



Ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale Sainte-Marguerite

Étude des conditions hydrauliques en rivière - Tronçon SM-1- Estuaire – 100%

No Logesdes: 4348-70030-018-01-0-BV-L

Préparé par :

Lasalle | NHC Inc.

9620 rue Saint-Patrick

LaSalle, QC H8R 1R8

Tel: 514.366.2970

www.lasallenhc.com

Préparé pour :

Hydro-Québec

75, boul. René-Lévesque Ouest, 3^e étage,

Québec, QC, H2Z 1A4

Au nom de :

Yanni Sodir, ing., MBA. Ing.

75, boul. René-Lévesque Ouest, 3^e étage,

Québec, QC, H2Z 1A4

15 mai 2026

R.0758 - Rapport final, Rév. 00

Numéro de référence de Lasalle|NHC : 08008864

SUIVI DU DOCUMENT

Date	Révision No.	Révisé par	Émis pour
2025-06-23	00	Wael Taha et Maryse Bonneau-Lefebvre	Rapport 60% - Préliminaire
2025-12-15	00	Wael Taha et Maryse Bonneau-Lefebvre	Rapport 100% - Préliminaire
2026-05-15	00	Wael Taha et Maryse Bonneau-Lefebvre	Rapport 100% - Final

Rapport préparé par :



Benoit Ruest
Ingénieur en hydraulique et océanographe
No OIQ : 5054787



Florentin Anne
Candidat à la profession d'ingénieur (CPI)
No OIQ : 6062775

Rapport révisé par :



Maryse Bonneau-Lefebvre, ing., M.Ing.
Chargée de projet
No OIQ : 5003331



Wael Taha, ing., M.Ing.
Associé, Chargé de projet
No OIQ : 133365

Chemin d'accès au fichier LNI : S:\Etudes\!_PROJETS_ACTIFS\8008864_Centrale-SM-3_Etude-Hydraulique\8_Rapport\3_Final\4_Conditions hydraulique estuaire\Rapport_100%

CLAUSE DE LIMITATION DE RESPONSABILITÉ

Ce document a été préparé par **Lasalle|NHC** de façon conforme aux bonnes pratiques d'ingénierie et est destiné à l'usage exclusif de **Hydro-Québec** et de leurs représentants autorisés dans le cadre spécifique du projet **Ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale Sainte-Marguerite**.

Le contenu de ce document ne peut être appliqué ou utilisé, en tout ou en partie, par ou à l'avantage d'autres parties sans l'autorisation écrite de **Lasalle|NHC**. Aucune autre garantie, expresse ou tacite, n'est accordée.

Lasalle|NHC et ses directeurs, associés, employés et mandataires n'assument aucune responsabilité à l'utilisation ou au recours du présent document ou de son contenu par des parties autres que **Hydro-Québec**.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	12
2	CONTEXTE & OBJECTIFS	13
3	DONNÉES	15
3.1	Système de référence et datum	15
3.2	Modèle numérique de terrain (MNT)	15
3.2.1	Données LiDAR	15
3.2.2	Données bathymétriques	15
3.3	Mouillages, profils CTD et débits mesurés	17
3.4	Résistance hydraulique	19
3.5	Température et salinité au large	20
4	APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	24
4.1	Maillage	24
4.2	Traceurs de température et de salinité	25
4.3	Conditions limites	26
4.4	Schéma numérique	27
5	CALIBRATION DU MODÈLE 3D	28
5.1	Scénarios de modélisation	28
5.1.1	Scénarios de calibration de l'hydraulique	28
5.1.2	Scénarios de calibration de la salinité et de la température	28
5.2	Résultats de calibration	31
5.2.1	Calibration de l'hydraulique	31
5.2.2	Calibration de la salinité et de la température	31
5.3	Limites et incertitudes du modèle	51
6	CARACTÉRISATION DE L'INTRUSION SALINE	52
6.1	Scénarios de modélisation	52
6.2	Résultats de modélisation	55
6.2.1	Cartes des gammes de positions du front salin	55
6.2.2	Profils verticaux de température et de salinité	60
6.2.3	Variations temporelles des conditions de température et de salinité	60
6.3	Interprétation des résultats	69
6.3.1	Débit maximum pour les mois de janvier et février	69
6.3.2	Débit module pour le mois de mai	70
6.3.3	Débit module pour le mois de juin	70
6.3.4	Débit module pour les mois d'octobre et de novembre	71

7	VITESSES DE COURANT ET CONTRAINTES DE CISAILLEMENT AU FOND À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE SAINTE-MARGUERITE	73
7.1	Contexte et objectifs	73
7.2	Analyse des résultats	74
7.2.1	Débit maximum de janvier/février	74
7.2.2	Débit module de mai	74
7.2.3	Débit module de juin	75
7.2.4	Débit module d'octobre/novembre	75
8	CONCLUSION & RECOMMANDATIONS	83
9	RÉFÉRENCES	86

ANNEXES

Annexe A	Figures du calage de l'hydraulique
Annexe B	Profils de température et de salinité mesurés (profils CTD) et modélisés (TELEMAC-3d) en conditions de marées de mortes-eaux (campagne 1A)
Annexe C	Profils de température et de salinité mesurés (profils CTD) et modélisés (TELEMAC-3d) en conditions de marées de vives-eaux (campagne 2)
Annexe D	Simulations complémentaires en conditions de marée de mortes-eaux
Annexe E	Séries temporelles de salinité, de température et de niveaux d'eau en conditions de référence et projetées
Annexe F	Vitesses de courants au fond à l'embouchure de la rivière Sainte-Marguerite en marée de vives-eaux

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES ET

TABLEAUX

Tableau 1	Classes d'utilisation du sol et coefficients de rugosité associés dans la zone d'étude.	20
Tableau 2	Répartition verticale des couches du maillage de calcul du modèle TELEMAC-3D.	24
Tableau 3	Conditions hydrauliques associées aux scénarios de calibration de l'hydraulique.	28
Tableau 4	Simulations TELEMAC-3D pour les périodes de mesure des profils CTD.	29
Tableau 5	Simulations TELEMAC-3D supplémentaires en conditions de marée de mortes-eaux.	30
Tableau 6	Moyennes mensuelles historiques des températures de l'eau de la rivière Sainte-Marguerite à la station de mesure RSM0622 sur la période 2003-2012.	53
Tableau 7	Scénarios de modélisation pour la caractérisation du front salin en conditions de référence et en conditions projetées.	54

FIGURES

Figure 1	Domaine d'étude en aval de la centrale SM-1 incluant l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite ainsi qu'une portion du golfe Saint-Laurent.	13
Figure 2	Localisation des données bathymétriques utilisés pour la préparation du modèle numérique de terrain de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite.	16
Figure 3	Modèle numérique de terrain (MNT) de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite et du domaine élargie (datum CGVD28).	17
Figure 4	Positions des mesures de mouillages à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite (en aval de la centrale SM-1).	18
Figure 5	Positions des profils CTD réalisés à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite en 2024 (en aval de la centrale SM-1).	19
Figure 6	Position des profils CTD de l'OGSL utilisé pour le forçage du modèle TELEMAC-3D à la frontière au large (golfe du Saint-Laurent).	22
Figure 7	Profils de température et de salinité au large (golfe du Saint-Laurent) obtenus à partir de la base de données océanographiques de l'OGSL.	23
Figure 8	Variation de la distribution verticale des couches du modèle TELEMAC-3D en fonction de la profondeur d'eau et de la position (PK) sur la rivière	

	Sainte-Marguerite (haut : portion aval du modèle, bas : portion amont du modèle).	25
Figure 9	Limites du modèle TELEMAC-3D.	26
Figure 10	Comparaison des profils de salinité et de température à la station SM 02 à l'échelle de marée haute durant une marée de mortes-eaux (mesures en bleu et résultats de modélisation en rouge).	32
Figure 11	Comparaison des profils de salinité et de température à la station SM 02 à l'échelle de marée basse durant une marée de mortes-eaux (mesures en bleu et résultats de modélisation en rouge).	33
Figure 12	Corrélation entre la salinité moyenne mesurée (profils CTD) et modélisée (T3D) en conditions de marée de mortes-eaux (campagne 1A).	35
Figure 13	Corrélation entre la salinité moyenne mesurée (profils CTD) et modélisée (T3D) en conditions de marée intermédiaire (campagne 1B).	35
Figure 14	Corrélation entre la salinité moyenne mesurée (profils CTD) et modélisée (T3D) en conditions de marée de vives-eaux (campagne 2).	36
Figure 15	Corrélation entre la température moyenne mesurée (profils CTD) et modélisée (T3D) en conditions de marée de mortes-eaux (campagne 1A).	36
Figure 16	Corrélation entre la température moyenne mesurée (profils CTD) et modélisée (T3D) en conditions de marée intermédiaire (campagne 1B).	37
Figure 17	Corrélation entre la température moyenne mesurée (profils CTD) et modélisée (T3D) en conditions de marée de vives-eaux (campagne 2).	37
Figure 18	Comparaison de la position du front salin (limite de salinité de 3 PSU au fond) modélisée avec le modèle TELEMAC-3D et établie à partir des profils CTD en conditions de marée de mortes-eaux (campagne 1A).	38
Figure 19	Comparaison de la position du front salin (limite de salinité de 3 PSU au fond) modélisée avec le modèle TELEMAC-3D et établie à partir des profils CTD en conditions de marée intermédiaire (campagne 1B).	38
Figure 20	Comparaison de la position du front salin (limite de salinité de 3 PSU au fond) modélisée avec le modèle TELEMAC-3D et établie à partir des profils CTD en conditions de marée de vives-eaux (campagne 2).	39
Figure 21	Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1129, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (15-18 juin 2024) et de marée intermédiaire (19-22 juin 2024).	42
Figure 22	Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1130, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (15-18 juin 2024) et de marée intermédiaire (19-22 juin 2024).	43
Figure 23	Séries temporelles de la température au fond et des niveaux d'eau modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1131, bleu)	

	en conditions de marée de mortes-eaux (15-18 juin 2024) et de marée intermédiaire (19-22 juin 2024).	44
Figure 24	Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1150, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (15-18 juin 2024) et de marée intermédiaire (19-22 juin 2024).	45
Figure 25	Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1129, bleu) en conditions de marée de vives-eaux (16-22 septembre 2024).	46
Figure 26	Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1130, bleu) en conditions de marée de vives-eaux (16-22 septembre 2024).	47
Figure 27	Séries temporelles de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1131, bleu) en conditions de marée de vives-eaux (16-22 septembre 2024).	48
Figure 28	Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1150, bleu) en conditions de marée de vives-eaux (16-22 septembre 2024).	49
Figure 29	Profils de salinité à marée basse mesurés à la station SM02 en conditions de marée de mortes-eaux (2024-06-17, débit de 101 m ³ /s) et de marée de vives-eaux (2024-09-20, débit de 111 m ³ /s).	50
Figure 30	Bathymétrie de la rivière Sainte-Marguerite dans le secteur du mouillage ESMA1129.	50
Figure 31	Profils de température et de salinité imposés à la frontière au large du modèle selon la période de l'année associée à chaque scénario de modélisation.	53
Figure 32	Carte de localisation des gammes de position du front salin (salinité 3 PSU au fond) en conditions de débit maximum pour les mois de janvier et de février en conditions de référence et en conditions projetées pour des marées de mortes-eaux (gauche) et des marées de vives-eaux (droite).	56
Figure 33	Carte de localisation des gammes de position du front salin (salinité 3 PSU au fond) en conditions de débit module pour le mois de mai en conditions de référence et en conditions projetées pour des marées de mortes-eaux (gauche) et des marées de vives-eaux (droite).	57
Figure 34	Carte de localisation des gammes de position du front salin (salinité 3 PSU au fond) en conditions de débit module pour le mois de juin en conditions	

	de référence et en conditions projetées pour des marées de mortes-eaux (gauche) et des marées de vives-eaux (droite).	58
Figure 35	Carte de localisation des gammes de position du front salin (salinité 3 PSU au fond) en conditions de débit module pour les mois d'octobre et de novembre en conditions de référence et en conditions projetées pour des marées de mortes-eaux (gauche) et des marées de vives-eaux (droite).	59
Figure 36	Profils verticaux de salinité et de température à l'étale de marée basse pour le scénario de débit maximum pour les mois de janvier et février en conditions de référence ($Q=325 \text{ m}^3/\text{s}$) et en conditions projetées ($Q=525 \text{ m}^3/\text{s}$).	61
Figure 37	Profils verticaux de salinité et de température à l'étale de marée haute pour le scénario de débit maximum pour les mois de janvier et février en	

	conditions de référence ($Q=325 \text{ m}^3/\text{s}$) et en conditions projetées ($Q=525 \text{ m}^3/\text{s}$).	62
Figure 38	Profils verticaux de salinité et de température à l'étale de marée basse pour le scénario de débit module pour le mois de mai en conditions de référence ($Q=160,5 \text{ m}^3/\text{s}$) et en conditions projetées ($174,7 \text{ m}^3/\text{s}$).	63
Figure 39	Profils verticaux de salinité et de température à l'étale de marée haute pour le scénario de débit module pour le mois de mai en conditions de référence ($Q=160,5 \text{ m}^3/\text{s}$) et en conditions projetées ($174,7 \text{ m}^3/\text{s}$).	64
Figure 40	Profils verticaux de salinité et de température à l'étale de marée basse pour le scénario de débit module pour le mois de juin en conditions de référence ($Q=148,3 \text{ m}^3/\text{s}$) et en conditions projetées ($104 \text{ m}^3/\text{s}$).	65
Figure 41	Profils verticaux de salinité et de température à l'étale de marée haute pour le scénario de débit module pour le mois de juin en conditions de référence ($Q=148,3 \text{ m}^3/\text{s}$) et en conditions projetées ($104 \text{ m}^3/\text{s}$).	66
Figure 42	Profils verticaux de salinité et de température à l'étale de marée basse pour le scénario de débit module pour les mois d'octobre et de novembre en conditions de référence et en conditions projetées ($Q=93 \text{ m}^3/\text{s}$).	67
Figure 43	Profils verticaux de salinité et de température à l'étale de marée haute pour le scénario de débit module pour les mois d'octobre et de novembre en conditions de référence et en conditions projetées ($Q=93 \text{ m}^3/\text{s}$).	68
Figure 44	Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au jusant (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit fixe maximum de janvier/février pour les conditions de référence et les conditions projetées.	76
Figure 45	Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au flot (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit fixe maximum de janvier-février pour les conditions de référence et les conditions projetées.	77
Figure 46	Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au jusant (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit module de mai pour les conditions de référence et les conditions projetées.	78
Figure 47	Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au flot (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit module de mai pour les conditions de référence et les conditions projetées.	79
Figure 48	Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au jusant (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit module de juin pour les conditions de référence et les conditions projetées.	80
Figure 49	Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au flot (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit module de juin pour les conditions de référence et les conditions projetées.	81
Figure 50	Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au jusant et au flot (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit module d'octobre/novembre pour les conditions de référence/projetées.	82

1 INTRODUCTION

La présente étude s'intègre à l'avant-projet pour l'ajout d'un 3^e groupe turbine/alternateur (T/A) à la centrale SM-3 située sur la rivière Sainte-Marguerite à quelque 75 km en amont de son embouchure. La centrale SM-3 a été mise en service en 2003, alors que deux centrales étaient déjà installées en aval (SM-2 et SM-1) sur la rivière Sainte-Marguerite. La centrale de SM-3 est principalement utilisée en période de pointe et fonctionne actuellement avec deux groupes T/A (débit d'équipement total actuel de 300 m³/s). Le projet vise l'ajout d'un 3^e groupe, pour un débit additionnel de 200 m³/s.

Le projet est assujéti au processus d'Étude d'Impact sur l'Environnement (EIE). Ainsi, les effets du projet sur l'environnement, tant en phase de construction qu'en phase d'exploitation, sont à évaluer. L'exploitation de la centrale munie d'un 3^e groupe modifiera la gestion du réservoir SM-3 ainsi que la gestion des aménagements en aval. Les études du milieu physique exigées pour alimenter l'Étude d'Impact sur l'Environnement (EIE) incluent : l'hydraulique, le panache d'eau douce dans l'estuaire, le régime des glaces et le régime thermique.

L'étude des conditions hydrauliques dans l'estuaire en aval de SM-1 consiste à évaluer l'impact du suréquipement de SM-3 sur l'intrusion saline et le mouvement des masses d'eau dans l'estuaire et la zone côtière proximale de la Sainte-Marguerite. L'objectif de cette étude est d'alimenter l'EIE qui sera déposée pour le projet. Un modèle numérique 3D de ce tronçon a été développé pour cette étude. Il est utilisé pour comparer différents scénarios de simulation en conditions de référence et en conditions futures d'exploitation. À noter que les exigences environnementales applicables à l'état de référence seront respectées pendant la phase de construction en maintenant le débit minimal exigé via l'évacuateur de la centrale SM-1. Aucun scénario supplémentaire n'est donc nécessaire pour représenter la phase de construction pour les analyses.

La section 2 du rapport résume le contexte et les objectifs du mandat puis la section 3 présente les données utilisées pour la réalisation du projet. La section 4 décrit l'approche méthodologique utilisée pour le développement du modèle hydrodynamique 3D alors que la section 5 présente la calibration du modèle. La caractérisation de l'intrusion saline en conditions de référence et projetées basée sur les résultats de modélisation numérique est détaillée à la section 6. Finalement, la section 7 présente les conclusions et les recommandations de l'étude.

2 CONTEXTE & OBJECTIFS

La rivière Sainte-Marguerite est un affluent du fleuve Saint-Laurent avec son embouchure à Clarke City, un secteur de la ville de Sept-Îles, sur la Côte-Nord. Le tronçon à l'étude est situé entre l'exutoire de la centrale SM-1 et l'embouchure de la rivière Sainte-Marguerite (PK 0 à 7,5) dans le golfe du Saint-Laurent en plus d'une zone élargie de 13,5 km en aval de la flèche littorale (Pointe Sainte-Marguerite) et est présenté sur la figure 1. Le tronçon complet (incluant la zone élargie) s'étend sur une distance d'environ 21 km.

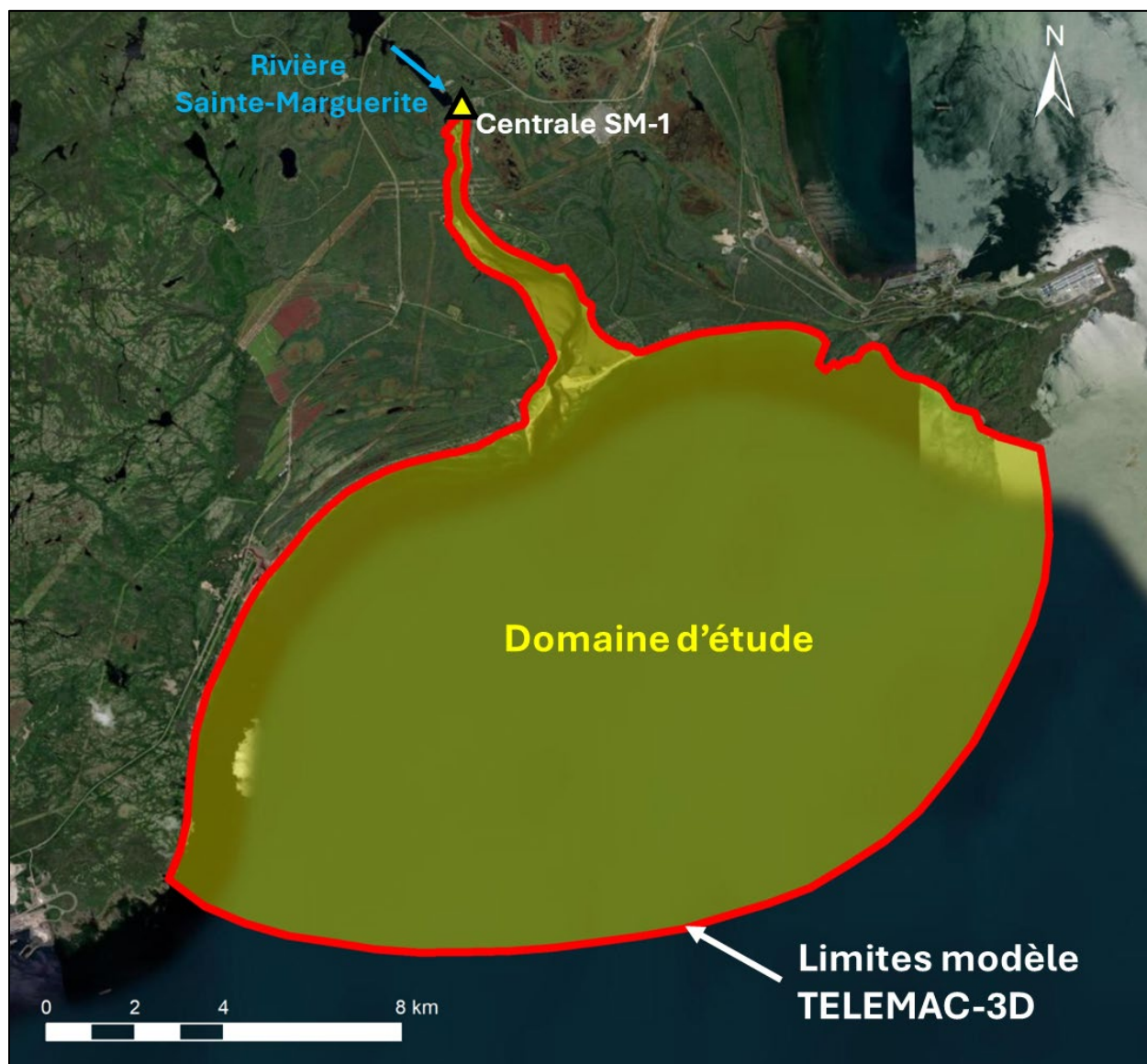


Figure 1 **Domaine d'étude en aval de la centrale SM-1 incluant l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite ainsi qu'une portion du golfe Saint-Laurent.**

Les centrales SM-1 et SM-2 ont des débits d'équipement beaucoup plus faibles (environ 190 m³/s pour SM-1 et 70 m³/s pour SM-2) que la centrale SM-3 et la capacité d'emmagasinement des réservoirs de SM-1 et de SM-2 entre les niveaux d'opération est faible. Ainsi, la configuration actuelle à deux groupes mène déjà à des déversements fréquents aux centrales SM-1 et SM-2. L'exploitation d'un 3^e groupe T/A à SM-3 pourrait donc mener à une augmentation des débits déversés à la centrale SM-1.

L'objectif principal de l'étude est de déterminer l'impact de l'augmentation potentielle des débits déversés à SM-1 sur l'intrusion saline et le mouvement des masses d'eau dans l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite pour des périodes spécifiques de l'année choisies pour leur intérêt environnemental. Un modèle hydrodynamique 3D de ce tronçon est développé dans le cadre de cette étude (modèle TELEMAC-3D). Il est utilisé pour comparer différents scénarios de simulation en conditions de référence et en conditions futures.

3 DONNÉES

3.1 Système de référence et datum

L'ensemble des données géographiques est exprimé selon la projection MTM 6 (NAD83). L'ensemble des données altimétriques est exprimé par rapport à la référence verticale (datum) CGVD28.

3.2 Modèle numérique de terrain (MNT)

Le modèle numérique de terrain (MNT) a été élaboré à partir des données bathymétriques et topographiques fournies par Hydro-Québec et les données disponibles sur la base de données du Service Hydrographique du Canada (SHC). L'ensemble de ces données est présenté dans cette section.

3.2.1 Données LiDAR

Des données topographiques relevées par LiDAR en octobre 2023 avec une résolution de 0,5 m ont été utilisées pour préparer le MNT. Elles couvrent l'ensemble du tronçon de SM-1 jusqu'à l'embouchure de la rivière Sainte-Marguerite.

3.2.2 Données bathymétriques

Différentes sources de données bathymétriques ont été utilisées :

- Données bathymétriques relevées en 2023 qui couvrent l'ensemble du tronçon jusqu'à l'estuaire;
- Données bathymétriques relevées en juillet 2024 qui couvrent l'ensemble du tronçon jusqu'à l'estuaire;
- Données bathymétriques NONNA fournies par le SHC relevées de 2000 à 2019 d'une résolution de 10 m.

La figure 2 présente la couverture des différentes sources de données bathymétriques. Cette figure montre que les données bathymétriques NONNA chevauchent en partie les données prises en 2023 et 2024. Ces dernières étant plus récentes, des données NONNA ont été filtrées dans cette zone. Il est à noter que les données bathymétriques de 2023 du chenal dans l'embouchure de la rivière Sainte-Marguerite ne sont pas utilisées, car leurs élévations diffèrent des mesures prises en juillet 2024. Ces différences, supérieures par endroits à 1 ou 2 mètres, sont possiblement causées par le potentiel de mobilité élevé des fonds de la zone autour de la flèche sableuse.

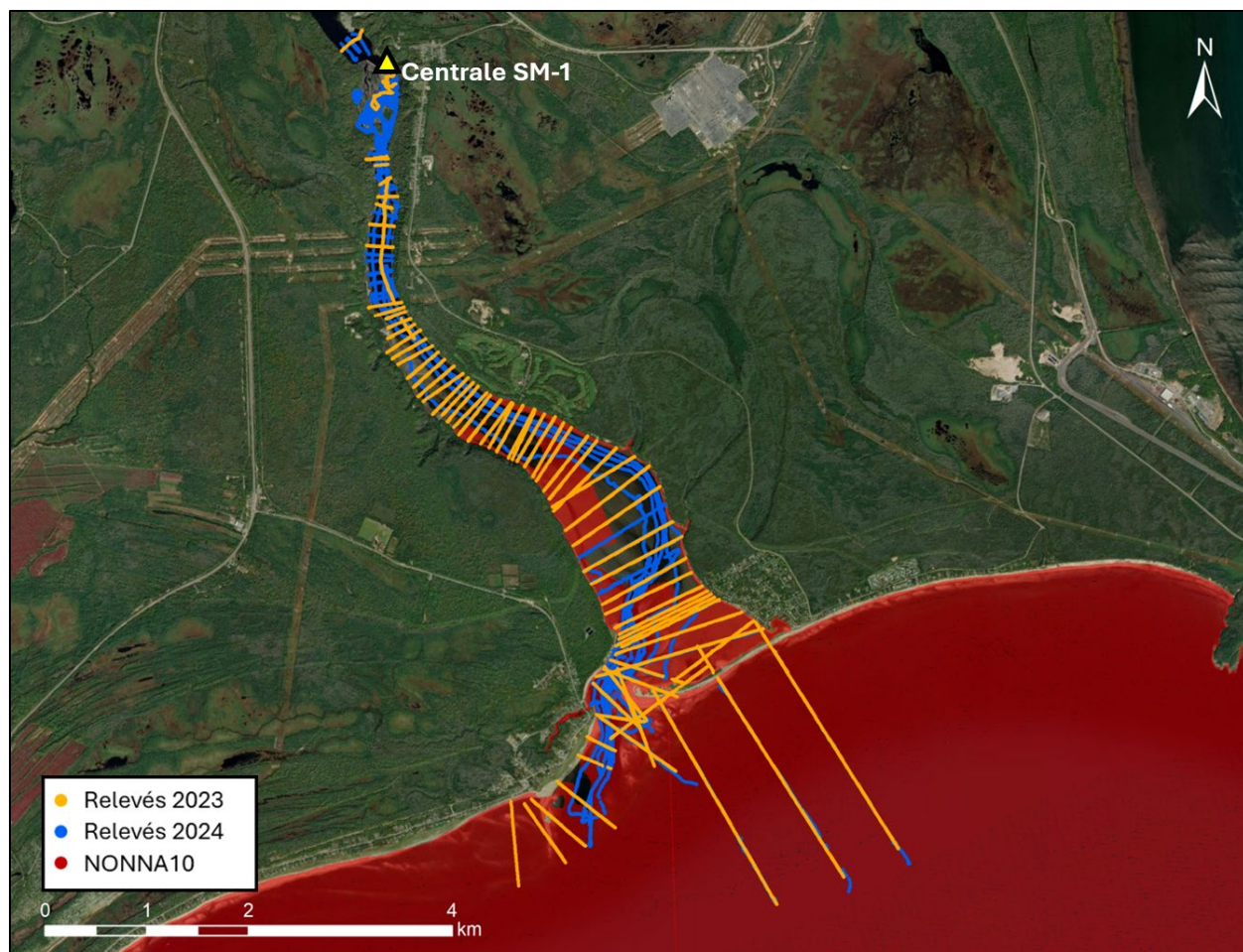


Figure 2 Localisation des données bathymétriques utilisés pour la préparation du modèle numérique de terrain de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite.

Une fois les données bathymétriques et topographiques rassemblées dans le même système d'information géographique (MTM zone 6) et rapportées à la référence altimétrique CGVD28 commune, les données ont été importées dans le logiciel de prétraitement de données de BlueKenue pour leur interpolation sur des maillages de calcul numérique. La bathymétrie résultante est illustrée à la figure 3.

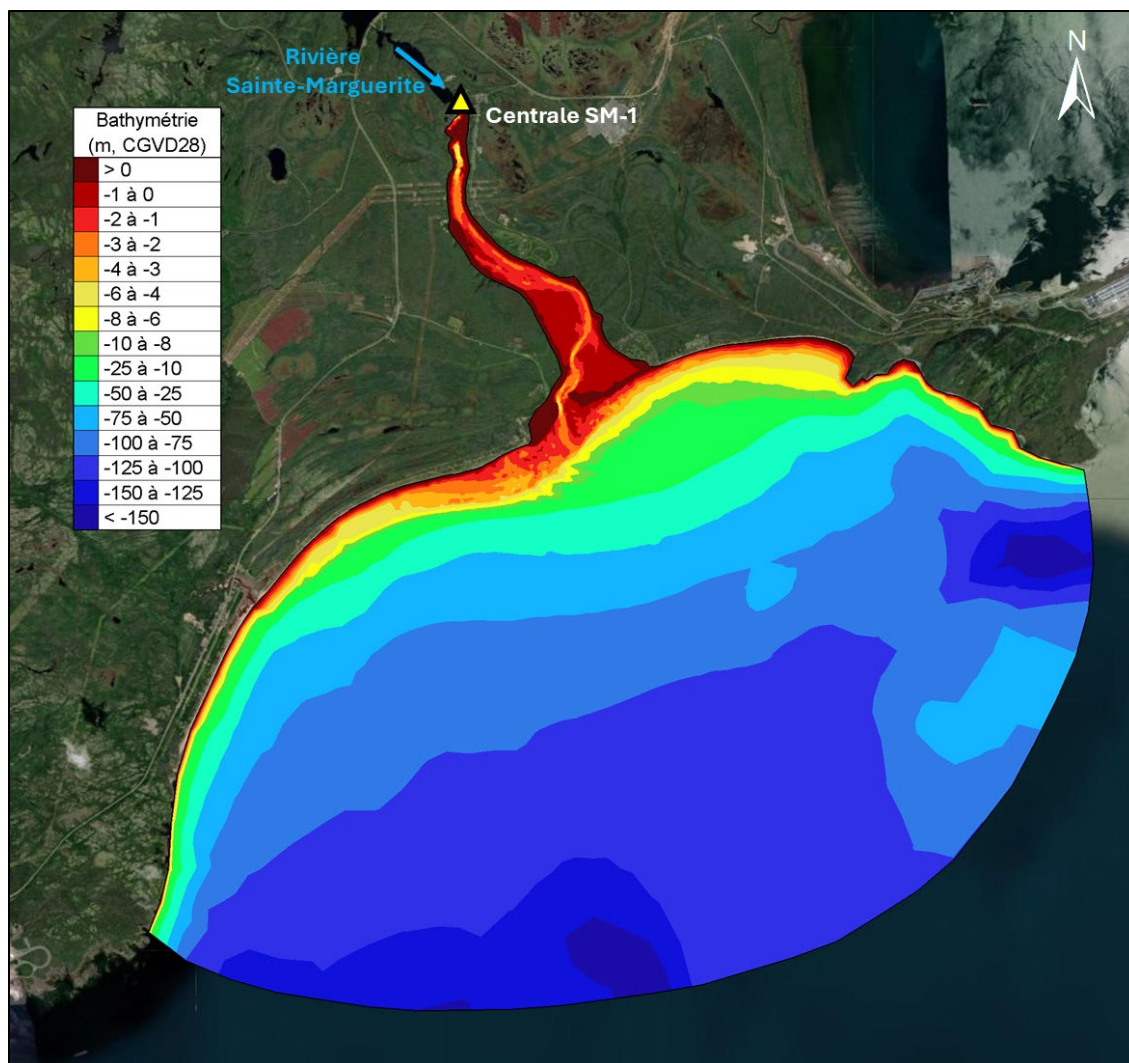


Figure 3 Modèle numérique de terrain (MNT) de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite et du domaine élargie (datum CGVD28).

3.3 Mouillages, profils CTD et débits mesurés

Des données de mouillage couvrant la période de mai à octobre 2024 ont été fournies par Hydro-Québec. La figure 4 présente la position des différents mouillages mis en place par Hydro-Québec dans le cadre du projet. Les données des mouillages ESMA1129, ESMA1130, ESMA1131 et ESMA1150 ont été utilisées pour la calibration et la validation du modèle hydrodynamique 3D de l'estuaire. À noter toutefois que les données du mouillage ESMA1128, situé à l'embouchure de la rivière Sainte-Marguerite, n'étaient pas disponibles pour le développement du modèle hydrodynamique puisqu'Hydro-Québec n'a pas été en mesure de le récupérer. Les données de

température et de salinité au mouillage RSMA1132 situé à l'exutoire de SM-1 ont pour leur part été utilisées pour le forçage du modèle (condition limite amont).

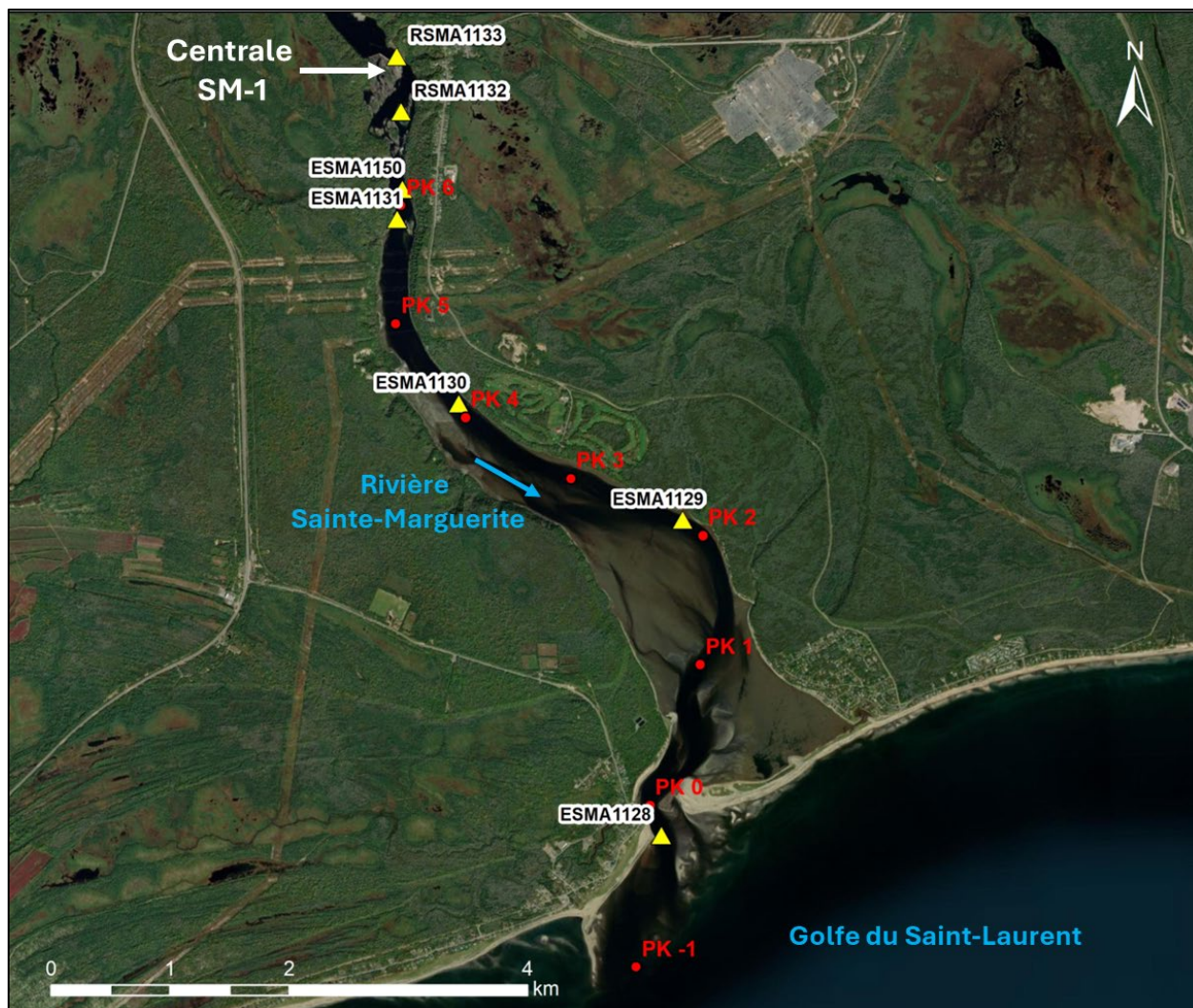


Figure 4 Positions des mesures de mouillages à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite (en aval de la centrale SM-1).

Les débits turbinés et déversés à SM-1 durant les périodes des mesures ont été fournis par Hydro-Québec. Ces données sont utilisées pour la calibration hydraulique du modèle et sont présentées à la section 5.

Des profils CTD ont également été fournis par Hydro-Québec. Ils couvrent la période du 15 au 18 juin 2024 en conditions de marée de mortes-eaux, du 20 au 21 juin 2024 en conditions de marée intermédiaire et du 17 au 22 septembre en conditions de marée de vives-eaux. Leurs positions

sont présentées à la figure 7. Ces données sont utilisées pour le calage de la salinité et de la température du modèle.

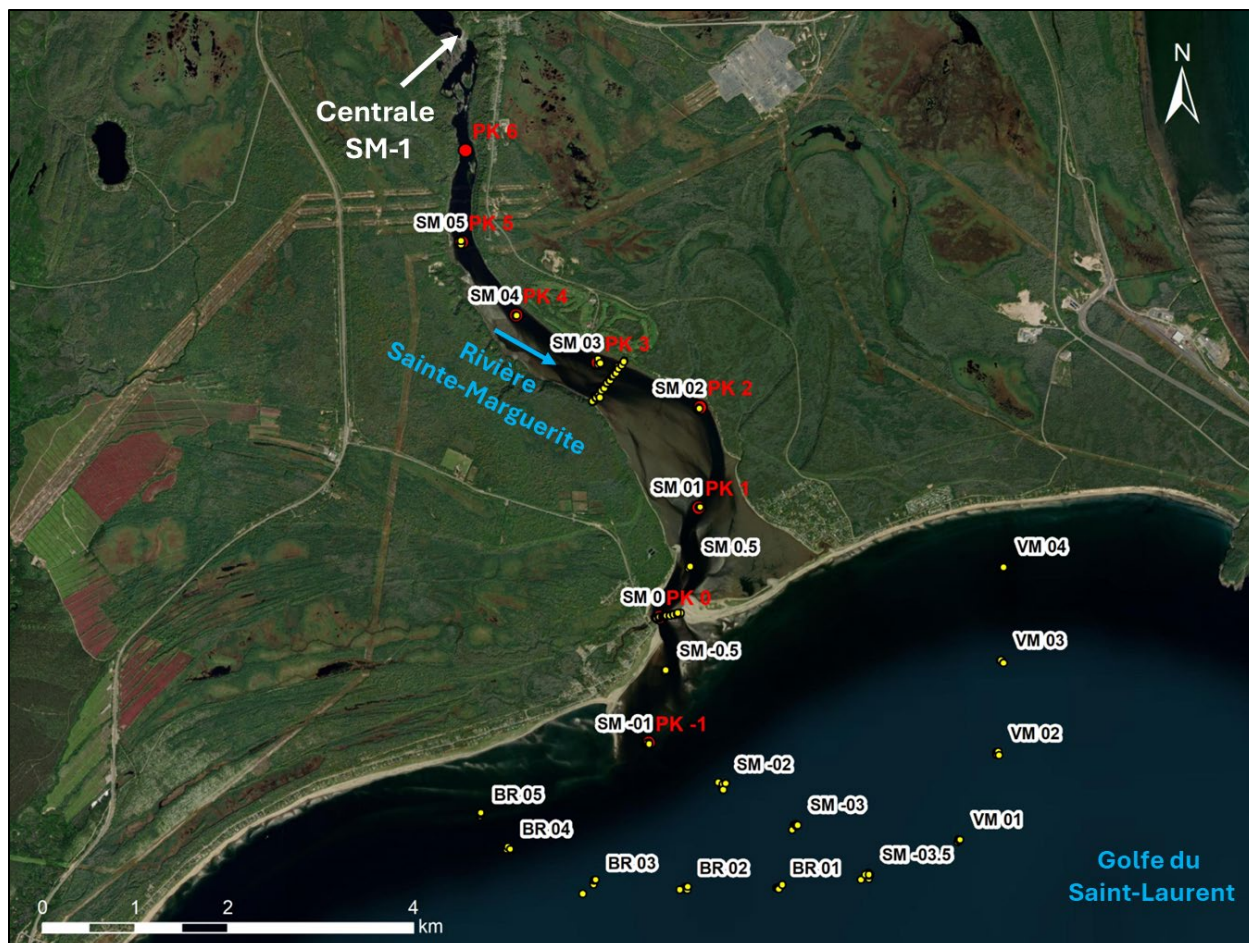


Figure 5 Positions des profils CTD réalisés à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite en 2024 (en aval de la centrale SM-1).

3.4 Résistance hydraulique

Pour déterminer la résistance hydraulique, la matrice d'utilisation du sol de l'ensemble de la province, obtenue auprès du MELCCFP dans le cadre d'un autre projet, a été convertie en polygones puis révisée afin de correspondre aux informations visibles sur les images satellites de la zone d'étude. Le tronçon modélisé est situé dans une région forestière où l'écoulement est principalement limité au lit de la rivière, sans plaine inondable. Ainsi, la majorité des polygones correspondent à des zones forestières.

Le tableau 1 donne les gammes de valeurs de coefficients de rugosité (n de Manning) typiquement utilisées pour les classes d'utilisation du sol résultantes, ainsi que les valeurs appliquées dans le modèle après calibration. Une analyse de sensibilité sur le coefficient de Manning attribué à la classe « Aquatique » a été effectuée pour retenir un coefficient de 0,015 après calage du modèle. Un coefficient de Manning de la classe « Forestier » a été attribué au sol de la rive (coefficient de 0,14 retenu).

Tableau 1 Classes d'utilisation du sol et coefficients de rugosité associés dans la zone d'étude.

Classe	Description	n de Manning	
		Gammes recommandées	Valeur appliquée
Forestier	Forêt (dense ou clairsemée)	0,08 – 0,20	0,14
Humide	Tourbière, marais, ou marécage – avec arbustes ou végétation clairsemée	0,05 – 0,085	0,07
Aquatique	Eau, lac, réservoir	0,025 – 0,05	0,015*
Sol nu et lande	Sol nu, roc-sol à nu ou dénudé	0,023 – 0,036	0,033

* Valeur retenue après calibration

3.5 Température et salinité au large

La température et la salinité à la condition limite aval du modèle doivent être imposées dans le golfe du Saint-Laurent suffisamment loin de l'embouchure pour ne pas être influencées par les apports d'eau douce issus de la rivière. Toutefois, l'analyse préliminaire des relevés CTD fournis par Hydro-Québec a révélé que même les profils CTD mesurés le plus au large sont influencés par le débit d'eau douce de la rivière Sainte-Marguerite. En effet, les profils de température et de salinité à proximité de l'embouchure fluctuent significativement en fonction de la marée et ne peuvent, par le fait même, être utilisés comme forçage au large pour le modèle hydrodynamique 3D. Dans ce contexte, une source externe de données a été utilisée pour pallier ce manque de données. Les bases de données océanographiques de l'Observatoire global du Saint-Laurent (OGSL) ont été consultées pour trouver des profils de températures et salinité pouvant servir de forçage au large pour le modèle. Bien qu'ils n'aient pas été mesurés en 2024, deux profils ont été sélectionnés pour effectuer la calibration du modèle :

- Profil du 7 juillet 2023 (49,554°N / 65,881°O) : Données CTD de la mission concertée sur le Coriolis II (MAP2023) : PLAINE

- Profil du 12 août 2021 (49,526°N / 66,203°O) : Données CTD de la mission concertée sur le Coriolis (MAC2021) : Odyssée Saint-Laurent 2021

La position de ces profils CTD se situe à environ 75 km de l'embouchure de la rivière Sainte-Marguerite (figure 6). Ces profils ont le potentiel de représenter des conditions typiques de température et de salinité au large dans le golfe du Saint-Laurent en période estivale (période des relevés CTD). Il est tout de même anticipé que ces profils ne puissent pas représenter de manière précise les conditions rencontrées à la condition limite aval du modèle d'autant plus que leur position est localisée plus près de la rive sud du Saint-Laurent que de la rive nord. Néanmoins, il s'agit potentiellement de la meilleure source de données disponibles pour le forçage du modèle et devrait permettre de rencontrer des conditions de forçage au large sans influence de l'eau douce issue de la rivière Sainte-Marguerite. De plus, ces profils CTD sont considérés indépendants des caractéristiques de la marée donc applicables autant en période de marée de mortes-eaux qu'en période de marée de vives-eaux. La figure 7 présente les profils de température et de salinité pour ces deux profils.

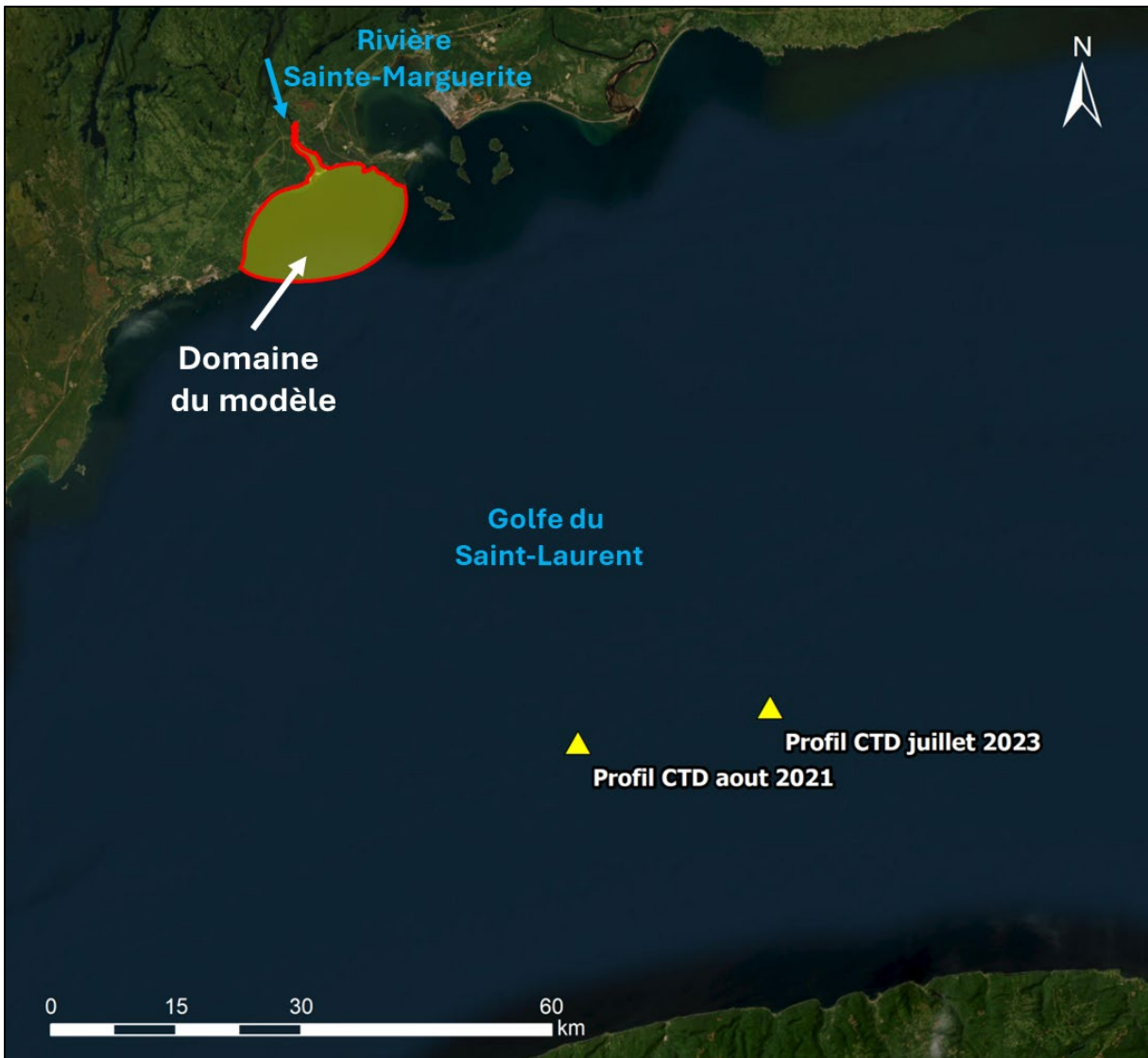


Figure 6 Position des profils CTD de l'OGSL utilisé pour le forçage du modèle TELEMAC-3D à la frontière au large (golfe du Saint-Laurent).

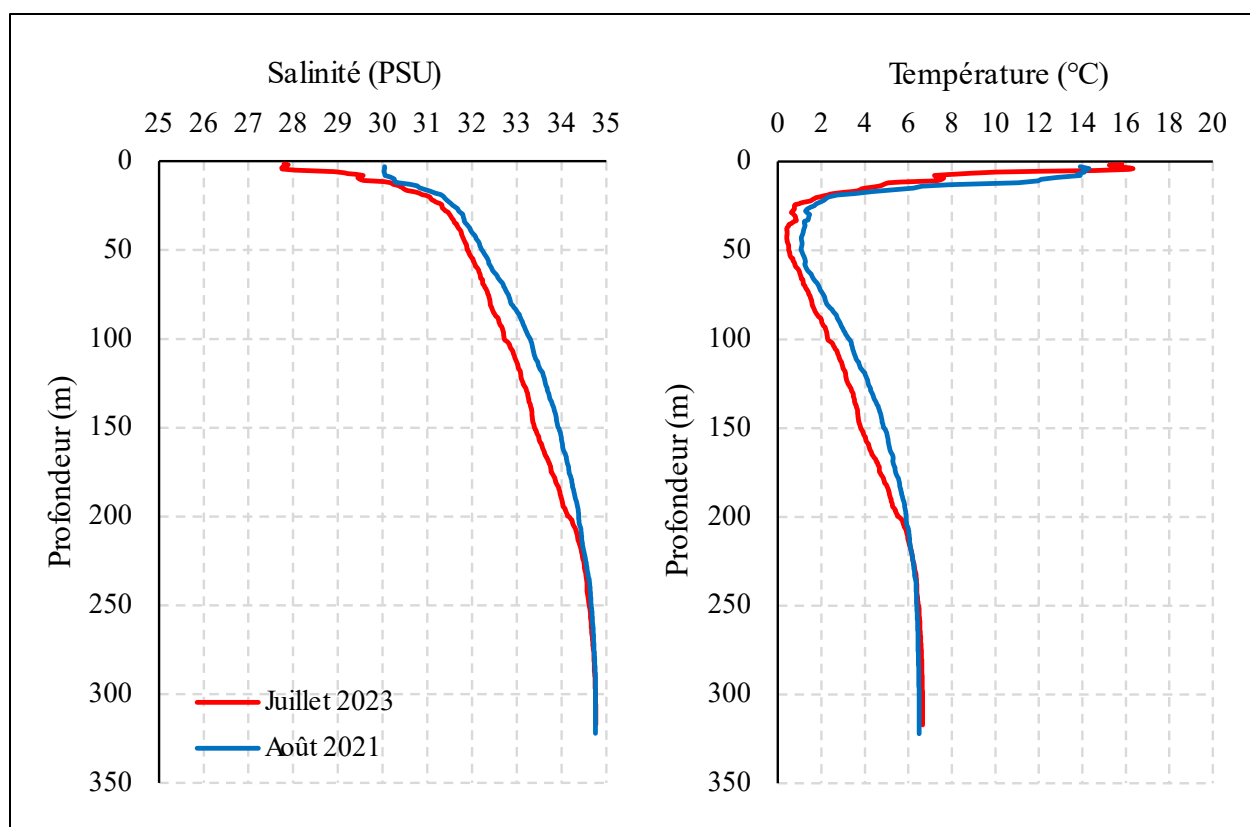


Figure 7 Profils de température et de salinité au large (golfe du Saint-Laurent) obtenus à partir de la base de données océanographiques de l'OGSL.

4 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

4.1 Maillage

La surface de la zone d'étude illustrée sur la figure 3 a été maillée à l'aide d'un maillage triangulaire. Les mailles triangulaires en plan sont ensuite discrétisées sur la verticale en couches pour donner des éléments prismatiques. Les mailles triangulaires en plan ont une taille caractéristique de 20 m dans le secteur de la rivière, de 50 m dans l'embouchure de l'estuaire et de 1 000 m au large. Le maillage du modèle comprend environ 33 000 surfaces triangulaires. Il est important de noter que la taille du maillage augmente en fonction du nombre de couches sur la verticale. Ici, le modèle comprend 8 couches sur la verticale pour un total de 263 000 éléments prismatiques. La résolution définitive du maillage de calcul a été sélectionnée après une analyse de sensibilité de manière à bien représenter les phénomènes physiques d'intérêt (mélange des masses d'eau douce/salée à l'intérieur de l'estuaire) tout en maintenant des temps de calcul raisonnables. Il a donc été jugé préférable d'opter pour un maillage horizontal plus grossier pour en contrepartie maximiser le nombre de couches sur la verticale afin de mieux représenter les gradients de température et de salinité sur la colonne d'eau.

Les 8 couches du maillage sont distribuées de manière non uniforme sur la colonne d'eau en fonction de ratios de la profondeur d'eau locale (tableau 2 et figure 8). Par conséquent, l'élévation des niveaux entre les couches varie dans l'espace et dans le temps en fonction de la profondeur d'eau à chaque point. Compte tenu de l'importante stratification de la colonne d'eau sur sa portion supérieure, les couches sont plus concentrées près de la surface (6 couches sur la moitié supérieure de la colonne d'eau vs 2 couches sur la moitié inférieure de la colonne d'eau). Cette distribution des couches permet de mieux représenter les gradients verticaux de température et de salinité.

Tableau 2 Répartition verticale des couches du maillage de calcul du modèle TELEMAC-3D.

Niveaux entre les couches	Élévation relative du niveau par rapport au fond*
1 (fond)	0
2	0,3H
3 (mi-profondeur)	0,5H
4	0,7H
5	0,8H
6	0,9H
7	0,95H
8 (surface)	H

* H=profondeur d'eau

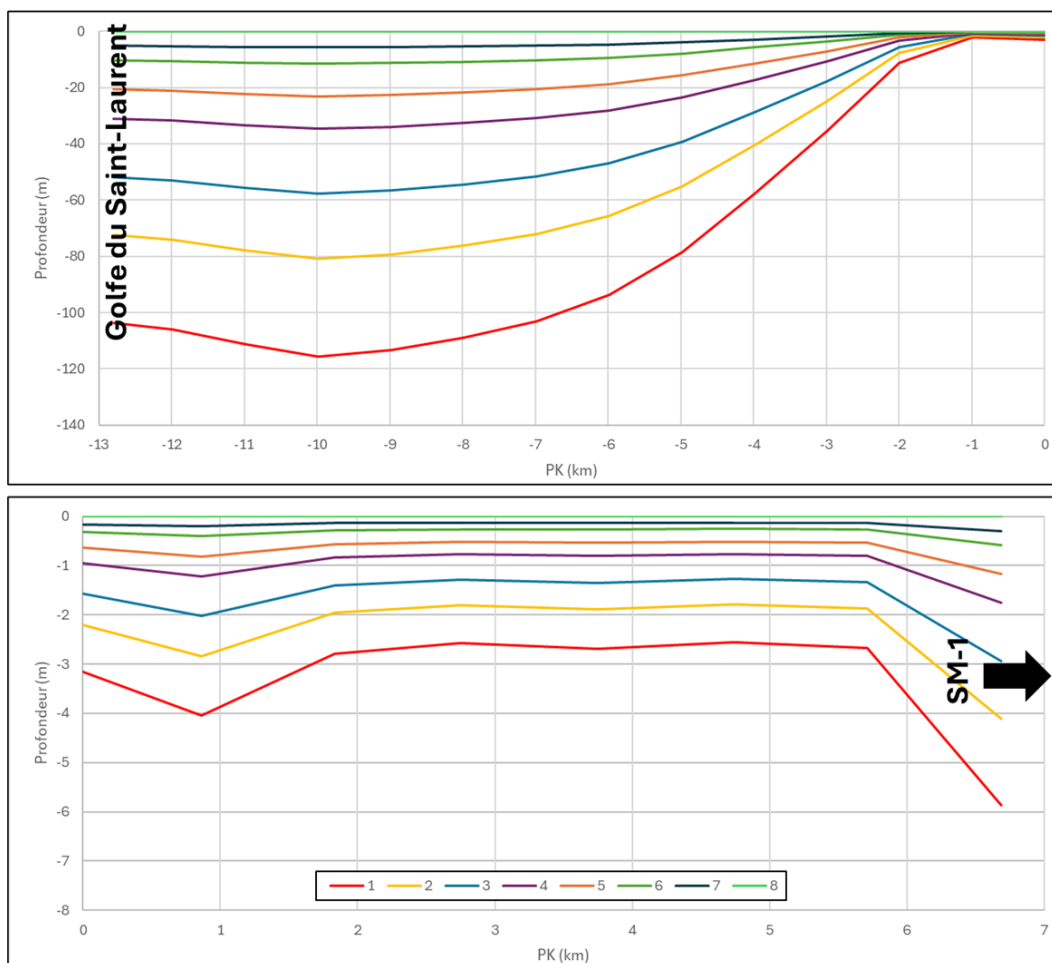


Figure 8 Variation de la distribution verticale des couches du modèle TELEMAC-3D en fonction de la profondeur d'eau et de la position (PK) sur la rivière Sainte-Marguerite (haut : portion aval du modèle, bas : portion amont du modèle).

4.2 Traceurs de température et de salinité

Le modèle TELEMAC-3D a été employé avec des traceurs actifs de température et de salinité, c'est-à-dire que ces traceurs influencent la masse volumique de l'eau à l'intérieur du domaine de calcul. Les variations de température et de salinité peuvent conséquemment influencer la stratification de la colonne d'eau et générer des courants de densité.

4.3 Conditions limites

La figure 9 illustre les limites de la zone d'étude couverte par le modèle numérique hydrodynamique. Les limites amont et aval présentées sont les suivantes :

- Sortie de la centrale de SM-1 (amont);
- Évacuateur de crue de SM-1 (amont);
- Golfe du Saint-Laurent (aval).

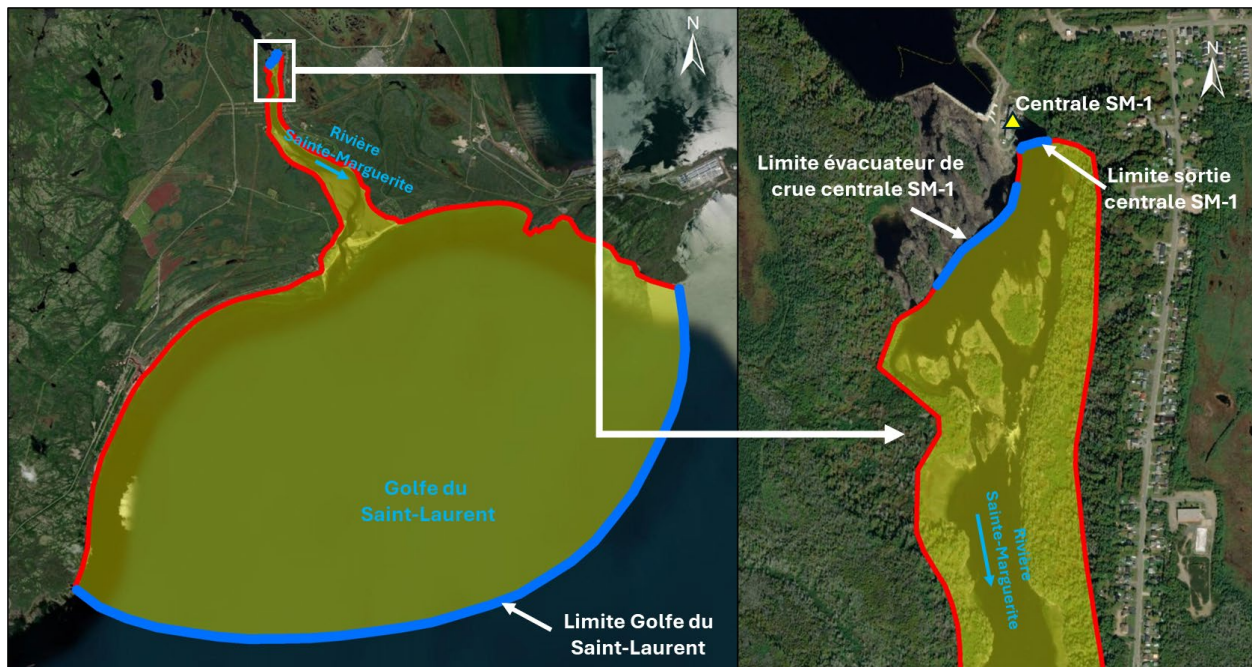


Figure 9 Limites du modèle TELEMAC-3D.

Ces limites sont choisies pour représenter le plus fidèlement possible les conditions d'opérations des centrales SM-1 et d'assurer un forçage adéquat dans le golfe du Saint-Laurent avec le signal de marée approprié.

Dans le modèle numérique, une condition de débit est imposée sur les deux limites amont du modèle. À la frontière aval du modèle (golfe du Saint-Laurent), une condition de niveaux d'eau et de vitesses imposés a été employée en y appliquant les constituants harmoniques majeurs et mineurs (marée astronomique) issus de la base de données du modèle marégraphique global TPXO (Egbert et al., 1994; Egbert et Erofeeva, 2002). Bien que le forçage de marée TPXO inclut seulement la composante astronomique de la marée, cette approche a l'avantage de fournir des vitesses de courant en plus des niveaux d'eau, ce qui améliore significativement la stabilité du modèle à la frontière au large. Cela est particulièrement important pour bien représenter les flux

de température et de salinité qui entrent et qui sortent dans le domaine de calcul via cette frontière. C'est pour cette raison que la base de données TPXO a été retenue pour le forçage de la marée plutôt que les mesures de niveaux d'eau à la station marégraphique de Sept-Îles (SHC).

De plus, chaque limite se voit imposer des profils de température et de salinité. Pour les conditions amont, les données de température et de salinité mesurées au mouillage ESMA1132 (le plus en amont de la rivière Sainte-Marguerite) sont utilisées en imposant un profil vertical uniforme sur la colonne d'eau (salinité de 0 PSU). Pour la condition au large, les profils de température et de salinité obtenus via l'OGSL sont utilisés pour le forçage (figure 7).

4.4 Schéma numérique

Les conditions hydrodynamiques ont été modélisées à l'aide de TELEMAC-3D (OpenTELEMAC-MASCARET, 2022), un outil de modélisation numérique d'écoulement à surface libre reconnu internationalement.

Le modèle TELEMAC-3D résout les équations tridimensionnelles d'écoulement à surface libre ainsi que celles de transport et de diffusion de quantités physiques telles que la température et la salinité. Le modèle calcule la vitesse et la profondeur d'eau sur l'ensemble du domaine en fonction de la bathymétrie et de la rugosité du fond (coefficient de Manning) ainsi que de la température et de la salinité. Ce modèle a été calibré à partir des données hydrauliques et des profils CTD fournis par Hydro-Québec.

Les principaux paramètres de simulation utilisés pour TELEMAC-3D sont les suivants :

- Pas de temps de calcul fixe de 5 s;
- Pas de temps de sortie des résultats de 15 min;
- Durée de la période simulée variant dépendamment de la période étudiée;
- Loi de frottement sur le fond : Manning;
- Bords découvrant : activés;
- Modèle de turbulence horizontale et verticale à viscosité constante;
- Loi de densité : fonction de la température et de la salinité;
- Influence de la force de Coriolis : activée;
- Version non hydrostatique : non activée.

5 CALIBRATION DU MODÈLE 3D

5.1 Scénarios de modélisation

5.1.1 Scénarios de calibration de l'hydraulique

Les conditions de simulation pour le calage sont extraites à partir des données fournies par Hydro-Québec.

Les données de mouillage de mai à octobre 2024 de la rivière Sainte-Marguerite dont la localisation est illustrée sur la figure 4 sont utilisées pour extraire et valider les niveaux d'eau lors du forçage de la marée.

Les données fournies des débits turbinés par la centrale SM-1 ainsi que ceux déversés sont utilisées comme conditions amont du modèle.

Pour assurer un calage adéquat du modèle, il est nécessaire d'effectuer des simulations de plusieurs conditions de débits de rivière et de marée. Ainsi, quatre scénarios sont sélectionnés pour permettre d'explorer une vaste gamme de conditions hydrauliques (tableau 3).

Tableau 3 Conditions hydrauliques associées aux scénarios de calibration de l'hydraulique.

Scénario de calibration	Période	Marée	Débit	Débit moyen (m ³ /s)	Gamme de débits [min, max] (m ³ /s)
1	30 septembre au 2 octobre 2024	Mortes-eaux	Faible	63	[4, 117]
2	28 au 30 juillet 2024	Mortes-eaux	Élevé	164	[102, 219]
3	5 au 7 octobre 2024	Vives-eaux	Faible	47	[10, 110]
4	24 au 26 juin 2024	Vives-eaux	Élevé	179	[117, 246]

5.1.2 Scénarios de calibration de la salinité et de la température

La calibration du modèle en termes de reproduction des fluctuations de température et de salinité à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite a été effectué pour les trois périodes pour lesquelles des relevés CTD (profils de température et de salinité) étaient disponibles. Ces périodes correspondent à trois conditions de marées :

- Marée de mortes-eaux (campagne 1A) : 15-18 juin 2024;

- Marée intermédiaire (campagne 1B) : 20-21 juin 2024;
- Marée de vives-eaux (campagne 2) : 17-22 septembre 2024.

Ces périodes de calibration ont été regroupées en deux simulations différentes (tableau 4).

Tableau 4 Simulations TELEMAC-3D pour les périodes de mesure des profils CTD.

Simulation	Période	Marée	Débit moyen (m ³ /s)	Gamme de débits [min, max] (m ³ /s)	Profils de température/salinité imposés en aval (golfe du Saint-Laurent)
1	14 au 22 juin 2024	Mortes-eaux et intermédiaire	154	[50, 269]	7 juillet 2023*
2	28 au 30 juillet 2024	Vives-eaux	121	[98, 178]	12 août 2021*

* Profils indépendants de la condition de marée

En complément aux profils CTD disponibles, les mesures de température et de salinité sur le fond aux mouillages ESMA1129, ESMA1130, ESMA1131 et ESMA1150 ont été utilisés sur ces mêmes périodes pour vérifier la calibration du modèle. Quatre autres périodes de calibration supplémentaires pour les conditions de marée de mortes-eaux ont été ajoutées durant le processus de calibration du modèle pour mieux évaluer la performance du modèle et améliorer la compréhension de ses limites (tableau 5). À noter que les mouillages ESMA1131 et ESMA1150 étant à proximité de l'exutoire de SM-1, sont en permanence en eau douce pour les différentes périodes de validation modélisées.

La calibration du modèle a principalement consisté à tester la réponse du modèle pour différents modèles de turbulence disponibles dans TELEMAC-3D. Le modèle de turbulence utilisé dans le modèle et sa paramétrisation s'est révélé être le paramètre pour lequel la stratification de la colonne d'eau et la dynamique du front salin à l'intérieur de l'estuaire sont les plus sensibles. Les modèles de turbulences testés lors du calage du modèle sont les suivants :

- Viscosité constante
- K-epsilon
- *Mixing length* (Prantl)
 - Sans amortissement
 - Fonction d'amortissement de Viollet
 - Fonction d'amortissement de Munk and Anderson
- *Mixing length* (Nezu and Nakagawa)
 - Sans amortissement
 - Fonction d'amortissement de Viollet

- Fonction d'amortissement de Munk and Anderson
- Smagorinsky

Tableau 5 Simulations TELEMAC-3D supplémentaires en conditions de marée de mortes-eaux.

Simulation	Période	Marée	Débit moyen (m ³ /s)	Gamme de débits [min, max] (m ³ /s)	Profils de température et de salinité imposés en aval (golfe du Saint-Laurent)
3	10 au 18 juillet 2024	Mortes-eaux	122	[100, 146]	7 juillet 2023*
4	11 au 19 août 2024	Mortes-eaux	120	[95, 227]	7 juillet 2023*
5	26 août au 2 septembre 2024	Mortes-eaux	109	[96, 129]	12 août 2021*
6	10 au 18 septembre 2024	Mortes-eaux	124	[51, 197]	12 août 2021*

* Profils indépendants de la condition de marée

En complément, d'autres essais de sensibilité ont été effectués dans le but de potentiellement améliorer la calibration du modèle. Le nombre de couches sur la verticale dans le modèle TELEMAC-3D a notamment été augmenté à 13 plutôt que 8 et les conditions frontières au large (température et salinité) ont été imposées à partir de profils CTD fournis par Hydro-Québec situés plus près de l'embouchure plutôt qu'à partir des profils du golfe obtenus de l'OGSL. Finalement, le modèle TELEMAC-3D à 8 couches sur la verticale paramétré pour utiliser un modèle de turbulence à viscosité constante (horizontal et vertical) et forcé au large avec des profils de température et de salinité obtenus de l'OGSL est la configuration de modèle qui a été retenue. Les résultats de la calibration pour cette configuration de modèle sont présentés à la section 5.2.2.

5.2 Résultats de calibration

5.2.1 Calibration de l'hydraulique

Les comparaisons de niveaux d'eau entre les données des mouillages et les valeurs de simulations sont présentées à l'annexe A. Il est observé que, pour les quatre scénarios de calibration, les valeurs temporelles de niveaux d'eau des simulations ont un déphasage moyen de 3 minutes sur les niveaux mesurés aux mouillages. Elles sont donc bien en phase avec celles des mouillages.

Il est aussi observé que, dans l'ensemble, les amplitudes des niveaux d'eau des simulations sont similaires à celles des données de mouillage. L'erreur normalisée RMSE (*Root Mean Square Error*) est utilisée pour comparer les résultats de simulations aux valeurs mesurées. La valeur moyenne du RMSE aux différents mouillages pour l'ensemble des simulations est de 0,12 m, soit une valeur relative de 5,8% par rapport au marnage. Dans l'ensemble, le modèle propage donc bien le signal de marée à l'intérieur de l'estuaire à partir de la frontière aval.

5.2.2 Calibration de la salinité et de la température

L'évaluation de la performance du modèle est basée sur la comparaison des mesures de température et de salinité (profils CTD et mouillages) avec les résultats du modèle pour les différentes périodes de calibration sélectionnées. Pour les profils CTD, une comparaison graphique des profils de température et de salinité a été effectuée. Toutefois, la salinité près du fond est le principal paramètre qui a été utilisé pour évaluer quantitativement la performance du modèle. Après consultation de l'équipe projet d'Hydro-Québec, un critère de 3 PSU pour la salinité au fond a été considéré pour établir la position du front salin. Les séries temporelles de la température et de la salinité au fond pour les mouillages ESMA1129, ESMA1130, ESMA1131 (température seulement) et ESMA1150 ont pour leur part été employées pour évaluer la performance du modèle à bien reproduire les fluctuations de salinité au fond en fonction du temps et des cycles de marées.

Profils CTD

Les principaux profils CTD localisés le long du chenal principal en conditions de marée haute et de marée basse sont présentés à l'annexe B (campagne 1A, marées de mortes-eaux) et à l'annexe C (campagne 2, marées de vives-eaux). Ces figures montrent que l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite peut être fortement stratifié à la rencontre des masses d'eau salée et d'eau douce. Ce phénomène est davantage rencontré en conditions de marée de mortes-eaux. En conditions de marée de vives-eaux, l'estuaire peut être très stratifié par endroits et davantage mélangé ailleurs.

Sur les profils CTD des annexe B et C, il est possible de comparer graphiquement les profils de température et de salinité mesurés avec les profils modélisés à l'aide du modèle TELEMAC-3D

pour la même position et environ au même instant (à ± 10 minutes près). De manière générale, le modèle arrive à représenter relativement bien les variations de température et de salinité sur la colonne d'eau aux différents points de mesure à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite. À titre d'exemple, la figure 10 montre que le modèle arrive à reproduire raisonnablement bien la stratification de la salinité sur la colonne d'eau à l'étape de marée haute. Des différences plus notables peuvent tout de même être observées entre les mesures et les résultats de simulation pour certains profils spécifiques, notamment lorsque de forts gradients de salinité sont présents. En effet, des écarts maximums de l'ordre de 10-20 PSU sur la salinité et de l'ordre de 5°C sur la température sont observés sur certains profils, plus particulièrement lorsque que la colonne d'eau est fortement stratifiée et qu'une couche d'eau salée se maintient au fond à marée basse selon les mesures alors que la masse d'eau salée est repoussée en aval dans le modèle et davantage mélangée sur une partie plus importante de la colonne d'eau (exemple à la figure 11).

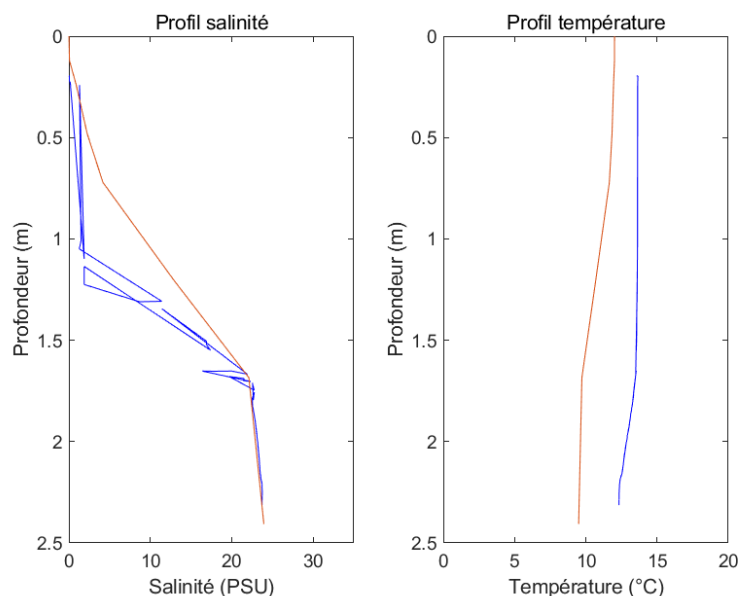


Figure 10 Comparaison des profils de salinité et de température à la station SM 02 à l'étape de marée haute durant une marée de mortes-eaux (mesures en bleu et résultats de modélisation en rouge).

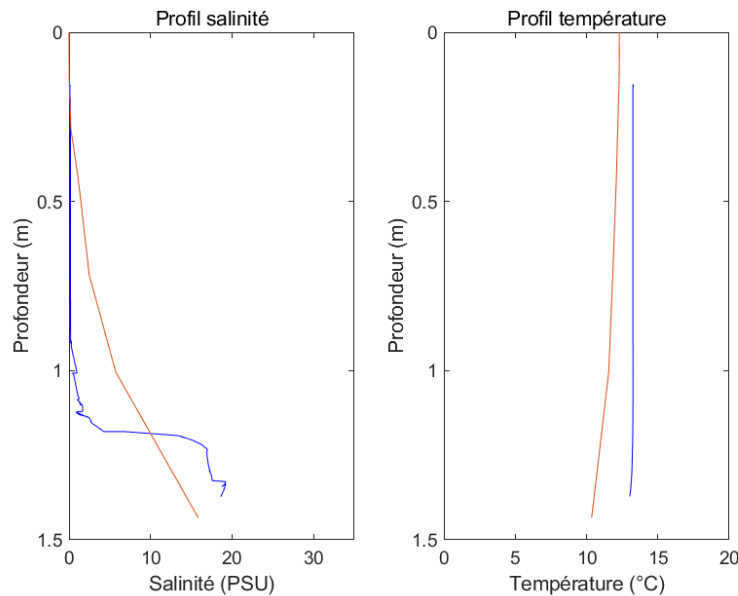


Figure 11 Comparaison des profils de salinité et de température à la station SM 02 à l'étalement de marée basse durant une marée de mortes-eaux (mesures en bleu et résultats de modélisation en rouge).

La performance du modèle a été évaluée plus quantitativement en évaluant la corrélation entre les salinités moyennées sur la colonne d'eau calculées à partir des profils CTD (annexes B et C) et à partir des résultats du modèle. La figure 12, la figure 13 et la figure 14 présentent les graphiques de corrélation pour les conditions de marée de mortes-eaux, de marée intermédiaire et de marée de vives-eaux respectivement. Sur ces figures, le coefficient de corrélation (R^2), le RMSE ainsi que le biais sont présentés en plus de la régression linéaire entre les données (trait rouge). Pour les trois périodes, la corrélation entre le modèle et les mesures est jugée satisfaisante (coefficient de corrélation supérieur à 0,8). Bien qu'il y ait une certaine dispersion des données autour de la régression linéaire, plus particulièrement en conditions de marée intermédiaire (figure 13) ou de marées de vives-eaux (figure 14) et pour des valeurs de salinité inférieures à 20 PSU, le RMSE et le biais demeurent raisonnables considérant la complexité du domaine et des phénomènes modélisés ainsi que les limites et incertitudes du modèle (section 5.3).

Une analyse de la corrélation entre les températures moyennes sur la colonne d'eau calculées à partir des profils CTD (annexes B et C) et à partir des résultats du modèle est aussi réalisée pour évaluer la performance du modèle. Tout comme pour l'analyse des salinités moyennes, la figure 15, la figure 16 et la figure 17 présentent les graphiques de corrélation pour les conditions de marée de mortes-eaux, de marée intermédiaire et de marée de vives-eaux respectivement. Pour les trois périodes, il est observé que la corrélation est moins forte que celle des salinités (entre 0,62 et 0,77). Cela est causé par une plus grande dispersion des points autour de la régression linéaire malgré une tendance claire. Tout comme pour la salinité, cela peut aussi être expliqué par la complexité du domaine et des phénomènes modélisés ainsi que les limites et incertitudes du

modèle (section 5.3). Comme mentionné à la section 0, il était anticipé que les profils de salinité et de température au large puissent ne pas représenter de manière précise les conditions rencontrées à la condition limite aval du modèle d'autant plus que les conditions météorologiques locales au moment des relevés peuvent affecter significativement les températures de l'eau en surface. Les valeurs de température calculées par le modèle peuvent donc différer des valeurs moyennes de température là où ont été mesurés les profils CTD. Toutefois, le RMSE et le biais demeurent satisfaisants à des valeurs de +/- 1.5-2.5°C sur une vaste gamme de température.

La performance du modèle a également été évaluée en comparant la variation de la position du front salin établie à partir du modèle TELEMAC-3D (critère de salinité de 3 PSU près du fond) avec les mesures terrain (profils CTD). Bien que les profils CTD ne permettent pas toujours de positionner précisément la limite du front salin à l'intérieur de l'estuaire à un instant donné avec un nombre limité de points de mesure dans une fenêtre de temps, ils peuvent néanmoins établir si la limite du front salin est localisée plus en amont ou plus en aval relativement au point de mesure.

La figure 18, la figure 19 et la figure 20 présentent la variation temporelle de la position modélisée du front salin à l'intérieur de l'estuaire (limite de salinité de 3 PSU au fond, trait rouge) pour les conditions de marée de mortes-eaux, de marée intermédiaire et de marée de vives-eaux respectivement. Les triangles noirs représentent les profils CTD mesurés sur le terrain (annexes B et C) en fonction de leur position (PK) et du temps. Ces triangles ne sont pas directement des positions de front salin relevés sur le site mais servent plutôt d'indicateurs permettant d'estimer de manière relative la position du front salin en fonction de leur orientation en fonction de salinité mesurée. Un triangle qui pointe vers le haut sur le graphique (Δ , en direction amont sur la rivière) indique que la position du front salin est située plus en amont par rapport à la position de la mesure. Inversement, un triangle qui pointe vers le bas sur le graphique (∇ , en direction aval sur la rivière) indique que la position du front salin est située plus en aval par rapport à la position de la mesure. Sur ces figures, il est possible de constater que la position du front salin peut varier à l'intérieur d'un domaine d'environ 5 à 6 km de longueur en fonction de la marée et que dans l'ensemble, le modèle arrive à bien positionner la limite du front salin comparativement aux mesures terrain. En effet, pour la plupart des points de référence, la position relative du front salin modélisée est cohérente avec les données mesurées.

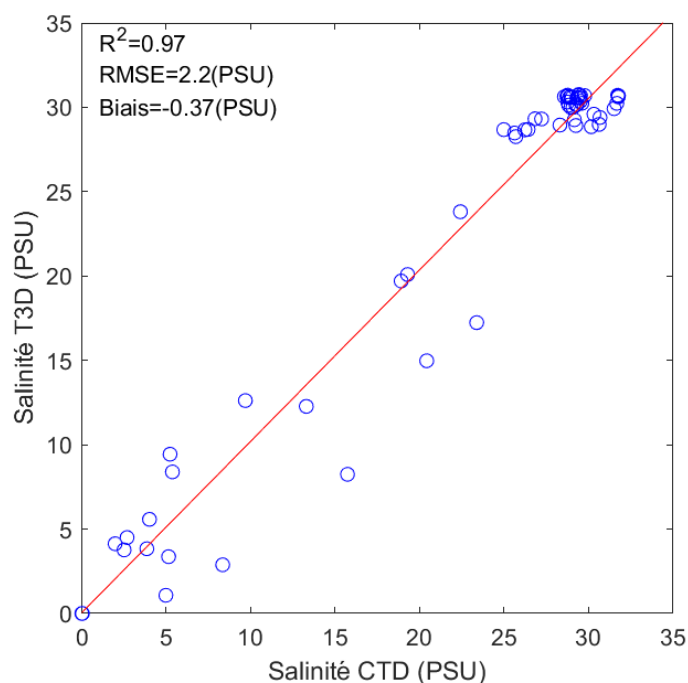


Figure 12 Corrélation entre la salinité moyenne mesurée (profils CTD) et modélisée (T3D) en conditions de marée de mortes-eaux (campagne 1A).

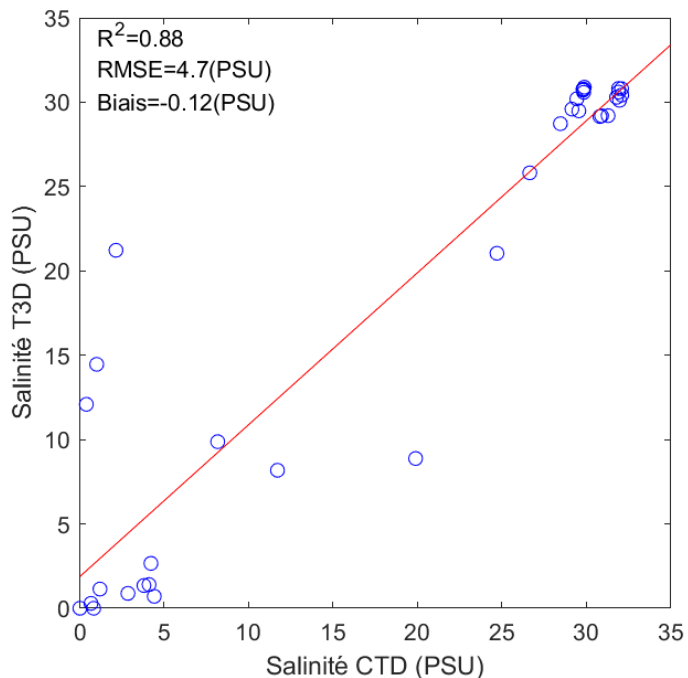


Figure 13 Corrélation entre la salinité moyenne mesurée (profils CTD) et modélisée (T3D) en conditions de marée intermédiaire (campagne 1B).

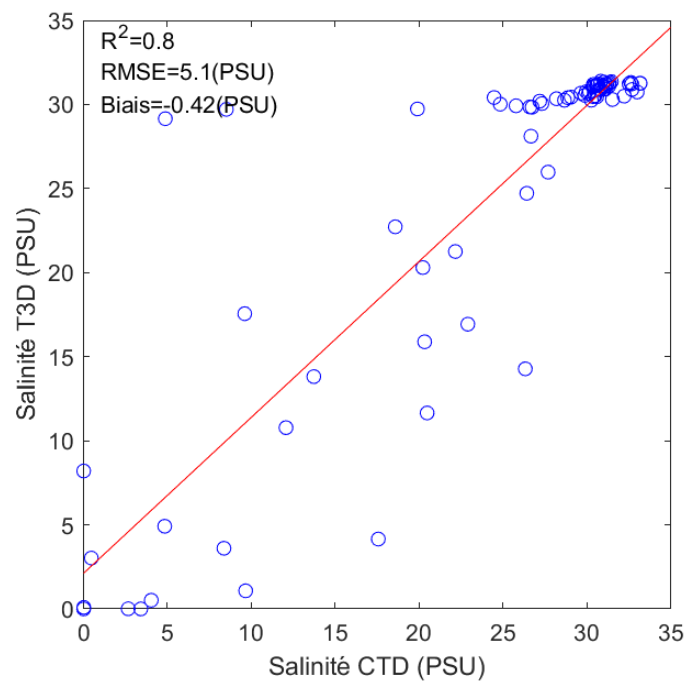


Figure 14 Corrélation entre la salinité moyenne mesurée (profils CTD) et modélisée (T3D) en conditions de marée de vives-eaux (campagne 2).

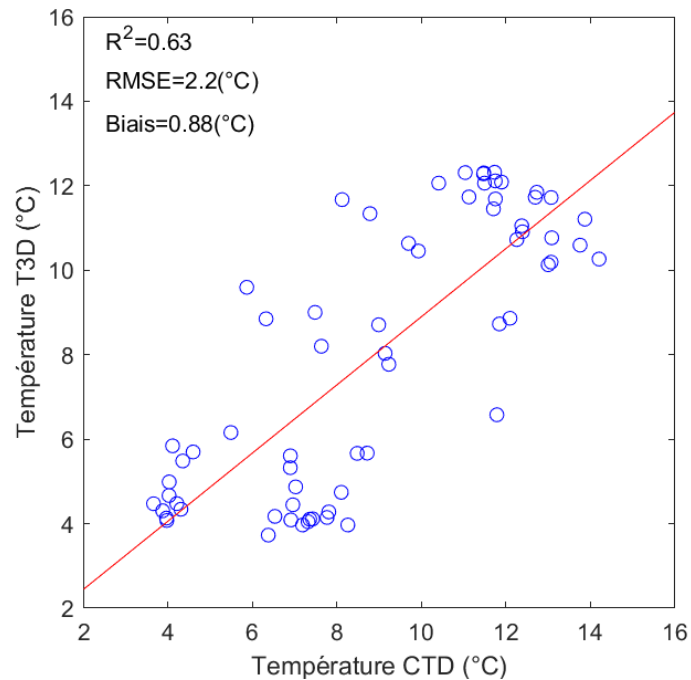


Figure 15 Corrélation entre la température moyenne mesurée (profils CTD) et modélisée (T3D) en conditions de marée de mortes-eaux (campagne 1A).

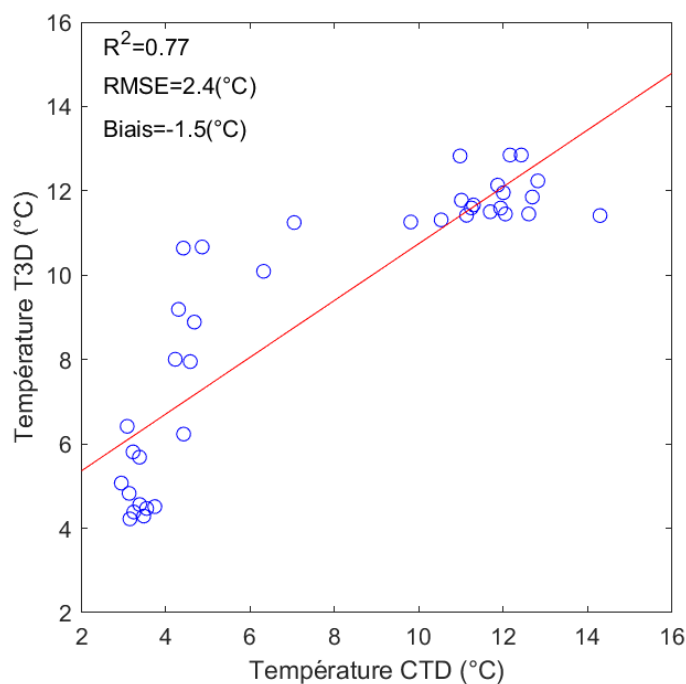


Figure 16 Corrélation entre la température moyenne mesurée (profils CTD) et modélisée (T3D) en conditions de marée intermédiaire (campagne 1B).

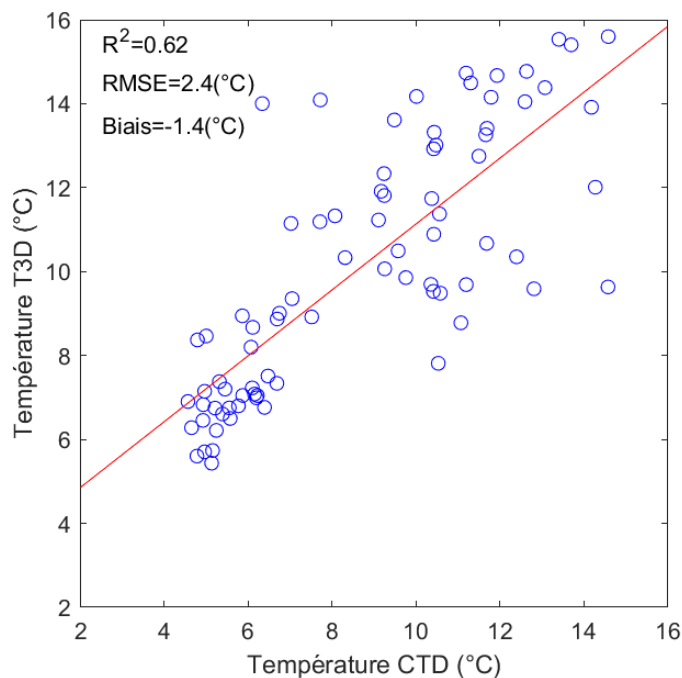


Figure 17 Corrélation entre la température moyenne mesurée (profils CTD) et modélisée (T3D) en conditions de marée de vives-eaux (campagne 2).

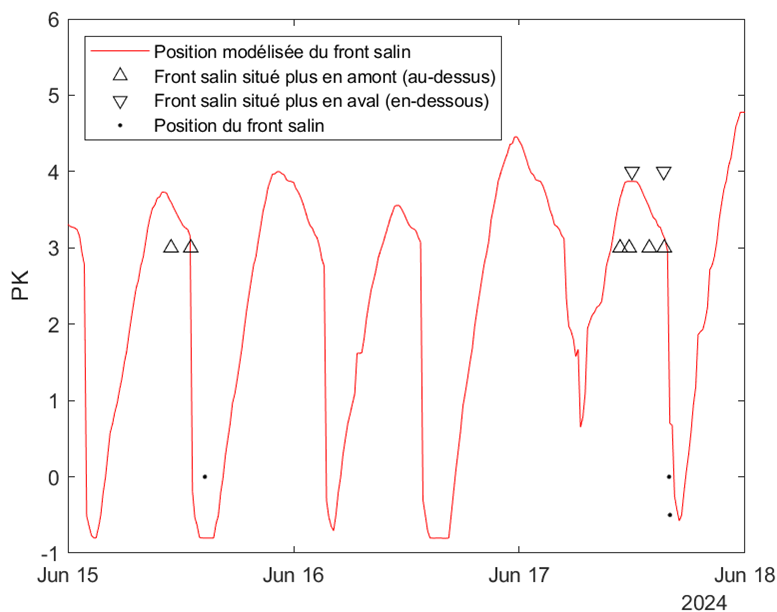


Figure 18 Comparaison de la position du front salin (limite de salinité de 3 PSU au fond) modélisée avec le modèle TELEMAC-3D et établie à partir des profils CTD en conditions de marée de mortes-eaux (campagne 1A).

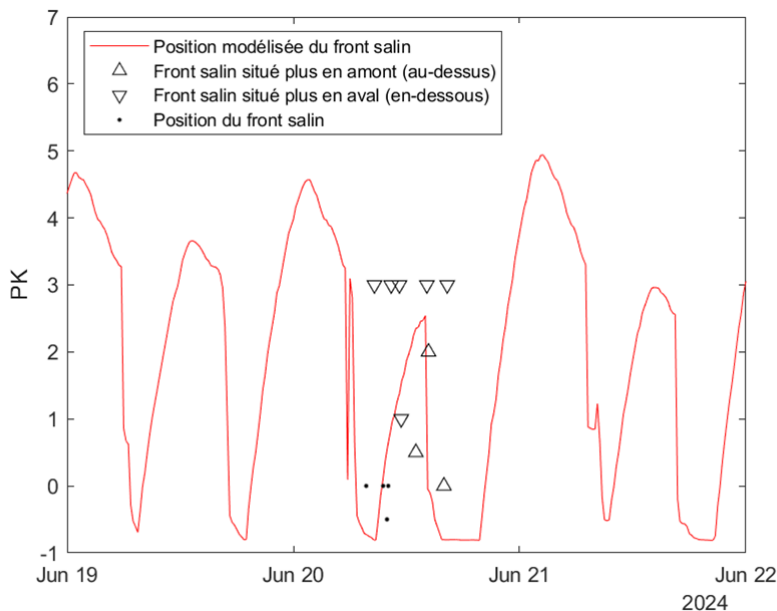


Figure 19 Comparaison de la position du front salin (limite de salinité de 3 PSU au fond) modélisée avec le modèle TELEMAC-3D et établie à partir des profils CTD en conditions de marée intermédiaire (campagne 1B).

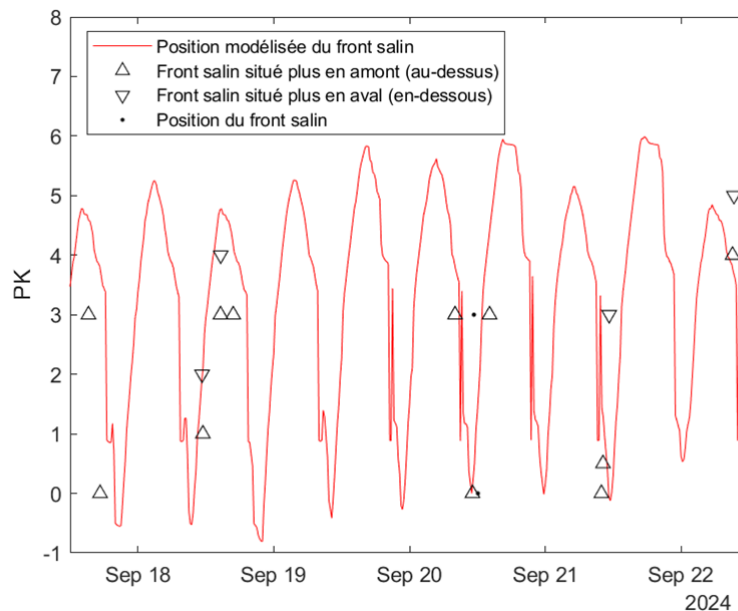


Figure 20 Comparaison de la position du front salin (limite de salinité de 3 PSU au fond) modélisée avec le modèle TELEMAC-3D et établie à partir des profils CTD en conditions de marée de vives-eaux (campagne 2).

Mouillages

La performance du modèle TELEMAC-3D a également été évaluée en comparant les résultats de simulation avec les séries temporelles de salinité et de température sur le fond mesurées aux mouillages ESMA1129, ESMA1130, ESMA1131 (température seulement) et ESMA1150. À noter que l'influence de l'eau salée aux mouillages ESMA1131 et ESMA1150 (les plus en amont) est nulle pour les périodes analysées.

La figure 21, la figure 22, la figure 23 et la figure 24 présentent cette comparaison pour des conditions de marée de mortes-eaux et de marée intermédiaire et ce, pour une large gamme de débits (50 à 269 m³/s). Pour la marée de mortes-eaux (15 au 18 juin 2024), les fluctuations de salinité et de température modélisées au mouillage ESMA1129 (figure 21) ne correspondent pas aux mesures. Le modèle prédit en effet des fluctuations de salinité sur le fond qui varient entre 0 PSU (marée basse) et des valeurs supérieures à 20 PSU (marée haute) alors que selon les données du mouillage, la salinité au fond fluctue plus faiblement sauf pour un cycle de marée spécifique sur la période de validation. Tandis que la température simulée par le modèle varie entre 7 °C (marée haute) et 14 °C (marée basse), les données du mouillage indiquent que la température au fond fluctue plus faiblement entre 12 °C (marée haute) et 14 °C (marée basse). Cependant, pour la marée intermédiaire (19 au 22 juin 2024), le modèle arrive à relativement bien représenter les fluctuations de salinité et de température au fond à l'exception des cycles de marées du 21 et 22 juin 2024 où les températures simulées ne fluctuent pas autant que celles mesurées. Des écarts importants sur les variations de salinité au fond sont également observés

entre les résultats du modèle et les mesures au mouillage ESMA1130 (figure 22) pour certains cycles de marée spécifiques pour lesquels le modèle prédit que l'eau salée atteint la position du mouillage ESMA1130 alors que la salinité demeure à 0 PSU sur les mesures (eau douce). Il est toutefois important de préciser que chaque cycle de marée n'engendre pas systématiquement une augmentation de la mesure de salinité au mouillage ESMA1130 en conditions de marée de mortes-eaux ou de marée intermédiaire. Pour le mouillage ESMA1130, cependant, les températures simulées au fond suivent de manière satisfaisante les valeurs mesurées sauf pour le cycle de marée du 21 juin 2024 où les fluctuations de température simulées sont sous-estimées. À noter que la performance du modèle semble être indépendante du débit de la rivière.

En conditions de marée de vives-eaux avec des débits variant entre 98 et 178 m³/s, les fluctuations de salinité au fond aux mouillages ESMA1129 (figure 25), ESMA1130 (figure 26), ESMA1131 (figure 27) et ESMA1150 (figure 28) sont raisonnablement bien reproduites par le modèle. Le modèle et les mesures montrent qu'à chaque cycle de marée, la salinité au fond aux mouillages ESMA1129 et ESMA1130 varie entre 0 PSU à marée basse et des valeurs supérieures à 20 PSU à marée haute sauf pour deux cycles de marée spécifiques pour lesquels la salinité au fond demeure nulle à marée haute au mouillage ESMA1130 selon les mesures alors que le modèle prédit une augmentation significative de la salinité au fond. Pour les températures au fond au mouillage ESMA1129, les fluctuations de températures sont aussi raisonnablement bien reproduites avant le 20 septembre 2024. Après cette date, les valeurs de température simulées à marée haute sont systématiquement plus élevées que celles mesurées. Au mouillage ESMA1130, les fluctuations de températures sont raisonnablement bien reproduites sauf pour les deux cycles de marée haute déjà identifiés en analysant la salinité.

La comparaison des séries temporelles de température et de salinité avec celles du débit d'eau douce en aval de SM-1 montre que la performance du modèle à reproduire l'intrusion saline au fond à l'intérieur de l'estuaire semble être indépendante de l'ordre de grandeur du débit de la rivière. En effet, le modèle peut bien reproduire ou moins bien reproduire les fluctuations de température et de salinité aux mouillages ESMA1129 et ESMA1130 autant à débit faible, à débit moyen et à débit élevé.

L'analyse des différences entre les résultats du modèle et les données des mouillages (particulièrement ESMA1129 et ESMA1130), a donc révélé que le modèle semble être moins performant pour reproduire la salinité et la température sur le fond pour des conditions de marée de mortes-eaux, plus spécifiquement à marée basse. À noter que quatre autres périodes de marée de mortes-eaux réparties entre juillet et septembre 2024 ont également été simulées et ont mené au même constat, plus particulièrement pour le mouillage ESMA1129 (annexe D) situé au PK 2,5. L'analyse des profils CTD à marée basse disponibles à la station SM02 située environ 200 m en aval du mouillage ESMA1129 (figure 29) a révélé qu'en marée de mortes-eaux, une mince couche d'eau salée (environ 20 cm d'épaisseur) se maintient au fond et que le reste de la colonne d'eau est essentiellement de l'eau douce (figure 29), courbe bleue). Un fort gradient de salinité est donc présent près du fond et peut difficilement être reproduit par le modèle hydrodynamique 3D

compte tenu de la résolution verticale et de la distribution verticale des couches du maillage utilisé. Toutefois, pour les conditions de marée de vives-eaux, la salinité est uniforme sur l'ensemble de la colonne d'eau (figure 29, courbe rouge). L'absence de stratification en conditions de marées de vives-eaux s'explique probablement par le fait que ces marées de plus grandes amplitudes génèrent un prisme de marée plus important et conséquemment des vitesses de courant plus élevées dans l'estuaire au flot et au jusant. Ces conditions hydrodynamiques sont plus favorables au mélange des masses d'eau sur l'ensemble de la colonne d'eau à cause notamment de la plus forte turbulence. En marée de mortes-eaux, les vitesses d'écoulement plus faibles génèrent moins de turbulence et favoriseraient ainsi la forte stratification de la colonne d'eau en maintenant une mince couche d'eau salée au fond à marée basse. Le débit d'eau douce de la rivière s'écoulerait alors au-dessus de la couche d'eau salée sans se mélanger complètement. Ce phénomène est possiblement accentué au mouillage ESMA1129 situé au PK 2,5 puisque l'instrument a été installé à l'intérieur d'une fosse bathymétrique (figure 30) ce qui est susceptible de favoriser le maintien d'une couche d'eau plus dense au fond lorsque les vitesses de courant sont trop faibles pour permettre le mélange complet de la colonne d'eau. Pour le mouillage ESMA1130 situé plus en amont au PK 4, mais dans un secteur moins profond, la capacité du modèle à bien reproduire les variations de salinité au fond pour des marées de mortes-eaux est généralement meilleure (annexe D).

Il n'est pas surprenant que le modèle TELEMAC-3D n'arrive pas à représenter adéquatement la salinité près du fond à marée basse au mouillage ESMA1129 en conditions de marée de mortes-eaux. Le fort gradient de salinité près du fond et la position du mouillage à l'intérieur d'une dépression bathymétrique rendent cette condition spécifique plus difficile à modéliser. En effet, le modèle hydrodynamique 3D par couches tend généralement à atténuer les forts gradients de température et de salinité sur la colonne d'eau à cause notamment de la diffusion numérique. Certains modèles de turbulence verticale comme les modèles de type *Mixing Length* peuvent dans certains cas favoriser une meilleure stabilité de la stratification de la colonne d'eau, mais les essais de sensibilité ont révélé qu'ils étaient dans l'ensemble moins performants que le modèle de turbulence à viscosité constante (configuration retenue) pour bien reproduire les fluctuations dans l'espace et dans le temps de la salinité à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite. Les modèles de type *Mixing Length* avaient tendance à engendrer un important déphasage temporel de la progression et du retrait du front salin à l'intérieur de l'estuaire, ce qui est un paramètre plus important à reproduire que la salinité sur le fond dans les dépressions. Dans ce contexte, la configuration retenue pour le modèle TELEMAC-3D est considérée satisfaisante pour rencontrer les objectifs de l'étude malgré ses limites (section 6.2.3).

Il est à souligner que certains écarts entre les températures de l'eau simulées sur le fond et mesurées par les mouillages, particulièrement au mouillage ESMA1129 situé plus en aval, s'expliquent par les écarts de la salinité discutés ci-dessus. Toutefois, d'autres écarts occasionnels pourraient plutôt s'expliquer par des conditions météorologiques locales et ponctuelles qui pourraient affecter la partie supérieure des profils de températures à la condition limite aval.

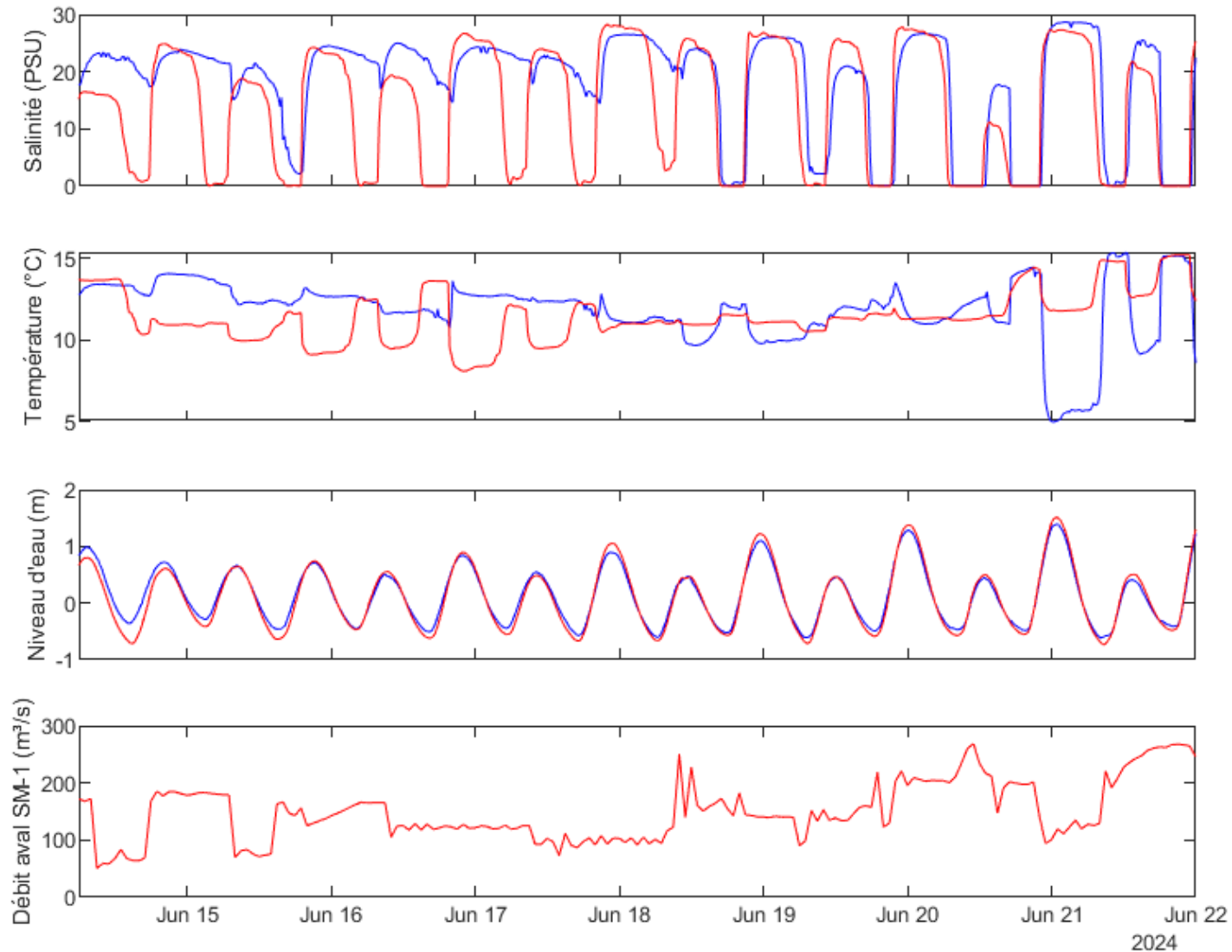


Figure 21 Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1129, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (15-18 juin 2024) et de marée intermédiaire (19-22 juin 2024).

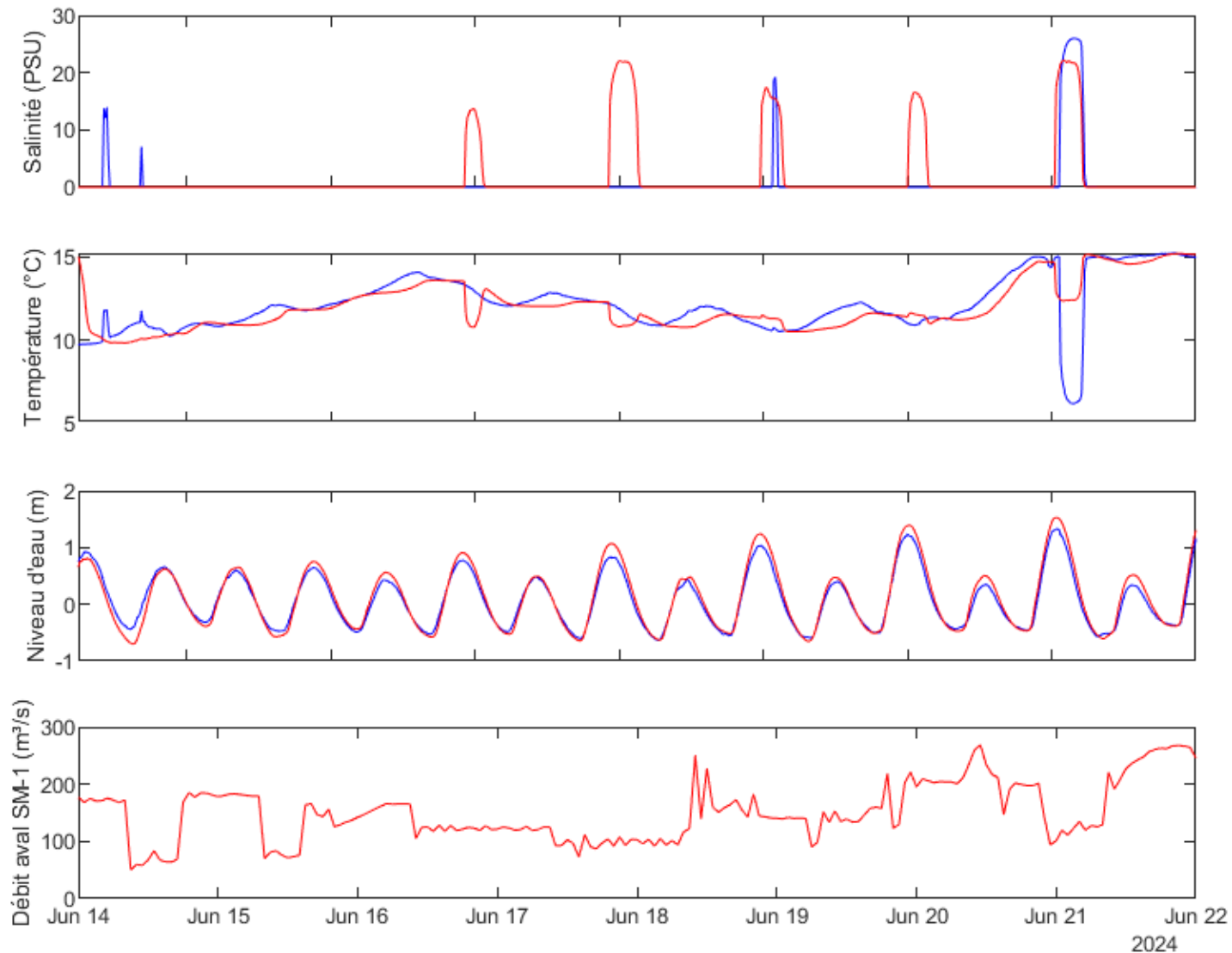


Figure 22 Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1130, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (15-18 juin 2024) et de marée intermédiaire (19-22 juin 2024).

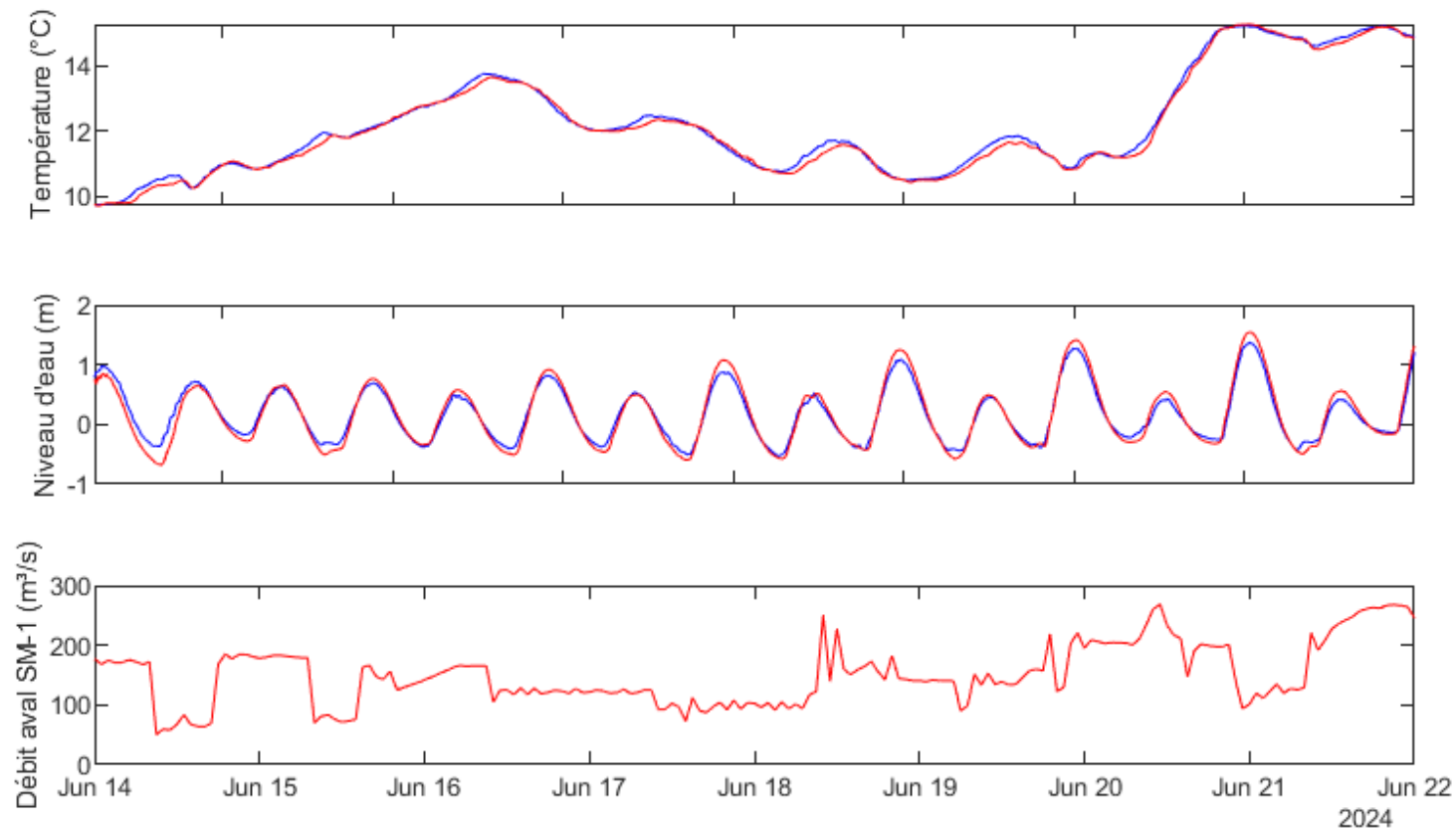


Figure 23 Séries temporelles de la température au fond et des niveaux d'eau modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1131, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (15-18 juin 2024) et de marée intermédiaire (19-22 juin 2024).

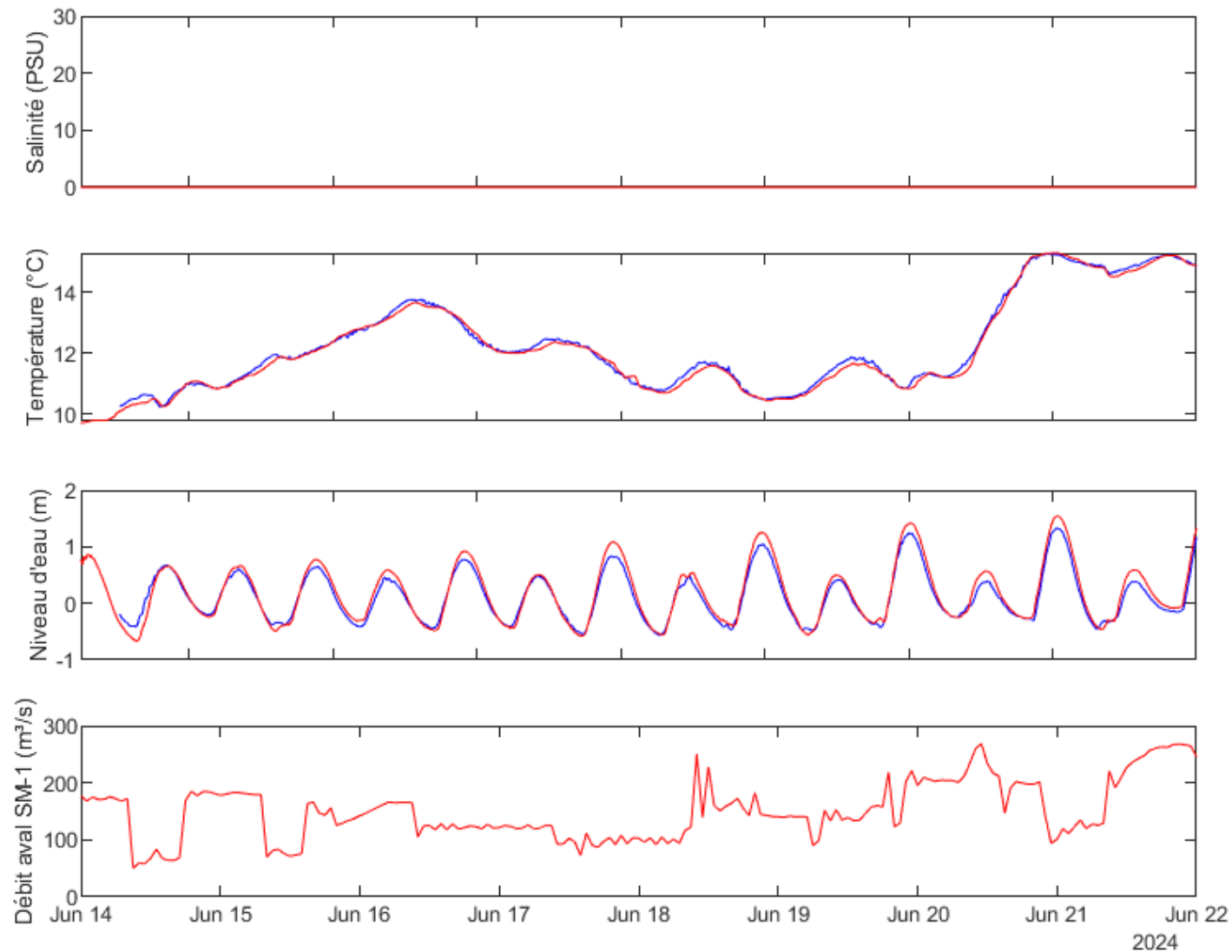


Figure 24 Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1150, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (15-18 juin 2024) et de marée intermédiaire (19-22 juin 2024).

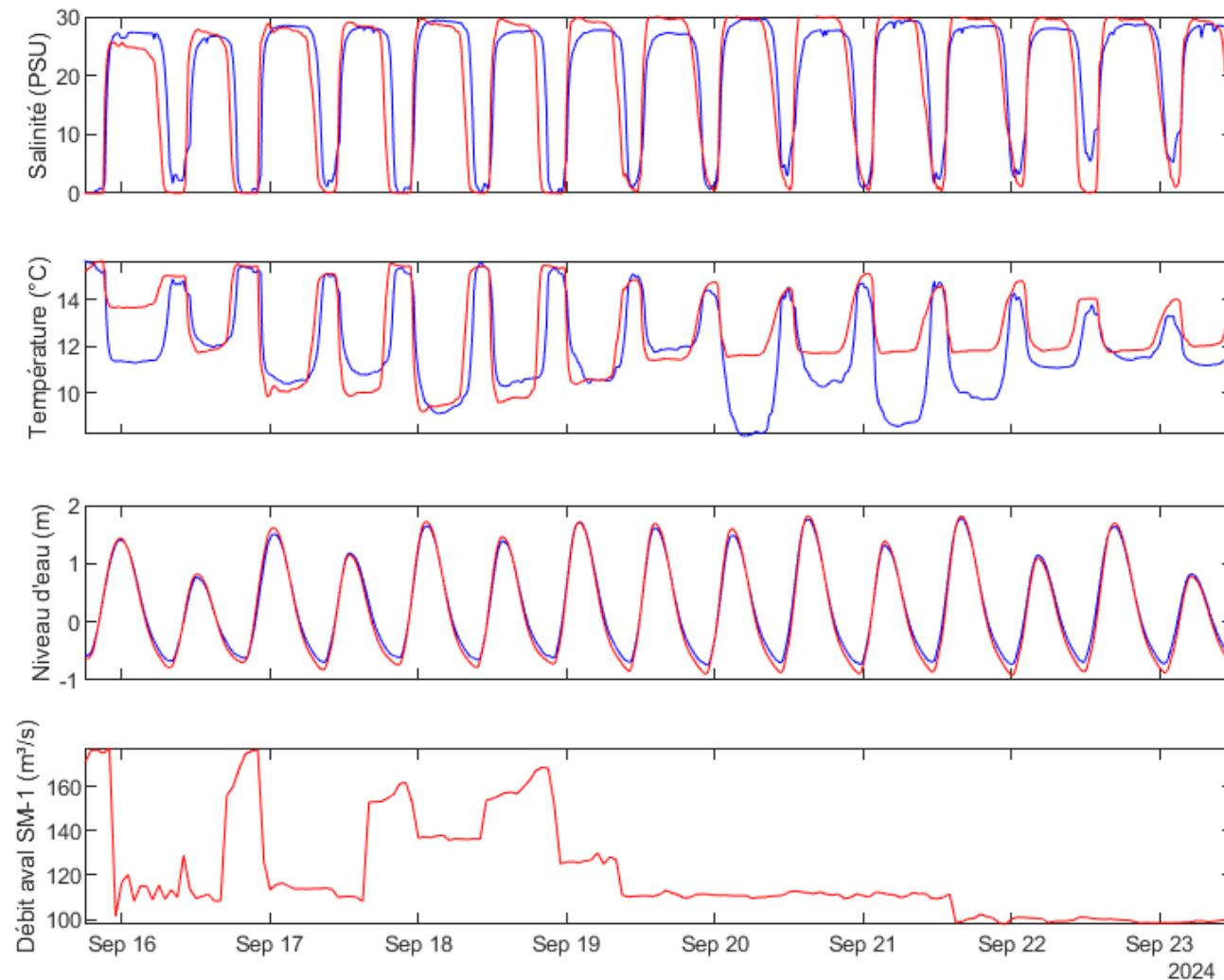


Figure 25 Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1129, bleu) en conditions de marée de vives-eaux (16-22 septembre 2024).

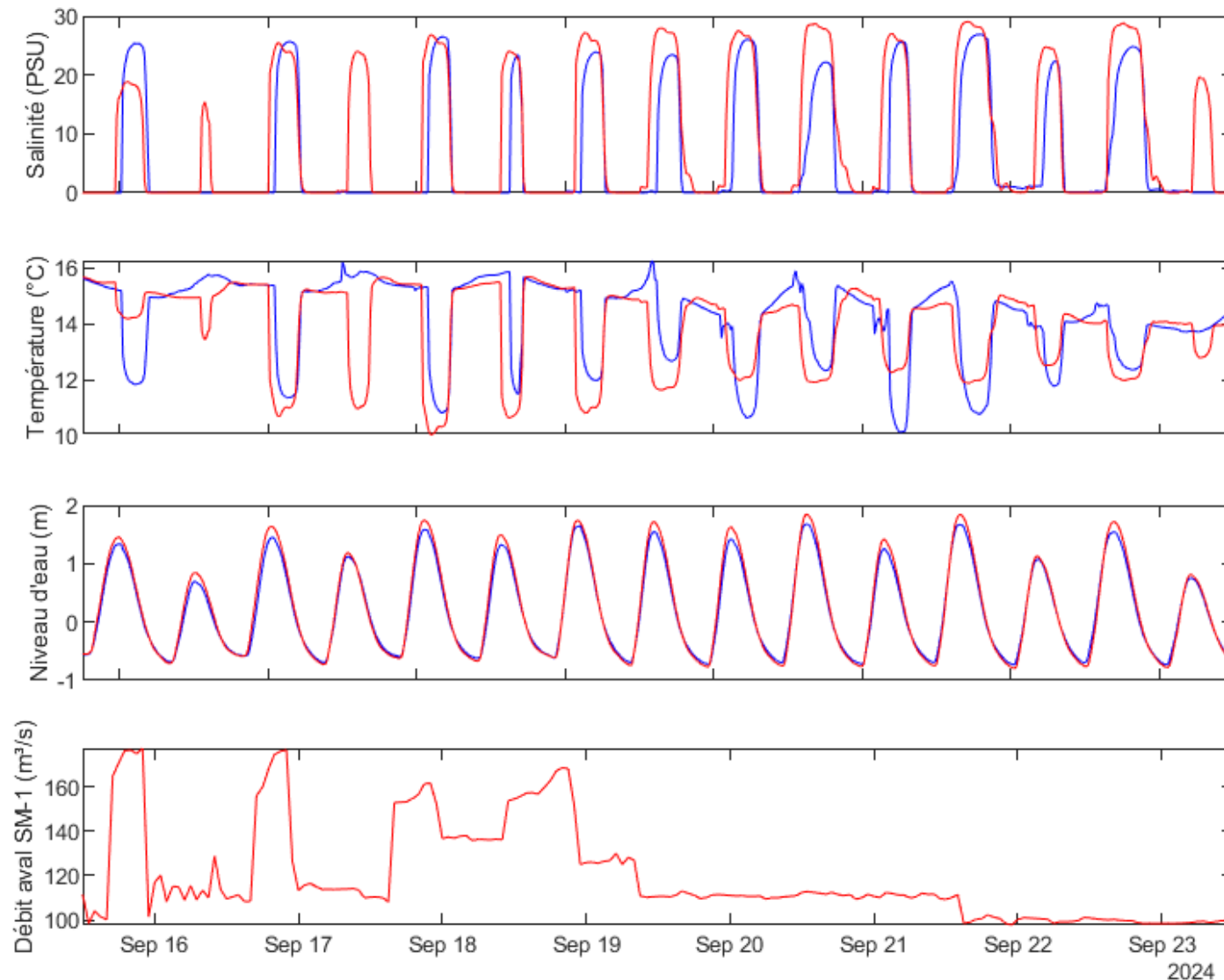


Figure 26 Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1130, bleu) en conditions de marée de vives-eaux (16-22 septembre 2024).

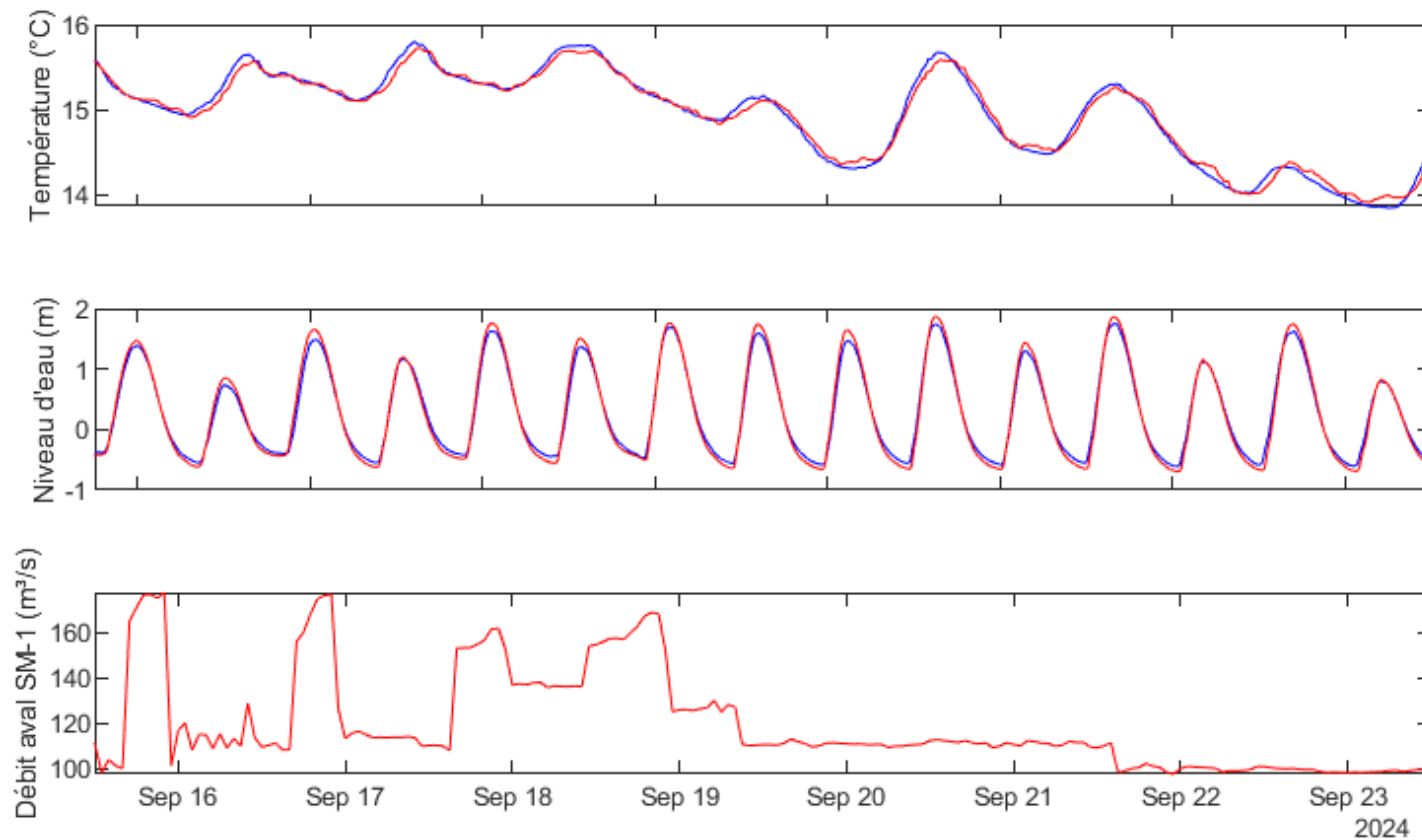


Figure 27 Séries temporelles de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1131, bleu) en conditions de marée de vives-eaux (16-22 septembre 2024).

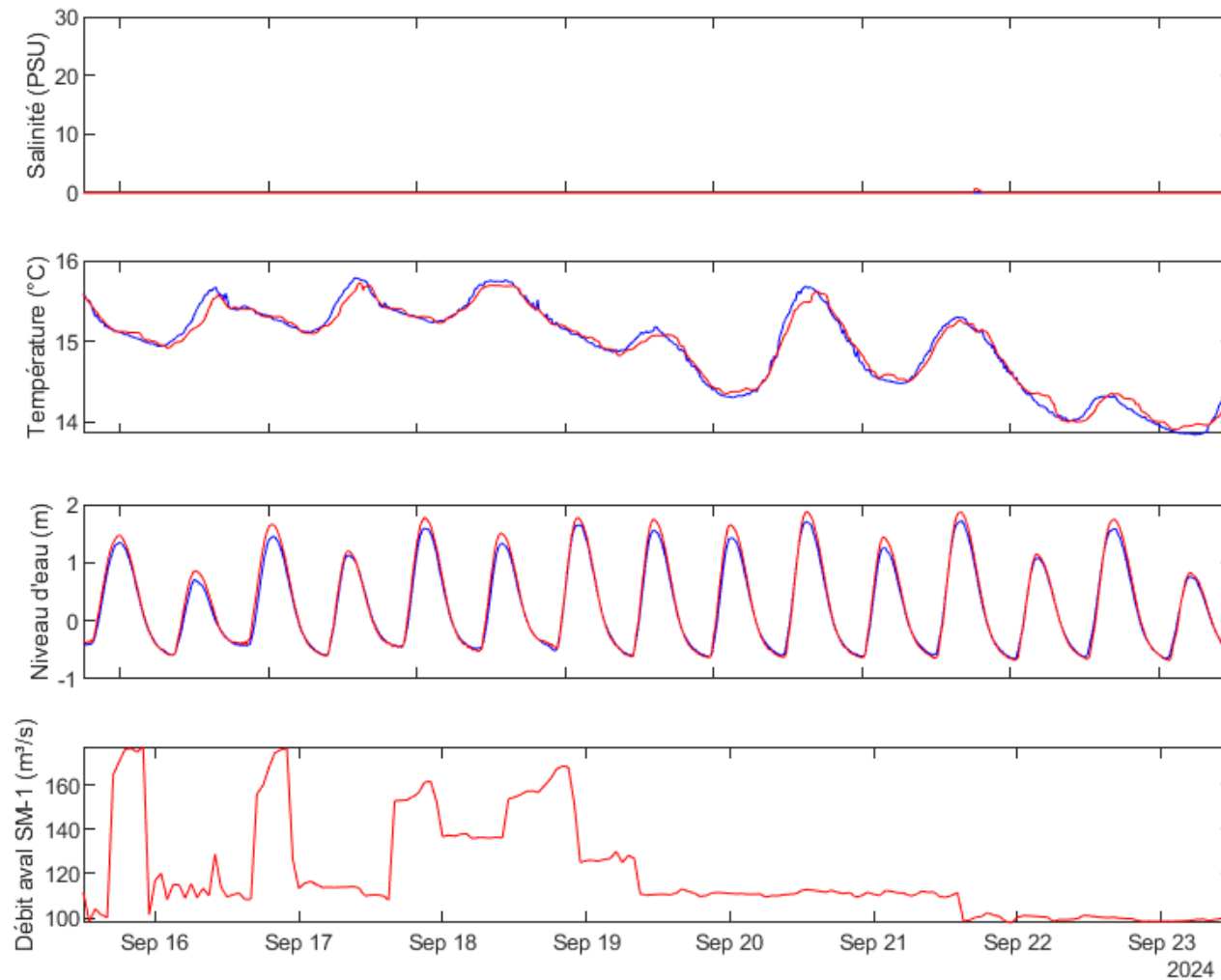


Figure 28 Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1150, bleu) en conditions de marée de vives-eaux (16-22 septembre 2024).

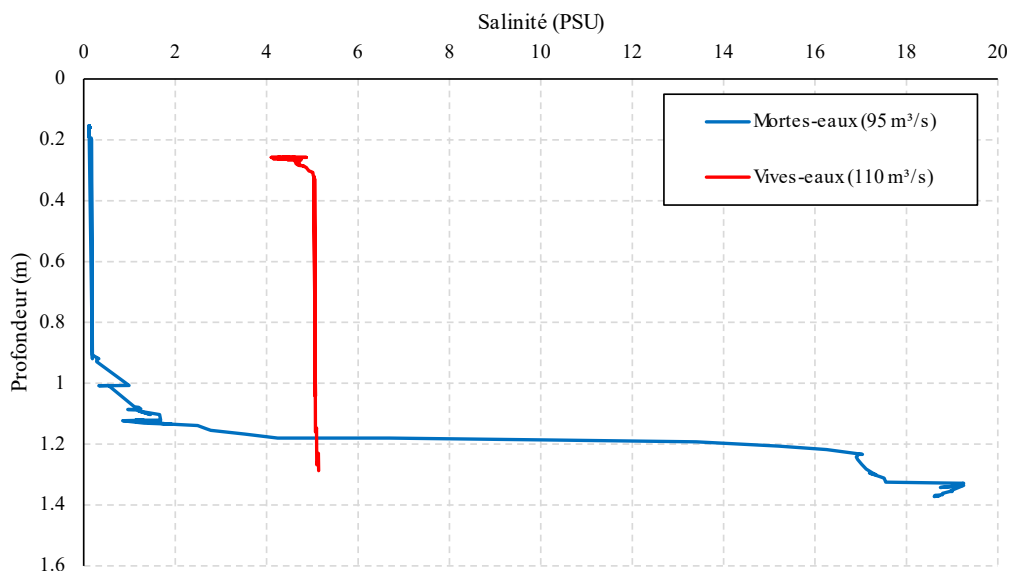


Figure 29 Profils de salinité à marée basse mesurés à la station SM02 en conditions de marée de mortes-eaux (2024-06-17, débit de 101 m³/s) et de marée de vives-eaux (2024-09-20, débit de 111 m³/s).

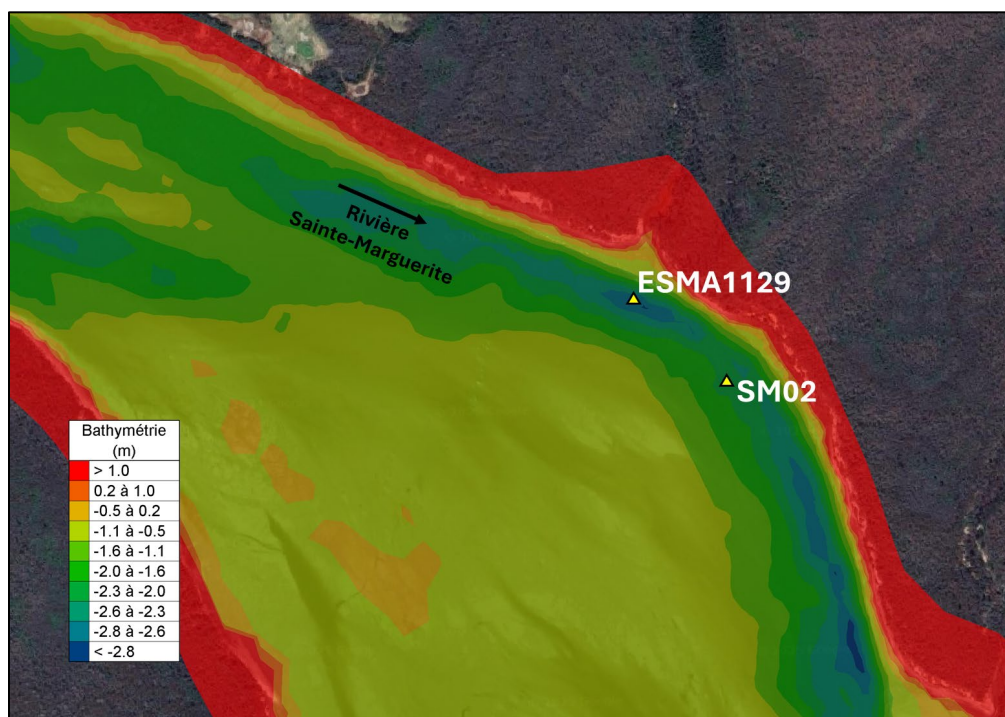


Figure 30 Bathymétrie de la rivière Sainte-Marguerite dans le secteur du mouillage ESMA1129.

5.3 Limites et incertitudes du modèle

La performance générale du modèle pour simuler réalistement la dynamique des masses d'eau à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite est considérée satisfaisante pour rencontrer les objectifs principaux de l'étude. Néanmoins, il est important d'exposer certaines des limites du modèle reliées notamment à la disponibilité limitée de certaines données et à certaines hypothèses de modélisation.

Le choix des conditions limites du modèle à la frontière aval (golfe du Saint-Laurent) a impliqué certaines hypothèses simplificatrices pour s'adapter aux données disponibles et pour obtenir une approche de modélisation robuste et facilement adaptable pour la simulation des différents scénarios. **Le forçage de marée** (base de données TPXO) intègre seulement la composante astronomique (marée prédite) et néglige par le fait même la composante météorologique (effet de la pression atmosphérique et du vent) sur les fluctuations de niveaux d'eau. Cette simplification peut potentiellement expliquer en partie certains des écarts observés entre les mesures et les résultats de modélisation sur les niveaux d'eau et la salinité. **Les profils de température et de salinité imposés comme conditions limites** proviennent de données mesurées, mais pour des périodes différentes des périodes des simulations et à des sites situés plus près de la rive sud du golfe du Saint-Laurent que du site à l'étude. Ainsi, les conditions limites de température et de salinité imposées au modèle sont certainement différentes des conditions réelles, plus particulièrement pour la température près de la surface qui est plus sensible aux conditions atmosphériques récentes. Cela introduit nécessairement de l'incertitude sur les températures et la salinité modélisée à l'intérieur de l'estuaire et peut probablement expliquer certains des écarts observés entre les mesures et les résultats du modèle.

Le modèle néglige complètement **l'effet du vent et des vagues** sur l'hydrodynamique et le mélange des masses d'eau puisqu'il ne s'agit pas des phénomènes physiques primaires qui gouvernent la dynamique estuarienne pour le site à l'étude. Néanmoins, le vent et les vagues ont tout de même le potentiel d'influencer les patrons de courant et d'avoir un impact sur le mélange des masses d'eau (particulièrement près de la surface). Le fait de négliger le vent et les vagues permet de significativement simplifier le modèle hydrodynamique, mais peut mener dans certains cas à des divergences entre le modèle et les mesures in situ.

Finalement, la géométrie du modèle établie à partir des données bathymétriques et LiDAR disponibles peut également être une source d'incertitude pour le modèle hydrodynamique. En effet, la **nature très dynamique de la morphologie de l'estuaire** de la rivière Sainte-Marguerite (migration des chenaux principaux et secondaires, évolution morphologique de la flèche sableuse à l'embouchure, etc.) fait en sorte qu'il est possible que la morphologie de l'estuaire ait évolué entre les différentes périodes des relevés bathymétriques, la période des campagnes de mesures océanographiques et les conditions actuelles. En effet, des changements importants de la géométrie de l'estuaire, plus particulièrement à l'embouchure avec la présence de la flèche sableuse, pourraient possiblement avoir un impact sur les conditions hydrodynamiques en général.

6 CARACTÉRISATION DE L'INTRUSION SALINE

6.1 Scénarios de modélisation

Hydro-Québec a fourni une liste de scénarios de modélisation en conditions de référence et en conditions projetées pour la caractérisation du front salin dans l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite. Les scénarios en conditions projetées prennent en considération l'ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale SM-3 avec les conséquences anticipées sur la gestion des débits en aval de la centrale SM-1. Les scénarios de modélisation précisent une période de l'année, le débit de la rivière en aval de la centrale SM-1 ainsi que le marnage de la marée (mortes-eaux ou vives-eaux) à considérer. Toutefois, les conditions de température et de salinité associées à chacun des scénarios n'ont pas été définies par Hydro-Québec. Dans ce contexte, des hypothèses réalistes appuyées sur des données historiques ont été effectuées pour établir les conditions de température et de salinité à imposer aux frontières pour chacune des simulations.

À la frontière amont du modèle, une salinité de 0 PSU est imposée au débit d'eau douce pour l'ensemble des scénarios. La température de l'eau est pour sa part établie à partir des moyennes mensuelles historiques des températures de l'eau à la station de mesure RSM0622 d'Hydro-Québec sur la période 2003-2012 (Tableau 6). Cette station de mesure est localisée directement en amont de la centrale SM-02. Cette température est considérée proche de celle à la sortie de SM-1 car le tronçon entre SM-2 et SM-1 est très court et la retenue est de faible contenance.

À la frontière au large du modèle située à l'intérieur du golfe du Saint-Laurent, les profils de température et de salinité à imposer au modèle ont été définis à partir des données disponibles dans les rapports annuels de caractérisation des conditions océanographiques physiques dans le golfe du Saint-Laurent publiés par Pêches et Océans Canada pour la période 2018-2024 (Galbraith et al., 2019-2025). Ces rapports annuels présentent une compilation par région du golfe et par mois d'un ensemble de profils de température et de salinité mesurés durant une année. Ces données ont permis d'établir des profils typiques de température et de salinité pour le secteur nord-ouest du golfe où le site à l'étude est situé, et ce, pour les différentes périodes de l'année spécifiées dans les scénarios à l'étude (figure 31).

Le tableau 7 présente la liste des scénarios de modélisation pour la caractérisation du front salin à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite en conditions de référence et en conditions projetées pour un ensemble de combinaisons de conditions de débit, de marée, de température et de salinité. À noter que les scénarios de débit fixe module pour la période octobre-novembre pour les conditions de référence sont similaires en conditions projetées. En effet, le débit de 93,3 m³/s en conditions de référence a été arrondi à 93 m³/s pour combiner ces simulations avec celles en conditions projetées.

À noter que pour chaque scénario, les conditions hydrodynamiques 3D ont été simulées sur une période de 72 heures. Les premières 24 heures servent d'initialisation des conditions ambiantes de température et de salinité alors que les dernières 48 heures sont considérées pour les analyses des résultats.

Tableau 6 Moyennes mensuelles historiques des températures de l'eau de la rivière Sainte-Marguerite à la station de mesure RSM0622 sur la période 2003-2012.

Mois	Température moyenne historique (°C)	Mois	Température moyenne historique (°C)
Janvier	0,7	Juillet	15,0
Février	0,7	Août	16,8
Mars	0,8	Septembre	15,0
Avril	1,3	Octobre	10,4
Mai	5,1	Novembre	4,90
Juin	11,6	Décembre	1,58

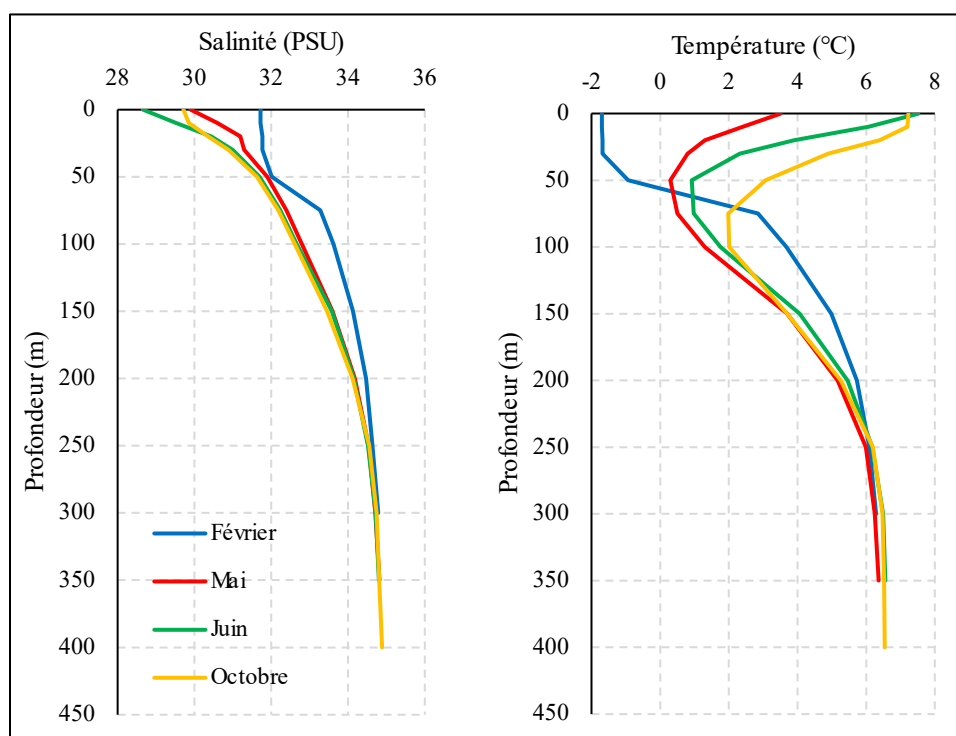


Figure 31 Profils de température et de salinité imposés à la frontière au large du modèle selon la période de l'année associée à chaque scénario de modélisation.

Tableau 7 Scénarios de modélisation pour la caractérisation du front salin en conditions de référence et en conditions projetées.

Débit caractéristique	Période	Débit de la rivière en aval de SM-1	Marnage de la marée	Conditions limites amont de température et de salinité de l'eau	Conditions limites au large de température et de salinité de l'eau
Conditions de référence					
Débit fixe maximum	Janvier-Février	325 m ³ /s	Mortes-eaux	0,7°C 0 PSU	Profils CTD de février
Débit fixe maximum	Janvier-Février	325 m ³ /s	Vives-eaux	0,7°C 0 PSU	Profils CTD de février
Débit fixe module	Mai	160,5 m ³ /s	Mortes-eaux	5,1°C 0 PSU	Profils CTD de mai
Débit fixe module	Mai	160,5 m ³ /s	Vives-eaux	5,1°C 0 PSU	Profils CTD de mai
Débit fixe module	Juin	148,3 m ³ /s	Mortes-eaux	11,6°C 0 PSU	Profils CTD de juin
Débit fixe module	Juin	148,3 m ³ /s	Vives-eaux	11,6°C 0 PSU	Profils CTD de juin
Débit fixe module	Octobre - Novembre	93,3 m ³ /s*	Mortes-eaux	7,7°C 0 PSU	Profils CTD d'octobre
Débit fixe module	Octobre - Novembre	93,3 m ³ /s*	Vives-eaux	7,7°C 0 PSU	Profils CTD d'octobre
Conditions projetées					
Débit fixe maximum	Janvier-Février	525 m ³ /s	Mortes-eaux	0,7°C 0 PSU	Profils CTD de février
Débit fixe maximum	Janvier-Février	525 m ³ /s**	Vives-eaux	0,7°C 0 PSU	Profils CTD de février
Débit fixe module	Mai	174,7 m ³ /s	Mortes-eaux	5,1°C 0 PSU	Profils CTD de mai
Débit fixe module	Mai	174,7 m ³ /s	Vives-eaux	5,1°C 0 PSU	Profils CTD de mai
Débit fixe module	Juin	104 m ³ /s	Mortes-eaux	11,6°C 0 PSU	Profils CTD de juin
Débit fixe module	Juin	104 m ³ /s	Vives-eaux	11,6°C 0 PSU	Profils CTD de juin
Débit fixe module	Octobre - Novembre	93 m ³ /s	Mortes-eaux	7,7°C 0 PSU	Profils CTD d'octobre
Débit fixe module	Octobre - Novembre	93 m ³ /s	Vives-eaux	7,7°C 0 PSU	Profils CTD d'octobre

* Le débit de 93,3 m³/s en conditions de référence a été arrondi à 93 m³/s lors des simulation pour le rendre similaire au débit en conditions projetés pour les scénarios de débit fixe module pour la période octobre-novembre.

** Le débit de 525 m³/s en conditions projetées est supérieur au débit d'équipement annoncé (500 m³/s) afin de prendre en considération l'incertitude sur le débit turbiné (hypothèse conservatrice).

6.2 Résultats de modélisation

Le post-traitement des sorties du modèle TELEMAC-3D pour chaque scénario de modélisation a permis de structurer et de représenter les résultats de manière à faciliter leur interprétation afin d'évaluer l'impact du suréquipement de la centrale SM-3 sur la dynamique des masses d'eau à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite. Des cartes de localisation du front salin (section 6.2.1) et des graphiques de profils verticaux de température et de salinité (section 6.2.2) ont été produits. En complément, des graphiques de séries temporelles de température, de salinité et de niveaux d'eau ont également été préparés pour apprécier les fluctuations de ces variables en fonction de la marée (annexe E).

6.2.1 Cartes des gammes de positions du front salin

Des cartes présentant les zones à l'intérieur desquelles la position du front salin fluctue dans le temps en fonction des cycles de marée ont été préparées pour chacune des périodes analysées (figure 32 à figure 35). Il y a des cartes spécifiques selon le type de marnage de marée (vives-eaux ou mortes-eaux). Ces cartes ont été produites en évaluant, à chaque pas de temps de sortie du modèle, la limite où la salinité au fond atteint 3 PSU et en présentant, sur les figures, des polygones représentant l'enveloppe résultante des positions du front salin. Cela permet d'évaluer visuellement l'impact du suréquipement de la centrale SM-3 (conditions projetées représentées par les polygones hachurés en jaune) sur la gamme de positions du front salin comparativement aux conditions de référence (polygones rouges). La position des stations de mesures des profils CTD à l'intérieur de l'estuaire ont été ajoutées aux cartes comme repères visuels pour simplifier l'interprétation des résultats. La numérotation de ces stations est établie en fonction des points kilométriques de la rivière Sainte-Marguerite avec comme référence la station SM 0 à son embouchure dans le golfe du Saint-Laurent (chaînage positif vers l'amont (stations SM 01 à SM 06) et chaînage négatif vers le golfe (stations SM -01 à SM -03)).

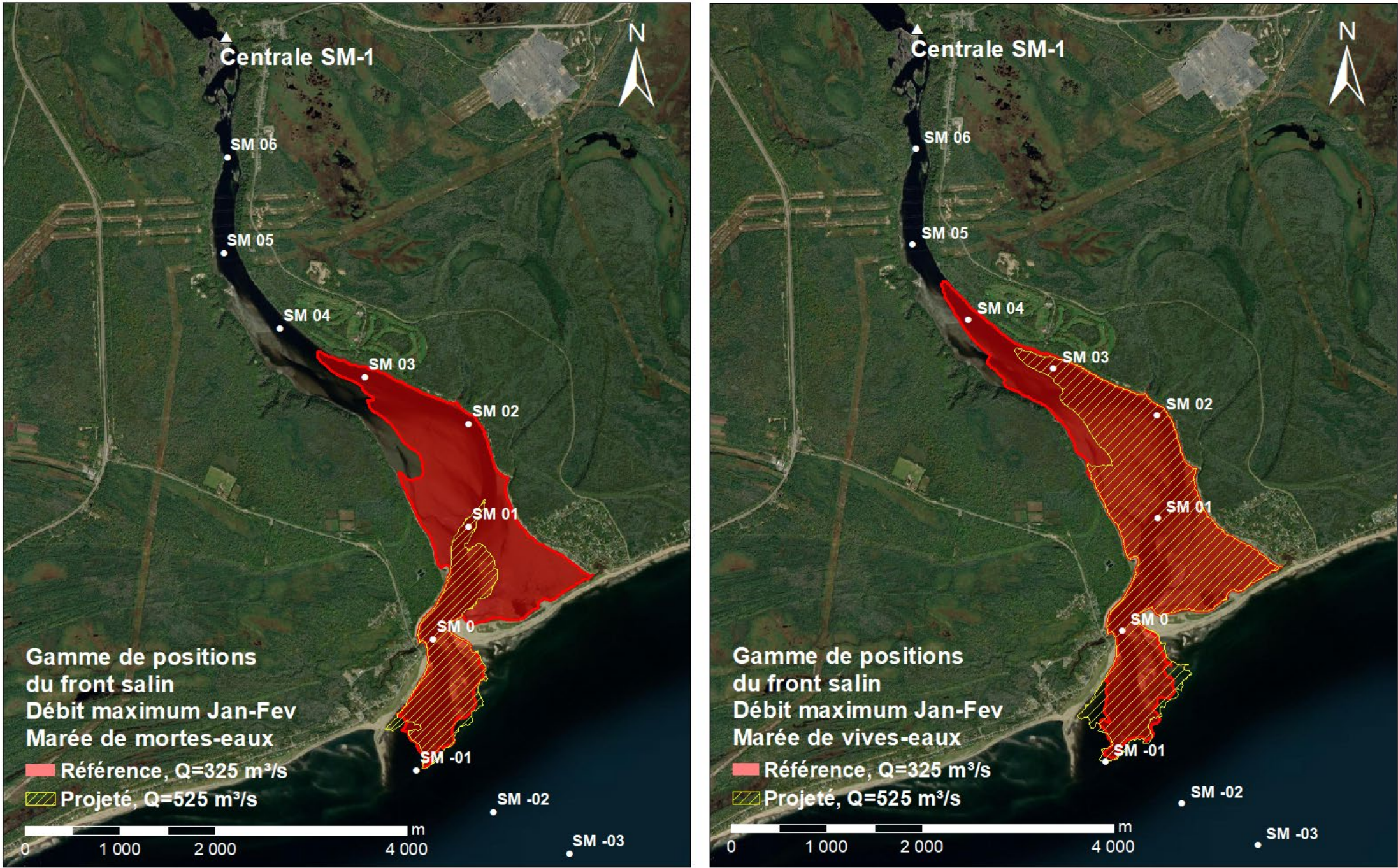


Figure 32 Carte de localisation des gammes de position du front salin (salinité 3 PSU au fond) en conditions de débit maximum pour les mois de janvier et de février en conditions de référence et en conditions projetées pour des marées de mortes-eaux (gauche) et des marées de vives-eaux (droite).

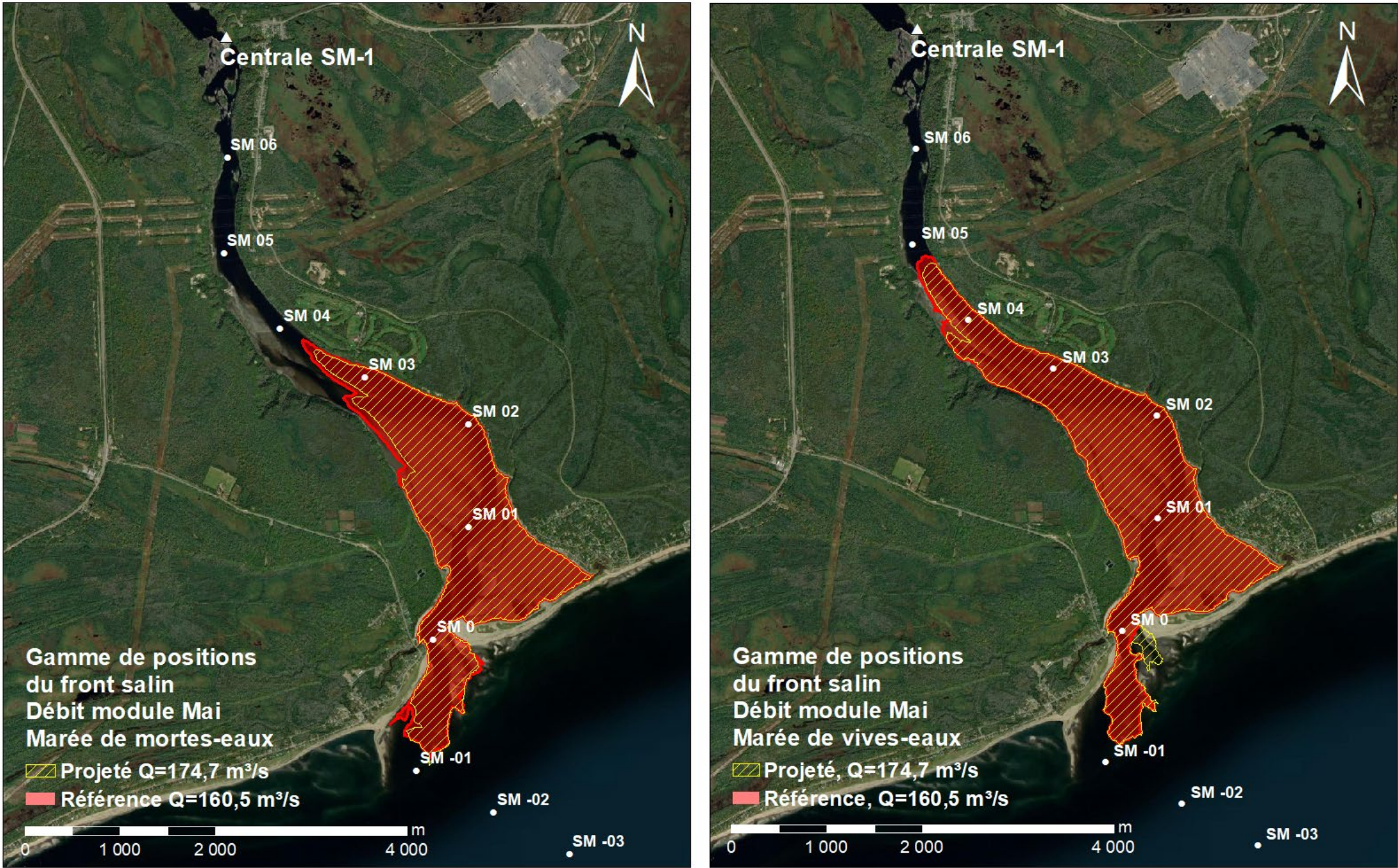


Figure 33 Carte de localisation des gammes de position du front salin (salinité 3 PSU au fond) en conditions de débit module pour le mois de mai en conditions de référence et en conditions projetées pour des marées de mortes-eaux (gauche) et des marées de vives-eaux (droite).

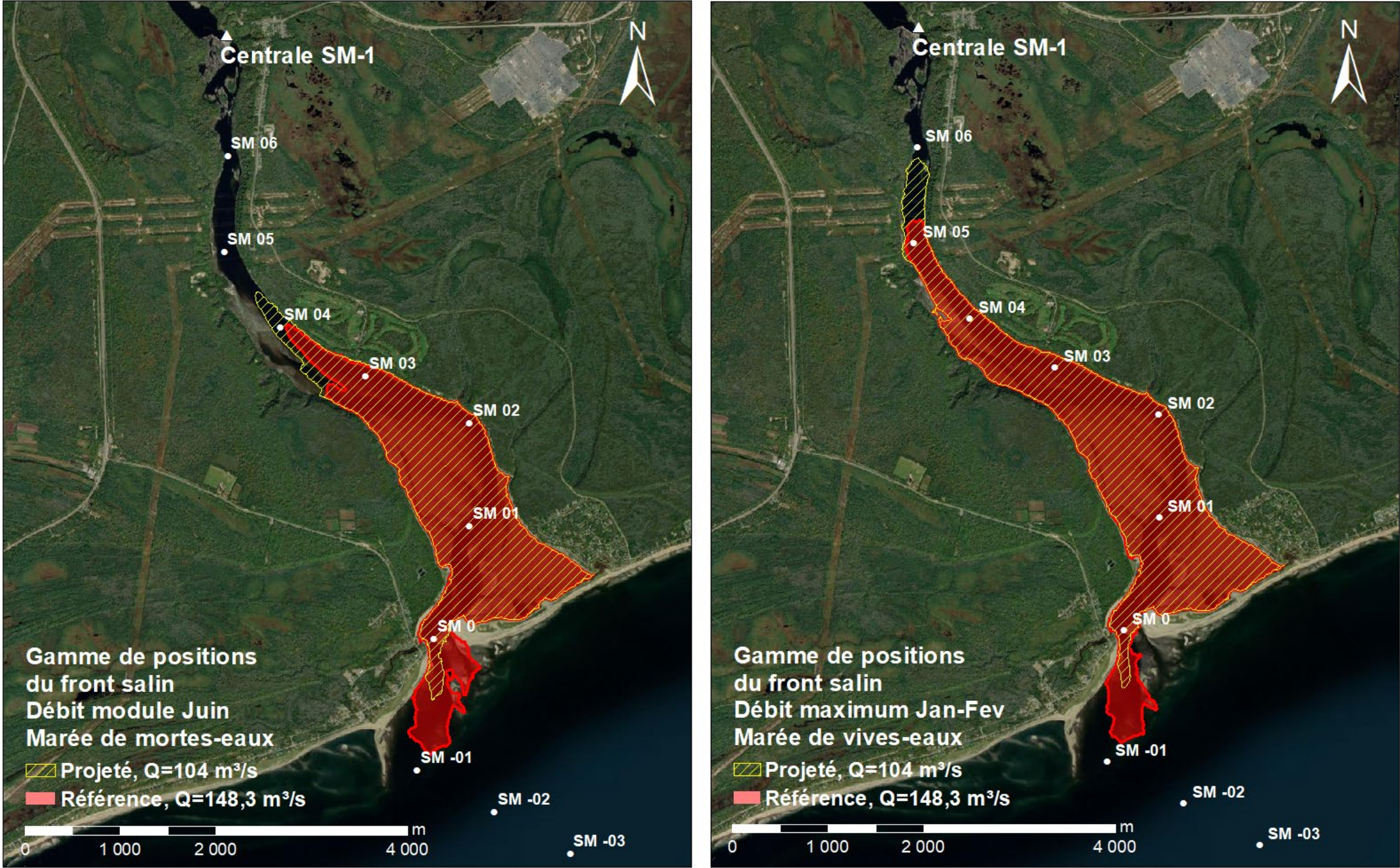


Figure 34 Carte de localisation des gammes de position du front salin (salinité 3 PSU au fond) en conditions de débit module pour le mois de juin en conditions de référence et en conditions projetées pour des marées de mortes-eaux (gauche) et des marées de vives-eaux (droite).

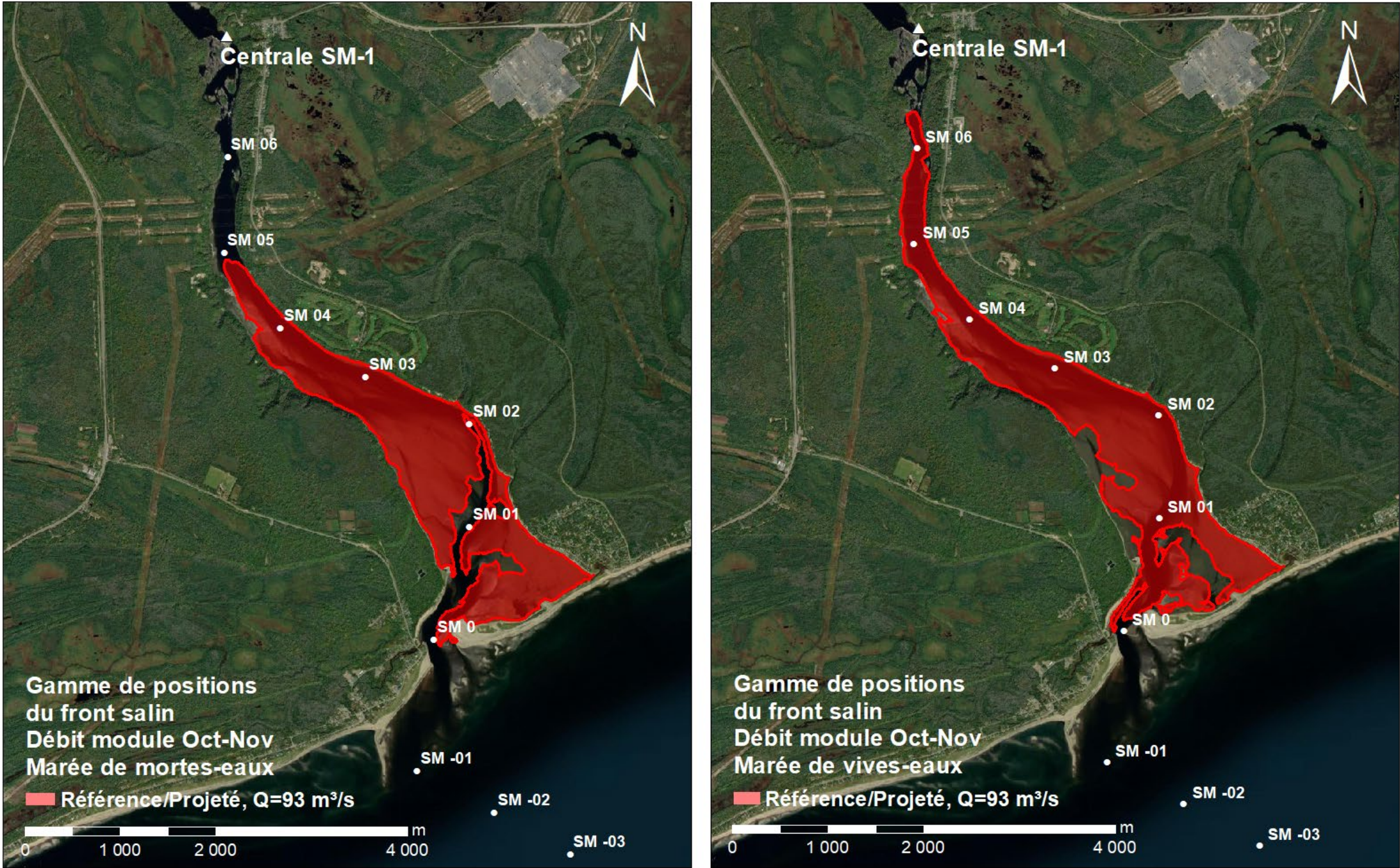


Figure 35 Carte de localisation des gammes de position du front salin (salinité 3 PSU au fond) en conditions de débit module pour les mois d'octobre et de novembre en conditions de référence et en conditions projetées pour des marées de mortes-eaux (gauche) et des marées de vives-eaux (droite).

6.2.2 Profils verticaux de température et de salinité

Pour chacun des scénarios modélisés, des profils verticaux de température de salinité à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite ont été extraits des résultats de modélisation à 10 stations de référence (figure 36 à figure 43). Les stations sont localisées sur les cartes de front salin (figure 32 à figure 35 de la section 6.2.1) et correspondent à des stations de mesures de profils CTD utilisées lors des campagnes terrain de 2024 (sauf pour la station SM 06, la station la plus en amont, qui a spécifiquement été ajoutée pour les analyses).

Sur ces figures, il est possible de comparer les profils verticaux de température et de salinité en conditions projetées (suréquipement de la centrale SM-3) et en conditions de référence en fonction du type de marnage de marée (vives-eaux ou mortes-eaux). De plus, les profils sont regroupés dans les figures selon le stade de la marée qui leur est associé (étales de marée basse ou étales de marée haute). L'étales de marée basse correspond normalement au moment où l'intrusion saline à l'intérieur de l'estuaire est minimale alors qu'elle est maximale autour de l'étales de marée haute.

6.2.3 Variations temporelles des conditions de température et de salinité

Les séries temporelles de température et de salinité moyennées sur la colonne d'eau ont été extraites aux stations des mouillages ESMA1128 (~PK0), ESMA1129 (~PK2), ESMA1130 (~PK4) et ESMA1131 (~PK6) pour chacun des scénarios de modélisation étudiés en conditions de référence ainsi qu'en conditions projetées. La localisation de ces stations est présentée sur la figure 4. Les graphiques de ces séries temporelles sont présentés à l'annexe E où ils sont regroupés par station et par période de l'année.

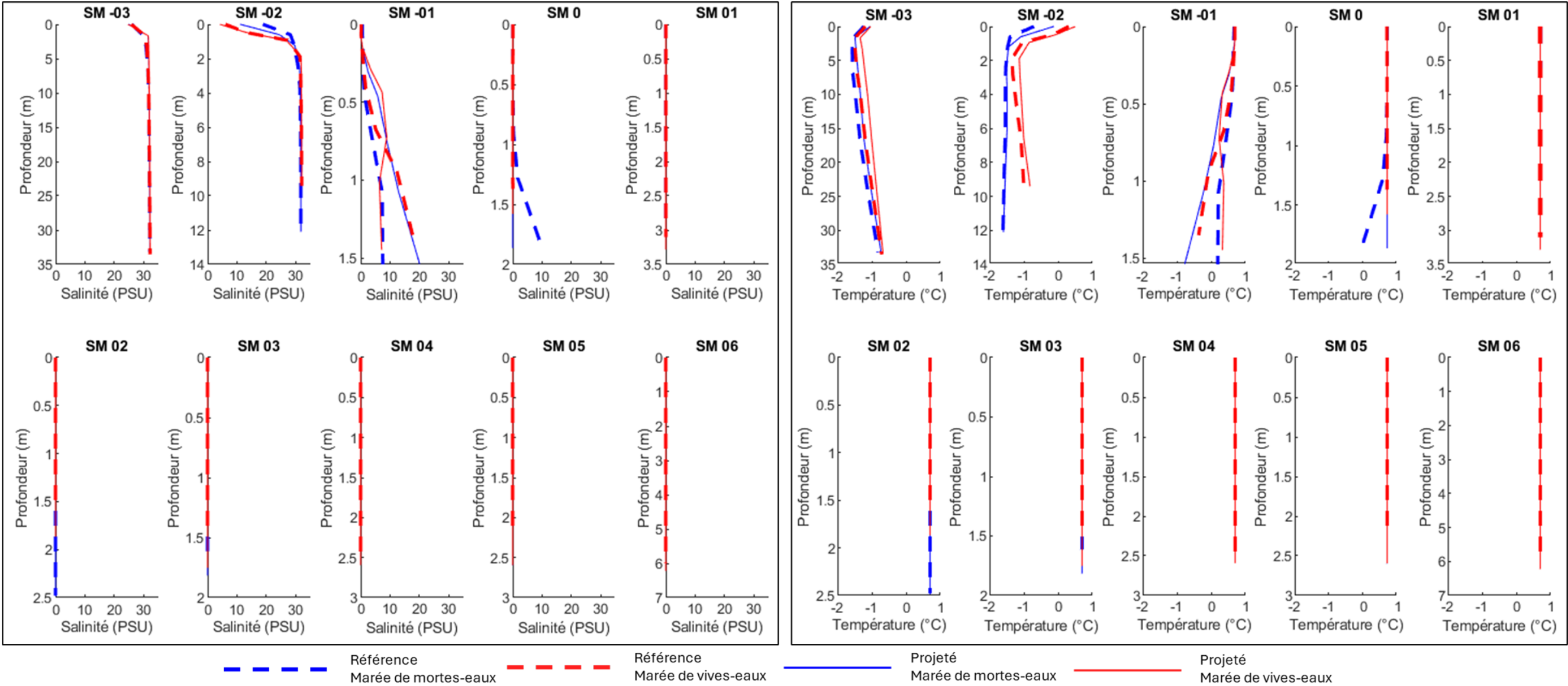


Figure 36 Profils verticaux de salinité et de température à l'étape de marée basse pour le scénario de débit maximum pour les mois de janvier et février en conditions de référence ($Q=325\text{ m}^3/\text{s}$) et en conditions projetées ($Q=525\text{ m}^3/\text{s}$).

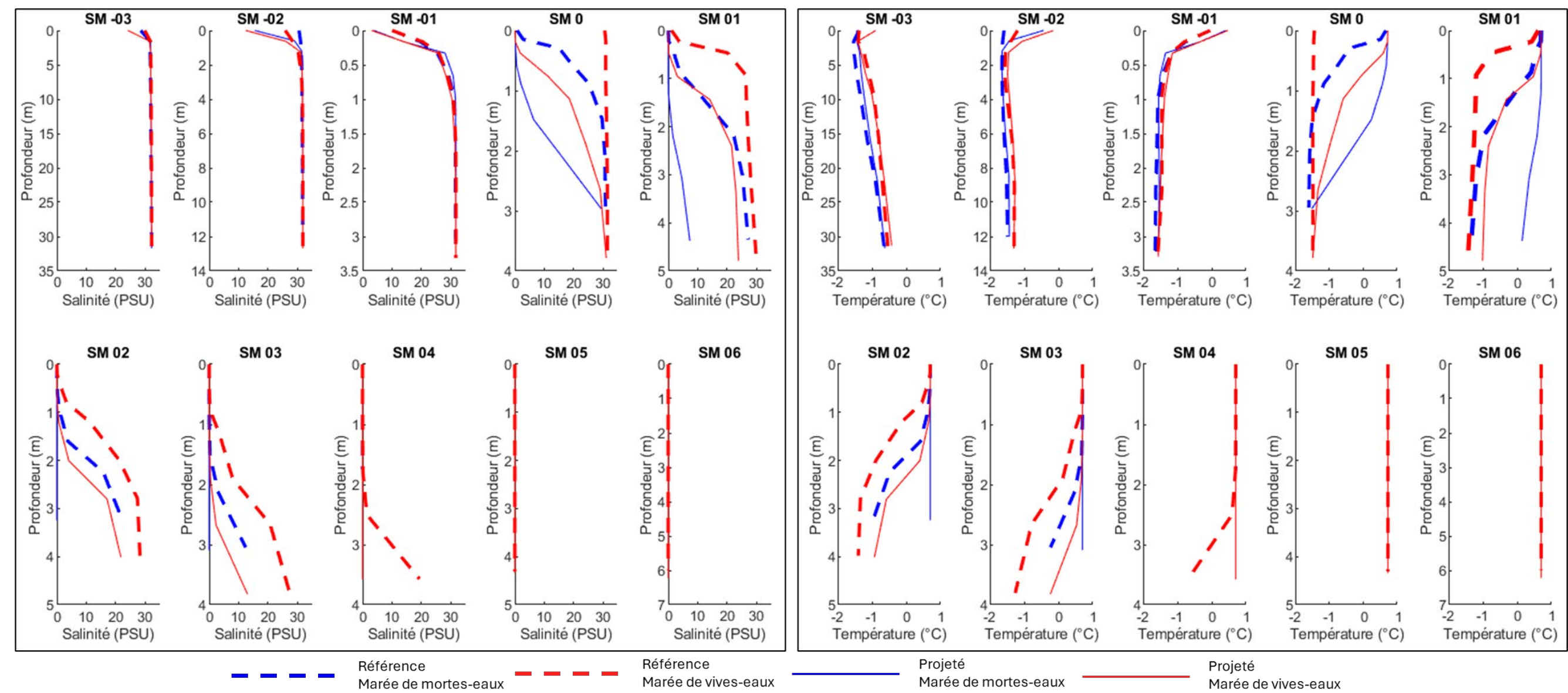


Figure 37 Profils verticaux de salinité et de température à l'étape de marée haute pour le scénario de débit maximum pour les mois de janvier et février en conditions de référence ($Q=325\text{ m}^3/\text{s}$) et en conditions projetées ($Q=525\text{ m}^3/\text{s}$).

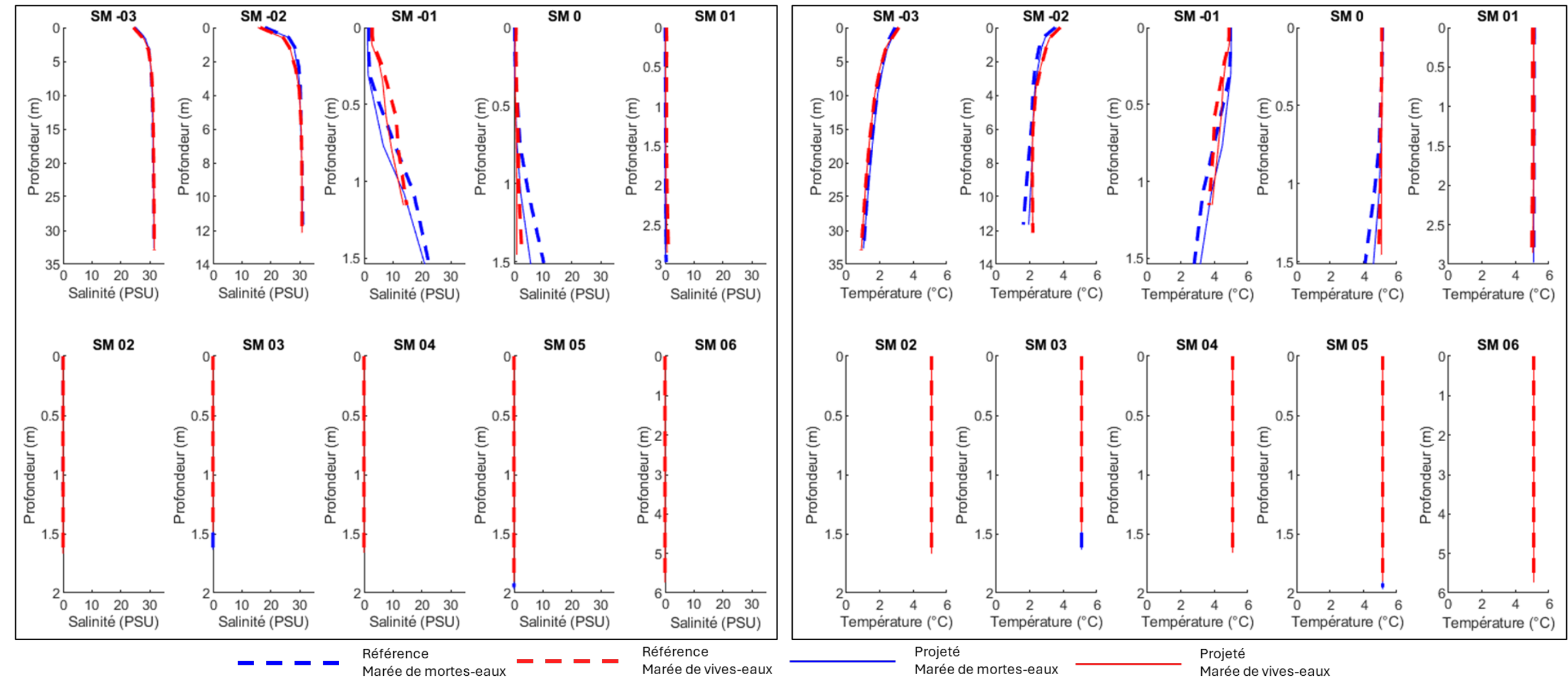


Figure 38 Profils verticaux de salinité et de température à l'étape de marée basse pour le scénario de débit module pour le mois de mai en conditions de référence (Q=160,5 m³/s) et en conditions projetées (174,7 m³/s).

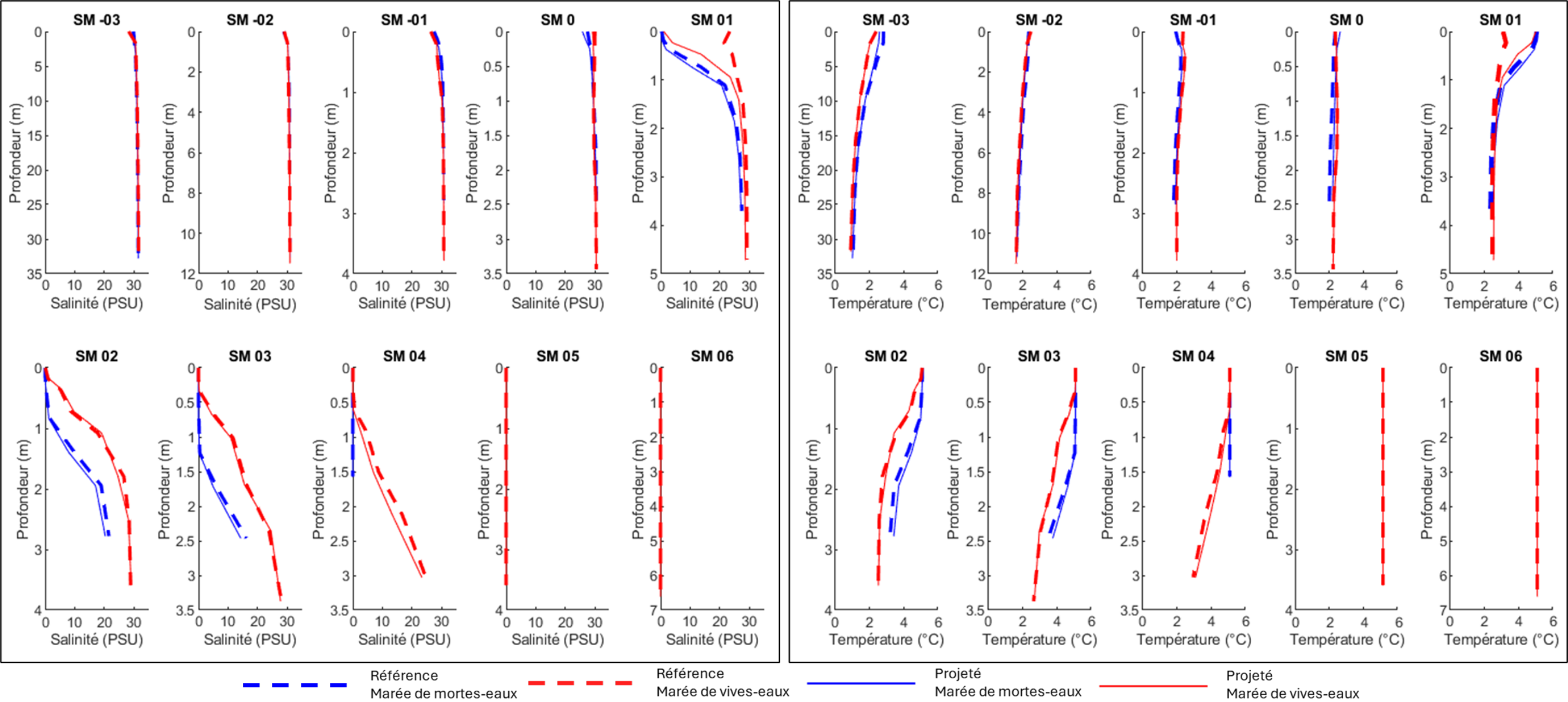


Figure 39 Profils verticaux de salinité et de température à l'éta de marée haute pour le scénario de débit module pour le mois de mai en conditions de référence ($Q=160,5 \text{ m}^3/\text{s}$) et en conditions projetées ($174,7 \text{ m}^3/\text{s}$).

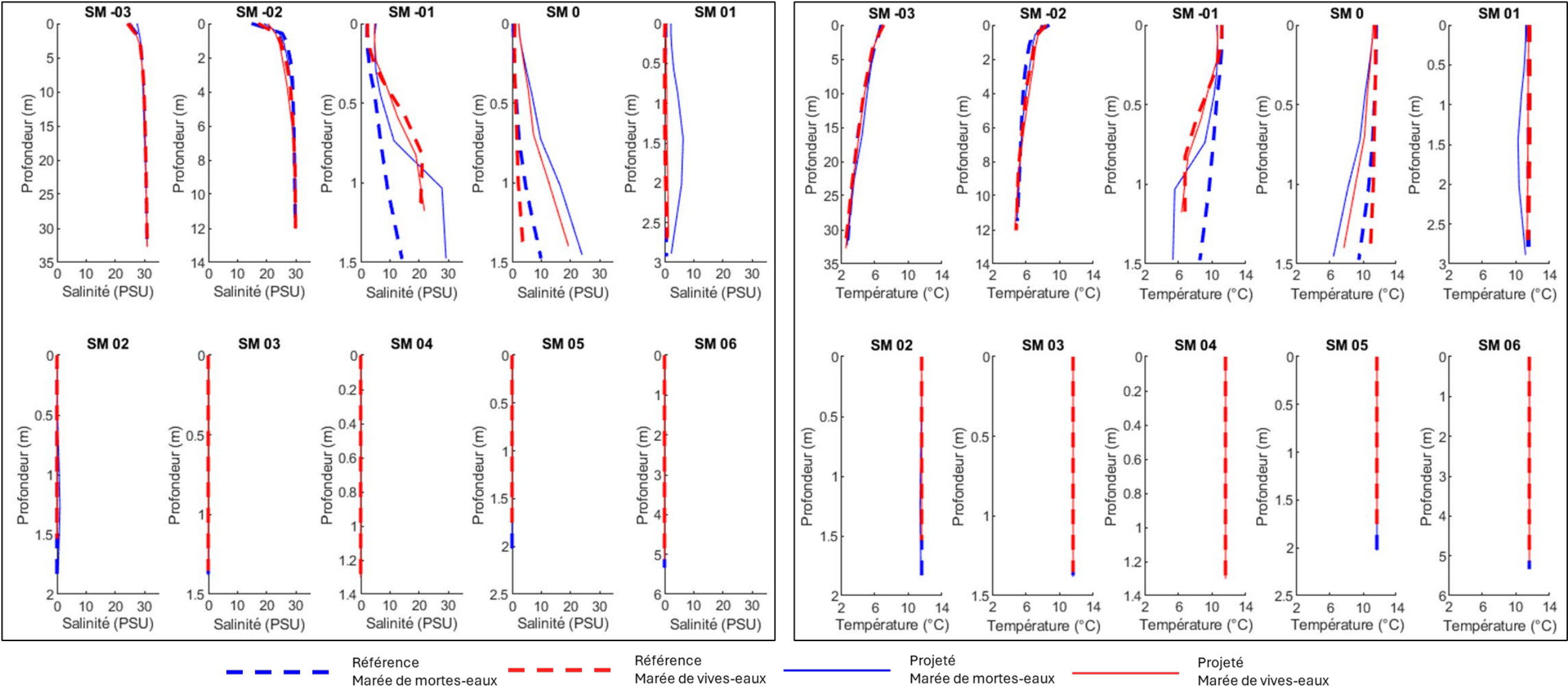


Figure 40 Profils verticaux de salinité et de température à l'étape de marée basse pour le scénario de débit module pour le mois de juin en conditions de référence ($Q=148,3 \text{ m}^3/\text{s}$) et en conditions projetées ($104 \text{ m}^3/\text{s}$).

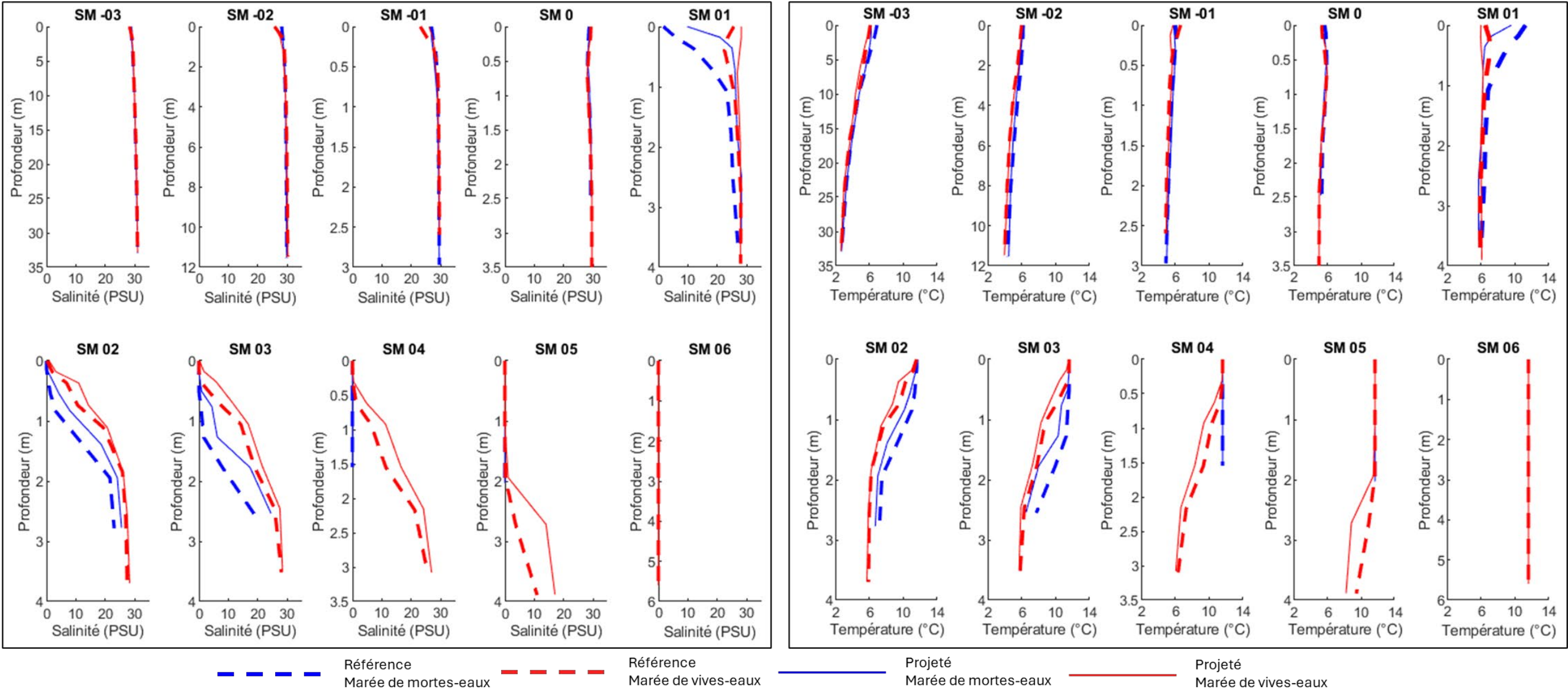


Figure 41 Profils verticaux de salinité et de température à l'étape de marée haute pour le scénario de débit module pour le mois de juin en conditions de référence ($Q=148,3 \text{ m}^3/\text{s}$) et en conditions projetées ($104 \text{ m}^3/\text{s}$).

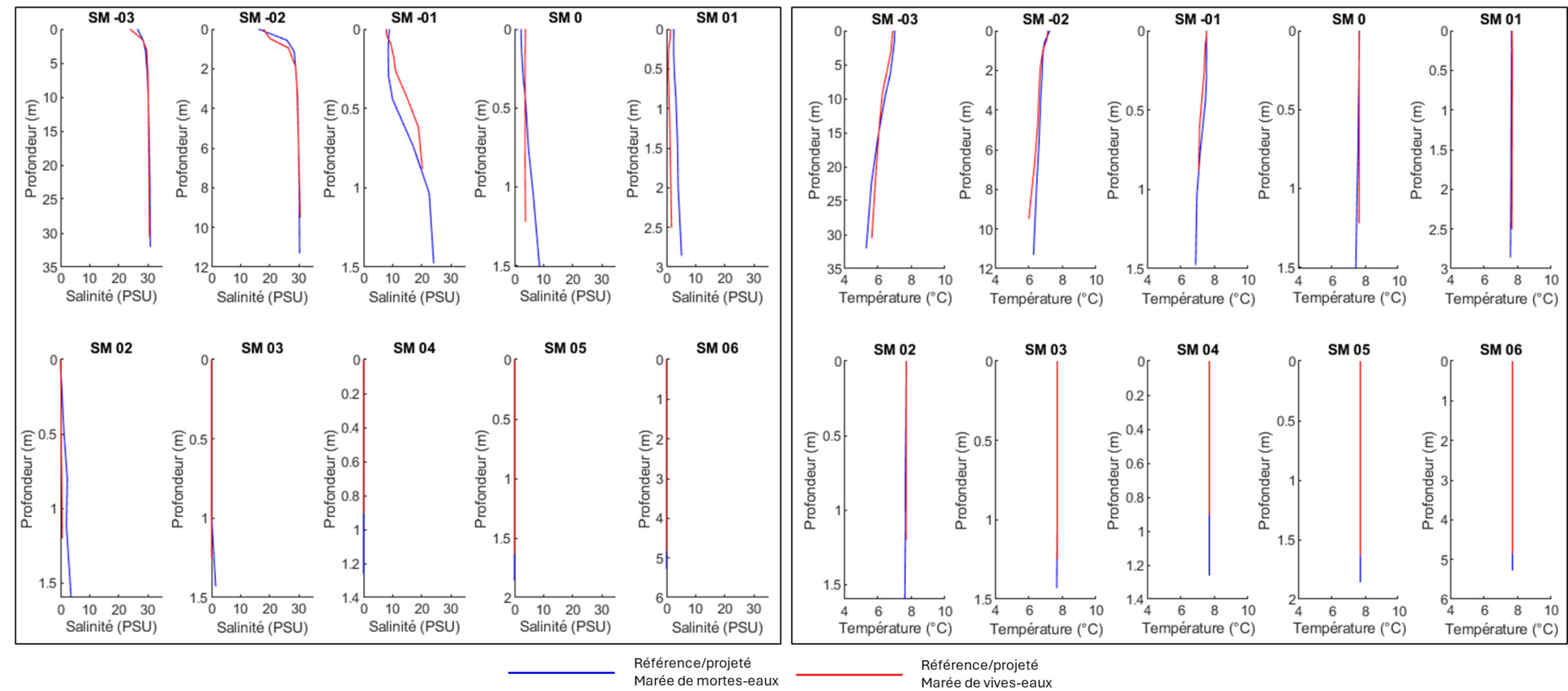


Figure 42 Profils verticaux de salinité et de température à l t le de marée basse pour le scénario de débit module pour les mois d'octobre et de novembre en conditions de référence et en conditions projetées (Q=93 m³/s).

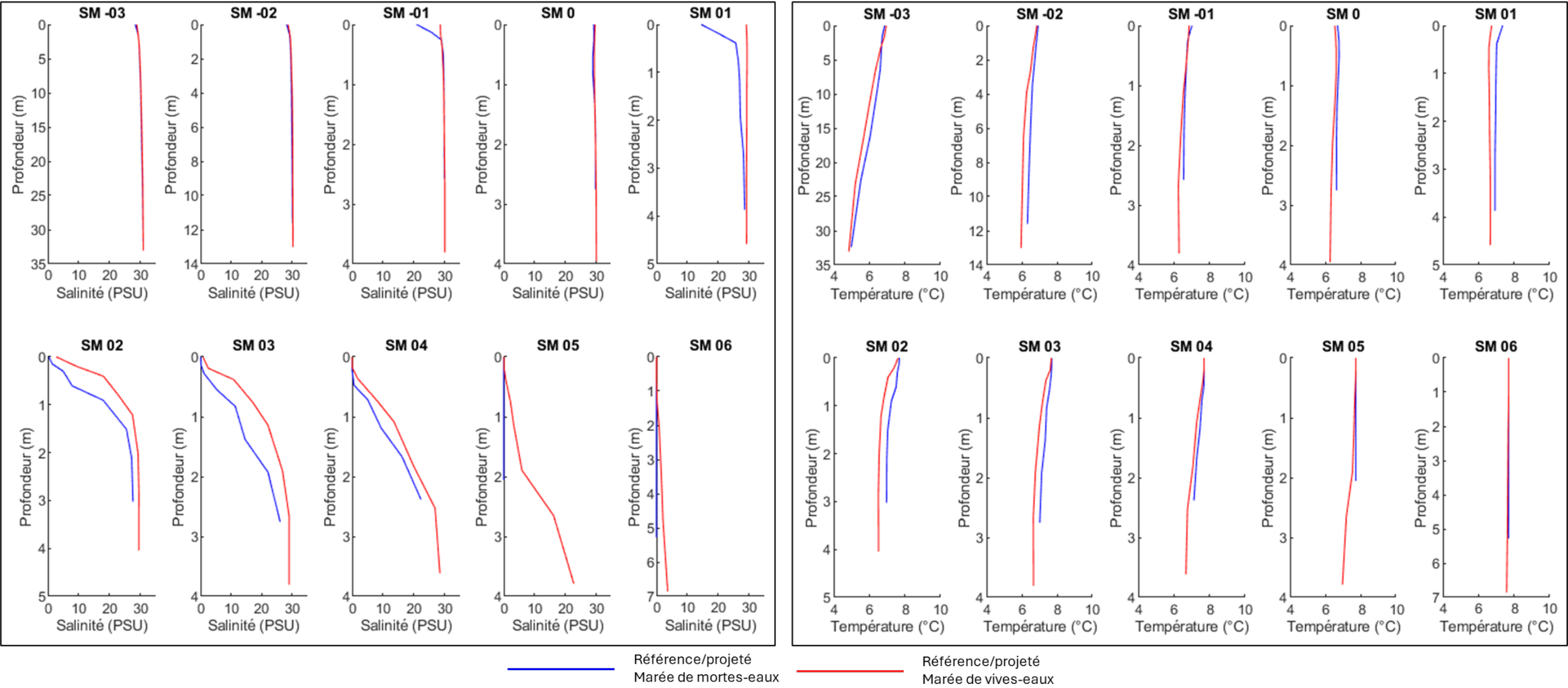


Figure 43 Profils verticaux de salinité et de température à l'étape de marée haute pour le scénario de débit module pour les mois d'octobre et de novembre en conditions de référence et en conditions projetées (Q=93 m³/s).

6.3 Interprétation des résultats

6.3.1 Débit maximum pour les mois de janvier et février

En période de débit maximum pour les mois de janvier et février, le mode de gestion des débits en conditions projetées augmente le débit de la rivière Sainte-Marguerite de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ par rapport aux conditions de référence ($525 \text{ m}^3/\text{s}$ vs $325 \text{ m}^3/\text{s}$). Avec cette augmentation des débits, il est attendu que l'intrusion saline à l'intérieur de l'estuaire de la rivière soit réduite en hiver. Les résultats de modélisation montrent en effet que la remontée maximale du front salin (salinité au fond de 3 PSU) est significativement atténuée en conditions projetées (figure 32), plus particulièrement en période de marée de mortes-eaux. La réduction de la remontée maximale du front salin (étale de marée haute) est réduite de l'ordre de 2,7 km en conditions de marée de mortes-eaux et d'environ 1 km en conditions de marée de vives-eaux. À l'étale de marée basse, lorsque l'intrusion saline est minimale, l'augmentation de débit d'eau douce de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ tend à repousser légèrement la position du front salin davantage à l'extérieur de l'estuaire de la rivière autant en période de marée de mortes-eaux qu'en période de marée de vives-eaux.

Ces changements sur la dynamique des masses d'eau à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite en conditions projetées (mois de janvier et février) sont également perceptibles sur les profils verticaux de température et de salinité montrés à la figure 36 (marée basse) et à la figure 37 (marée haute). Les profils verticaux de salinité montrent en effet une diminution significative de la salinité dans l'estuaire plus particulièrement à l'étale de marée haute. En conditions projetées, l'intrusion saline est présente jusqu'à la station SM 01 (SM 03 en conditions de référence) en marées de mortes-eaux et jusqu'à la station SM 03 (SM 04 en conditions de référence) en marées de vives-eaux. De plus, la couche d'eau douce en surface est généralement plus épaisse en conditions projetées.

Les séries temporelles de température, de salinité et de niveaux présentées à l'annexe E montrent pour leur part comment l'augmentation du débit en conditions projetées engendre une réduction de la salinité aux stations ESMA1128 (~PK0) et ESMA1129 (~PK2) pour les simulations en débit maximum pour les mois de janvier et février. À la station ESMA1130, l'influence de la masse d'eau salée est nulle en conditions de marée de mortes-eaux (référence et projetée) ainsi qu'en condition projetée pour la marée de vives-eaux. Une légère augmentation de salinité à la station ESMA1130 est perceptible à marée haute pour l'état de référence (marée de vives-eaux). L'étendue de l'intrusion saline à l'intérieur de l'estuaire n'atteint pas la station ESMA1131 pour aucun des scénarios modélisés pour la période de janvier et février. En termes de niveaux d'eau, il est possible de constater que l'augmentation du débit de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ engendre une augmentation des niveaux d'eau de quelques dizaines de centimètres plus particulièrement à marée basse (marées de mortes-eaux et de vives-eaux). Cet effet est plus important pour la station la plus en amont (ESMA1131) comparativement à celle la plus en aval (ESMA1128).

6.3.2 Débit module pour le mois de mai

En conditions projetées, le débit module du mois de mai est augmenté à 174,7 m³/s par rapport au débit de 160,5 m³/s en conditions de référence. Cette augmentation de débit de 14,2 m³/s avec le nouveau mode de gestion demeure relativement faible (environ 9% d'augmentation), mais peut tout de même avoir un impact sur le comportement de l'intrusion saline à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite. Les cartes qui présentent les gammes de positions du front salin associées à ces scénarios de modélisation (figure 33) montrent que l'augmentation du débit module pour le mois de mai en conditions projetées repousse la gamme de positions du front salin de l'ordre de 100 à 200 m vers l'aval (limites amont et aval). En marée de mortes-eaux, les limites les plus en amont du front salin remontent environ à mi-chemin entre les stations SM 03 et SM 04. En marée de vives-eaux, les limites les plus en amont du front salin remontent davantage la rivière et atteignent presque la station SM 05. Du côté du golfe, les limites les plus en aval du front salin se situent tout juste en amont de la station SM -01.

L'augmentation du débit module pour le mois de mai en conditions projetées a dans l'ensemble un impact relativement négligeable sur les profils verticaux de température et de salinité à l'intérieur de l'estuaire par rapport aux conditions de référence montrés à la figure 38 (marée basse) et à la figure 39 (marée haute). Le même constat ressort de l'analyse des séries temporelles de température, de salinité et de niveaux d'eau (annexe E). En effet, les changements sur ces séries temporelles sont minimaux.

6.3.3 Débit module pour le mois de juin

Le mode de gestion en conditions projetées prévoit une réduction du débit module en juin de l'ordre de 30% (148 m³/s en conditions de référence vs 104 m³/s en conditions projetées). Cette réduction du débit de 44 m³/s a un impact notable sur la dynamique des masses d'eau à l'intérieur de l'estuaire. La figure 34 illustre sur des cartes l'enveloppe de positions du front salin en conditions de référence et en conditions projetées pour le débit module de juin pour des marées de mortes-eaux et des marées de vives-eaux. L'interprétation de ces cartes montre que la réduction du débit de la rivière contribue à une remontée des positions du front salin plus en amont sur la rivière. En marée de mortes-eaux, la limite amont des positions du front salin se situe environ 500 m plus en amont qu'en conditions projetées (à mi-chemin entre les stations SM 04 et SM 05) par rapport aux conditions de référence (station SM 04). En marée de vives-eaux, cette remontée de la limite amont des positions du front salin en conditions projetées est de l'ordre 1 km. En effet, cette limite située tout juste en aval de la station SM 05 pour l'état de référence se situe un peu en aval de la station SM 06 avec le mode de gestion projeté. En ce qui concerne la limite aval des positions du front salin, un comportement assez similaire est observé autant pour la marée de mortes-eaux que la marée de vives-eaux. La limite aval du front salin est en fait déplacée d'environ 500 m en direction amont (à mi-chemin entre la station SM -01 et SM 0) par

rapport à l'état de référence pour laquelle cette limite se situe un peu en amont de la station SM - 01.

La figure 40 et la figure 41 présentent les profils verticaux de température et de salinité aux étales de marée basse et de marée haute respectivement pour les scénarios de débit module du mois de juin en conditions de référence et projetées. À marée basse (figure 40), c'est à la station SM 0 que l'impact de la réduction du débit est plus significatif (augmentation de la salinité). En marée de mortes-eaux, une légère augmentation de la salinité est également perceptible à la station SM 01. À marée haute (figure 41), l'impact de la diminution de débit est perceptible sur un tronçon de rivière plus étendu, soit entre les stations SM 01 et SM 03 en marée de mortes-eaux et entre les stations SM 01 et SM 05 en marée de vives-eaux. La réduction de débit engendre globalement une augmentation de la salinité de quelques PSU à ces stations sur une portion significative de la colonne d'eau.

L'augmentation de la salinité de quelques PSU à l'intérieur de l'estuaire associée à la réduction du débit module de juin en conditions projetées est également visible sur les séries temporelles de salinité pour les stations ESMA1128, ESMA1129 et ESMA1130 (annexe E). À noter qu'il s'agit des salinités moyennées sur la colonne d'eau. À la station ESMA1128, la salinité augmente sauf à marée haute où la salinité est comparable à l'état de référence. À la station ESMA1129, la salinité moyenne tend à augmenter légèrement sur presque l'ensemble des cycles de marée sauf quelques exceptions autour de certaines étales de marée basse (marées de mortes-eaux et de vives-eaux). L'augmentation de la salinité en conditions projetées est plus ciblée dans le temps pour la station ESMA1130. En effet, l'augmentation de salinité se produit autour des étales de marée haute avec un léger décalage dans le temps (le pic de salinité se produit après le pic de niveau d'eau). À noter qu'en marée de mortes-eaux, l'augmentation de la salinité demeure très faible même au pic de l'augmentation. Finalement, pour la station ESMA1131 (station la plus en amont), l'impact du mode de gestion projeté des débits sur la salinité est négligeable. La salinité est nulle autant en conditions projetées qu'en conditions de référence.

6.3.4 Débit module pour les mois d'octobre et de novembre

Il est anticipé que l'ajout d'un troisième groupe turbine/alternateur à la centrale SM-3 aura un effet négligeable sur le débit module en aval de la centrale SM-1 pour la période d'octobre et de novembre. En effet, débit module en conditions de référence est de 93,3 m³/s et il devient 93 m³/s en conditions projetées (réduction de l'ordre de 0,3%). Dans ce contexte, seul un débit de 93 m³/s a été considéré pour l'ensemble des simulations pour cette période. Les résultats de ces simulations s'appliquent donc autant aux conditions de référence qu'aux conditions projetées. À noter qu'il s'agit de la période de l'année étudiée avec le plus faible débit module.

La figure 35 montre l'enveloppe de positions du front salin (salinité au fond de 3 PSU) pour le débit module d'octobre/novembre. En conditions de marées de mortes-eaux, la limite amont de l'enveloppe de positions du front salin se situe directement en aval de la station SM 05 alors que

la limite aval se retrouve près de la station SM 02 dans l'axe du chenal principal. L'intrusion saline est plus importante le long du chenal principal alors qu'elle est moindre sur les hauts-fonds de part et d'autre du chenal. En conditions de marées de vives-eaux, l'étendue de l'enveloppe de positions du front salin est plus importante. La limite amont de l'enveloppe se situe alors en amont de la station SM 06 près du pied des chutes. Il s'agit du scénario modélisé pour lequel le front salin pénètre le plus à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite à marée haute. La limite aval de l'enveloppe de positions du front salin est différente en marées de vives-eaux. Elle se situe davantage en aval entre les stations SM 0 et SM 01.

Les profils verticaux de température et de salinité aux étales de marée basse et de marée haute pour les scénarios de débit module de la période octobre/novembre sont présentés à la figure 42 et à la figure 43. À marée basse (figure 42), l'influence de la masse d'eau salée en provenance du golfe est perceptible (salinité supérieure à 0 PSU) jusqu'à la station SM 03 en marée de mortes-eaux et jusqu'à la station SM 01 en marée de vives-eaux. À marée haute (figure 43), l'eau salée remonte l'estuaire de la rivière jusqu'à la station SM 04 en marée de mortes-eaux et jusqu'à la station SM 06 en marée de vives-eaux.

Les séries temporelles de salinité moyennée sur la colonne d'eau pour les scénarios de débit module de la période octobre/novembre sont pour leur part présentées à l'annexe E. Ces graphiques montrent que l'intrusion saline en fonction des marées est significative aux stations ESMA1128, ESMA1129 et ESMA1130 (marée de mortes-eaux et de vives-eaux). À la station ESMA1131, l'intrusion saline est relativement faible en marées de vives-eaux et complètement absente en marées de mortes-eaux.

7 VITESSES DE COURANT ET CONTRAINTES DE CISAILLEMENT AU FOND À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE SAINTE-MARGUERITE

7.1 Contexte et objectifs

L'embouchure de la rivière Sainte-Marguerite est un site où la dynamique sédimentaire est importante. Des changements morphologiques s'y produisent en continu (évolution de la flèche sableuse, reconfiguration des bancs de sable et des chenaux de marée, etc.) en fonction des sollicitations hydrodynamiques multiples, notamment le débit fluvial de la rivière, les courants de marée et l'action des vagues sur le littoral. Les changements anticipés dans le mode de gestion des débits sur la rivière Sainte-Marguerite en conditions projetées pourraient entraîner des conséquences sur l'évolution morphologique de l'embouchure de la rivière. Le modèle hydrodynamique 3D développé pour la caractérisation du front salin dans l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite a été employé pour comparer les vitesses d'écoulement et les contraintes de cisaillement au fond en conditions de référence et projetées à l'embouchure de la rivière Sainte-Marguerite dans le golfe du Saint-Laurent.

Le modèle hydrodynamique utilisé n'est pas un modèle à fond mobile, c'est-à-dire que la bathymétrie n'évolue pas dans le temps en fonction des sollicitations hydrodynamiques et de la nature des sédiments en place. Ainsi, le modèle ne permet pas de modéliser directement l'évolution morphologique du fond de manière absolue. Toutefois, l'interprétation des vitesses de courant et les contraintes de cisaillement au fond peuvent tout de même servir d'indicateur pour évaluer les impacts potentiels des changements du mode de gestion des débits sur la dynamique sédimentaire du secteur (érosion/sédimentation). Il s'agit donc d'estimer le potentiel de mobilité des sédiments à cause des changements aux débits qui transitent par l'estuaire.

À noter que le modèle hydrodynamique néglige complètement l'effet des vagues sur la dynamique des courants à l'embouchure de la rivière. Les courants littoraux associés aux vagues sont un des principaux mécanismes responsables de l'évolution morphologique de la flèche sableuse présente à l'embouchure. L'interprétation des résultats du modèle hydrodynamique doit être faite avec prudence en considérant que la morphologie de l'embouchure de la rivière peut naturellement s'ajuster aux changements dans le mode de gestion des débits et tendre vers de nouveaux états d'équilibre à cause des autres processus physiques (ex : vague et courants littoraux). Une modélisation hydrosédimentaire complète combinée à des suivis rigoureux suivant la mise en place du nouveau mode de gestion des débits sont fortement recommandés.

7.2 Analyse des résultats

Les vitesses de courant 2D (courants moyennés sur la colonne d'eau), les vitesses près du fond et les contraintes de cisaillement au fond ont été extraites des fichiers de résultats du modèle hydrodynamique 3D au maximum du jusant (débit sortant) et du flot (débit entrant). À noter que ces pointes de courants maximum se produisent plus spécifiquement autour de l'étalement de marée basse durant laquelle les profondeurs d'eau sont minimales ce qui induit généralement des vitesses d'écoulement plus élevées. Ces résultats de modélisation ont été extraits en conditions de marée de vives-eaux pour les scénarios hydrauliques suivants en conditions de référence et en conditions projetées :

- Débit maximum de janvier/février;
- Débit module de mai;
- Débit module de juin;
- Débit module d'octobre/novembre.

Les vitesses d'écoulement 2D maximum ainsi que les contraintes de cisaillement sur le fond associées (jusant et flot) sont présentées dans les sections ci-dessous. Les vitesses d'écoulement au fond sont pour leur part présentées à l'Annexe F.

7.2.1 Débit maximum de janvier/février

L'augmentation de 62% du débit maximum en janvier/février (525 vs 325 m³/s) engendre des changements significatifs sur les courants 2D à l'embouchure de la rivière.

Au jusant (figure 44), les vitesses de courants en aval de la flèche littoral sont augmentées de manière plus importante (augmentation de l'ordre de 0,5-1 m/s) alors que l'impact est plus faible directement en amont de la flèche. L'analyse des contraintes de cisaillement sur le fond montre qu'il y a un potentiel de transport sédimentaire pour du gravier fin et du gravier moyen à l'embouchure (dans l'axe de la flèche littorale) en conditions de référence et projetées.

Au flot (figure 45), les vitesses de courants sont réduites de l'ordre de 0,2-0,4 m/s à l'embouchure avec l'augmentation du débit fluvial. Cela engendre une légère réduction des contraintes de cisaillement sur le fond. En effet, en conditions actuelles, il y a un potentiel de transport sédimentaire pour du sable grossier et du gravier fin alors qu'en conditions projetées, le potentiel de transport sédimentaire est davantage limité au sable grossier.

7.2.2 Débit module de mai

L'augmentation du débit module de 14,2 m³/s en mai en conditions projetées est relativement faible (+9%) et n'engendre pas de changements significatifs sur les courants 2D ni les contraintes

de cisaillement sur le fond à l'embouchure de la rivière. Cela est applicable au jusant (figure 46) et au flot (figure 47).

Au jusant, il y a un potentiel de mobiliser du gravier fin alors qu'au flot, le potentiel de transport sédimentaire correspond dans l'ensemble à du sable grossier (avec quelques zones où le gravier fin serait mobilisé).

7.2.3 Débit module de juin

La diminution du débit module de $44,3 \text{ m}^3/\text{s}$ en juin en conditions projetées est significative (+30%), mais engendre des changements relativement mineurs sur les courants 2D et les contraintes de cisaillement sur le fond à l'embouchure de la rivière.

Au jusant (figure 48), la diminution du débit réduit les vitesses de courant de l'ordre de $0,1\text{-}0,2 \text{ m/s}$ dans le secteur de l'embouchure. Le potentiel de transport sédimentaire associé aux contraintes de cisaillement sur le fond demeure toutefois comparable pour les deux conditions étudiées (gravier fin).

Au flot (figure 49), la diminution du débit provoque une légère augmentation des vitesses qui entre à l'intérieur de l'estuaire (de l'ordre de $0,15 \text{ m/s}$). Cela engendre une légère augmentation des contraintes de cisaillement sur le fond en conditions projetées qui augmente légèrement le potentiel de transport pour du gravier fin comparativement aux conditions de référence. Des gradients plus élevés sont notés le long de la rive droite en amont de la flèche qui pourrait se traduire par un potentiel d'érosion de berge dans ce secteur.

7.2.4 Débit module d'octobre/novembre

Le débit de module de $93 \text{ m}^3/\text{s}$ en octobre/novembre est similaire en conditions existantes et projetées. Malgré le fait que le débit module soit plus faible pour cette période comparativement aux autres périodes analysées, les vitesses de courant et les contraintes de cisaillement au jusant (figure 50) sont plus importantes (comparativement aux périodes de mai et de juin) avec comme conséquence une légère augmentation du potentiel de transport dans l'axe de la flèche littoral (gravier fin). Les contraintes de cisaillement demeurent toutefois plus faibles comparativement à la période de débit maximum de février.

Au flot (Figure 50), le débit module de $93 \text{ m}^3/\text{s}$ engendre les vitesses de courant et les contraintes de cisaillement les plus fortes parmi l'ensemble des scénarios simulés pour cette même phase de marée. Il y a un potentiel de transport de gravier fin sur une zone plus étendue du secteur de l'embouchure. De plus, des gradients élevés sont notés le long de la rive droite en amont de la flèche qui pourrait se traduire par un potentiel d'érosion de berge dans ce secteur.

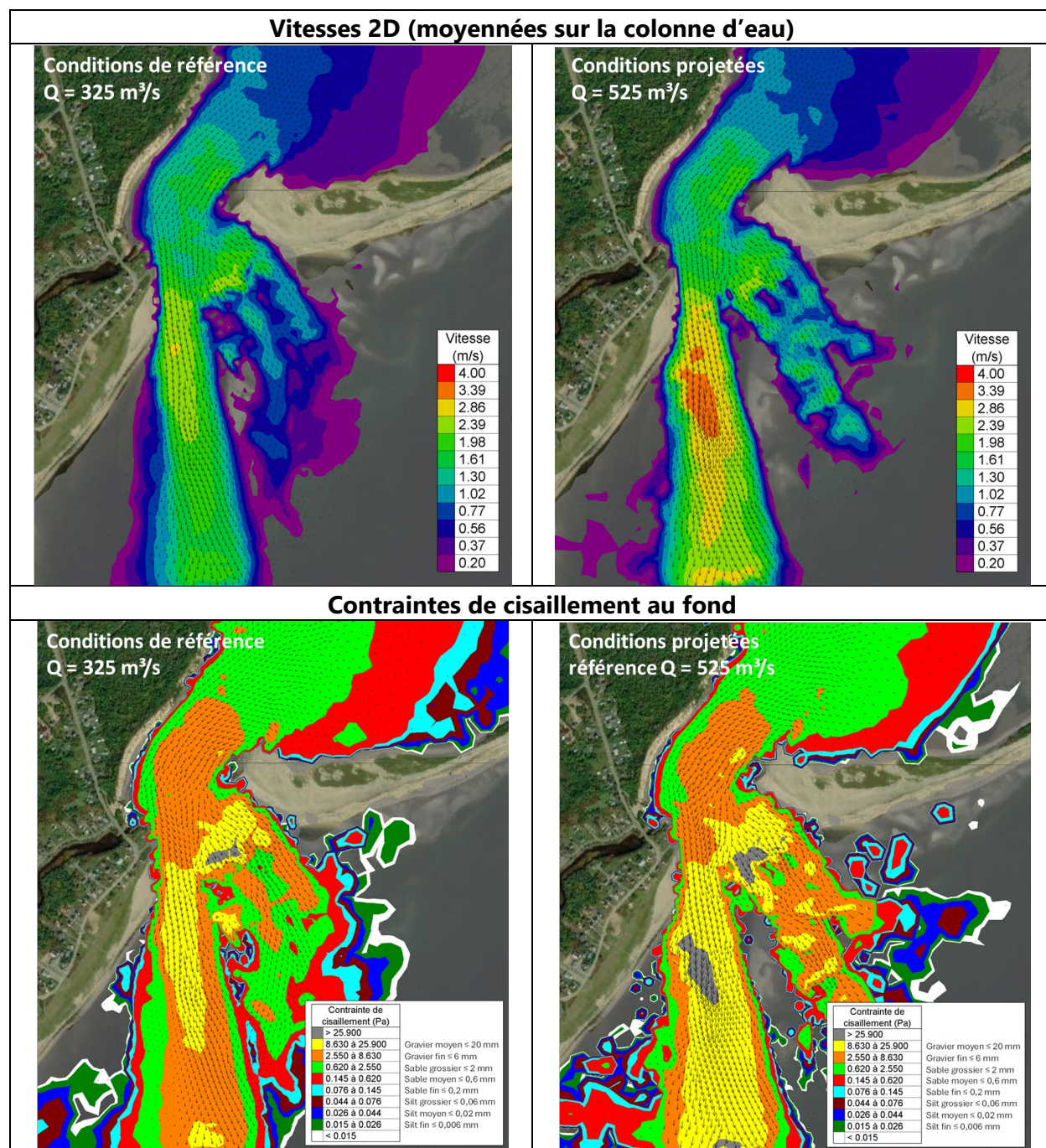


Figure 44 Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au jusant (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit fixe maximum de janvier/février pour les conditions de référence et les conditions projetées.

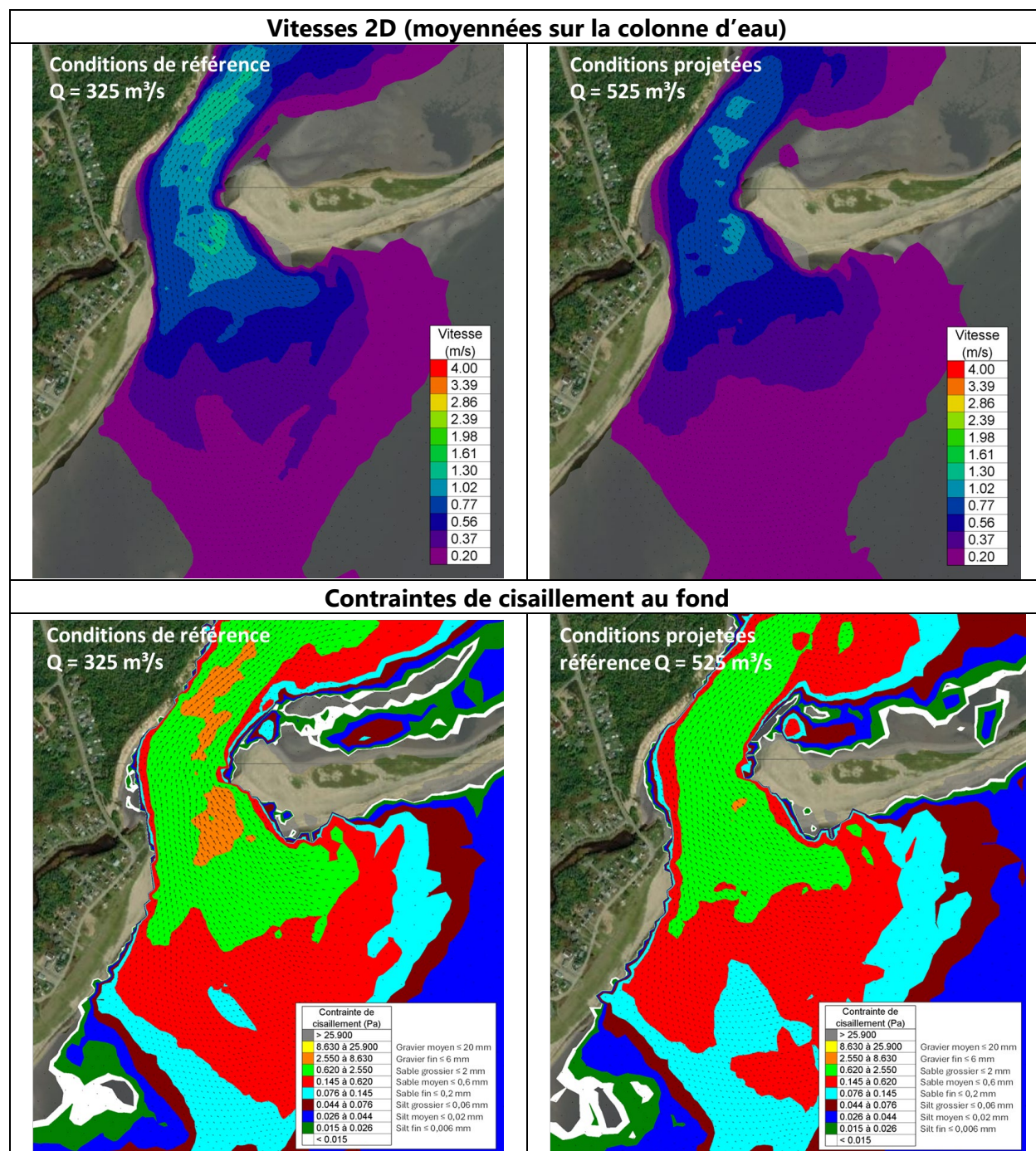


Figure 45 Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au flot (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit fixe maximum de janvier-février pour les conditions de référence et les conditions projetées.

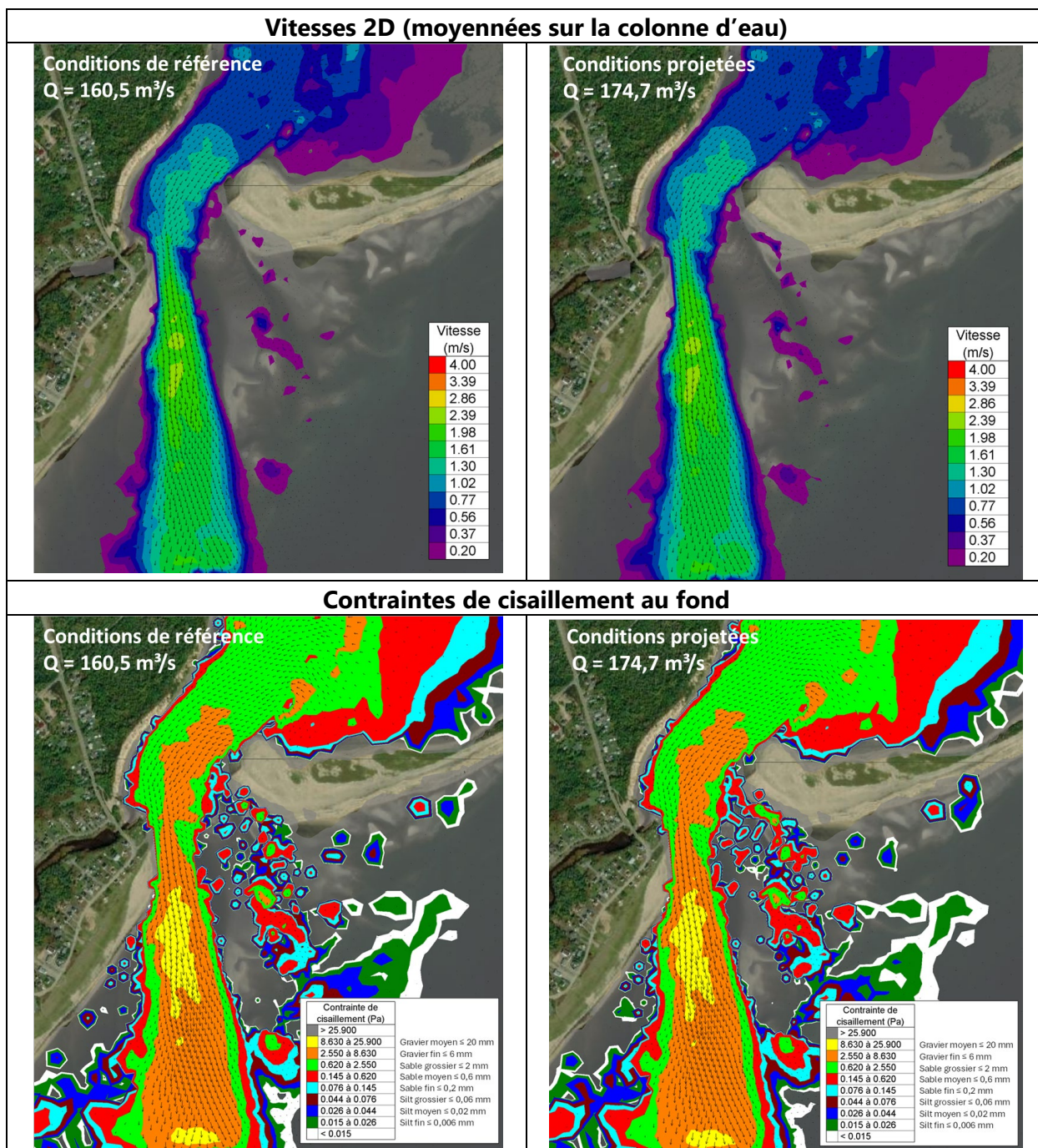


Figure 46 Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au jusant (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit module de mai pour les conditions de référence et les conditions projetées.

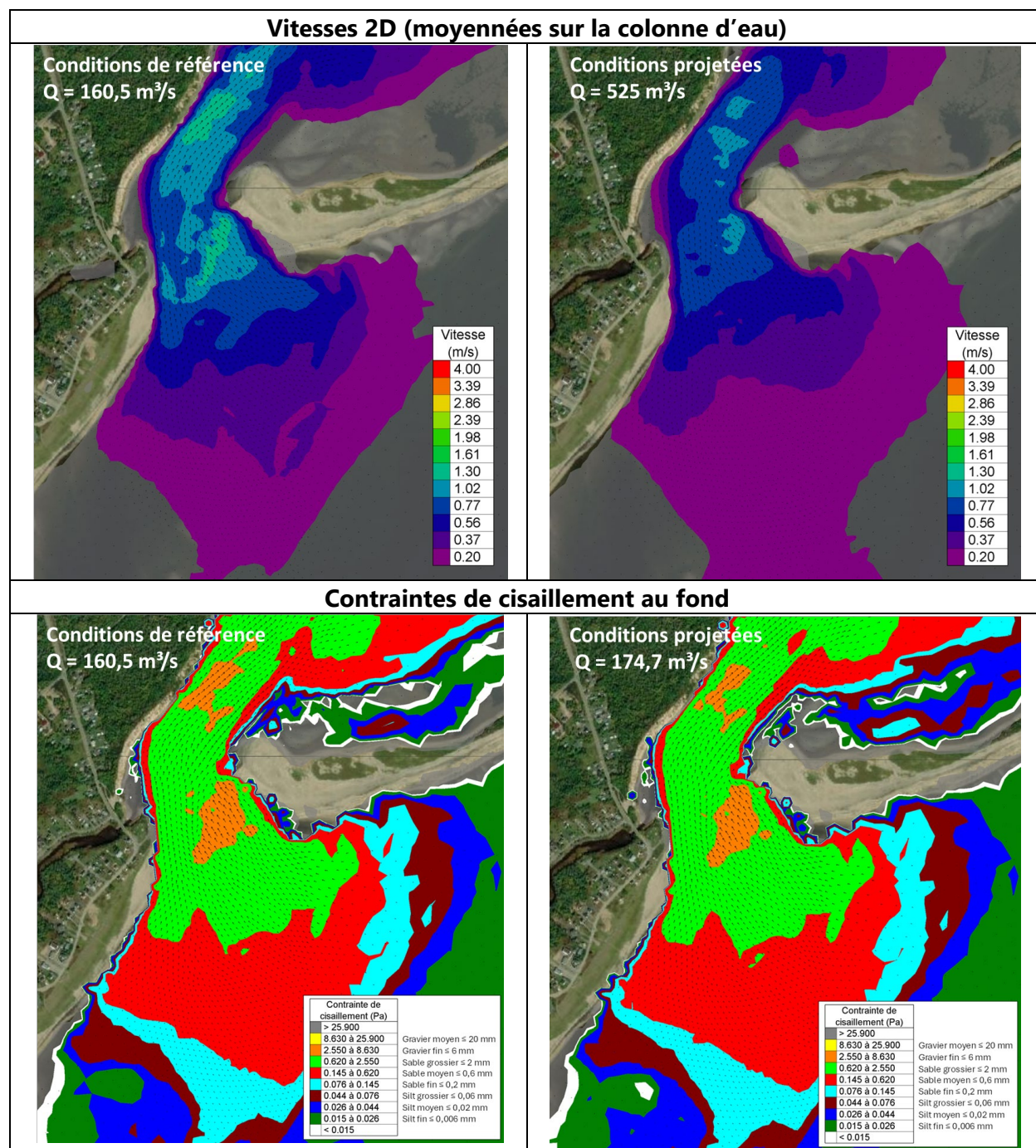


Figure 47 Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au flot (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit module de mai pour les conditions de référence et les conditions projetées.

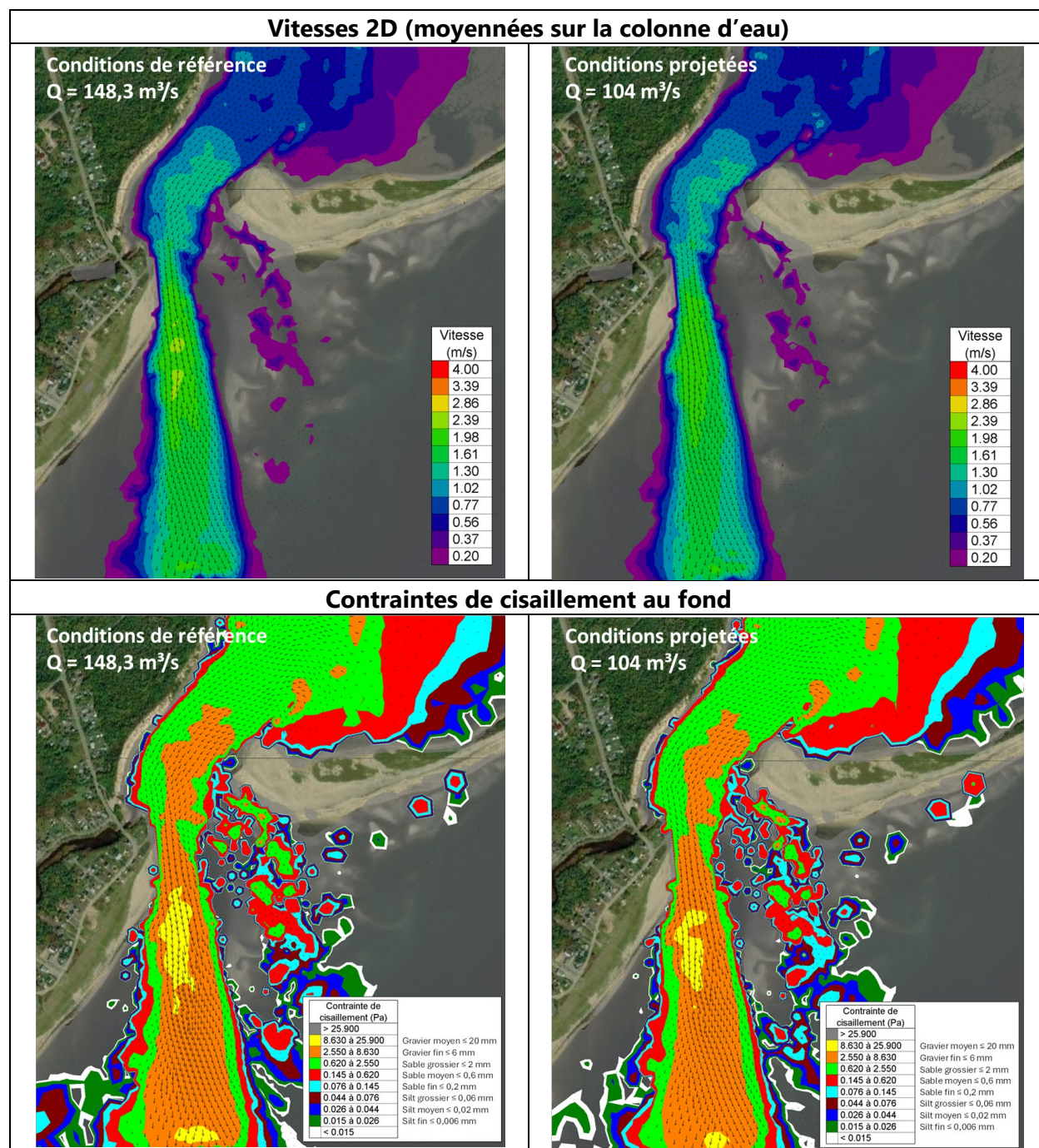


Figure 48 Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au jusant (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit module de juin pour les conditions de référence et les conditions projetées.

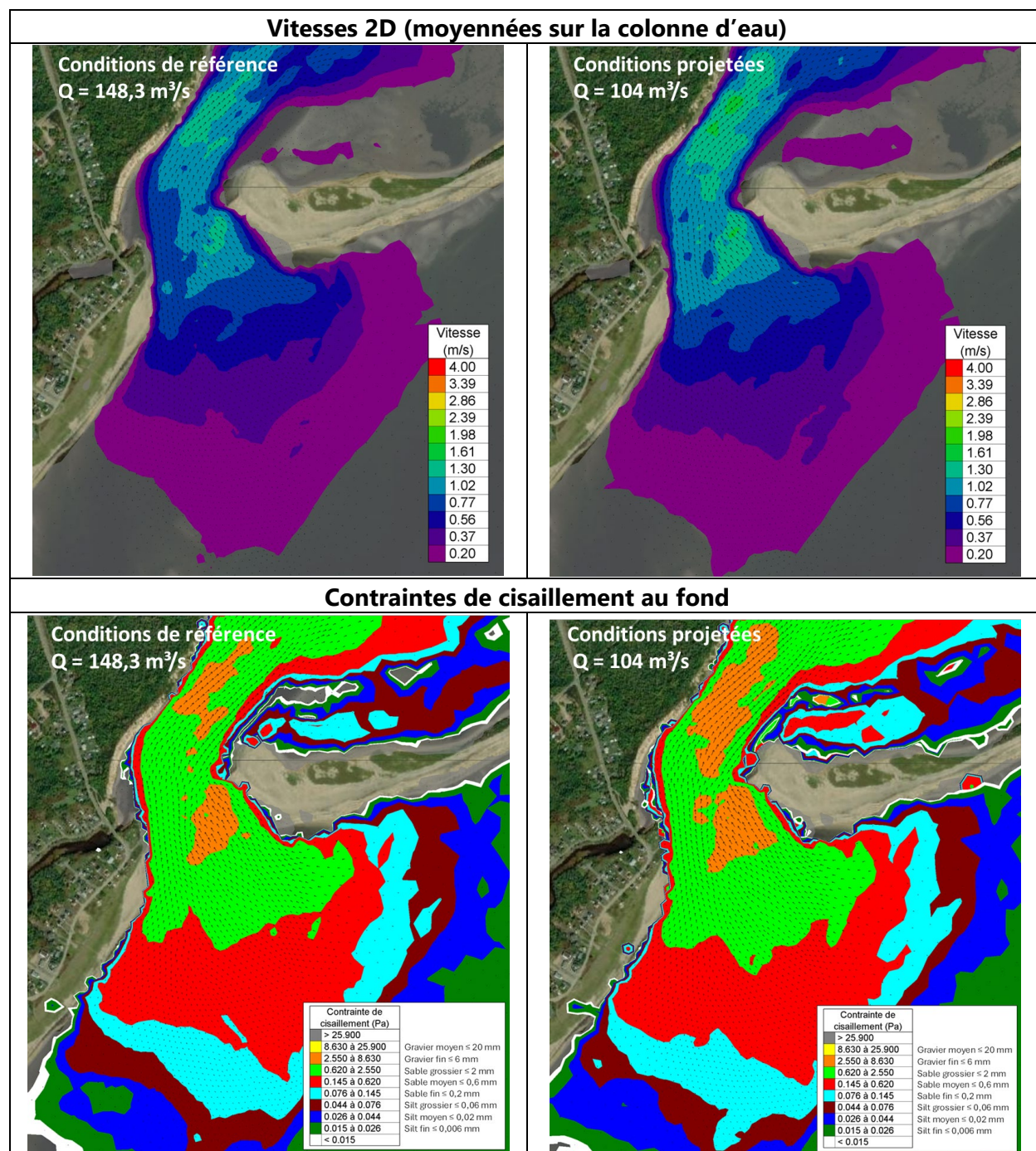


Figure 49 Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au flot (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit module de juin pour les conditions de référence et les conditions projetées.

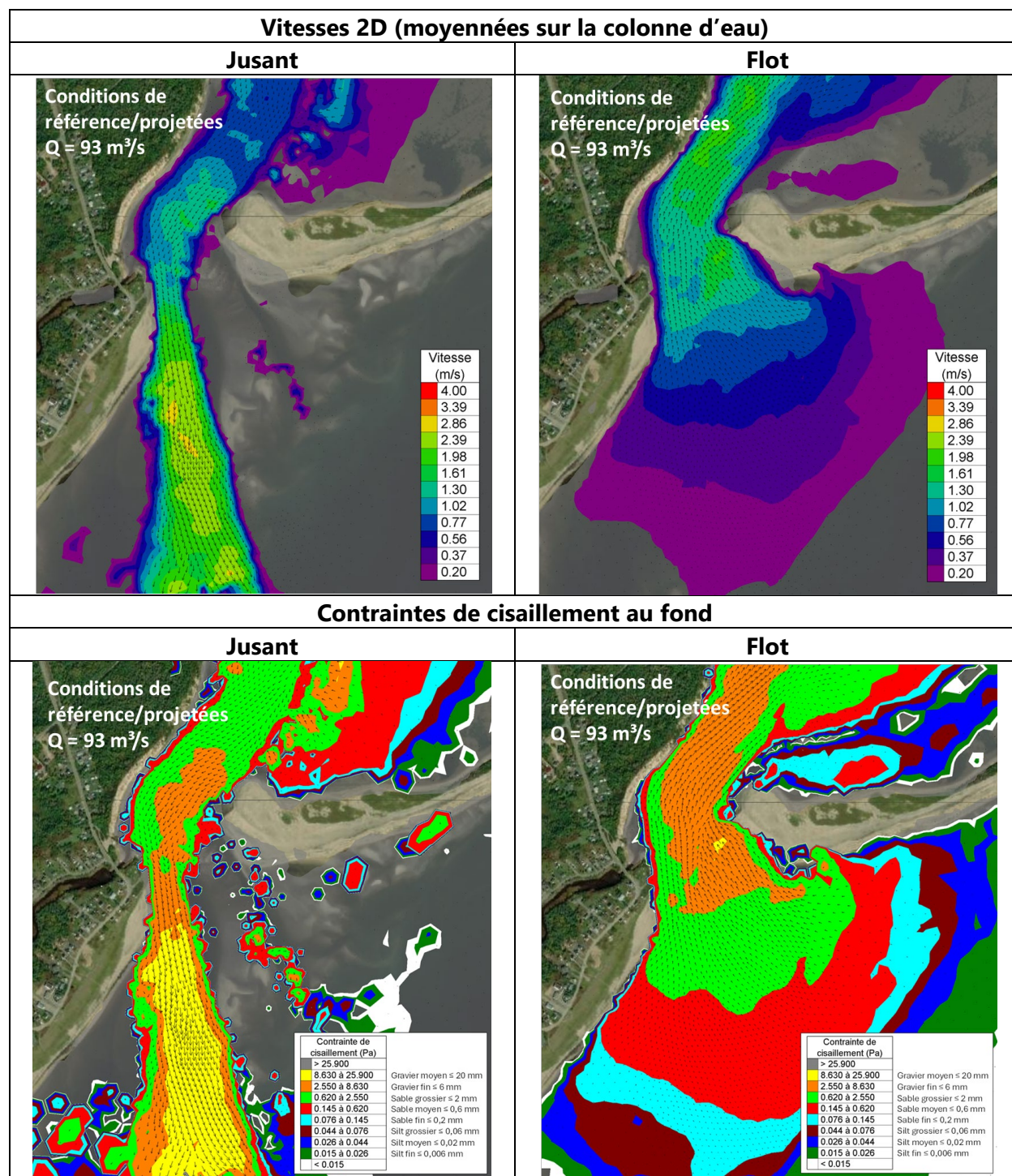


Figure 50 Vitesses 2D et contraintes de cisaillement au fond maximum au jusant et au flot (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit module d'octobre/novembre) pour les conditions de référence/projetées.

8 CONCLUSION & RECOMMANDATIONS

Hydro-Québec planifie l'ajout d'un 3^e groupe turbine/alternateur (T/A) à la centrale SM-3 située sur la rivière Sainte-Marguerite. Le projet est assujéti au processus d'Étude d'Impact sur l'Environnement (EIE). Ainsi, les effets du projet sur l'environnement, tant en phase de construction qu'en phase d'exploitation, sont à évaluer. Considérant que l'ajout du 3^e groupe T/A à la centrale SM-3 influencera le mode de gestion des débits (débit d'équipement augmenté d'environ 200 m³/s à SM-3), il est nécessaire d'étudier les effets anticipés de ces changements sur les tronçons de cours d'eau en aval de la centrale SM-3. Les centrales SM-1 et SM-2 ont des débits d'équipement beaucoup plus faibles que la centrale SM-3 et la capacité d'emménagement des réservoirs de SM-1 et de SM-2 entre les niveaux d'opération est faible. L'exploitation d'un 3^e groupe T/A à SM-3 pourrait donc mener à une augmentation des débits déversés à la centrale SM-1.

L'objectif principal de la présente étude était de déterminer l'impact de la modification du mode de gestion des débits à la centrale SM-3 sur l'intrusion saline et le mouvement des masses d'eau dans l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite, plus spécifiquement sur le tronçon de rivière en aval de la centrale SM-1 jusqu'à son embouchure dans le golfe du Saint-Laurent.

Un modèle hydrodynamique 3D (TELEMAC-3D) du tronçon à l'étude a été développé et calibré sur la base de mesures in situ fournies par Hydro-Québec. Le modèle permet de reproduire de manière satisfaisante les fluctuations de niveaux d'eau à l'intérieur de l'estuaire associées à la propagation de la marée et du débit fluvial. L'intrusion de masses d'eau plus dense (eau salée) que l'eau de la rivière Sainte-Marguerite en provenance du golfe du Saint-Laurent à l'intérieur de l'estuaire à chaque cycle de marée est dans l'ensemble bien reproduite par le modèle, particulièrement la salinité moyenne sur la colonne d'eau. Toutefois, la corrélation entre la température moyenne sur la colonne simulée et mesurée est moins forte que celle pour la salinité. Les écarts observés entre les mesures et les résultats du modèle, surtout la salinité et la température sur le fond à certains endroits en marée de mortes-eaux, peuvent s'expliquer par les limites et incertitudes du modèle, notamment la disponibilité de données plus précises pour le forçage au large du modèle au large. En effet, les profils de température et de salinité imposés au large ont été établis à partir de mesures réalisées durant une autre année (même saison) et à plus de 75 km au sud du site de l'embouchure de la rivière. De plus, le forçage de marée du modèle néglige complètement les effets atmosphériques sur les niveaux d'eau (signal de marée astronomique seul) ainsi que l'effet du vent et des vagues sur les courants et le mélange des masses d'eau. Finalement, il est probable que des changements morphologiques significatifs se soient produits à l'embouchure (flèche littorale et bancs sableux) entre les différentes périodes des relevés bathymétriques et des celles des relevés océanographiques.

Le modèle TELEMAC-3D calibré de l'estuaire a été employé pour simuler une gamme de scénarios de modélisation en conditions de référence et en conditions projetées. Les scénarios en conditions projetées intègrent un ajustement des débits en aval de la centrale SM-1 pour prendre en

considération le futur mode de gestion des débits suivant l'ajout du 3^e groupe T/A à la centrale SM-3. La comparaison des conditions de température et de salinité modélisées à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite pour certaines périodes spécifiques (janvier/février, mai, juin et octobre/novembre) a permis de caractériser la dynamique de l'intrusion saline et d'évaluer l'impact des changements du mode de gestion des débits sur cette dernière.

L'analyse des résultats a révélé que c'est pour la période en débit maximum (janvier/février) que le changement du mode de gestion des débits projetés a le plus d'impact par rapport aux conditions de référence pour la même période. Un déplacement de plus de 2 km vers l'aval de la limite amont de la gamme de positions du front salin est observée en marée de mortes-eaux et environ 1 km en marée de vives-eaux. De manière générale, à l'intérieur de la zone d'influence de l'intrusion saline, la couche d'eau douce en surface est plus importante et la salinité au fond est réduite sans toutefois être complètement éliminée. La réduction maximale de la salinité moyenne sur la colonne d'eau est de l'ordre de 10 PSU dans le secteur de la station ESMA1129 au PK2.

En conditions de débit module pour le mois de mai, le mode de gestion projeté prévoit une légère augmentation des débits. L'impact de cet ajustement est relativement négligeable sur la dynamique de l'intrusion saline à l'intérieur de l'estuaire. En effet, les gammes de positions du front salin et les profils de température et de salinité en conditions projetées sont assez comparables avec les conditions de référence.

En juin, le débit module projeté est réduit de l'ordre de 30% par rapport aux conditions de référence. Cette réduction du débit favorise l'intrusion saline à l'intérieur de l'estuaire. En effet, la limite amont des gammes de positions du front salin est déplacée d'environ 500 m vers l'amont en conditions de marée de mortes-eaux et d'environ 1 km vers l'amont pour les marées de vives-eaux. Cela se traduit de manière générale par une certaine augmentation de la salinité sur la portion de l'estuaire influencée par l'intrusion saline et conséquemment une légère réduction de la couche d'eau douce en surface (particulièrement à marée haute). L'augmentation maximale de la salinité moyennée sur la colonne d'eau est de l'ordre de 5 PSU (station ESMA1129, ~PK2).

Le débit module pour la période d'octobre/novembre est similaire en conditions de référence et en conditions projetées avec le mode de gestion de débits ajusté. Dans ce contexte, le suréquipement de la centrale SM-3 n'a aucun effet sur l'intrusion saline à l'intérieur de l'estuaire pour cette période de l'année. Il est tout de même important de préciser qu'il s'agit de la période de l'année avec les débits les plus faibles et conséquemment une pénétration plus importante du front salin à l'intérieur de l'estuaire. En effet, en marée de vives-eaux, la limite la plus en amont du front salin se situe au-delà du PK6 (tout juste en aval des chutes).

La modélisation numérique a servi de base pour caractériser l'intrusion saline à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite et ainsi évaluer l'impact potentiel des changements qu'Hydro-Québec veut apporter au mode de gestion des débits avec l'ajout du 3^e groupe T/A à la centrale SM-3. Les différences entre les conditions de références et projetées sont

principalement saisonnières, et surtout en hiver et en été. Toutefois, sur un cycle annuel complet, les masses d'eau douce et d'eau salée vont continuer à transiter dans l'estuaire en conditions projetées comme en conditions de références. Les résultats de modélisation produits et analysés devront être utilisés pour évaluer si les changements anticipés sur les conditions de température et de salinité pourraient avoir des impacts significatifs sur les habitats naturels du milieu. Dans ce contexte, il est important de réitérer que malgré le travail de calibration, le modèle hydrodynamique 3D s'accompagne de plusieurs limites et incertitudes. Ainsi, il est recommandé que des suivis post-travaux soient effectués pour documenter, de manière complémentaire au travail de modélisation, les changements sur la dynamique des masses d'eau à l'intérieur de l'estuaire.

L'analyse des vitesses d'écoulement et des contraintes de cisaillement sur le fond à l'embouchure de la rivière extraites des résultats du modèle hydrodynamique a permis d'évaluer sommairement l'impact potentiel du mode de gestion des débits sur la dynamique sédimentaire de ce secteur. Toutefois, considérant que le modèle utilisé n'est pas un modèle à fond mobile (aucune modélisation de l'évolution morphologique du fond) et que l'effet des vagues sur la dynamique sédimentaire est complètement négligé (transport littoral), ces analyses doivent être interprétées avec prudence. Une modélisation hydrosédimentaire complète combinée à des suivis rigoureux suivant la mise en place du nouveau mode de gestion des débits sont fortement recommandés. Les résultats saillants de cette analyse de mobilité des matériaux à très haut niveau se résument à :

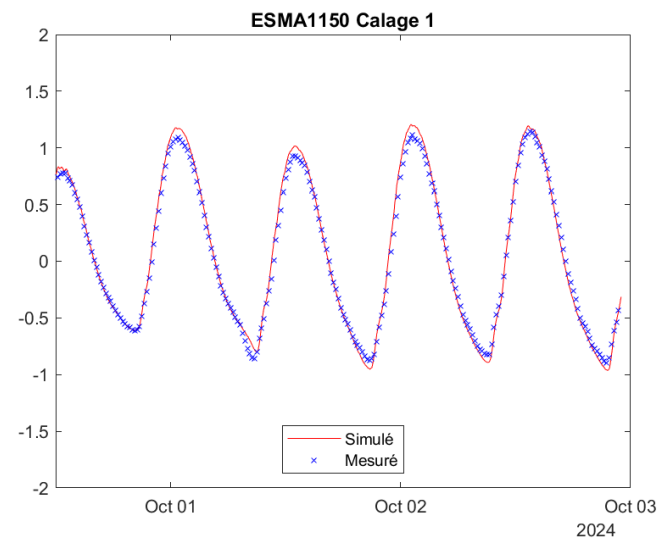
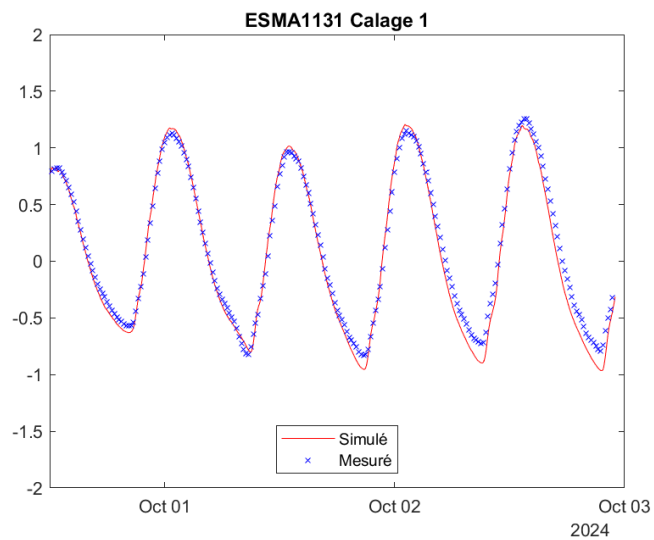
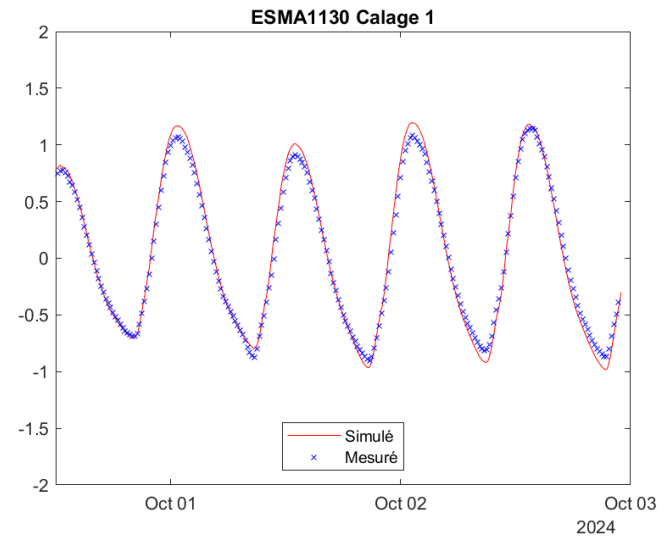
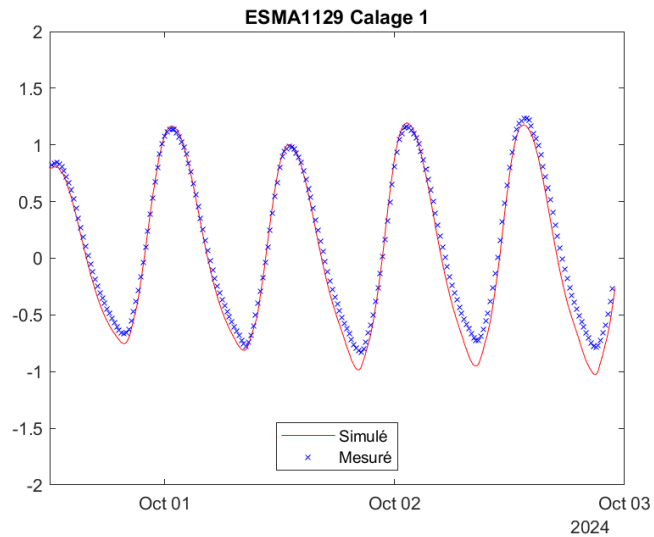
- Pour l'augmentation du débit en janvier février, l'analyse des contraintes de cisaillement sur le fond au jusan montre qu'il y a un potentiel de transport sédimentaire pour du gravier fin et du gravier moyen à l'embouchure (dans l'axe de la flèche littorale) autant en conditions de référence qu'en conditions projetées malgré des vitesses plus élevées en conditions futures. Au flot, le potentiel de transport sédimentaire est davantage limité au sable grossier en conditions futures alors qu'il y a un potentiel de mobilité de matériaux plus grossiers en conditions actuelles.
- Au mois de juin, la diminution du débit provoque une légère augmentation des vitesses qui entre à l'intérieur de l'estuaire au flot. Cela engendre une légère augmentation des contraintes de cisaillement sur le fond en conditions projetées qui augmente légèrement le potentiel de transport pour du gravier fin comparativement aux conditions de référence. Des gradients plus élevés sont notés le long de la rive droite en amont de la flèche qui pourrait se traduire par un potentiel d'érosion de berge dans ce secteur.
- Aucun changement au mode de gestion des débits n'est anticipé sur le potentiel de mobilité des sédiments en mai ni à l'automne.

9 RÉFÉRENCES

- EGBERT, G.D., BENNETT, A.F. & FOREMAN, M.G.G. 1994. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99 (C12), 2156-2202.
- EGBERT, G.D. & EROFEEVA, S.Y. 2002. Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19, 183-204.
- LASALLE|NHC. 2024. R.0649 - Ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale Sainte-Marguerite 3 – Étude du régime des glaces-60%.
- GALBRAITH, P.S., CHASSE, J., SHAW, J.-L., LEFAIVRE, D. et BOURASSA, M.-N. 2025. Physical Oceanographic Conditions in the Gulf of St. Lawrence during 2024. *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci.* 397: v + 95 p.
- GALBRAITH, P.S., CHASSE, J., SHAW, J.-L., DUMAS, J. et BOURASSA, M.-N. 2024. Physical Oceanographic Conditions in the Gulf of St. Lawrence during 2023. *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci.* 378: v + 91 p.
- GALBRAITH, P.S., CHASSE, J., SHAW, J.-L., DUMAS, J., LEFAIVRE, D. et BOURASSA, M.-N. 2023. Physical Oceanographic Conditions in the Gulf of St. Lawrence during 2022. *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci.* 354: v + 88 p.
- GALBRAITH, P.S., CHASSE, J., DUMAS, J., SHAW, J.-L., CAVERHILL, C., LEFAIVRE, D. et LAFLEUR, C. 2022. Conditions océanographiques physiques dans le golfe du Saint-Laurent en 2021. *Pêches et Océans Canada, Doc. de rech.* 2020/030. iv + 84 p.
- GALBRAITH, P.S., CHASSE, J., SHAW, J.-L., DUMAS, J., CAVERHILL, C., LEFAIVRE, D. et LAFLEUR, C. 2020. Conditions océanographiques physiques dans le golfe du Saint-Laurent en 2019. *Pêches et Océans Canada, Doc. de rech.* 2020/030. iv + 84 p.
- GALBRAITH, P.S., CHASSE, J., CAVERHILL, C., NICOT, P., GILBERT, D., LEFAIVRE, D. et LAFLEUR, C. 2019. Conditions océanographiques physiques dans le golfe du Saint-Laurent en 2018. *Pêches et Océans Canada, Doc. de rech.* 2019/046. iv + 83 p.
- OPEN TELEMAC-MASCARET. 2022. TELEMAC-3D – User Manual – Version v8p4, 109 pages.

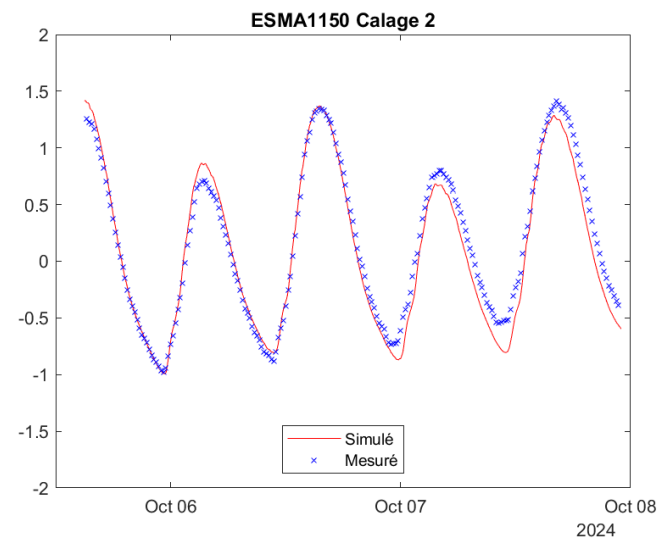
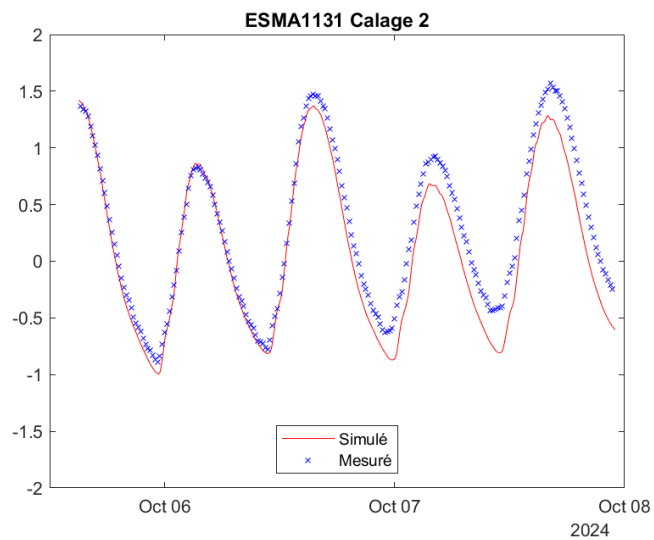
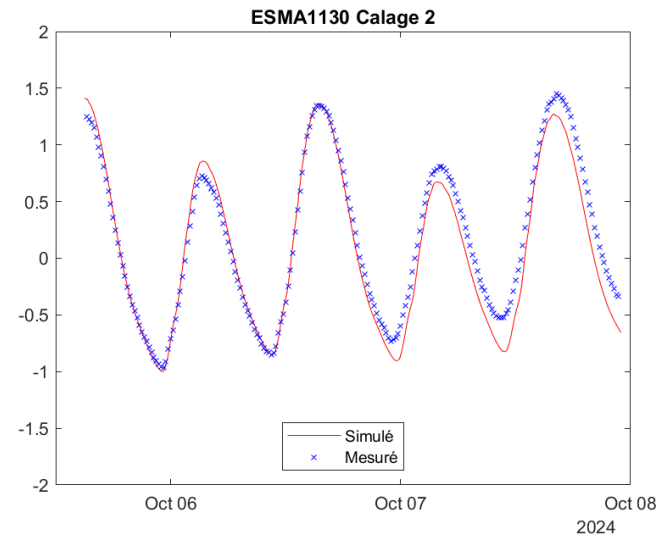
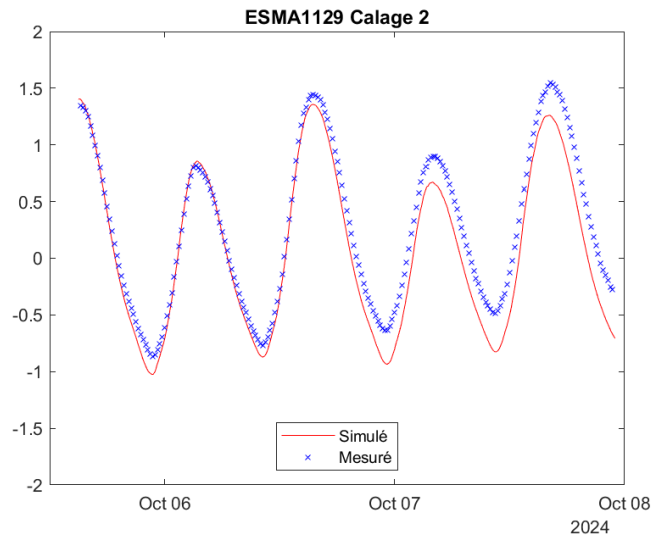
ANNEXE A

FIGURES DU CALAGE DE L'HYDRAULIQUE



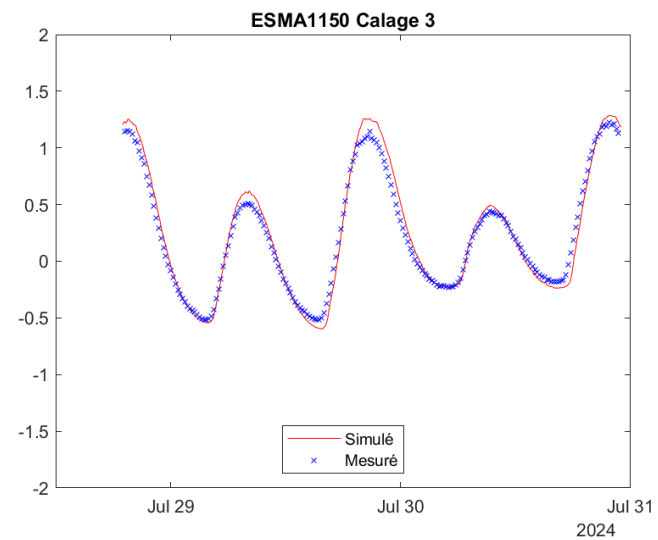
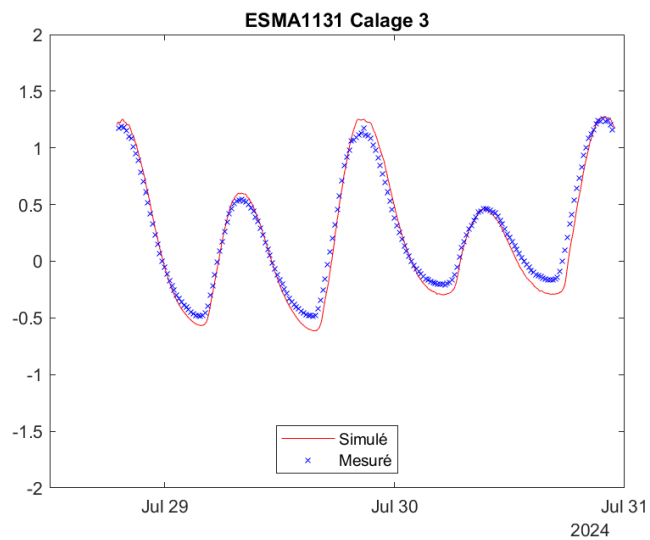
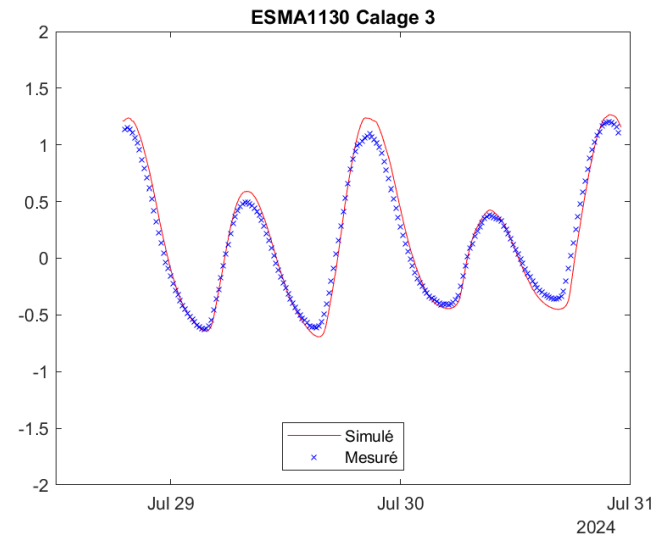
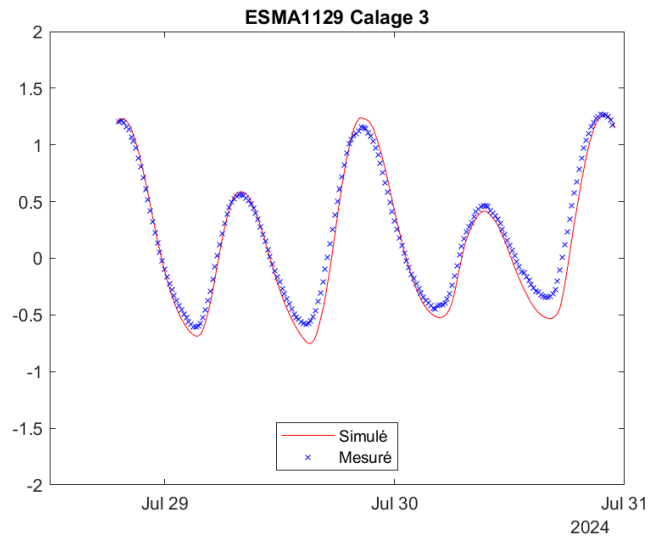
Comparaison des données de mouillage aux valeurs de simulation – Calage 1

Ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale Sainte-Marguerite
Étude des conditions hydrauliques en rivière - Tronçon SM-1-Estuaire – 100%



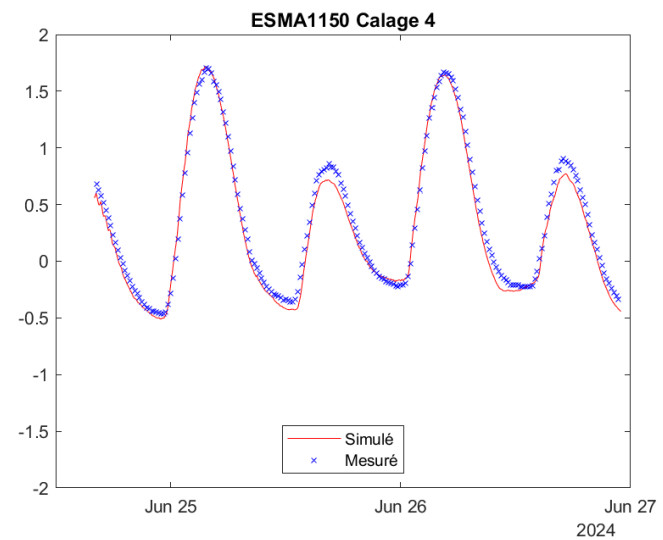
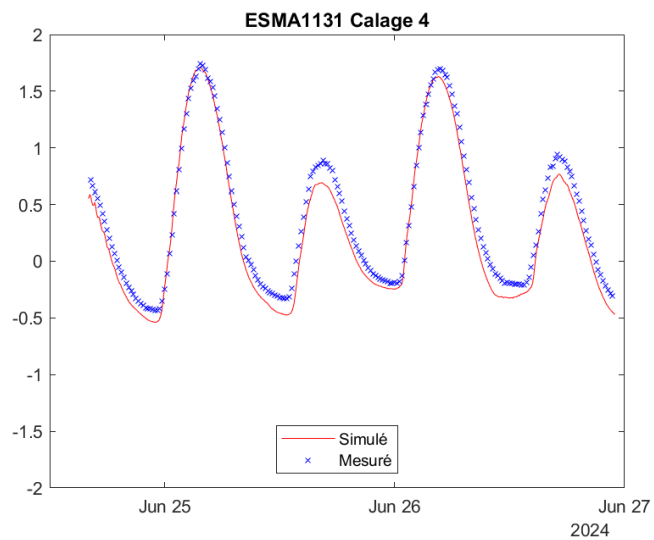
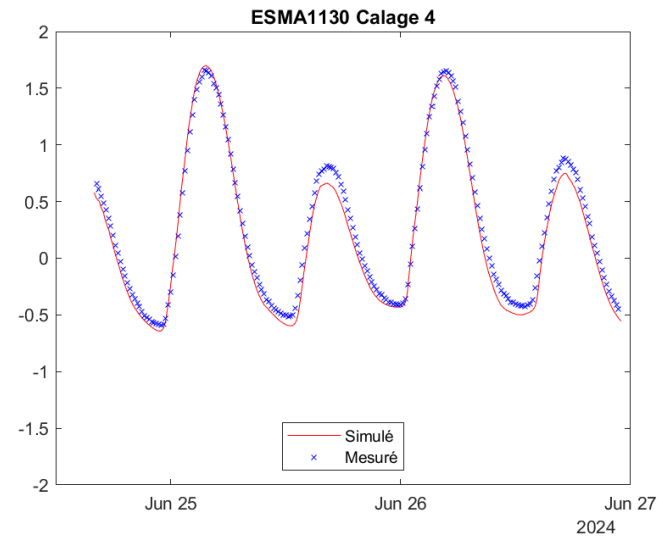
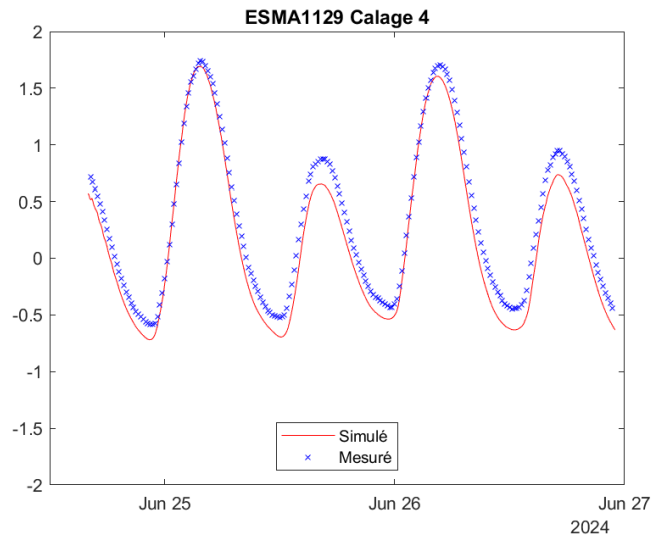
Comparaison des données de mouillage aux valeurs de simulation – Calage 2

Ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale Sainte-Marguerite
Étude des conditions hydrauliques en rivière - Tronçon SM-1-Estuaire – 100%



Comparaison des données de mouillage aux valeurs de simulation – Calage 3

Ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale Sainte-Marguerite
Étude des conditions hydrauliques en rivière - Tronçon SM-1-Estuaire – 100%

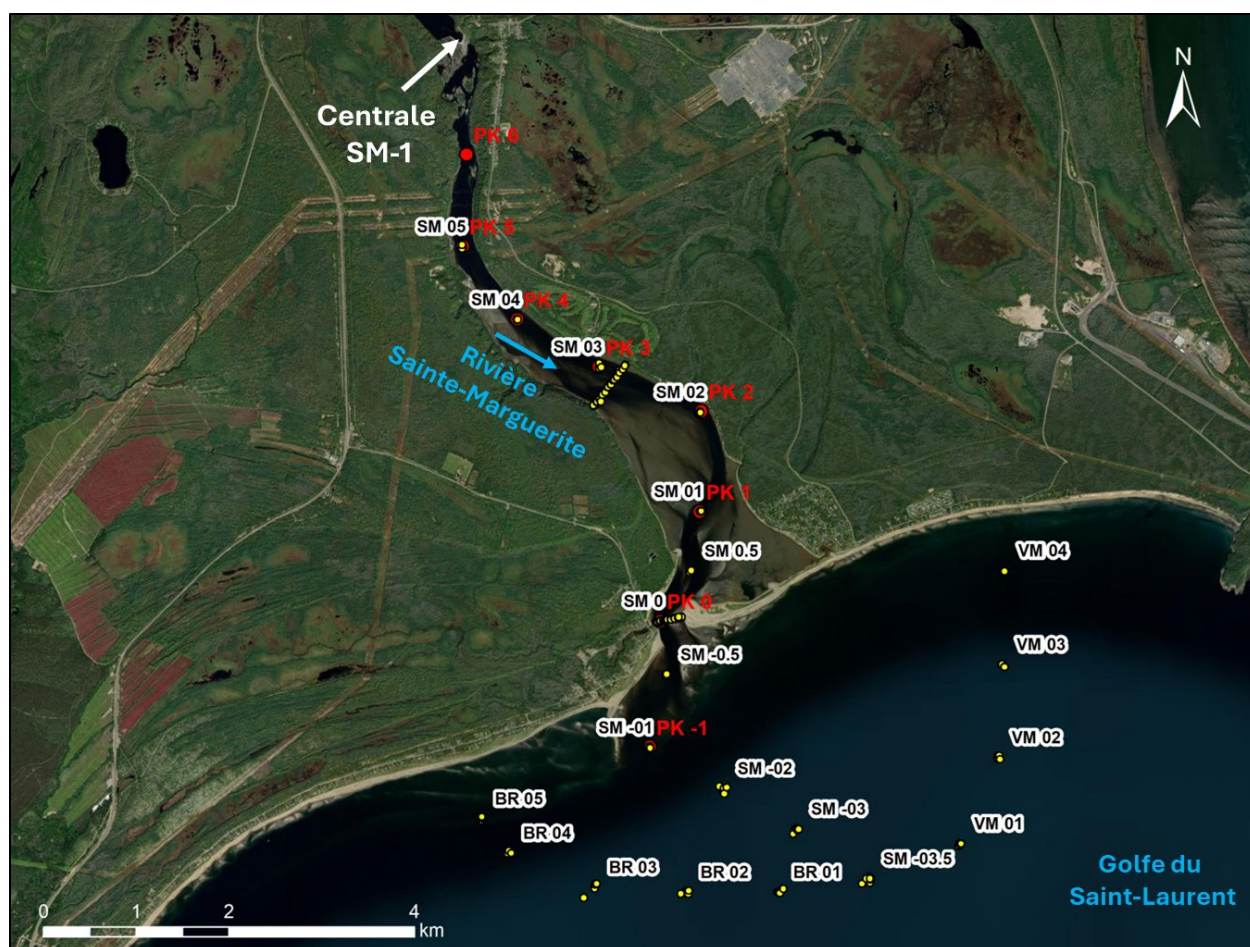


Comparaison des données de mouillage aux valeurs de simulation – Calage 4

Ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale Sainte-Marguerite
Étude des conditions hydrauliques en rivière - Tronçon SM-1-Estuaire – 100%

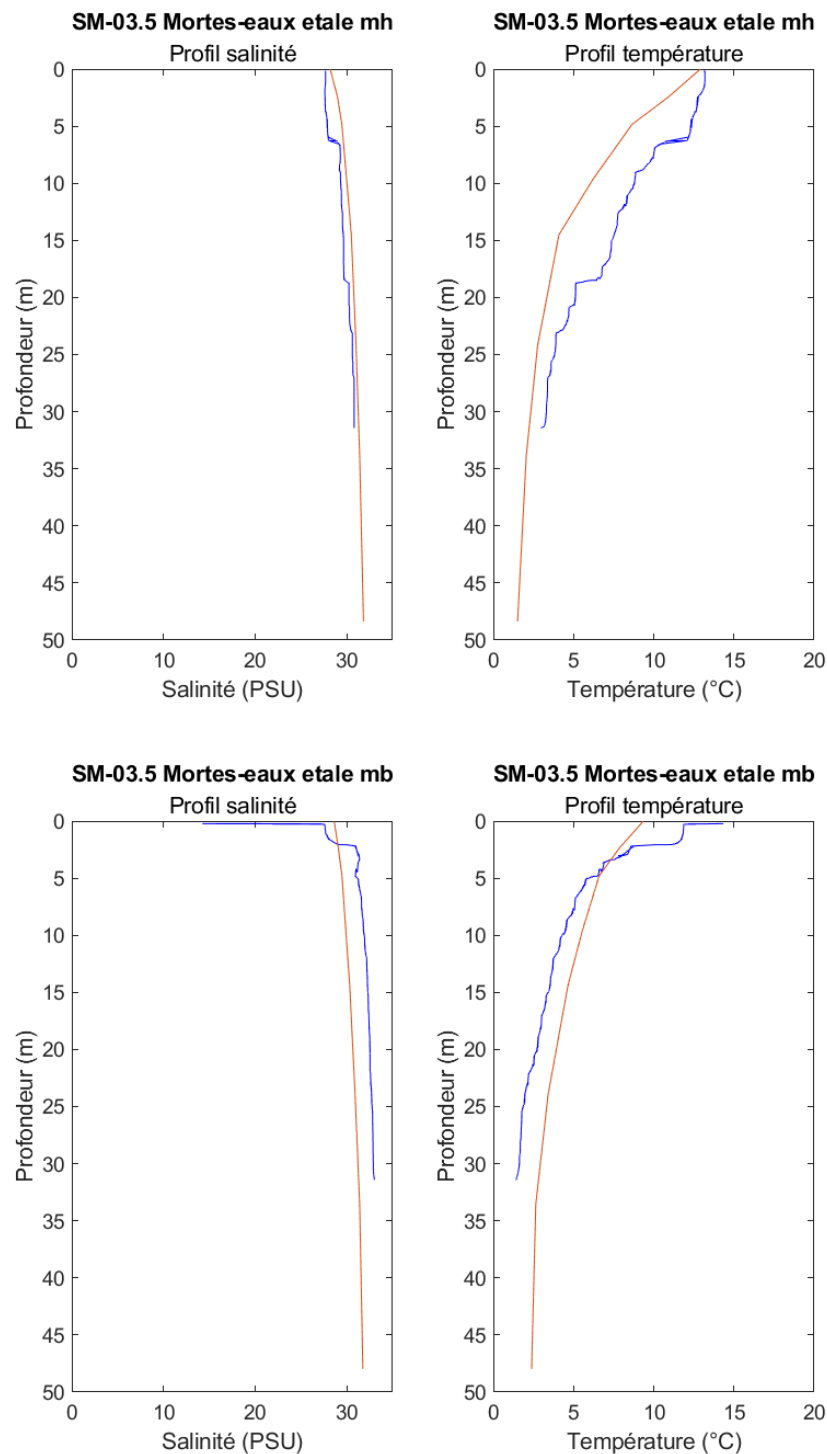
ANNEXE B

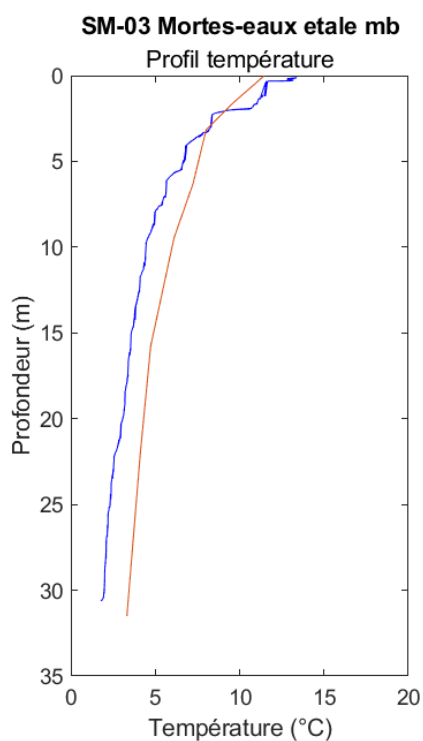
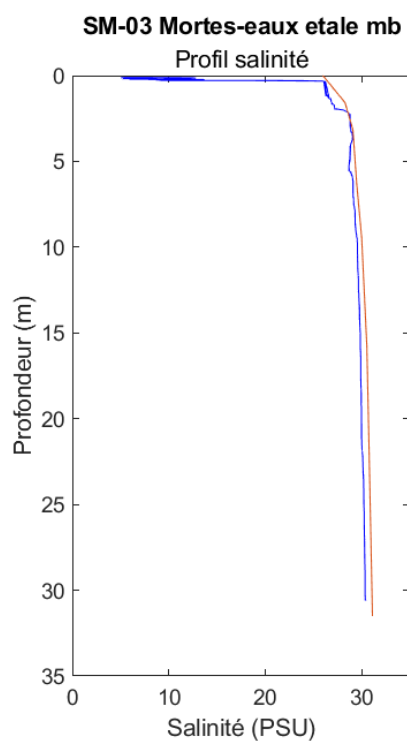
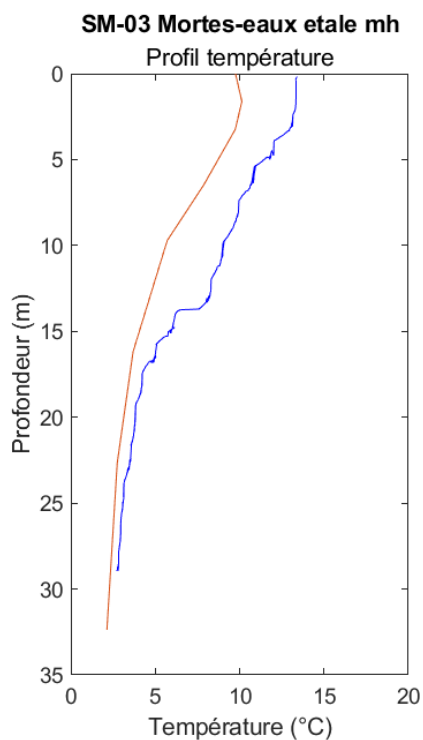
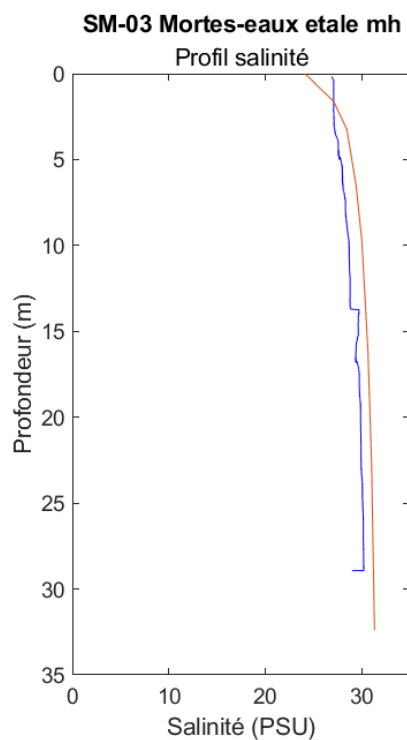
PROFILS DE TEMPÉRATURE ET DE SALINITÉ MESURÉS (PROFILS CTD) ET MODÉLISÉS (TELEMAC-3D) EN CONDITIONS DE MARÉES DE MORTES-EAUX (CAMPAGNE 1A)

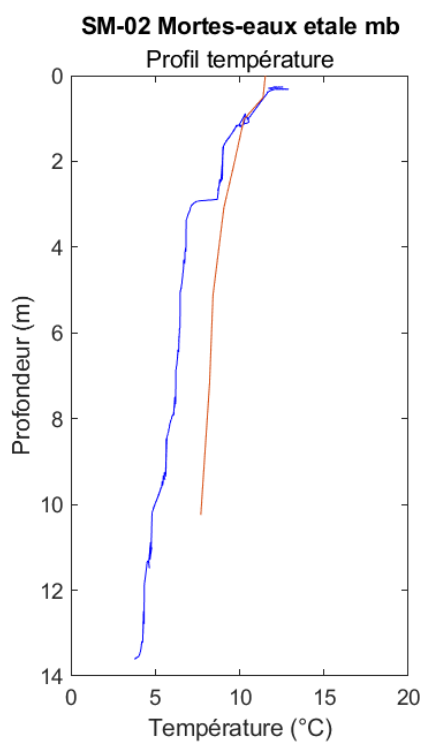
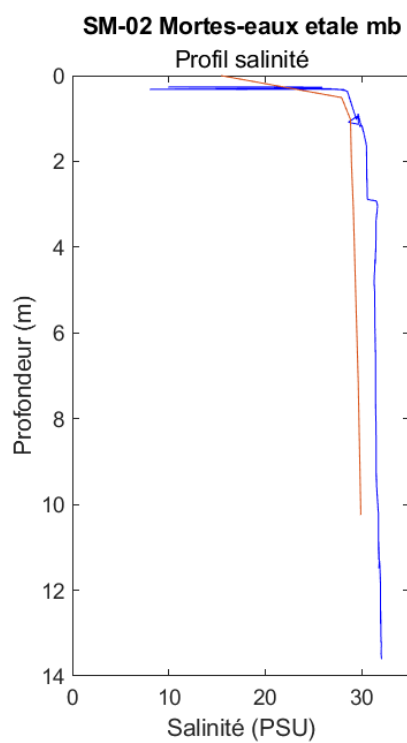
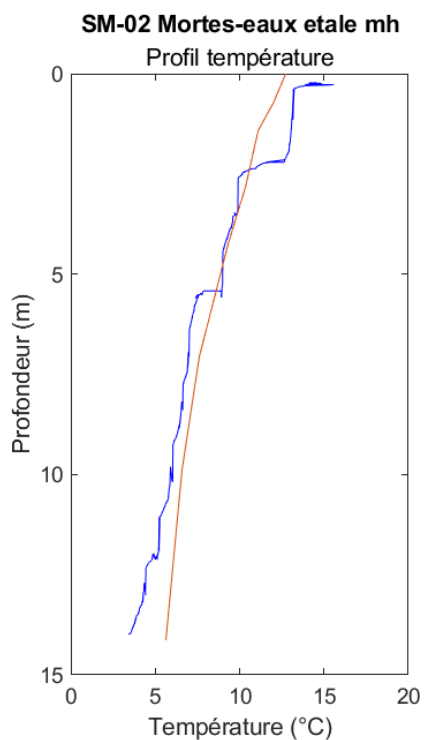
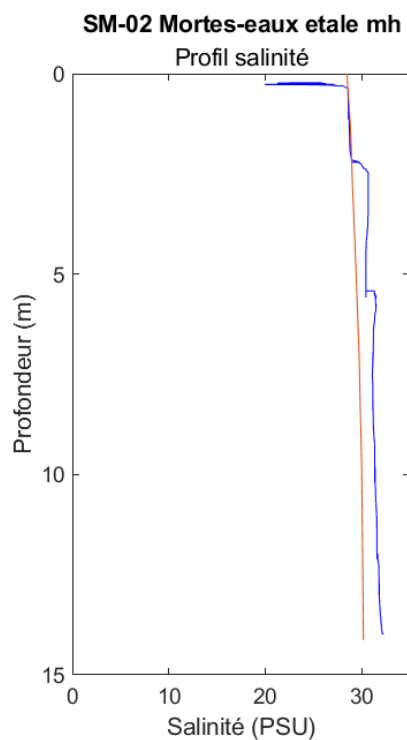


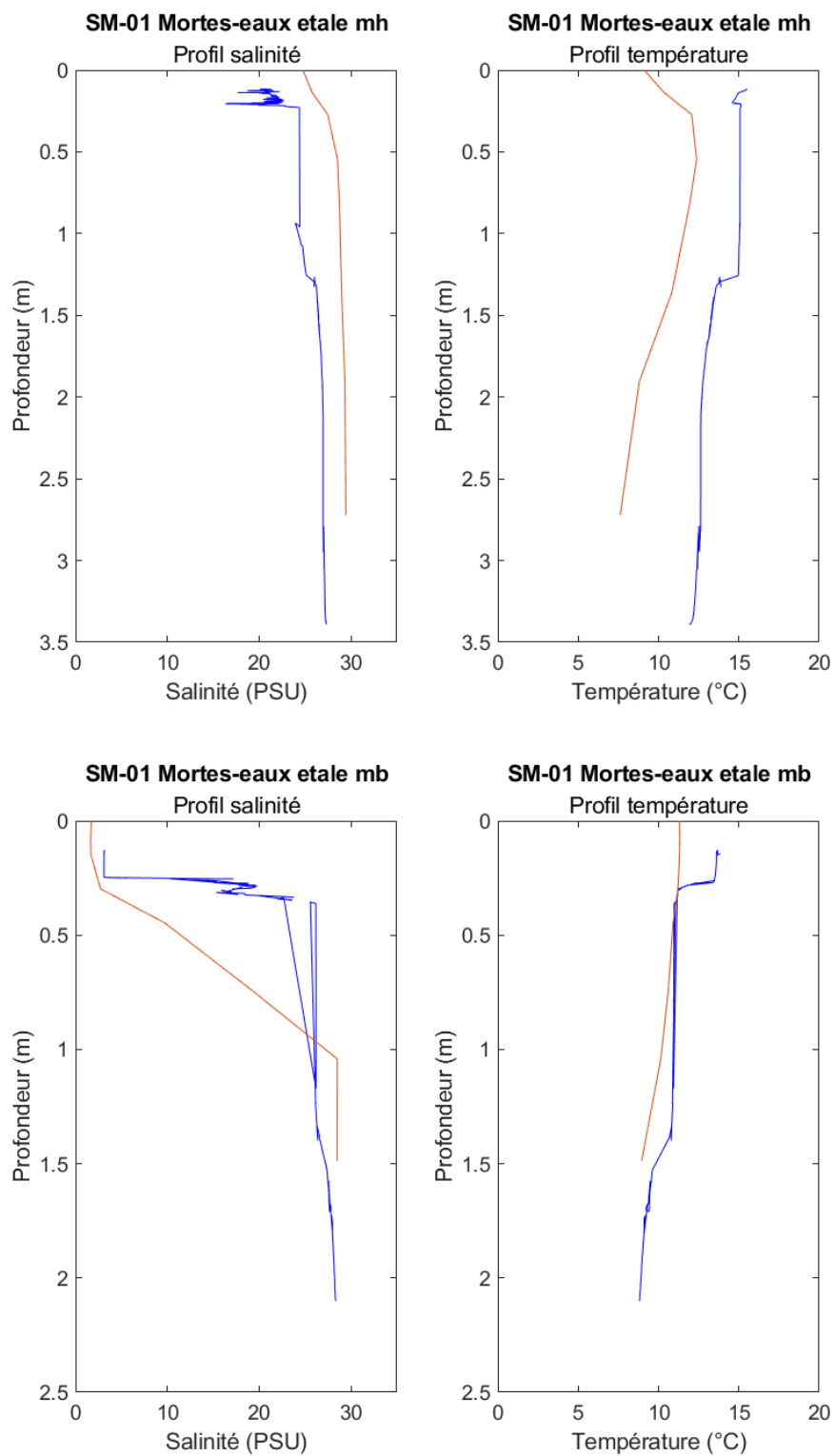
Carte de localisation des profils CTD

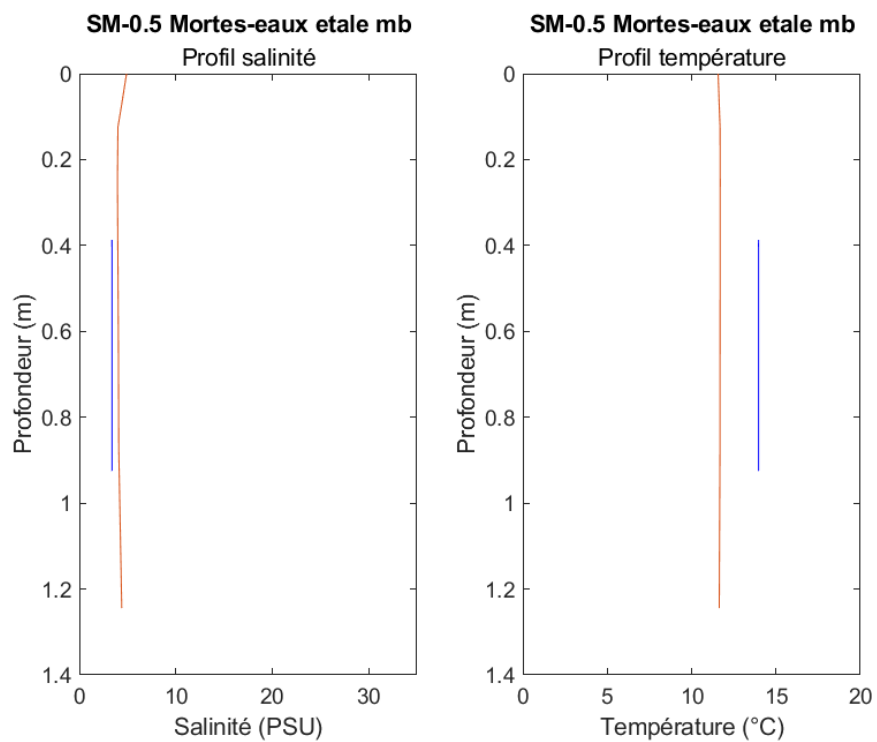
Sur les profils de température et de salinité ci-dessous, les courbes en bleu correspondent aux mesures (profils CTD) et les courbes en rouge correspondent aux conditions modélisées (TELEMAC-3D).

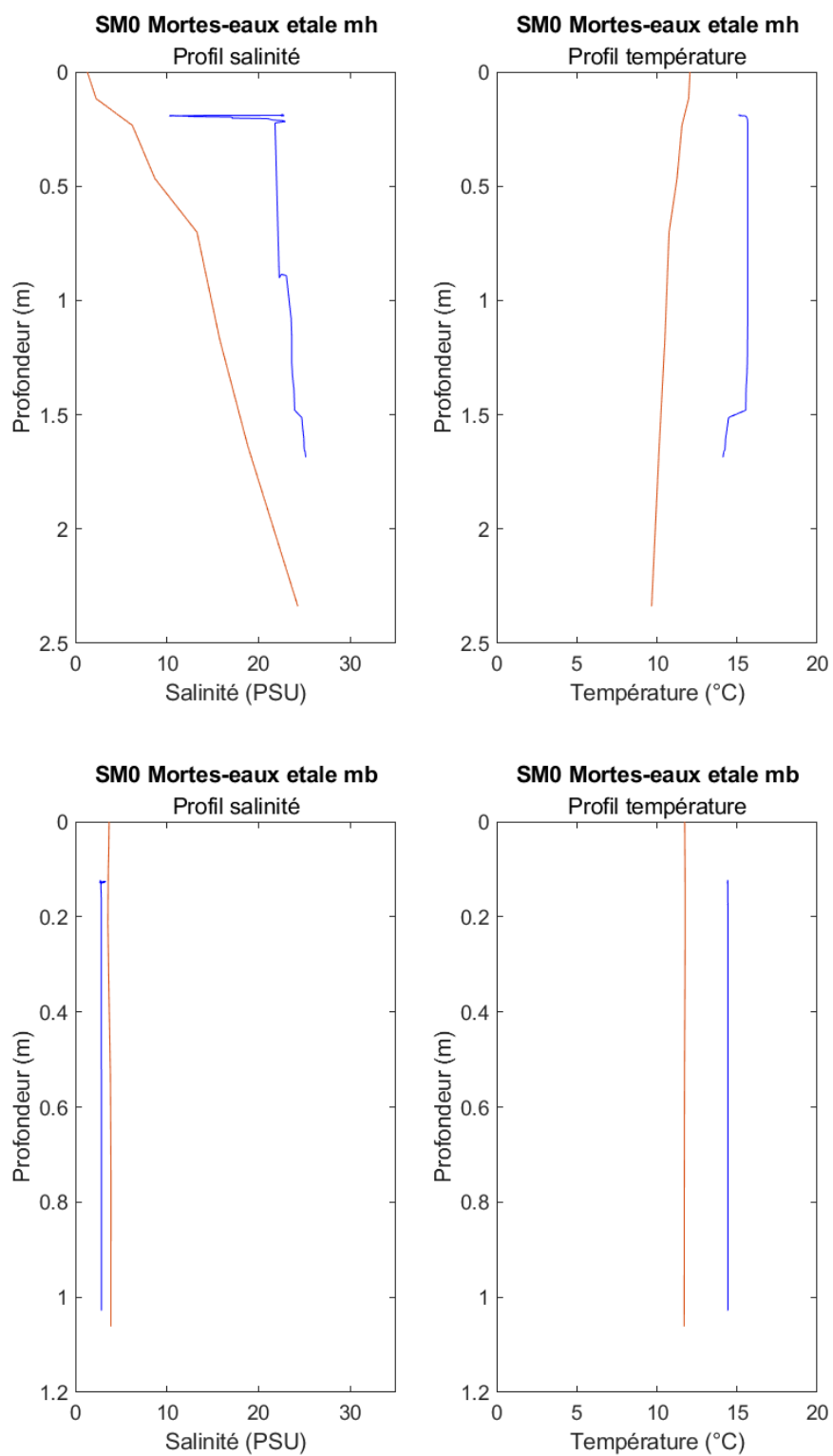


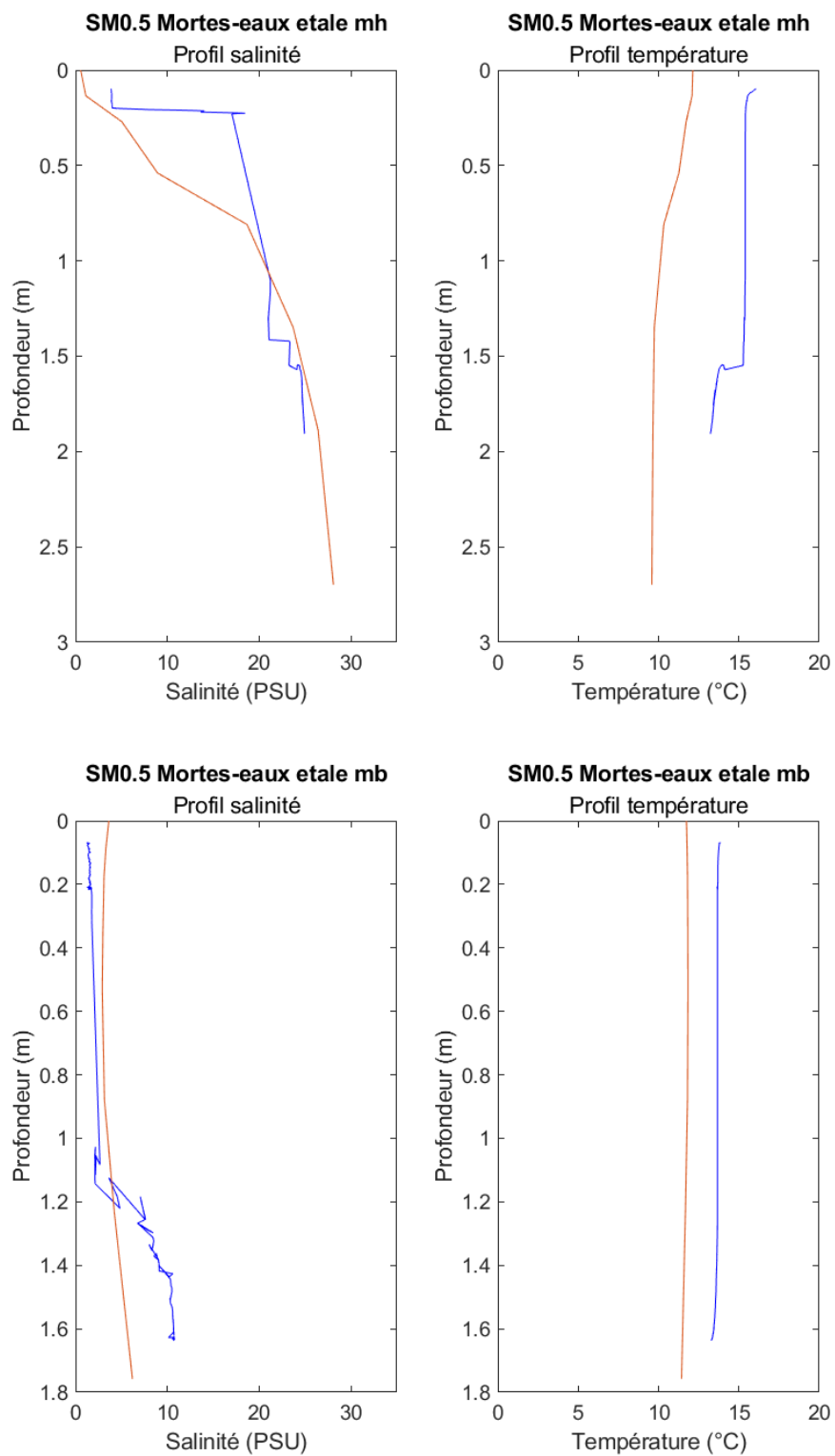


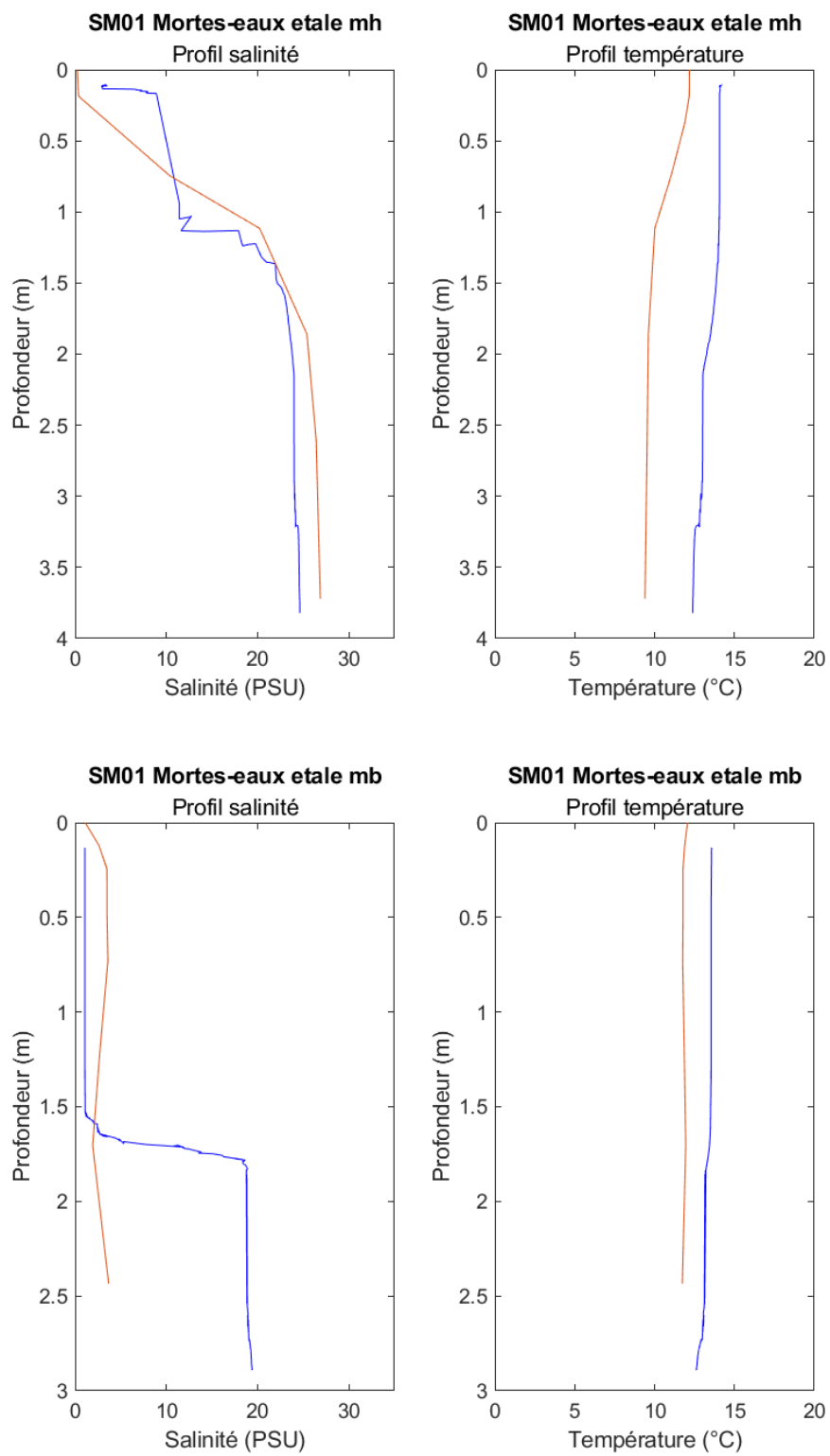


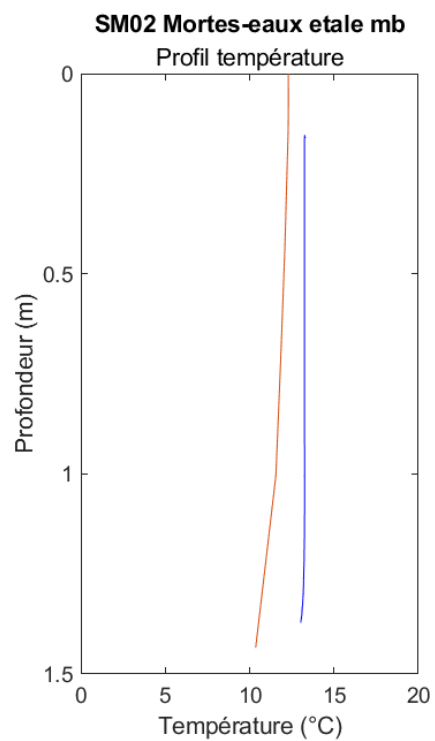
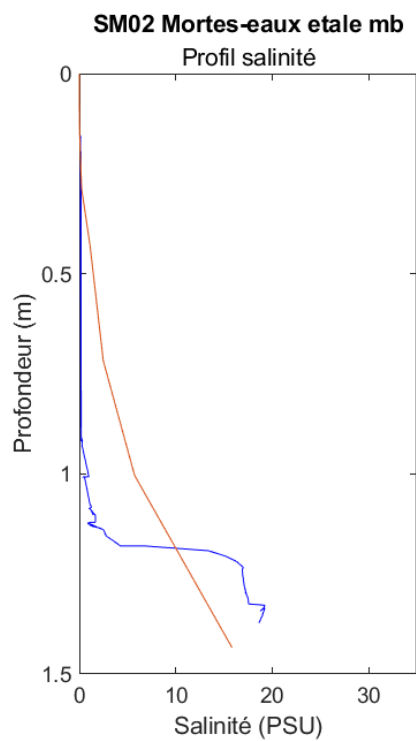
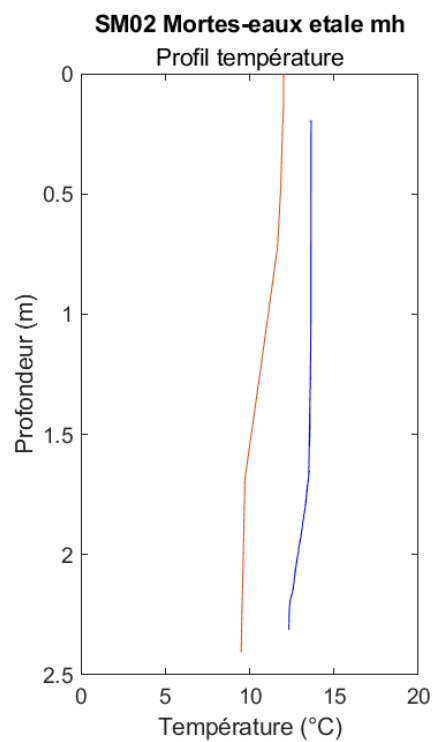
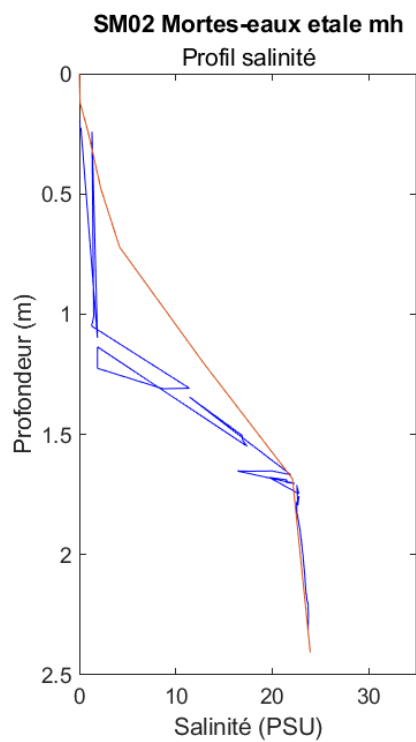


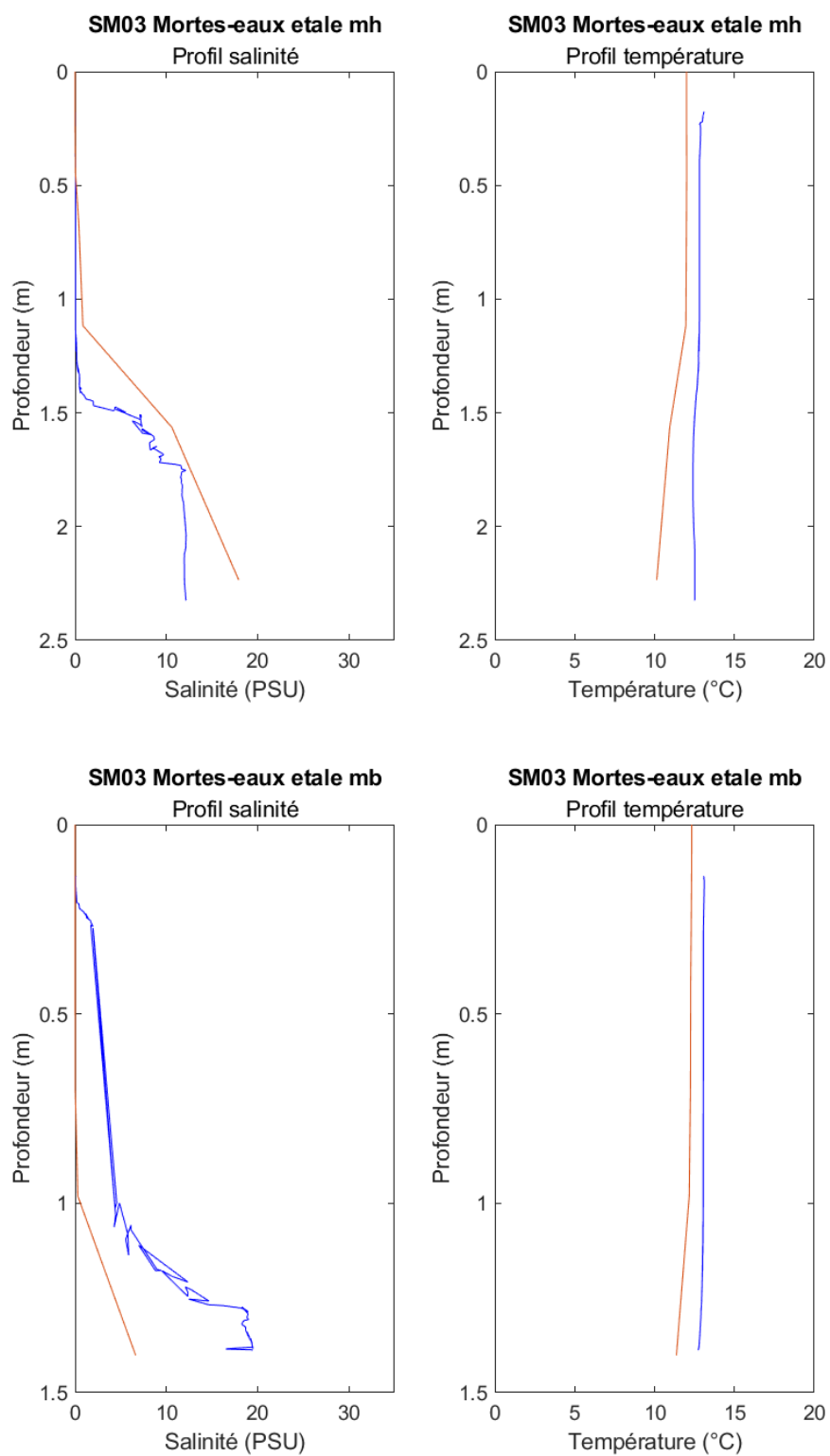


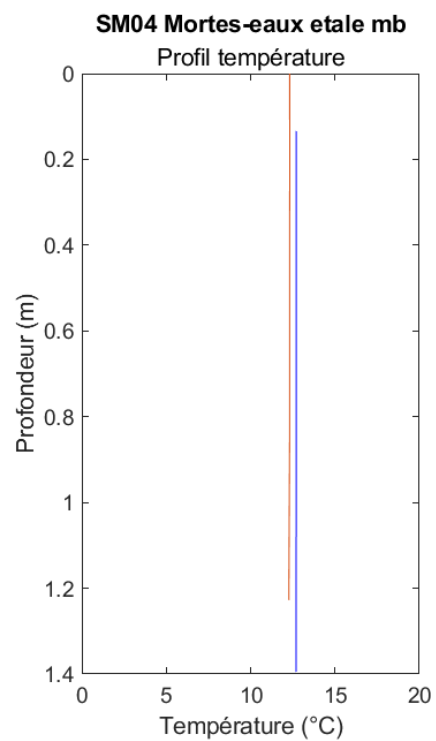
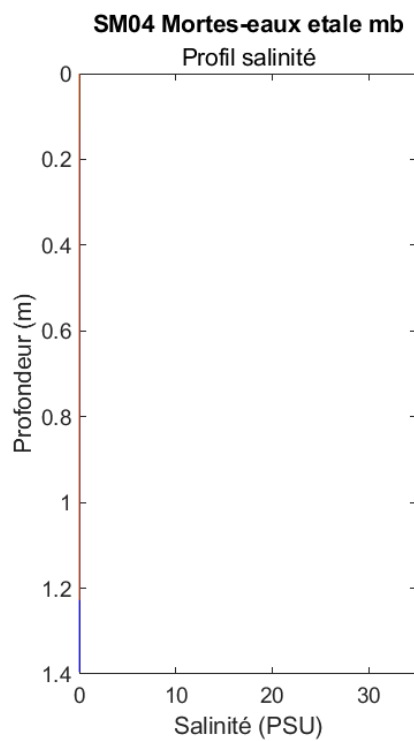
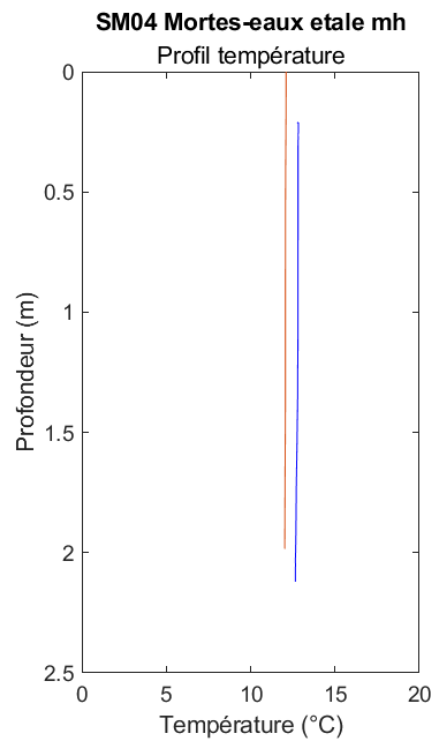
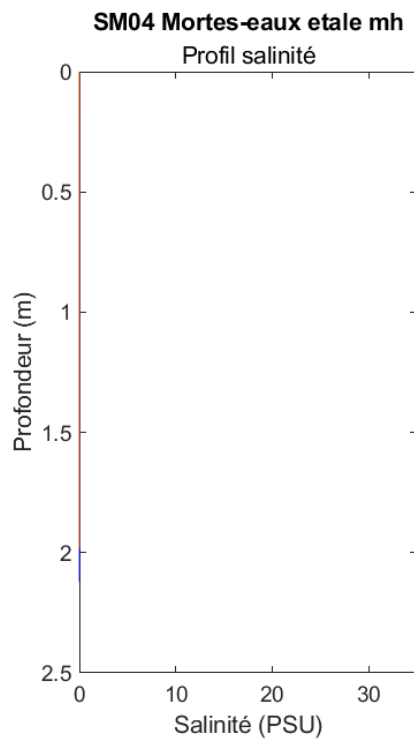


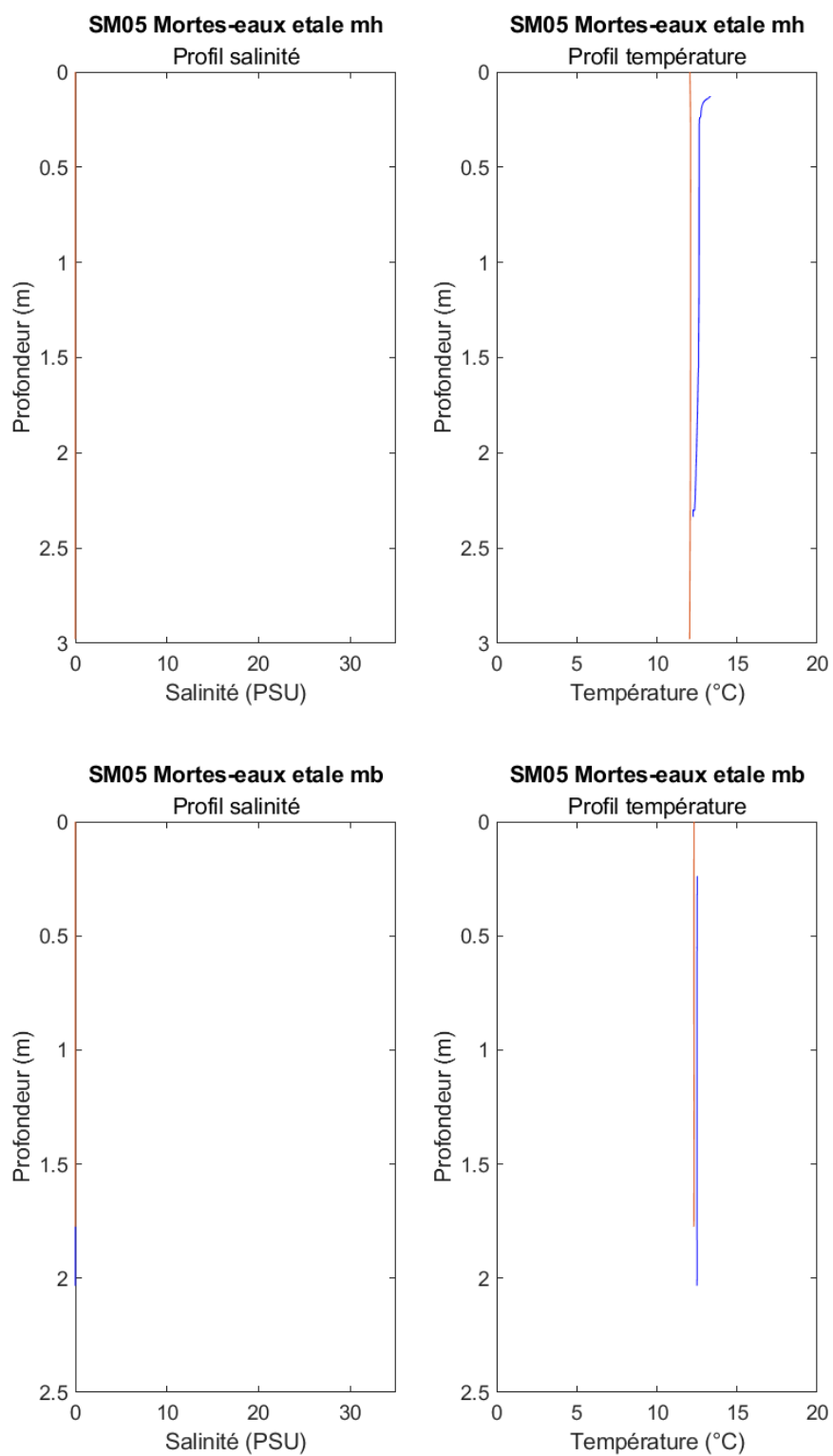






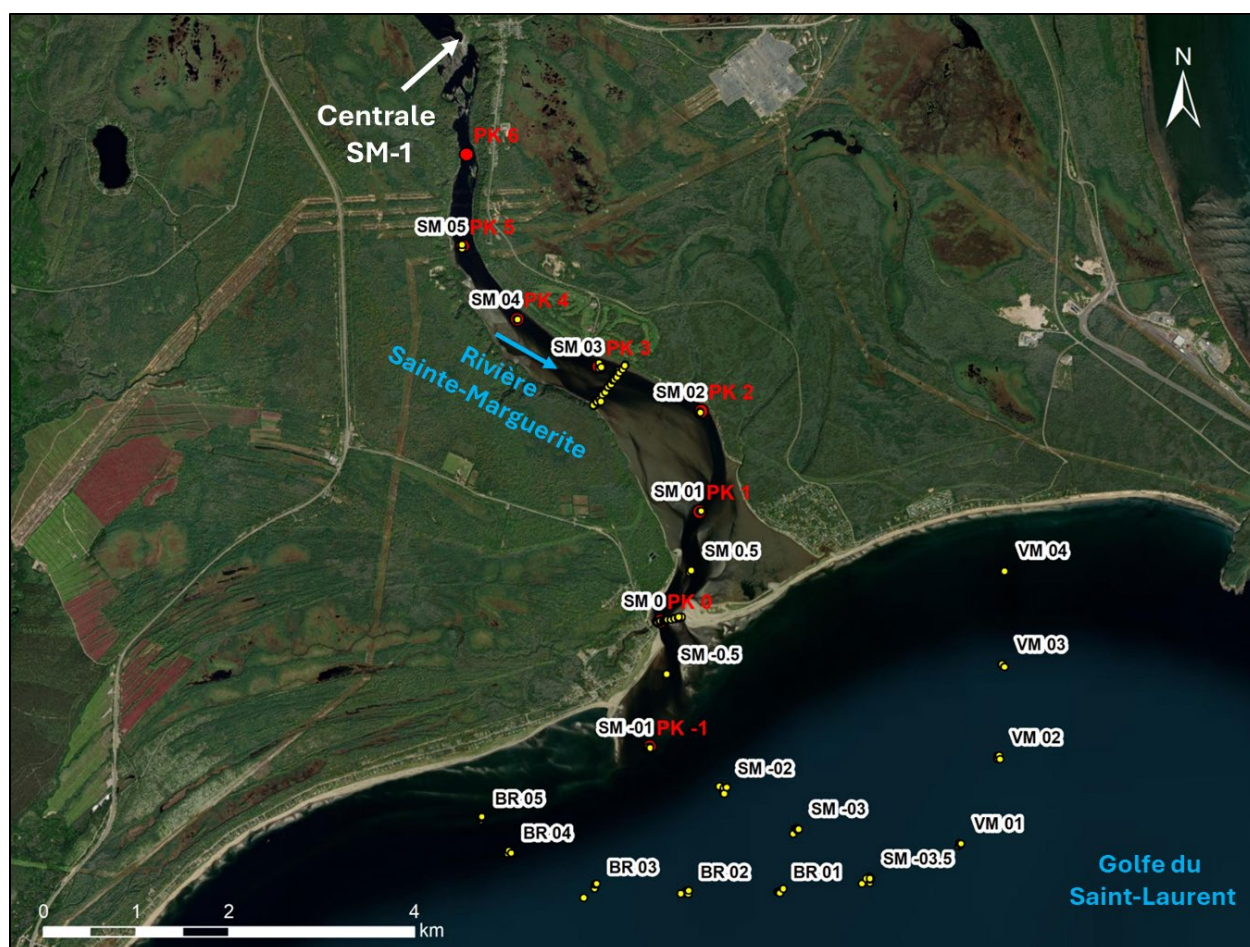






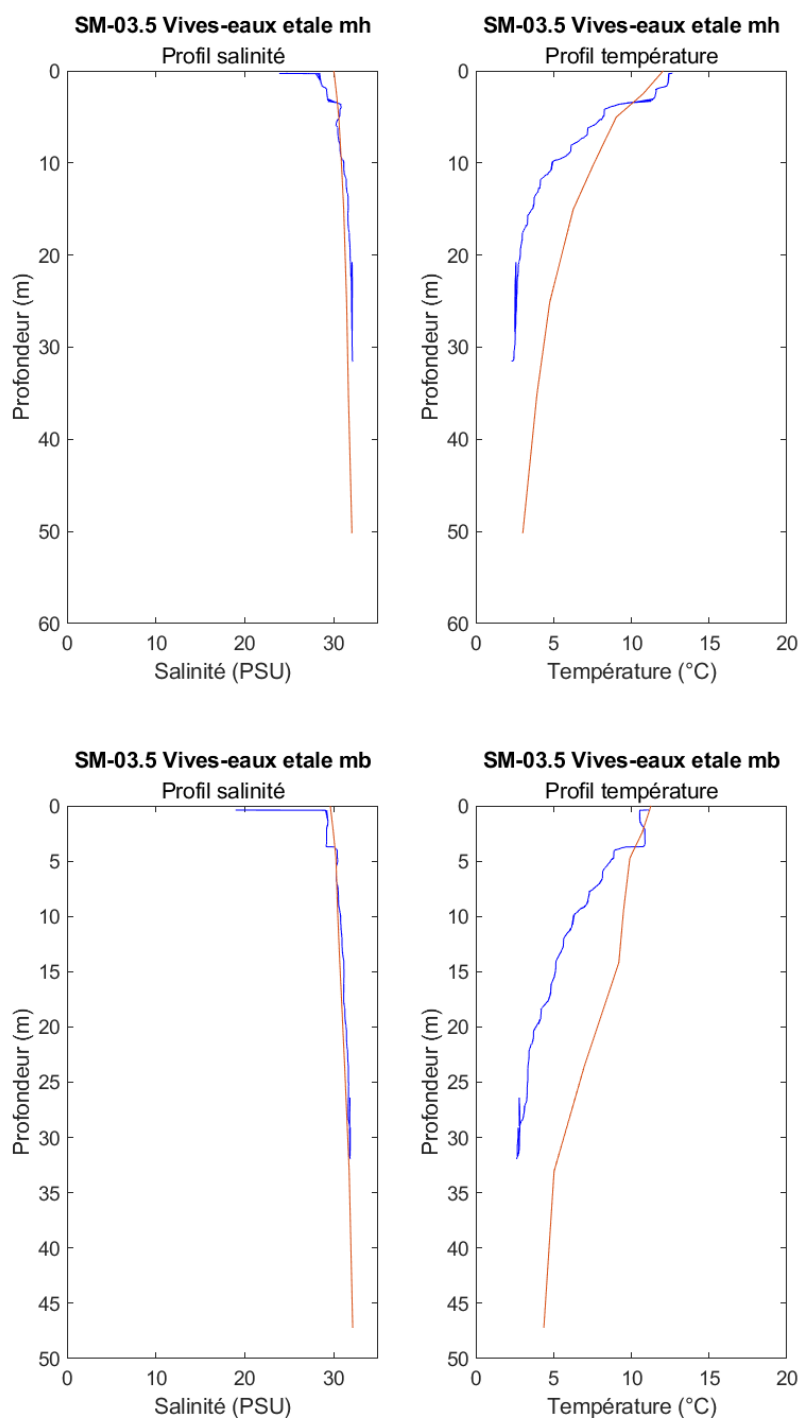
ANNEXE C

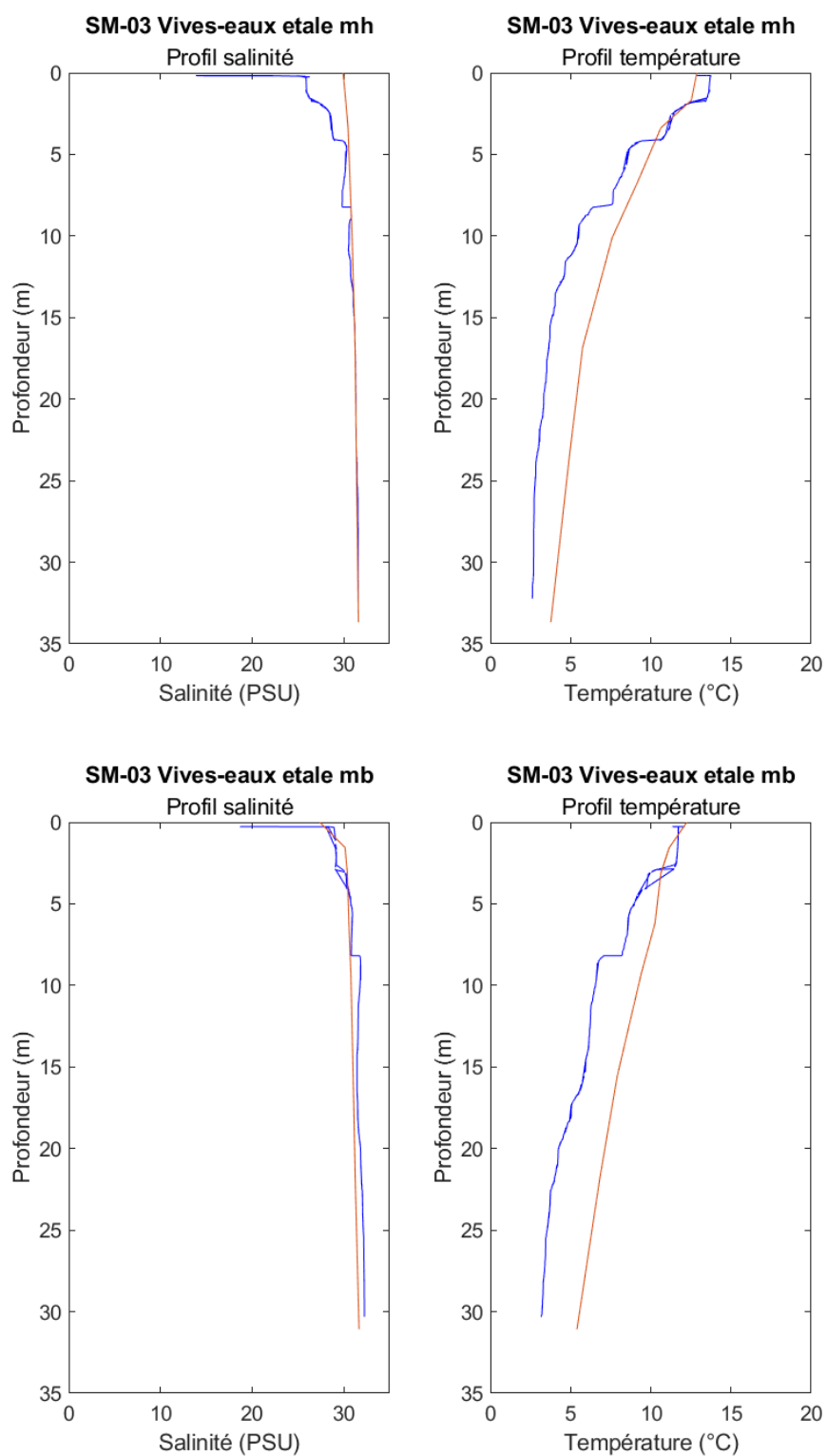
PROFILS DE TEMPÉRATURE ET DE SALINITÉ MESURÉS (PROFILS CTD) ET MODÉLISÉS (TELEMAC-3D) EN CONDITIONS DE MARÉES DE VIVES-EAUX (CAMPAGNE 2)

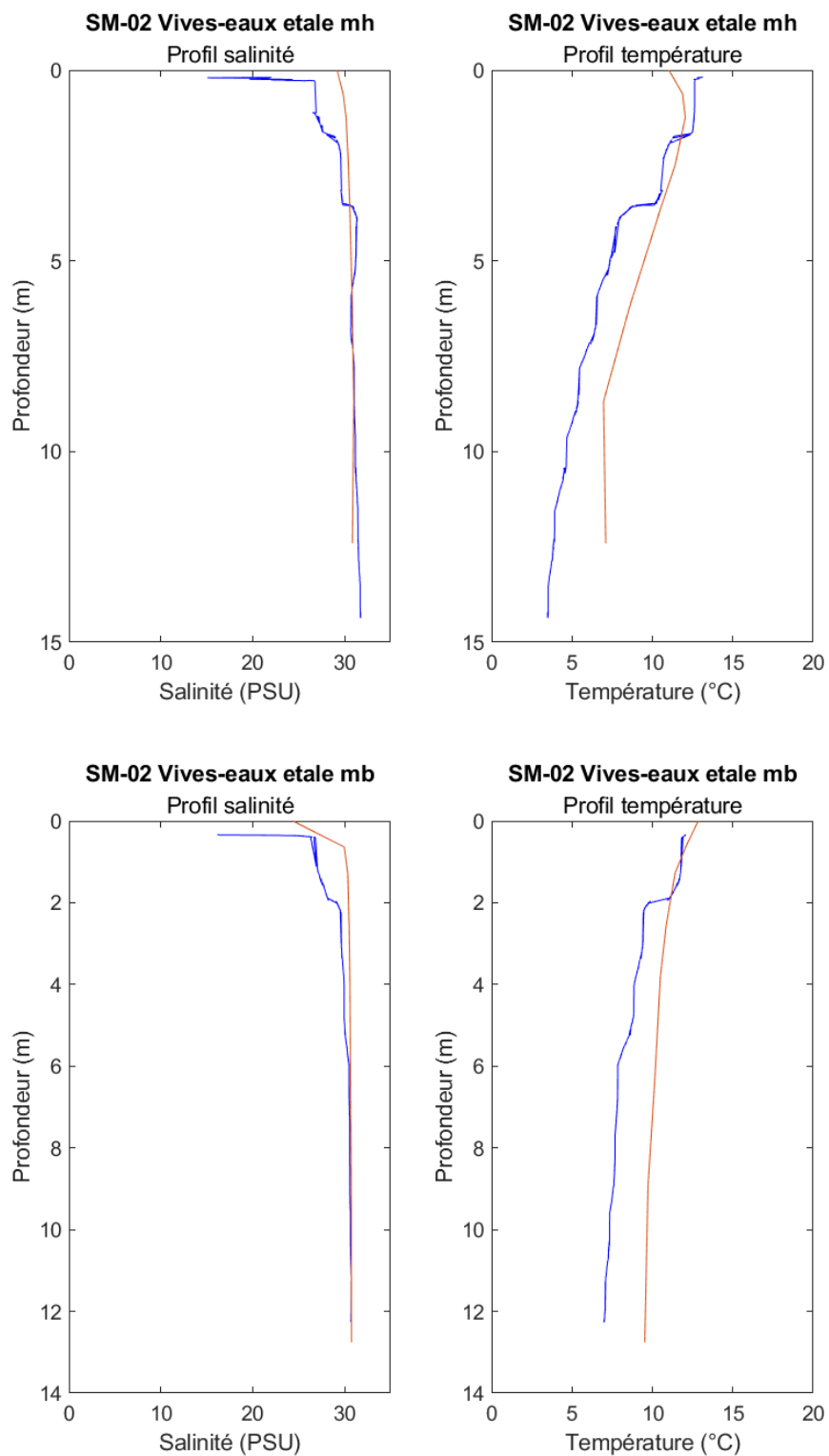


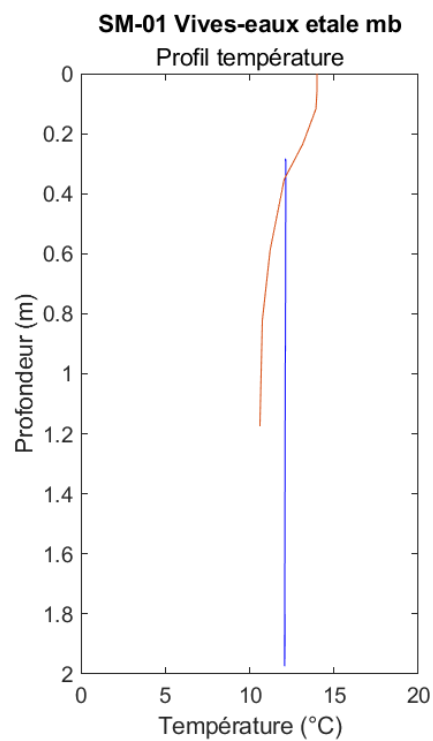
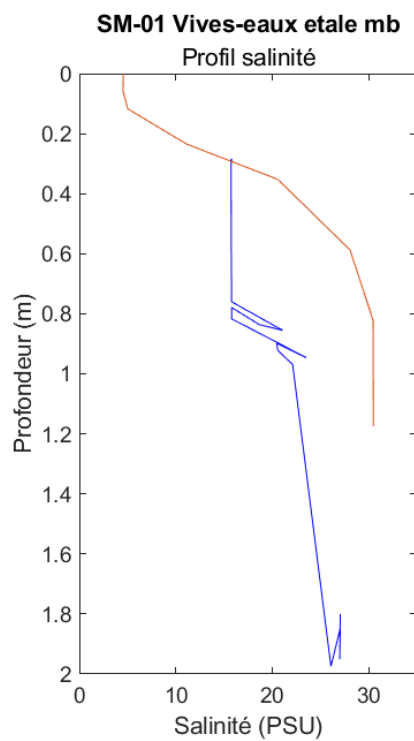
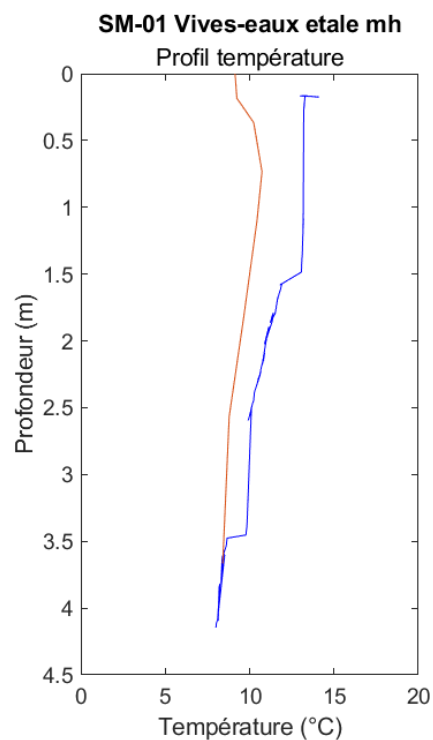
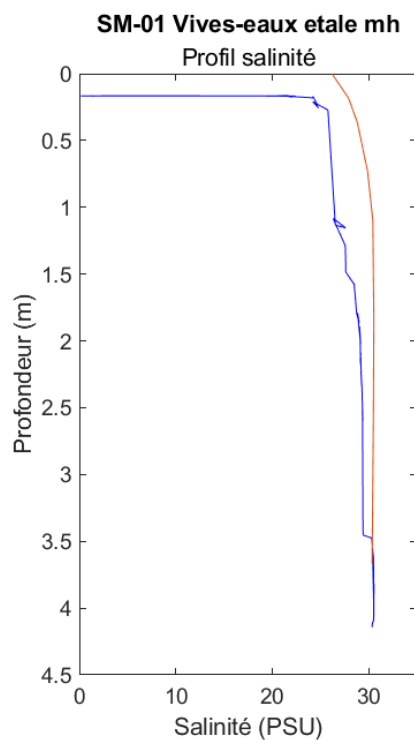
Carte de localisation des profils CTD

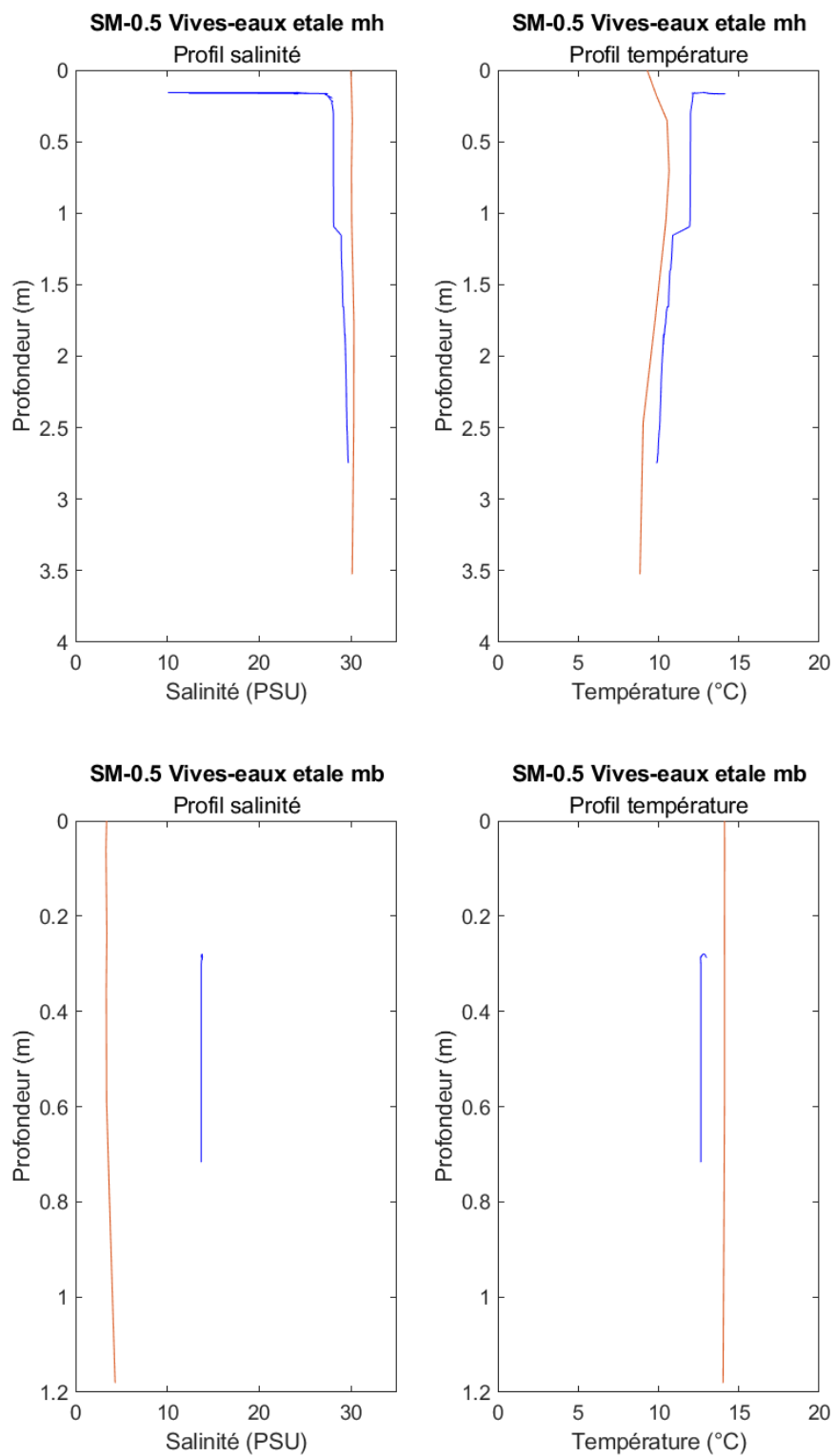
Sur les profils de température et de salinité ci-dessous, les courbes en bleu correspondent aux mesures (profils CTD) et les courbes en rouge correspondent aux conditions modélisées (TELEMAC-3D).

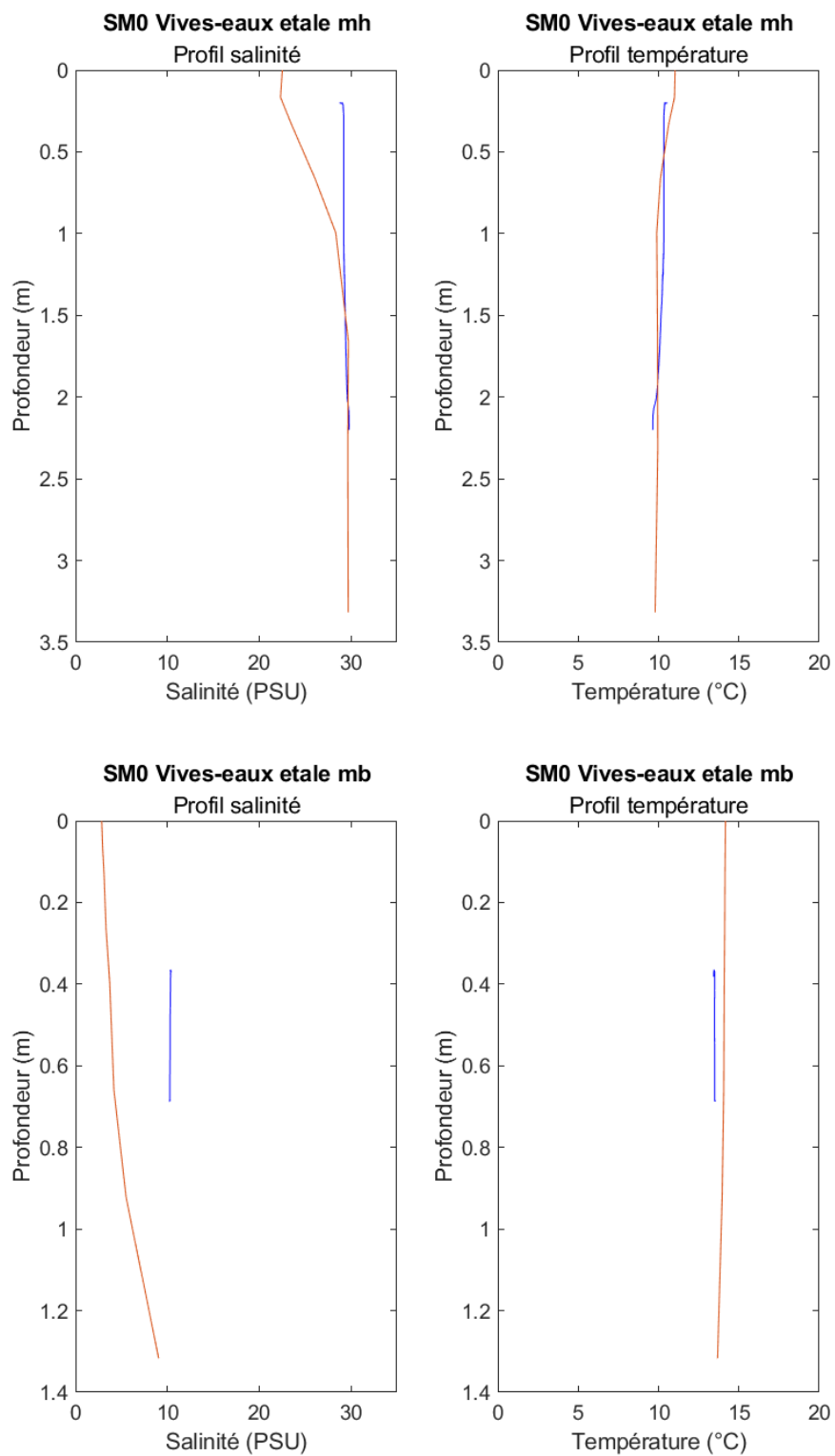


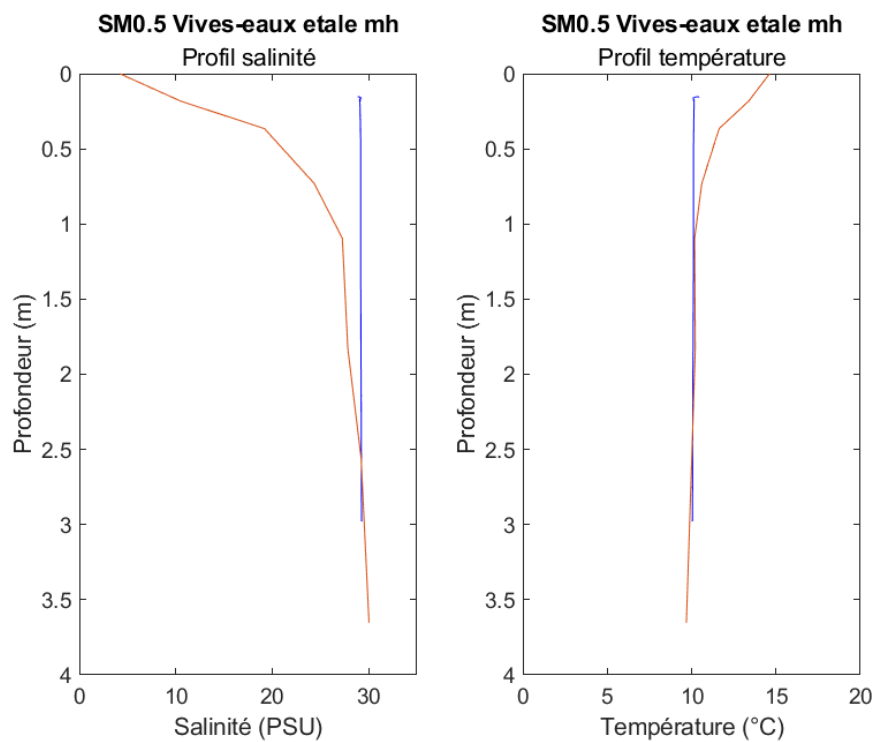


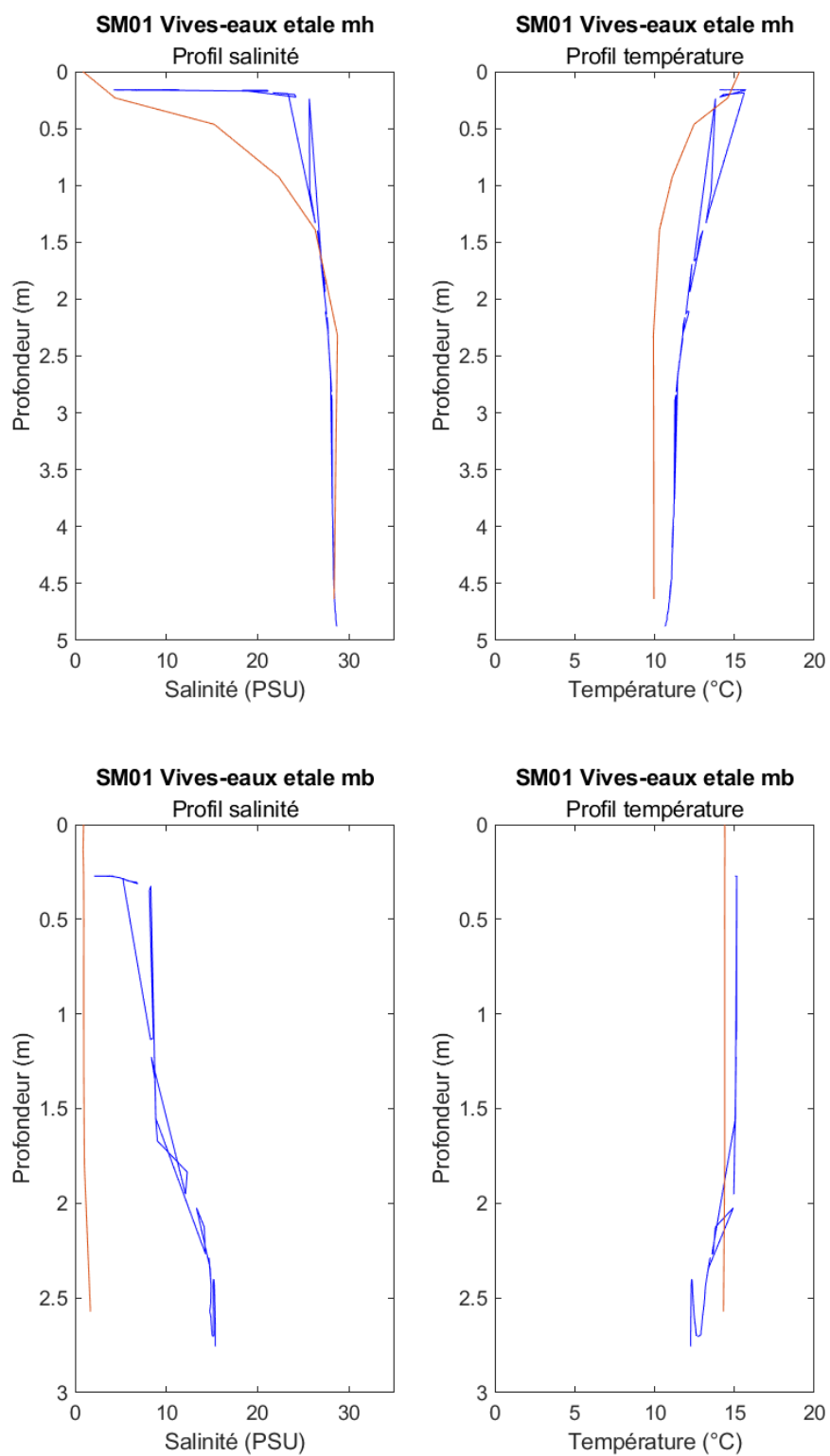


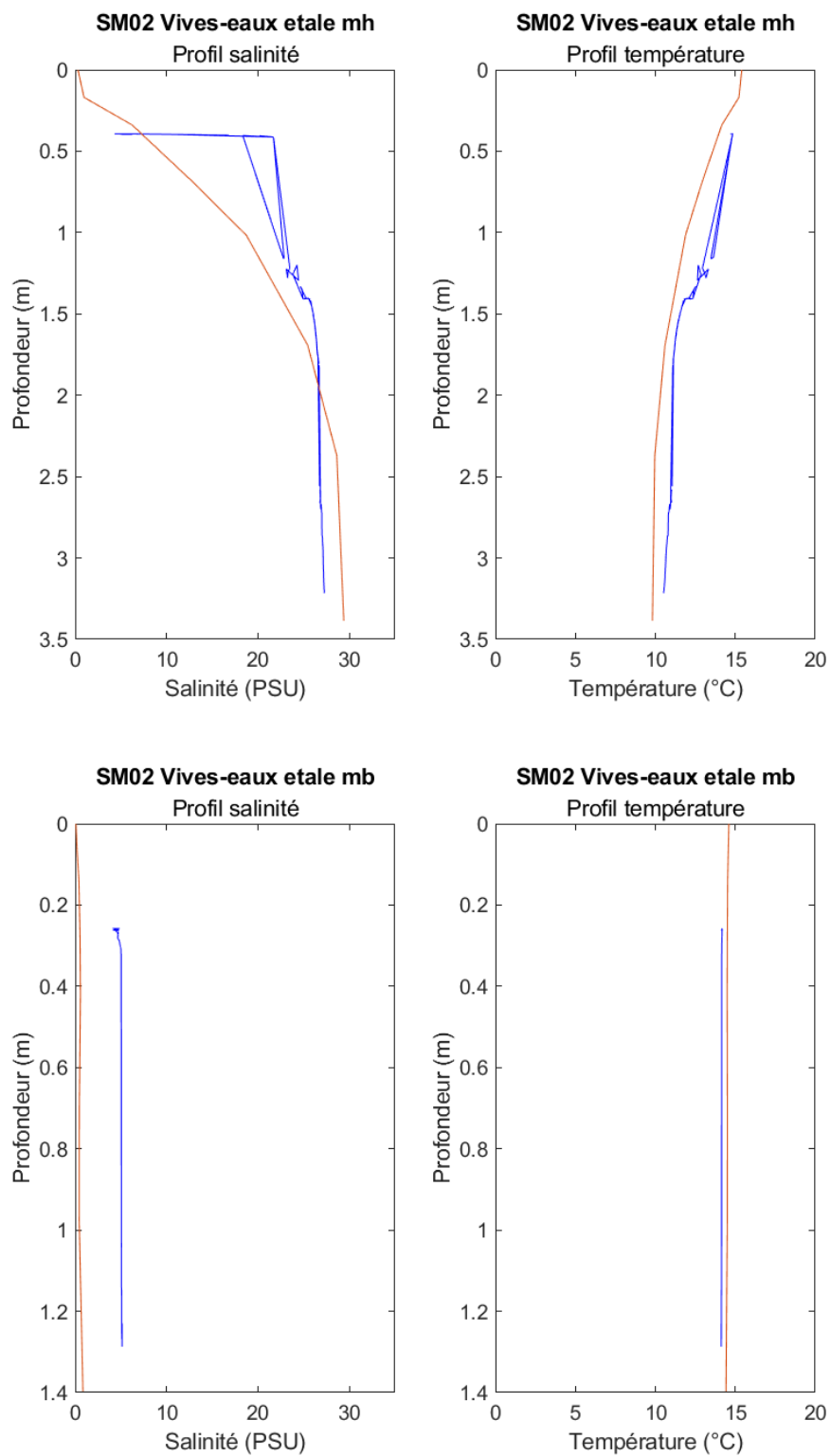


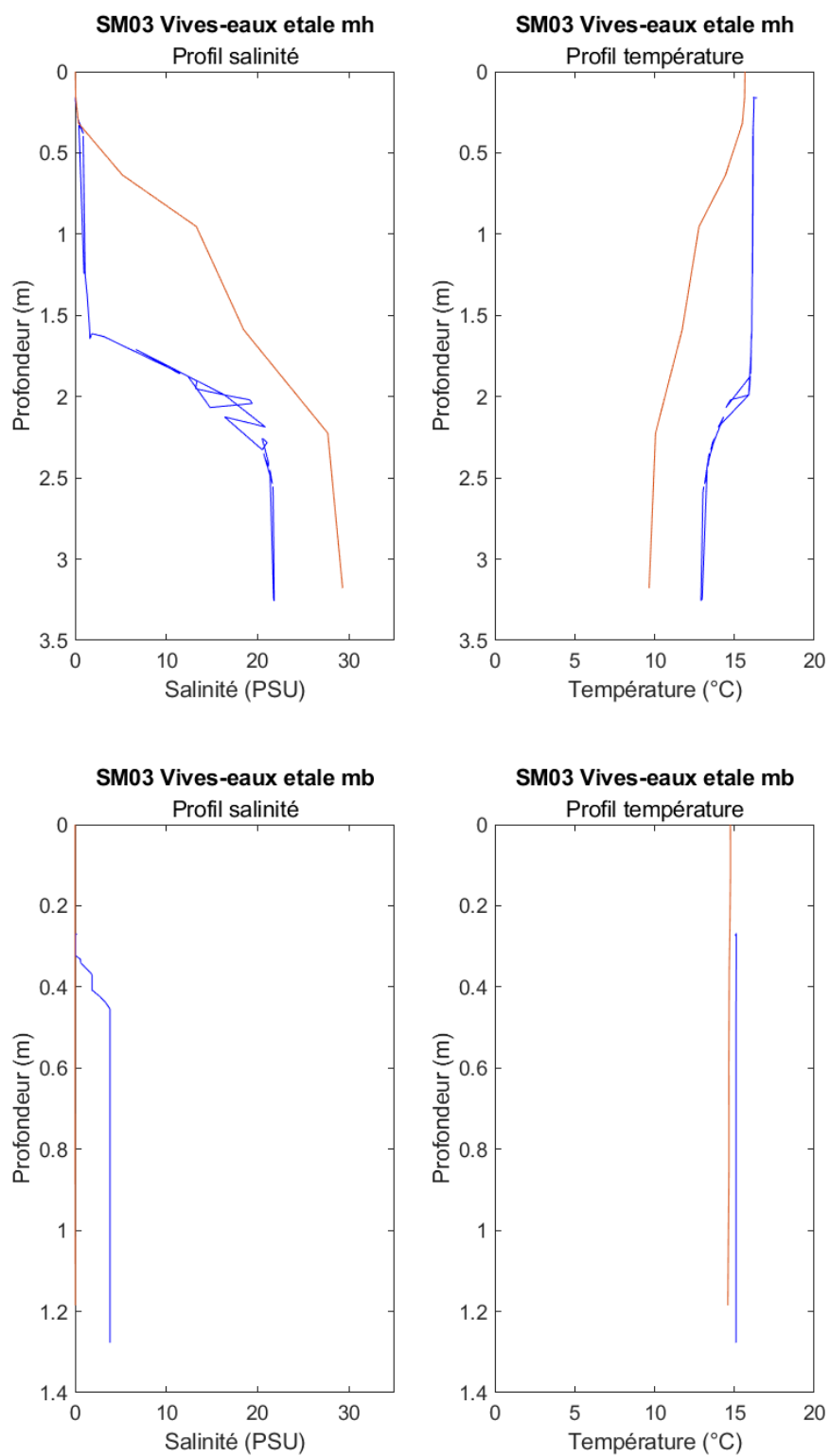


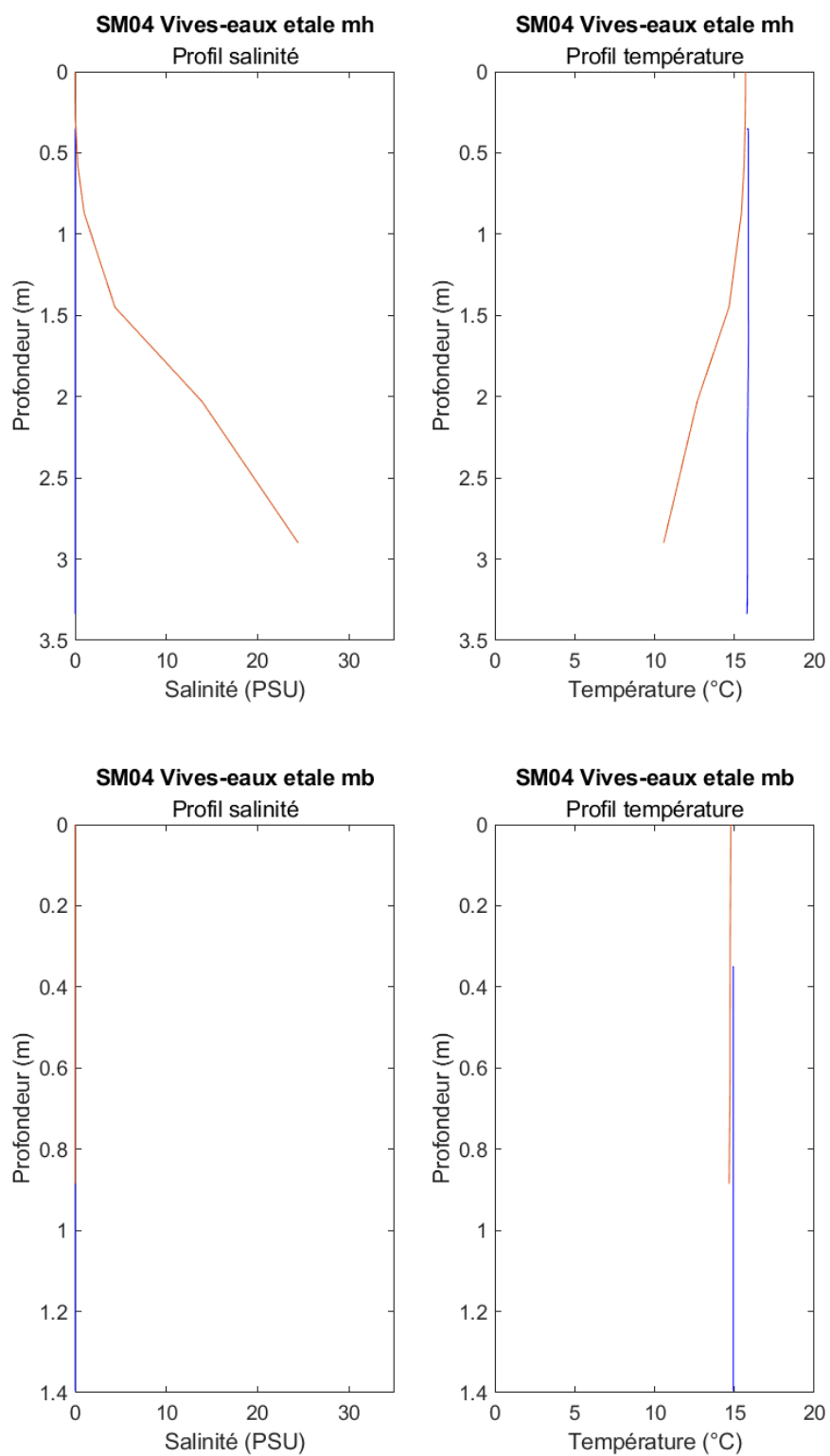






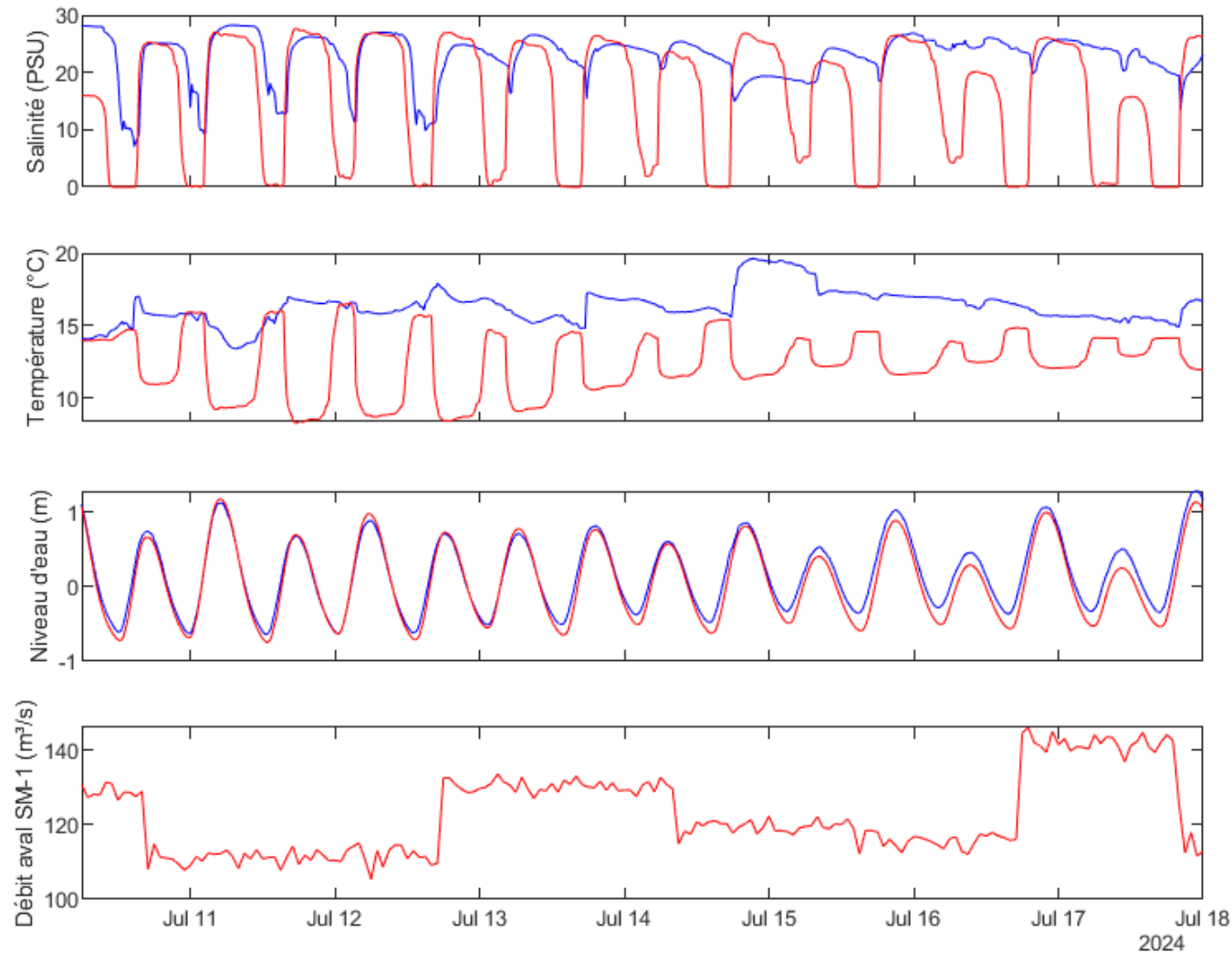




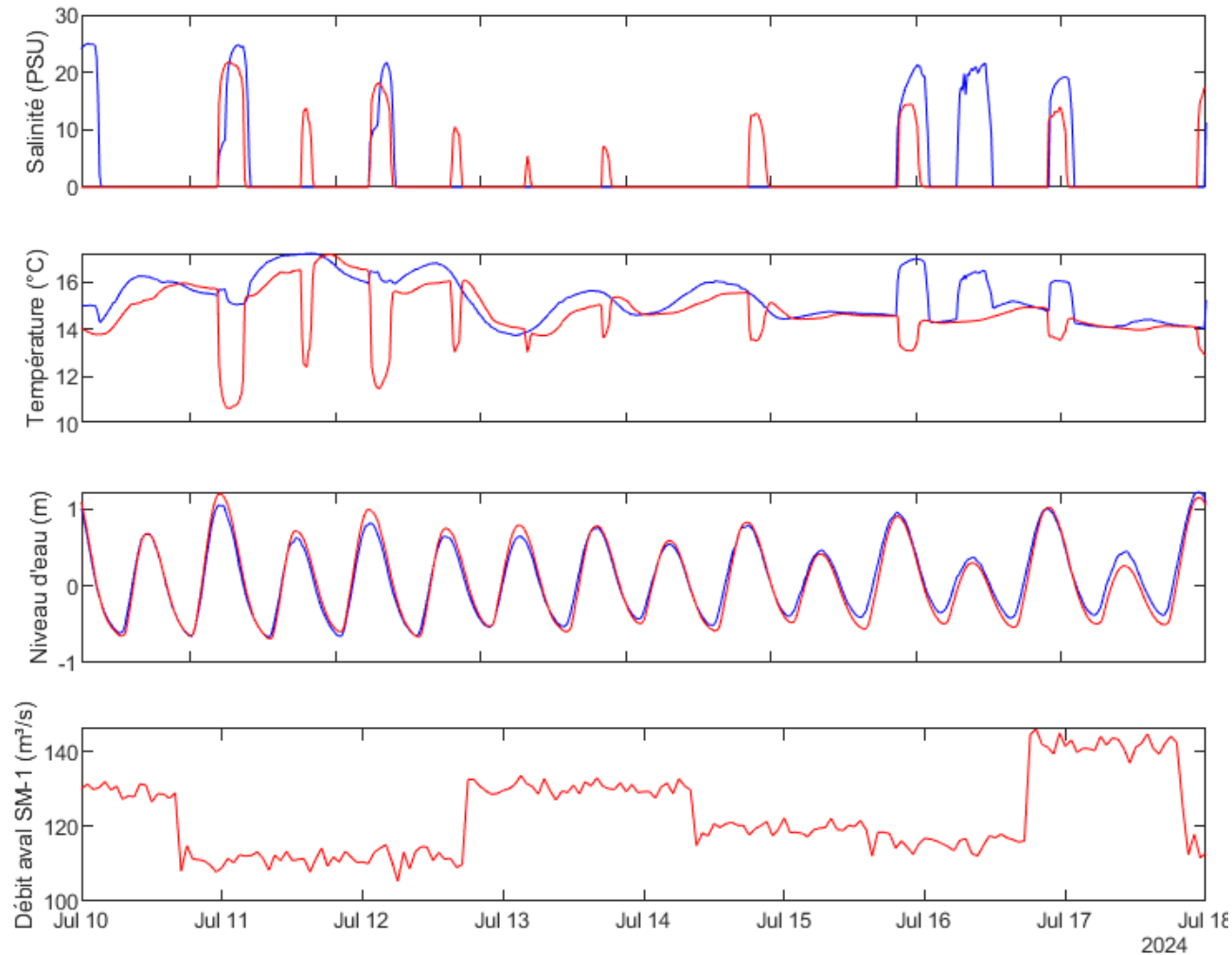


ANNEXE D

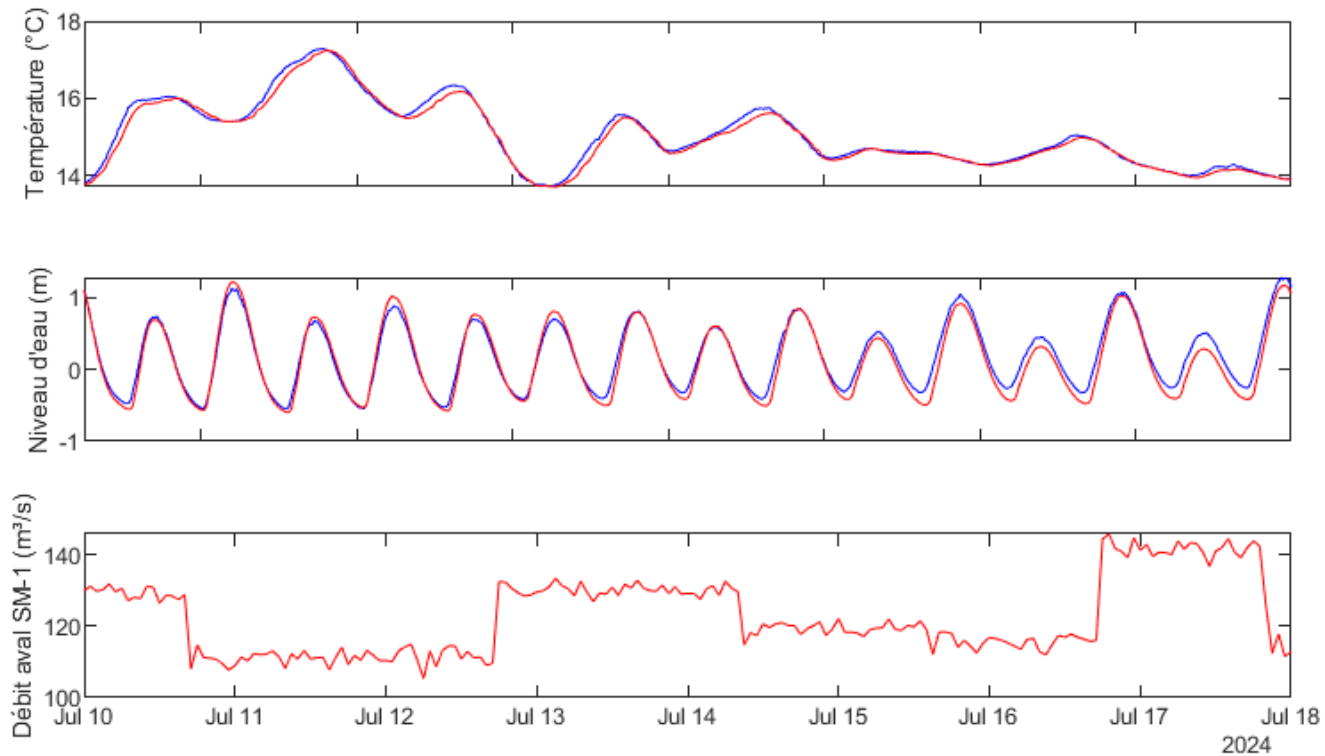
SIMULATIONS COMPLÉMENTAIRES EN CONDITIONS DE MARÉE DE MORTES-EAUX



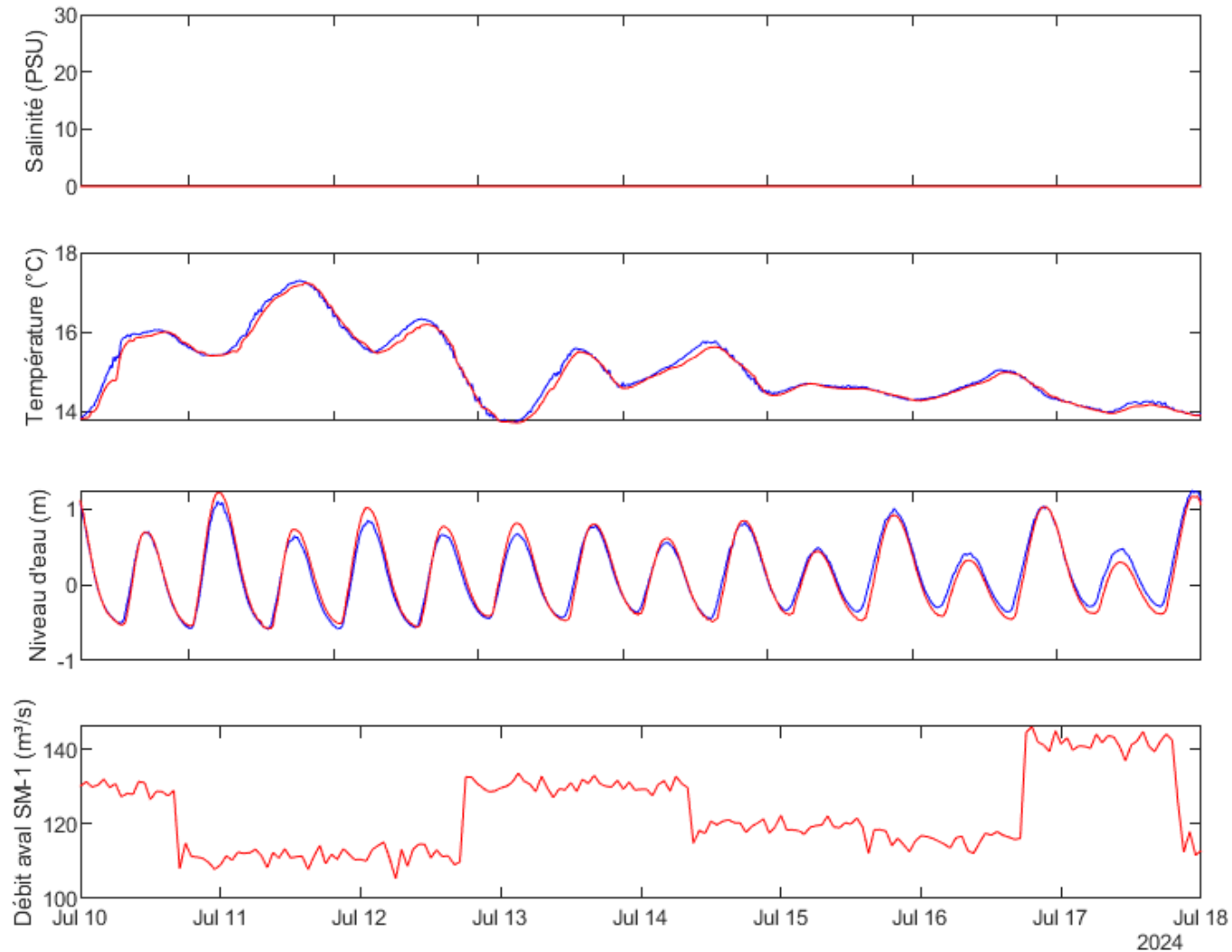
Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1129, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (10-18 juillet 2024).



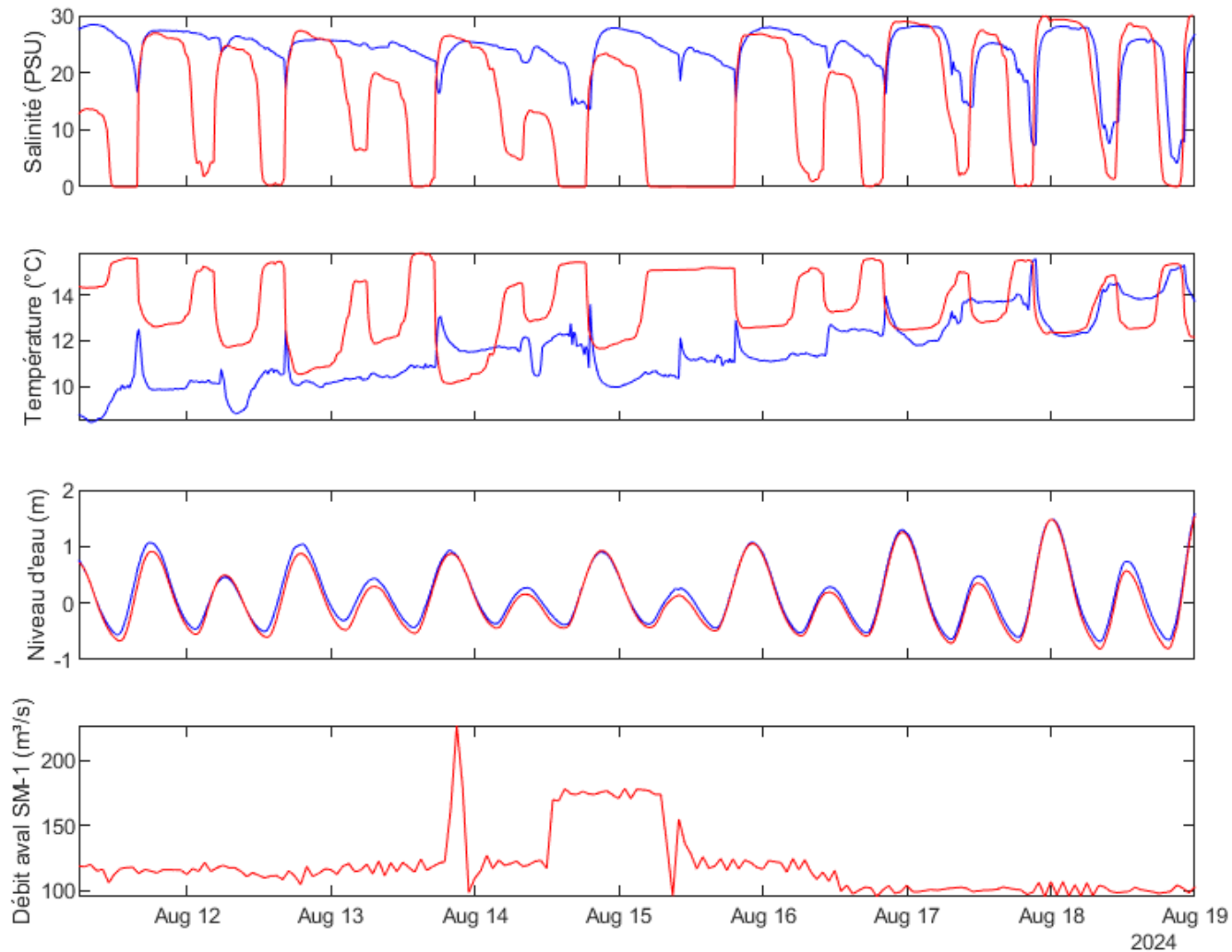
Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1130, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (10-18 juillet 2024).



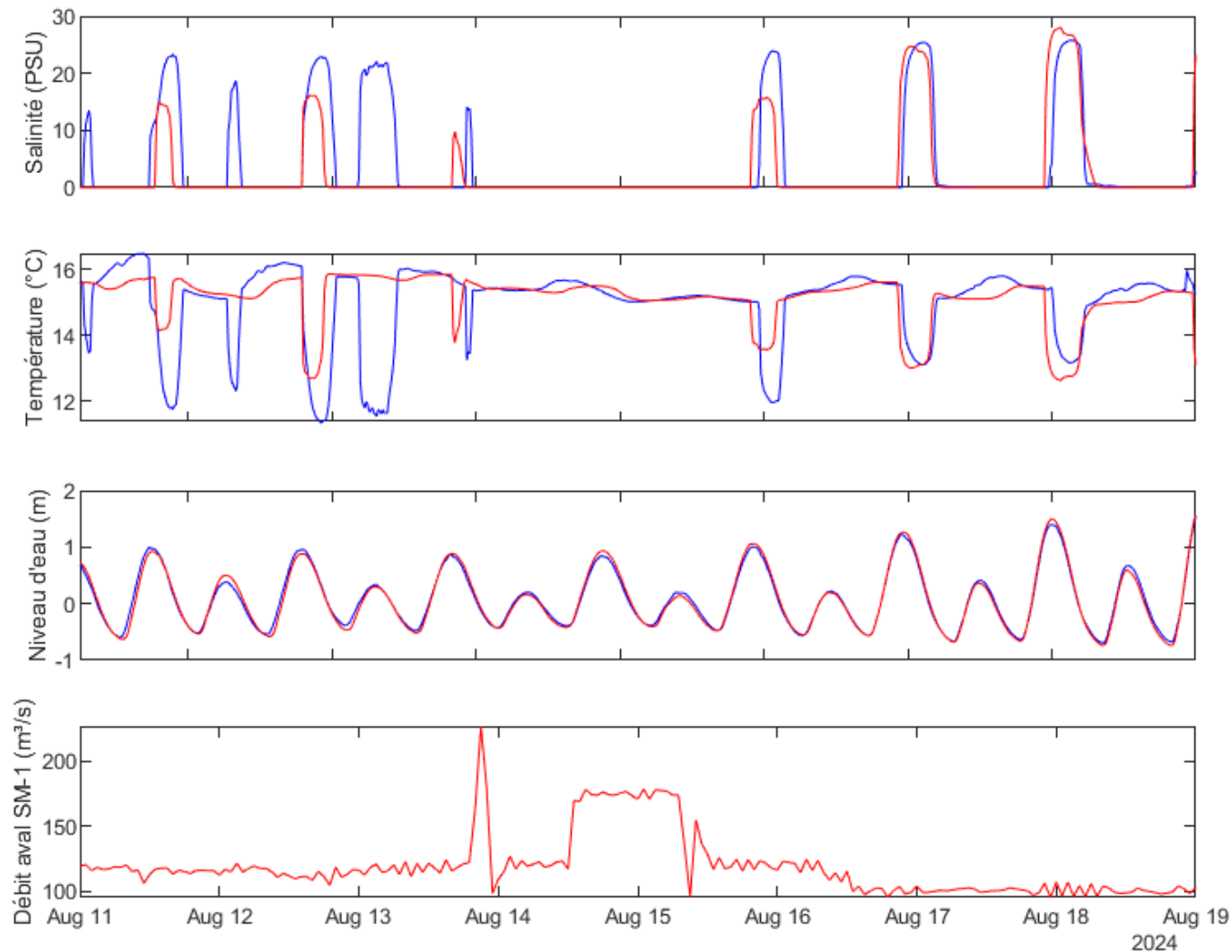
Séries temporelles de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1131, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (10-18 juillet 2024).



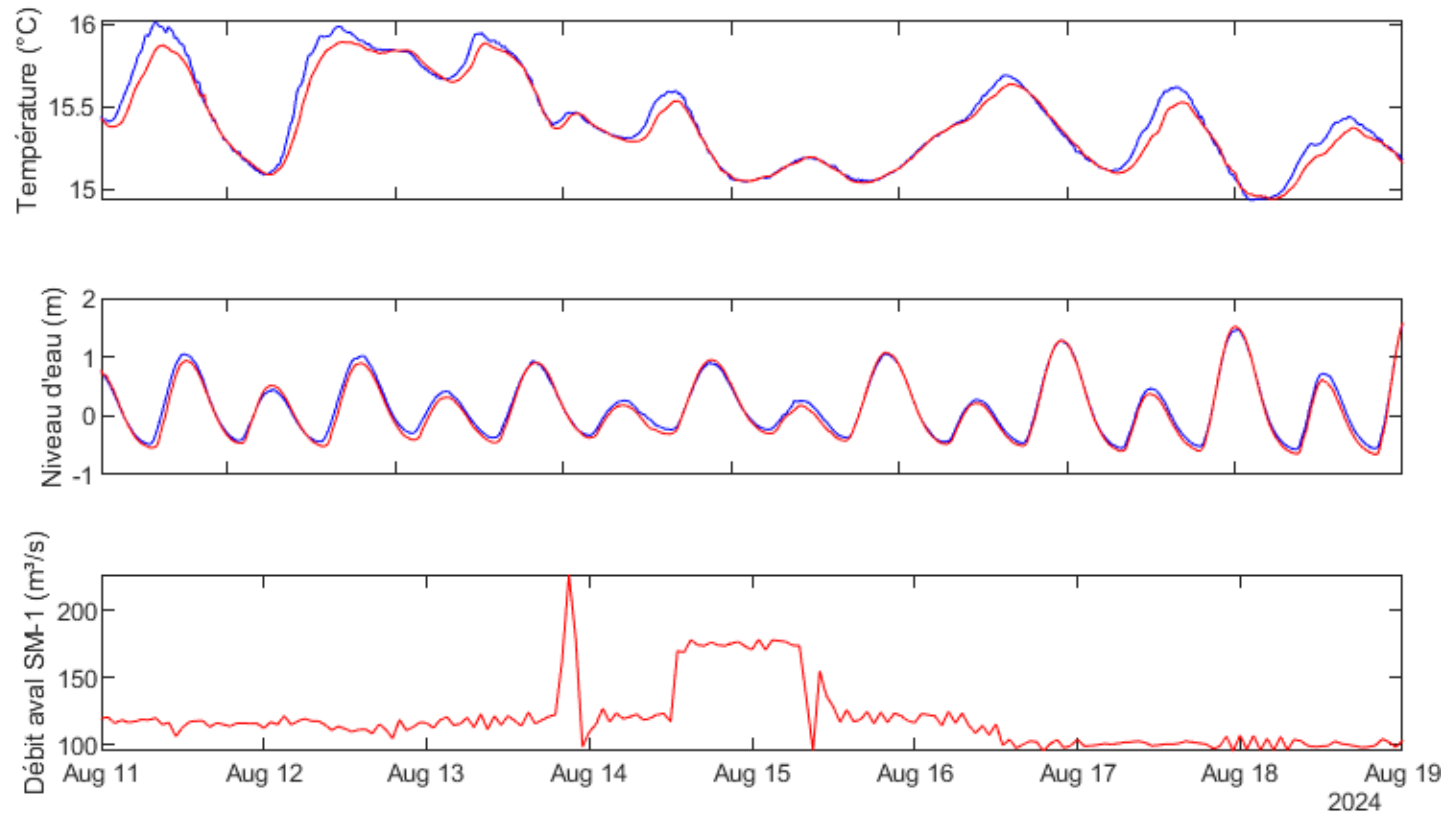
Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1150, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (10-18 juillet 2024).



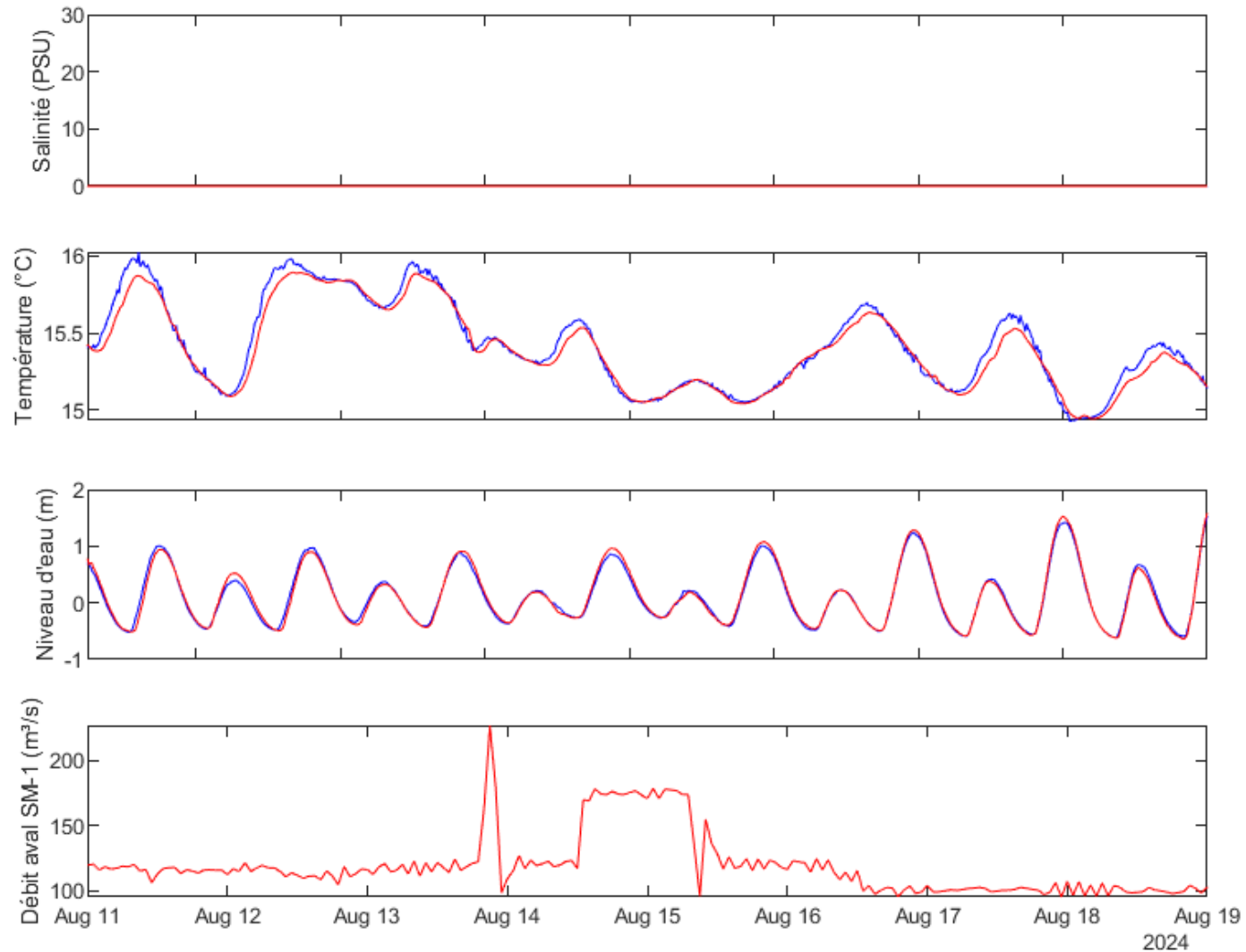
Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1129, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (11-19 août 2024).



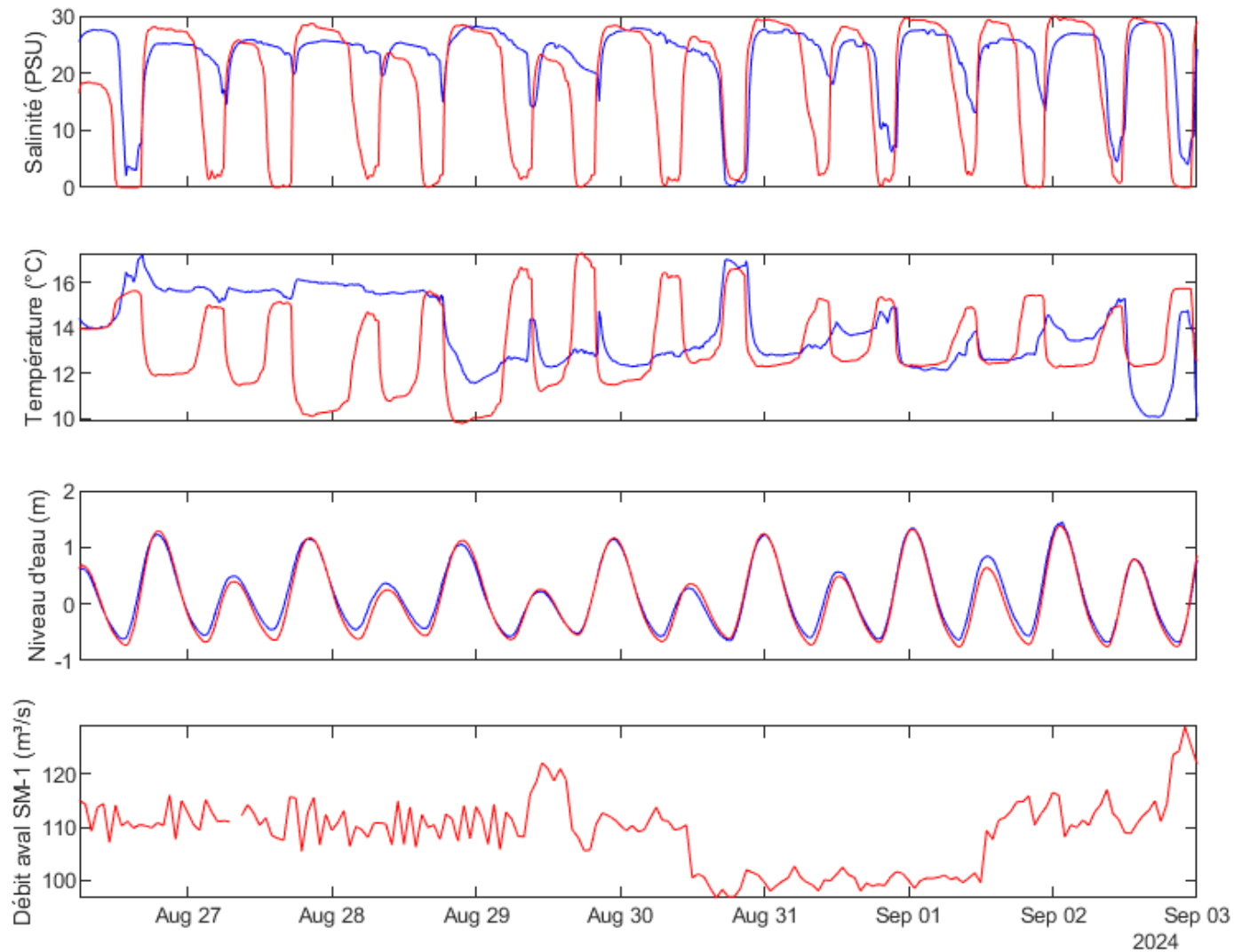
Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1130, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (11-19 août 2024).



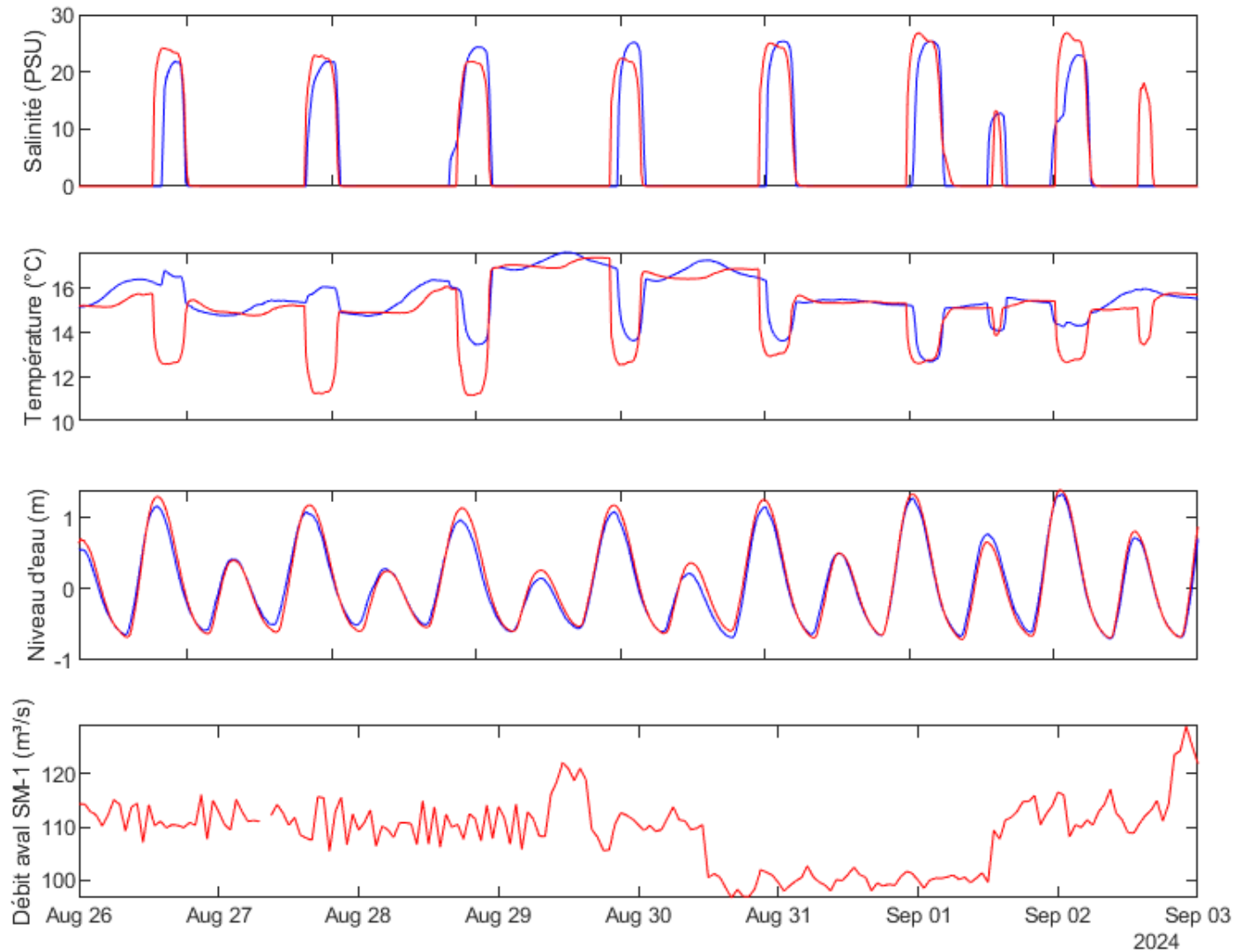
Séries temporelles de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1131, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (11-19 août 2024).



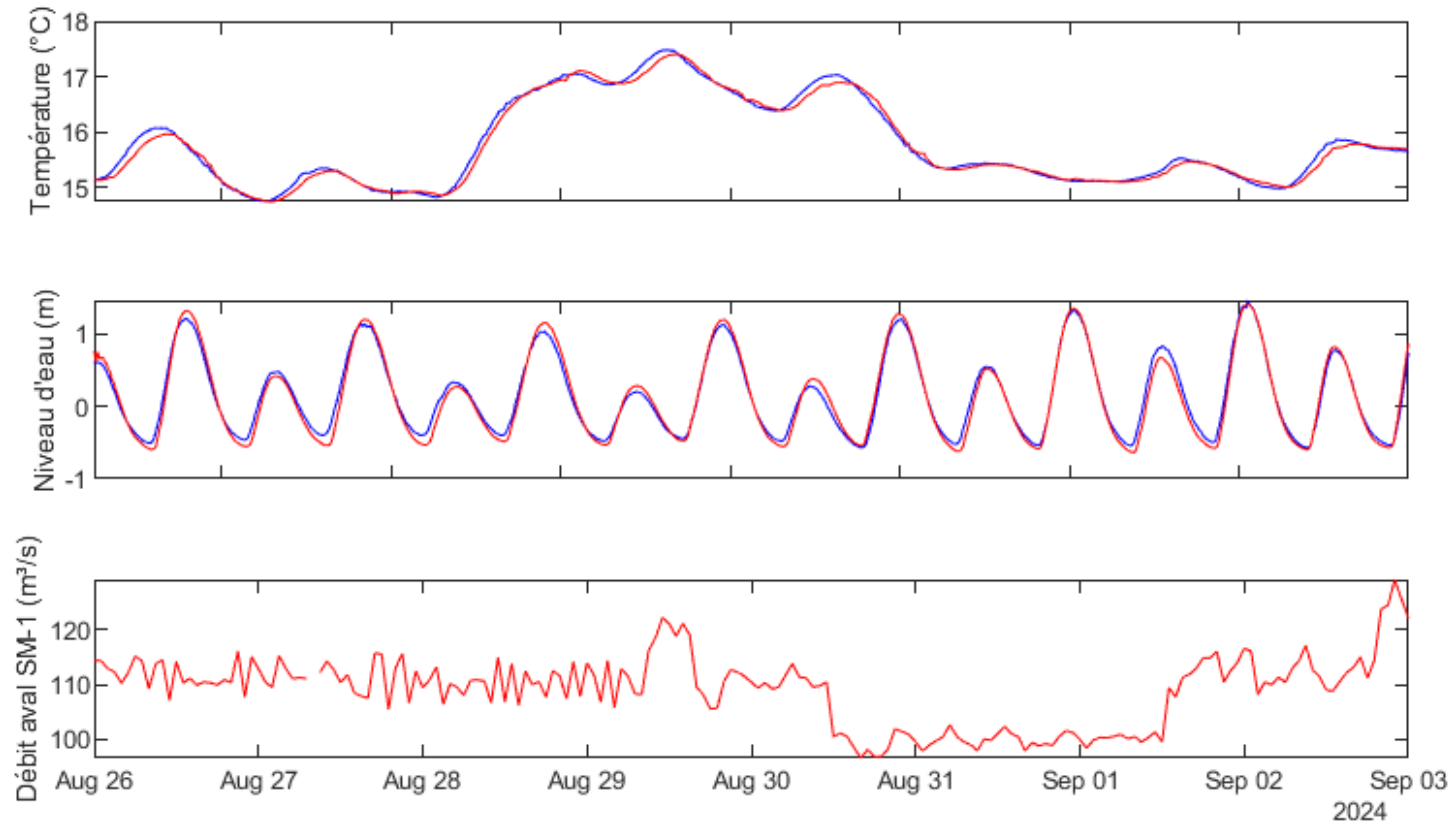
Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1131, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (11-19 août 2024).



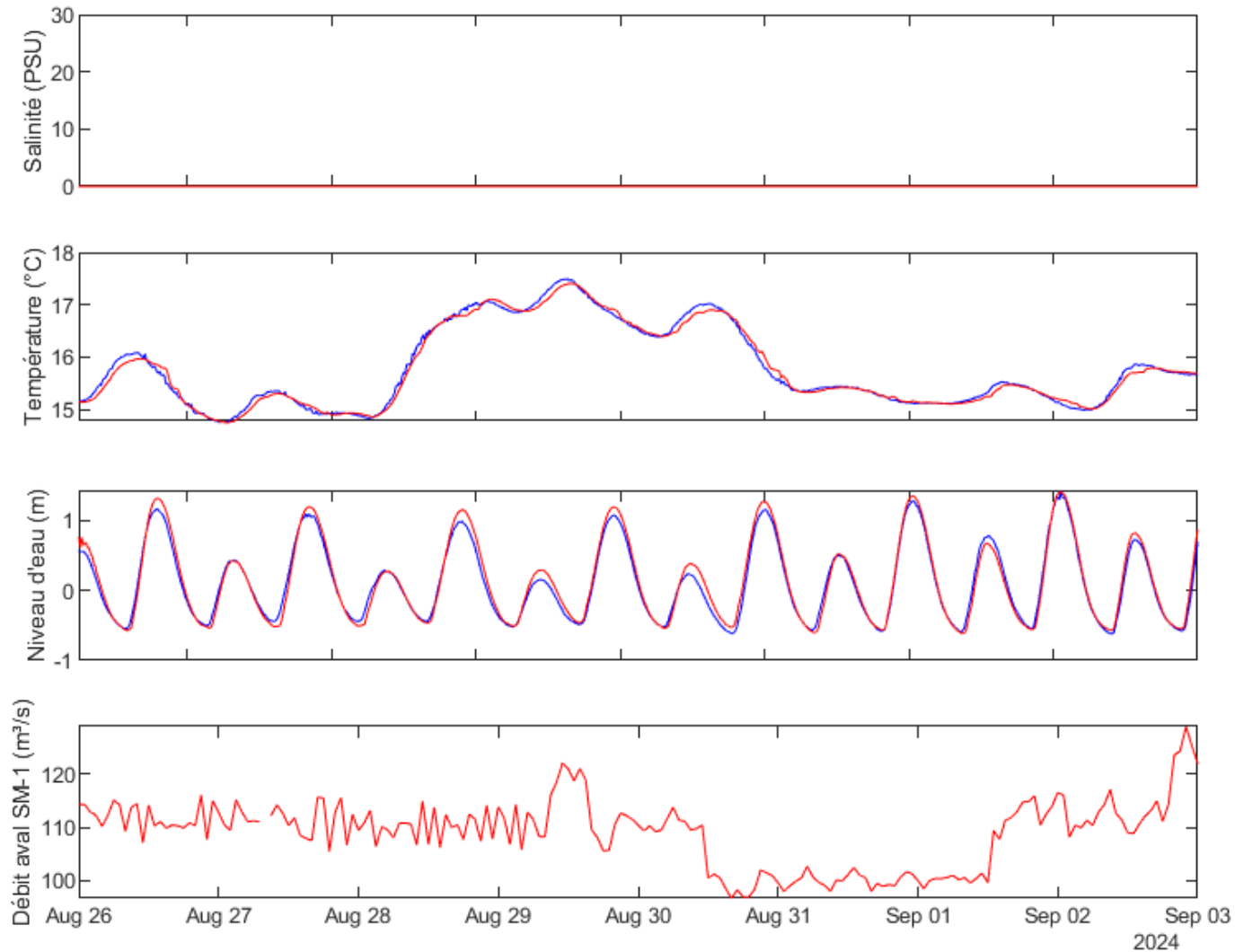
Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1129, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (26 août au 3 septembre 2024).



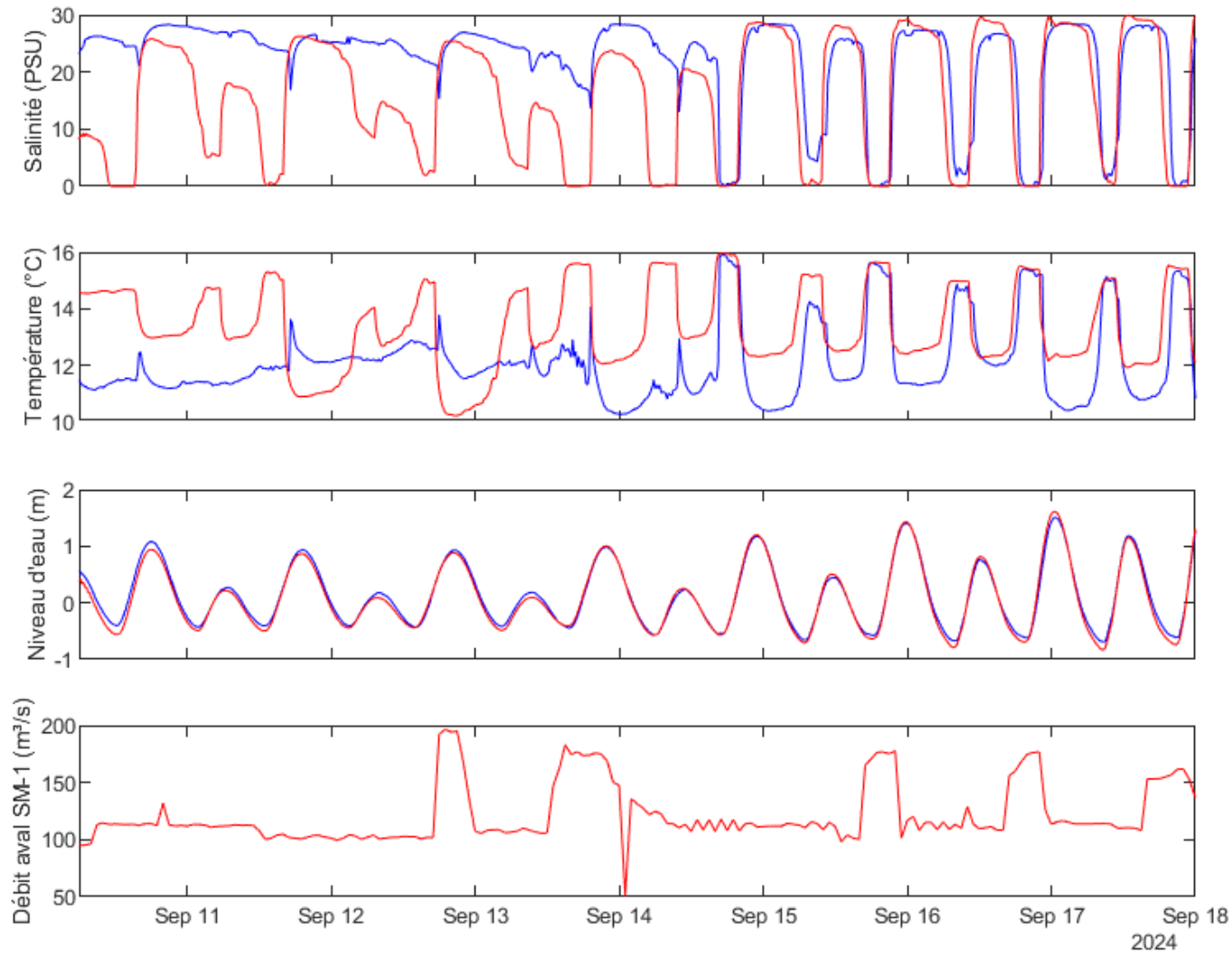
Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1130, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (26 août au 3 septembre 2024).



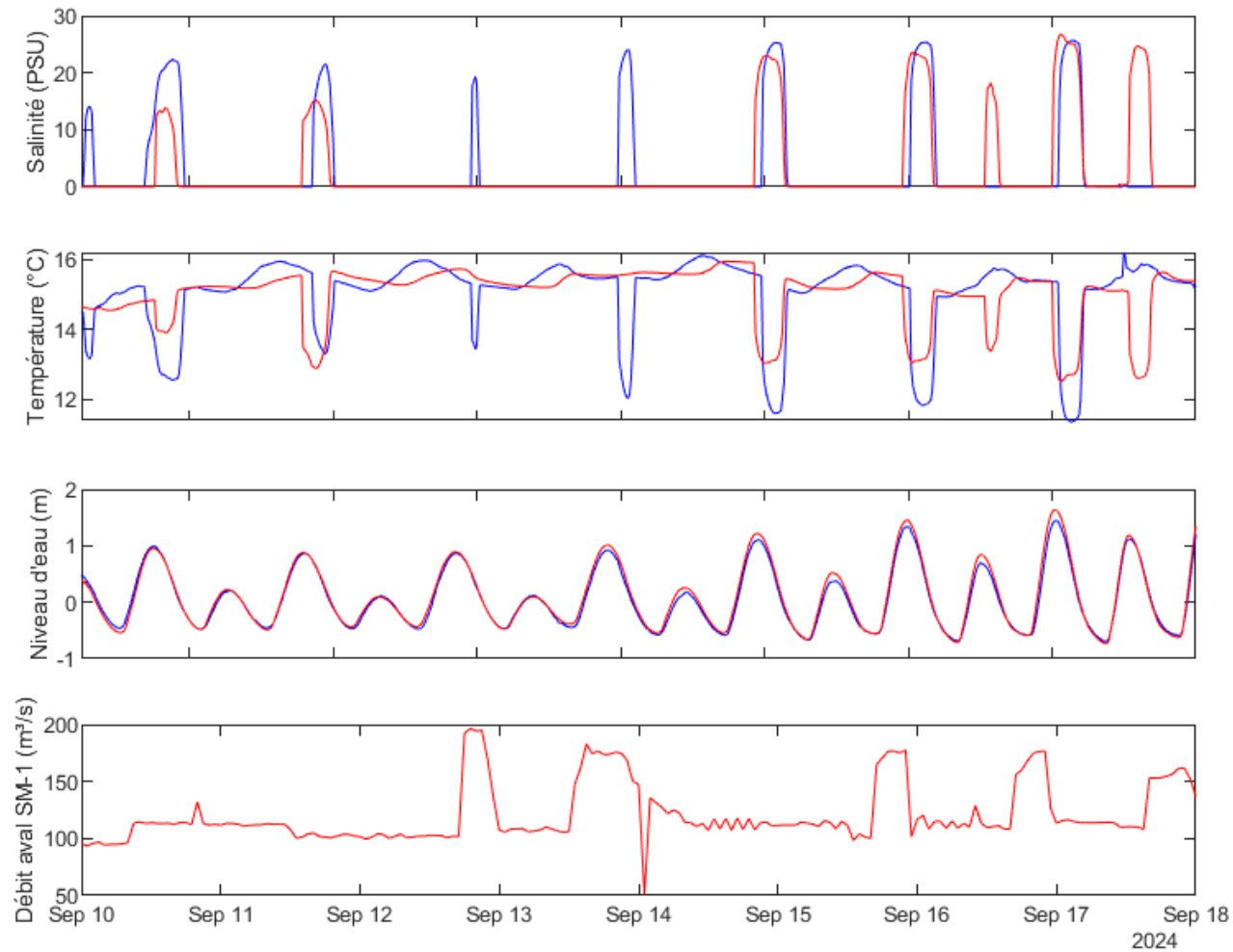
Séries temporelles de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1131, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (26 août au 3 septembre 2024).



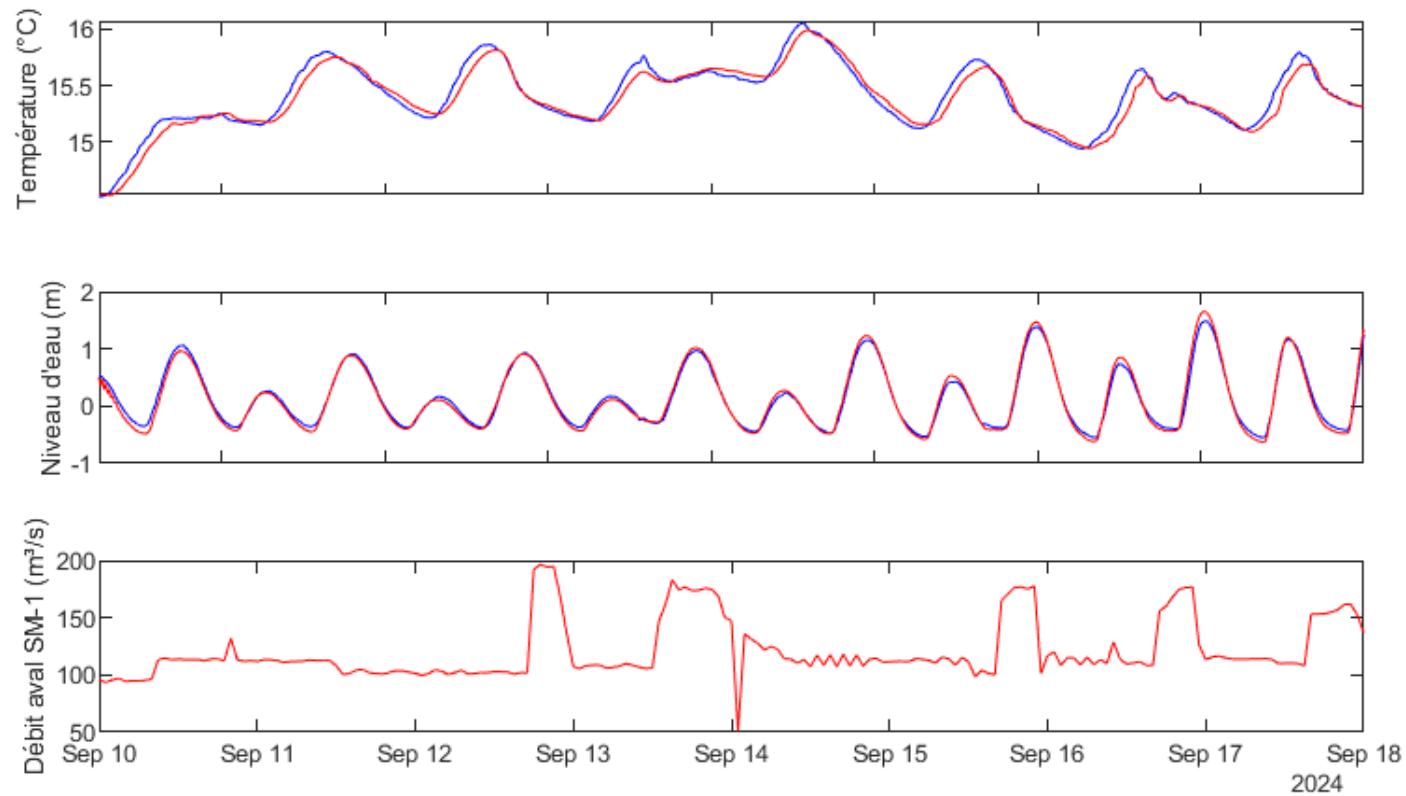
Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1150, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (26 août au 3 septembre 2024).



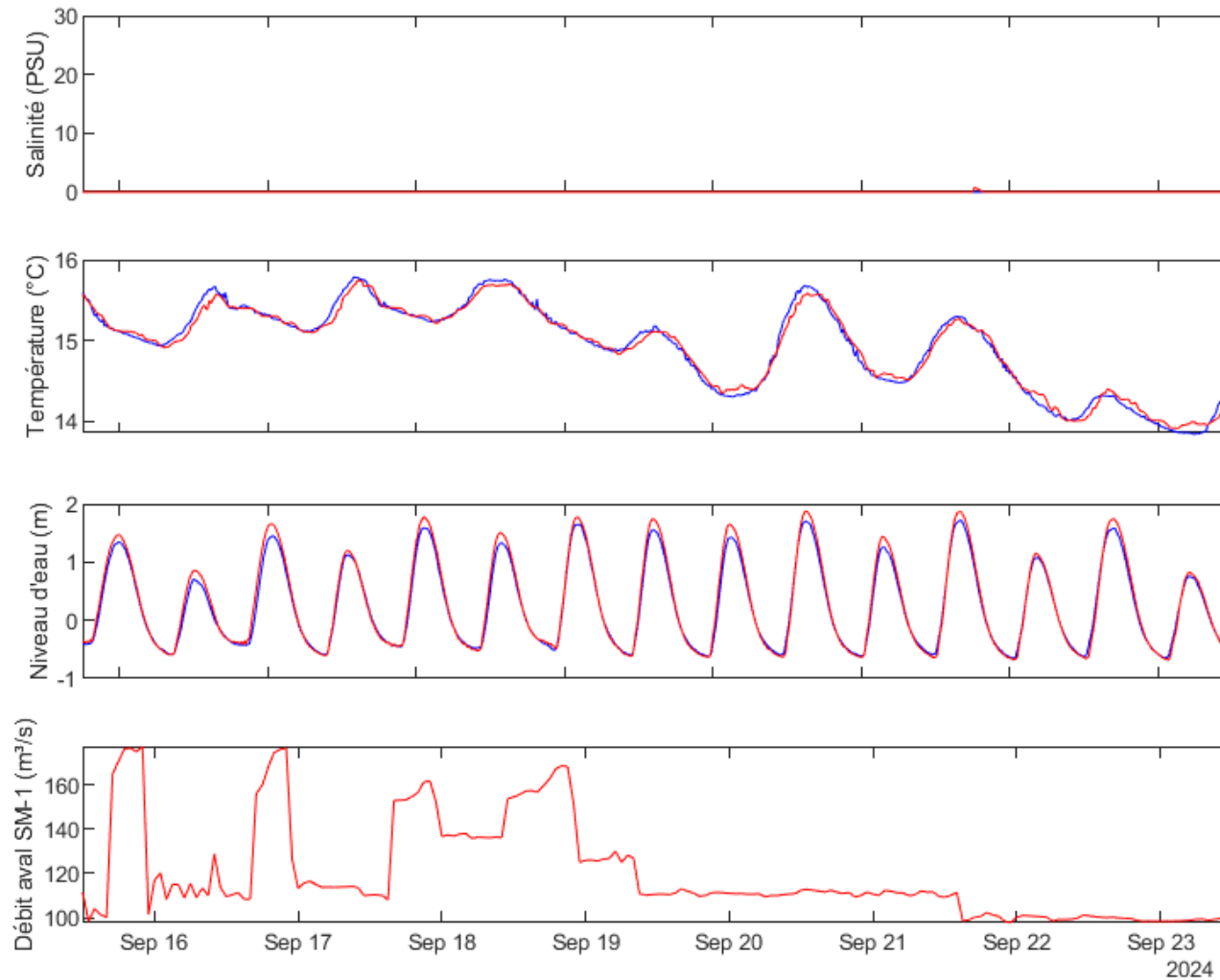
Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1129, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (10 au 18 septembre 2024).



Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière mod lis es (TELEMAC-3D, rouge) et mesur es (mouillage ESMA1130, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (10 au 18 septembre 2024).



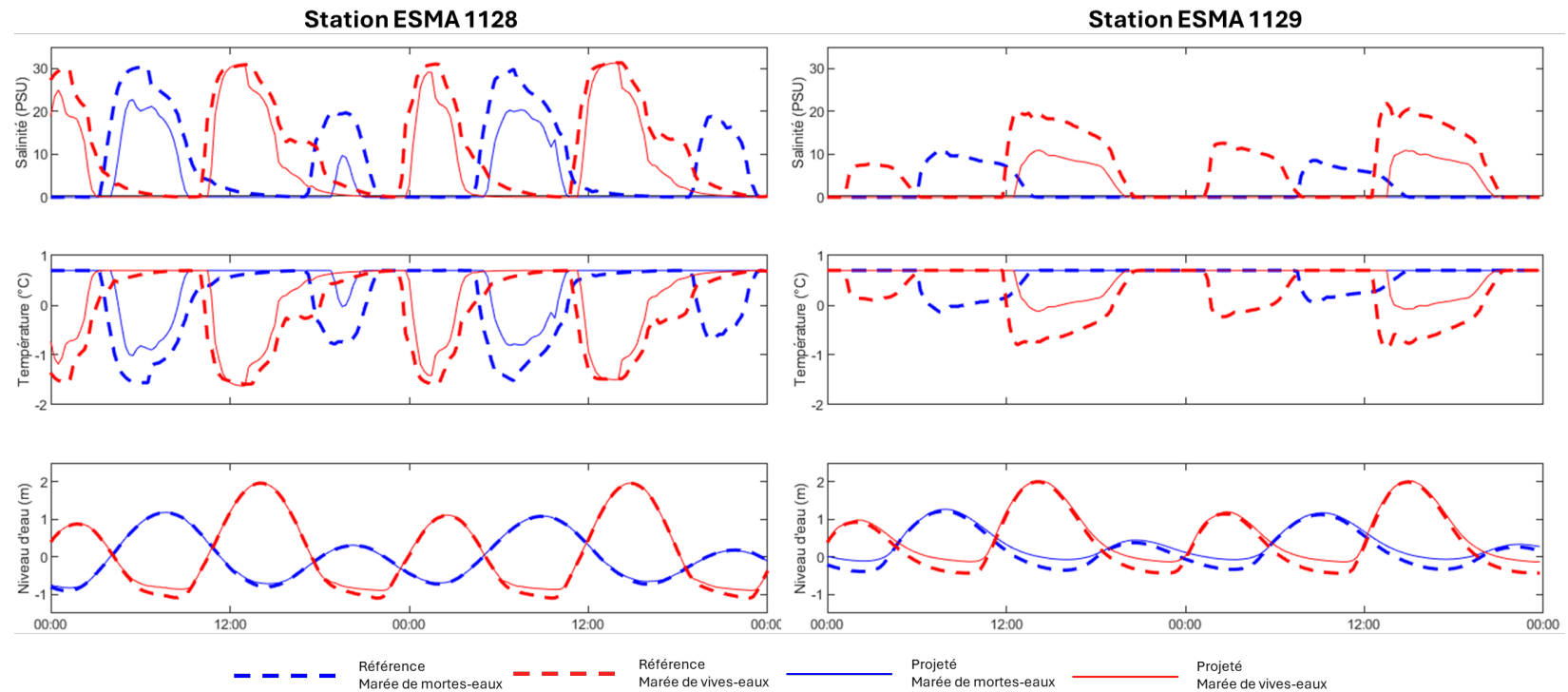
Séries temporelles de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1131, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (10 au 18 septembre 2024).



Séries temporelles de la salinité au fond, de la température au fond, des niveaux d'eau et du débit de la rivière modélisées (TELEMAC-3D, rouge) et mesurées (mouillage ESMA1150, bleu) en conditions de marée de mortes-eaux (10 au 18 septembre 2024).

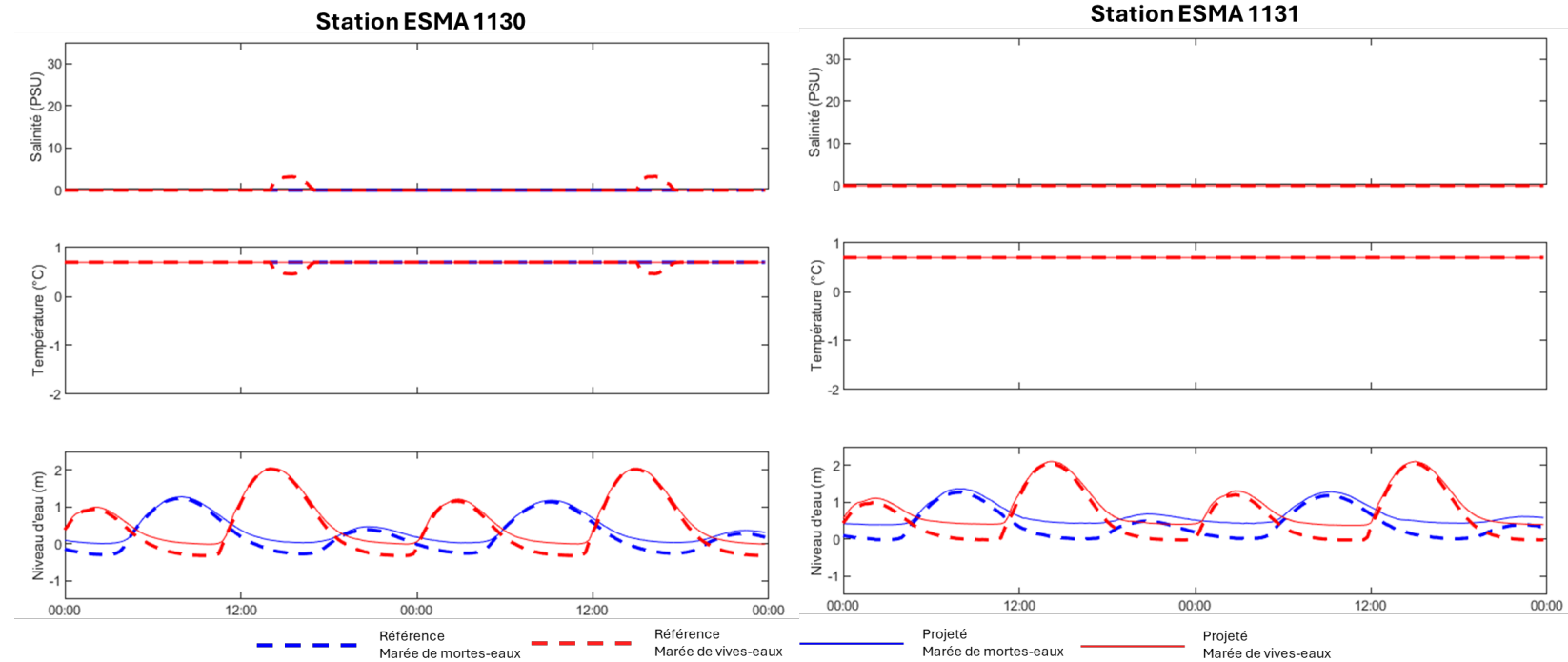
ANNEXE E

SÉRIES TEMPORELLES DE SALINITÉ, DE TEMPÉRATURE ET DE NIVEAUX D'EAU EN CONDITIONS DE RÉFÉRENCE ET PROJETÉES



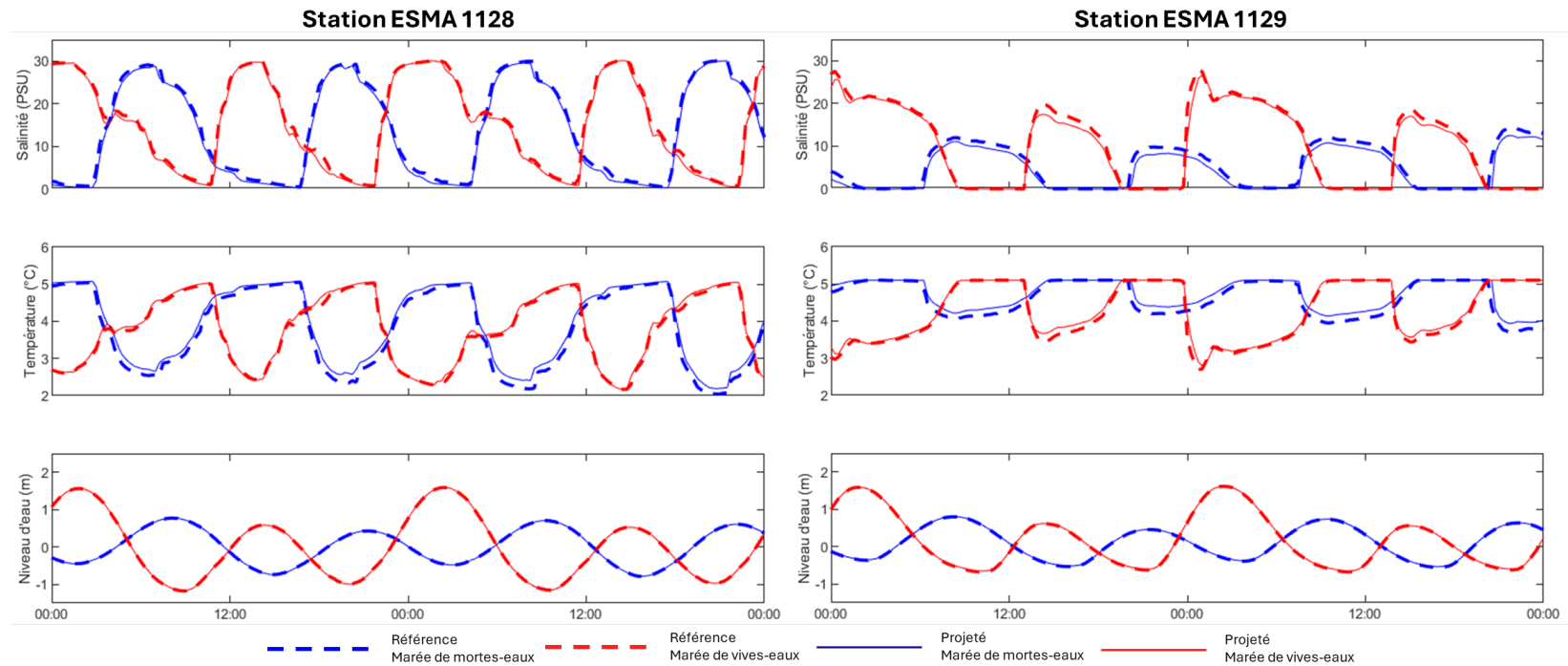
Séries temporelles de la salinité, de la température et des niveaux d'eau modélisés pour le scénario de débit maximum pour les mois de janvier et de février en conditions de référence ($Q=325 \text{ m}^3/\text{s}$) et projetées ($Q=525 \text{ m}^3/\text{s}$) aux stations ESMA1128 et ESMA1129.

* La salinité et la température sont des moyennes sur la colonne d'eau.



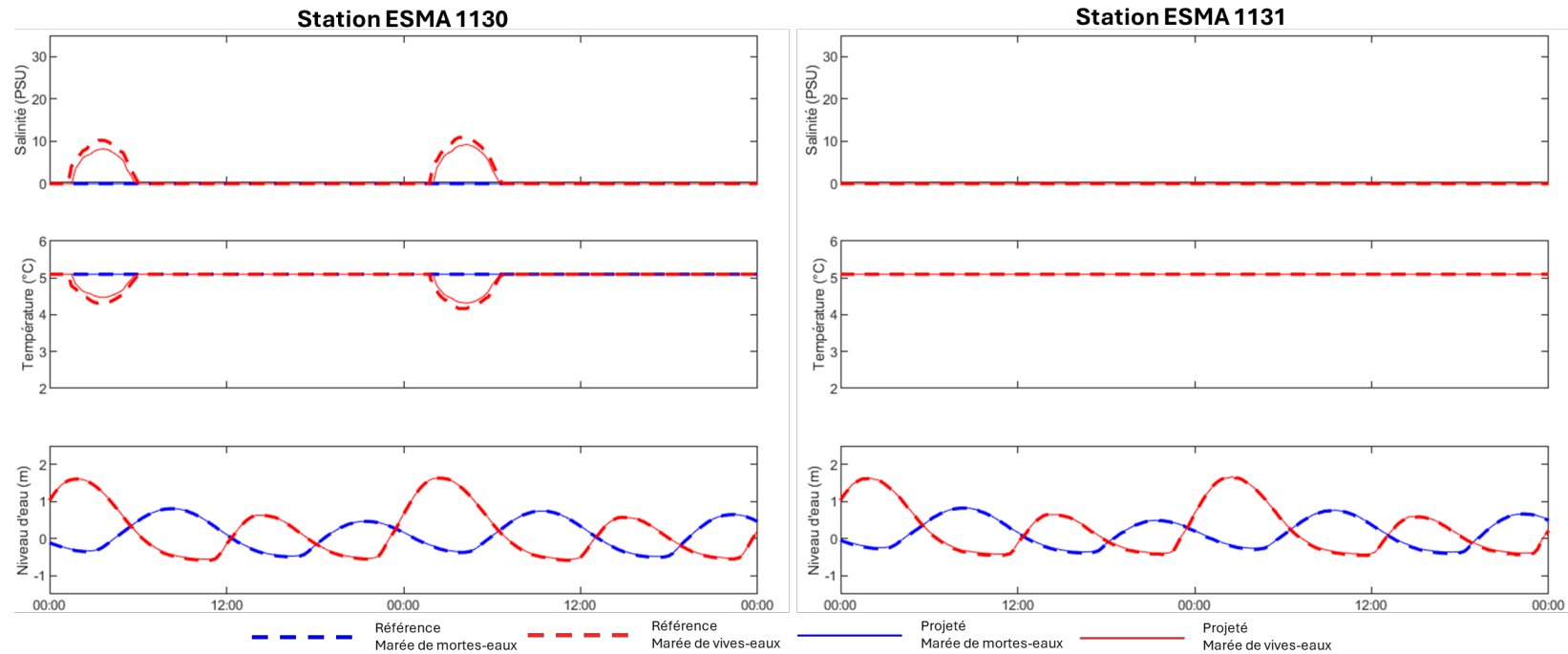
Séries temporelles de la salinité, de la température et des niveaux d'eau modélisés pour le scénario de débit maximum pour les mois de janvier et de février en conditions de référence ($Q=325 \text{ m}^3/\text{s}$) et projetées ($Q=525 \text{ m}^3/\text{s}$) aux stations ESMA1130 et ESMA1131.

* La salinité et la température sont des moyennes sur la colonne d'eau.



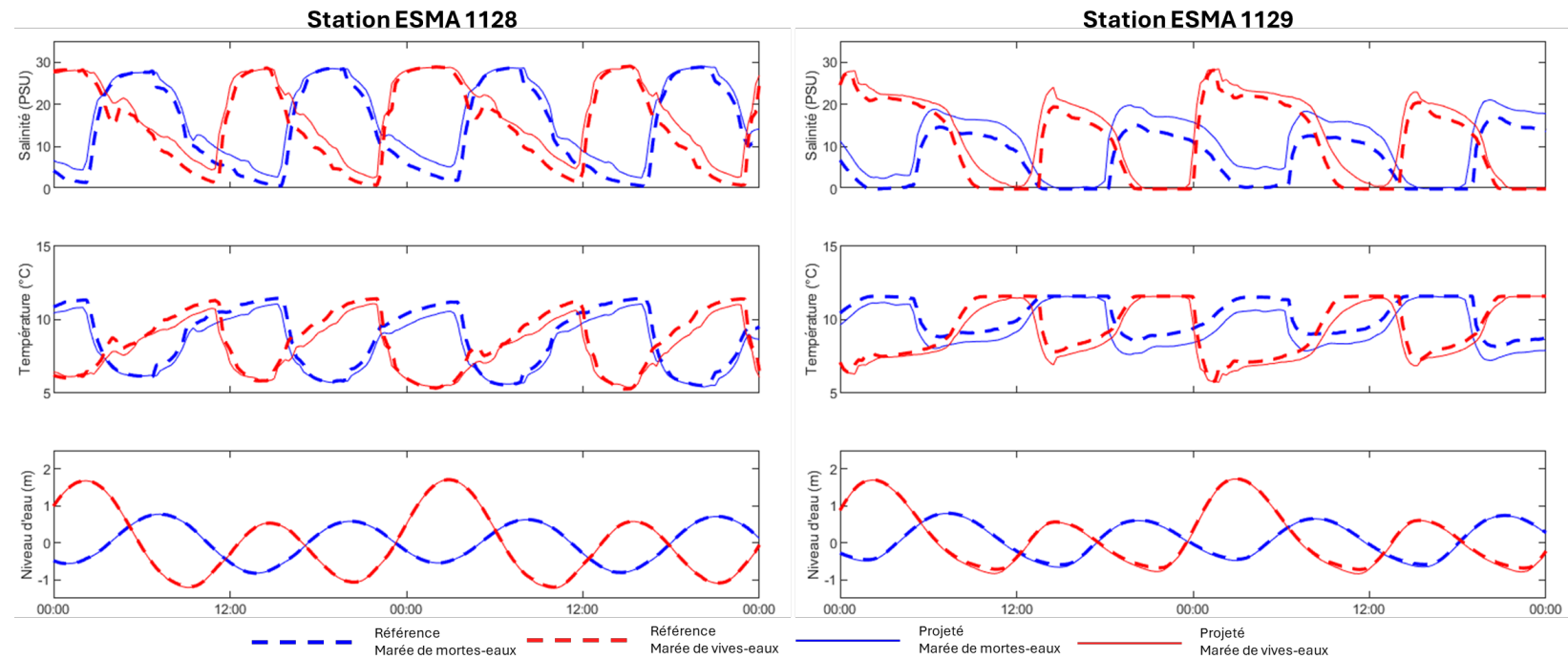
Séries temporelles de la salinité, de la température et des niveaux d'eau modélisés pour le scénario de débit module pour le mois de mai en conditions de référence ($Q=160,5 \text{ m}^3/\text{s}$) et projetées ($Q=174,7 \text{ m}^3/\text{s}$) aux stations ESMA1128 et ESMA1129.

* La salinité et la température sont des moyennes sur la colonne d'eau.



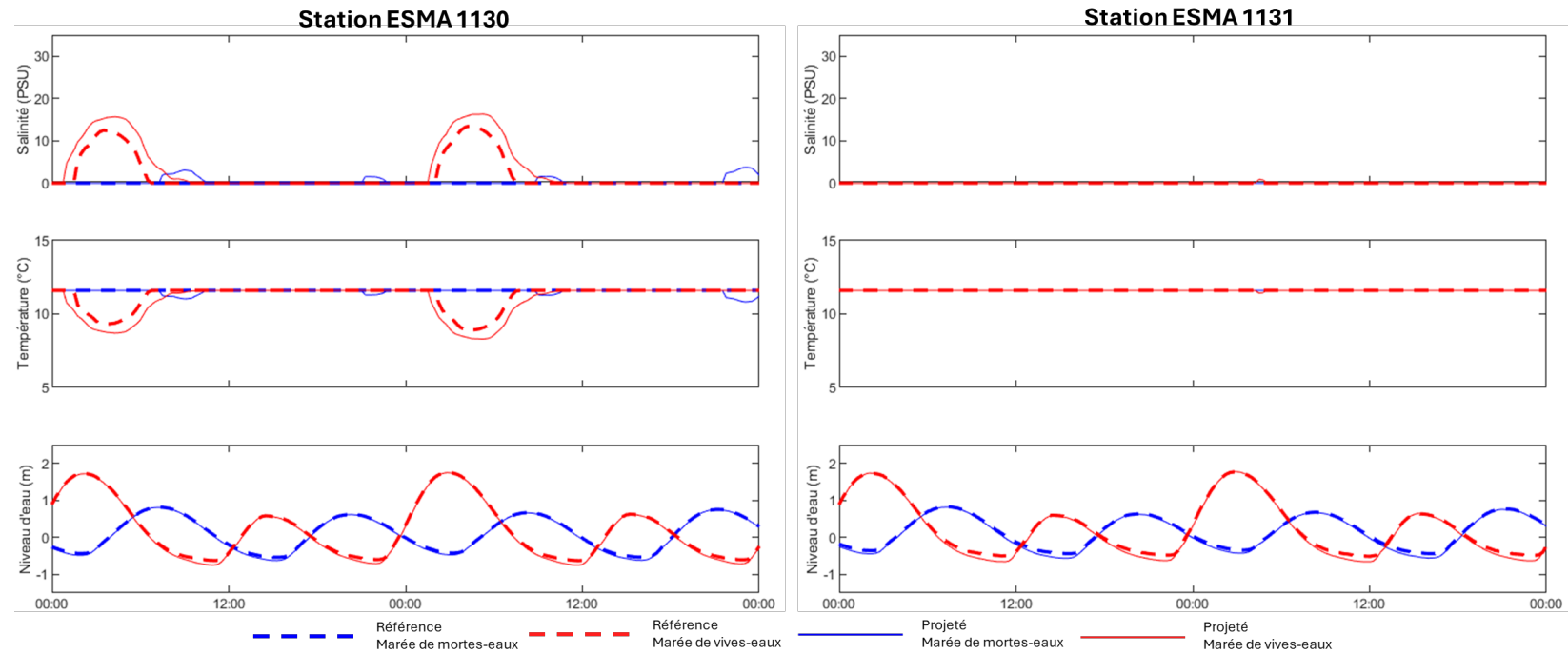
Séries temporelles de la salinité, de la température et des niveaux d'eau modélisés pour le scénario de débit module pour le mois de mai en conditions de référence ($Q=160,5 \text{ m}^3/\text{s}$) et projetées ($Q=174,7 \text{ m}^3/\text{s}$) aux stations ESMA1130 et ESMA1131.

* La salinité et la température sont des moyennes sur la colonne d'eau.



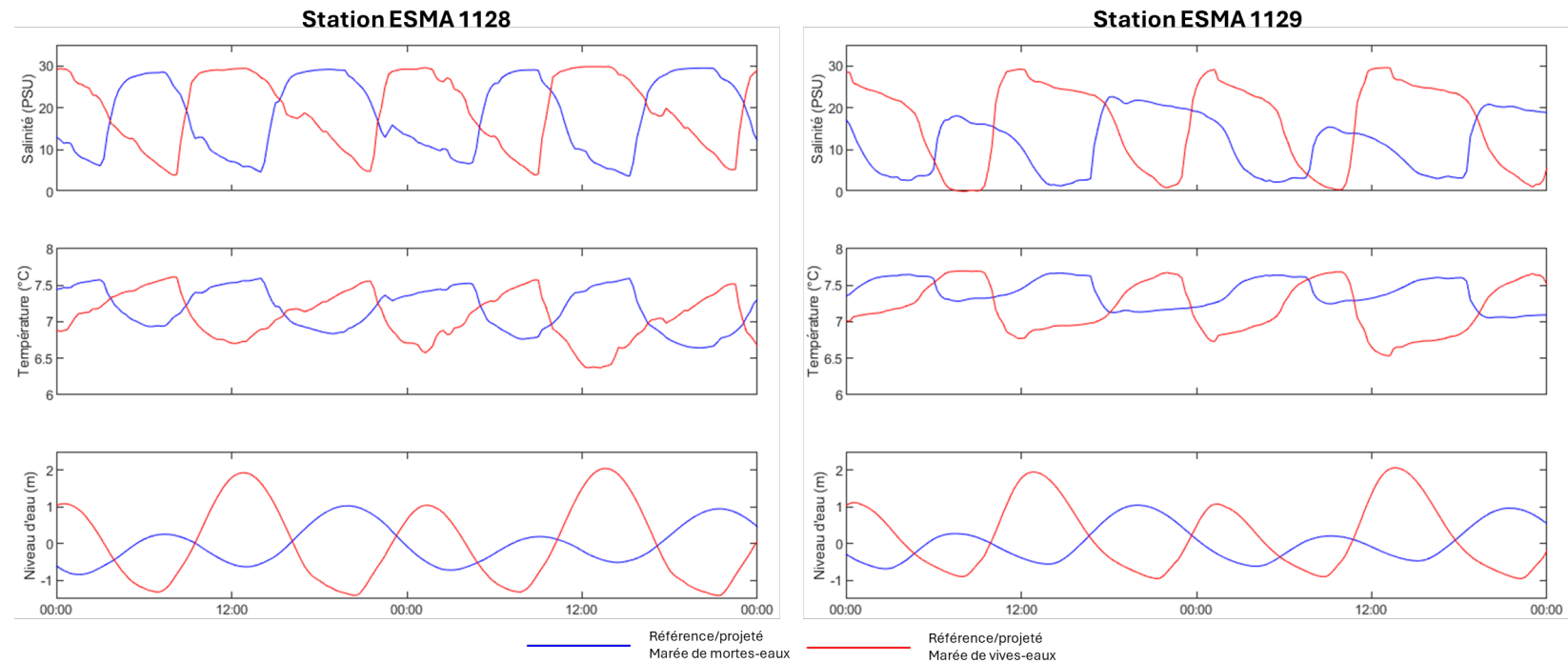
Séries temporelles de la salinité, de la température et des niveaux d'eau modélisés pour le scénario de débit module pour le mois de juin en conditions de référence ($Q=148,3 \text{ m}^3/\text{s}$) et projetées ($Q=104 \text{ m}^3/\text{s}$) aux stations ESMA1128 et ESMA1129.

* La salinité et la température sont des moyennes sur la colonne d'eau.



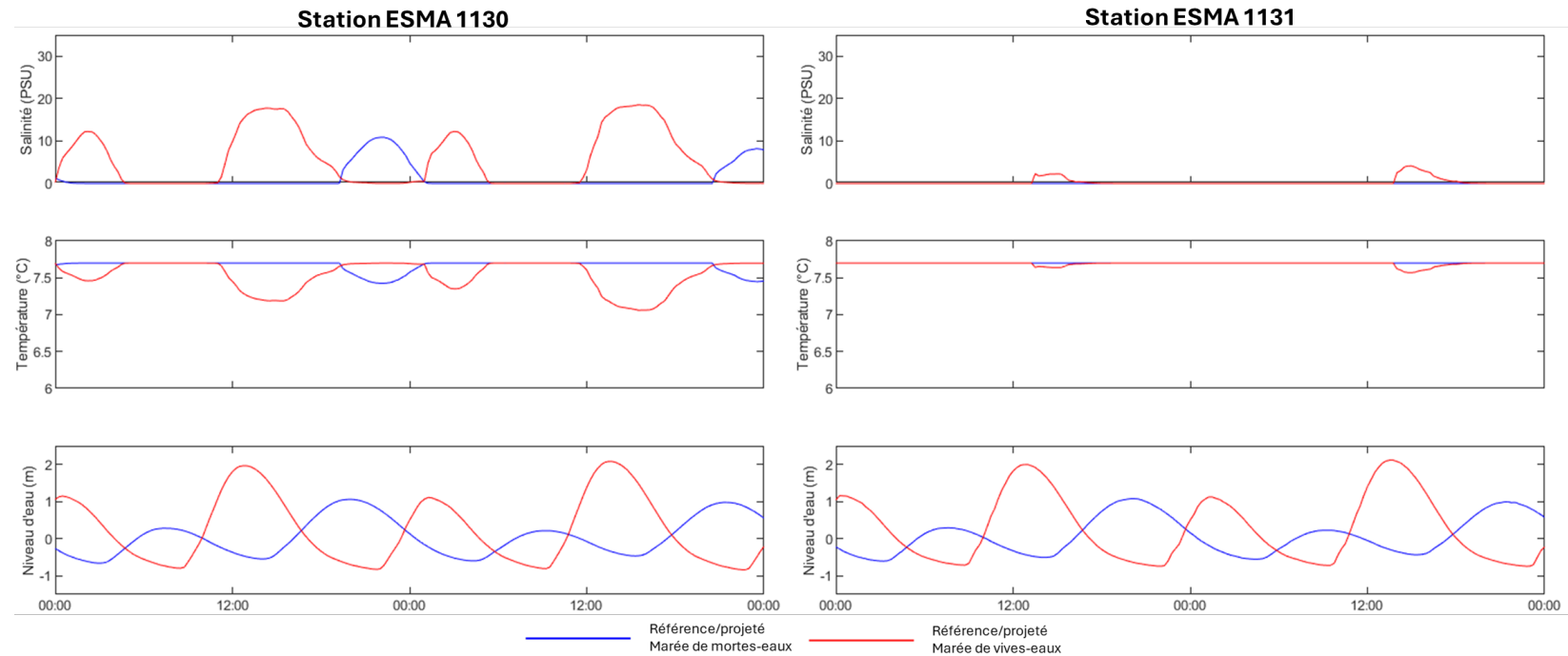
Séries temporelles de la salinité, de la température et des niveaux d'eau modélisés pour le scénario de débit module pour le mois de juin en conditions de référence ($Q=148,3 \text{ m}^3/\text{s}$) et projetées ($Q=104 \text{ m}^3/\text{s}$) aux stations ESMA1130 et ESMA1131.

* La salinité et la température sont des moyennes sur la colonne d'eau.



Séries temporelles de la salinité, de la température et des niveaux d'eau modélisés pour le scénario de débit module pour les mois d'octobre et de novembre en conditions de référence et projetées ($Q=93 \text{ m}^3/\text{s}$) aux stations ESMA1128 et ESMA1129.

* La salinité et la température sont des moyennes sur la colonne d'eau.

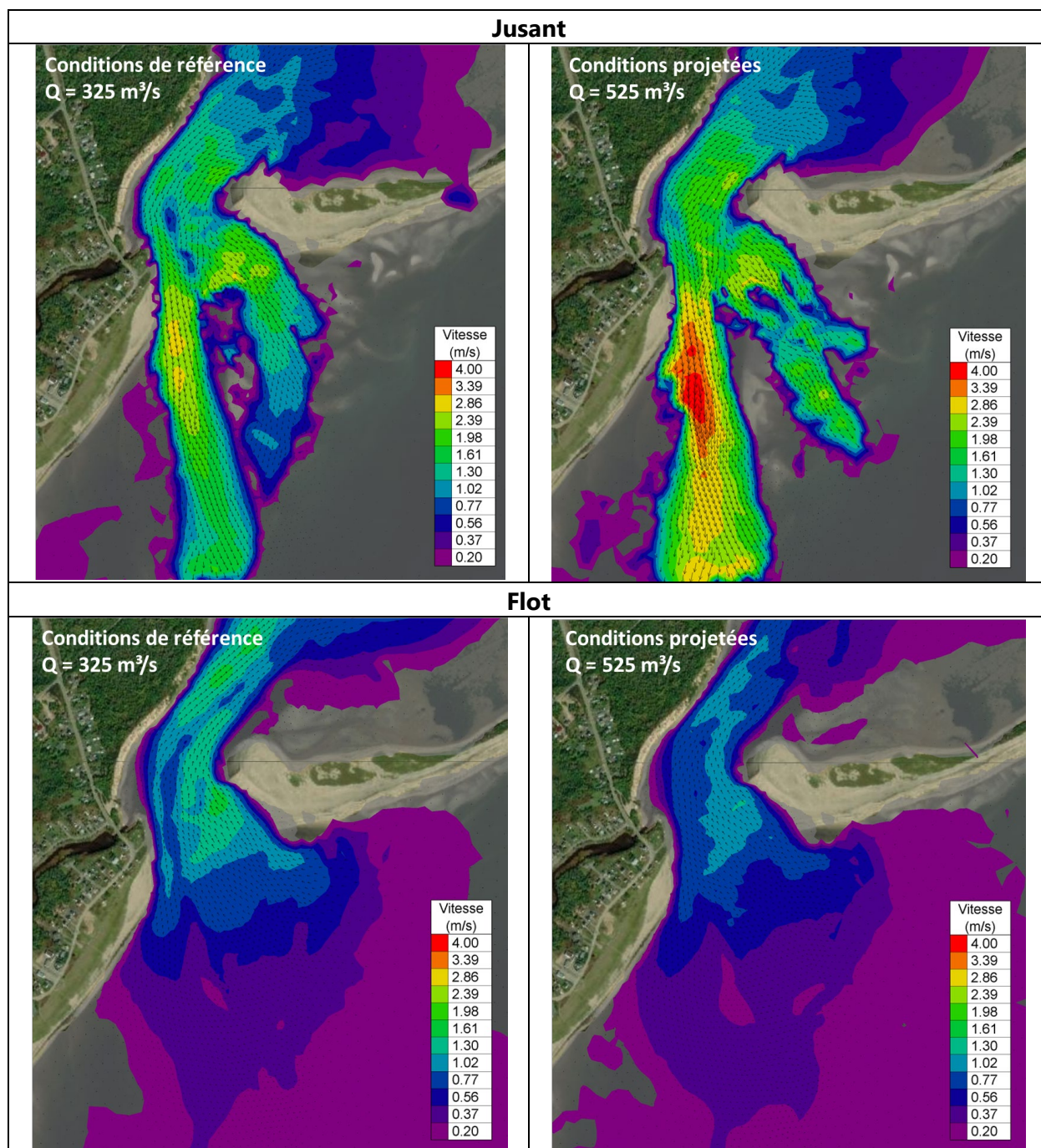


Séries temporelles de la salinité, de la température et des niveaux d'eau modélisés pour le scénario de débit module pour les mois d'octobre et de novembre en conditions de référence et projetées ($Q=93 \text{ m}^3/\text{s}$) aux stations ESMA1130 et ESMA1131.

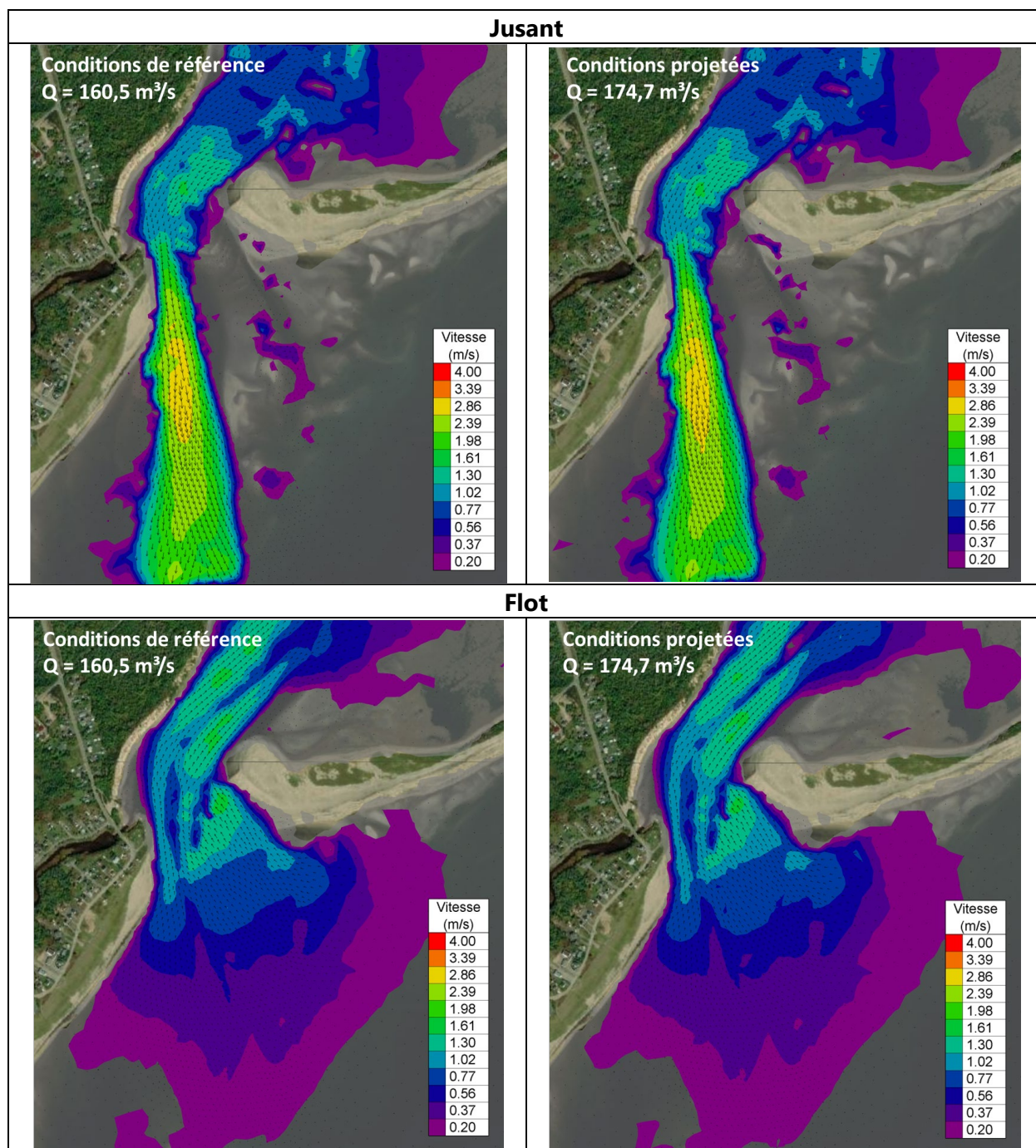
* La salinité et la température sont des moyennes sur la colonne d'eau.

ANNEXE F

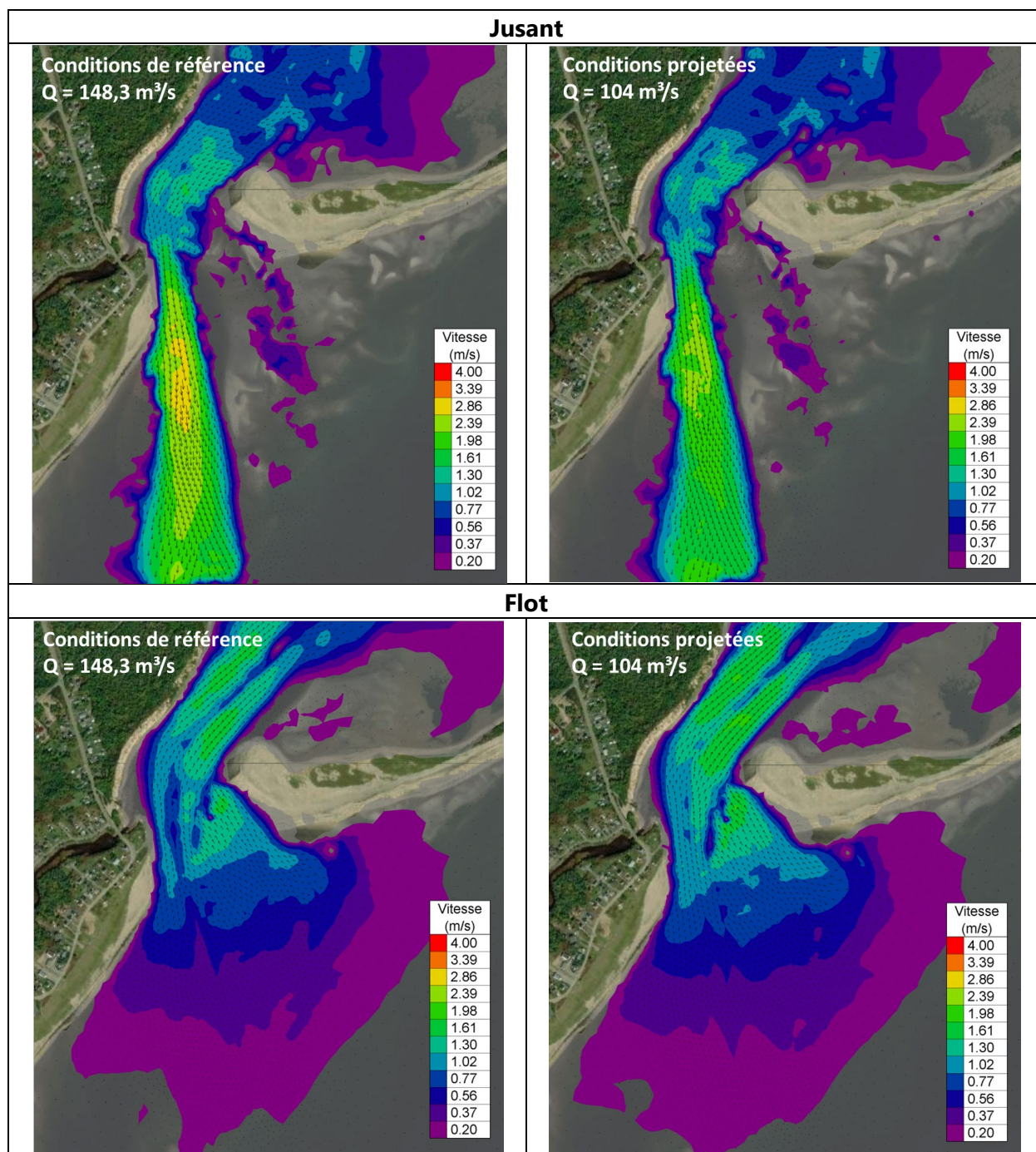
VITESSES DE COURANTS AU FOND À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE SAINTE-MARGUERITE EN MARÉE DE VIVES-EAUX



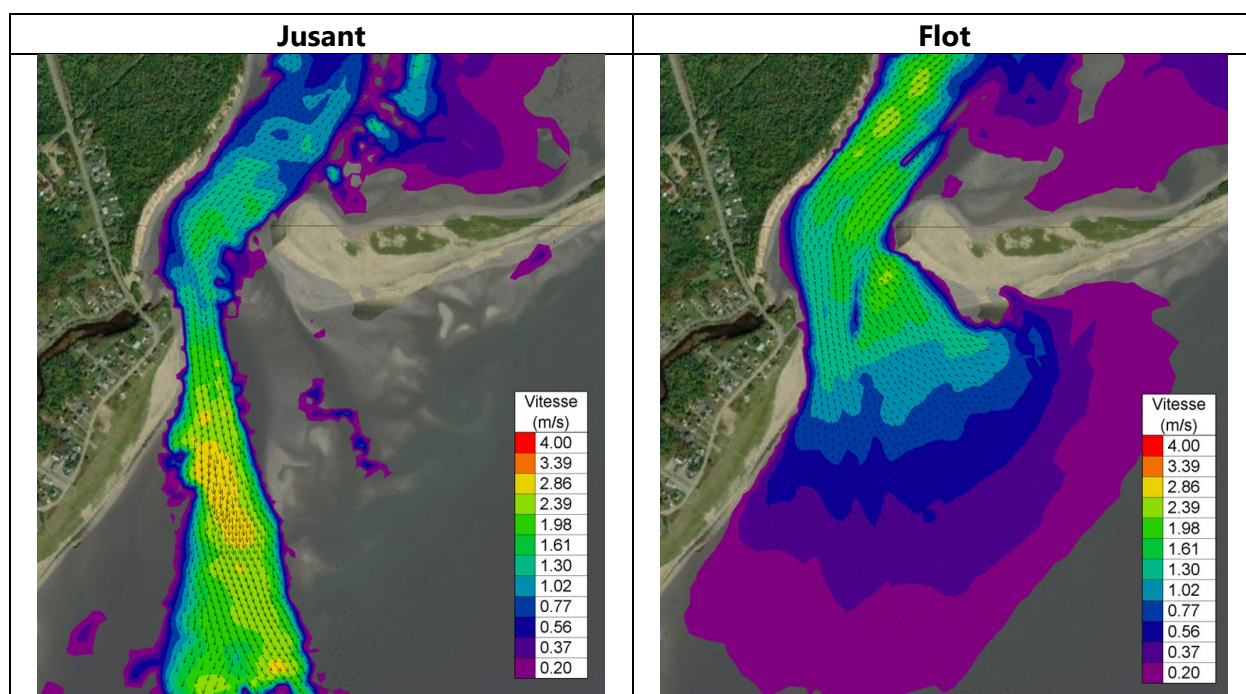
Vitesses de courant maximum près du fond au jusant et au flot (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit maximum de janvier/février pour les conditions de référence et les conditions projetées.



Vitesses de courant maximum près du fond au jusant et au flot (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit module de mai pour les conditions de référence et les conditions projetées.



Vitesses de courant maximum près du fond au jusant et au flot (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit module de juin pour les conditions de référence et les conditions projetées.



Vitesses de courant maximum près du fond au jusant et au flot (marée de vives-eaux) associées au scénario de débit module d'octobre/novembre pour les conditions de référence/projetées.

