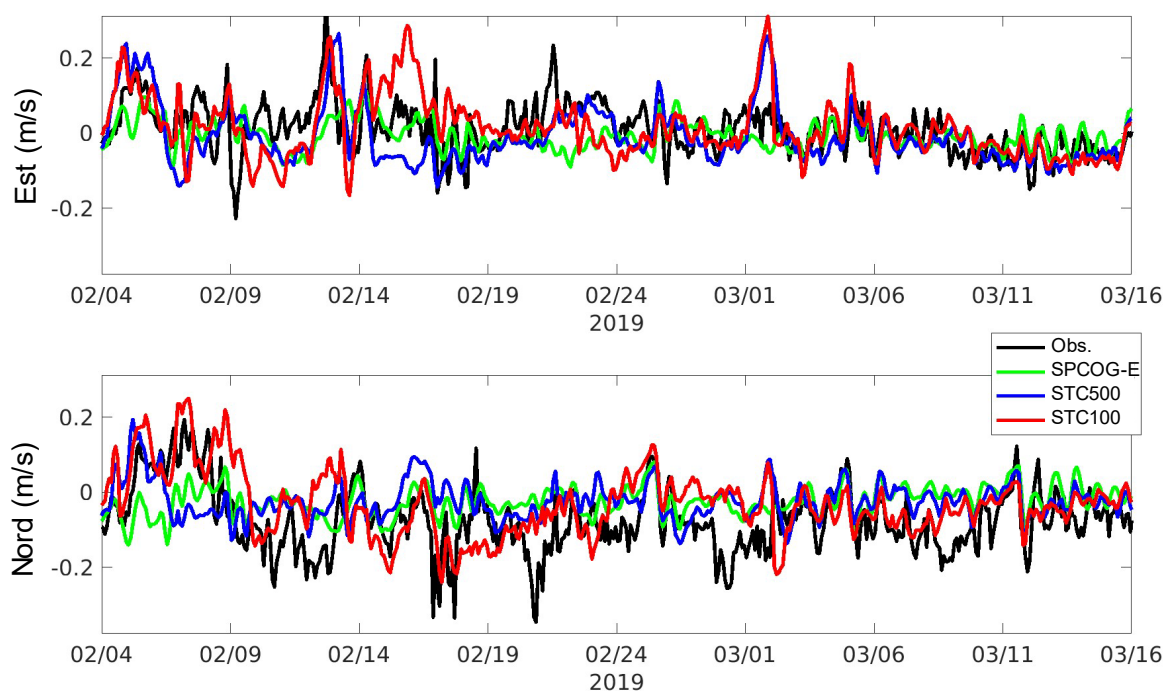


Figure 27. Courant résiduel (non tidal) à une profondeur de 10 m à la station M2086.

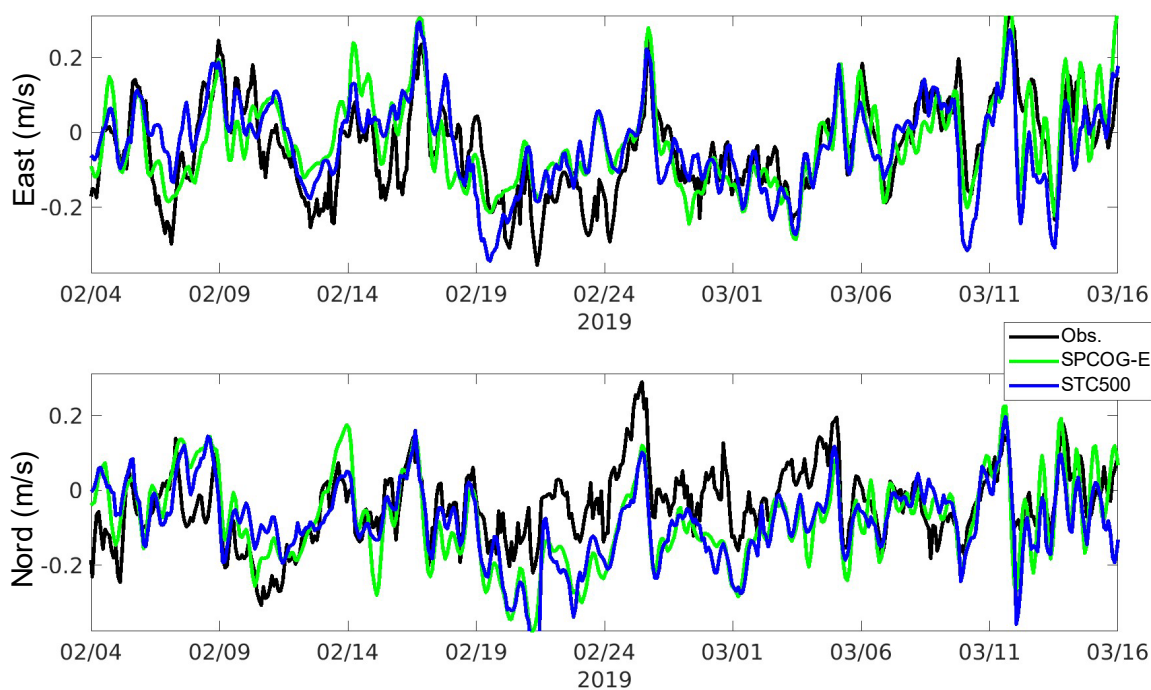


Figure 28. Courant résiduel (non tidal) à une profondeur de 10 m à la station M2087.

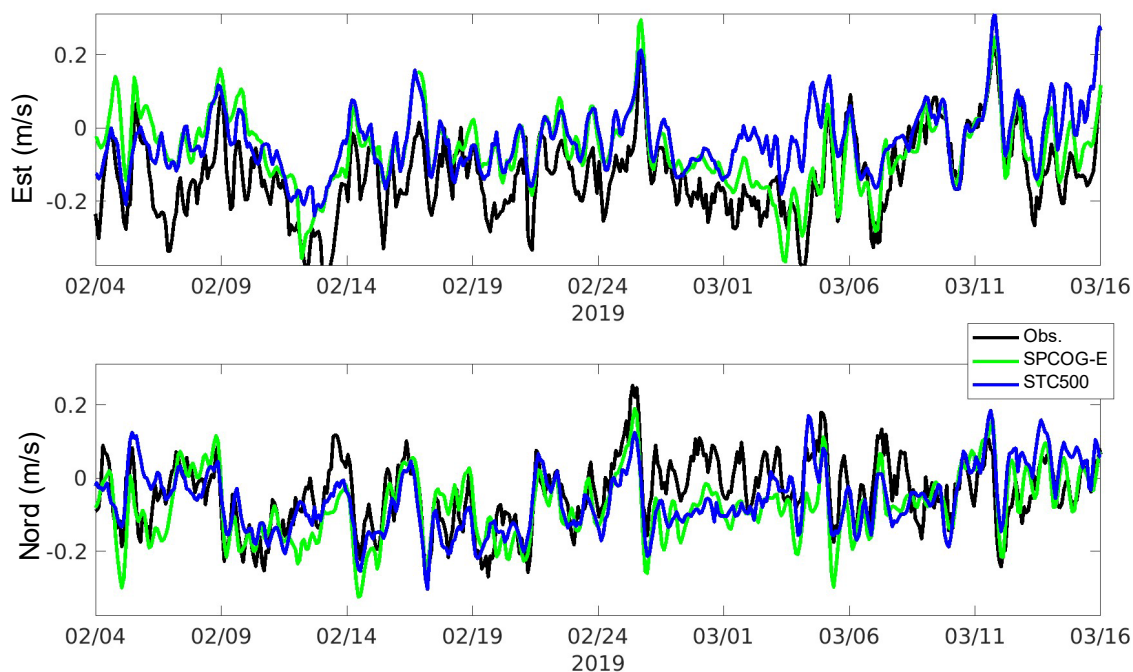


Figure 29. Courant résiduel (non tidal) à une profondeur de 10 m à la station M2088.

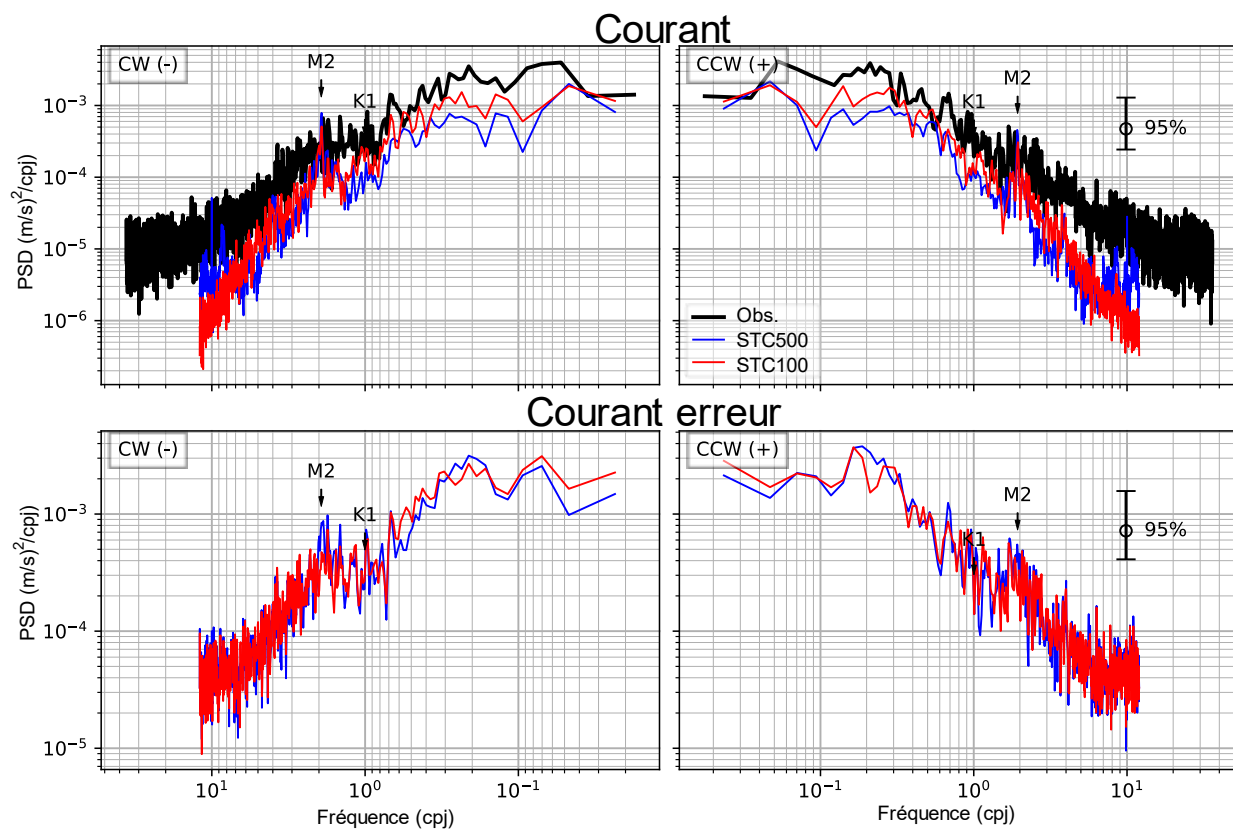


Figure 30. Spectres de puissance rotatifs des courants résiduels (non tidaux) à la station CM1_May2016, à une profondeur de 10 m.

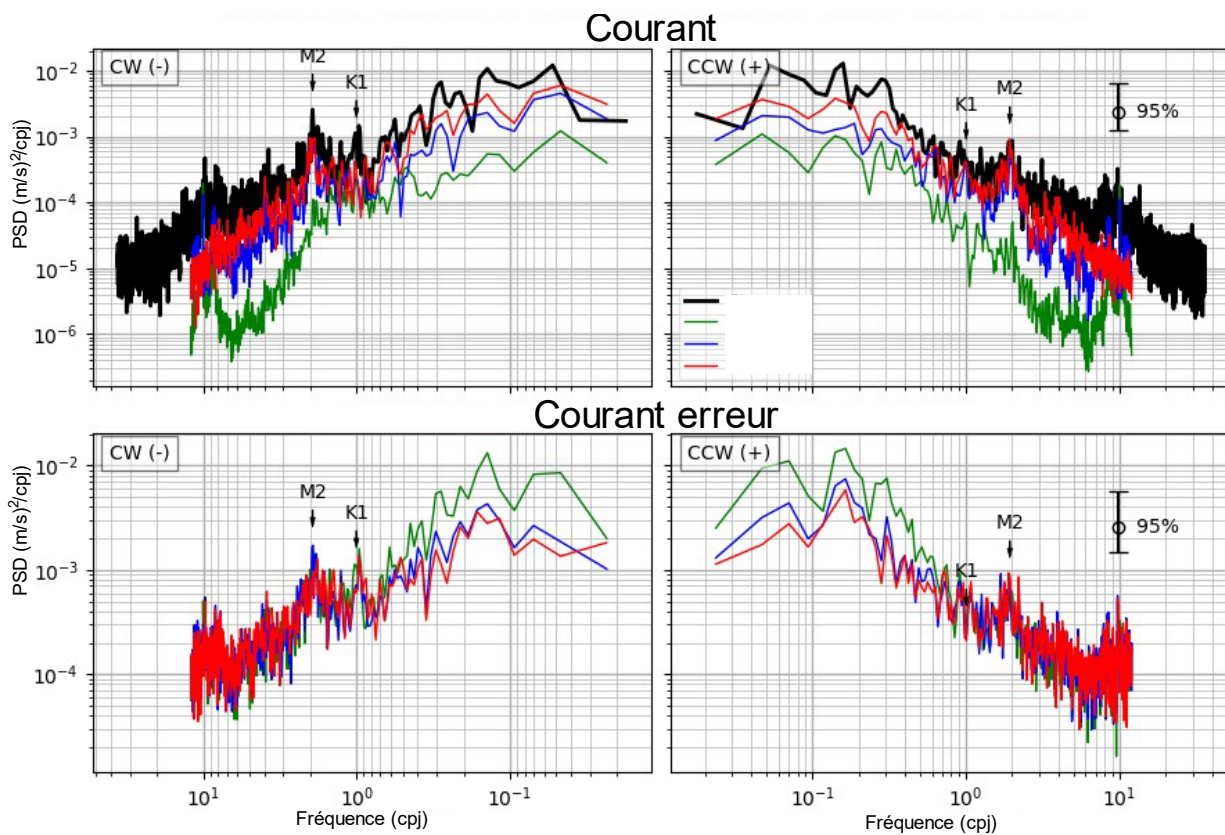


Figure 31. Spectres de puissance rotatifs des courants résiduels (non tidaux) à la station CM7_May2016, à une profondeur de 10 m.

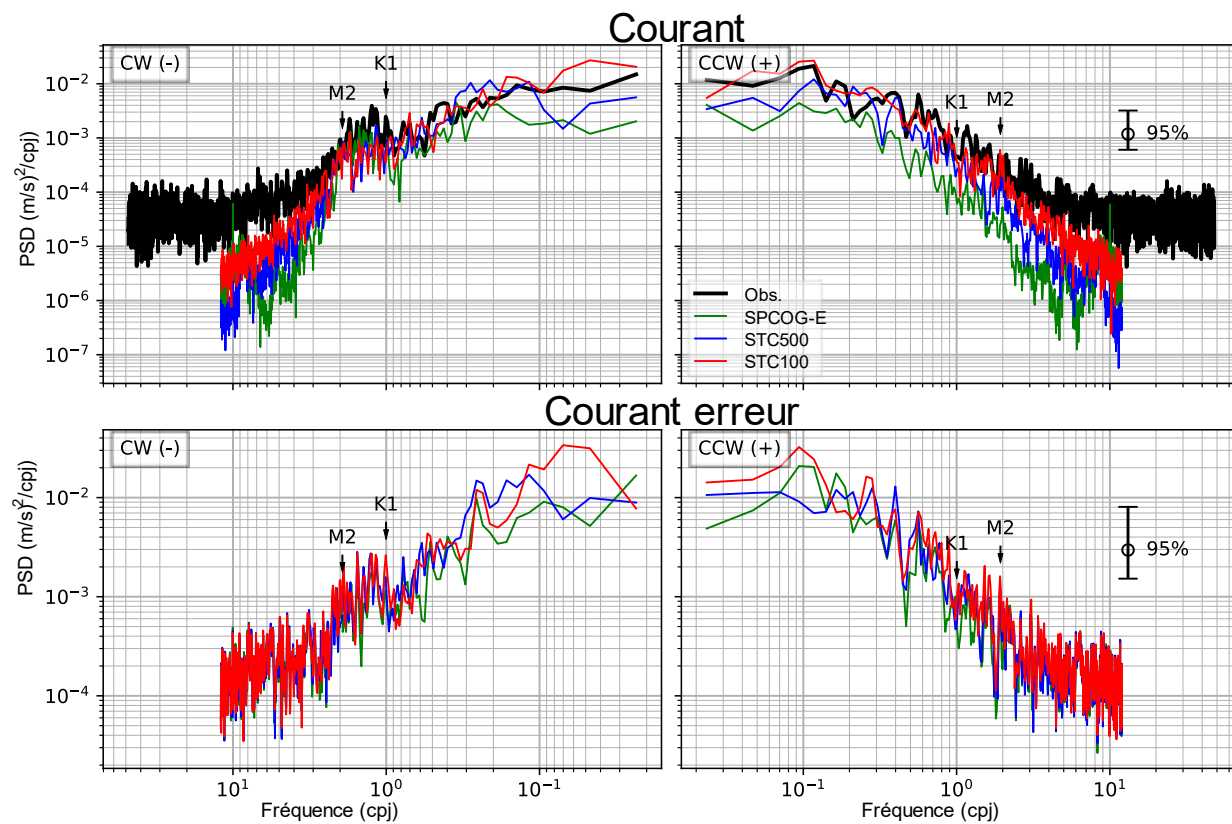


Figure 32. Spectres de puissance rotatifs des courants résiduels (non tidaux) à la station M2086, à une profondeur de 10 m.

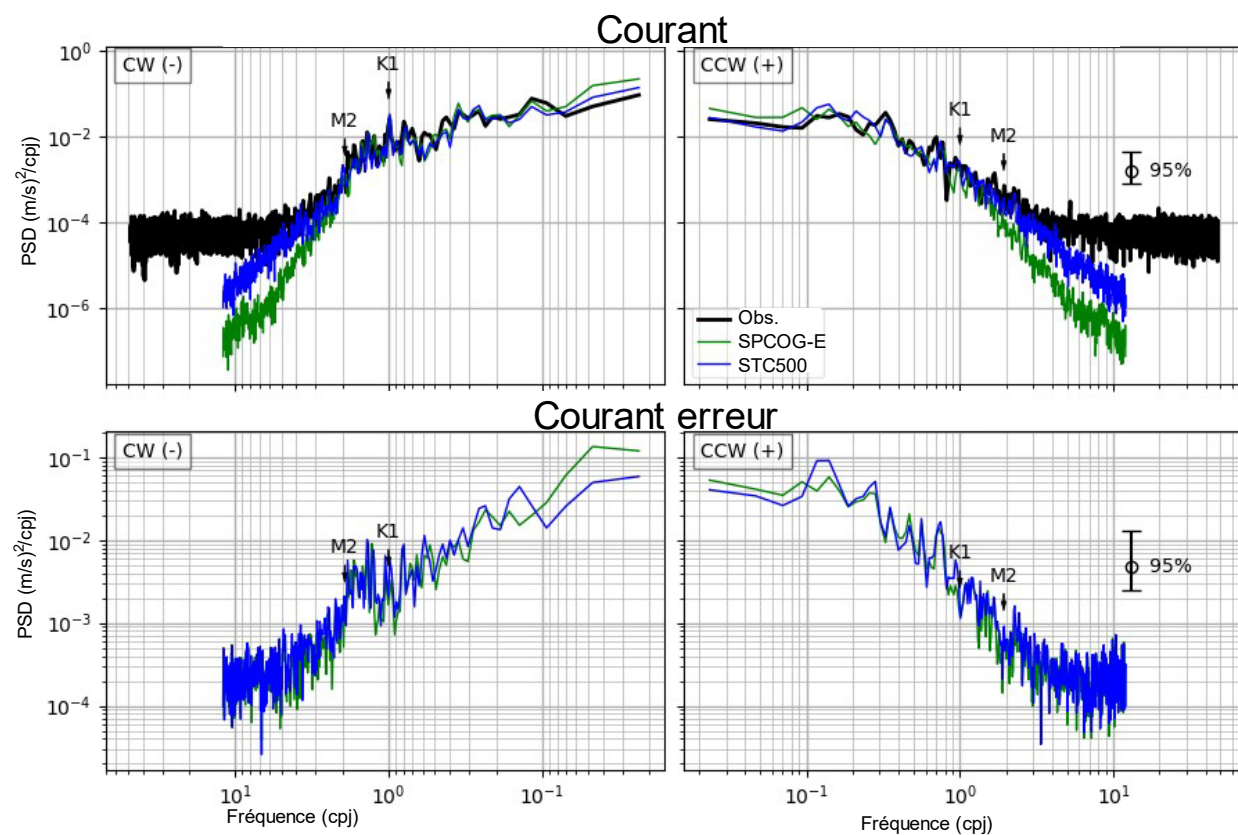


Figure 33. Spectres de puissance rotatifs des courants résiduels (non tidaux) à la station M2087, à une profondeur de 10 m.

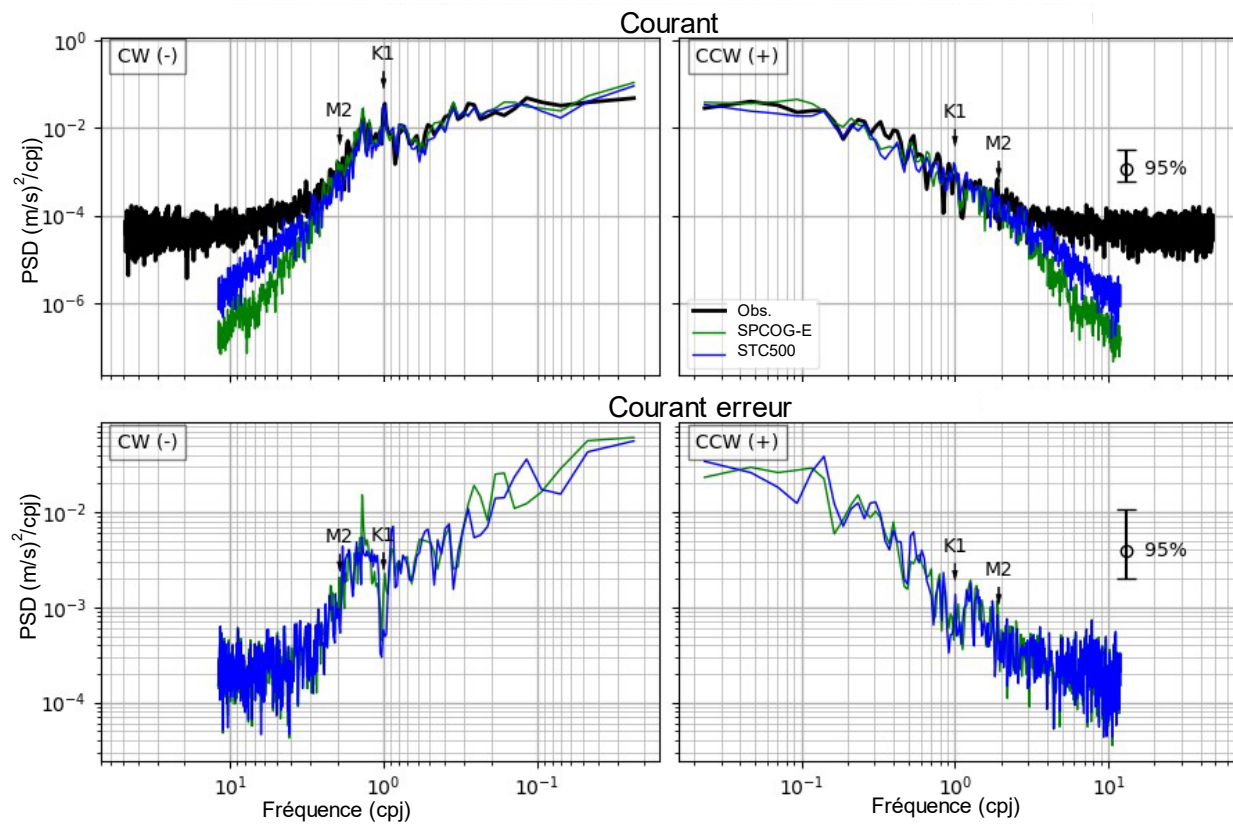


Figure 34. Spectres de puissance rotatifs des courants résiduels (non tidaux) à la station M2088, à une profondeur de 10 m.

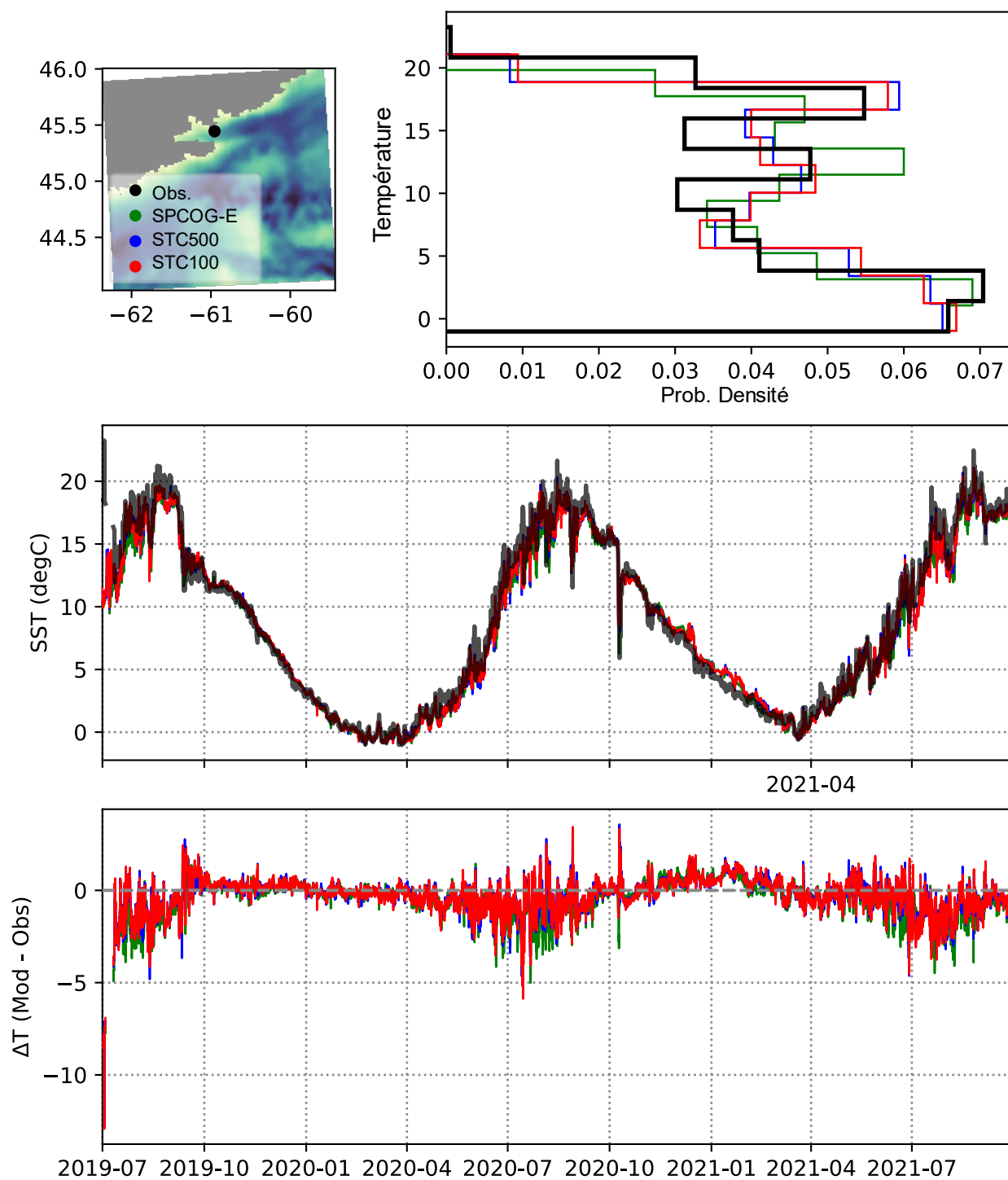


Figure 35. Température à la surface de la mer observée et modélisée à la station est de la baie de Chedabucto.

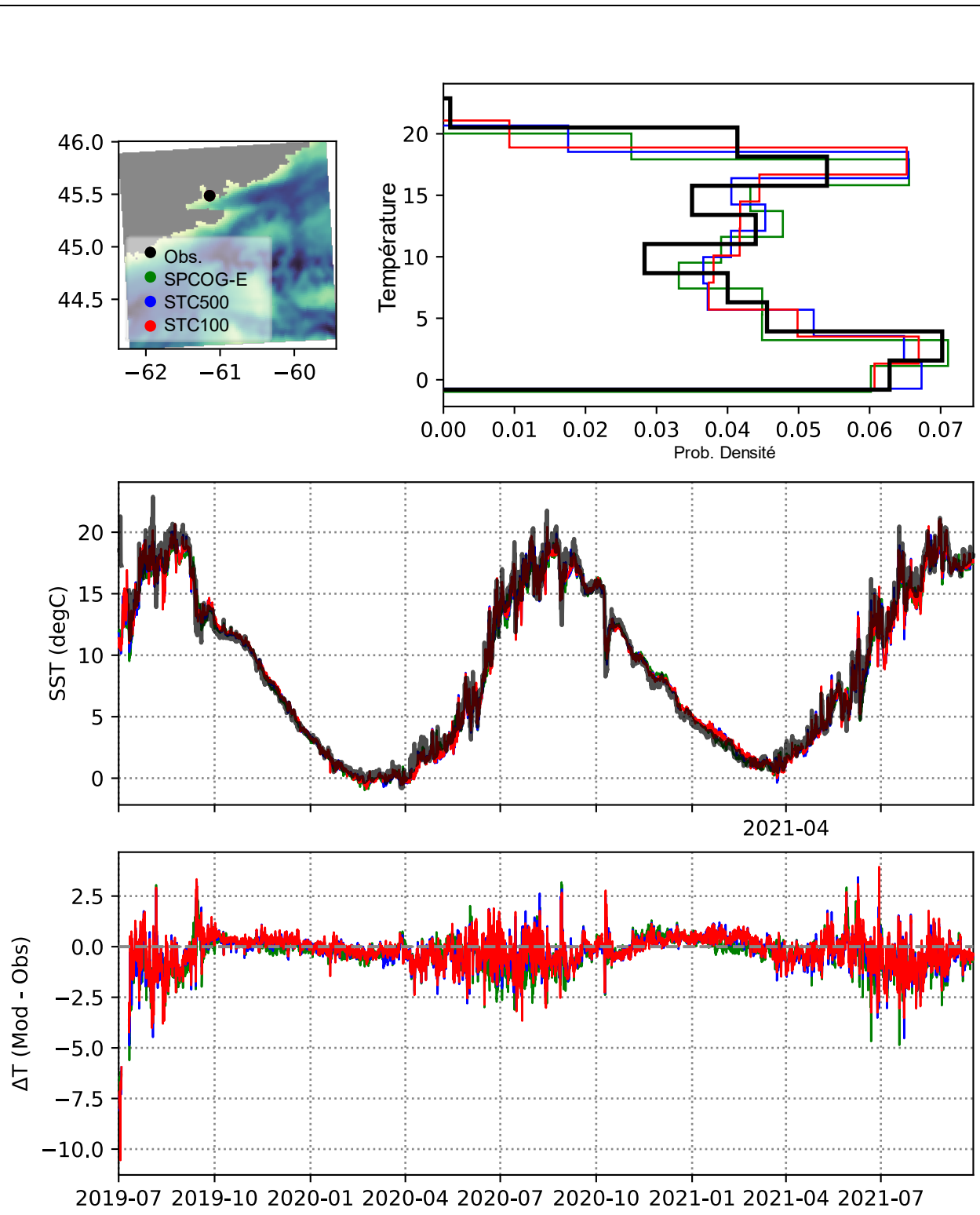


Figure 36. Température à la surface de la mer observée et modélisée à la station ouest de la baie de Chedabucto.

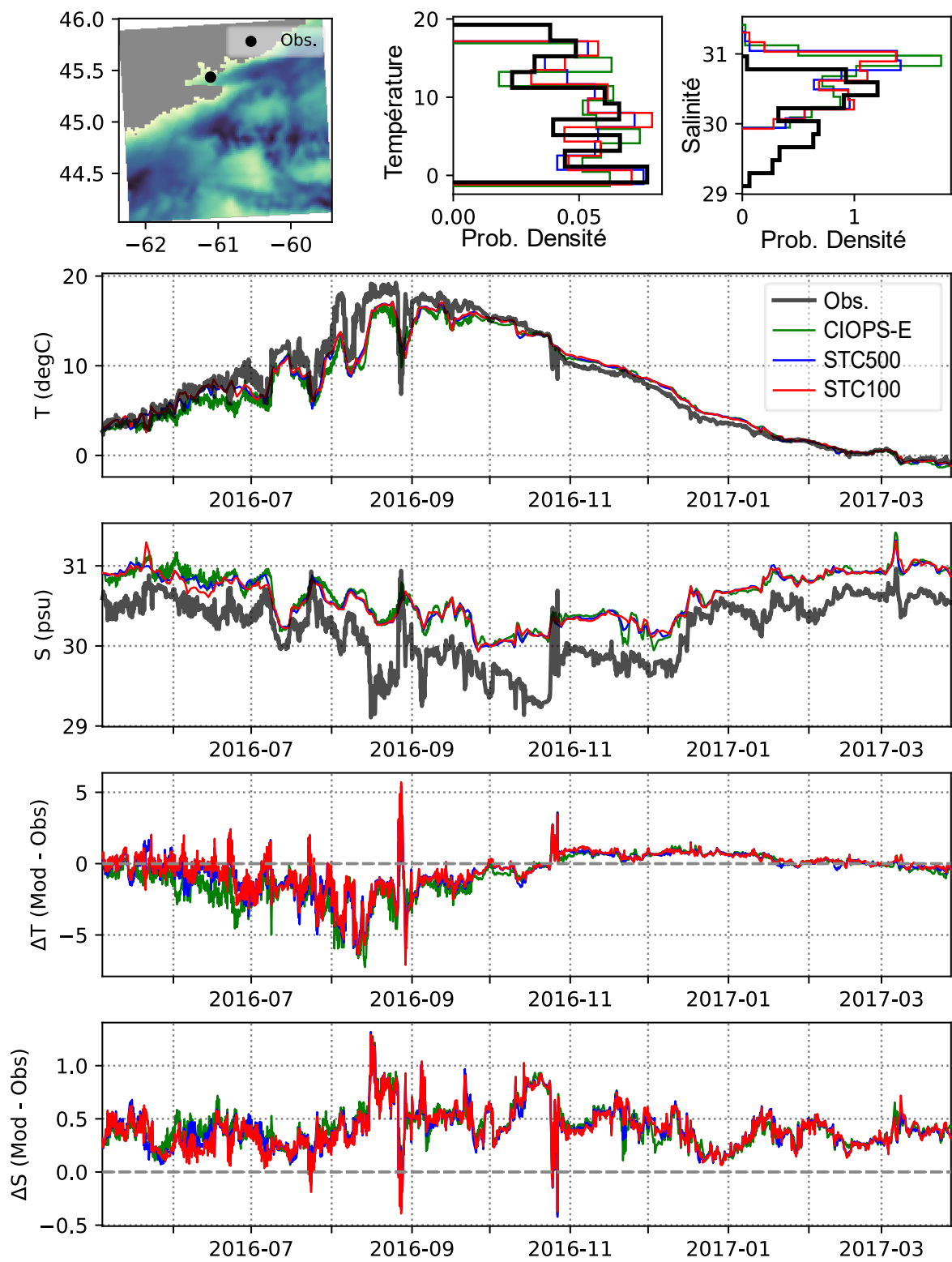


Figure 37. Température et salinité observées et modélisées à la station CB_10m.

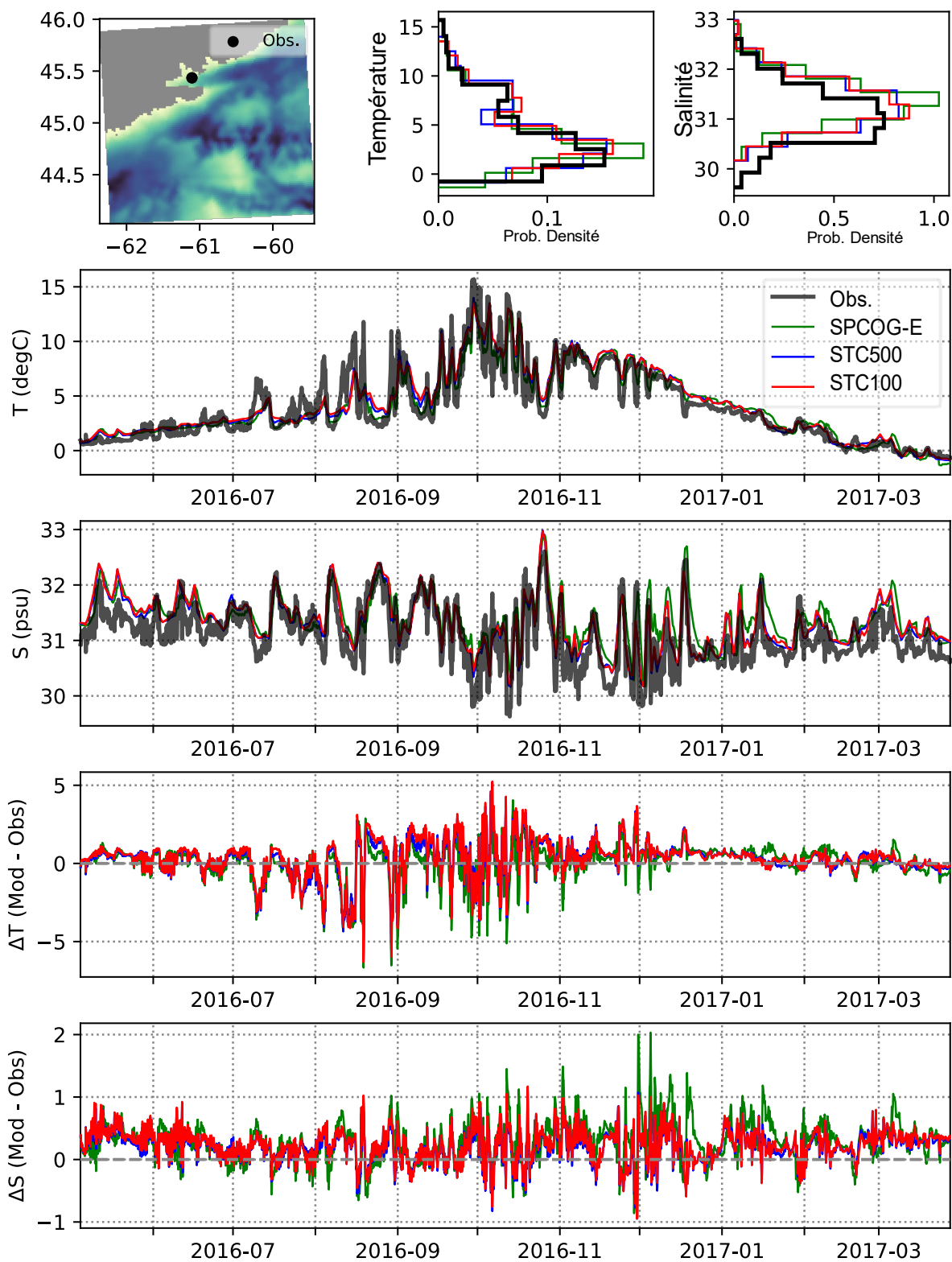


Figure 38. Température et salinité observées et modélisées à la station CB_48m.

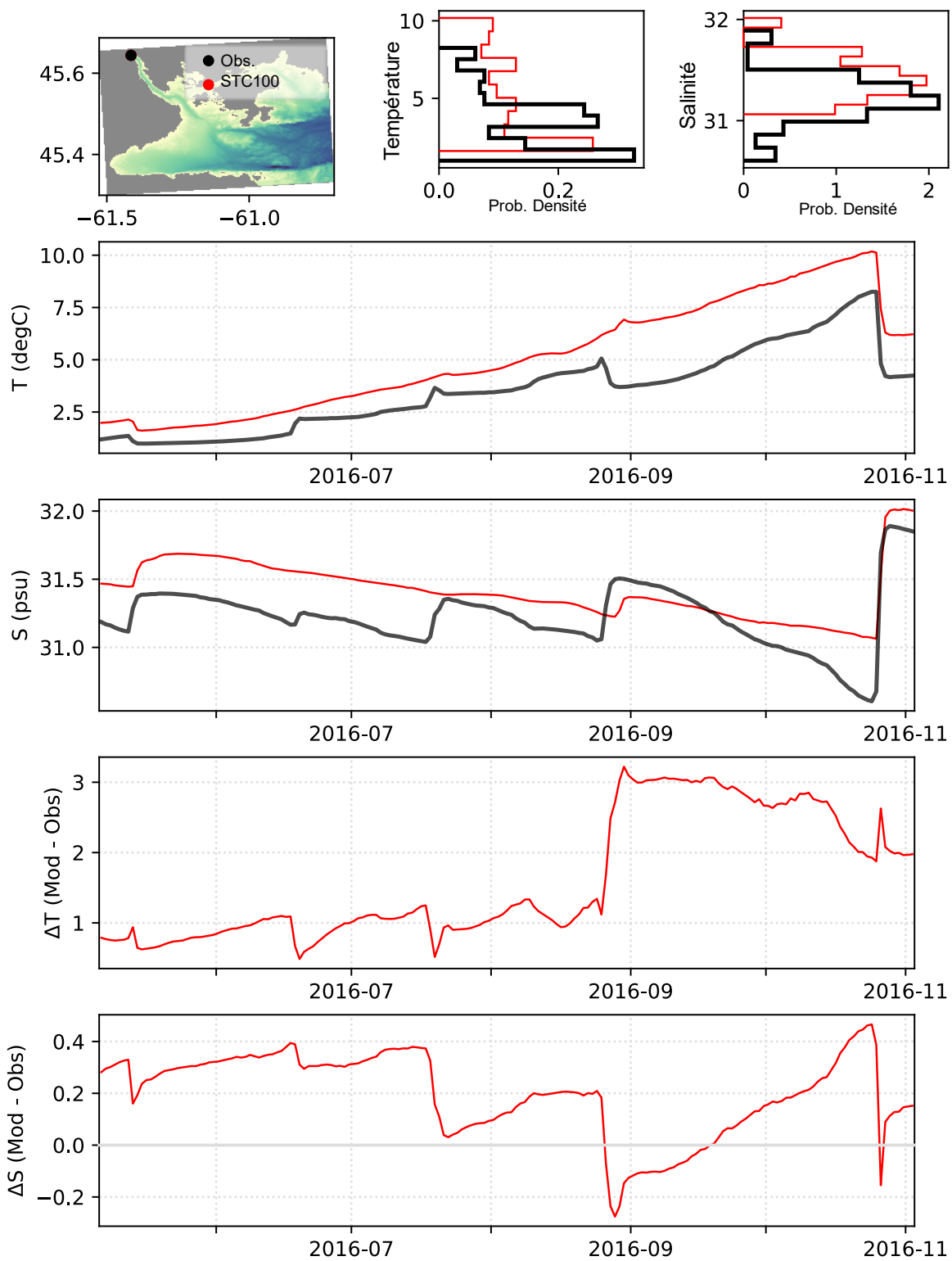


Figure 39. Température et salinité observées et modélisées à la station CW_55m.

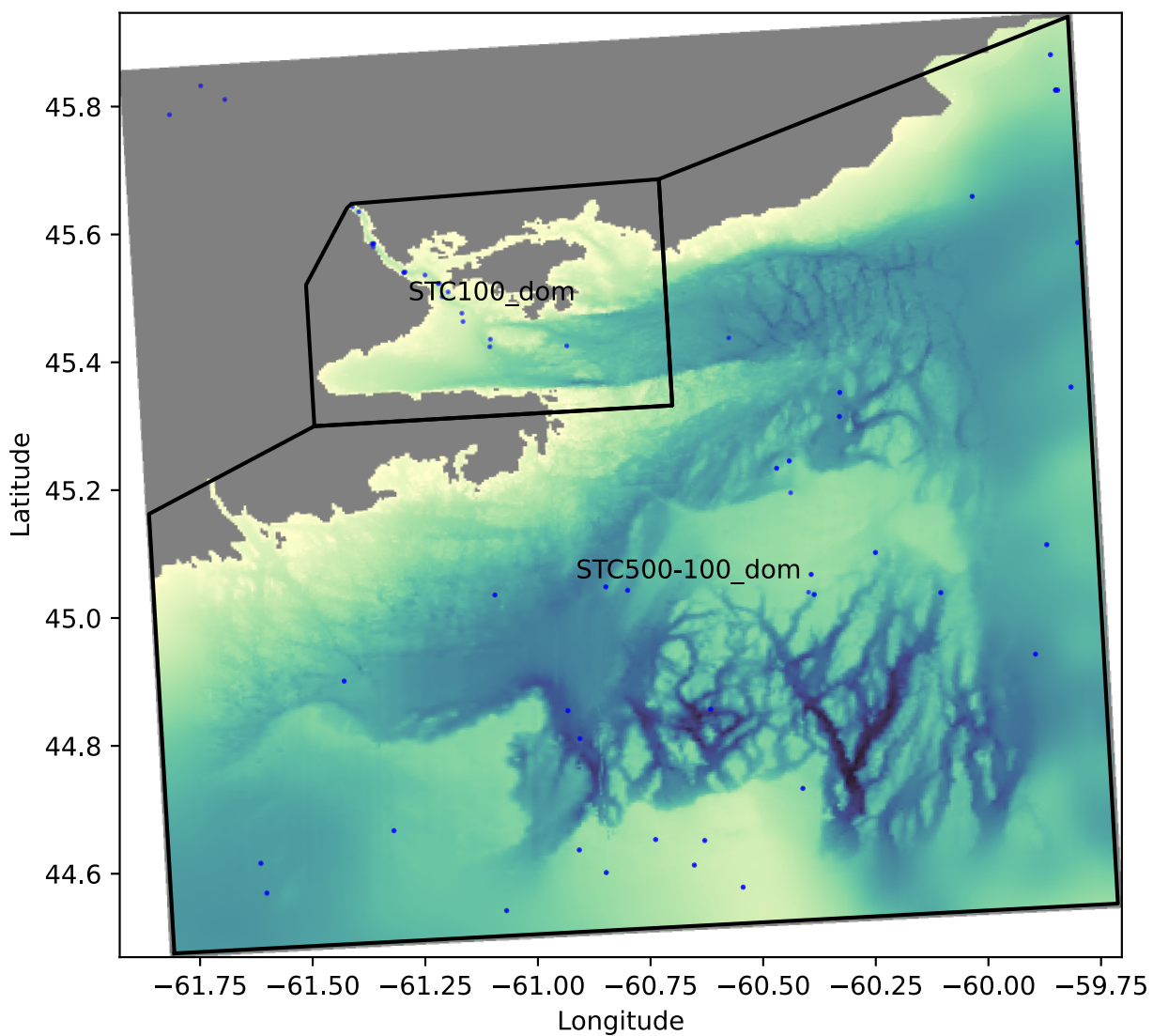


Figure 40. Emplacements des profils CTD. Les lignes noires indiquent les régions intérieure (STC100_dom) et extérieure (STC500-100_dom) utilisées dans l'analyse.

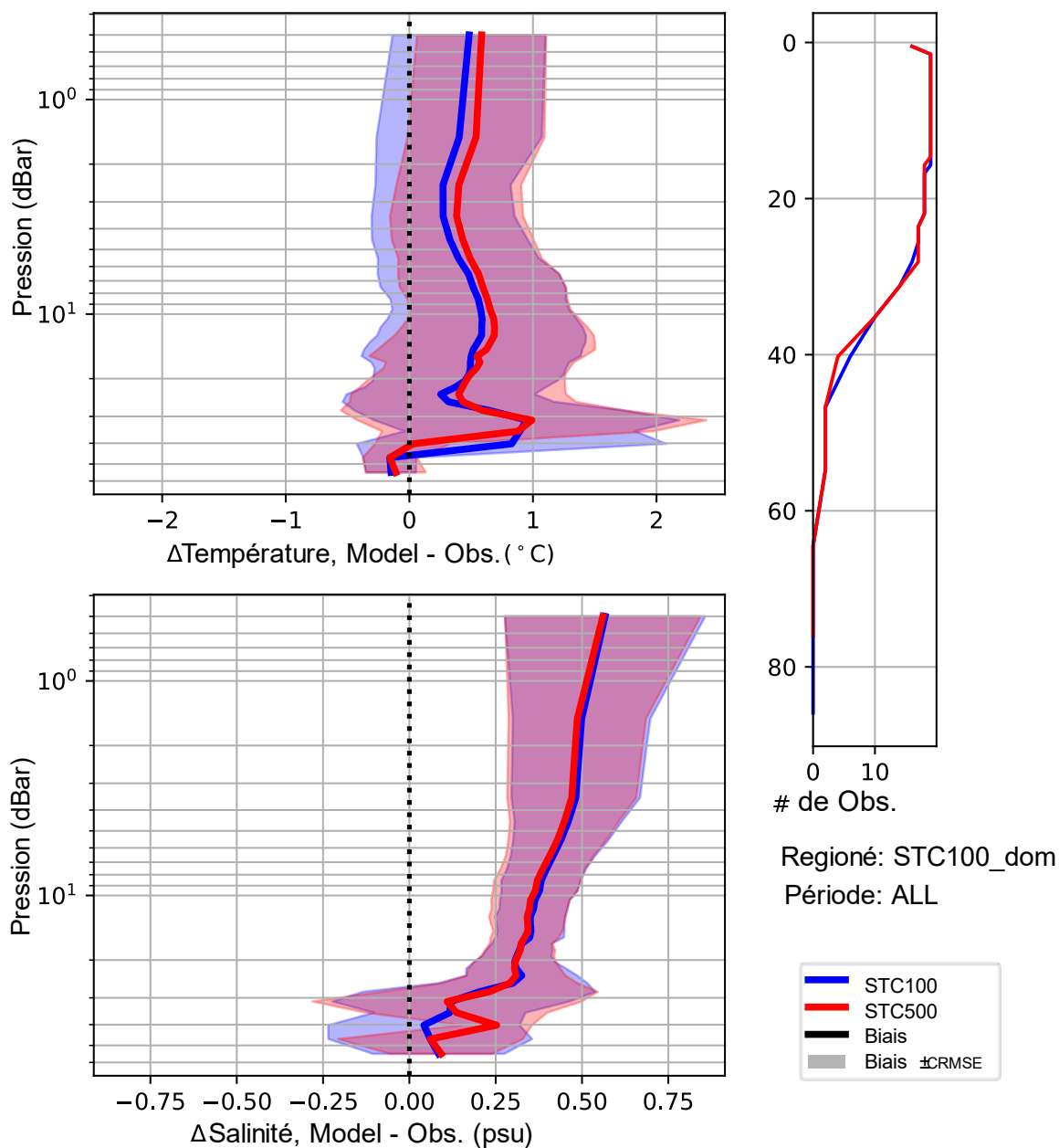


Figure 41. Profils verticaux du biais $\pm$ la CRSME pour la température et la salinité pour les profils CTD dans la région intérieure (STC100_dom).

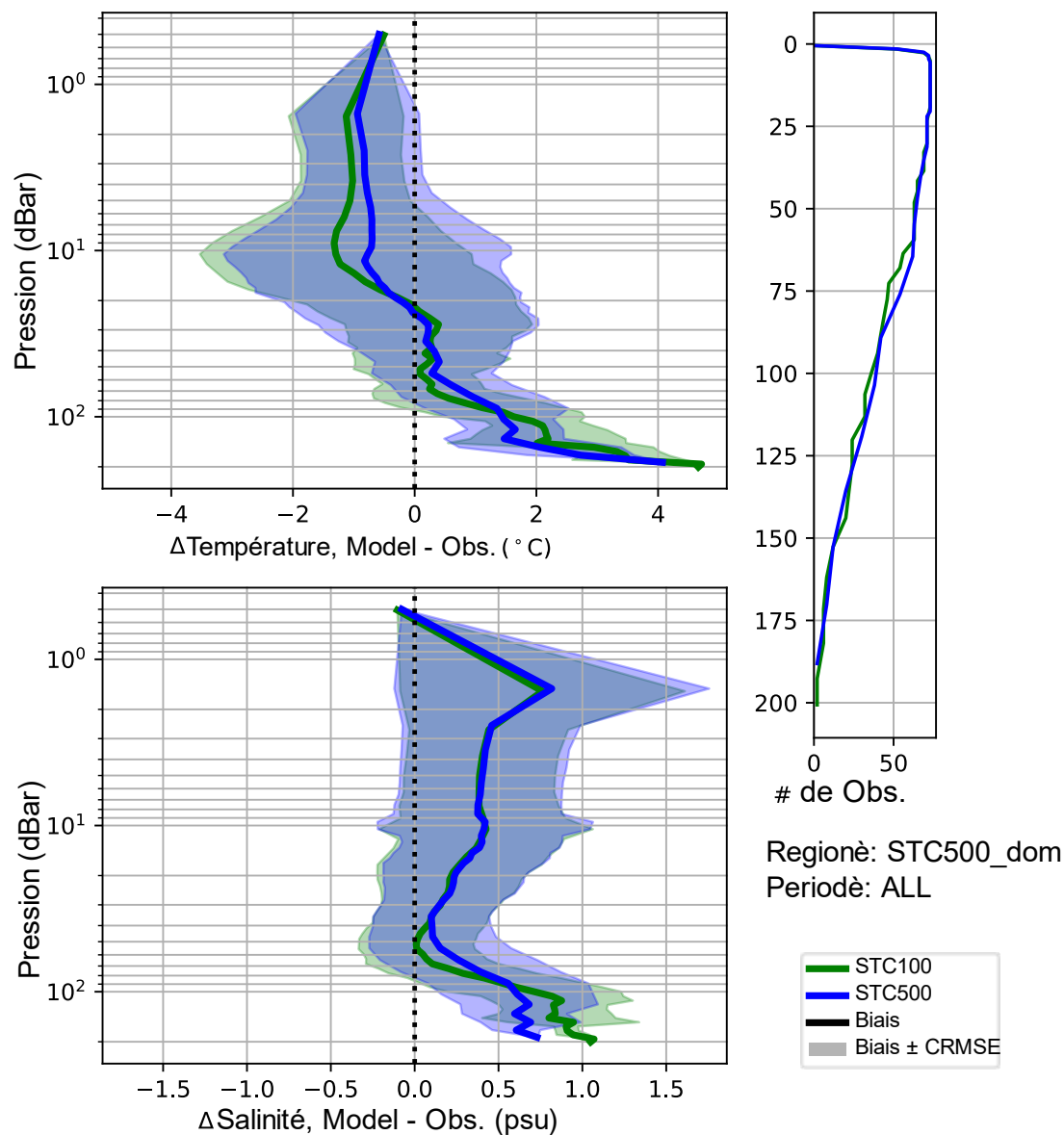


Figure 42. Profils verticaux du biais $\pm$ la CRSME pour la température et la salinité pour les profils CTD dans la région extérieure (STC500-100_dom).

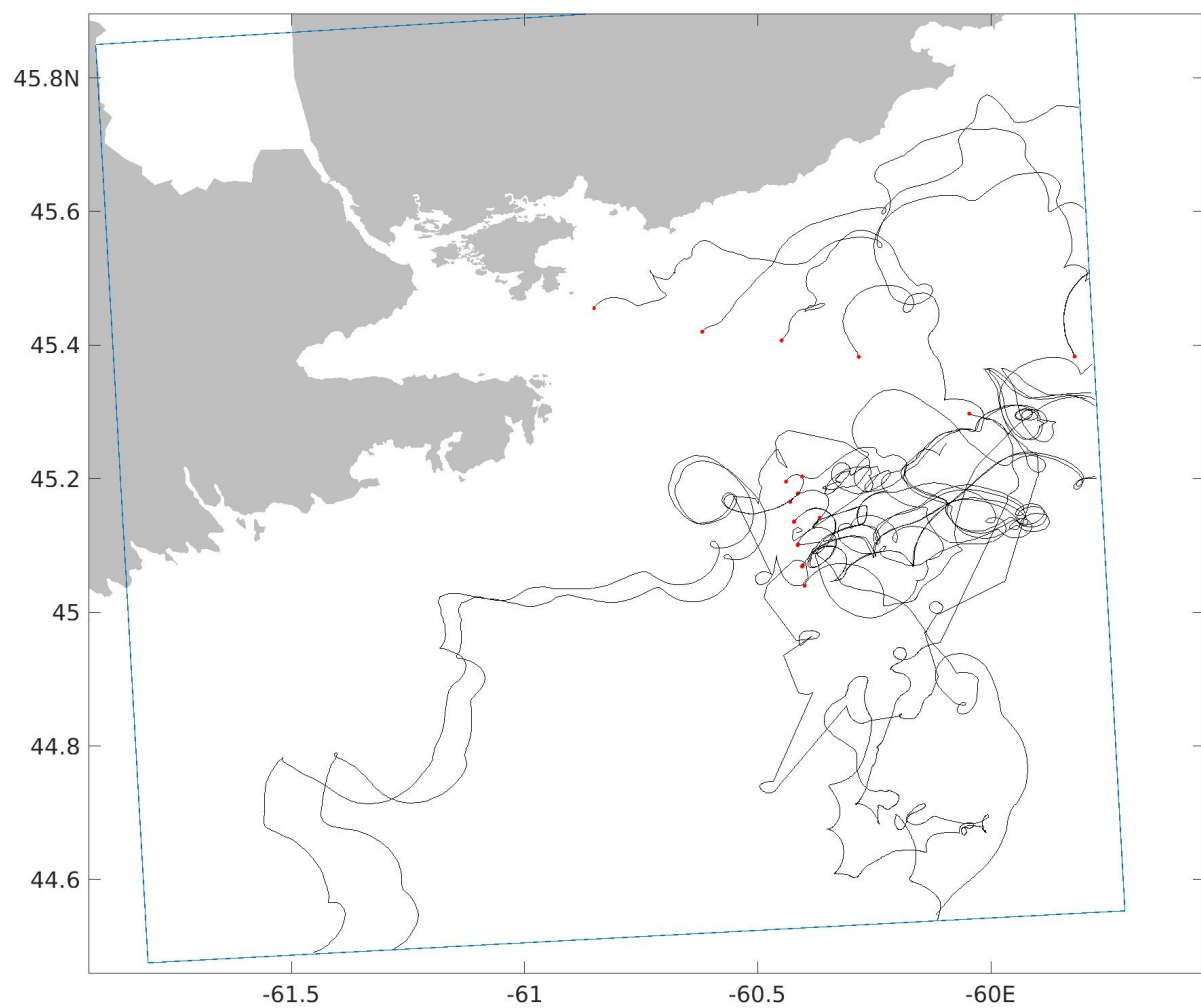


Figure 43. Trajectoires des bouées dérivantes observées. Les points rouges indiquent les lieux de largage.

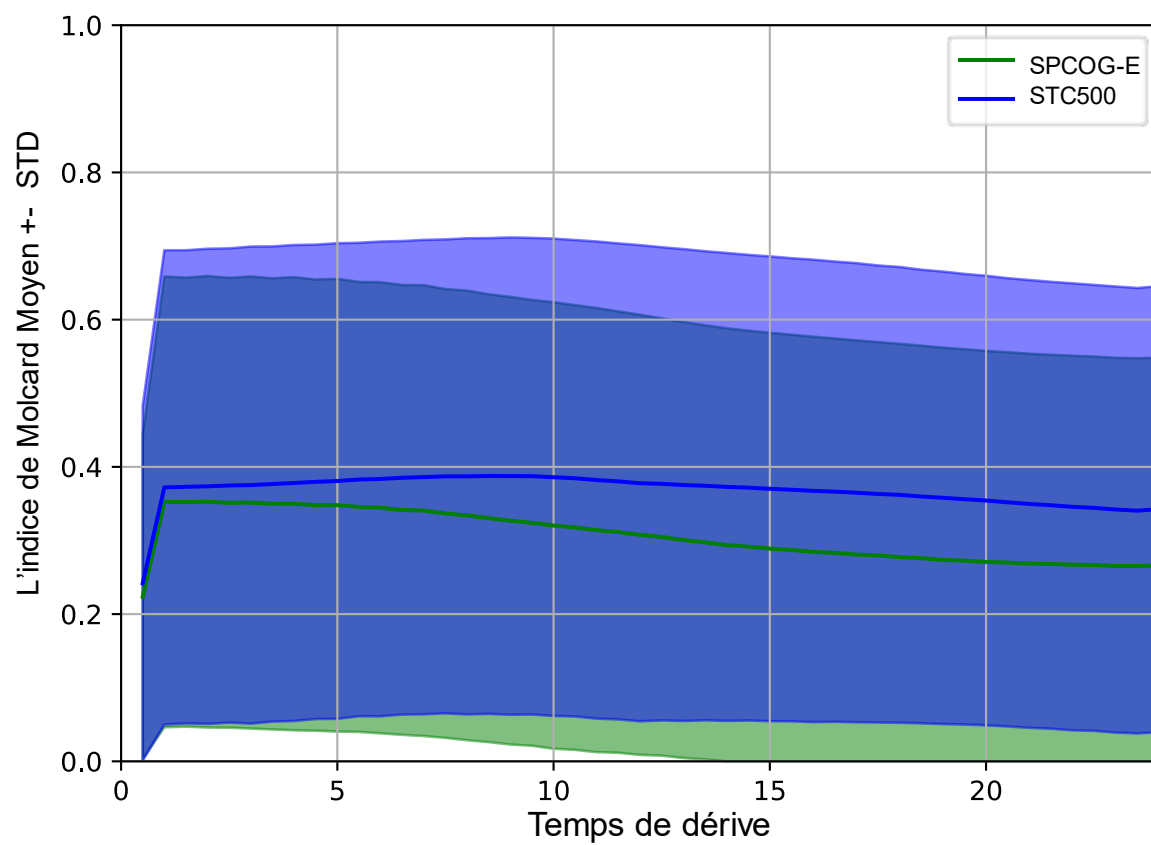


Figure 44. Indice d'efficacité de Molcard selon l'analyse de la dérive.

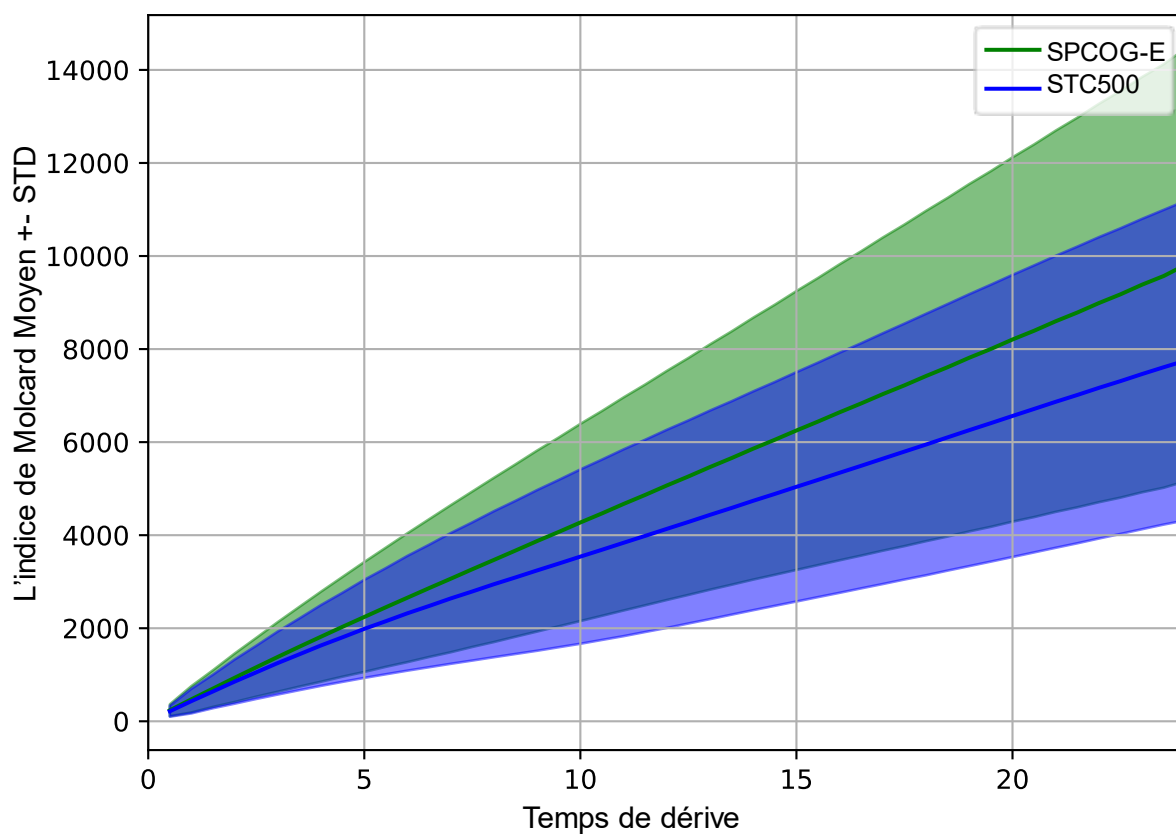


Figure 45. Distance de séparation moyenne selon l'analyse de la dérive.

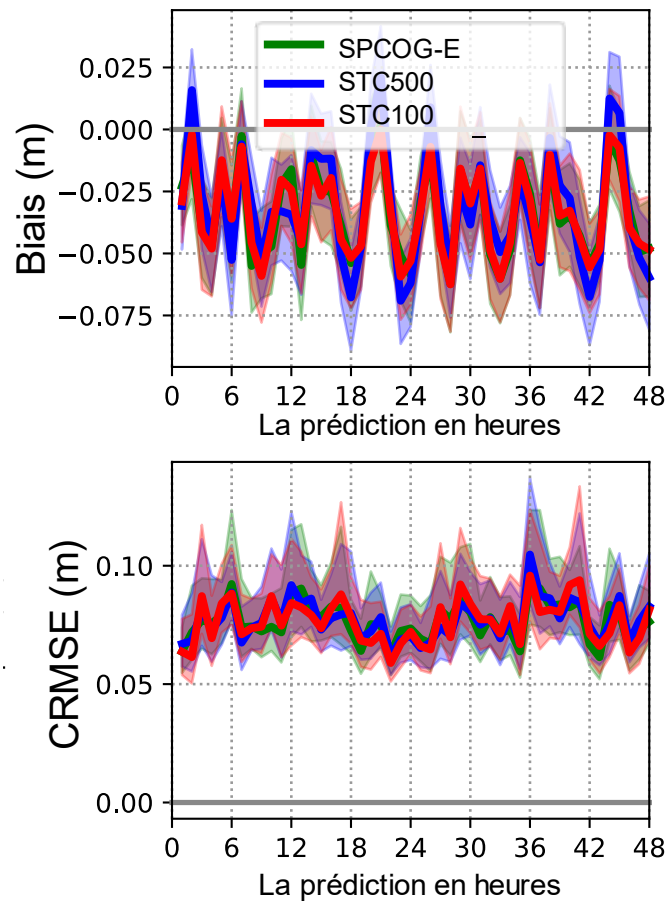


Figure 46. Biais et CRMSE du niveau d'eau résiduel moyen selon l'échéance de la prédiction en heures à la station de Port Hawkesbury. Les enveloppes colorées illustrent les limites de confiance à 95 % suivant des estimations faites selon la méthode bootstrap.