

PORT DE QUÉBEC

NOUVELLES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES DU SECTEUR BEAUPORT Modélisation numérique de la stabilité des zones draguées

- Préliminaire -



9620, rue Saint-Patrick, LaSalle (Québec), Canada, H8R 1R8
Téléphone : (514) 366-2970 / Télécopieur : (514) 366-2971

Internet : www.lasalleNHC.com

Courriel : info@lasalleNHC.com

Rapport présenté à :

Administration portuaire de Québec

PRÉLIMINAIRE

PORT DE QUÉBEC

NOUVELLES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES DU SECTEUR BEAUPORT

Modélisation numérique de la stabilité des zones draguées

Rapport no 0013

Décembre 2014

Préparé par :

Nicolas Gallant, ing. junior

<Originale signée par>

Marc Villeneuve, ing.

414-108 (1268)

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	iii
1.0 INTRODUCTION.....	4
2.0 AMÉNAGEMENTS À L'ÉTUDE ET PROBLÉMATIQUE	5
2.1 Zone à l'étude.....	5
2.2 Aménagements projetés	6
2.3 Problématique et objectifs.....	8
3.0 MODÈLE NUMÉRIQUE	11
3.1 Description du modèle utilisé	11
3.1.1 Mike 21 HD.....	11
3.1.2 Mike 21 SW.....	11
3.1.3 Mike 21 ST	12
3.1.4 Couplage des modèles.....	12
3.2 Limite de la zone modélisée.....	12
3.3 Numérisation de la bathymétrie	14
3.4 Conditions aux limites	19
3.5 Paramètres de calcul	19
3.5.1 Hydrodynamique.....	19
3.5.2 Vagues	20
3.5.3 Transport sédimentaire.....	20
4.0 TRANSPORT SÉDIMENTAIRE PAR LES COURANTS DE MARÉES ET LES VAGUES	22
4.1 Scénarios de simulation.....	22
4.2 Conditions actuelles	23
4.2.1 Simulation initiale – Tempête de l'ENE	23
4.2.2 Courants de marée (sans vagues)	23
4.2.3 Bathymétrie et géométrie de la zone draguée	25
4.3 Conditions futures.....	27
4.3.1 Nouvelle configuration des fonds	27
4.3.2 Résultats de simulation	28

TABLE DES MATIÈRES (suite)

5.0	AUTRES FACTEURS POTENTIELS DE SÉDIMENTATION	32
5.1	Charge sédimentaire du Saint-Laurent et rivière Saint-Charles	32
5.2	Jets d'hélice des navires	33
6.0	MESURES CORRECTIVES	34
7.0	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	36
	RÉFÉRENCES	38

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Zone à l'étude.....	5
Figure 2 : Aménagements à l'étude	6
Figure 3 : Zones draguées.....	7
Figure 4 : Variantes finales des plages	8
Figure 5 : Relevés bathymétriques devant le quai 53 – 19 au 22 avril 2013.....	9
Figure 6 : Approches de modélisation hydrosédimentologique dans MIKE 21	13
Figure 7 : Limites du modèle numérique et station marégraphiques du SHC	13
Figure 8 : Données utilisées dans le montage de la bathymétrie numérique	16
Figure 9 : Bathymétrie numérique	17
Figure 10 : Maillage flexible à éléments triangulaires.....	18
Figure 11 : Conditions actuelles – Changements morphologiques.....	24
Figure 12 : Bathymétrie de la zone à l'étude	26
Figure 13 : Transport sédimentaire et adoucissement de la pente de dragage	27
Figure 14 : Conditions futures – Bathymétrie et emprise du dragage.....	28
Figure 15 : Conditions futures – Changements morphologiques.....	29
Figure 16 : Vitesses d'écoulement maximales en vive-eau.....	31
Figure 17 : Courants de marée pouvant causer de la sédimentation aux abords du quai 53	35
Figure 18 : Conditions actuelles - Adoucissement de la pente de dragage	35

1.0 INTRODUCTION

L'Administration portuaire de Québec (APQ) poursuit actuellement son projet d'extension du secteur portuaire Beauport, qui comporte notamment la construction d'une nouvelle ligne de quai dans le prolongement du quai no 53 et la mise en place d'un terminal de vrac liquide dans l'estuaire de la rivière Saint-Charles.

Ces nouveaux aménagements impliquant la mise en place de nouvelles zones de dragage d'accès, l'APQ désire analyser la stabilité des aires draguées, vis-à-vis des risques de sédimentation et d'érosion. La question liée de la sédimentation repose notamment sur les conditions actuellement observées à l'extrémité du quai no 53, où des accumulations importantes de sable se reforment très rapidement suite aux dragages d'entretien. Il importe donc d'assurer que cette problématique ne sera pas reproduite et amplifiée dans la zone draguée plus étendue qui sera requise aux abords des nouveaux quais.

Préparé par Lasalle|NHC (anciennement le Groupe-Conseil LaSalle) à la demande de l'APQ, le présent rapport porte sur l'étude de la stabilité des zones draguées dans le secteur Beauport, et ce tant dans les conditions actuelles qu'en présence des aménagements projetés. L'analyse repose sur l'utilisation du modèle numérique hydrosédimentologique développé par Lasalle|NHC lors des phases d'études antérieures de l'extension du secteur Beauport [1, 2, 3 et 4].

La méthodologie et les résultats sont présentés en cinq sections. La section 2 décrit d'abord les aménagements et la problématique à l'étude. La section 3 présente ensuite le modèle numérique mis en œuvre pour la simulation des conditions hydrosédimentologiques dans le secteur à l'étude. La section 4 traite des risques de sédimentation et d'érosion des zones draguées sous l'effet des courants de marée et des vagues de tempête, pour les conditions d'aménagement actuelles et projetées. La section 5 analyse brièvement l'impact potentiel des jets d'hélice de navires et de la charge sédimentaire de la rivière Saint-Charles sur les conditions de sédimentation. La section 6 présente diverses pistes de solution visant à réduire la sédimentation observées en conditions actuelles, aux abords du quai no 53. La section 7 présente finalement les conclusions et recommandations de l'étude.

2.0 AMÉNAGEMENTS À L'ÉTUDE ET PROBLÉMATIQUE

2.1 Zone à l'étude

Le projet d'extension portuaire à l'étude est situé dans le secteur le secteur Beauport. Les postes à quai 50 à 53 forment actuellement une ligne continue et délimitent la rive nord de l'estuaire de la rivière Saint-Charles (figure 1). Les plages utilisées à des fins récréatives sont situées au nord-est du secteur portuaire, dans la portion supérieure de la pointe. Actuellement, la plage principale est utilisée par les véliplanchistes et plaisanciers, et sera éventuellement disponible pour la baignade. L'érosion de cette plage par les vagues générées par les vents du secteur est-nord-est a conduit à la formation d'une flèche sableuse clairement visible. Cette dernière, de même que la seconde plage bordant le rentrant sud-ouest (figure 1), sont fréquentées par les adeptes de kitesurf.



Figure 1 : Zone à l'étude

2.2 Aménagements projetés

Le projet d'extension du secteur portuaire Beauport comporte notamment la construction d'un nouveau quai de 610 m de long (quai 54) dans le prolongement du quai no 53 et la mise en place d'un terminal de vrac liquide dans l'estuaire de la rivière Saint-Charles, aux abords du quai no 50 (figure 2).

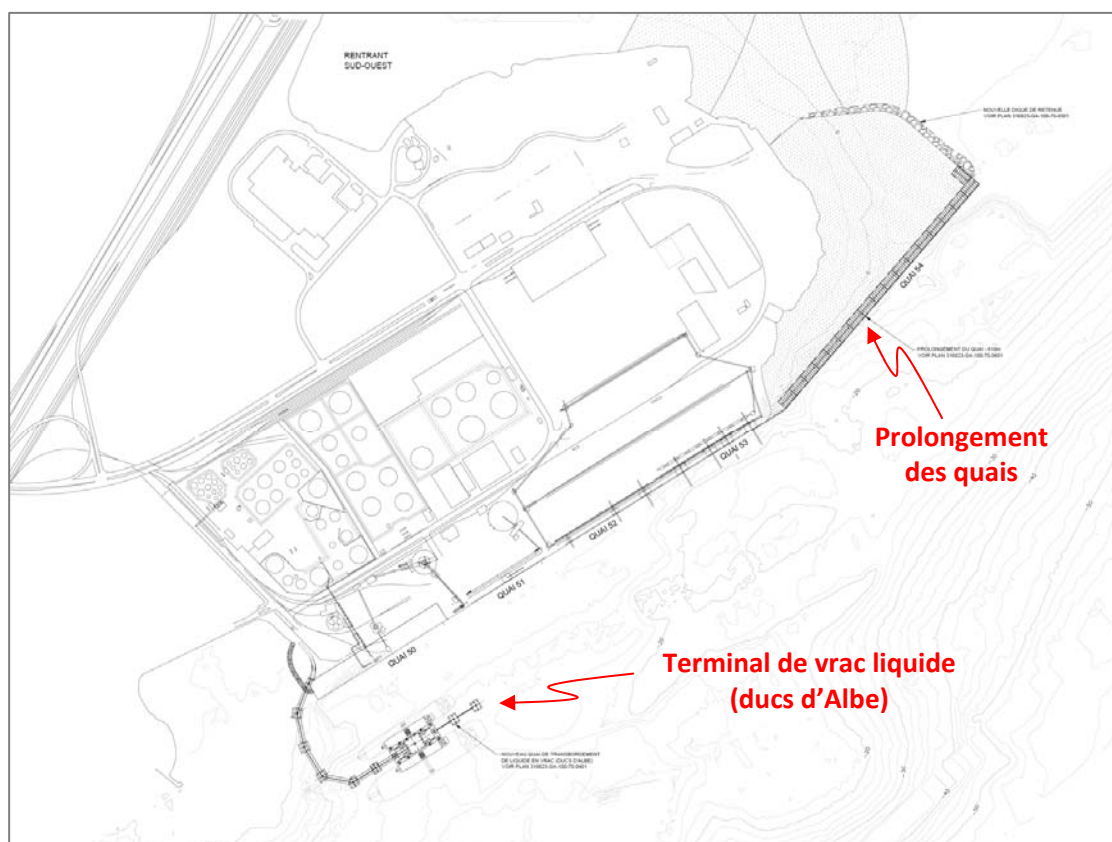


Figure 2 : Aménagements à l'étude

(source : Hatch, Mott, MacDonald)

Ces nouveaux aménagements requièrent des travaux de dragage relativement importants, en vue de garantir une profondeur minimale de 16 m devant les nouveaux quais et le long de la portion externe des ducs d'Albe. Un dragage à la cote -13,5 m ZC¹ est également prévue dans la zone située entre les ducs d'Albe et le quai no 50 (figure 3).

¹ Toutes les élévations et cotes altimétriques du présent rapport sont exprimées par rapport au zéro des cartes nautiques (ZC) qui, dans le port de Québec, se situe 2,0 m sous la référence géodésique (niveau moyen des mers).

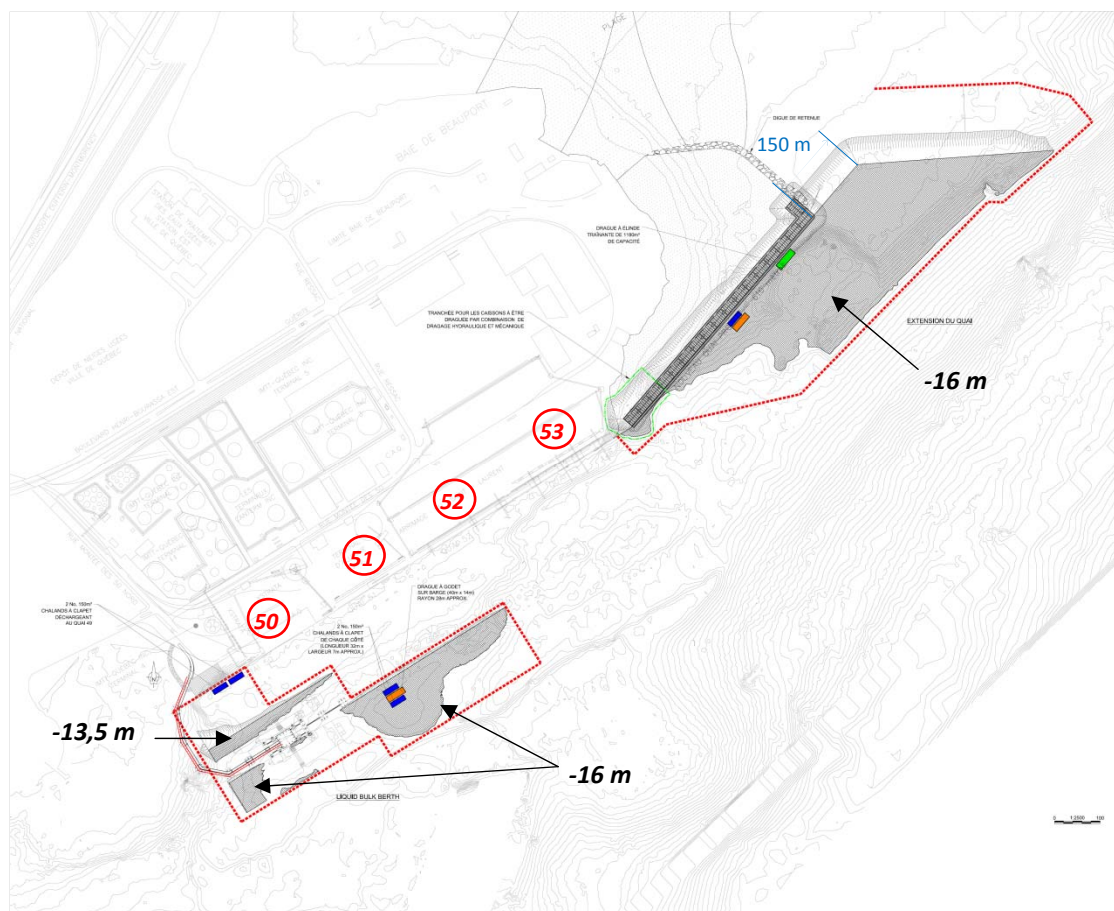


Figure 3 : Zones draguées
(source : Hatch, Mott, MacDonald)

La ligne du quai 54 forme un angle de 17° par rapport à ligne des quais existants 50 à 53. Conformément aux plans de la firme Hatch, Mott, MacDonald fournis par l'APQ, l'aire draguée est prolongée sur 150 m au-delà de l'extrémité du quai 54 (figure 2). Il est supposé que les pentes d'excavation sont de 1V :5H dans l'ensemble des zones draguées.

Au nord de la zone portuaire, le projet d'extension prévoit également l'aménagement d'une zone récréotouristique recréant la plage principale et la plage de kitesurf. Lasalle|NHC, en collaboration avec la firme CRI, ont récemment optimisé la géométrie des futures plages en vue d'éviter les conditions érosives observées le long de la plage actuelle et de favoriser la pérennité des nouvelles plages [3, 4].

L'aménagement pris en compte dans la présente étude correspond à la variante 2014-V1, soit la dernière configuration des plages proposée par l'APQ en juin 2014, intégrant les

retouches initiales proposées par Lasalle|NHC en vue de l'optimisation finale [4]. La figure 4 illustre cette variante qui requiert un volume de sable dragué de 400 000 m³ pour le remblai de la zone récréotouristique².

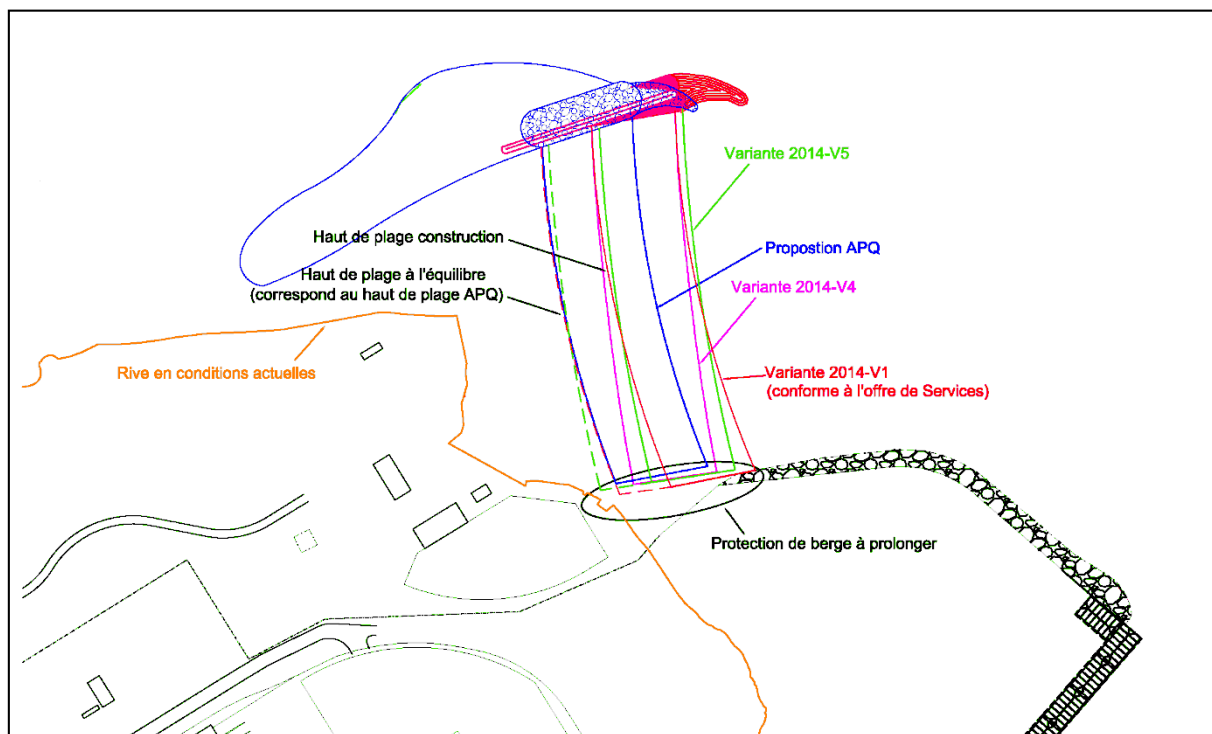


Figure 4 : Variantes finales des plages
(source : référence [4])

2.3 Problématique et objectifs

Dans les conditions d'aménagement actuelles, l'APQ observe une sédimentation importante à l'extrémité est du quai no 53.

Un appel-conférence tenu avec le Maître de Port, M. Michel Petit, le 27 novembre 2014 a confirmé ces conditions. Sur la base de travaux de dragage dont il a été témoin en 2013, M. Petit a d'une part indiqué que l'opérateur de la drague peinait à maintenir la pente d'excavation reliant la zone draguée (cote -15 m ZC) aux fonds naturels.

² La variante finale proposée au terme de l'étude d'optimisation [4] est la variante 2014-V5 (figure 4). Aux fins de la présente étude, les variantes V1 et V5 peuvent toutefois être considérées comme étant identiques.

D'autre part, des relevés effectués seulement deux semaines après les dragages ont révélé une sédimentation importante près de l'extrémité du quai, au droit des bollards 59 et 60 (figure 5).

La figure 5 présente un relevé plus récent, effectué entre le 19 et le 22 avril 2013, montrant le patron de sédimentation observé dans cette zone. À l'ouest du bollard 59, les fonds dragués offrent une profondeur d'au moins 15,5 m aux abords immédiats des quais alors qu'une accumulation de sédiments est clairement visible plus à l'est, avec des profondeurs disponibles réduites à 14 m devant le bollard 60 et à 12,2 m à l'extrémité du quai 53.

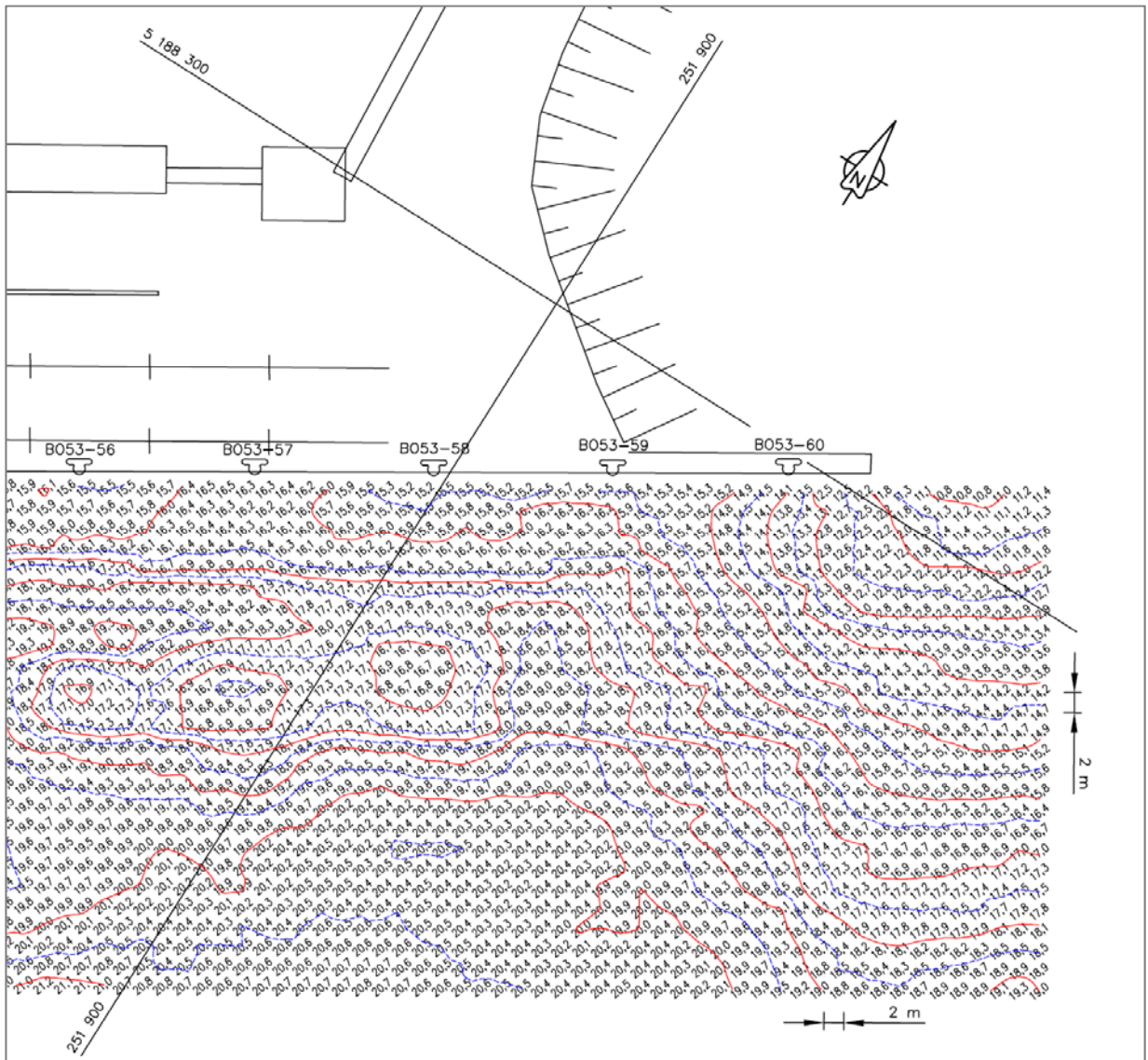


Figure 5 : Relevés bathymétriques devant le quai 53 – 19 au 22 avril 2013
(source : APQ)

A priori, cette sédimentation semble clairement résulter de l'action des courants (courants de marée et courants littoraux induits par les vagues le long de la pointe de Beauport) et de l'instabilité de la pente d'excavation reliant les fonds dragués aux zones peu profondes correspondant à la pointe et la batture de Beauport.

La présente étude vise essentiellement à simuler les conditions hydrodynamiques et le transport sédimentaire au site du projet et à en déduire les risques de déposition ou de remaniement des fonds pouvant réduire le tirant d'eau minimal initialement procuré par les dragages. Les simulations des conditions hydrosédimentologiques sont effectuées en conditions d'aménagement actuelles et projetées, à l'aide du modèle numérique du port de Québec dont dispose déjà Lasalle|NHC. Les résultats de ces travaux sont présentés à la section 5.

Outre les conditions hydrodynamiques locales, d'autres facteurs pourraient expliquer la sédimentation le long des quais de la pointe de Beauport et de l'estuaire de la rivière Saint-Charles :

- Les apports sédimentaires externes, provenant du transport sédimentaire dans le Saint-Laurent et/ou la rivière Saint-Charles;
- Le remaniement des fonds par les jets d'hélice des navires ou des remorqueurs.

Ces deux aspects sont brièvement abordés à la section 6.

3.0 MODÈLE NUMÉRIQUE

3.1 Description du modèle utilisé

La modélisation numérique des conditions hydrosédimentologiques a été effectuée à l'aide des divers modules du modèle bidimensionnel MIKE 21. Ce modèle commercial, conçu au Danemark par la firme *DHI Water & Environment* est reconnu à l'échelle internationale et a été utilisé avec succès dans de nombreux projets impliquant la simulation des écoulements en milieux fluviaux, estuariens et côtiers.

3.1.1 Mike 21 HD

La modélisation des courants induits par la marée et les vagues (courants littoraux) repose sur le module FM (*Flexible Mesh*) de MIKE 21. Ce module utilise un maillage flexible aux volumes finis qui permet d'augmenter la résolution de la bathymétrie dans les zones d'intérêt. Celles-ci sont modélisées à l'aide d'un maillage relativement fin tandis que les champs éloignés sont modélisés avec un maillage plus grossier, permettant ainsi d'optimiser les temps de calculs.

Dans le cas présent, d'après les niveaux de marée imposés aux limites de la zone modélisée, le module fournit les valeurs de niveaux et de vitesses d'écoulement intégrées sur la verticale en chacun des points de maillage de la bathymétrie. Le module intègre également les contraintes de radiation dues aux vagues (calculées à l'aide du module SW - voir section suivante), qui permettent de superposer les courants littoraux aux courants de marée.

3.1.2 Mike 21 SW

La transformation des vagues du large à l'approche du littoral sous l'effet de la réfraction et du déferlement est simulée à l'aide du module SW (*Spectral Waves*) de MIKE 21. Le module SW intègre les développements les plus récents pour la simulation de la génération et de la transformation des vagues en eaux profondes et côtières. Les simulations permettent de reproduire les phénomènes de réfraction, de dissipation par déferlement et/ou frottement sur le fond, de génération des vagues par le vent, d'interaction non linéaire entre les vagues et d'interaction vagues-courants.

Le module permet d'utiliser des données de vagues au large pré-établies, qui doivent alors être connues grâce à des mesures ou autres données externes, ou de générer des vagues par le vent. La deuxième approche a été utilisée pour la présente étude.

3.1.3 Mike 21 ST

La modélisation du transport sédimentaire associé aux courants et aux vagues est effectuée à l'aide du module ST (*Sand Transport*) de MIKE 21. En fonction de l'ensemble des forçages hydrodynamiques (courant de marée, agitation due aux vagues et courants littoraux), ce module permet le calcul du transport des sables et de l'évolution morphologique des plages.

Le module MIKE 21 ST repose sur le modèle sédimentaire Q3D développé par DHI Water & Environment pour simuler la dynamique sédimentaire littorale sous l'influence combinée des vagues et des courants. Le modèle Q3D calcule le transport sédimentaire et l'hydrodynamique en deux dimensions, en utilisant toutefois une approche quasi 3D permettant de prendre en compte l'évolution dans le temps et sur la verticale du cisaillement, de la turbulence, des vitesses des courants et des concentrations de sédiments. L'évolution temporelle de la couche limite sous l'effet combiné des vagues et du courant est résolue selon la méthode d'intégration de la quantité de mouvement développé par Fredsoe (réf. [5]).

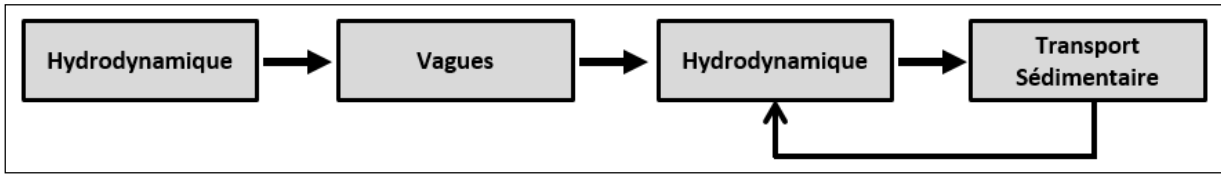
3.1.4 Couplage des modèles

Lors des études de modélisation hydrosédimentologique effectuée par Lasalle|NHC entre 2006 et 2010 [1, 2, 3], la simulation des vagues, des courants et du transport sédimentaire s'effectuait en mode séquentiel (figure 6a). L'influence des changements morphologiques était alors limitée aux conditions hydrodynamiques (courants et niveaux d'eau) et non aux vagues.

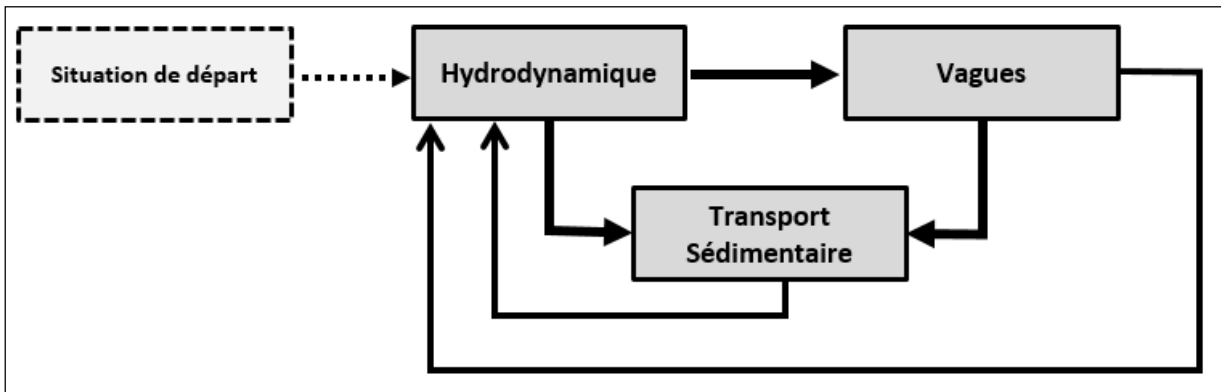
Dans la dernière version de MIKE 21, qui a été utilisée pour la présente étude, la modélisation de l'ensemble des processus peut être effectuée en mode couplé, permettant une mise à jour de l'ensemble des variables (courants, vagues, transports des sédiments et morphologie) à chaque pas de temps du calcul (figure 6b).

3.2 Limite de la zone modélisée

La figure 7 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre l'étendue de la zone couverte par le modèle numérique. Celle-ci est identique à l'étendue du modèle hydrodynamique global utilisé lors de nos études antérieures. La limite amont se situe légèrement à l'aval du pont de Québec et ses limites aval sont fixées de part et d'autre de l'île d'Orléans, à la hauteur de l'Ange-Gardien.



a) Modélisation séquentielle



b) Modélisation dynamique

Figure 6 : Approches de modélisation hydrosédimentologique dans MIKE 21



Figure 7 : Limites du modèle numérique et station marégraphiques du SHC

La configuration adoptée permet d'assurer une distance suffisante des limites amont et aval du modèle par rapport au secteur à l'étude, de manière à éviter les imprécisions pouvant survenir à proximité de ces limites, où les conditions d'écoulement sont imposées plutôt que calculées par le modèle.

3.3 Numérisation de la bathymétrie

La figure 8 illustre la couverture et la densité des données utilisées pour le montage de la bathymétrie numérique. Ces données sont constituées en majeure partie par les cartes nautiques et les fichiers de levés hydrographiques obtenus auprès du Service hydrographique du Canada (SHC) :

Dans la zone d'ensemble du modèle :

- Cartes marines no 1316 et 1317 en format numérique AutoCAD;

Dans la zone du port et des battures de Beauport :

- Levés hydrographiques no 3005094 : 9 882 points relevés en 1982;

Dans l'estuaire de la rivière Saint-Charles et le secteur Beauport :

- Levés hydrographiques no 3003712 : 835 points relevés en 1971;
- Levés hydrographiques no 3005121 : 898 points relevés en 1982;
- Levés hydrographiques no 3104341 : 8 121 points relevés en 2005;
- Levés hydrographiques no 3104342 : 926 points relevés en 2005;
- Levés hydrographiques no 3104710 : 115 306 points relevés en 2006.

Dans les bras de l'île d'Orléans:

- Levés hydrographiques no 3003870 : 6201 points relevés en 1974;
- Levés hydrographiques no 3003828 : 19 865 points relevés en 1975.

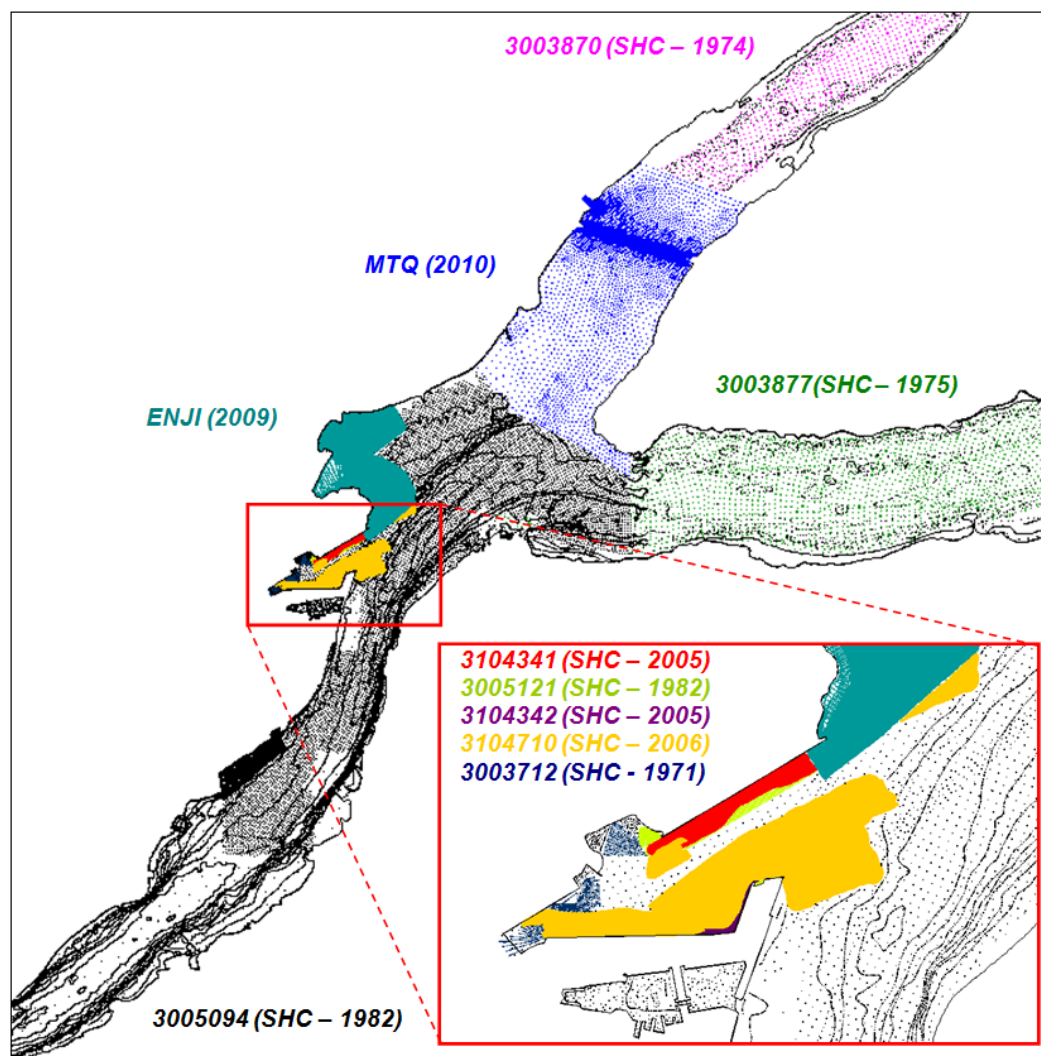
Pour le bras nord de l'île d'Orléans, des données récentes (2010) transmises par le Ministère des Transport du Québec (MTQ) dans le cadre d'un autre mandat ont pu également être ajoutés au modèle bathymétrique.

Lors de notre étude de 2010 [3], des données additionnelles avaient été intégrées au modèle aux abords de la pointe de Beauport et dans le rentrant sud-ouest, sur la base des relevés effectués durant l'été 2009 par les Entreprises Normand Juneau (ENJI).

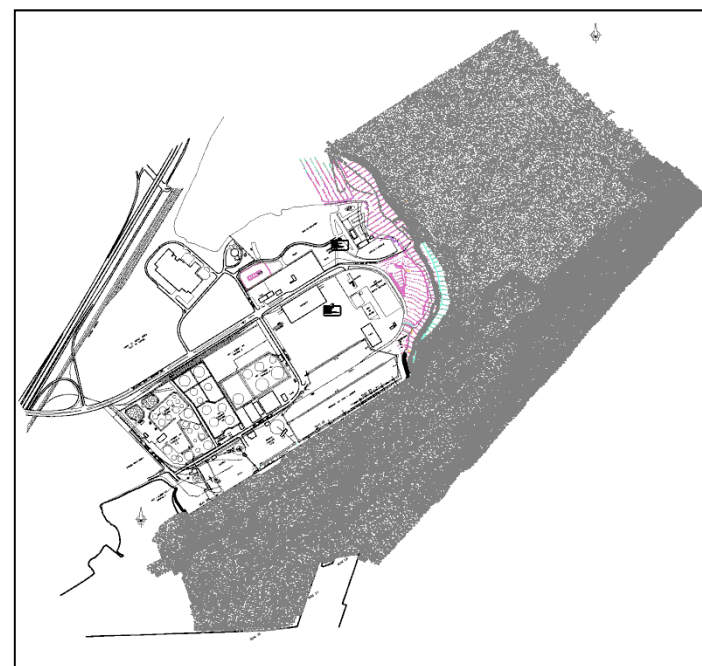
Dans le cadre de notre dernière étude d'optimisation du secteur récréotouristique [4], nous avons intégré au modèle les nouveaux relevés effectués par le SHC (échosondages) et l'APQ (relevés dans la zone littorale) au cours de l'été 2013 (figure 8b).

Une fois les informations bathymétriques rassemblées dans le même système d'information géographique (MTM zone 7) et rapportées au zéro des cartes, les données bathymétriques ont été transformées en fichiers ASCII et intégrées à l'interface de pré-traitement MIKE Zero.

La bathymétrie résultante en conditions actuelles est illustrée à la figure 9 pour l'ensemble du modèle et aux abords de la zone à l'étude. La figure 10 présente le maillage correspondant dans chacune de ces zones. La résolution du maillage est de l'ordre de 150 m dans les zones éloignées et diminue jusqu'à environ 10 m le long des plages de la pointe de Beauport.



a) Relevés antérieurs à 2010



b) Intégration des relevés de 2013

Figure 8 : Données utilisées dans le montage de la bathymétrie numérique

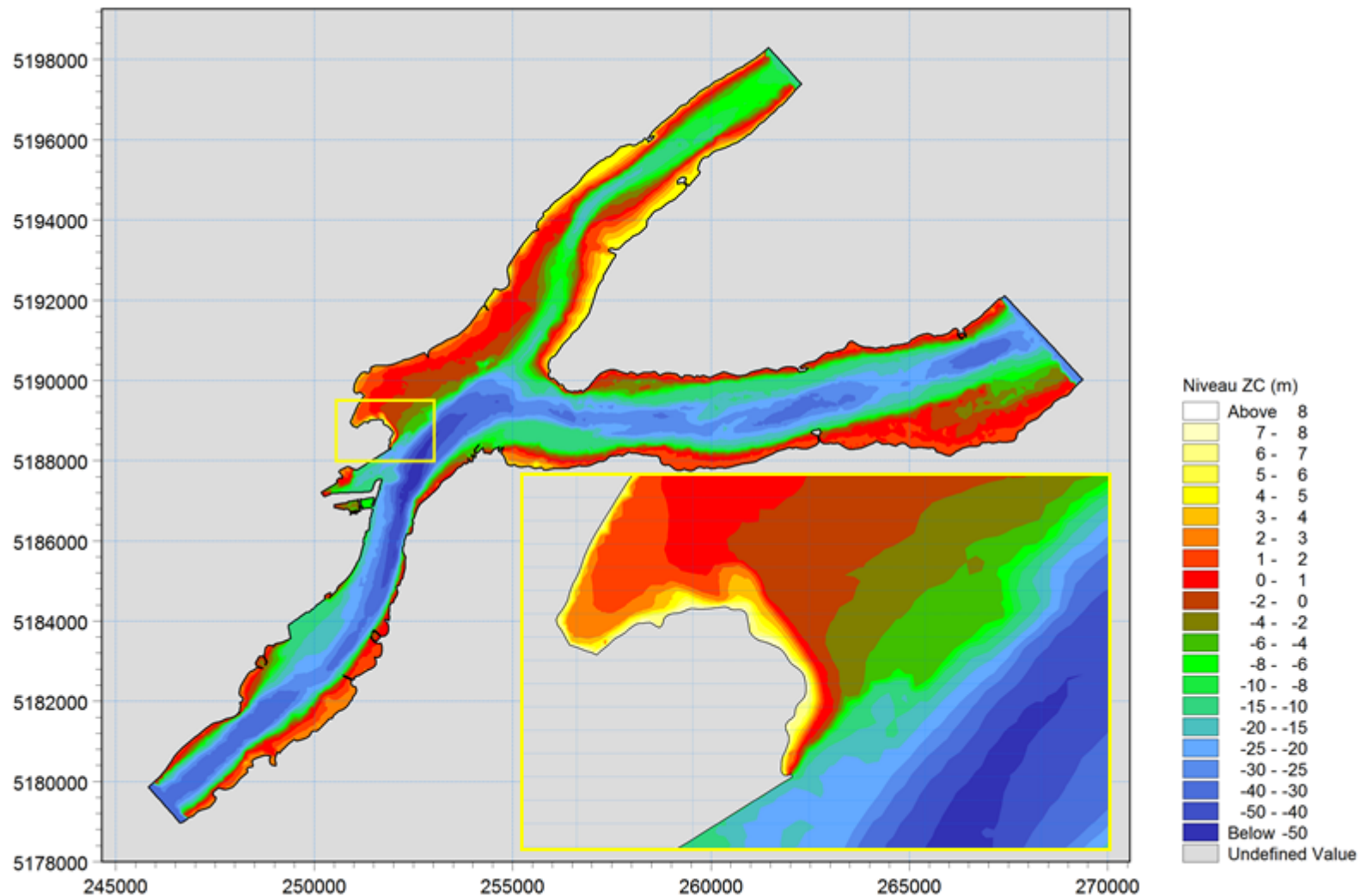


Figure 9 : Bathymétrie numérique

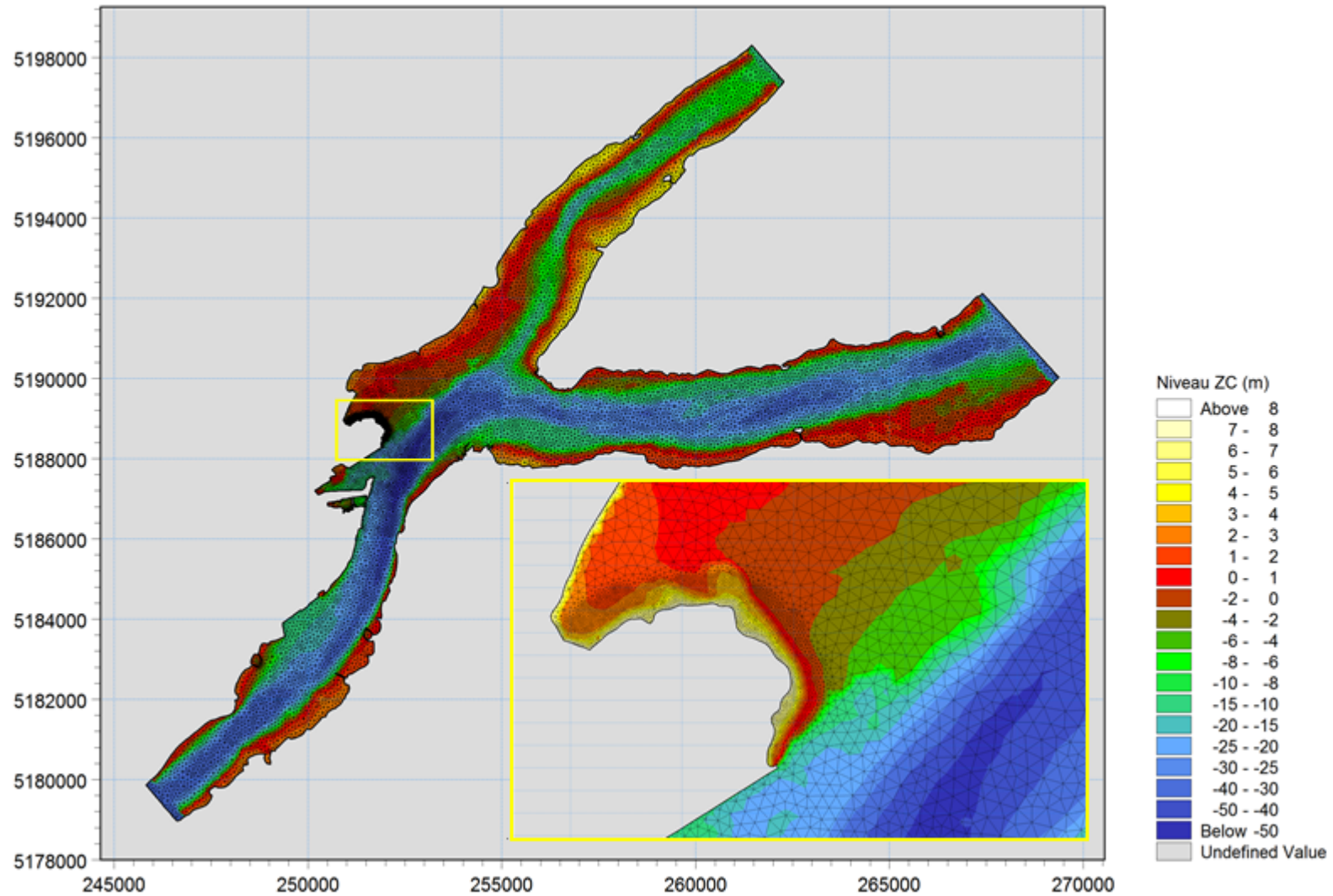


Figure 10 : Maillage flexible à éléments triangulaires

3.4 Conditions aux limites

Les conditions aux limites d'un modèle représentent les paramètres qui sont imposés par l'utilisateur aux diverses frontières de la zone modélisée. Un choix judicieux de ces conditions est essentiel pour obtenir un modèle donnant des résultats représentatifs de la réalité.

Pour le module hydrodynamique, les signaux de marée reconstitués aux stations du SHC ont été imposés aux limites du modèle, selon les dates des tempêtes modélisées. Pour la limite du bras nord de l'île d'Orléans, située entre les stations de Sainte-Anne-de-Beaupré et de Montmorency (voir figure 12), les niveaux de marée ont été interpolés en fonction des distances séparant la limite du modèle des deux stations marégraphiques.

Pour les vagues, un spectre nul a été imposé aux limites du modèle puisqu'il a été choisi de générer les vagues par le vent dans le modèle. Pour le module sédimentaire, aucune concentration de sédiments n'a été spécifiée aux limites du modèle.

3.5 Paramètres de calcul

3.5.1 Hydrodynamique

a) Frottement sur les fonds

Toutes les simulations hydrodynamiques ont été réalisées avec un coefficient de Manning de $n = 0,03$, constant dans l'ensemble du secteur modélisé.

b) Viscosité turbulente

Les flux de quantité de mouvement dus à la turbulence, à l'intégration verticale des équations de base (modèle bidimensionnel) et aux fluctuations se produisant à des échelles inférieures aux cellules de maillage, ceux-ci sont pris en compte dans MIKE 21 par un paramètre de viscosité turbulente. En pratique, la variation de ce paramètre induit notamment dans les écoulements une plus ou moins grande tendance à former des zones de décollement et des courants de retour. Sur la base des résultats obtenus dans des études similaires, la formulation de Smagorinsky, avec une constante de 0,28, a été utilisée.

3.5.2 Vagues

a) Déferlement

Tous les résultats de simulation ont été obtenus en tenant compte de l'influence du déferlement. MIKE 21 SW simule la dissipation d'énergie due au déferlement selon la formulation proposée par Battjes & Janssen [6]. Le déferlement est alors contrôlé par trois paramètres pour lesquels les valeurs proposées dans les références de MIKE 21 SW ont été conservées:

$$\alpha = 1,0 \quad \gamma_1 = 1,0 \quad \gamma_2 = 0,8$$

Les valeurs de α et γ_2 sont conformes à Battjes & Janssen [6] alors que celle de γ_1 est tirée de Holthuijsen et al. [7]. Les paramètres γ_1 et γ_2 influencent respectivement les limites de cambrure et de profondeur d'eau conduisant au déferlement.

b) Frottement

La zone modélisée présente une vaste gamme de profondeurs, allant de profondeurs importantes dans le chenal principal du fleuve Saint-Laurent, à de très faibles profondeurs près du rivage et dans le rentrant sud-ouest. Une analyse de sensibilité a donc été réalisée pour évaluer l'influence du paramètre de frottement sur les fonds sur la dissipation de l'énergie des vagues dans le secteur des plages. Les résultats obtenus en incluant et en excluant le paramètre de frottement sur les fonds, tout en maintenant l'influence du déferlement dans les deux cas, ont montré peu d'écarts dans la hauteur des vagues simulée près des plages. Il a donc été décidé d'inclure l'influence du frottement sur les fonds dans les simulations. La valeur par défaut de MIKE 21 SW, soit un coefficient de Nikuradse de 0,04 m, a été conservée.

3.5.3 Transport sédimentaire

a) Paramètres généraux

Le modèle Q3D étant passablement lourd du point de vue des temps de calcul, sa mise en œuvre dans MIKE 21 passe par la définition au préalable d'une base de données de taux de transport des sédiments. L'utilisateur doit ainsi fixer une gamme de valeurs couvrant toutes les combinaisons possibles de vagues (hauteur et période), courants, sédiments (diamètre moyen, granulométrie) et bathymétrie (profondeur d'écoulement, pente des fonds) pouvant être obtenues pendant la

simulation. Cette étape requière également le choix d'une théorie des vagues, et la possibilité d'inclure ou non différents phénomènes pouvant affecter le transport sédimentaire (la présence de formes sur les fonds (dunes, rides), courants de densité, pente des fonds, etc.).

À défaut de données de validation, la sensibilité des résultats aux principaux paramètres cités plus haut a été testée. On a ainsi vérifié l'influence de la théorie des vagues et de la pente des fonds sur les résultats. Ces tests de sensibilité n'ont pas montré d'écarts significatifs dans les résultats.

b) Granulométrie

Comme pour l'ensemble des études antérieures effectuées par Lasalle|NHC pour l'extension du secteur Beauport, un D_{50} de 0,2 mm a été utilisé pour les simulations hydrosédimentologiques.

Des essais de sensibilité ont également été réalisés avec un D_{50} de 0,5 mm. La comparaison des résultats, en termes de patrons d'érosion et de déposition, n'a toutefois pas montré de différences significatives. Les volumes de sédiments érodés et déplacés sont certes plus importants en présence du diamètre plus fin, mais les tendances générales restent les mêmes. Dans le contexte d'une étude comparative (conditions actuelles versus conditions futures), il a été jugé approprié de conserver le diamètre de 0,2 mm pris en compte lors de nos dernières études.

4.0 TRANSPORT SÉDIMENTAIRE PAR LES COURANTS DE MARÉES ET LES VAGUES

4.1 Scénarios de simulation

Les premières simulations des conditions hydrosédimentologiques ont été consacrées à l'aménagement actuel et visaient avant tout à confirmer que le modèle numérique parvenait à reproduire l'accumulation de sable récurrente formée à l'extrémité du quai 53.

Nos études antérieures du secteur Beauport [1, 2, 3 et 4] ont clairement montré que la plage actuelle est soumise à un fort transport littoral sous l'effet des vagues de tempêtes liées aux vents dominants du secteur général ENE. Les simulations ont indiqué que de telles vagues induisent des courants littoraux orientés vers le nord dans la moitié nord de la plage et vers le sud dans la portion sud. Les courants littoraux dirigés vers le nord conduisent à la formation de la flèche sableuse bien visible dans les relevés bathymétriques et les photos aériennes et il était raisonnable de supposer que les courants orientés vers le sud pouvaient mener à l'ensablement affectant l'extrémité du quai no 53.

En première étape, il était donc logique de simuler cette tempête de l'ENE. Conformément à l'approche utilisée lors de notre dernière étude, un vent constant de l'ENE ayant une vitesse de 23 m/s (83 km/h) a été imposé au modèle pendant 5 jours, en présence des variations du niveau d'eau associées à une marée de vive-eau. La référence [4] fournit plus de détails concernant les paramètres de cette simulation.

Pour départager l'effet des vagues (et des courants littoraux) de celui des courants de marée, les simulations ont été reprises en considérant uniquement l'effet de la marée, avec un vent nul.

Ces deux simulations ont ensuite été reprises pour les conditions d'aménagement projetées, en présence de l'extension portuaire et de la nouvelle zone récréotouristique.

4.2 Conditions actuelles

4.2.1 Simulation initiale – Tempête de l'ENE

La figure 11a illustre les changements morphologiques résultant dans la zone à l'étude suite à la tempête synthétique de l'ENE. Les zones de sédimentation et d'érosion sont respectivement illustrées en vert et en rouge. La modélisation prédit effectivement une accumulation près de l'extrémité du quai 53, mais les épaisseurs de sédimentation les plus importantes demeurent concentrées derrière la ligne de quai. Toutefois, devant l'extrémité du quai, la simulation conduit à une accumulation dans la gamme de 1 mm à 1 cm sur une zone relativement étendue et des valeurs dans la gamme de 1 à 10 cm sont obtenues aux abords immédiats du quai.

S'ils résultent uniquement de la tempête exceptionnelle prise en compte dans la simulation (i.e. 5 jours de vent de plus de 80 km/h), ces taux de sédimentation semblent très faibles par rapport à l'importance et à la rapidité de la sédimentation observée sur le site. Toutefois, si cette accumulation est plutôt attribuable à l'effet des courants de marée, une telle sédimentation observée en seulement quelques jours peut expliquer les conditions observées sur le site.

4.2.2 Courants de marée (sans vagues)

Afin de départager l'effet des courants de marée de celui exercé par les vagues de tempêtes, la simulation précédente a été reprise sans vent ou vague, i.e. avec la marée comme seule source de forçage des conditions hydrodynamiques.

La figure 11b illustre les changements morphologiques obtenus le long de la pointe de Beauport, au terme de cinq jours de simulation. Malgré la réduction des forces érosives qui résulte de l'absence des vagues, la nouvelle simulation montre une zone de sédimentation notable devant l'extrémité du quai no 53. En effet, la zone en sédimentation est maintenant plus étendue et les épaisseurs maximales (1 à 10 cm) sont toujours devant l'extrémité du quai 53, mais légèrement déplacées vers le large.

Ces simulations indiquent que sur une période de cinq jours, la marée seule conduit devant l'extrémité du quai no 53 à une sédimentation équivalente à celle qui résulte au terme d'une tempête d'intensité et de durée exceptionnelles. Il semble donc clair que la sédimentation relativement importante observée dans cette zone peut s'expliquer sur la simple base des courants de marée.

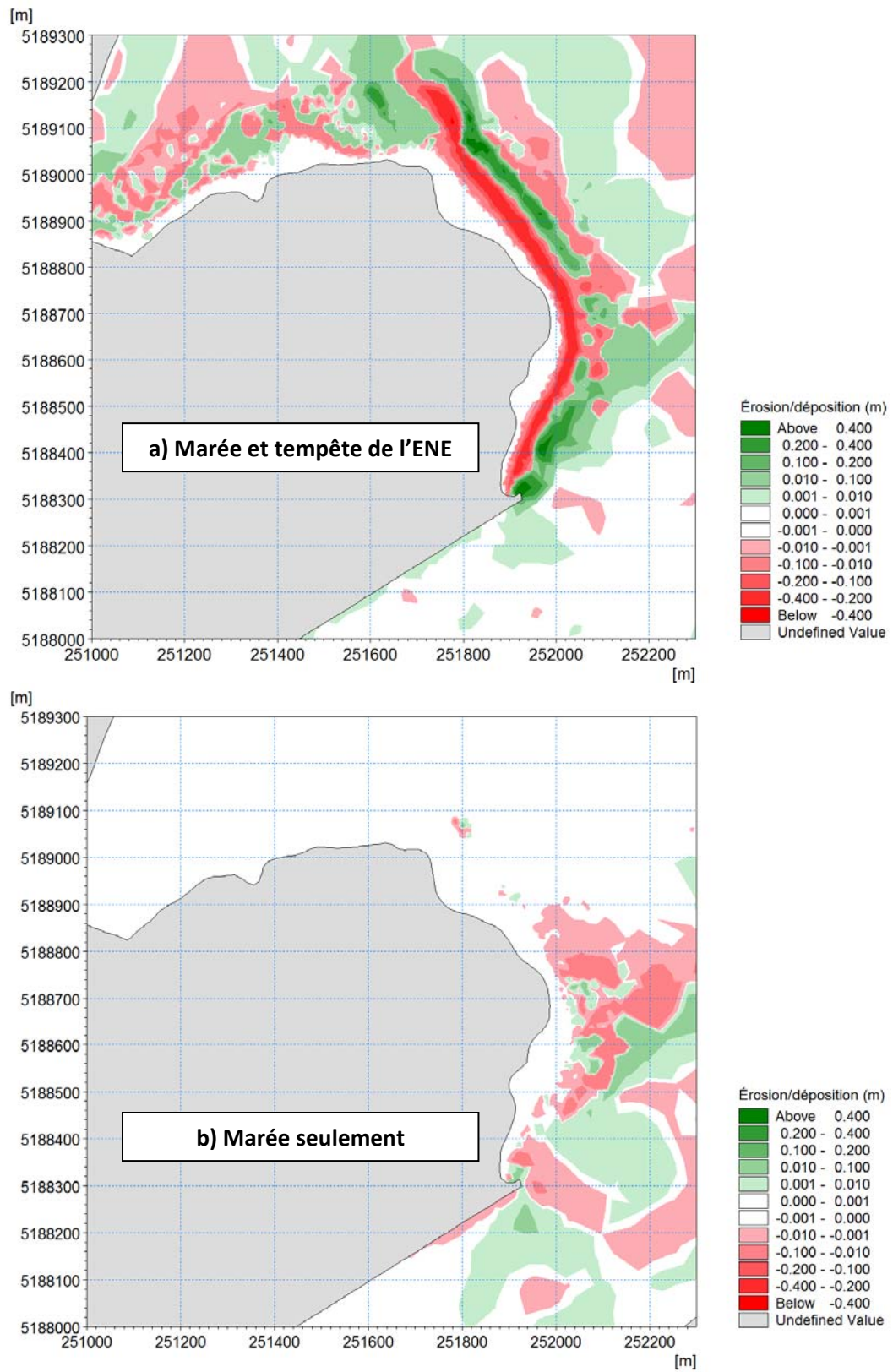


Figure 11 : Conditions actuelles – Changements morphologiques

Il importe également de souligner que la simulation avec marée seulement (figure 11b) prédit une étroite zone de faible érosion longeant le quai no 53, alors que la simulation avec marée et vagues de tempête (figure 11a) ne prédit que de la sédimentation.

Au-delà de ces différences entre les deux simulations, les résultats de modélisation numérique confirment que la zone draguée bordant l'extrémité du quai 53 est sujette à de la sédimentation provoquée par les conditions hydrodynamiques locales.

4.2.3 Bathymétrie et géométrie de la zone draguée

L'action des courants de marée et, dans une moindre mesure, celle des courants littoraux sur la sédimentation observée à l'extrémité du quai no 53 peuvent être mises en relation avec la bathymétrie locale de cette zone.

Les figures 12a et 12b illustrent les bathymétries relevées aux abords de la pointe de Beauport en 2009 et 2013 respectivement. On note d'abord que la morphologie des fonds a peu changé entre 2009 et 2013 (sauf le long de la plage, où l'échelle des figures ne permet pas de percevoir les changements survenus). On observe également une ligne de discontinuité très nette entre la batture de Beauport et le chenal plus profond du fleuve, avec un gradient marqué des profondeurs.

Comme l'indique la figure 12, l'extrémité du quai no 53 coïncide pratiquement avec cette pente raide entre la batture et les plus grandes profondeurs. Aux abords immédiats de l'extrémité du quai 53, ce gradient de profondeur est accentué par la présence de la plage. En effet, l'espace disponible pour passer de la cote des fonds dragués (-15 m) à l'élévation du terrain naturel (environ +6 à +7m au sommet de la plage) est clairement insuffisant pour obtenir une pente de dragage stable.

Dans ce contexte, la sédimentation observée aux abords du quai 53 peut d'abord s'expliquer par l'instabilité de la pente, les vitesses d'écoulement au sommet de la pente étant alors suffisante pour pousser les matériaux vers le bas de la pente. L'adoucissement de la pente se traduit alors par un empiètement du pied de cette pente dans la zone initialement draguée à -15 m.

D'autre part, lorsque les courants de marée ou les courants littoraux sont suffisamment forts pour transporter les sédiments de la batture ou de la plage vers le large, l'augmentation soudaine des profondeurs rencontrée aux abords du quai no 53 tend à favoriser la sédimentation dans la zone draguée.

Ces processus relativement simples sont illustrés schématiquement à la figure 13.

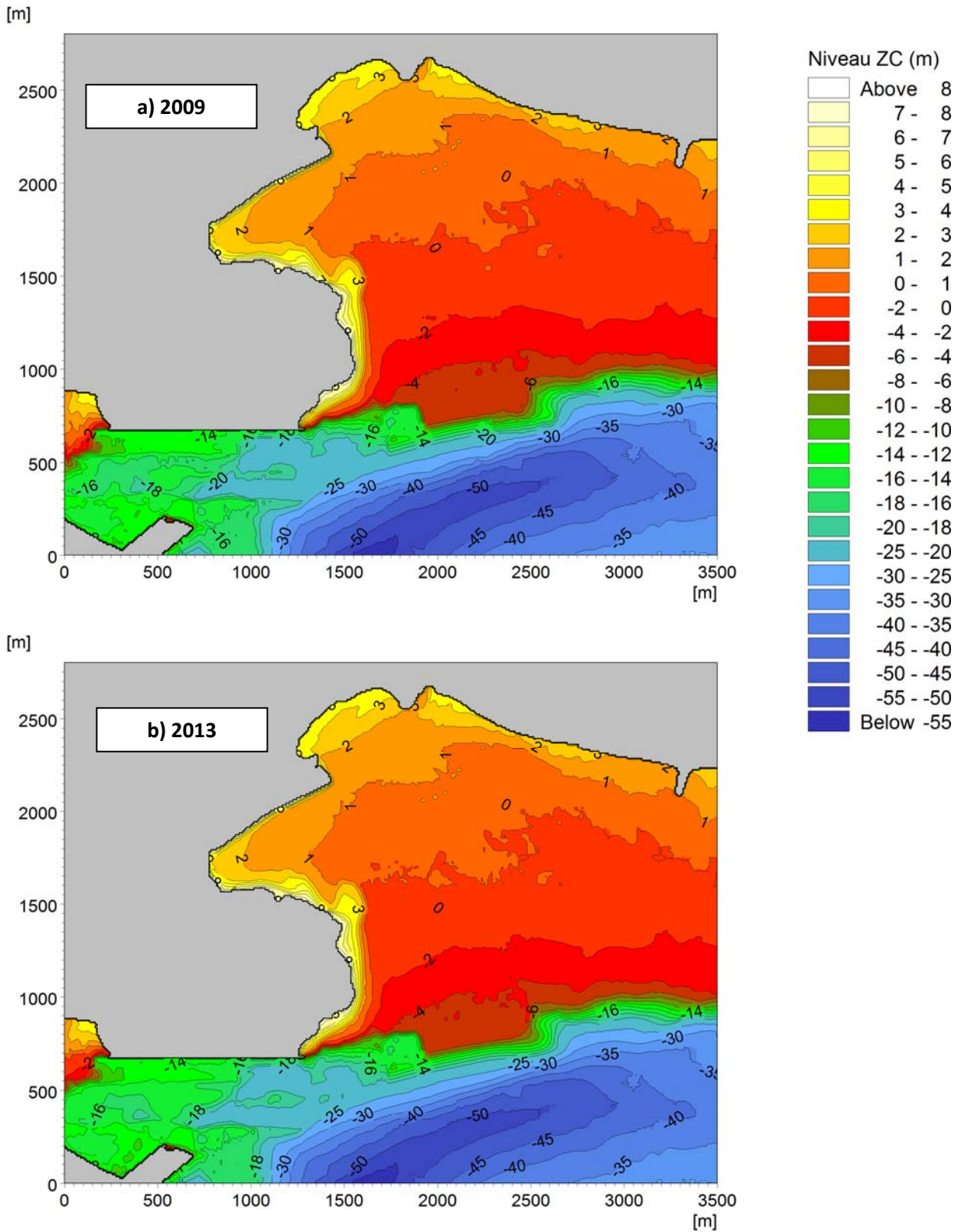


Figure 12 : Bathymétrie de la zone à l'étude

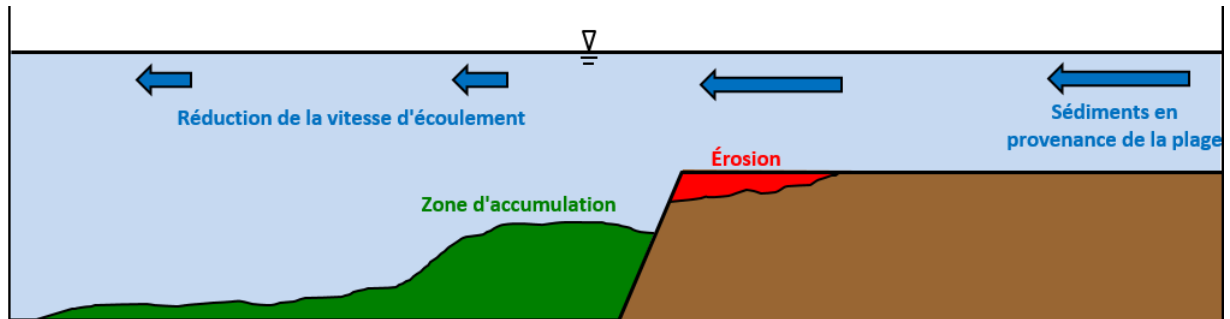


Figure 13 : Transport sédimentaire et adoucissement de la pente de dragage

4.3 Conditions futures

4.3.1 Nouvelle configuration des fonds

La figure 14 superpose l'emprise de la variante 2014-V1 à la bathymétrie actuelle du secteur. Comparativement aux conditions actuelles (figure 12), il est clair que les profondeurs naturelles aux abords de la nouvelle zone draguée (prévue à -16 m) sont plus fortes que celles actuellement observées aux abords immédiats de l'extrémité du quai no 53.

Ces nouvelles conditions sont rendues possibles par le déplacement vers le nord de la plage principale, dont les faibles profondeurs ne seront plus limitantes pour la mise en place de pentes de dragage stables. En conditions futures, la pente instable obtenue en conditions actuelles pourra donc être évitée, de même que la forte discontinuité des profondeurs qu'elle introduit.

Sur cette base, il est apparu fort probable, avant même de procéder aux simulations, que les problèmes d'ensablement récurrents observés en conditions naturelles aux abords du quai 53 ne se reproduiraient pas en présence des nouveaux aménagements.

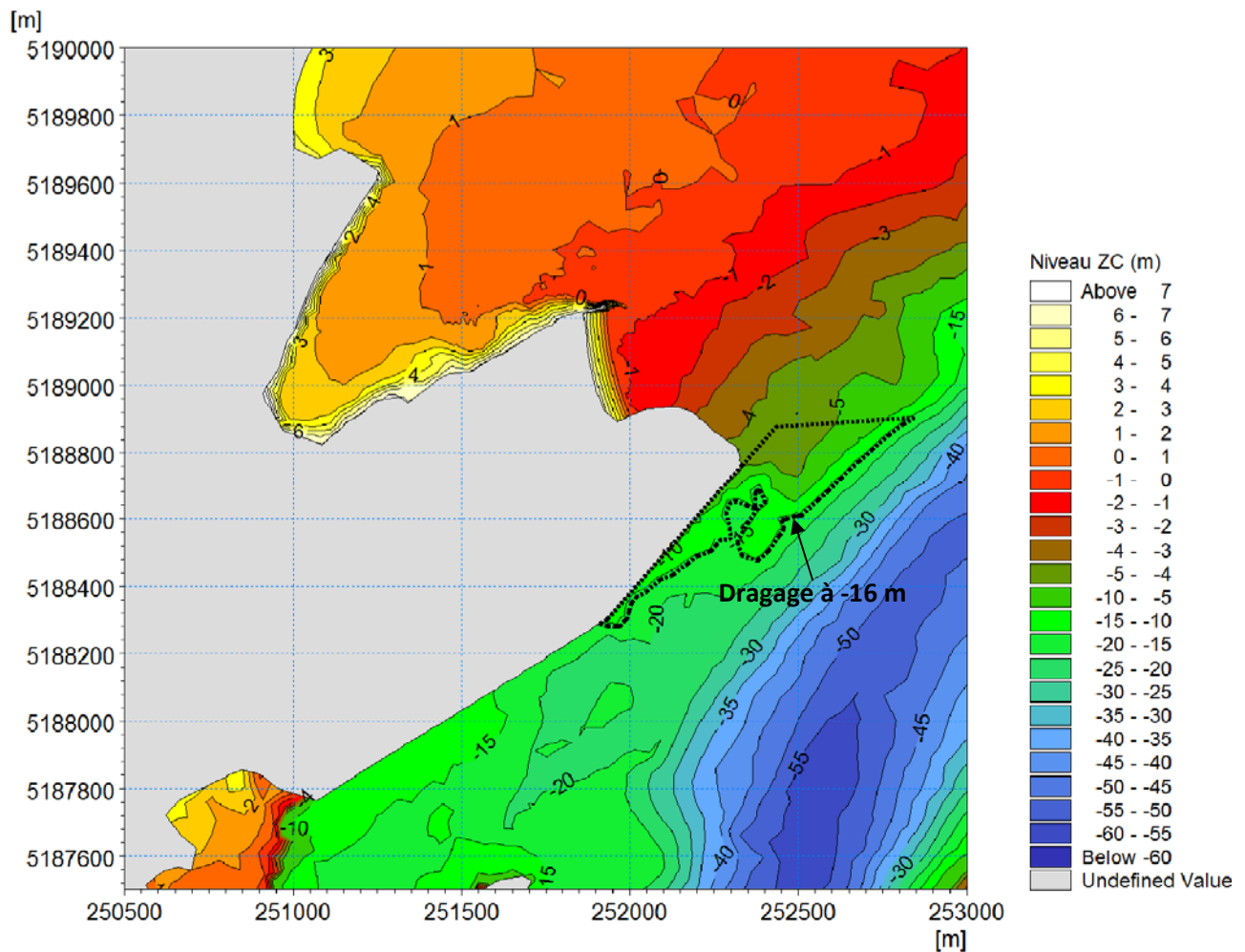


Figure 14 : Conditions futures – Bathymétrie et emprise du dragage

4.3.2 Résultats de simulation

Les figures 15a et 15b illustrent les patrons de sédimentation et d'érosion obtenus au terme de cinq jours de simulation, sous l'effet combiné de la marée et d'une très forte tempête de l'ENE (figure 14a) puis en présence des courants de marée seulement (figure 14b).

En conditions de tempête, la figure 15a montre qu'une portion importante de la nouvelle aire draguée est soumise à des conditions érosives, et ce même si l'érosion obtenue après 5 jours de tempête et de marée est très faible (de 1 mm à 1 cm d'érosion des fonds). Le long du nouveau quai, on observe une bande très étroite de sédimentation, demeurant toutefois d'épaisseur très limitée (1 mm à 1 cm d'accumulation).

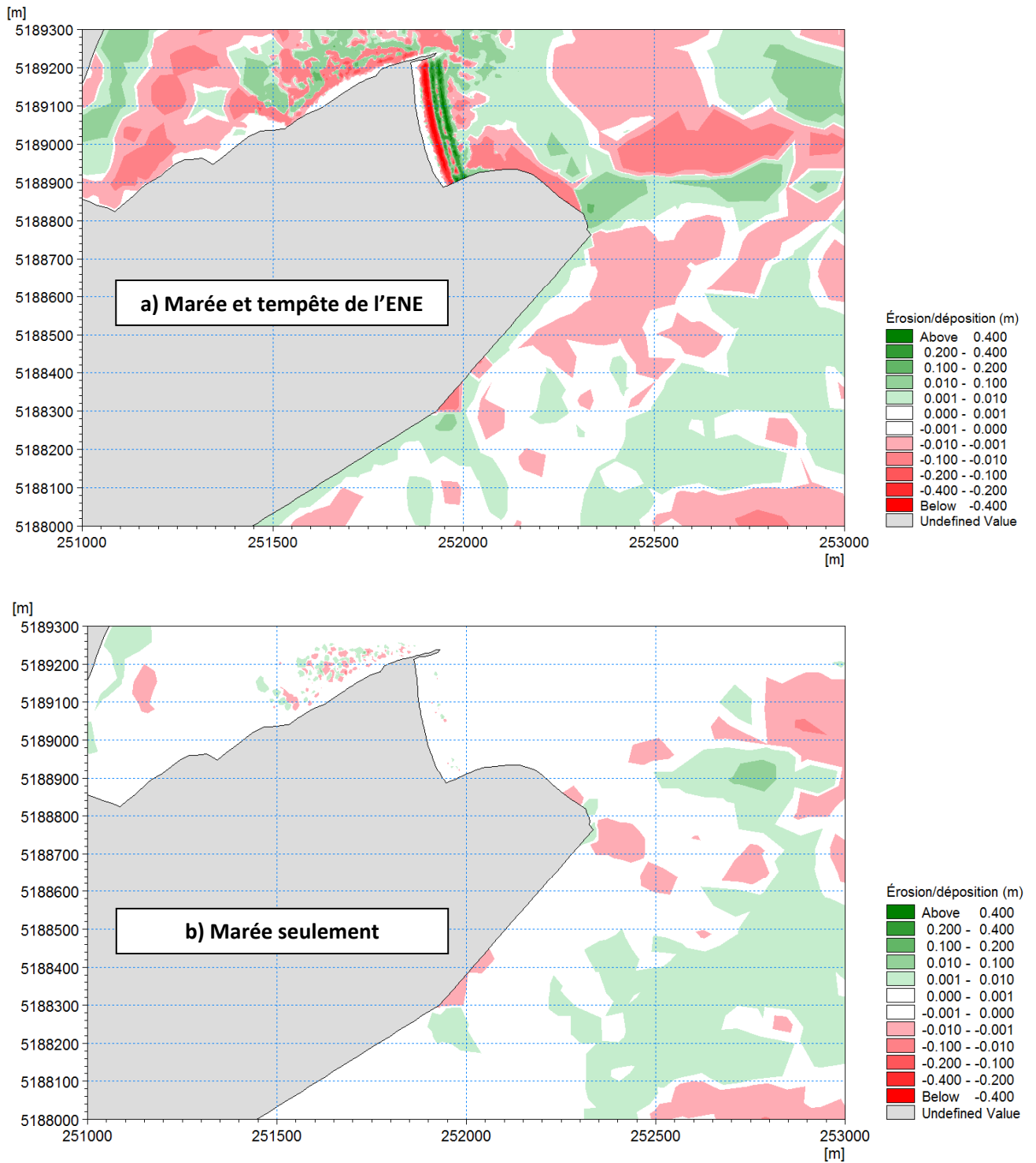


Figure 15 : Conditions futures – Changements morphologiques

La modélisation indique toutefois que ces zones limitées d'érosion et de sédimentation sont avant tout attribuables aux conditions de tempête. En effet, la reprise de la simulation avec la marée uniquement (figure 15b) ne montre que des zones très limitées d'érosion/déposition. Une tendance à l'érosion demeure visible aux deux extrémités du quai no 54. Des zones très limitées de déposition sont visibles derrière la ligne de quai et aux abords immédiats de l'extrémité. Un examen plus détaillé des résultats confirme que ces zones sont situées près du sommet et de la base de la pente d'excavation de 1V :5H de la zone draguée. Un adoucissement local de cette pente, à 1V :7H ou à 1V :10H permettrait fort probablement d'éviter ces accumulations.

En vue de mieux comprendre les différences observées entre les changements morphologiques se produisant en conditions actuelles et projetées, la figure 16 compare les vitesses maximales obtenues pendant un cycle complet de marée de vive-eau pour ces deux conditions. En conditions actuelles (figure 16a), les courants maximums le long des quais 50 à 53 varient de 0,1 à 0,7, avec des valeurs de 0,55 à 0,7 m/s devant le quai 53 (figure 16a). En conditions futures, les vitesses maximales aux abords du quai 54 seront plutôt de 0,7 à 0,9 m/s (figure 16b). Par surcroît, dans la zone draguée près de l'extrémité du quai 53, les vitesses maximales ne dépassent pratiquement pas 0,7 m/s alors qu'elles atteindront 1 m/s en conditions futures.

Sur la base de ces résultats, il est donc très peu probable que la sédimentation récurrente actuellement obtenue en bout de quai se répète en conditions futures. En fait, les zones draguées pourraient même, en conditions futures, être l'objet de conditions légèrement érosives.

Tel que mentionné précédemment, des dépôts très localisés pourraient survenir à l'intersection de l'extension portuaire et de la pente de dragage mais, contrairement aux conditions actuelles, cette pente pourrait alors être adoucie en vue de minimiser la discontinuité dans la morphologie des fonds et dans les conditions d'écoulement.

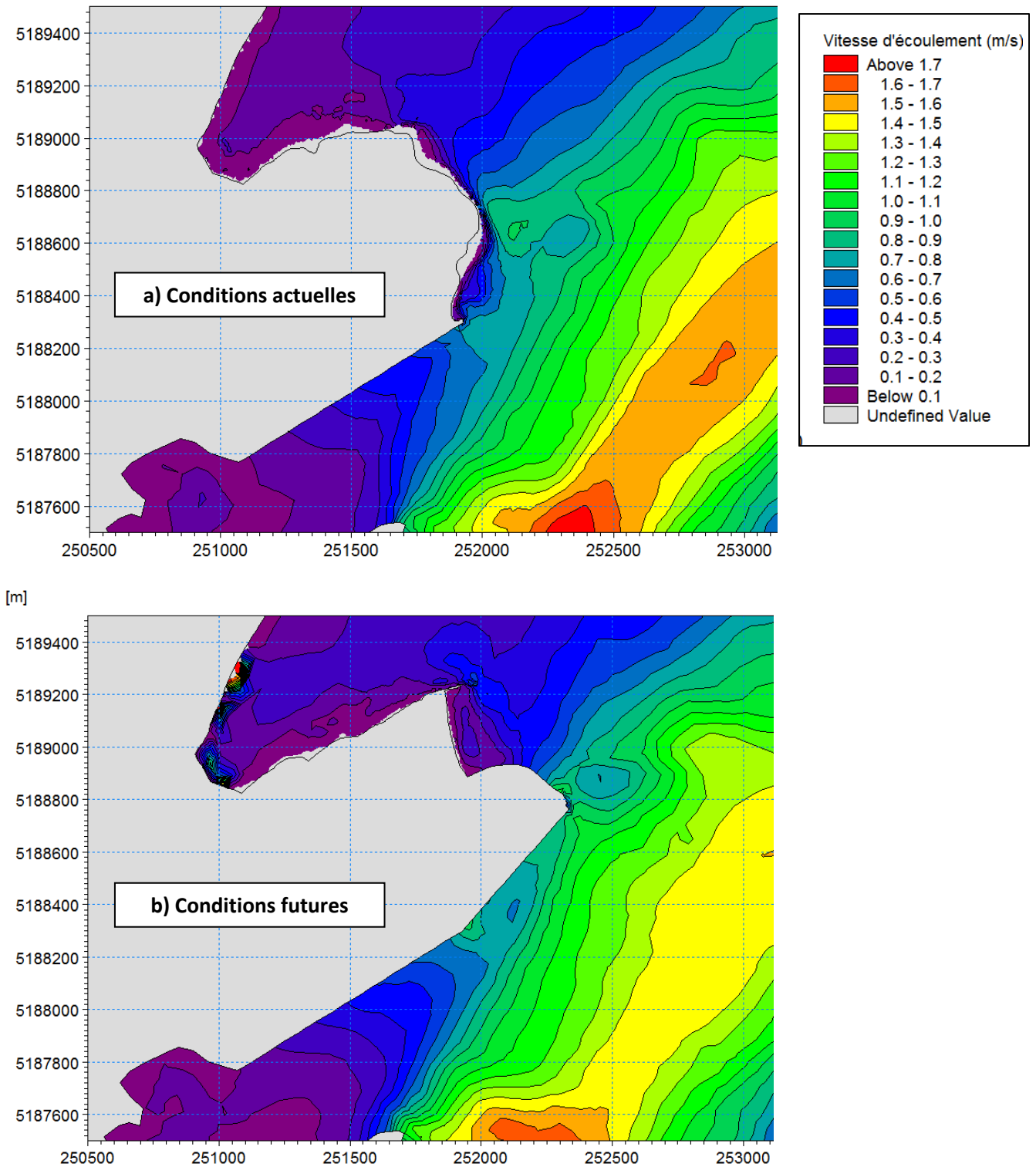


Figure 16 : Vitesses d'écoulement maximales en vive-eau

5.0 AUTRES FACTEURS POTENTIELS DE SÉDIMENTATION

5.1 Charge sédimentaire du Saint-Laurent et rivière Saint-Charles

Mis à part le secteur de la plage et les zones de dragage bordant les quais, les bathymétries prises dans le secteur Beauport à quatre ans d'intervalle, de 2009 à 2013, montrent très peu de changement dans la morphologie générale des fonds.

Il apparaît donc clairement que les problématiques de sédimentation observées aux abords du quai 53 (tout comme les conditions érosives rencontrées le long de la plage actuelle) résultent avant tout de conditions locales plutôt que du régime hydrosédimentaire global du Saint-Laurent ou de la rivière Saint-Charles.

En effet, il est très peu probable que les apports sédimentaires charriés par le débit fluvial du Saint-Laurent puissent exercer un impact tangible sur la sédimentation des zones draguées dans le secteur Beauport. D'une part, ce secteur se situe en retrait de la veine principale d'écoulement des courants de marée, qui se concentre dans le chenal central du fleuve. La profondeur de ce chenal principal atteignant 50 à 60 m au droit du secteur Beauport, il est difficile d'imaginer que les sédiments plus grossiers (gravillons et sables) charriés sur les fonds puissent être transportés jusqu'aux abords des quais. D'autre part la dispersion des matériaux plus fins (limons et argiles) transportés en suspension par le fleuve pourrait à la rigueur présenter des risques de sédimentation mais l'agitation due aux vagues, aux courants de marée et à la propulsion des navires est trop importante pour permettre la sédimentation fine. D'ailleurs, les dragages d'entretien effectués dans le secteur Beauport ne révèlent pas la présence de quantités importantes de sédiments fins.

Pour ce qui est des apports sédimentaires potentiels issus de la rivière Saint-Charles, ils sont à toutes fins pratiques inexistant, à cause de l'effet d'entrave au transport des sédiments exercé par la présence du barrage de contrôle Joseph-Samson, qui est situé à l'entrée de l'estuaire de la Saint-Charles. Ce barrage est équipé de vannes-clapets visant à prévenir les inondations dans le cours inférieur de la rivière lors des grandes marées. L'aménagement remplit bien cette fonction mais il coupe en retour tout apport sédimentaire de la rivière Saint-Charles vers le fleuve et a par conséquent contribué à l'ensablement de la rivière, dans le bief amont du barrage.

Dans le mode d'opération actuel, aucun apport sédimentaire ne peut donc transiter vers l'estuaire de la Saint-Charles et ainsi contribuer à la sédimentation des quais avoisinants (ou du terminal de vrac liquide projeté par l'APQ).

Il faut toutefois souligner que des études ont été réalisées récemment en vue d'établir l'effet d'une ouverture plus fréquente de la vanne de fond du barrage Samson, avec l'objectif de réduire la sédimentation et de favoriser le renouvellement de l'eau dans le cours inférieur de la rivière (voir par exemple la référence [8]).

Il est clair que l'opération périodique de cette vanne de fond pourrait provoquer de l'ensablement dans l'estuaire de la Saint-Charles. L'APQ devra donc suivre de près tout changement majeur du mode d'exploitation du barrage qui pourrait éventuellement être mis en œuvre dans le futur par la Ministère de l'environnement du Québec (Centre d'expertise hydrique).

Soulignons finalement que même en crue, la rivière Saint-Charles ne conduit pas dans son estuaire à des vitesses plus élevées que celles générées par les courants de marée maximums. Cette question avait été analysée à l'aide du modèle numérique lors de notre étude de 2007 [2], qui avait également montré que la présence des ducs d'Albe n'exerçait pas d'impact tangible sur les vitesses d'écoulement et les niveaux d'eau dans l'estuaire.

5.2 Jets d'hélice des navires

À la lumière des résultats déjà obtenus, il est clair que la problématique de sédimentation récurrente observée devant l'extrémité du quai 53 est avant tout liée aux conditions locales d'écoulement et, surtout, à la morphologie des fonds à cet endroit.

L'influence potentielle des jets d'hélice doit donc être exclue à cet égard, un avis également émis par le Maître de Port, M. Michel Petit, lors de l'appel-conférence du 27 novembre 2014.

6.0 MESURES CORRECTIVES

Comme on l'a mentionné précédemment, la configuration de l'extension portuaire et de l'aire draguée devant le nouveau quai ne devrait pas reproduire en conditions futures la sédimentation actuellement observée à l'extrémité des quais existants.

Si dans l'attente des nouveaux aménagements, l'APQ désirait solutionner cette problématique de sédimentation pour les aménagements actuels, deux pistes de solution pourraient être envisagées :

- i. *Mise en place d'un épi déflecteur* : Cette approche viserait à interrompre ou dévier le transport de sable le long de la forte pente d'excavation située à l'extrémité du quai no 53, à l'aide d'une structure en enrochement émergente ou submergée. Deux problèmes importants s'opposent toutefois à cette solution. D'une part les courants de marée pouvant charrier des sables vers la zone draguée ne sont pas limités aux abords immédiats de l'extrémité du quai 53 (figure 17). L'ouvrage requis devrait donc avoir une emprise relativement importante. En second lieu, l'augmentation très marquée des profondeurs vers le large pourrait entraîner une augmentation excessive de l'emprise des talus de l'épi déflecteur. Dans les deux cas, l'épi ayant une dimension suffisante pour être efficace constituerait fort probablement une entrave à la navigation.
- ii. *Adoucissement de la pente de dragage* : Cette option consisterait à adoucir la pente du dragage à l'extrémité du quai no 53 à une valeur usuelle de 1V :5H assurant une meilleure stabilité. La figure 18 indique l'emprise de l'excavation qui serait ainsi requise. Comme on l'a mentionné précédemment, une telle excavation n'est pas compatible avec la morphologie de la plage et des ouvrages de soutènement seraient requis le long du haut de plage actuel, pour accommoder l'écart de niveau entre la pente de dragage et le terrain naturel. Cette approche introduirait également des questions vis-à-vis de l'effet des vagues de tempête le long de ces ouvrages de soutènement.

En résumé, il n'est pas évident de proposer des ouvrages simples permettant d'assurer une solution efficace à la problématique d'ensablement observé dans les conditions actuelles à l'extrémité du quai no 53. Dans le contexte du projet d'extension du secteur portuaire, il apparaît plus logique de faire appel aux dragages d'entretien plutôt qu'à la mise en place d'ouvrages visant à contrôler cette sédimentation.

Il va de soi que tout effort visant à adoucir la pente de dragage, en limitant l'empiètement vers la plage, sera le bienvenu lors de ces dragages d'entretien.

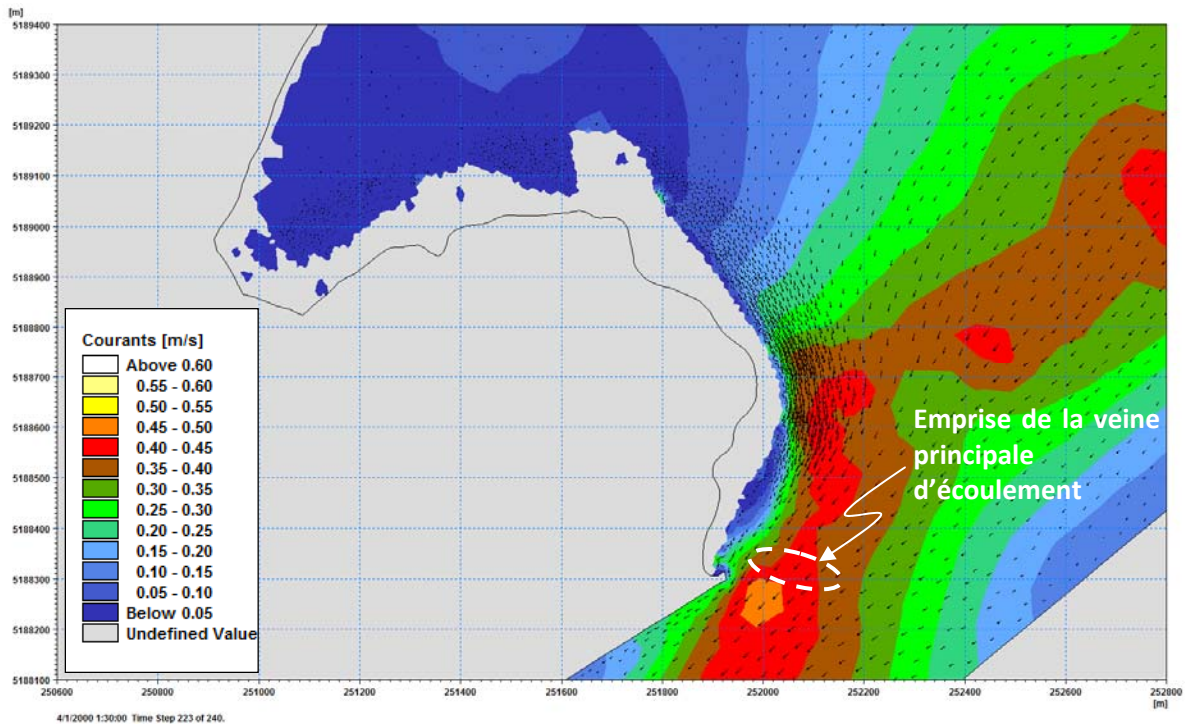


Figure 17 : Courants de marée pouvant causer de la sédimentation aux abords du quai 53

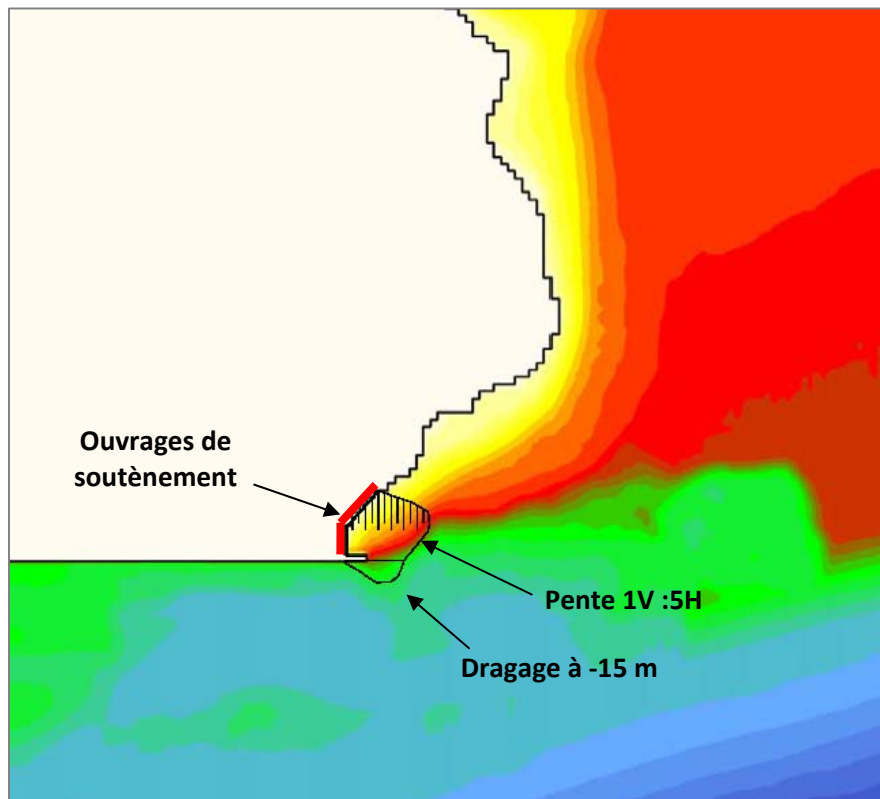


Figure 18 : Conditions actuelles - Adoucissement de la pente de dragage

7.0 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Lasalle|NHC a été mandaté par l'Administration portuaire de Québec (APQ) en vue d'analyser la stabilité des zones draguées aux abords des quais du secteur Beauport, pour les conditions d'aménagement actuelles et projetées. De façon plus précise, l'APQ visait à éviter dans les conditions futures la sédimentation récurrente observée aux bouts du quai no 53 dans les conditions actuelles.

L'influence des conditions hydrosédimentologiques sur la stabilité des zones draguées a été analysée à l'aide du modèle numérique développé par Lasalle|NHC pour ses études antérieures de l'extension du secteur Beauport.

L'analyse a mené à des conclusions pouvant se résumer comme suit :

- En conditions actuelles, l'ensablement obtenu au bout du quai 53 est lié aux conditions hydrodynamiques locales ainsi qu'à la pente trop raide entre la zone draguée à -15 m et le terrain naturel de la plage et la batture;
- Les courants littoraux générés le long de la plage par les tempêtes du secteur général ENE contribuent à cet ensablement mais les simulations indiquent que le phénomène se produit tout aussi clairement sous la simple action des courants de marée, ce qui explique la rapidité avec laquelle la sédimentation est observée;
- L'espace disponible entre l'aire draguée et la plage n'est pas suffisant pour obtenir une pente stable et une portion importante de la sédimentation résulte simplement de l'instabilité de cette pente. Par ailleurs, l'augmentation soudaine des profondeurs ressentie par les courants de marée ou les courants littoraux passant de la batture vers le large réduit fortement la capacité de transport solide de l'écoulement et les sédiments transportés par ces courants tendent à se déposer dans la zone draguée;
- En conditions d'aménagement futures, l'aire draguée devant les nouveaux quais se trouve en eau plus profonde et la plage est éloignée de cette zone draguée. Le problème lié à une transition trop courte entre la zone draguée et les fonds naturels est donc éliminé;
- Par surcroît, la nouvelle zone draguée devant le futur quai 54 est soumise à des vitesses maximales nettement supérieures à celles observées le long du quai 53; les risques de sédimentation récurrente sont ainsi grandement réduits. En fait, en fonction de la

granulométrie exacte des fonds, l'aire draguée aux abords du quai no 54 pourrait même être soumise à des conditions érosives;

Dans les conditions d'aménagement projetées, aucun ouvrage n'est à prévoir pour éviter la sédimentation dans les zones draguées. La seule intervention requise pourrait viser à éviter la sédimentation très localisée prédite à l'intersection de l'extension portuaire et de la pente de dragage, ce qui pourrait être obtenu en adoucissant légèrement cette pente.

Une telle option est difficilement envisageable dans les conditions actuelles, à cause de la grande proximité entre la zone draguée et le terrain beaucoup plus élevé constituant la plage. Si l'APQ désire solutionner la problématique de sédimentation récurrente observée en conditions actuelles, elle pourrait envisager la mise en place d'ouvrages de soutènement le long de la portion sud de la plage, permettant d'obtenir une pente d'excavation plus stable (1V :5H) jusqu'à l'aire draguée.

Dans le contexte du projet d'extension du secteur Beauport, il n'est toutefois pas recommandé de procéder à de telles interventions pour l'aménagement actuel, notamment à cause des questions qui seraient soulevées vis-à-vis de l'interaction des vagues de tempêtes avec cette nouvelle configuration entre la plage et la zone draguée devant le quai 53.

RÉFÉRENCES

- [1] VILLENEUVE, M. ET HOSSAINI N. (2006). *Port de Québec – Legs fédéral de 2008 – Site de la baie de Beauport – Impacts de l’extension du secteur portuaire de Beauport sur les conditions hydrosédimentologiques locales*. Rapport du Groupe-Conseil LaSalle no 1605 préparé pour l’Administration portuaire de Québec, avril 2006.
- [2] VILLENEUVE, M. (2007). *Port de Québec – Nouvelles infrastructures portuaires Beauport 2007(J-4161) – Modélisation numérique des conditions hydrauliques*. Rapport du Groupe-Conseil LaSalle no 1657 préparé pour l’Administration portuaire de Québec, août 2007.
- [3] DENAULT, C. ET VILLENEUVE M. (2010). *Port de Québec – Extension du secteur Beauport – Étude des conditions hydrosédimentologiques – Rapport du Groupe-Conseil LaSalle no 1744 préparé pour l’Administration portuaire de Québec, avril 2010.*
- [4] DENAULT, C., GALLANT, N. ET VILLENEUVE M. (2014). *Port de Québec – Extension du secteur Beauport – Mise au point de la variante finale des plages – Modélisation des conditions hydrosédimentologiques – Rapport Lasalle|NHC no 1873 préparé pour l’Administration portuaire de Québec, décembre 2014.*
- [5] FREDSE, J (1984). *Turbulent boundary layers in wave current motion*. J. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 110, no NY10, pp. 1103-1120.
- [6] BATTJES J.A. ET JANSSEN J.P.F.M. (1979). *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Proceedings 16th Coastal Engineering Conference, 1978, Hamburg, ASCE, New York, N.Y., pp. 567-587.
- [7] HOLTHUIJSEN L. H., BOOIJ, N. ET HERBERS, T.H.C. (1989). *A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents*. Coastal Engineering, 13, pp. 23-54.
- [8] ROY-GOSSELIN, P.H. (2012), *Gestion des débits au barrage Samson*, Mémoire de Maîtrise, Département de Génie Civil, Université Laval.