

Confidentiel

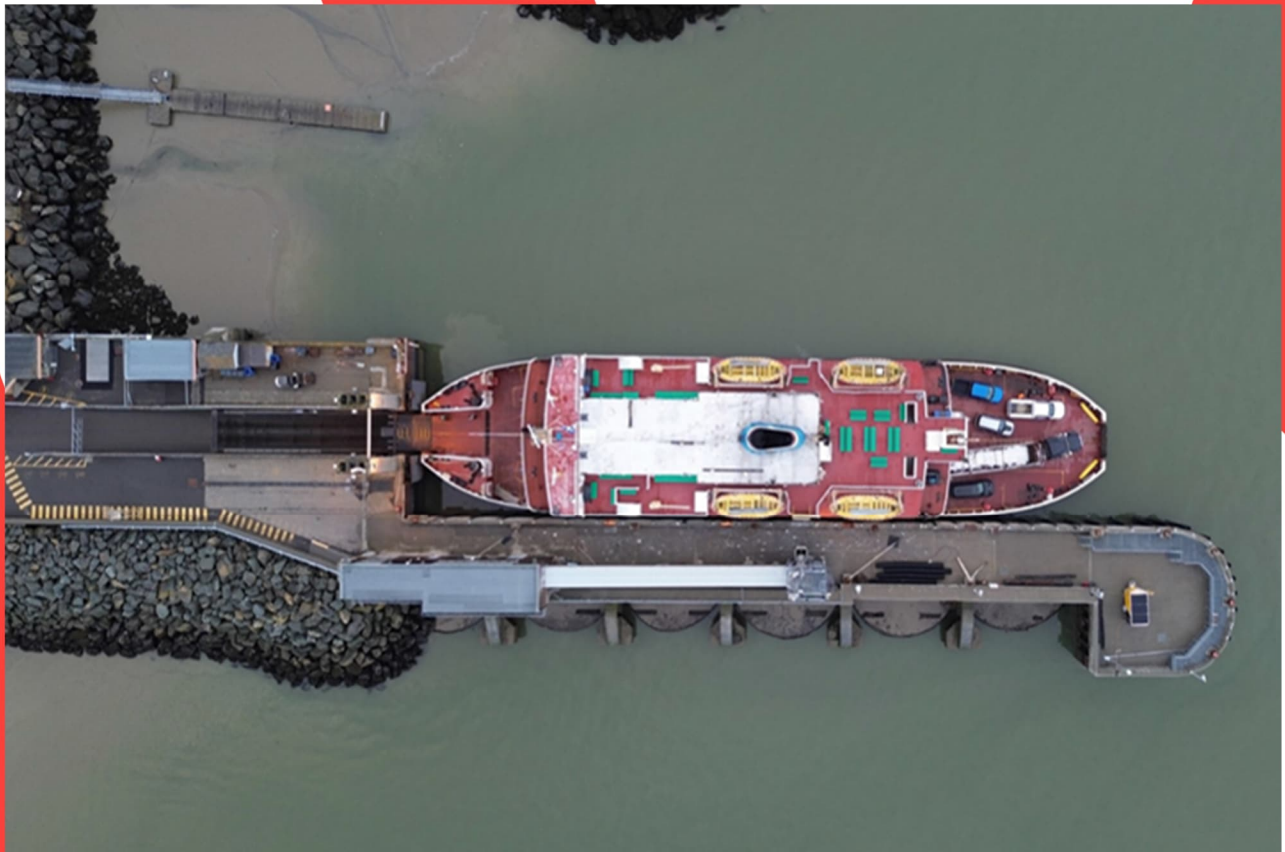
Société des traversiers du Québec

Dragage annuel de Rivière-du-Loup

Rapport de modélisation de la dispersion des sédiments

22 juin 2026

Référence WSP : CA0009072.3441_R_Rev0



Distribution du document

Société des traversiers du Québec Dragage annuel de Rivière-du-Loup Rapport de modélisation de la dispersion des sédiments

22 juin 2026

Référence WSP : CA0009072.3441_R_Rev0

Préparé pour

Société des traversiers du Québec

Préparé par

WSP CANADA INC.
1135, boulevard Lebourgneuf
Québec (Québec) G2K 0M5
Canada

Téléphone : +1-418-623-2254
Télécopieur : +1-418-624-1857

Référence à citer

WSP. 2026. *Dragage annuel de Rivière-du-Loup, Rapport de modélisation de la dispersion des sédiments*. Produit pour Société des traversiers du Québec. Référence WSP : CA0009072.3441_R_Rev0. 41 pages et annexe.



Révisions

Rév.	Date	Information détaillée
RevA	2026-01-26	Version préliminaire
RevB	2026-06-18	Version préfinale dans nouveau format WSP
Rev0	2026-06-22	Version finale

Signatures

Contrôle de la qualité	Nom	Date	Signature
Préparé par :	Noémie Blouin pour : Reinier Tromp, P.Eng., PMP, M.Sc. Responsable côtier	2026-06-22	
Approuvé par :	Mélanie Lévesque Biologiste, M.Sc. Océanographie Gestionnaire - Écologie Aquatique	2026-06-22	

Limitations

WSP Canada Inc. (WSP) a préparé ce rapport uniquement pour son destinataire Société des traversiers du Québec, conformément à la convention de consultant convenue entre les parties. Advenant qu'une convention de consultant n'ait pas été exécutée, les parties conviennent que les Modalités générales à titre de consultant de WSP régiront leurs relations d'affaires, lesquelles vous ont été fournies avant la préparation de ce rapport.

Ce rapport est destiné à être utilisé dans son intégralité. Aucun extrait ne peut être considéré comme représentatif des résultats de l'évaluation.

Les conclusions présentées dans ce rapport sont basées sur le travail effectué par du personnel technique, entraîné et professionnel, conformément à leur interprétation raisonnable des pratiques d'ingénierie et techniques courantes et acceptées au moment où le travail a été effectué.

Le contenu et les opinions exprimées dans le présent rapport sont basés sur les observations et/ou les informations à la disposition de WSP au moment de sa préparation, en appliquant des techniques d'investigation et des méthodes d'analyse d'ingénierie conformes à celles habituellement utilisées par WSP et d'autres ingénieurs/techniciens travaillant dans des conditions similaires, et assujettis aux mêmes contraintes de temps, et aux mêmes contraintes financières et physiques applicables à ce type de projet.

WSP dénie et rejette toute obligation de mise à jour du rapport si, après la date du présent rapport, les conditions semblent différer considérablement de celles présentées dans ce rapport; cependant, WSP se réserve le droit de modifier ou de terminer ce rapport sur la base d'informations, de documents ou de preuves additionnels.

WSP ne fait aucune représentation relativement à la signification juridique de ses conclusions.

La divulgation de tout renseignement faisant partie du présent rapport relève uniquement de la responsabilité de son destinataire. Si un tiers utilise, se fie, ou prend des décisions ou des mesures basées sur ce rapport, ledit tiers en est le seul responsable. WSP n'accepte aucune responsabilité quant aux dommages que pourrait subir un tiers suivant l'utilisation de ce rapport ou quant aux dommages pouvant découler d'une décision ou mesure prise basée sur le présent rapport.

WSP a exécuté ses services offerts au destinataire de ce rapport conformément à la convention de consultant convenue entre les parties tout en exerçant le degré de prudence, de compétence et de diligence dont font habituellement preuve les membres de la même profession dans la prestation des mêmes services ou de services comparables à l'égard de projets de nature analogue dans des circonstances similaires. Il est entendu et convenu entre WSP et le destinataire de ce rapport que WSP n'offre aucune garantie, expresse ou implicite, de quelque nature que ce soit. Sans limiter la généralité de ce qui précède, WSP et le destinataire de ce rapport conviennent et comprennent que WSP ne fait aucune représentation ou garantie quant à la suffisance de sa portée de travail pour le but recherché par le destinataire de ce rapport.



En préparant ce rapport, WSP s'est fié de bonne foi à l'information fournie par des tiers, comme indiqué dans le rapport. WSP a raisonnablement présumé que les informations fournies étaient correctes et WSP ne peut donc être tenu responsable de l'exactitude ou de l'exhaustivité de ces informations.

Les bornes et les repères d'arpentage utilisés dans ce rapport servent principalement à établir les différences d'élévation relative entre les emplacements de prélèvement et/ou d'échantillonnage et ne peuvent servir à d'autres fins. Notamment, ils ne peuvent servir à des fins de nivelage, d'excavation, de construction, de planification, de développement, etc.

WSP nie toute responsabilité financière quant aux effets du rapport sur une transaction subséquente ou sur la dépréciation de la valeur des biens qu'il peut entraîner, ou encore qui peuvent découler des mesures, des actions et des coûts qui en résultent.

Les recommandations de conception fournies dans ce rapport s'appliquent uniquement au projet et aux zones décrites dans le texte, et uniquement si elles sont construites conformément aux détails indiqués dans le présent rapport. Les commentaires fournis dans ce rapport sur les problèmes potentiels pouvant subvenir lors de la construction et sur les différentes méthodologies possibles sont uniquement destinés à guider le concepteur. Le nombre d'emplacements de prélèvement et/ou d'échantillonnage peut ne pas être suffisant pour évaluer l'ensemble des facteurs pouvant affecter la construction, les méthodologies et les coûts. WSP nie toute responsabilité pouvant découler de décisions ou actions prises découlant de ce rapport, sauf si WSP en est spécifiquement informé et y participe. Advenant une telle situation, la responsabilité de WSP sera déterminée et convenue à ce moment.

Les conditions générales d'un site ne peuvent être extrapolées au-delà des zones définies et des emplacements de prélèvement et d'échantillonnage. Les conditions d'un site entre les emplacements de prélèvement et d'échantillonnage peuvent différer des conditions réelles. La précision et l'exactitude de toute extrapolation et spéculation au-delà des emplacements des prélèvements et d'échantillonnage dépendent des conditions naturelles, de l'historique de développement du site et des changements entraînés par la construction et des autres activités sur le site. De plus, l'analyse a été effectuée pour les paramètres chimiques et physiques déterminés seulement, et il ne peut pas être présumé que d'autres substances chimiques ou conditions physiques ne sont pas présentes. WSP ne fournit aucune garantie et ne fait aucune représentation contre les risques environnementaux non décelés ou contre des effets négatifs causés à l'extérieur de la zone définie.

Ces limitations sont considérées comme faisant partie intégrante du présent rapport.

Équipe de réalisation

WSP Canada Inc. (WSP)

Responsable côtier

Reinier Tromp, P. Eng., PMP, M. Sc.

Réviseurs

Sunder Prasad, Ph. D.

Noemie Blouin, P. Eng., M. Sc.

Stéphane Lorrain, M. Sc.

Table des matières

1.	Introduction	1
1.1	Objectifs de l'étude.....	2
2.	Caractérisation du milieu physique	4
2.1	Bathymétrie.....	4
2.2	Niveau d'eau	6
2.2.1	Caractéristiques des marées.....	6
2.2.2	Surcote de tempête	6
2.3	Vent	8
2.4	Courants	10
2.5	Sédiment.....	12
3.	Modélisation hydrodynamique.....	13
3.1	Méthodologie	13
3.2	Maillage du modèle et bathymétrie.....	13
3.3	Forçage du modèle	14
3.4	Paramètres du modèle	15
3.5	Scénarios du modèle	15
3.6	Résultats de calibration et de validation	15
3.6.1	Niveaux d'eau	16
3.6.2	Courants	19
4.	Modélisation du transport sédimentaire.....	20
4.1	Méthodologie	21
4.1.1	Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire.....	21
4.1.2	Caractéristiques des sédiments dragués et du chaland à clapets	22
4.1.3	Caractéristiques du dépôt	25
4.2	Résultats.....	26
4.2.1	Résultats du modèle en champ proche STFATE.....	26
4.2.2	Sortie STFATE vers les données d'entrée de DELFT3D-FM ST	28
4.2.3	Résultats du modèle en champ lointain DELFT3D-FM ST	30

5.	Conclusion	37
5.1	Synthèse des constats	37
5.1.1	Comportement à court terme (phase de rejet)	37
5.1.2	Comportement à moyen et long terme	37
5.1.3	Évolution des dynamiques sédimentaires.....	38
5.1.4	Impacts environnementaux	38
5.1.5	Comportement global du site.....	39
5.2	Recommandations	39
	Bibliographie.....	40

Tableaux

Tableau 1	Niveaux de marée à la station de Rivière-du-Loup (MPO, 2025).....	6
Tableau 2	Fractions sédimentaires issues des données de sédiments dragués de 2011 à 2020	12
Tableau 3	Propriétés des sédiments retenues pour la présente étude.....	12
Tableau 4	Forçage du modèle HD Delft3D-FM	15
Tableau 5	Paramètres du modèle HD Delft3D-FM.....	15
Tableau 6	Scénarios du modèle HD Delft3D-FM	15
Tableau 7	Paramètres des sédiments dragués.....	23
Tableau 8	Paramètres du chaland à clapets (SBH) (Le Groupe Ocean Inc., 2019)	24
Tableau 9	Caractéristiques du projet de dragage de référence de la STQ.....	24
Tableau 10	Paramètres supplémentaires du chaland pour la modélisation STFATE	24
Tableau 11	Propriétés supposées des classes de sédiments.....	25
Tableau 12	Concentrations maximales de MES à 100 m et 300 m de la cellule de dépôt 2025 sur une durée de dépôt de 48 h.....	35

Figures

Figure 1	Emplacement du quai de Rivière-du-Loup et des cellules de dépôt de l'Anse-au-Persil (en orange) dans le fleuve Saint-Laurent.....	1
Figure 2	Aperçu des données bathymétriques	4
Figure 3	Chenal situé au nord du site de dépôt de l'Anse-au-Persil, avec des formes de fond indiquant un transport sédimentaire vers l'amont.....	5
Figure 4	Coupe transversale dans le chenal nord présentant des formes de fond ondulatoires	5
Figure 5	Série temporelle du niveau d'eau et niveau d'eau résiduel à Rimouski	7
Figure 6	Probabilité de dépassement du niveau d'eau résiduel à Rimouski, l'année 2014 étant définie comme une année typique	8
Figure 7	Série temporelle des données de vent pour Rivière-du-Loup	9
Figure 8	Rose des vents pour la station de Rivière-du-Loup	9
Figure 9	Probabilité de dépassement de la vitesse du vent à Rivière-du-Loup.....	10
Figure 10	Diagramme de dispersion des courants près de la surface issu de la campagne de mesures ADCP réalisée du 7 octobre 2004 au 13 octobre 2005 (Sandwell, 2006)	11
Figure 11	Diagramme de dispersion des courants près du fond issu de la campagne de mesures ADCP réalisée du 7 octobre 2004 au 13 octobre 2005 (Sandwell, 2006)	11
Figure 12	Étendue du maillage du modèle Delft3D-FM et bathymétrie	14

Figure 13	Emplacements des stations marégraphiques du MPO (en bleu) dans le domaine du modèle Delft3D-FM, ainsi que l'emplacement de l'ADCP de 2005 (en rouge)	16
Figure 14	Résultats de calibration de l'élévation de surface entre le 1 ^e et le 29 octobre 2014 pour quatre stations marégraphiques	17
Figure 15	Résultats de calibration de l'élévation de surface entre le 1 ^{er} et le 29 novembre 2014 pour quatre stations marégraphiques	18
Figure 16	Résultats de calibration des courants selon l'azimut de 20° entre le 29 juin et le 13 juillet 2005, pour l'ADCP situé dans la zone de dépôt	19
Figure 17	Cellules de dépôt au site de dépôt de l'Anse-au-Persil (en orange)	21
Figure 18	Phases du modèle STFATE du panache de sédiments dragués.....	22
Figure 19	Emplacements de rejet en conditions de jusant (en vert) et emplacements de rejet en conditions de flot (en rouge) au site de dépôt de l'Anse-au-Persil.....	26
Figure 20	Profils verticaux de MES mesurés à une distance d'environ 270 à 460 m du site de dépôt le 27 juin 2005 (LaSalle, 2008)	27
Figure 21	Résultats du modèle STFATE des MES à la fin de la phase d'effondrement.....	28
Figure 22	Distribution massique dans la colonne d'eau pour le gravier, le sable et la vase (agrégats entièrement déposés)	30
Figure 23	Concentrations maximales de MES dans le domaine du modèle Delft3D-FM après un rejet unique au site de dépôt de l'Anse-au-Persil.....	31
Figure 24	Concentrations maximales de TSS au-dessus de l'état ambiant sur l'ensemble de la colonne d'eau et sur toute la période modélisée, attribuables aux activités de dépôt de sédiments dans la cellule 2025 du site de dépôt d'Anse-au-Persil, entre le 21 septembre et le 8 décembre pour l'année de référence 2014.	33
Figure 25	Série temporelle des concentrations de MES à différentes profondeurs d'eau, à une distance de 100 m de la cellule de dépôt 2025, sur une durée de dépôt de 48 h	34
Figure 26	Série temporelle des concentrations de MES à différentes profondeurs d'eau, à une distance de 300 m de la cellule de dépôt 2025, sur une durée de dépôt de 48 h	34
Figure 27	Dépôt de sédiments entre le 21 septembre et le 8 décembre autour de la cellule de dépôt 2025.....	35

Annexes

Annexe A	Pistes de réflexion pour l'approfondissement des connaissances
----------	--

1. Introduction

Dans le cadre du programme décennal de dragage d'entretien du quai de Rivière-du-Loup (RDL), la Société des traversiers du Québec (STQ) réalise annuellement des travaux de dragage afin de maintenir l'accessibilité sécuritaire aux installations portuaires. Les sédiments dragués sont déposés majoritairement en eau libre au site autorisé de l'Anse-au-Persil, situé à environ 3 km au nord-est du quai (figure 1).

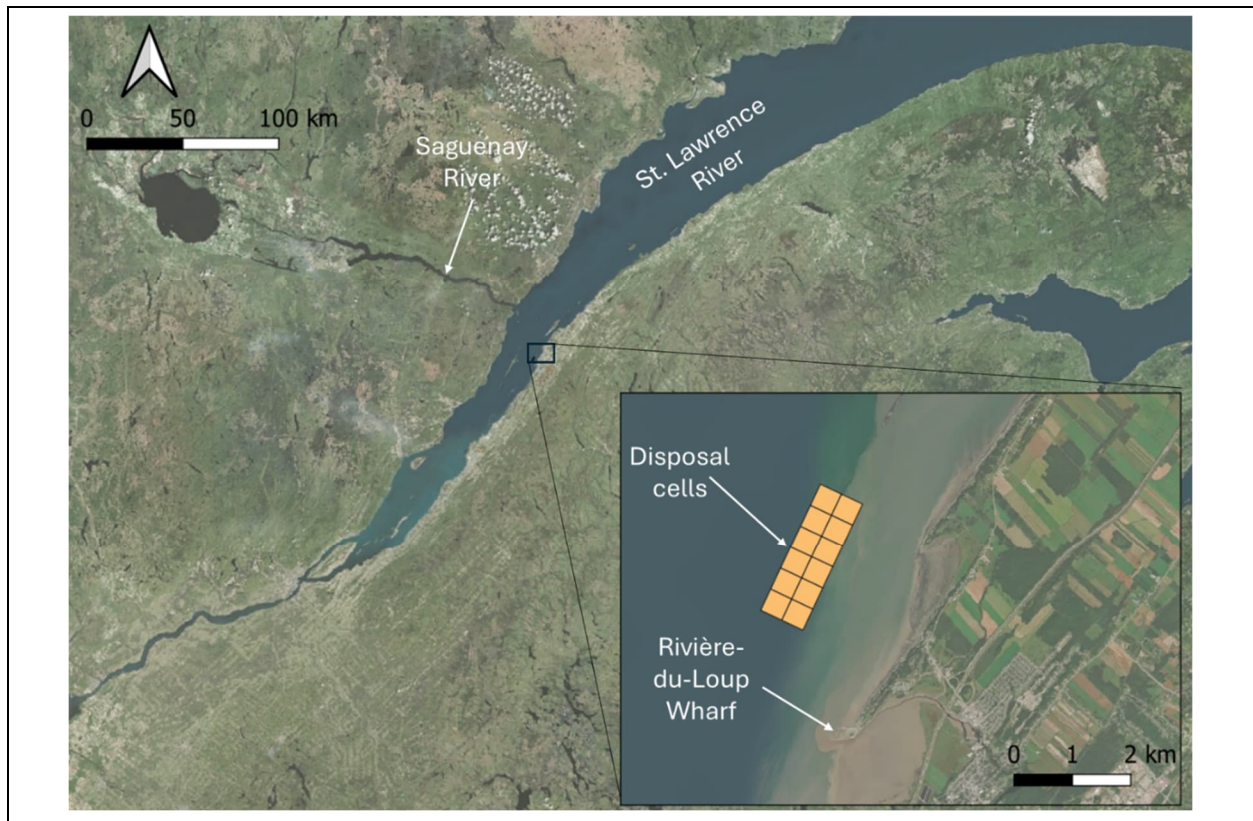


Figure 1 **Emplacement du quai de Rivière-du-Loup et des cellules de dépôt de l'Anse-au-Persil (en orange) dans le fleuve Saint-Laurent**

Considérant les enjeux environnementaux associés au rejet de sédiments en milieu aquatique, la STQ s'est engagée, auprès du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), à documenter de manière intégrée le devenir des sédiments tant en suspension qu'au fond, ainsi que les impacts potentiels sur le milieu récepteur. Cette démarche s'inscrit dans la continuité des exigences issues du processus d'autorisation environnementale et des engagements formulés en 2023.

Afin de répondre à ces exigences, deux études complémentaires ont été réalisées :

- une analyse géomorphologique du site de mise en dépôt visant à caractériser les dynamiques sédimentaires et l'évolution morphologique à partir de données bathymétriques multitemporelles et d'observations du fond marin (WSP, 2025);
- une modélisation hydrodynamique et hydro-sédimentaire, objet du présent rapport, visant à simuler :
 - a. la dispersion des sédiments en suspension lors du clapage (champ proche et champ lointain);
 - b. l'évolution morphodynamique du dépôt fraîchement formé sous l'action des courants.

Ces deux approches sont complémentaires et permettent d'obtenir une compréhension cohérente des processus de transport sédimentaire à différentes échelles spatiales et temporelles.

Le rapport est structuré comme suit :

- Section 2 : Caractérisation du milieu physique ;
- Section 3 : Description de la modélisation hydrodynamique;
- Section 4 : Modélisation du transport sédimentaire;
- Section 5 : Conclusions, hypothèses et recommandations;
- Section 6 : Liste des références.

1.1 Objectifs de l'étude

Le présent rapport vise à caractériser de manière intégrée le devenir des sédiments dragués au site de mise en dépôt de l'Anse-au-Persil, en considérant à la fois les processus de dispersion en suspension lors du clapage et l'évolution morphodynamique des dépôts au fond.

Dans cette perspective, l'étude s'inscrit dans la continuité des travaux antérieurs réalisés sur le site et vise à consolider la compréhension des dynamiques sédimentaires à partir d'une approche combinant modélisation numérique, analyse géomorphologique et données de terrain.

Les objectifs spécifiques de l'étude sont les suivants :

1. Décrire le comportement à court terme (phase de rejet) des sédiments dragués en présentant :
 - a. L'étendue spatiale et les concentrations du panache de matières en suspension (MES) généré lors des opérations de clapage;
 - b. La distribution verticale et horizontale des sédiments immédiatement après leur rejet, incluant la formation d'un nuage dense près du fond et sa dispersion initiale;

- c. Le processus de dilution et de dissipation du panache dans la colonne d'eau à proximité du point de rejet.
2. Décrire le comportement à moyen et long terme des sédiments dragués en présentant :
 - a. La dispersion des sédiments en suspension sous l'action des courants;
 - b. Le dépôt initial des matériaux et la redistribution sous l'effet des conditions hydrodynamiques;
 - c. L'érosion, remise en suspension et transport secondaire des sédiments ;
 - d. L'évolution morphodynamique de la cellule de dépôt et des zones environnantes.
3. Décrire l'évolution des dynamiques sédimentaires et la cohérence des observations en effectuant une :
 - a. Comparaison des patrons de dispersion et de dépôt avec ceux documentés dans les études antérieures;
 - b. Validation des résultats de modélisation à partir des observations de terrain (MES, bathymétrie, granulométrie);
 - c. Interprétation de l'évolution du comportement du site (caractère dispersif et stabilité des dépôts).
4. Évaluer des impacts environnementaux en définissant :
 - a. L'ampleur spatiale du panache en suspension;
 - b. L'intensité et la durée des concentrations de MES dans le milieu récepteur;
 - c. Le rayon d'influence des opérations de mise en dépôt, tant en suspension qu'au fond;
 - d. La capacité du site à contenir ou disperser les matériaux déposés.
5. Appuyer la gestion du site de mise en dépôt en effectuant :
 - a. L'identification des conditions hydrodynamiques influençant la dispersion ou la rétention des sédiments;
 - b. L'évaluation de l'efficacité des pratiques actuelles de mise en dépôt;
 - c. La définition d'éléments d'optimisation des stratégies de dépôt (séquence, localisation, gestion des cellules);
 - d. La contribution à l'élaboration d'approches de suivi adaptées à l'évolution du site.

Plus globalement, l'étude vise à établir le rayon d'influence du dépôt, valider les hypothèses sur la dynamique sédimentaire du site et fournir une base scientifique robuste pour la gestion des opérations de dragage.

2. Caractérisation du milieu physique

2.1 Bathymétrie

Deux ensembles de données bathymétriques ont été recensés pour cette étude :

1. Données de levé bathymétrique pour le site de dépôt de l'Anse-au-Persil.
2. Données bathymétriques NONNA du Service hydrographique du Canada (SHC) pour le fleuve Saint-Laurent (gouvernement du Canada, Pêches et Océans Canada [MPO] et SHC, 2024).

Toutes les données bathymétriques ont été converties au système CGVD2013. Un aperçu des données bathymétriques est présenté à la figure 2. Pour le reste de ce rapport, tous les niveaux verticaux mentionnés sont rapportés au référentiel vertical CGVD2013.

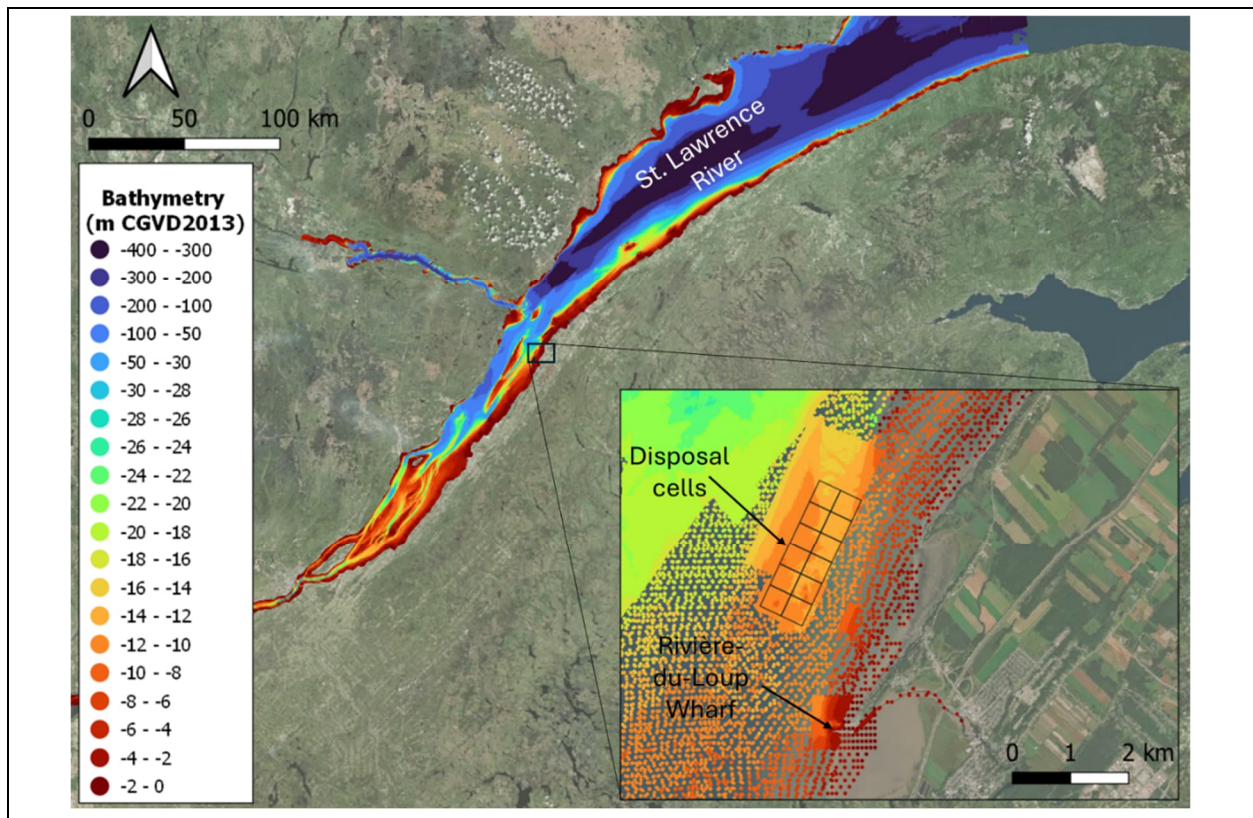


Figure 2 **Aperçu des données bathymétriques**

L'analyse des données bathymétriques dans le chenal situé juste au nord du site de rejet de l'Anse-au-Persil a révélé la présence de formes de fond sous-marines associées à un transport sédimentaire dirigé vers l'amont (figures 3 et 4) puisque les parties les plus abruptes des formes de fond étaient situées du côté amont. Les formes de fond observées présentaient des longueurs variant entre 10 et 30 m, et des hauteurs comprises entre 0,4 et 1,5 m.

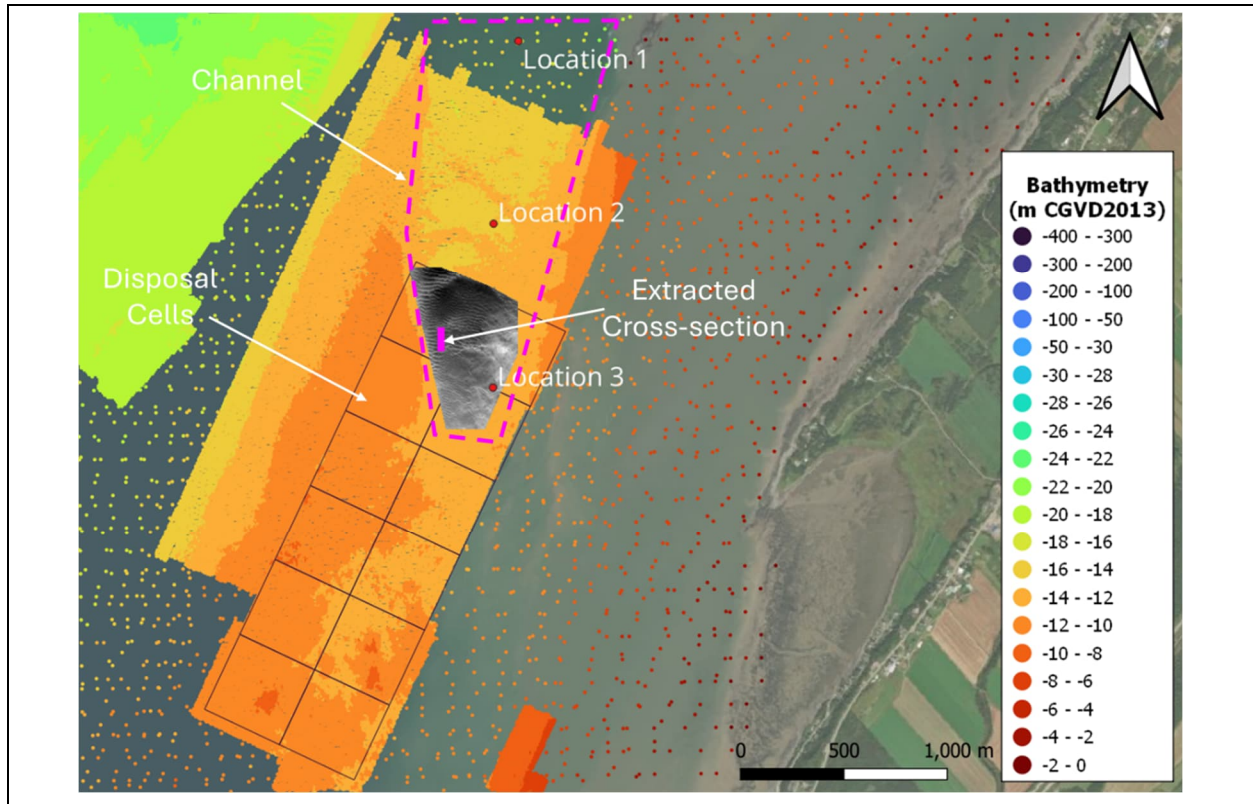


Figure 3 **Chenal situé au nord du site de dépôt de l'Anse-au-Persil, avec des formes de fond indiquant un transport sédimentaire vers l'amont**

Les formes de fond sur le lit du fleuve sont présentées plus en détail, en noir et blanc.

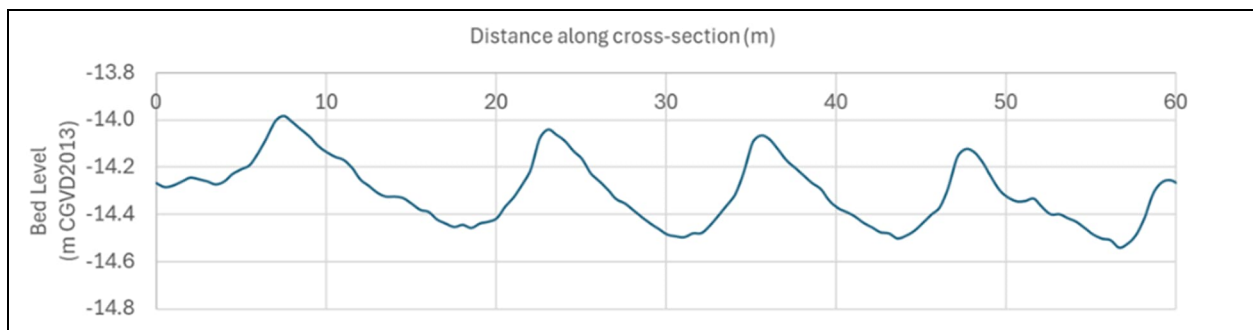


Figure 4 **Coupe transversale dans le chenal nord présentant des formes de fond ondulatoires**

La direction aval est vers la droite.

2.2 Niveau d'eau

2.2.1 Caractéristiques des marées

Un aperçu des caractéristiques des marées à RDL (station ID 03130) est présenté au tableau 1 (MPO, 2025). Le zéro des cartes (ZC) se situe 2,96 m sous le référentiel géodésique (CGVD2013).

Tableau 1 Niveaux de marée à la station de Rivière-du-Loup (MPO, 2025).

ID	Hauteur (m) CGVD2013)
Niveau d'eau le plus élevé enregistré	3,18
Plus haute marée astronomique	2,74
Pleine mer supérieure de grande marée	2,69
Moyenne des pleines mers supérieures (pleine mer supérieure de marée moyenne)	1,65
Pleine mer moyenne (pleine mer de marée moyenne)	1,36
Niveau moyen de l'eau	-0,27
Basse mer moyenne (basse mer de marée moyenne)	-1,87
Moyenne des basses mers inférieures (basse mer inférieure de marée moyenne)	-1,98
Basse mer inférieure de grande marée	-2,99
Plus basse marée astronomique	-3,09
Niveau d'eau le plus bas enregistré	-3,59

2.2.2 Surcote de tempête

Les données de niveaux d'eau observés ont été obtenues à partir de la station marégraphique de Rimouski (station ID 02985), en raison de sa proximité avec le site du projet. Une série temporelle continue a été compilée et analysée pour la période de 1985 à 2016. L'analyse et la prédiction harmonique des marées ont été réalisées à l'aide des fonctions Matlab « UTide » (Codiga, 2011), afin de séparer le signal non marégraphique du signal marégraphique dans la série temporelle des niveaux d'eau mesurés. La configuration par défaut d'UTide a été appliquée, en utilisant les enregistrements de niveaux d'eau mesurés comme données d'entrée pour estimer les constituants de marée. Des renseignements détaillés sur la configuration d'UTide sont fournis dans Codiga (2011).

Dans un premier temps, UTide a réalisé une analyse harmonique des données de niveaux d'eau observés afin d'extraire le signal de marée. Ce signal a ensuite été utilisé pour reconstruire les niveaux d'eau de marée prédits sur l'ensemble de la série temporelle. Les résidus ont été déterminés en soustrayant ces niveaux d'eau de marée prédits des niveaux d'eau mesurés, permettant ainsi d'isoler les résidus non marégraphiques. La figure 5 présente la série temporelle du niveau d'eau mesuré et du niveau d'eau résiduel (c.-à-d. la surcote de tempête) calculé pour l'ensemble des données. Les probabilités de dépassement du niveau d'eau résiduel pour chaque année de données ont ensuite été tracées (figure 6). À l'aide d'une méthode des moindres carrés, l'année 2014 a été identifiée comme celle dont la courbe de probabilité de dépassement était la plus proche de la moyenne calculée pour l'ensemble des années du jeu de données.

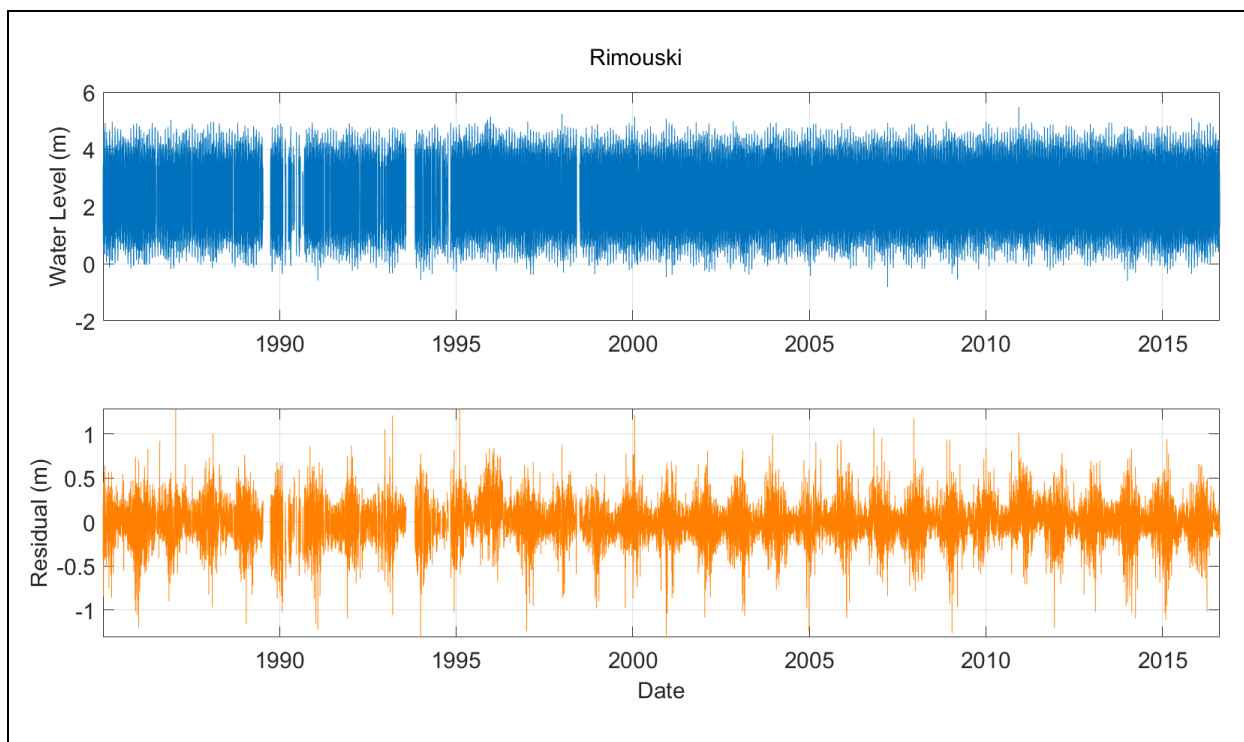


Figure 5 Série temporelle du niveau d'eau et niveau d'eau résiduel à Rimouski

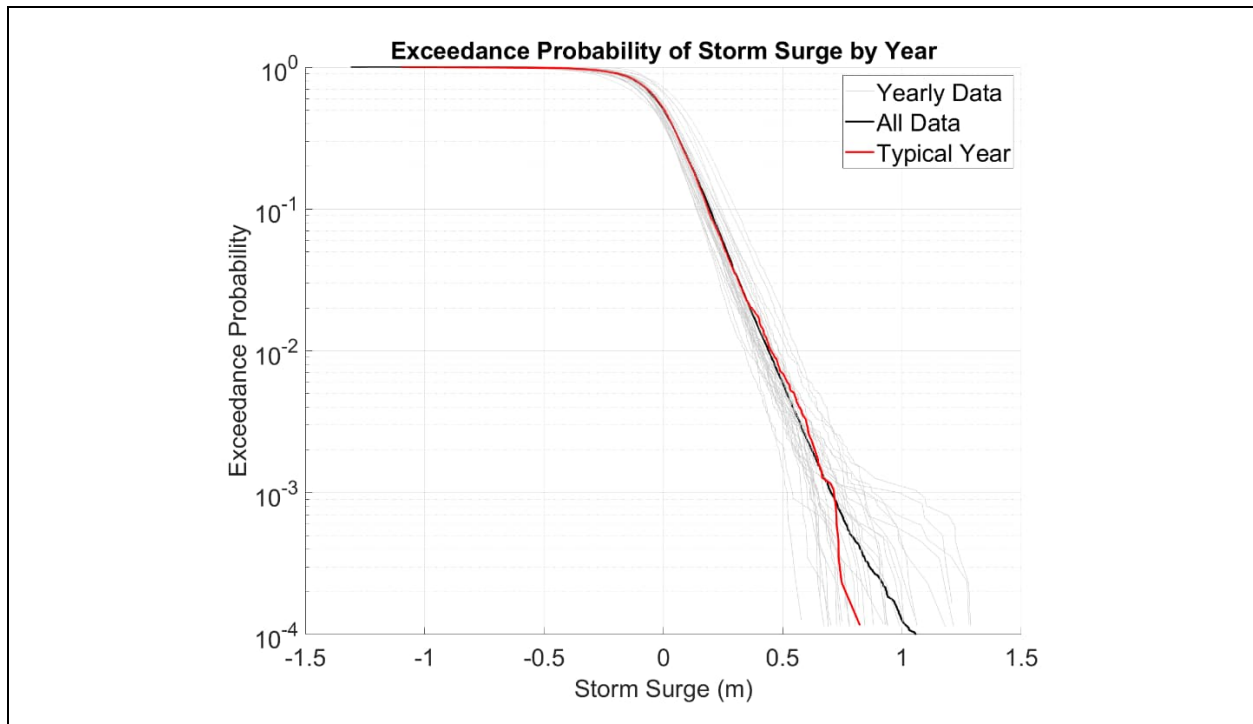


Figure 6 Probabilité de dépassement du niveau d'eau résiduel à Rimouski, l'année 2014 étant définie comme une année typique

2.3 Vent

Les données de vent ont été obtenues pour la station de Rivière-du-Loup (ID climatique = 7056616). Cette station est en service depuis 1994 et est située sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent. La série temporelle des vitesses horaires moyennes du vent mesurées à cette station est présentée à la figure 7, et une rose des vents est présentée à la figure 8.

Les événements de vents forts pour lesquels la vitesse du vent dépassait 36 km/h ainsi que les événements de vents extrêmes pour lesquels la vitesse du vent dépassait 40 km/h ont été recensés. En moyenne, il a été conclu qu'environ un ou deux événements majeurs surviennent chaque année. Afin de déterminer une année typique, les courbes de probabilité de dépassement des vitesses de vent pour chaque année ont été comparées à la courbe globale de dépassement établie à partir de l'ensemble des données de la station de RDL (figure 8). Les courbes de dépassement pour chaque année sont présentées en gris pâle, tandis que la courbe de dépassement globale est représentée par une ligne noire grasse. Une comparaison par la méthode des moindres carrés a révélé que l'année 2014 était la plus représentative de la moyenne globale, comme illustré en rouge gras à la figure 9.

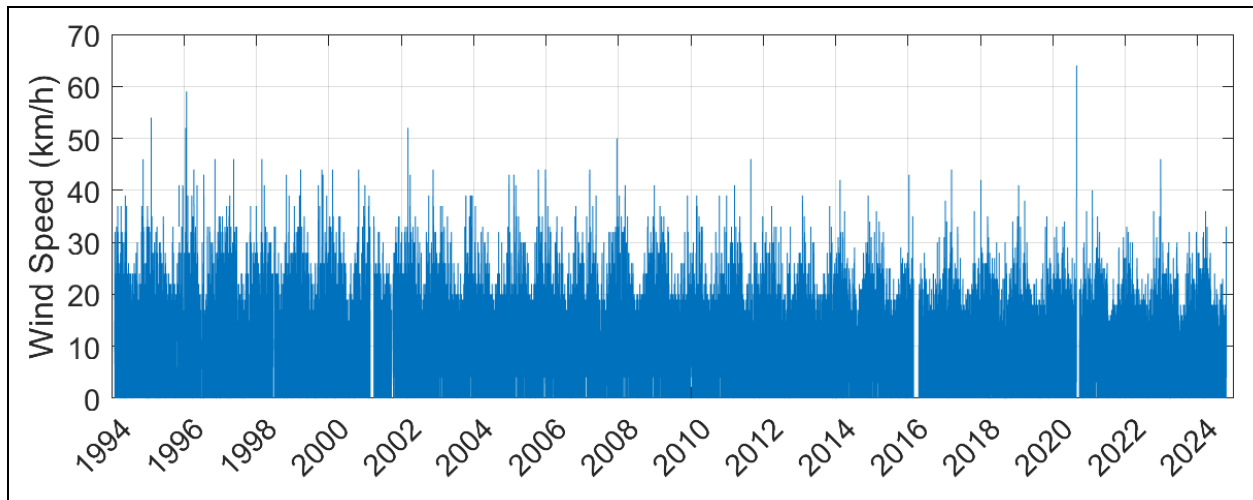


Figure 7 Série temporelle des données de vent pour Rivière-du-Loup

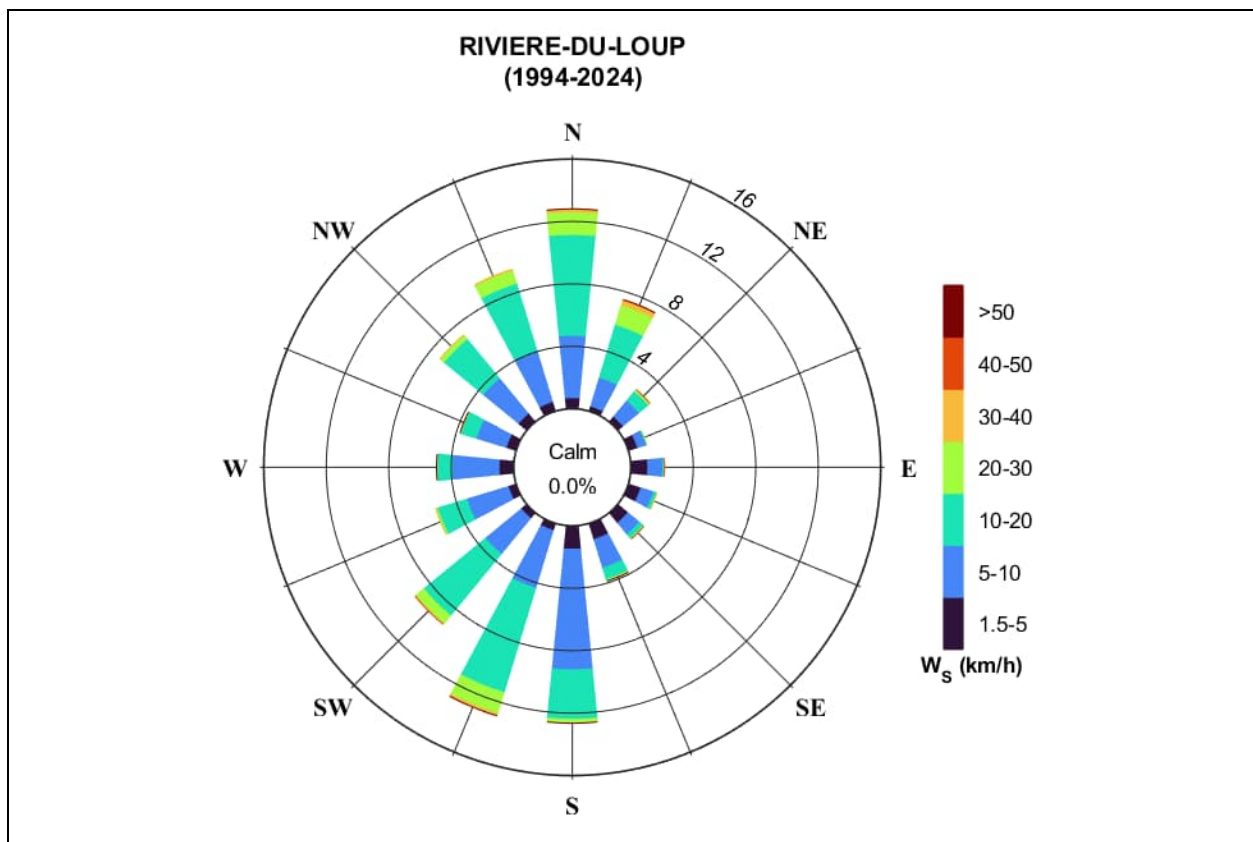


Figure 8 Rose des vents pour la station de Rivière-du-Loup

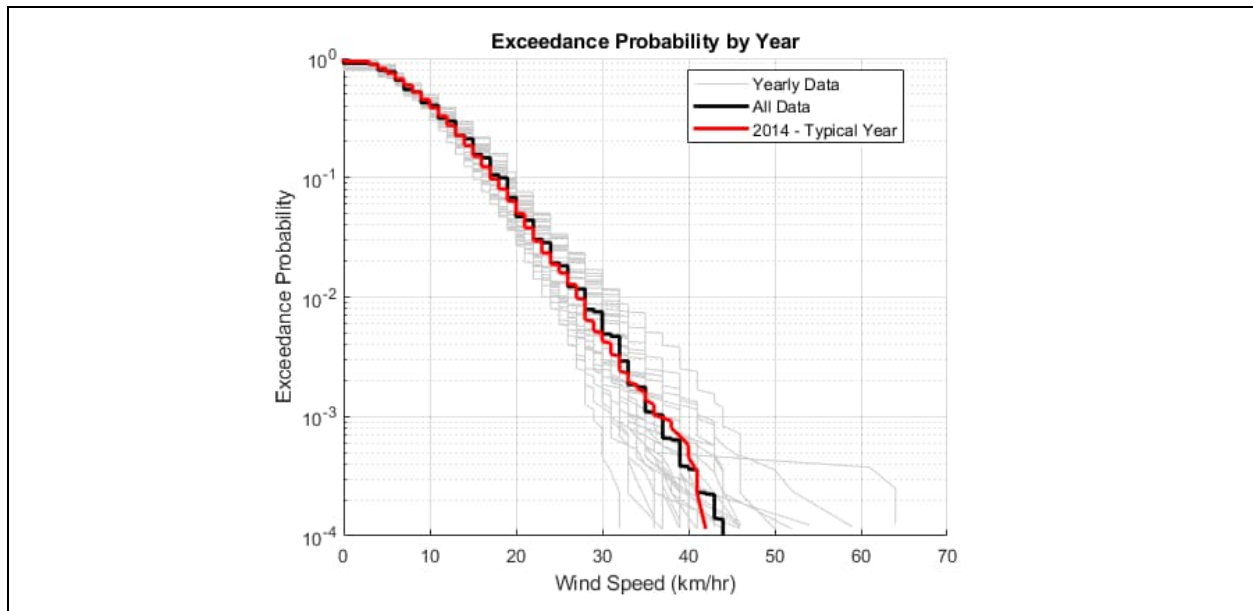


Figure 9 Probabilité de dépassement de la vitesse du vent à Rivière-du-Loup

2.4 Courants

Les mesures ADCP ont été analysées à partir du rapport météo-océanographique de Sandwell pour Gros-Cacouna (Sandwell, 2006). Les mesures ont été réalisées entre le 7 octobre 2004 et le 13 octobre 2005 au poste d'amarrage de Gros-Cacouna, situé à environ 7,5 km en amont du site de dépôt de l'Anse-au-Persil. À partir de ces mesures ADCP (figures 10 et 11), il apparaît clair que les écoulements de surface sont dominés par le jusant, tandis que les écoulements près du fond sont dominés par le flot. Cette asymétrie s'explique par le déplacement du coin salin entrant et sortant du fleuve Saint-Laurent dans les couches inférieures de la colonne d'eau, tandis que des eaux plus douces s'écoulent au-dessus de ce coin salin.

L'asymétrie observée des vitesses de courant dans les couches de fond et de surface pourrait expliquer les formes de fond associées au transport sédimentaire vers l'amont, observées dans le chenal situé juste au nord du site de dépôt de l'Anse-au-Persil (voir section Section 2). Afin d'examiner plus en détail la présence de ces formes de fond, une compréhension des processus physiques régissant le transport sédimentaire et les changements morphologiques est toutefois nécessaire. À cette fin, il est recommandé de mettre en place un programme de collecte de données sur le terrain axé sur la mesure des niveaux d'eau, des courants et des vagues dans le chenal situé juste au nord du site de dépôt de l'Anse-au-Persil.

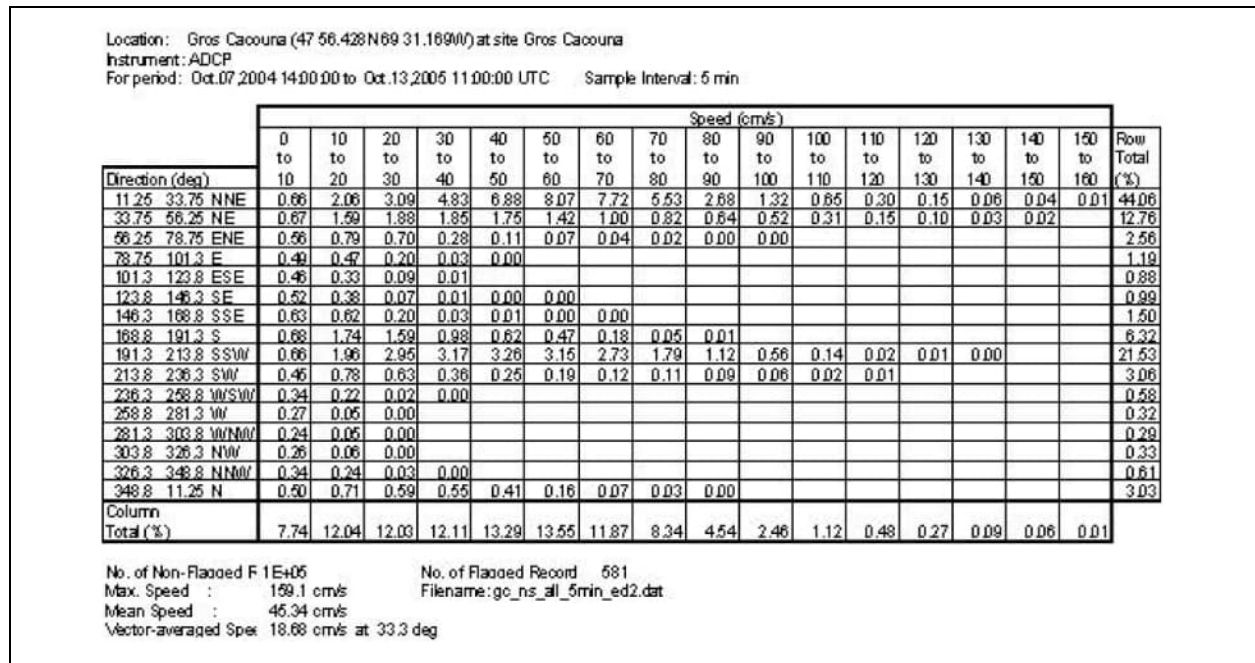


Figure 10 Diagramme de dispersion des courants près de la surface issu de la campagne de mesures ADCP réalisée du 7 octobre 2004 au 13 octobre 2005 (Sandwell, 2006)
Les courants de jusant et de flot s'écoulent respectivement vers 20° et 200°.

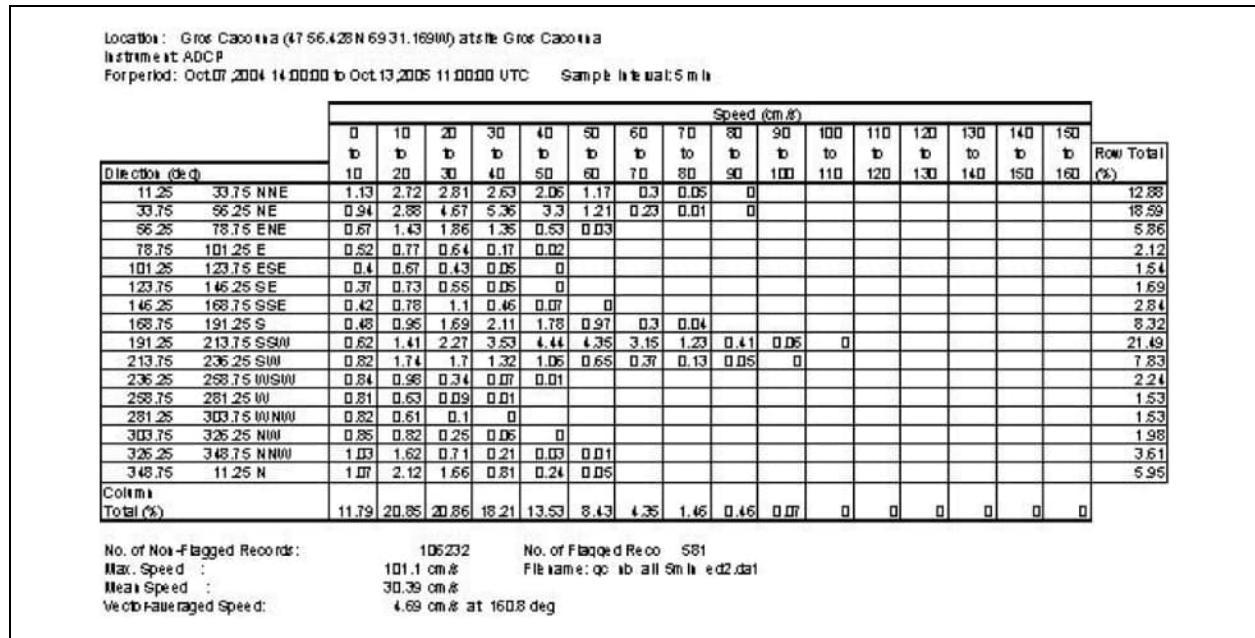


Figure 11 Diagramme de dispersion des courants près du fond issu de la campagne de mesures ADCP réalisée du 7 octobre 2004 au 13 octobre 2005 (Sandwell, 2006)
Les courants de jusant et de flot s'écoulent respectivement vers 20° et 200°.

2.5 Sédiment

Des échantillons de sédiments dragués prélevés entre 2011 et 2020 près de RDL ont été fournis et analysés par WSP. À partir de ces échantillons, il a été conclu que les sédiments dragués étaient de nature limon sableux, la classe granulométrique dominante étant le limon. Il convient de noter que pour les échantillons dont les fractions ne totalisaient pas 100 %, la fraction de limon a été ajustée en conséquence. Aucune analyse granulométrique des sédiments n'a été mise à la disposition de WSP; la classification granulométrique de Wentworth (Wentworth, 1922) a donc été utilisée afin de déterminer les tailles moyennes des grains pour chaque classe de sédiments (tableau 2). Les vitesses de chute ont été déterminées selon la loi de Stokes, Budryck ou Rittinger (LibreTexts Engineering, 2025) et sont présentées au tableau 3. Aux fins de la présente étude, le limon et l'argile ont été regroupés dans une classe définie comme de la vase.

Tableau 2 Fractions sédimentaires issues des données de sédiments dragués de 2011 à 2020

	GRAVIER (%)	SABLE (%)	LIMON (%)	ARGILE (%)
RDL-11-01	0,02	20,24	77,69	2,05
RDL-11-02	0,01	35,12	62,06	2,81
RDL-11-03	0,21	33,81	63,55	2,43
RDL-11-04	0,00	36,63	61,25	2,12
RDL-11-05	0,01	31,96	66,47	1,56
RDL-11-06	0,07	26,52	72,27	1,15
RDL-11-07	0,03	27,97	70,24	1,76
RDL-11-08	0,02	28,32	69,72	1,93
RDL-11-09	0,03	27,87	70,28	1,82
RDL-11-10	0,01	33,45	63,85	2,69
Moyenne	0,04	30,19	67,74	2,03

Tableau 3 Propriétés des sédiments retenues pour la présente étude.

	GRAVIER	SABLE	VASE (LIMON ET ARGILE)
Fraction sédimentaire (%)	0,04	30,19	69,77
Diamètre des sédiments (mm)	3,000	0,375	0,011
Vitesse de chute (mm/s)	194,000	48,500	0,078

3. Modélisation hydrodynamique

3.1 Méthodologie

Un modèle hydrodynamique (HD) tridimensionnel (3D) Delft3D-FM du fleuve Saint-Laurent a été développé avec cinq couches sigma d'épaisseur égale. Delft3D-FM est un logiciel libre développé par Deltares (Deltares, 2024), pouvant être utilisé pour simuler les environnements côtiers, fluviaux et estuariens. Il utilise un maillage flexible non structuré et permet de modéliser l'interaction entre l'eau, les sédiments, les vagues et la qualité de l'eau, aussi bien en 2D qu'en 3D. Le modèle HD Delft3D-FM a été calibré et validé à partir des niveaux d'eau mesurés aux stations marégraphiques situées le long du fleuve Saint-Laurent, ainsi que des mesures de courant ADCP réalisées à proximité du site de dépôt. Les vagues générées par le vent n'ont pas été incluses dans la présente étude puisque le site de dépôt de l'Anse-au-Persil est situé en eau plus profonde et que le panache sédimentaire devrait donc être relativement peu influencé par les vagues.

Aucun effet lié à la salinité ou à la température de l'eau n'a été inclus dans le modèle Delft3D-FM pour la présente étude, puisque leur influence sur la dispersion du panache sédimentaire est faible comparativement à celle induite par les courants. Il s'agit d'une approche simplifiée, dans laquelle les processus de transport sédimentaire à grande échelle sont simulés afin de répondre aux objectifs de l'étude. Pour représenter les phénomènes à plus petite échelle, c.-à-d. les formes de fond observées indiquant un transport sédimentaire potentiel vers l'amont, la salinité et la température devraient être intégrées au modèle, en plus d'utiliser un maillage de résolution nettement plus élevée. Actuellement, le modèle Delft3D-FM ne reproduit pas l'intensité et/ou la durée de l'écoulement de flot près du fond induit par le déplacement du coin salin vers l'amont, comme l'indiquent les mesures ADCP (Sandwell, 2006). Toutefois, le modèle reproduit tout de même les courants de flot et de jusant ainsi que les contraintes de cisaillement au fond qui en résultent. Par conséquent, à l'échelle globale, le transport sédimentaire de fond sur plusieurs cycles de marée est représenté adéquatement.

3.2 Maillage du modèle et bathymétrie

Un maillage flexible utilisant les ensembles de données bathymétriques décrits à la Section 2.1 a été développé pour couvrir environ 300 km du fleuve Saint-Laurent (figure 12). La résolution du maillage varie dans l'ensemble du domaine du modèle; la résolution la plus élevée (30 m) a été définie dans la zone de dépôt et ses environs, puis elle diminue à 100-250 m dans la majeure partie du reste du domaine du modèle.

La résolution de maillage la plus faible (500 m) a été définie près de Rimouski. Deux limites du modèle ont été utilisées : une limite amont de débit près de Trois-Rivières et une limite aval de niveau d'eau près de Rimouski. La bathymétrie près de la limite aval a été fixée à - 350 m afin d'éviter les instabilités du modèle.

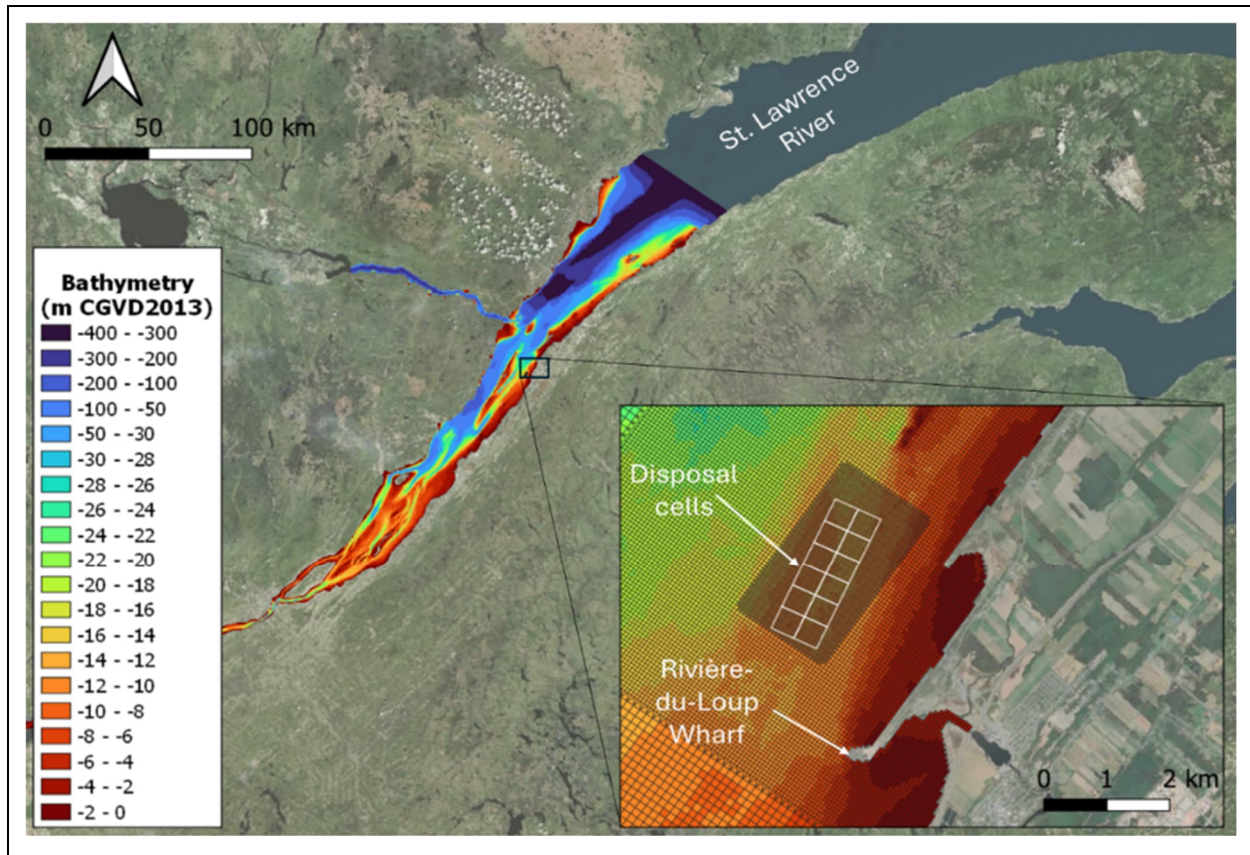


Figure 12 Étendue du maillage du modèle Delft3D-FM et bathymétrie

3.3 Forçage du modèle

Le modèle Delft3D-FM a été forcé à l'aide des niveaux d'eau à la limite aval près de Rimouski et des débits à la limite amont près de Trois-Rivières. Les effets du vent et de la pression atmosphérique spatialement variables ont également été ajoutés au modèle. Le tableau 4 résume les sources de données accessibles au public, utilisées pour le forçage du modèle.

Tableau 4 Forçage du modèle HD Delft3D-FM

Forçage	Source des données
Niveaux d'eau à la limite aval près de Rimouski	Marégraphes canadiens du MPO (MPO, 2025)
Débits à la limite amont près de Trois-Rivières	Observatoire global du Saint-Laurent (OGSL, 2025)
Vents et pression atmosphérique	Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) (Saha et al., 2014)

3.4 Paramètres du modèle

Un aperçu des différents paramètres du modèle HD utilisés dans le modèle Delft3D est présenté au tableau 5. Pour tous les autres paramètres du modèle, les valeurs par défaut ont été utilisées.

Tableau 5 Paramètres du modèle HD Delft3D-FM

Paramètre	Valeur
Rugosité du fond	Coefficient de Manning de 0,025. Pour certaines zones du modèle, la rugosité a été ajustée à des valeurs comprises entre 0,001 et 0,03, selon les résultats de calibration/validation.
Viscosité turbulente horizontale	0,1 m ² /s (valeur par défaut). Près des limites du modèle, une valeur de 10 N/m ² a été utilisée afin d'éviter les instabilités numériques.

3.5 Scénarios du modèle

Un aperçu des différents scénarios de modélisation exécutés pour calibrer et valider le modèle HD Delft3D-FM est présenté au tableau 6.

Tableau 6 Scénarios du modèle HD Delft3D-FM

Exécution	ID d'exécution	Période	Mesures
Exécution de calibration 1	HD-C01	1er octobre – 29 octobre 2014	Calibration par rapport aux niveaux d'eau mesurés
Exécution de validation	HD-V01	1er novembre – 29 novembre 2014	Validation par rapport aux niveaux d'eau mesurés
Exécution de calibration 2	HD-C02	29 juin – 13 juillet 2005	Calibration par rapport aux courants moyens sur la profondeur mesurés

3.6 Résultats de calibration et de validation

La calibration et la validation du modèle Delft3D-FM ont été réalisées en comparant les niveaux d'eau modélisés et mesurés à différentes stations marégraphiques du MPO situées dans le domaine du modèle, ainsi que les vitesses de courant modélisées et mesurées à l'emplacement de l'ADCP de 2005 (figure 13).

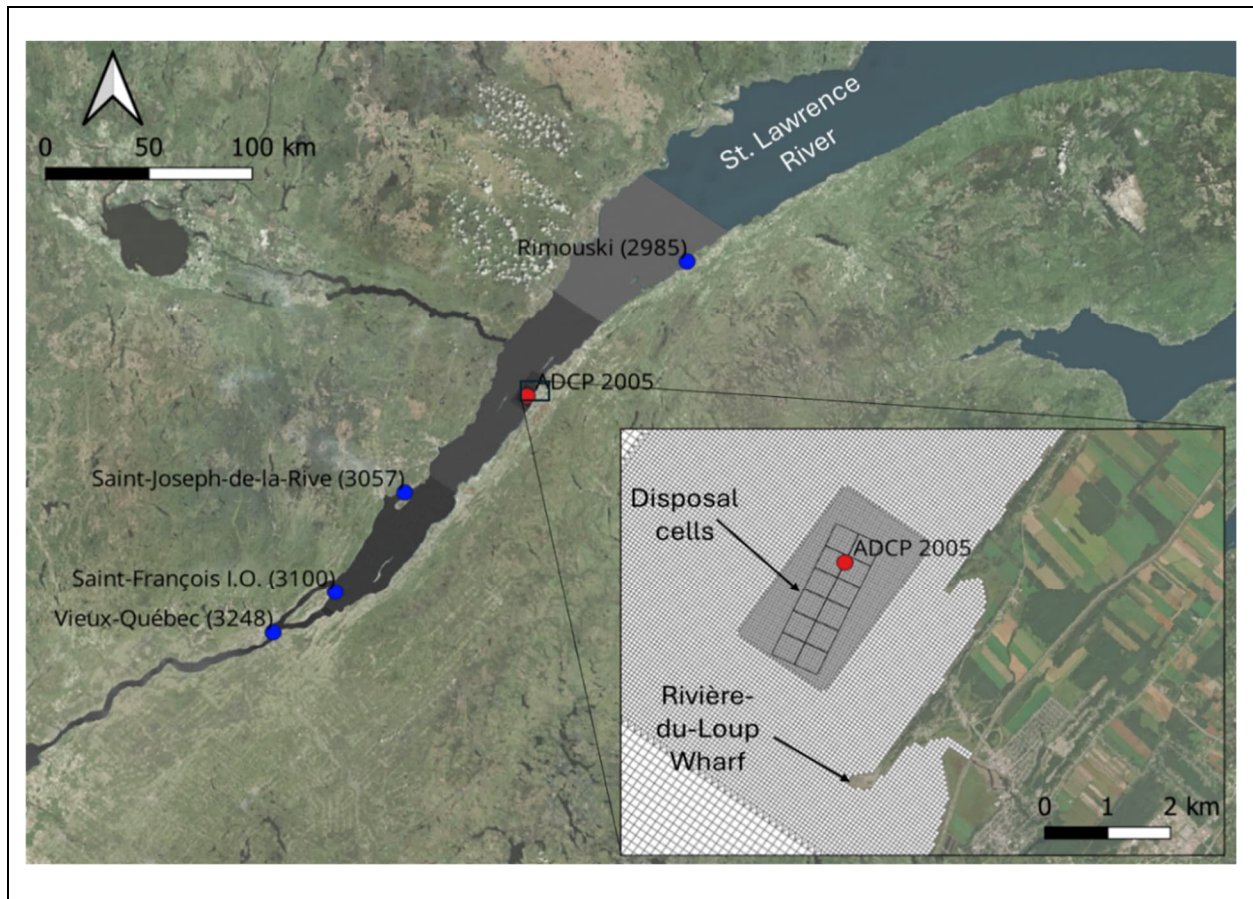


Figure 13 Emplacements des stations marégraphiques du MPO (en bleu) dans le domaine du modèle Delft3D-FM, ainsi que l'emplacement de l'ADCP de 2005 (en rouge)

Le maillage est représenté par des lignes grises avec des zones blanches

3.6.1 Niveaux d'eau

Un aperçu des résultats de calibration du modèle pour la période du 1^{er} octobre au 1^{er} novembre 2014, aux différentes stations marégraphiques, est présenté à la figure 14. Un aperçu de la validation du modèle pour la période du 1^{er} novembre au 1^{er} décembre 2014 est présenté à la figure 15. Il peut être conclu que le modèle reproduit avec précision les niveaux d'eau mesurés aux quatre stations marégraphiques, soit Rimouski, Saint-Joseph-de-la-Rive, Saint-François I.O. et Vieux-Québec, avec une RMSE comprise entre 0,02 et 0,36 m.

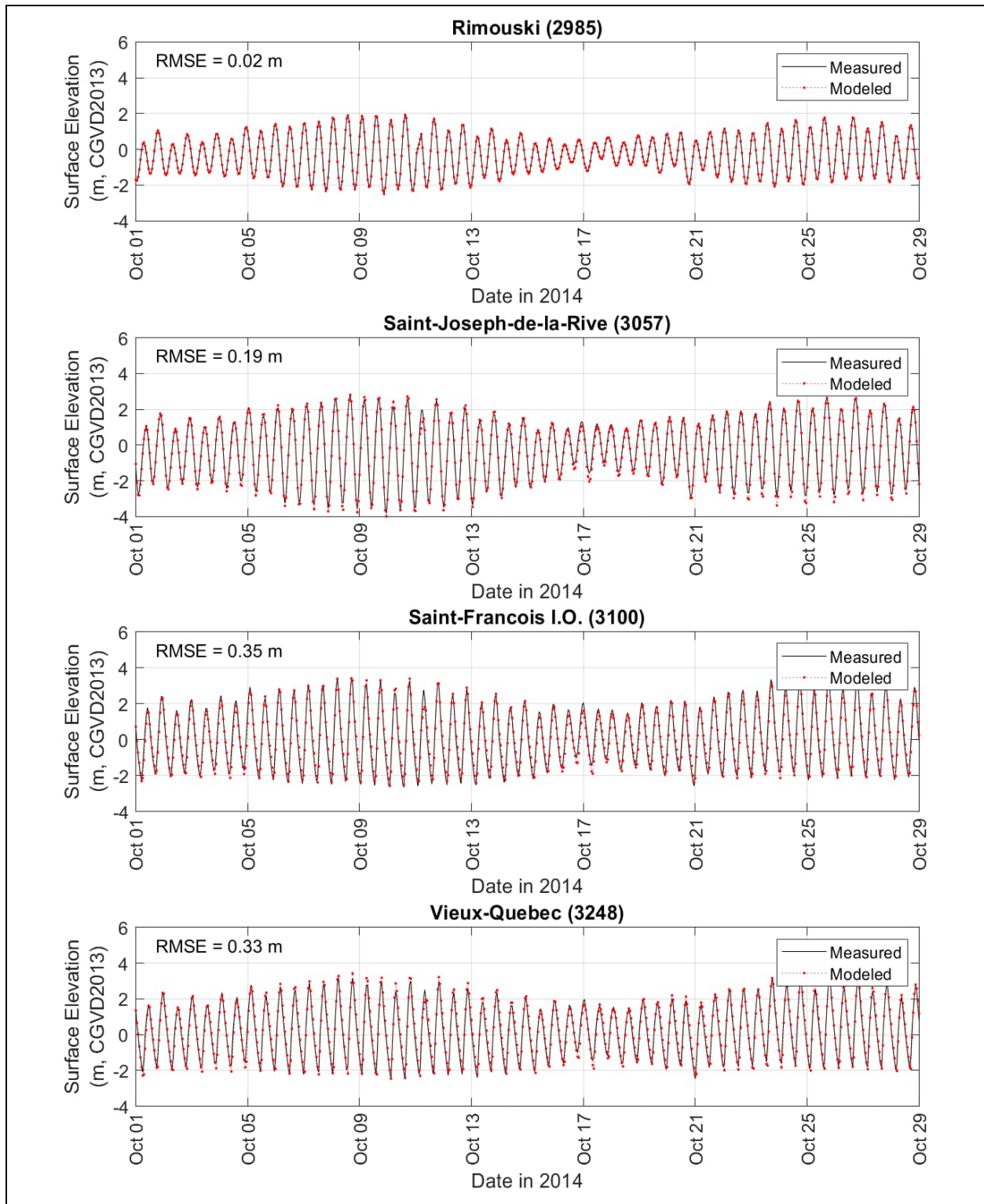


Figure 14 Résultats de calibration de l'élévation de surface entre le 1^e et le 29 octobre 2014 pour quatre stations marégraphiques

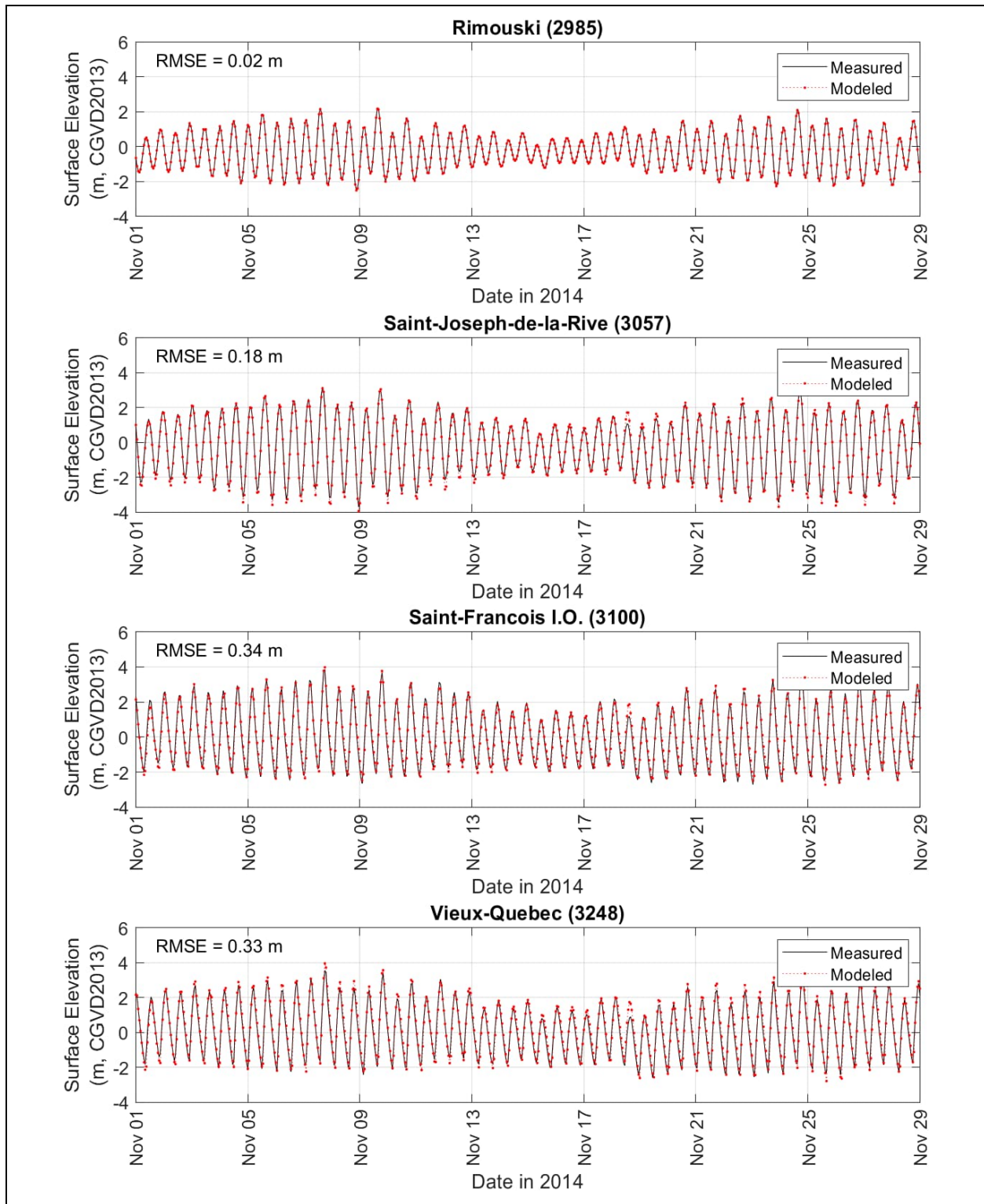


Figure 15 Résultats de calibration de l'élévation de surface entre le 1^{er} et le 29 novembre 2014 pour quatre stations marégraphiques

3.6.2 Courants

Un aperçu des résultats de calibration du modèle concernant les courants pour la période du 29 juin au 13 juillet 2005 est présenté à la figure 16. Pour ce faire, les mesures ADCP moyennées sur la profondeur selon l'azimut de 20° ont été extraites du rapport 2024 de Lasalle NHC pour Gros-Cacouna (Lasalle NHC, 2024). Il peut être conclu que le modèle reproduit bien les inversions de courant entre le jusant et le flot. L'intensité du courant vers l'amont, soit le flot (valeurs négatives), est bien reproduite par le modèle, mais celle du courant vers l'aval, soit le jusant (valeurs positives), est sous-estimée avec une RMSE de 0,21 m/s. Les écarts entre les données mesurées et modélisées sont principalement observés entre le 2 et le 5 juillet 2005, et pourraient s'expliquer par l'absence des apports locaux du bassin versant ainsi que par la non-représentation des courants induits par la densité et de la stratification dans le modèle Delft3D-FM. Aux fins de la présente étude, soit la modélisation de la dispersion des sédiments, ces résultats de calibration des vitesses de courant sont jugés adéquats et représentent une condition d'écoulement conservatrice, puisque les vitesses sous-estimées réduisent la dispersion des sédiments dragués déposés et augmentent les concentrations locales de MES totales.

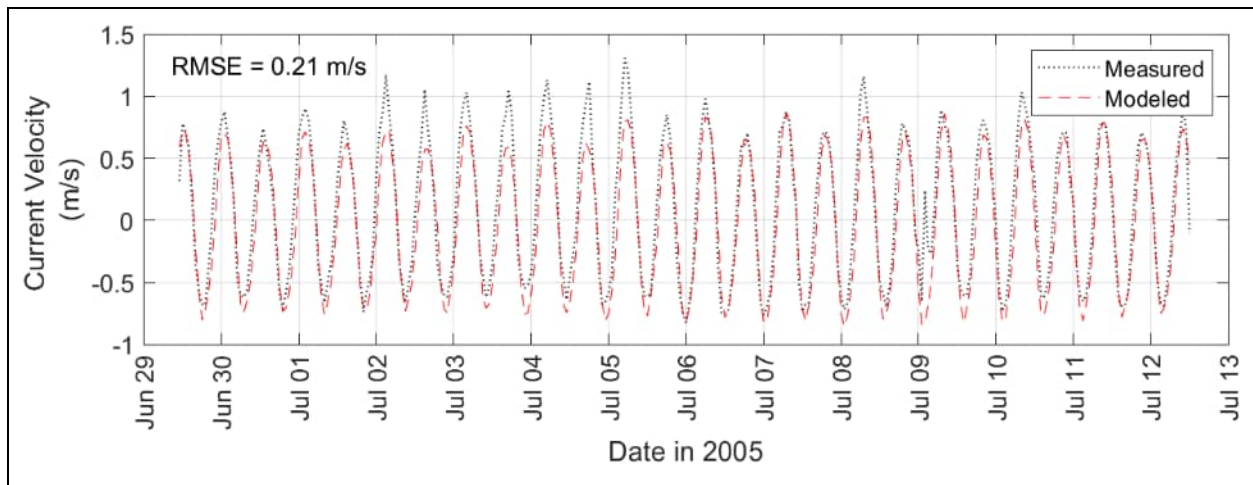


Figure 16 Résultats de calibration des courants selon l'azimut de 20° entre le 29 juin et le 13 juillet 2005, pour l'ADCP situé dans la zone de dépôt

4. Modélisation du transport sédimentaire

En raison de la sédimentation à proximité du quai de RDL, des travaux annuels de dragage d'entretien sont nécessaires afin de maintenir l'accessibilité du quai aux navires. Les données disponibles indiquent que depuis 1999, entre 22 000 et 51 000 m³ de matériaux en place ont été retirés chaque année. Aux fins de la présente étude, il a été supposé qu'un volume de 60 000 m³ devait être dragué. De plus, il a été supposé qu'une drague mécanique à benne preneuse serait utilisée pour les travaux de dragage.

Le dragage mécanique des sédiments implique généralement l'utilisation d'une grande benne preneuse descendue jusqu'au fond au moyen d'une excavatrice montée sur barge, afin de creuser ou de prélever des volumes individuels de sédiments, qui sont ensuite transférés dans un chaland à clapets. À l'aide de ce chaland, les sédiments dragués sont ensuite déposés en eau libre au site de dépôt de l'Anse-au-Persil, situé à environ 3 km au nord-est du quai de RDL.

Le site de dépôt de l'Anse-au-Persil couvre une superficie d'environ 3 km² et est divisé en 12 parcelles sur lesquelles les dépôts sont effectués en alternance chaque année. Pour la présente étude, la parcelle 2025 est considérée comme le site de dépôt (figure 17).



Figure 17 Cellules de dépôt au site de dépôt de l'Anse-au-Persil (en orange)
Les cellules marquées d'un « x » ont été abandonnées

4.1 Méthodologie

La modélisation des panaches de sédiments en suspension associés au dépôt des matériaux dragués au site de dépôt de l'Anse-au-Persil est réalisée au moyen d'un modèle numérique en champ proche et d'un modèle numérique en champ lointain. Pour les calculs en champ proche, le modèle STFATE (Johnsen et Fong, 1995) est utilisé, permettant de modéliser le comportement à court terme des rejets de sédiments dragués. STFATE est un modèle informatique utilisé pour prédire le devenir à court terme des matériaux dragués déposés en eau libre. Développé par le *U.S. Army Engineer Research and Development Center* (ERDC), ce modèle constitue une composante essentielle du processus d'évaluation du dépôt en eau libre des sédiments dragués. Pour le modèle en champ lointain, Delft3D-FM Sediment Transport (ST) a été utilisé afin de modéliser la dispersion des sédiments en suspension par les courants dans le fleuve Saint-Laurent. Aux fins de la présente étude de dispersion du panache, un fond non érodable a été utilisé dans l'ensemble du domaine du modèle.

4.1.1 Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire

Le modèle STFATE divise l'évolution des sédiments dragués rejetés dans l'eau en trois phases :

- **Phase de descente convective** : au cours de laquelle une fraction importante du mélange fluide sédiments-eau libéré par le chaland descend dans la colonne d'eau sous forme de jet de densité sous l'effet de la gravité. Le jet de densité peut contenir des agrégats de sédiments cohésifs agglomérés dans le mélange sédiments-eau. Une partie des sédiments peut se détacher du jet de densité et être dispersée par les courants ambiants.
- **Phase d'effondrement dynamique** : au cours de laquelle les sédiments libérés atteignent le fond, et le jet de densité s'effondre sur le fond marin, mettant ainsi fin à la descente convective et entraînant la dispersion horizontale des sédiments en suspension près du fond, à mesure que l'énergie se dissipe.
- **Phase d'advection-diffusion** : au cours de laquelle la force de l'impact sur le fond n'influence plus les sédiments libérés, et les sédiments sont transportés et dispersés par les forces du milieu environnant, c.-à-d. les courants, jusqu'à leur dépôt sur le fond marin.

La figure 18 présente une représentation schématique du comportement des sédiments dragués rejetés en eau libre. La descente convective et l'effondrement dynamique, incluant la dispersion horizontale près du fond marin, sont des processus à court terme pouvant être modélisés à l'aide du modèle STFATE (Johnsen et Fong, 1995). Sur la base des résultats du

modèle, il est possible d'évaluer la quantité de sédiments qui demeure en suspension dans la colonne d'eau après le rejet, ainsi que la quantité qui se dépose à court terme sur le fond marin selon les caractéristiques du rejet, notamment le volume, la granulométrie, la fraction de sédiments agglomérés, la teneur en eau, la densité et le type de chaland.

Pour la présente étude, le modèle STFATE a été utilisé afin d'établir la distribution verticale des concentrations de sédiments en suspension (CSS), lesquelles sont ensuite introduites dans le modèle Delft3D-FM ST au moyen de rejets ponctuels. La dispersion à long terme des sédiments dans le milieu marin, sous l'effet des courants ambiants, est évaluée à l'aide de Delft3D-FM ST.

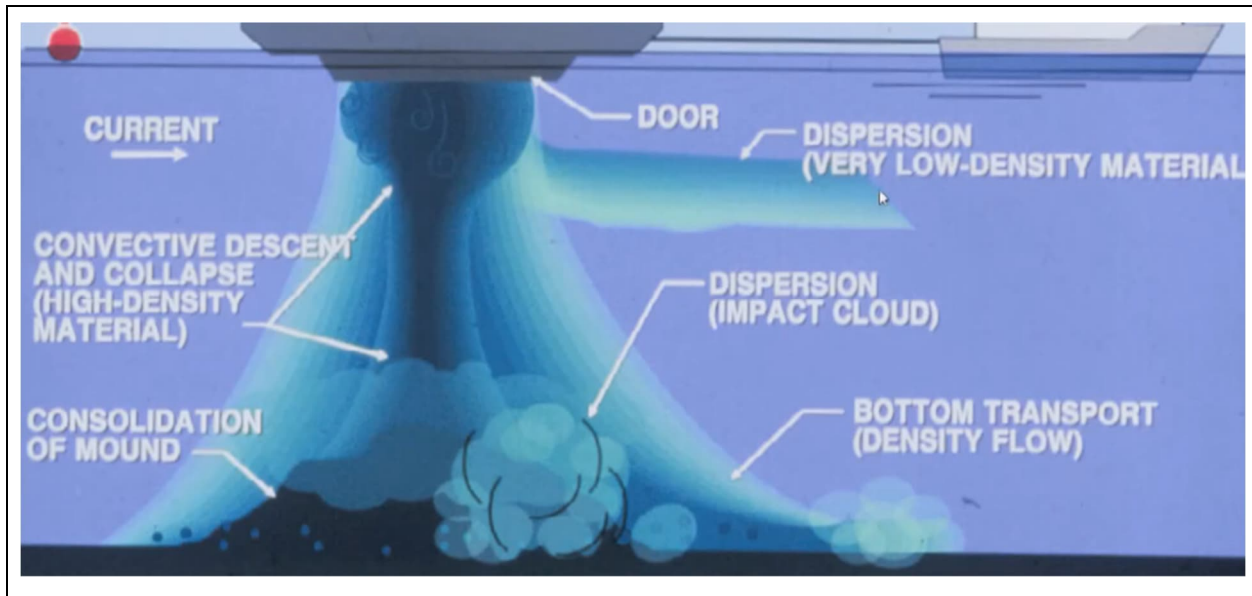


Figure 18 Phases du modèle STFATE du panache de sédiments dragués

4.1.2 Caractéristiques des sédiments dragués et du chaland à clapets

Un aperçu des paramètres des sédiments dragués est présenté au tableau 7 pour le volume de 60 000 m³ de sédiments censés être dragués. Les données de densité des sédiments en place n'ont pas été mises à la disposition de WSP dans le cadre de cette étude. À partir d'une revue de la littérature, il a été conclu qu'une large plage de valeurs de densité en place pouvait potentiellement être présente (van Rijn, 2020; Graw, Wood et Phrampus, 2021). Sur la base de cette revue, une densité en place relativement élevée de 1,9 t/m³ a été retenue pour les sédiments de type limon sableux (van Rijn, 2020; Graw, Wood et Phrampus, 2021), en supposant qu'une certaine consolidation des sédiments du fond ait eu lieu. Une densité relativement élevée a été choisie, ce qui conduit à une masse de sédiments déposée plus importante et donc conservatrice au site de l'Anse-au-Persil. En utilisant cette densité, une

masse totale de sédiments dragués de 114 000 t, correspondant à une masse sèche d'environ 86 000 t (sur la base d'une densité relative des particules sédimentaires de 2,65), a été estimée. Pour les études futures, il est recommandé de collecter des données locales sur la densité des sédiments au quai de RDL, puisque celles-ci permettront de déterminer avec plus de précision la masse de sédiments déposée.

Tableau 7 Paramètres des sédiments dragués.

Paramètre	Valeur
Volume dragué (m ³)	60,000
Densité des sédiments dragués (t/m ³)	1,9
Masse des sédiments dragués (t)	114,000
Masse sèche des sédiments dragués (t)	86,000

Afin de déterminer le nombre de voyages de chaland nécessaires au dépôt de ces sédiments, WSP a utilisé des données provenant d'un projet de référence fourni par la STQ. Pour ce projet, WSP comprend que les sédiments dragués ont été acheminés vers la rive au moyen de 13 chalands au total et qu'après un certain temps, ces sédiments ont été transportés hors site par camions. Les données de poids consignées dans les registres des camions indiquent qu'une masse totale de matériaux dragués de 1 879 t a été transportée hors site. Aucune donnée de densité des sédiments n'étant disponible, une densité de 1,8 t/m³ a donc été supposée. Cette densité a été retenue comme étant inférieure à la densité en place de 1,9 t/m³, en raison de la redistribution des particules lors des activités de dragage et puisque l'eau était supposée s'être drainée des sédiments avant leur transport hors site par camions. Aux fins de la présente étude, il a été supposé, de façon conservatrice, qu'environ 20 % de la masse de sédiments n'était pas comptabilisée dans les registres des camions. Ainsi, environ 173 t de sédiments ont été transportées par voyage de chaland, correspondant à une masse sèche de 122 t.

En supposant une capacité moyenne du chaland de 125 m³, une densité des sédiments à bord du chaland de 1,62 t/m³ a été estimée. Il convient de noter qu'à des fins de stabilité du chaland, la densité maximale de chargement est de 1,85 t/m³ (Le Groupe Ocean Inc., 2019, tableau 8). Sur la base des données fournies par la STQ et des hypothèses retenues pour la présente étude, il a été conclu que les chalands n'étaient pas remplis en moyenne à leur capacité maximale, tant en volume qu'en poids. Il est recommandé que pour les études futures, les tirants d'eau des chalands lors du chargement (avant et après chargement), ainsi que les registres des volumes d'eau résiduelle (avant chargement) consignés par l'entrepreneur en dragage, soient fournis afin de permettre un calcul plus précis des charges moyennes de sédiments par chaland.

Un aperçu des caractéristiques des sédiments fondé sur les données disponibles et les hypothèses retenues est présenté au tableau 9. La densité des sédiments dragués diminue de 1,9 t/m³ en place à 1,62 t/m³ à bord du chaland, en raison de l'eau transférée avec les sédiments dragués lors de la procédure de dragage mécanique. Il est estimé que 703 voyages de chaland sont nécessaires pour déposer les 60 000 m³ de sédiments dragués.

Des paramètres supplémentaires du chaland pour la modélisation STFATE sont présentés au tableau 10. Un tirant d'eau avant dépôt de 1,54 m a été calculé à l'aide d'un coefficient de bloc de 0,85 (Gupta et al., 2023) et d'un volume moyen de remplissage de 125 m³, avec une densité de remplissage de 1,62 t/m³. Une vitesse moyenne de 6,0 nœuds a été supposée pour le chaland pendant les activités de dépôt.

Tableau 8 Paramètres du chaland à clapets (SBH) (Le Groupe Ocean Inc., 2019)

Paramètre	Valeur
Capacité volumique maximale du chaland (m ³)	160
Capacité massique maximale du chaland (t)	296
Densité maximale des sédiments dans le chaland (t/m ³)	1,85
Longueur du chaland (m)	31,34
Largeur du chaland (m)	7,04
Tirant d'eau du chaland avant dépôt (maximum) (m)	2,02

Tableau 9 Caractéristiques du projet de dragage de référence de la STQ

Paramètre	Valeur
Données de poids enregistrées par les camions (t)	1,879
Pourcentage de masse non comptabilisée (%)	20 %
Masse totale de sédiments transportée hors site (t)	2,250
Nombre de voyages de chaland (-)	13
Masse moyenne de sédiments bruts par voyage de chaland (t)	173
Masse sèche moyenne de sédiments par voyage de chaland (t)	122
Densité moyenne des sédiments à bord du chaland (t/m ³)	1,62

Tableau 10 Paramètres supplémentaires du chaland pour la modélisation STFATE

Paramètre	Valeur
Volume total de sédiments, d'eau interstitielle et d'eau ajoutée dans le chaland (m ³)	125
Tirant d'eau avant dépôt (m) basé sur la masse moyenne des sédiments dragués	1,54
Vitesse pendant le dépôt des sédiments (nœuds)	6,0

Comme mentionné à la section 2.4, les mesures réalisées entre 2011 et 2020 montrent que les fractions des sédiments dragués sont composées en moyenne de 69,74 % de vase (c.-à-d. limon et argile), de 30,19 % de sable et de 0,04 % de gravier. Un aperçu des paramètres d'entrée des sédiments pour STFATE et Delft3D-FM ST est présenté au tableau 11. Dans les zones où les sédiments sont naturellement cohésifs, comme c'est le cas pour le site à l'étude, le dragage mécanique fait en sorte que les matériaux dragués conservent leur cohésion et demeurent ainsi sous forme de blocs ou d'agrégats tout au long du processus de dragage. Lors

de leur rejet depuis le chaland, ces agrégats coulent plus rapidement que les matériaux plus fins constitués de sédiments meubles ou non consolidés. Aux fins de la présente étude, il a été supposé que 70 % du volume serait sous forme de grands agrégats cohérents de 300 mm, avec une densité des sédiments de 1 330 kg/m³ (Maguire Group Inc., 2004). Il est supposé que ces agrégats se désintègrent au moment de l'impact avec le fond. Le pourcentage volumique de solides (gravier, sable, vase et agrégats) dans les sédiments dragués est d'environ 57,0 %.

Tableau 11 Propriétés supposées des classes de sédiments.

Paramètre	Gravier	Sable	Vase (limon et argile)	Agrégats
Cohésif	Non	Non	Oui	Non
Concentration volumique de la fraction solide (m ³ /m ³)	0,0001	0,0513	0,1185	0,3962
Densité des particules (t/m ³)	2,65	2,65	2,65	1,33
d ₅₀ des sédiments (mm)	3,0000	0,3750	0,0102	300,0000
Vitesse de chute (mm/s)	190,33	47,57	0,07	828,88
Contrainte de cisaillement critique (N/m ²)	2,10	0,20	0,37	Non érodable

4.1.3 Caractéristiques du dépôt

Un calendrier de dragage a été fourni à WSP, décrivant la séquence de dépôt. La fenêtre de dragage disponible a été fixée du 21 septembre au 30 novembre, avec un chaland disponible entre le 21 et le 30 septembre, et deux chalands disponibles entre le 1er octobre et le 30 novembre. La durée de la journée de travail était de 12 heures pour la période du 21 au 30 septembre (de 9 h à 21 h), et de 24 heures (journée complète) pour la période du 1er octobre au 30 novembre. Comme mentionné précédemment, 703 voyages de chaland sont supposés nécessaires pour déposer les 60 000 m³ de sédiments en place. Il est supposé que 120 voyages seront effectués entre le 21 et le 30 septembre, et 583 entre le 1er octobre et le 18 novembre. Il peut être conclu que dans la fenêtre de dragage disponible de 10 semaines (du 21 septembre au 30 novembre), les activités de dépôt devraient se dérouler pendant 8,3 semaines au site de dépôt de l'Anse-au-Persil (du 21 septembre au 18 novembre).

Dans la cellule de dépôt 2025, douze emplacements ont été attribués aux rejets individuels de sédiments. En conditions de jusant, les rejets sont censés être effectués aux emplacements de rejet au jusant 1 à 6 (voir les emplacements verts à la figure 19) tandis qu'en conditions de flot, les rejets sont effectués aux emplacements de rejet au flot 1 à 6 (voir les emplacements rouges à la figure 19). Le dépôt est censé se produire à ces emplacements afin que la majeure partie des sédiments déposés demeure à l'intérieur de la cellule de dépôt. Pour la modélisation STFATE, des conditions de courant moyennes de 0,52 m/s ont été supposées pour chaque rejet, correspondant aux conditions moyennes de courant de jusant et de flot de 2014 au site de dépôt

de l'Anse-au-Persil, d'après les résultats du modèle hydrodynamique Delft3D-FM. Une profondeur d'eau moyenne de 10 m a été utilisée pour la modélisation STFATE.

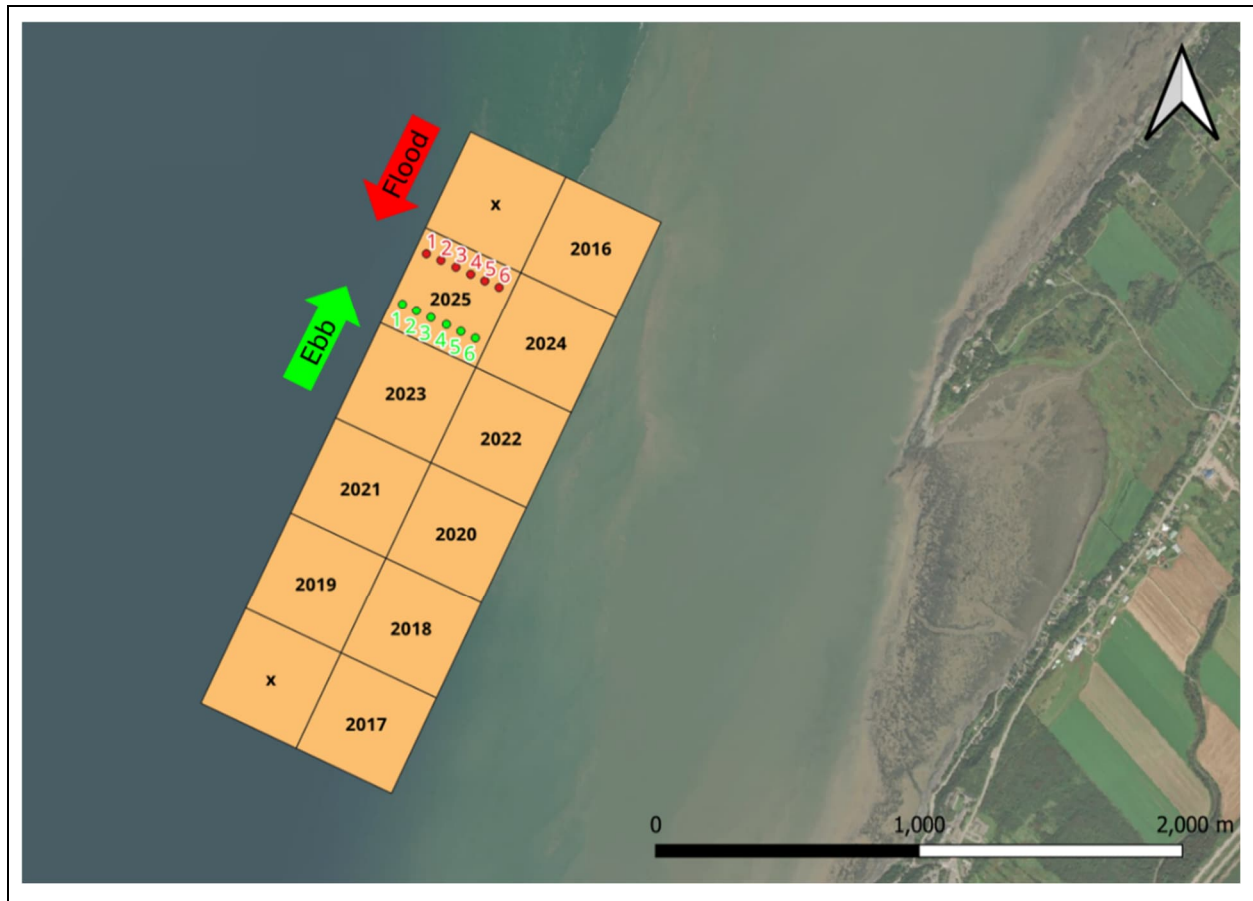


Figure 19 Emplacements de rejet en conditions de jusant (en vert) et emplacements de rejet en conditions de flot (en rouge) au site de dépôt de l'Anse-au-Persil

4.2 Résultats

4.2.1 Résultats du modèle en champ proche STFATE

Afin de valider le panache de dispersion des sédiments modélisé par STFATE, les conditions d'un rejet unique dans la cellule 2025 ont d'abord été modélisées, puis comparées qualitativement aux données de mesure des MES recueillies à la suite des activités de dépôt de sédiments dragués des 27 et 29 juin 2005 (LaSalle, 2008; figure 20). À partir de ces mesures, il

a été conclu que pour les activités de dépôt de sédiments documentées, les concentrations de MES étaient principalement élevées à proximité du lieu de dépôt et qu'elles revenaient rapidement aux concentrations naturelles de MES du milieu ambiant, estimées à 39 mg/L le 27 juin 2005 et à 19 mg/L le 29 juin 2005 (LaSalle, 2008).

Les mesures ont montré des concentrations de MES comprises entre 17 et 75 mg/L dans les profondeurs d'eau de 0 à 7 m, ainsi que des concentrations de MES de 170 à 510 mg/L dans la partie inférieure de la colonne d'eau. Ces mesures ont été effectuées à environ 270 à 460 m du lieu de dépôt des sédiments.

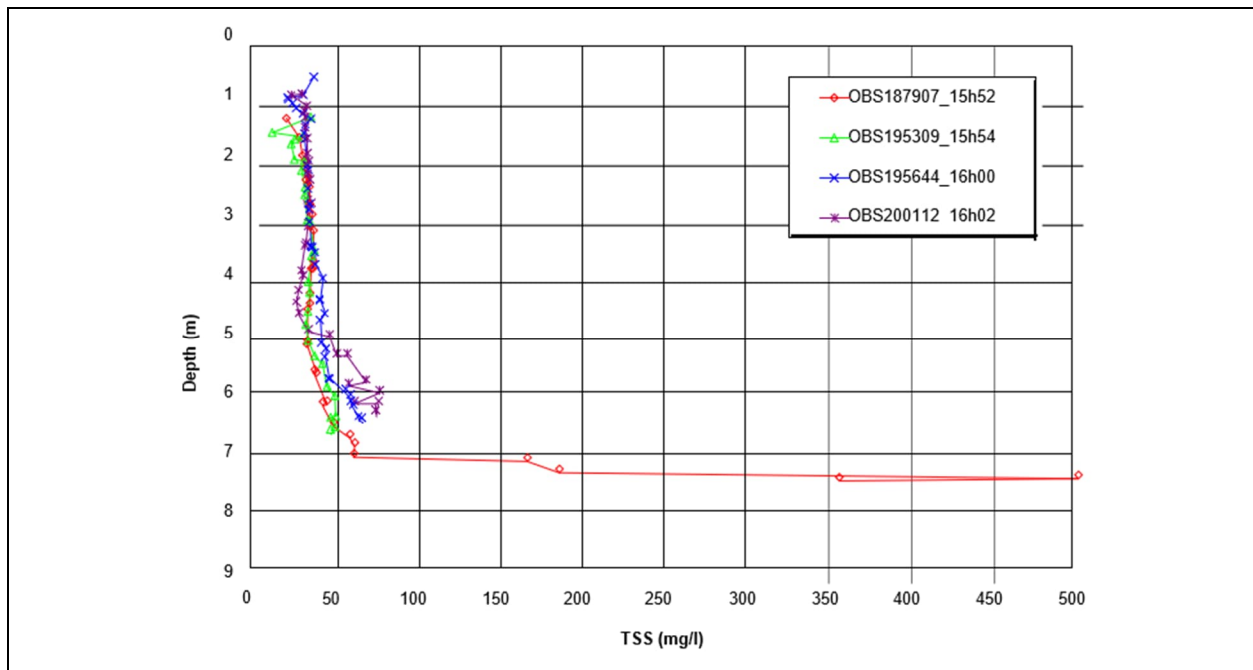


Figure 20 Profils verticaux de MES mesurés à une distance d'environ 270 à 460 m du site de dépôt le 27 juin 2005 (LaSalle, 2008)

L'événement de dépôt a eu lieu à 15 h 45

Les masses de chaque fraction (gravier, sable, vase) ont été extraites et additionnées à partir des résultats du modèle STFATE à différentes profondeurs dans la colonne d'eau, à la fin de la phase d'effondrement dynamique, c.-à-d. avant le début de la phase d'advection-dispersion. Tous les agrégats s'étaient déposés au fond. Les concentrations de MES à la fin de la simulation STFATE ont été tracées à la figure 21. Des concentrations élevées de MES peuvent être observées dans la couche près du fond. Dans le reste de la colonne d'eau, les concentrations de sédiments sont d'environ 30 à 80 mg/L, soit du même ordre de grandeur que les mesures de 2005 présentées à la figure 20. Les résultats de la modélisation STFATE ont montré que seule une faible fraction (1 %) des sédiments déposés est entraînée dans la colonne d'eau pendant la

phase de descente convective. Lorsque la masse sédimentaire atteint le fond, les sédiments plus grossiers et les agrégats demeurent sur le fond, tandis que les sédiments fins sont remis en suspension. Selon STFATE, environ 54 % des matériaux se déposent tandis que 45 % demeurent en suspension dans une couche de 1 à 2 m d'épaisseur près du fond.

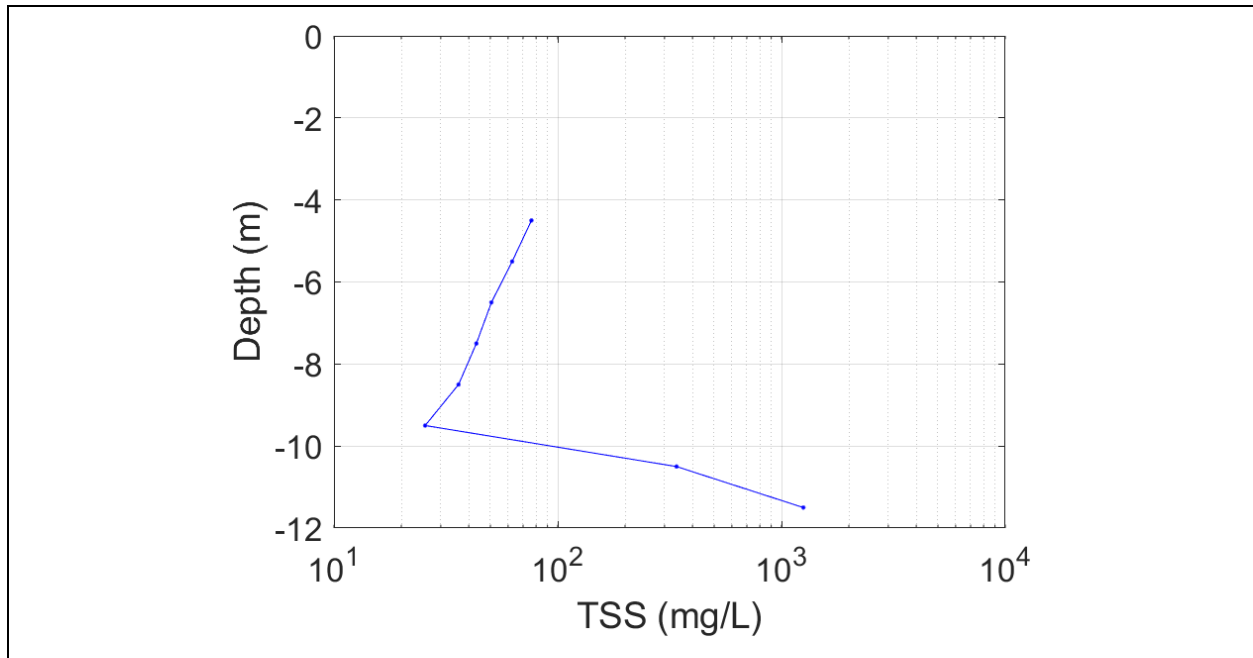


Figure 21 Résultats du modèle STFATE des MES à la fin de la phase d'effondrement

4.2.2 Sortie STFATE vers les données d'entrée de DELFT3D-FM ST

Comme mentionné précédemment, les résultats de sortie de STFATE sont introduits dans le modèle Delft3D-FM ST au moyen de rejets ponctuels placés dans le domaine du modèle Delft3D-FM ST couvert par le panache STFATE. Un aperçu de la distribution massique, dans la colonne d'eau, des fractions de gravier, de sable et de vase prédites par STFATE est présenté à la figure 22, pour un rejet unique (en rouge). De plus, la distribution massique utilisée comme donnée d'entrée dans Delft3D est montrée à des fins de comparaison (en bleu). Pour un rejet unique, un total de 122 t de solides a été déposé, dont 55,2 t demeurent dans la colonne d'eau, les agrégats s'étant entièrement déposés au fond. On peut observer que la masse de sédiments en suspension introduite dans le modèle Delft3D-FM ST correspond adéquatement à la distribution massique prédite par STFATE. Les différences entre STFATE et Delft3D-FM ST peuvent s'expliquer par la méthode d'intégration utilisée et par le nombre de cellules verticales dans le modèle Delft3D-FM ST.

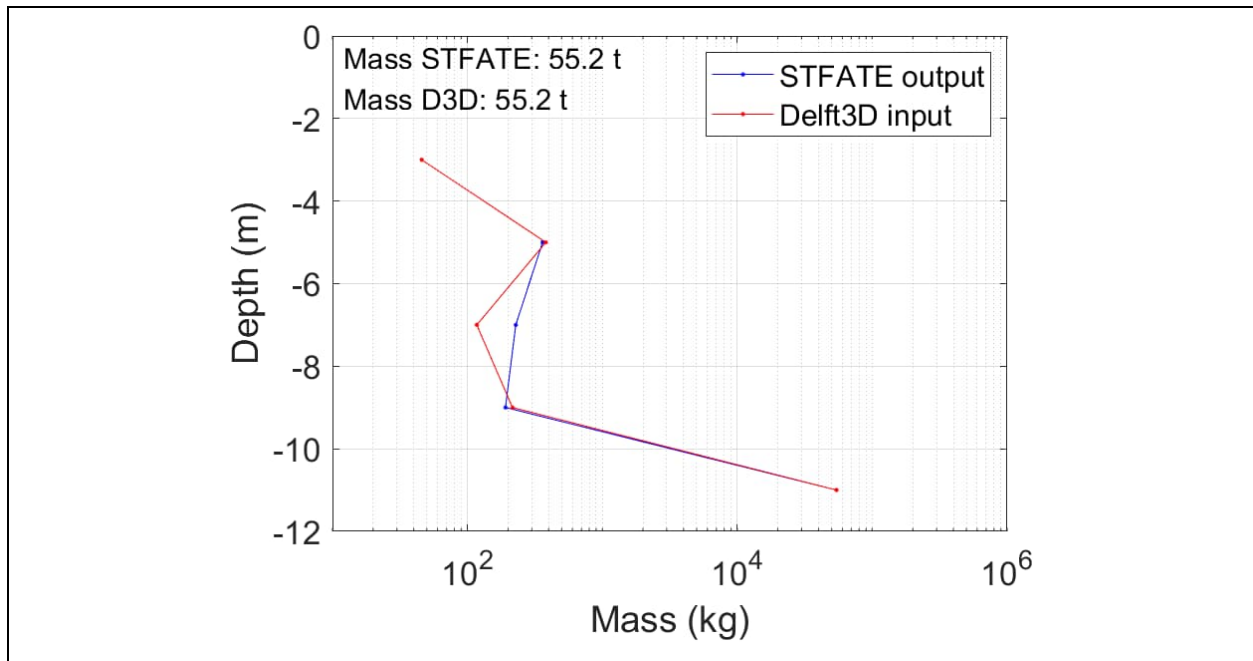


Figure 22 Distribution massique dans la colonne d'eau pour le gravier, le sable et la vase (agrégats entièrement déposés)

4.2.3 Résultats du modèle en champ lointain DELFT3D-FM ST

Pour simuler l'évolution du panache de dispersion, la phase d'advection-dispersion des sédiments en suspension a été réalisée à l'aide de Delft3D-FM ST. Les résultats du modèle en champ proche STFATE ont été intégrés dans Delft3D-FM ST au moyen d'emplacements de rejets ponctuels libérant les sédiments selon les résultats du modèle STFATE. Les agrégats ont été censés se désintégrer lors de l'impact avec le fond et ont été représentés comme une couche de sédiments érodable dans Delft3D-FM ST, avec les mêmes fractions sédimentaires que celles définies au tableau 2.

Les résultats de la modélisation Delft3D-FM ST pour un rejet unique montrent que les sédiments déposés sont rapidement dispersés par le milieu ambiant après la phase d'effondrement dynamique. La figure 23 montre l'évolution des concentrations maximales de MES dans l'ensemble du domaine du modèle à cinq profondeurs d'eau. On observe que les concentrations dans la couche près du fond sont élevées, mais diminuent rapidement à mesure qu'une fraction importante des sédiments se dépose au fond. Les concentrations de MES à 8 m sous la surface augmentent jusqu'à environ 350 mg/L. Des concentrations de sédiments pouvant atteindre 120 mg/L sont prédites plus haut dans la colonne d'eau. Dans l'ensemble, le

panache sédimentaire généré par un rejet unique atteint les concentrations ambiantes du milieu environnant dans un délai relativement court (4 à 5 heures).

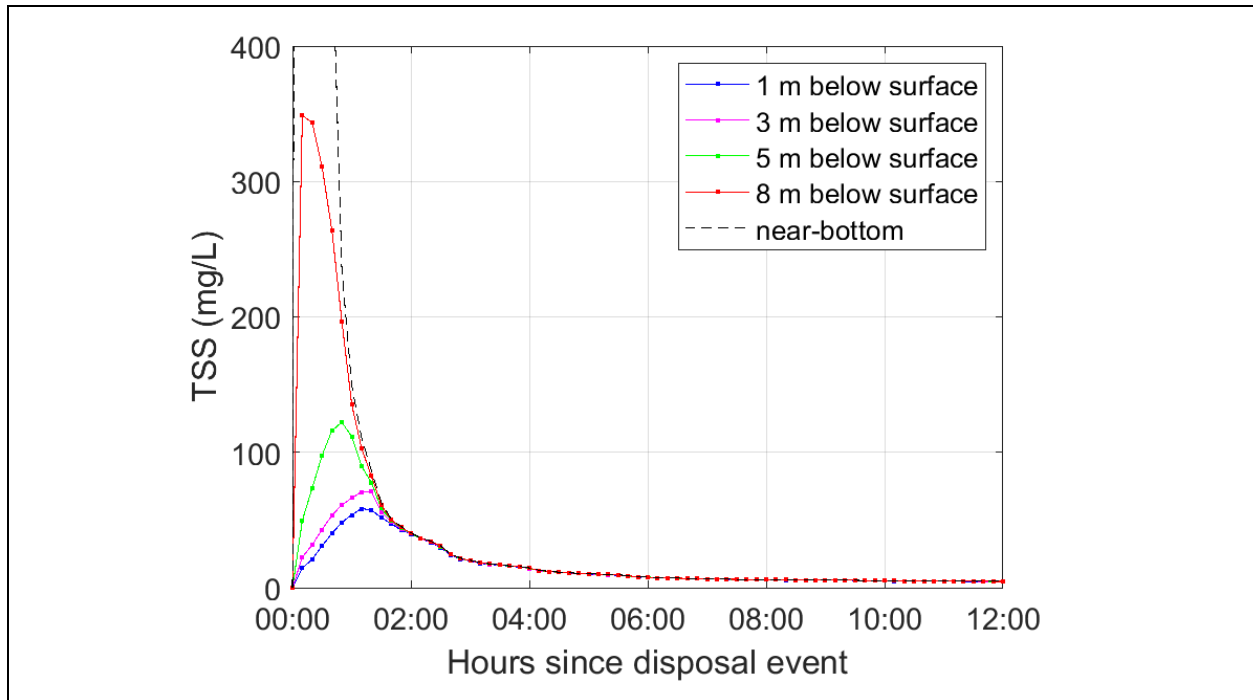


Figure 23 Concentrations maximales de MES dans le domaine du modèle Delft3D-FM après un rejet unique au site de dépôt de l'Anse-au-Persil

En comparant qualitativement les résultats du modèle Delft3D-FM ST aux mesures de MES de 2005 (LaSalle, 2008), il peut être conclu que les résultats de Delft3D-FM ST sont du même ordre de grandeur. Par conséquent, il est conclu que la méthode de modélisation en champ proche avec STFATE et en champ lointain avec Delft3D-FM ST permet de représenter raisonnablement l'évolution des sédiments en suspension après un rejet unique, et que la méthodologie adoptée est jugée adéquate pour prédire les panaches sédimentaires en champ proche et en champ lointain associés au dépôt de matériaux dragués.

Une simulation du modèle Delft3D-FM ST couvrant la période du 21 septembre au 8 décembre a été réalisée afin de déterminer le déplacement du panache sédimentaire associé au dépôt de sédiments dragués au site de dépôt de l'Anse-au-Persil, pour l'année de référence 2014. Au cours de cette période, 703 rejets de sédiments ont été effectués à 12 emplacements de dépôt dans la cellule 2025, comme illustré à la figure 19. Une seule simulation STFATE a été utilisée pour les rejets aux 12 emplacements de dépôt, en utilisant ainsi la même profondeur de rejet sous la surface de l'eau à tous les emplacements. La valeur réelle de z au-dessus du fond marin pour les MES injectées varie donc d'un rejet à l'autre en raison de la marée et des variations bathymétriques.

Cette approche a été retenue de manière conservatrice puisque pour certains rejets, les sédiments sont injectés plus haut dans la colonne d'eau. Au total, 760 rejets ponctuels ont été définis dans Delft3D-FM ST, afin de représenter le panache tridimensionnel en champ proche prédit par STFATE. Avec ces rejets ponctuels, un total de 86 000 t de sédiments a été progressivement introduit dans la cellule 2025. Le modèle a ensuite calculé la dispersion en champ lointain des sédiments dans l'ensemble du domaine du modèle sous l'effet des courants variables dans le temps. Après la fin des activités de dépôt le 18 novembre, la simulation s'est poursuivie jusqu'au 8 décembre afin de s'assurer que tous les sédiments déposés s'étaient décantés.

CONCENTRATIONS MAXIMALES DE MES

Les résultats du modèle Delft3D-FM ST ont été exportés à une fréquence de 3 heures en raison de contraintes liées à la taille des fichiers. La figure 24 présente une vue d'ensemble du panache de sédiments en suspension (TSS), illustrant les concentrations maximales de TSS au-dessus de l'état ambiant sur toute la colonne d'eau et sur l'ensemble de la période simulée. Des concentrations élevées de TSS au-dessus de l'état ambiant (> 1 mg/L) peuvent être observées jusqu'à environ 36 km en amont et 20 km en aval de la cellule de dépôt de 2025, sur une largeur d'environ 16 km (parallèlement au littoral). Une intensité plus marquée du flot par rapport au jusant (c.-à-d. une asymétrie de marée) dans le modèle est probablement à l'origine de cette différence de comportement entre l'extension amont et aval du panache. Des concentrations de TSS supérieures à 200 mg/L au-dessus de l'état ambiant ont été observées à une distance de 600 à 700 m de la cellule de dépôt, principalement dans la couche proche du fond.

Dans le rapport LaSalle (LaSalle, 2024), des augmentations modélisées des concentrations de sédiments en suspension associées au rejet de sédiments dragués mécaniquement dans les secteurs sud-ouest et nord-est du site de dépôt d'Anse-au-Persil ont été rapportées. LaSalle a utilisé le modèle PSED pour la simulation. Selon ce rapport, le panache de sédiments en suspension correspondant à l'intervalle de 0,1 à 2,0 mg/L s'étendait sur environ 15 km en amont et plus de 20 km en aval (la distance exacte en aval n'a pas pu être déterminée en raison de la couverture limitée présentée dans le rapport LaSalle). Par ailleurs, la largeur du panache (parallèle au littoral) a été estimée à environ 5 km. On peut conclure que l'extension du panache en amont ainsi que sa largeur dans la présente étude ont augmenté par rapport à l'étude de LaSalle (2024). La principale différence entre ces résultats est probablement liée à la masse de sédiments rejetés entre les deux études : dans la présente étude, environ 86 000 t de sédiments (masse sèche) ont été rejetées dans la colonne d'eau (soit 706 voyages de barges à raison de 122 t par voyage), contre environ 47 t (masse sèche) dans l'étude de LaSalle, soit un facteur d'environ 1830. Une autre différence notable concerne les scénarios modélisés : LaSalle a simulé des périodes de 48 heures en mortes-eaux et en vives-eaux (avec des vents constants de différentes directions), tandis que la présente étude couvre une période de 21 jours pour une année représentative, avec des vitesses et directions de vent variables.

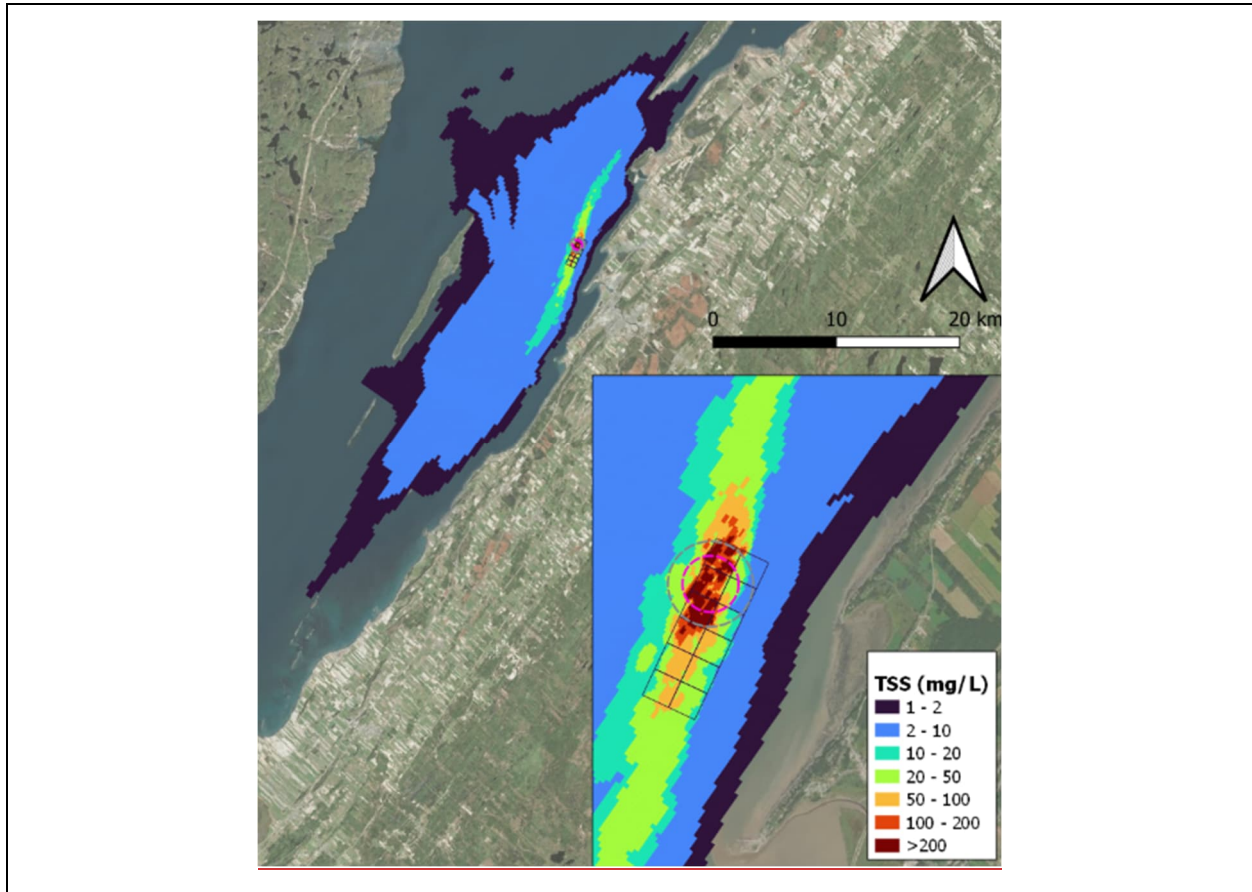


Figure 24 Concentrations maximales de TSS au-dessus de l'état ambiant sur l'ensemble de la colonne d'eau et sur toute la période modélisée, attribuables aux activités de dépôt de sédiments dans la cellule 2025 du site de dépôt d'Anse-au-Persil, entre le 21 septembre et le 8 décembre pour l'année de référence 2014.

Des cercles situés à une distance de 100 m (pointillés magenta) et de 300 m (pointillés gris) de la cellule sont représentés

Concentrations de MES à 100 m et 300 m de distance à différentes profondeurs

Une simulation du modèle Delft3D-FM ST de 48 heures, couvrant la période du 21 au 23 septembre, a été réalisée avec une résolution de sortie de 10 minutes. Durant cette période, les rejets ont été effectués toutes les heures entre 9 h et 21 h. L'évolution des concentrations de MES au cours de cette période de 48 heures est considérée comme représentative du panache sédimentaire à court terme à proximité de la cellule de dépôt. Les séries temporelles des concentrations de MES pour les couches de fond, intermédiaire et de surface de la colonne d'eau ont été extraites à 100 m et à 300 m de la cellule de dépôt 2025 (voir les cercles magenta et gris à la figure 24). Les résultats sont montrés aux figures 25 et 26.

Les concentrations de MES les plus élevées sont observées dans la couche de fond, tant à 100 m qu'à 300 m de distance, tandis que les concentrations de MES dans les couches intermédiaire et supérieure de la colonne d'eau sont nettement plus faibles. Le tableau 12 démontre que les concentrations maximales de MES dans la couche de fond sont de 1 710 mg/L et de 1 020 mg/L à des distances de 100 m et 300 m, respectivement. Les concentrations maximales de MES dans la couche intermédiaire sont nettement plus faibles, soit 215 mg/L et 175 mg/L, respectivement. Les concentrations maximales de MES dans la couche supérieure sont de 80 mg/L, tant à 100 m qu'à 300 m de la cellule de dépôt 2025. Les pics de concentration de MES sont de courte durée et semblent revenir principalement aux valeurs ambiantes avant le rejet subséquent de sédiments dragués. Les pics observés dans la couche de fond à 9 h les deux jours peuvent s'expliquer par le fait qu'à ces moments, les rejets ont été effectués plus près des cercles de 100 m et 300 m comparativement aux autres rejets réalisés au cours de cette période de 48 heures.

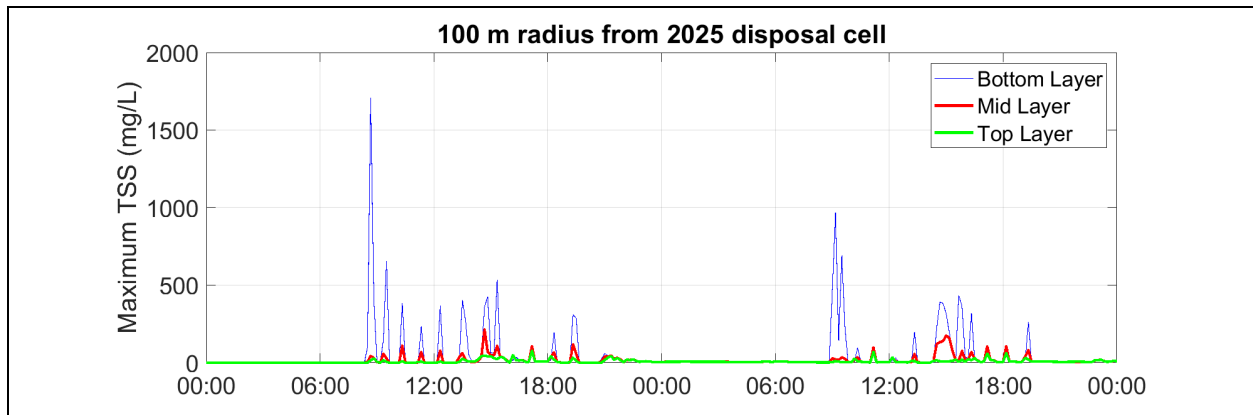


Figure 25 Série temporelle des concentrations de MES à différentes profondeurs d'eau, à une distance de 100 m de la cellule de dépôt 2025, sur une durée de dépôt de 48 h

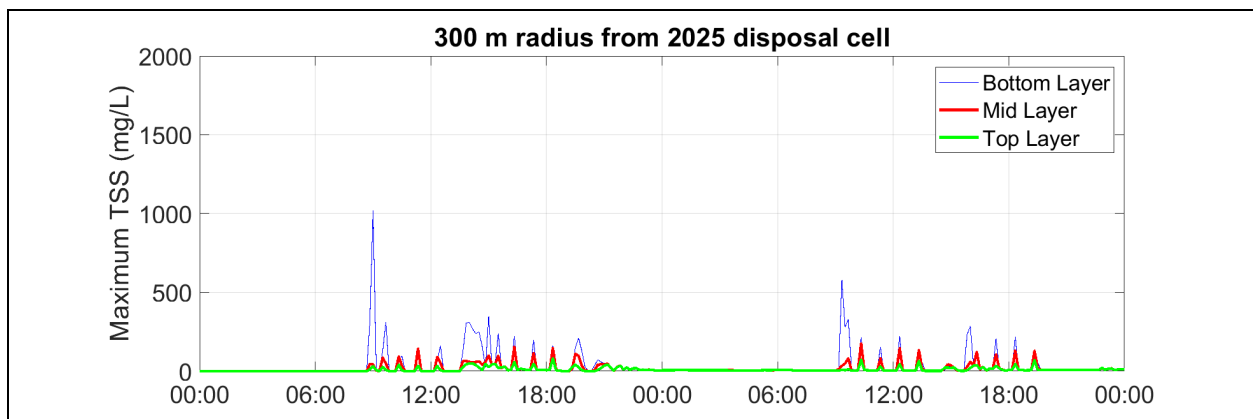


Figure 26 Série temporelle des concentrations de MES à différentes profondeurs d'eau, à une distance de 300 m de la cellule de dépôt 2025, sur une durée de dépôt de 48 h

Tableau 12 Concentrations maximales de MES à 100 m et 300 m de la cellule de dépôt 2025 sur une durée de dépôt de 48 h.

Paramètre	100 m	300 m
MES max. dans la couche de fond (mg/L)	1,710	1,020
MES max. dans la couche intermédiaire (mg/L)	215	175
MES max. dans la couche de surface (mg/L)	80	80

ÉVOLUTION MORPHODYNAMIQUE

L'évolution morphodynamique du fond dans la zone entourant la cellule de dépôt 2025 a été évaluée à la suite des activités de mise en dépôt (18 novembre) et à la fin de la période de simulation (8 décembre). Les résultats présentés à la figure 27 illustrent la distribution spatiale des sédiments déposés au fond autour de la cellule. À l'intérieur de la cellule 2025, les emplacements de rejet présentent des épaisseurs de dépôt importantes, atteignant localement environ 2,5 m. À l'extérieur de la cellule, des accumulations nettement plus faibles sont observées, généralement inférieures à 0,005 m. Les résultats indiquent que les sédiments ont été transportés sur des distances de l'ordre de 1 100 m vers l'aval et 1 300 m vers l'amont au cours de la période simulée.



Figure 27 Dépôt de sédiments entre le 21 septembre et le 8 décembre autour de la cellule de dépôt 2025

Cette légère dissymétrie dans l'extension du dépôt suggère une influence asymétrique des conditions hydrodynamiques locales, possiblement associée à la dynamique tidale. Toutefois, compte tenu des incertitudes inhérentes à la modélisation et à la variabilité naturelle du système, ces résultats ne permettent pas à eux seuls de conclure de manière catégorique à une prépondérance du transport vers l'amont.

Néanmoins, cette tendance apparaît cohérente avec les constats de l'analyse géomorphologique du site (WSP, 2025), qui met en évidence une organisation du fond marin et des formes sédimentaires compatibles avec une asymétrie des processus de transport et une influence notable des courants de marée sur la dynamique sédimentaire du secteur.

Par ailleurs, les patrons de dispersion simulés et les distances de transport estimées s'inscrivent dans la continuité des travaux antérieurs, notamment ceux documentant un milieu partiellement dispersif, caractérisé par une remise en suspension fréquente des sédiments et une redistribution progressive. Les temps caractéristiques de remobilisation obtenus dans la présente étude (ordre de plusieurs semaines à plusieurs centaines de jours) concordent avec les plages estimées dans l'étude de référence réalisée pour le site (LaSalle, 2008), qui évaluait des temps d'érosion compris entre 13,5 et 660 jours selon les classes granulométriques.

Trois semaines après la fin des activités de dépôt, les résultats indiquent qu'environ 84 % des sédiments demeurent à l'intérieur de la cellule 2025. À plus long terme, les simulations morphodynamiques accélérées suggèrent qu'une proportion très importante des sédiments (>99 %) pourrait être redistribuée à l'extérieur de la cellule sur une échelle de temps d'environ 450 jours. Cette évolution confirme le caractère dynamique du site, où les dépôts agissent comme une source temporaire de sédiments remobilisables, en cohérence avec les observations historiques (LaSalle, 2008) et les tendances morphologiques à plus long terme (WSP, 2025).

Dans l'ensemble, les résultats de modélisation apparaissent cohérents avec les observations géomorphologiques et les données empiriques disponibles, et appuient l'interprétation d'un système hydrosédimentaire actif, marqué par une dispersion progressive des matériaux et une influence notable, bien que non strictement quantifiée, de l'asymétrie tidale sur les processus de transport au fond.

5. Conclusion

5.1 Synthèse des constats

Les résultats de la modélisation hydrosédimentaire, combinés aux observations issues des études antérieures (LaSalle, 2008) et de l'analyse géomorphologique récente (WSP, 2025), permettent de caractériser de manière cohérente le comportement des sédiments dragués au site de mise en dépôt de l'Anse-au-Persil.

5.1.1 Comportement à court terme (phase de rejet)

Les simulations indiquent que le rejet des sédiments se traduit principalement par la formation d'un panache dense près du fond, associé à la descente rapide des matériaux. Les concentrations maximales de MES sont confinées à proximité immédiate du point de rejet, avec une dispersion verticale limitée et une dilution rapide sous l'effet des courants.

Ces résultats sont cohérents avec les observations de terrain et les conclusions des études antérieures (LaSalle, 2008), qui montrent un retour rapide aux conditions ambiantes hors de la zone immédiate de rejet.

5.1.2 Comportement à moyen et long terme

À l'échelle de la zone de dépôt, les analyses morphodynamiques indiquent que les sédiments déposés au fond subissent une redistribution progressive sous l'effet combiné des courants et des vagues. À court et moyen terme, une proportion importante des sédiments demeure initialement confinée dans la cellule de dépôt, avec environ 84 % des matériaux encore présents après trois semaines. Les épaisseurs de dépôt atteignent localement environ 2,5 m aux points de rejet, tandis qu'elles diminuent rapidement à l'extérieur de la cellule pour atteindre des valeurs généralement inférieures à 0,005 m, illustrant le caractère fortement localisé des accumulations initiales.

Les résultats montrent également que les matériaux déposés peuvent être redistribués sur des distances de l'ordre du kilomètre autour de la cellule, traduisant une mobilité non négligeable à l'échelle locale. Les simulations morphodynamiques accélérées suggèrent qu'une proportion importante des sédiments pourrait être progressivement remobilisée et transportée à l'extérieur de la cellule sur un horizon temporel de l'ordre de plusieurs centaines de jours (≈ 450 jours), en cohérence avec les temps caractéristiques d'érosion documentés dans les études antérieures (LaSalle, 2008).

Toutefois, il convient de préciser que la présente étude ne visait pas à simuler le transport sédimentaire de fond à long terme à l'échelle régionale, notamment en ce qui concerne les échanges sédimentaires à l'échelle du fleuve Saint-Laurent vers l'estuaire. Par conséquent, les résultats obtenus doivent être interprétés comme une évaluation du comportement morphodynamique local et à l'échelle de la cellule de dépôt, et non comme une quantification du devenir ultime des sédiments dans le système estuarien.

Dans ce contexte, les résultats indiquent que le site présente un comportement partiellement dispersif à l'échelle locale, caractérisé par une accumulation initiale suivie d'une redistribution progressive des matériaux. Cette interprétation est cohérente avec les observations historiques (LaSalle, 2008) ainsi qu'avec les tendances morphologiques observées à plus grande échelle dans le secteur (WSP, 2025), tout en reconnaissant que le devenir à long terme des sédiments au-delà de la zone modélisée demeure associé à un niveau d'incertitude.

5.1.3 Évolution des dynamiques sédimentaires

Les patrons de dispersion et de dépôt issus de la modélisation sont en accord avec :

- les observations empiriques (MES, bathymétrie) documentées historiquement (LaSalle, 2008);
- les tendances morphologiques observées à l'échelle du site, incluant une organisation du fond et une évolution spatiale des dépôts compatibles avec un système hydrosédimentaire dynamique (WSP, 2025).

Une légère dissymétrie dans l'extension des dépôts est observée, avec des distances de transport légèrement plus importantes vers l'amont que vers l'aval. Cette tendance suggère une influence asymétrique des conditions hydrodynamiques locales, possiblement liée à la dynamique tidale (WSP, 2025). Toutefois, cette observation ne permet pas, à elle seule, de conclure de manière catégorique à une dominance du transport vers l'amont à partir de la modélisation seule.

5.1.4 Impacts environnementaux

Les résultats indiquent que les impacts liés à la remise en suspension des sédiments sont :

- localisés spatialement, à proximité du point de rejet;
- limités dans le temps, en raison d'une dilution rapide des panaches;
- modérés en intensité, en dehors de la zone immédiate d'immersion.

À plus long terme, la dispersion des sédiments déposés s'effectue de manière progressive et diffuse, sans indication d'un transfert massif vers des zones éloignées.

5.1.5 Comportement global du site

Des simulations morphodynamiques accélérées indiquent qu'une proportion très importante des sédiments déposés (>99 %) pourrait être redistribuée à l'extérieur de la cellule sur un horizon d'environ 450 jours, une durée compatible avec les temps de transport estimés dans les études antérieures (LaSalle, 2008). Dans l'ensemble, les résultats confirment que le site de mise en dépôt présente un comportement partiellement dispersif, caractérisé par :

- une rétention temporaire des sédiments dans la cellule de dépôt;
- une redistribution graduelle sous l'effet des conditions hydrodynamiques;
- une dynamique cohérente avec les observations historiques et les caractéristiques morphologiques du secteur (WSP, 2025; LaSalle, 2008).

Le site agit comme une zone de transit sédimentaire, dans laquelle les matériaux déposés sont temporairement stockés avant d'être progressivement remobilisés et redistribués dans le système estuarien, en cohérence avec les observations morphologiques à plus grande échelle (WSP, 2025).

5.2 Recommandations

Les analyses réalisées fournissent une base robuste pour l'interprétation du comportement hydrosédimentaire du site, tel que requis dans le cadre des engagements de la STQ.

Dans une optique d'amélioration continue des connaissances et de réduction des incertitudes associées à la compréhension des dynamiques de rejet en eau libre, le site de l'Anse-aux-Persils, combiné aux données actuellement disponibles, constitue un contexte particulièrement propice à l'approfondissement des connaissances.

À cet égard, certaines avenues pourraient être envisagées, selon les besoins futurs ou d'éventuelles considérations de gestion, afin de bonifier progressivement la compréhension des processus en jeu.

L'équipe de WSP présente ainsi, à titre informatif et dans une perspective d'enrichissement des connaissances, quelques pistes de réflexion complémentaires en annexe.

Il est à noter que ces éléments ne s'inscrivent pas dans le cadre des engagements actuels entre la STQ et les autorités, et qu'ils relèvent plutôt d'un contexte d'approfondissement scientifique plus large, au-delà de la portée du présent mandat.

Bibliographie

- Codiga, D.L. (2011). Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions. Graduate School of Oceanography University of Rhode Island. GSO Technical Report 2011-01.
- Deltares (2024). Delft3D-FM Suite, version 2024.03. www.oss.deltares.nl.
- DFO (2025). Integrated Science Data Management of Fisheries and Oceans Canada. <https://www.isdm-gdsi.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/inventory-inventaire/sd-ds-eng.asp?no=2985&user=isdm-gdsi®ion=PAC>. Date accessed: 2025-03-01.
- Government of Canada, Fisheries and Oceans Canada, and Canadian Hydrographic Service (2024). Canadian Hydrographic Service Non-Navigational (NONNA) Intensity Data. Retrieved from app.geo.ca.
- Graw, J.H., Wood, W.T., & Phrampus, B.J. (2021). Predicting global marine sediment density using the random forest regressor machine learning algorithm. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB020135. <https://doi.org/10.1029/2020JB020135>.
- Guo, L., Wang, Z.B., Townend, I., and He, Q. (2019). Quantification of Tidal Asymmetry and Its Nonstationary Variations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 773-787. <https://doi.org/10.1029/2018JC014372>
- Gupta, P., Kim, Y., Steen, S., & Rahseed, A. (2023). Streamlined semi-automatic data processing framework for ship performance analysis. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 15 (2023) 100550.
- Johnson, B.H., and Fong, M.T. (1995). Development and verification of numerical models for predicting the initial fate of dredged material disposed in open water. Technical Report DRP-93-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- LaSalle (2008). Reconstruction du quai de Rivière-du-Loup. Etude sur le dragage d'entretien et les modes de dispersion des sédiments dragués. Client: Société des traversiers Québec.
- LaSalle NHC (2024). Modélisation hydro-sédimentaire de la dilution et la dispersion du panache de sédiments dragués. Etude d'impact du programme décennal de dragage du port de Gros-Cacouna. Rapport No. R0591. Prepared for Société portuaire du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie (SPBSG).
- Le Groupe Ocean Inc (2019). Petite Ourse Chaland à coque ouvrante démontable.

LibreTexts Engineering (2025).

[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Civil_Engineering/Slurry_Transport_\(Miedema\)/04%3A_A_The_Terminal_Settling_Velocity_of_Particles/4.04%3A_A_Terminal_Settling_Velocity_Equations#:~:text=Stokes%2C%20Budryck%20and%20Rittinger%20used,the%20constants%20in%20the%20equations..](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Civil_Engineering/Slurry_Transport_(Miedema)/04%3A_A_The_Terminal_Settling_Velocity_of_Particles/4.04%3A_A_Terminal_Settling_Velocity_Equations#:~:text=Stokes%2C%20Budryck%20and%20Rittinger%20used,the%20constants%20in%20the%20equations..) Data accessed: 2025-02-05.

Maguire Group Inc. (2004). Buzzards Bay Disposal Site Analysis – Results from MDFATE and STFATE Simulations at two Proposed Buzzards Bay Disposal Sites. Report prepared for the Massachusetts Office of Coastal Zone Management.

Saha, S., et al. (2014). The NCEP Climate Forecast System Version 2. J. Climate, 27, 2185–2208, doi.org.

Sandwell (2006). Cacouna Energy Gros-Cacouna Quebec LNG Receiving Terminal Metocean Summary.

SLGO (2025). <https://erddap.ogsl.ca/erddap/tabledap/ismerDebitsQuebecHoraire.html>. Date accessed: 2025-03-01.

Van Rijn (2020). Literature Review of Critical Bed-Shear Stresses for Mud-Sand Mixtures.

Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments: The Journal of Geology, v. 30, no. 5, p. 377–392.

WSP (2025). *Dragage annuel au quai de Rivière-du-Loup – Analyse géomorphologique*. Rapport pour la Société des traversiers du Québec. Réf. CA0009072.3441_R_Rev0.



Annexe A

**Pistes de réflexion pour
l'approfondissement des connaissances**



Gestion des opérations de dépôt

Adapter les modalités de mise en dépôt (séquence, fréquence et localisation) en fonction des conditions hydrodynamiques dominantes (marées, courants) afin :

- de limiter les accumulations locales excessives aux points de rejet;
- de favoriser une dispersion progressive et contrôlée des sédiments;
- d'optimiser leur stabilisation initiale après dépôt.

Répartir spatialement et temporellement les rejets à l'intérieur de la cellule de dépôt, notamment par une gestion séquentielle des zones de clapage, de manière à :

- éviter le dépôt répété au même emplacement sur de courtes périodes;
- permettre une redistribution naturelle partielle des matériaux entre les cycles de dépôt.

Tenir compte du caractère partiellement dispersif du site dans la planification des opérations, en reconnaissant :

- qu'une proportion des sédiments déposés sera inévitablement remobilisée et transportée à l'extérieur de la cellule à moyen terme ;
- que la cellule de dépôt fonctionne comme une zone de stockage temporaire, suivie d'une redistribution progressive dans le système hydrosédimentaire.

Suivi environnemental

- Maintenir un suivi bathymétrique périodique afin de documenter l'évolution morphologique du site et de valider les tendances de dispersion et d'accumulation observées dans le temps.
- Compléter, lorsque pertinent, par des mesures ponctuelles de MES en phase de rejet, permettant de :
 - a. valider les patrons de dispersion simulés à court terme ;
 - b. documenter l'intensité et l'étendue des panaches en conditions réelles.

Amélioration des connaissances

Afin de réduire les incertitudes associées à l'interprétation des processus hydrosédimentaires et de renforcer la compréhension du comportement du site de mise en dépôt, les actions suivantes sont recommandées :

- Maintenir un suivi bathymétrique périodique et envisager un élargissement de la couverture des levés multifaisceaux au-delà de la cellule de dépôt actuelle, afin de :
 - o documenter l'évolution morphologique du site à différentes échelles spatiales ;
 - o améliorer l'interprétation des directions de transport sédimentaire à partir des formes de fond ;
 - o mieux cerner les zones d'accumulation, de transit et d'érosion, en cohérence avec les observations géomorphologiques (WSP, 2025).

- Compléter, lorsque pertinent, par des mesures ponctuelles de MES en phase de rejet, permettant de :
 - o valider les patrons de dispersion simulés à court terme ;
 - o documenter l'intensité et l'étendue des panaches en conditions réelles, en continuité avec les observations historiques (LaSalle, 2008).
- Acquérir des données d'océanographie physique à proximité du site de dépôt, notamment :
 - o des mesures de vitesses de courant, idéalement à proximité du fond et sur des périodes représentatives du cycle saisonnier ;
 - o des données de vagues (hauteur, période, direction), permettant de caractériser les conditions énergétiques du site;
 - afin de :
 - mieux définir les forçages hydrodynamiques contrôlant l'érosion et la remise en suspension des sédiments ;
 - identifier les épisodes hydrodynamiques ponctuels susceptibles d'influencer significativement la morphologie du fond ;
 - appuyer l'interprétation des structures sédimentaires observées dans l'analyse géomorphologique (WSP, 2025).
- Poursuivre l'intégration des approches de modélisation hydrosédimentaire et d'analyse géomorphologique de manière à :
 - o valider les hypothèses relatives aux directions et aux mécanismes de transport des sédiments;
 - o améliorer la cohérence entre les résultats de modélisation et les observations du milieu;
 - o réduire les incertitudes associées à l'évaluation du comportement du site.
- Documenter plus finement les propriétés des sédiments (granulométrie, cohésion, consolidation), afin de :
 - o mieux contraindre les paramètres d'érosion et de dépôt utilisés dans les modèles;
 - o améliorer la représentation du comportement morphodynamique des dépôts;
 - o faciliter la comparaison avec les observations empiriques et les études antérieures (LaSalle, 2008).

Approche intégrée

- Considérer le site dans une perspective de système dynamique régional, tout en reconnaissant que le devenir à long terme des sédiments dépasse la portée de la présente modélisation;
- Adapter l'approche de gestion en fonction de l'évolution observée du comportement du site.

wsp



wsp.com