

**PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
NOUVELLES VARIANTES D'AMÉNAGEMENT DES PLAGES**

RAPPORT TECHNIQUE

R.0057

Préparé pour:

Administration portuaire de Québec

Préparé par:

Lasalle | NHC & Consultants Ropars, Inc.

10 février 2016

No de référence Lasalle | NHC 008001443

Préparé par:

<Originale signée par>



Consultants CRI

34863

<Originale signée par>



Nicolas Gallant, ing. Jr., M. ing. OIQ 5047189
Ingénieur junior, Lasalle|NHC

<Originale signée par>

Marc Villeneuve, ing., M. ing. OIQ 46139
Président, Lasalle|NHC

CLAUSE DE LIMITATION DE RESPONSABILITÉ.

Ce document a été préparé par Lasalle|NHC et Consultants Ropars Inc de façon conforme aux bonnes pratiques d'ingénierie et est destiné à l'usage exclusif de l'Administration portuaire de Québec. Le contenu de ce document ne peut être appliqué ou utilisé, en tout ou en partie, par ou à l'avantage d'autres parties sans l'autorisation écrite de Lasalle|NHC. Aucune autre garantie, expresse ou tacite, n'est accordée.

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

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Mise en contexte	1
1.2	Objectifs de la présente étude	2
2	DOCUMENTATION.....	3
2.1	Relevés bathymétriques	3
2.2	Plans des infrastructures	3
2.3	Données sur les tempêtes	4
2.4	Géométrie de plage et évolution temporelle des profils	4
2.5	Paramètres fournis par l'APQ.....	4
3	GÉOMÉTRIES DE PLAGE ÉVALUÉES	5
3.1	Option V15-01	5
3.2	Option V15-02	6
3.3	Option V15-03	7
3.4	Option V15-04	8
3.5	Option V15-05	9
3.6	Option V15-06	10
4	MODÉLISATION NUMÉRIQUE.....	11
4.1	Outils de modélisation.....	11
4.1.1	Module hydrodynamique - MIKE 21 FM	11
4.1.2	Module de vagues - MIKE 21 SW.....	11
4.1.3	Module de transport sédimentaire - MIKE 21 ST	11
4.2	Zone modélisée	12
4.3	Numérisation de la bathymétrie	12
4.4	Conditions aux limites	17
4.5	Paramètres de calculs.....	17
4.5.1	Paramètres hydrodynamiques	17
4.5.2	Paramètres de vagues	17
4.5.3	Paramètres de transport sédimentaire	18
5	ÉTUDE HYDROSÉDIMENTOLOGIQUE.....	19
5.1	Option V15-05	19
5.2	Option V15-06	19
6	RENTANT SUD-OUEST	24
6.1	Situation actuelle	24
6.2	Zone protégée par le brise-lames.....	24
6.3	Effet du brise-lames sur le rentrant sud-ouest.....	26
6.3.1	Sédiments	26
6.3.2	Végétation de marais	26

TABLE DES MATIÈRES (suite)

7	COURANTS DANS LA BAIE	27
7.1	Courants de marée	27
7.2	Courants dus aux vagues	27
7.3	Sécurité des usagers de la plage de baignade	28
7.4	Qualité de l'eau.....	28
8	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	33
8.1	Conclusion	33
8.2	Recommandations.....	33

Annexe A – Géométrie de la plage recommandée

Annexe B - Prévion de hausse des niveaux d'eau en fonction des changements climatiques

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Extension portuaire – Zone récréotouristique – Volume 400 000 m ³	2
Figure 2.1 : Zone couverte par les relevés bathymétriques de 2013	3
Figure 3.1 : Option V15-01	5
Figure 3.2 : Option V15-02	6
Figure 3.3 : Option V15-03	7
Figure 3.4 : Option V15-04	8
Figure 3.5 : Option V15-05	9
Figure 3.6 : Option V15-06	10
Figure 4.1: Données utilisées dans le montage de la bathymétrie numérique	14
Figure 4.2: Bathymétrie numérique	15
Figure 4.3: Maillage de la bathymétrie numérique	16
Figure 5.1 : Résultats de l'évaluation hydrosédimentologique de l'option V15-05	20
Figure 5.2 : Évolution des profils de la plage de l'option V15-05	21
Figure 5.3: Résultats de l'évaluation hydrosédimentologique de l'option V15-06	22
Figure 5.4: Évolution des profils de la plage de l'option V15-06	23
Figure 6.1: Mouvements du sable sur la plage actuelle	24
Figure 6.2 : Rentrant sud-ouest et brise-lames proposé (V15-06) – Rose des vents	25
Figure 6.3 : Rentrant sud-ouest et brise-lames proposé (V15-06) – Rose des vagues	26
Figure 7.1 : Courants maximums de flot en marée de vive-eau (marnage 4,53 m)	29
Figure 7.2 : Courants maximums de jusant en marée de vive-eau (marnage 4,53 m)	30
Figure 7.3: Courants littoraux induits par les vagues de tempêtes – Conditions actuelles	31
Figure 7.4: Courants littoraux induits par les vagues de tempêtes – Conditions futures (option V15-06)	32

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

L'Administration portuaire de Québec (APQ) poursuit actuellement son projet d'extension du secteur Beauport, avec la mise en place de deux nouveaux quais (54 et 55). Au-delà des enjeux touchant directement les besoins et objectifs du port de Québec, ce projet comprend un volet récréotouristique avec la consolidation de la plage.

Au cours des dernières années, Lasalle | NHC a été étroitement lié aux études d'optimisation de la nouvelle extension, pour tout ce qui touche les conditions hydrauliques et sédimentologiques qui seront observées aux abords de l'aménagement projeté.

En décembre 2014, Lasalle | NHC a remis à l'APQ un rapport d'étude comportant l'analyse d'une variante correspondant à un volume de remblai maximal de 400 000 m³ pour la zone récréotouristique¹.

La figure 1 illustre l'aménagement initialement proposé par l'APQ pour respecter ce volume, de même que les variantes examinées lors de notre étude en vue de minimiser les risques d'érosion de la plage.

Ayant progressé dans le processus d'évaluation environnementale de l'extension portuaire, l'APQ désire aujourd'hui réduire le volume de remblai et, par conséquent, l'empiétement dans le milieu hydrique correspondant au secteur récréotouristique.

La présente étude porte sur la mise au point d'un nouvel aménagement limitant si possible à 100 000 m³ le volume de remblai de la zone récréotouristique.

Comme pour les dernières études de l'extension du secteur Beauport réalisées par Lasalle | NHC, la présente étude a été effectuée en étroite collaboration avec M. Yann Ropars, de la firme Consultants Ropars Inc. (CRI).

Le rapport comporte huit sections. La section 2 présente les données et paramètres ayant servi de base à la présente étude. Les nouvelles variantes d'aménagement considérées sont décrites à la section 3. La section 4 présente les outils et paramètres de modélisation utilisés pour la présente étude et la section 5 traite des résultats obtenus pour les deux variantes d'aménagement les plus prometteuses. Pour la variante retenue, les sections 6 et 7 décrivent respectivement les résultats obtenus dans le rentrant sud-ouest et la baie de Beauport en présence des aménagements projetés. Les conclusions et recommandations de l'étude sont présentées à la section 8.

1 DENAULT, C., M. VILLENEUVE ET N. GALLANT, « Port de Québec – Extension du secteur Beauport – Mise au point de la variante finale des plages - Modélisation des conditions hydrosédimentologiques », Rapport no 1873 (version préliminaire) réalisé pour le compte de l'Administration Portuaire de Québec, Décembre 2014

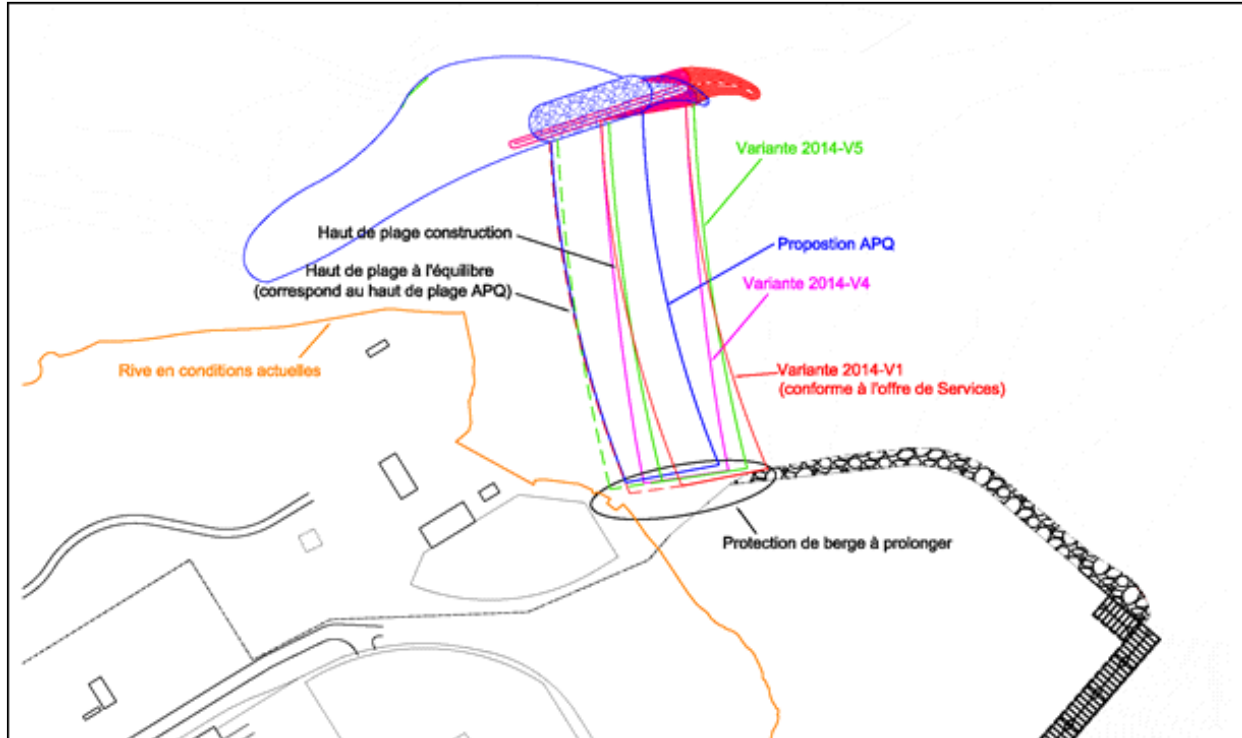


Figure 1.1 : Extension portuaire – Zone récréotouristique – Volume 400 000 m³
(Source : Figure 32, Rapport Lasalle | NHC no 1873)

1.2 Objectifs de la présente étude

Les objectifs de l'étude confiée par l'APQ à Lasalle | NHC sont de :

- Développer un concept de plage de baignade stable;
- Réduire les besoins de recharges récurrentes;
- Répondre le plus possible aux besoins de la clientèle qui fréquente actuellement le site;
- Éviter l'érosion des berges actuelles.

2 DOCUMENTATION

2.1 Relevés bathymétriques

Des relevés bathymétriques ont été effectués en septembre 2013 pour l'APQ. Ces relevés détaillés ont servi à préciser la topographie et les profondeurs d'eau près des infrastructures. L'étendue de ces relevés est reproduite sur la figure 2.1.

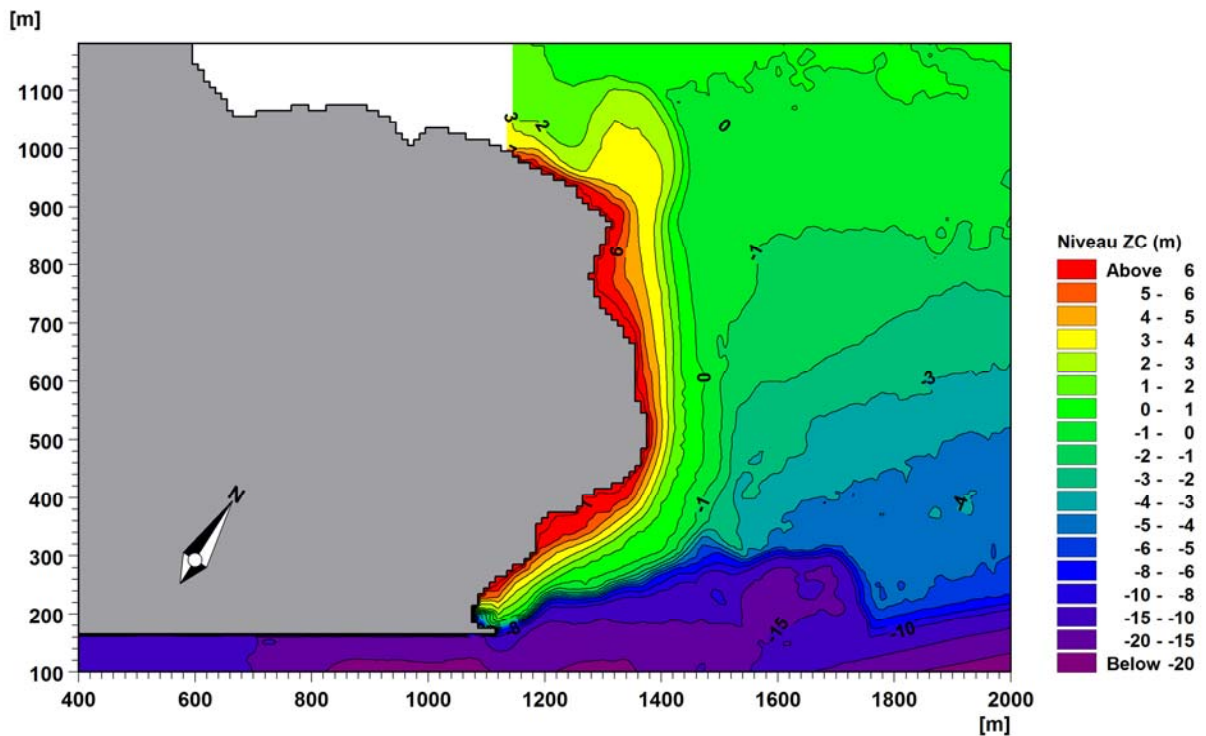


Figure 2.1 : Zone couverte par les relevés bathymétriques de 2013

2.2 Plans des infrastructures

Le plan des infrastructures projetées a été fourni par l'APQ. Il s'agit d'un plan produit par SNC-Lavalin² dans le cadre de leur mandat (extension portuaire).

² SNC-Lavalin, « Nouvelles infrastructures portuaires – Port de Québec, Secteur de Beauport – Projet No: J-4177 », No de dessin de SNC-Lavalin : 615534-6000-41D2-0001_02

2.3 Données sur les tempêtes

Les informations concernant les tempêtes sont décrites dans le dernier rapport de Lasalle|NHC³.

Deux séries synthétiques de tempêtes ont été développées sur la base des informations provenant d'une étude de vagues⁴ dans le secteur de la baie de Beauport.

Une série « courte » (vent uniforme en intensité et direction, niveau d'eau variable) a servi à tester les premières variantes de plage pour optimiser rapidement la géométrie de ces plages.

Une série « longue » (49 jours de tempêtes extraits de 12 années de données de vent), générée par la succession continue de tempêtes individuelles qui se sont produites dans la baie de Beauport et incluant la marée, a servi à valider les géométries développées dans la première phase des études.

2.4 Géométrie de plage et évolution temporelle des profils

L'étude de 2014 a permis de fixer les grandes lignes d'une plage de baignade stable dans le contexte hydrosédimentologique de la partie ouest de la baie de Beauport. Les deux éléments importants de ces grandes lignes sont l'orientation de la plage et le recul anticipé de la crête par rapport au profil de construction.

C'est sur la base de ces résultats que les premières ébauches de nouvelles configurations de plage ont été développées, avant de passer à l'étape de modélisation hydrosédimentologique.

2.5 Paramètres fournis par l'APQ

Les concepts de plage développés dans les étapes précédentes visaient à utiliser entre 400 000 et 650 000 m³ de sédiments dragués dans le cadre de la construction des nouveaux quais.

En plus des éléments apparaissant dans la sous-section 1.2, dans le cadre de cette nouvelle série de configurations de plage, deux éléments ont également orienté les choix dans la géométrie des plages, soit :

- Une quantité de sédiment réduite (de 100 000 à 250 000 m³) par rapport à l'étude de 2014;
- Le souci de préserver les herbiers du rentrant sud-ouest en évitant que le sable de la plage de kitesurf ne vienne « enterrer » ces herbiers, suite au déplacement anticipé de ces sables vers l'ouest sous l'effet des tempêtes dominantes du secteur est (protection du rentrant sud-ouest).

³ DENAULT, C., M. VILLENEUVE ET N. GALLANT, « *Port de Québec – Extension du secteur Beauport – Mise au point de la variante finale des plages - Modélisation des conditions hydrosédimentologiques* », Rapport no 1873 (version préliminaire) réalisé pour le compte de l'Administration Portuaire de Québec, Décembre 2014

⁴ ROPARS, Y., « *Port de Québec – Étude de configuration finale de la plage – Nouvelles infrastructures portuaires – Secteur de Beauport* », Rapport technique final, pour l'Administration portuaire de Québec, Février 2015

3.2 Option V15-02

L'option V15-02 (figure 3.2) diffère de l'option V15-01 par la courbure du brise-lames délimitant la partie nord de la plage de baignade. Cette courbure est destinée à améliorer la protection de la plage de kitesurf.

Une autre différence résultant du calcul des quantités de l'option précédente est que l'ensemble de la plage a été déplacée vers l'ouest pour limiter la quantité de sédiments requise dans la construction de la plage.

L'impact de ce recul est que la berge actuelle dans la partie sud de la zone récréotouristique devrait s'éroder, dans le cadre du processus de reprofilage de la plage de baignade, sous l'effet des vagues de tempête.

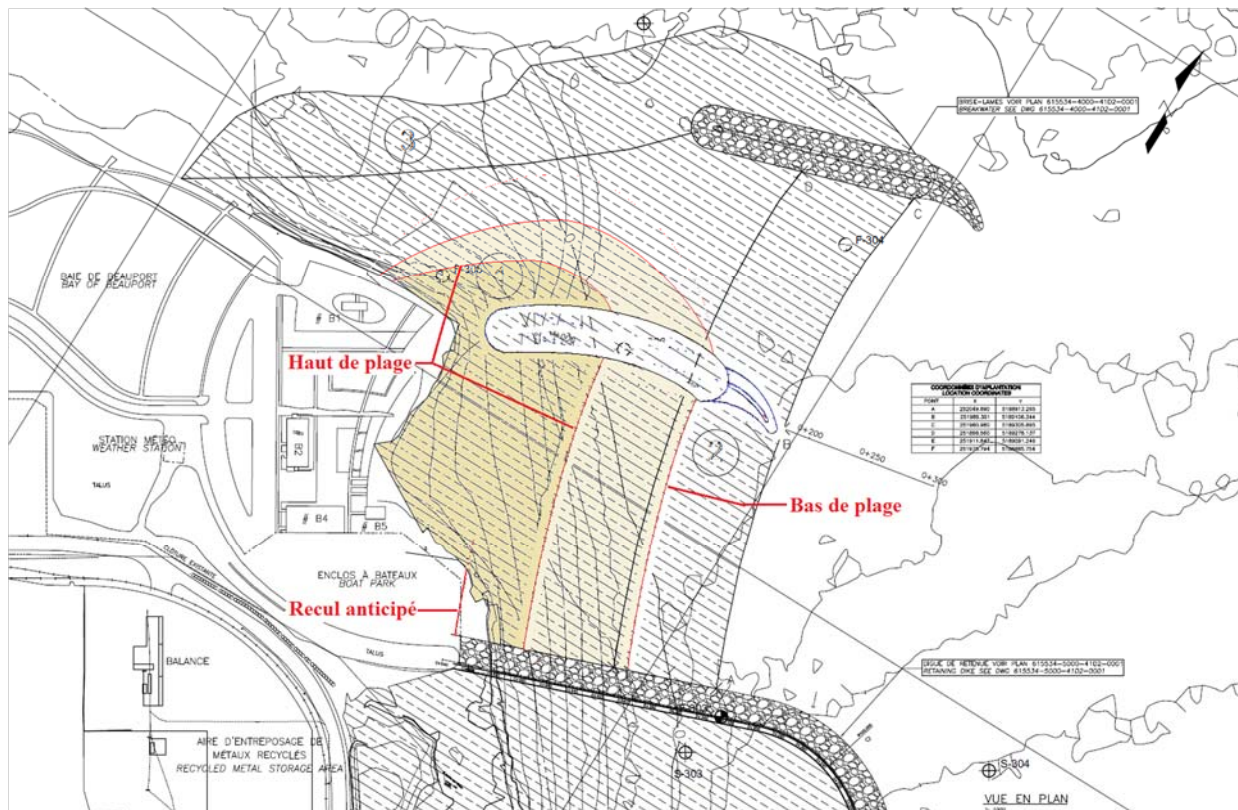


Figure 3.2 : Option V15-02

3.3 Option V15-03

L'option V15-03 a été définie dans le but de s'approcher du nouvel objectif de 100 000 m³ visé pour le projet de plage. Cette option, présentée sur la figure 3.3, requiert environ 120 000 m³ de sédiments.

Les deux impacts importants de ce choix sont :

- d'une part la diminution significative de la largeur de la zone récréotouristique par rapport à sa dimension actuelle et
- d'autre part l'érosion de la partie sud du rivage actuel, près de la digue de retenue des infrastructures portuaires.

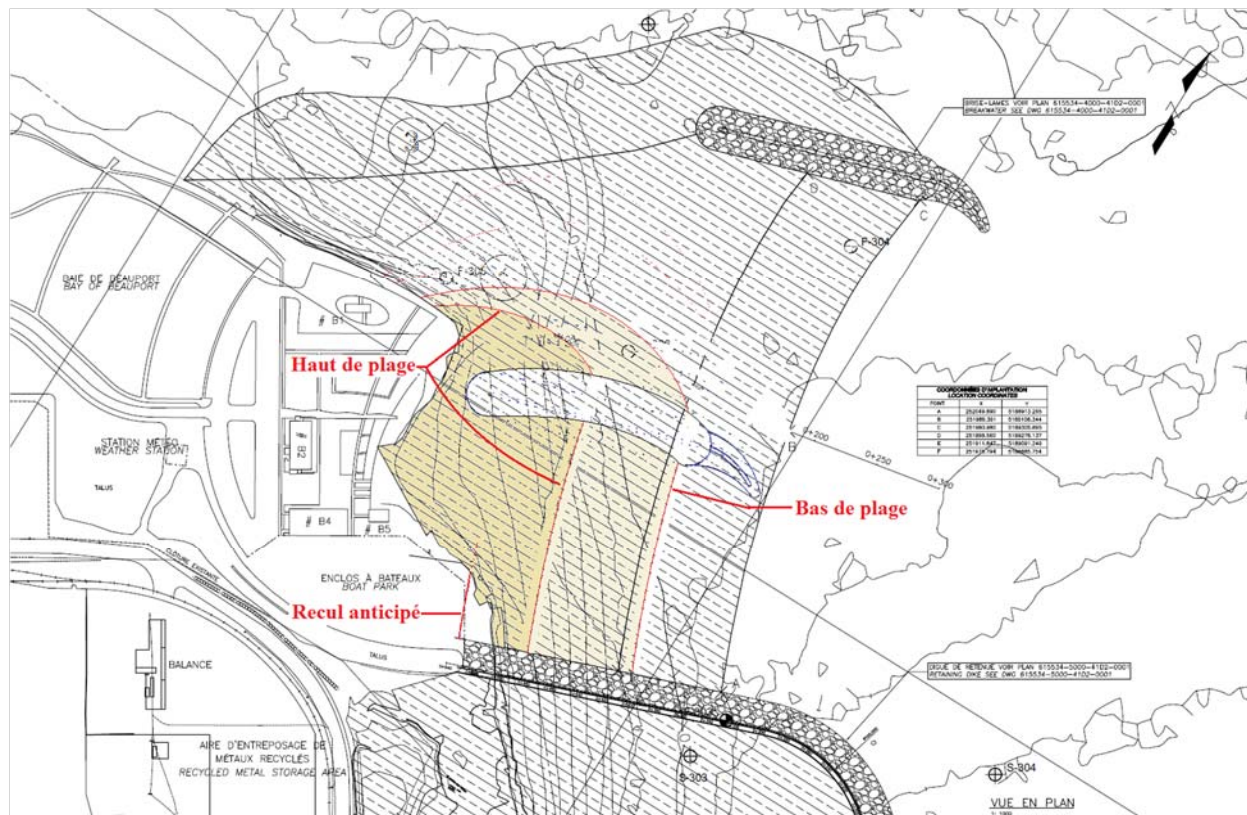


Figure 3.3 : Option V15-03

À la suite de la présentation de ces trois premières options, une discussion a eu lieu avec l'APQ pour définir l'orientation à donner aux prochaines configurations de plage, à la lumière des commentaires faits sur ces premières options.

Une nouvelle préoccupation a été soulevée par l'APQ. La construction de la plage de kitesurf des trois options précédentes devrait provoquer une migration des sables constituant cette plage vers les herbiers du rentrant sud-ouest, ce qui n'est pas recommandé pour la survie de ces herbiers. À la demande de l'APQ, la plage de kitesurf a donc été retirée du projet.

Il a également été décidé, dans un souci d'acceptabilité sociale, que la géométrie de la nouvelle plage ne devait pas donner l'impression d'une diminution de la largeur de la zone récréotouristique actuelle (voir option V15-03) et qu'il était préférable de ne pas provoquer l'érosion de la berge près de la zone d'entreposage des bateaux (options V15-02 et V15-03).

3.4 Option V15-04

L'option V15-04 a été développée pour répondre aux nouvelles orientations données au projet. Le brise-lames a été aligné avec la pointe nord de la zone récréotouristique actuelle. La position de la ligne de recul anticipé du haut de plage devrait provoquer un léger recul (érosion) de l'extrémité sud du rivage de la zone récréotouristique.

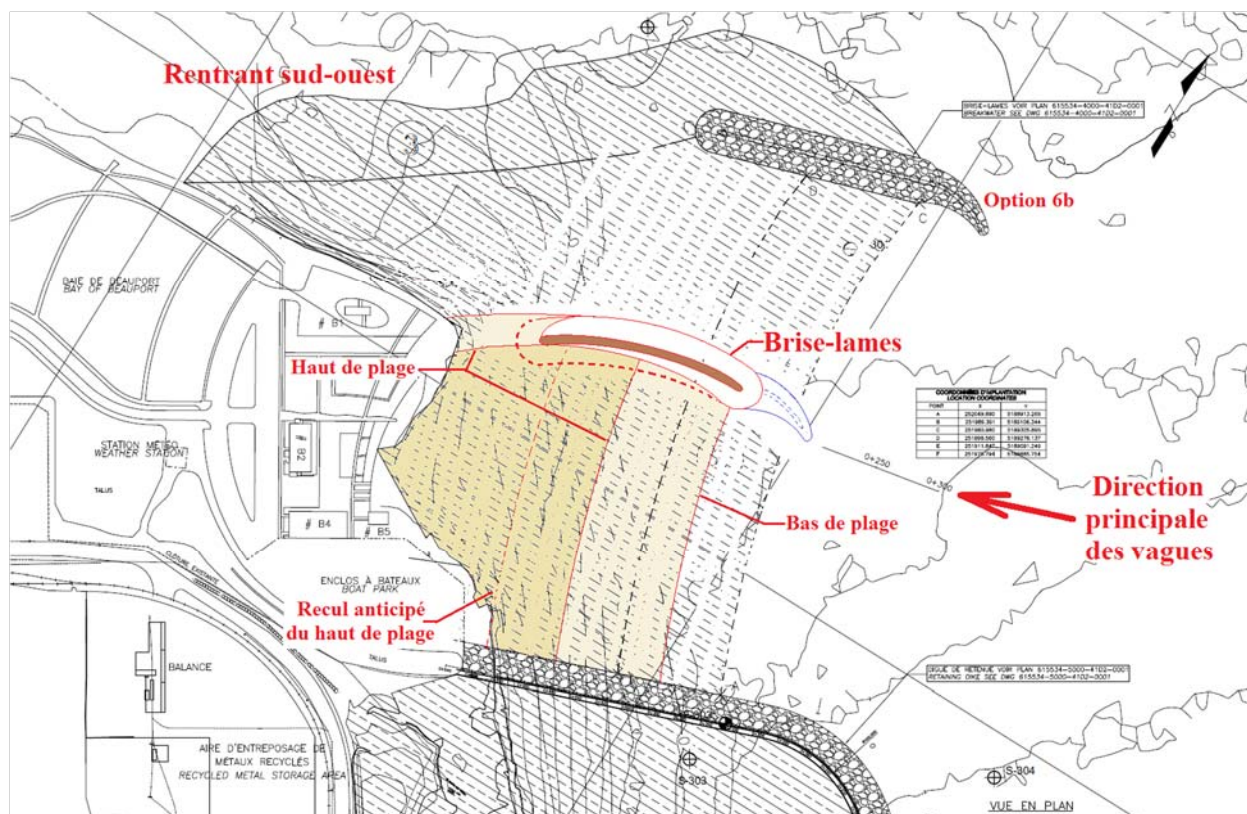


Figure 3.4 : Option V15-04

3.5 Option V15-05

L'option V15-05 présente, par rapport à l'option V15-04, un décalage d'une dizaine de mètres vers l'est de la racine du brise-lames et un pivotement de ce brise-lames dans le sens antihoraire. Cette option, présentée sur la figure 3.6, requiert environ 200 000 m³ de sédiments.

Le décalage vers l'est du brise-lames permet d'éviter l'érosion de la berge actuelle, dans la portion sud de la nouvelle plage.

Le pivotement du brise-lames par rapport à l'option précédente est destiné à éviter de donner l'impression de restreindre la largeur de la zone récréotouristique (effet de couloir entre les deux enrochements).

Cette option a fait l'objet d'une évaluation hydrosédimentologique (voir chapitre 4).

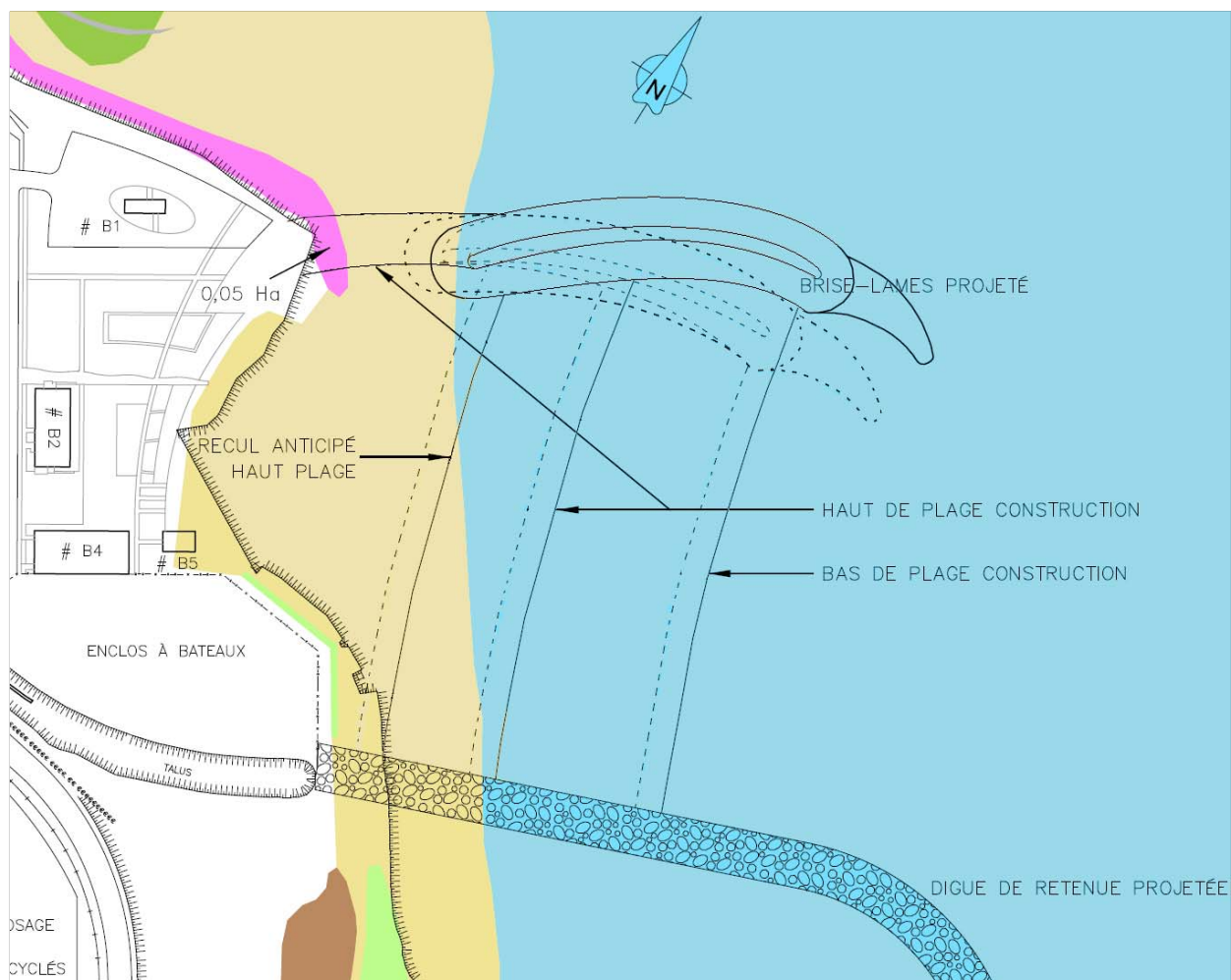


Figure 3.5 : Option V15-05

3.6 Option V15-06

L'option V15-06 a été développée à partir de l'évaluation des résultats de l'étude hydrosédimentologique de l'option V15-05. Le brise-lames a été décalé d'une quinzaine de mètres vers le nord-est par rapport à sa position dans l'option V15-05. Ce décalage entraîne une rotation dans le sens horaire de l'ensemble de la plage de baignade.

Cette option, présentée sur la figure 3.6, requiert environ 220 000 m³ de sédiments.

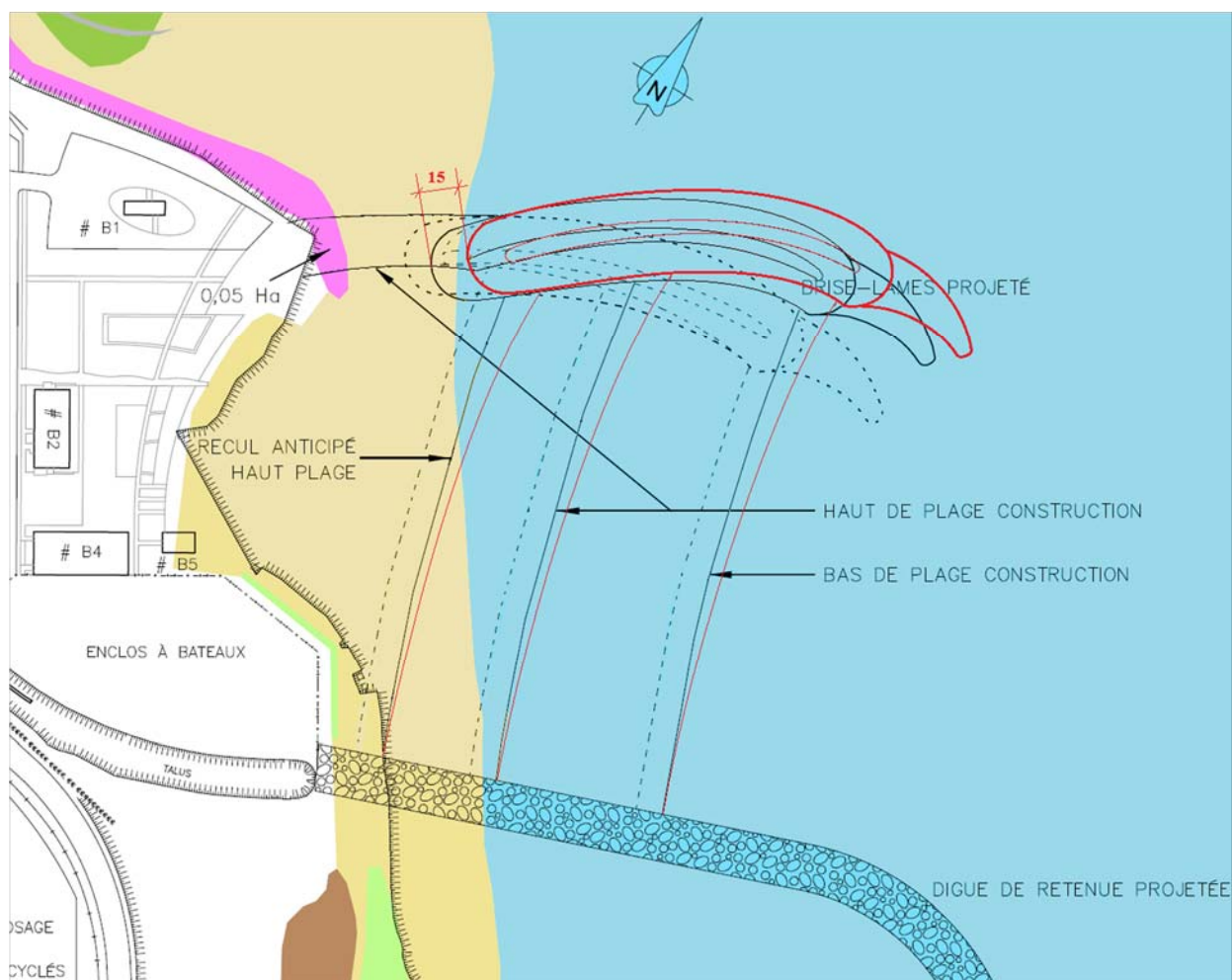


Figure 3.6 : Option V15-06

4 MODÉLISATION NUMÉRIQUE

4.1 Outils de modélisation

Tous les travaux de modélisation numérique de la présente étude ont été effectués à l'aide des divers modules du logiciel MIKE 21, conçu et commercialisé par la firme danoise DHI Water & Environment.

4.1.1 Module hydrodynamique - MIKE 21 FM

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 permet également d'inclure les contraintes de radiation dues aux vagues (calculées à l'aide du module SW - voir section suivante), qui superposent aux courants de marée les courants littoraux le long des plages.

4.1.2 Module de vagues - 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 option a ici été choisie.

4.1.3 Module de transport sédimentaire - 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 Fredsoe⁵.

L'intégration du modèle sédimentaire dans MIKE 21 FM permet de mettre en œuvre un modèle morphologique offrant un feedback continu entre les conditions hydrodynamiques et sédimentologiques.

4.2 Zone modélisée

La figure 4.2 illustre l'étendue de la zone couverte par le modèle numérique. 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.

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.

4.3 Numérisation de la bathymétrie

La majeure partie des données bathymétriques utilisées pour le montage du modèle numérique ont été obtenues auprès du SHC (figure 4.1) :

1. Dans la zone d'ensemble du modèle :
 - Cartes marines no 1316 et 1317 en format numérique AutoCAD;
2. Dans la zone du port et des battures de Beauport :
 - Levés hydrographiques no 3005094 : 9 882 points relevés en 1982;
3. 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.
4. Dans les bras de l'île d'Orléans:
 - Levés hydrographiques no 3003870 : 6201points relevés en 1974;
 - Levés hydrographiques no 3003828 : 19 865 points relevés en 1975.

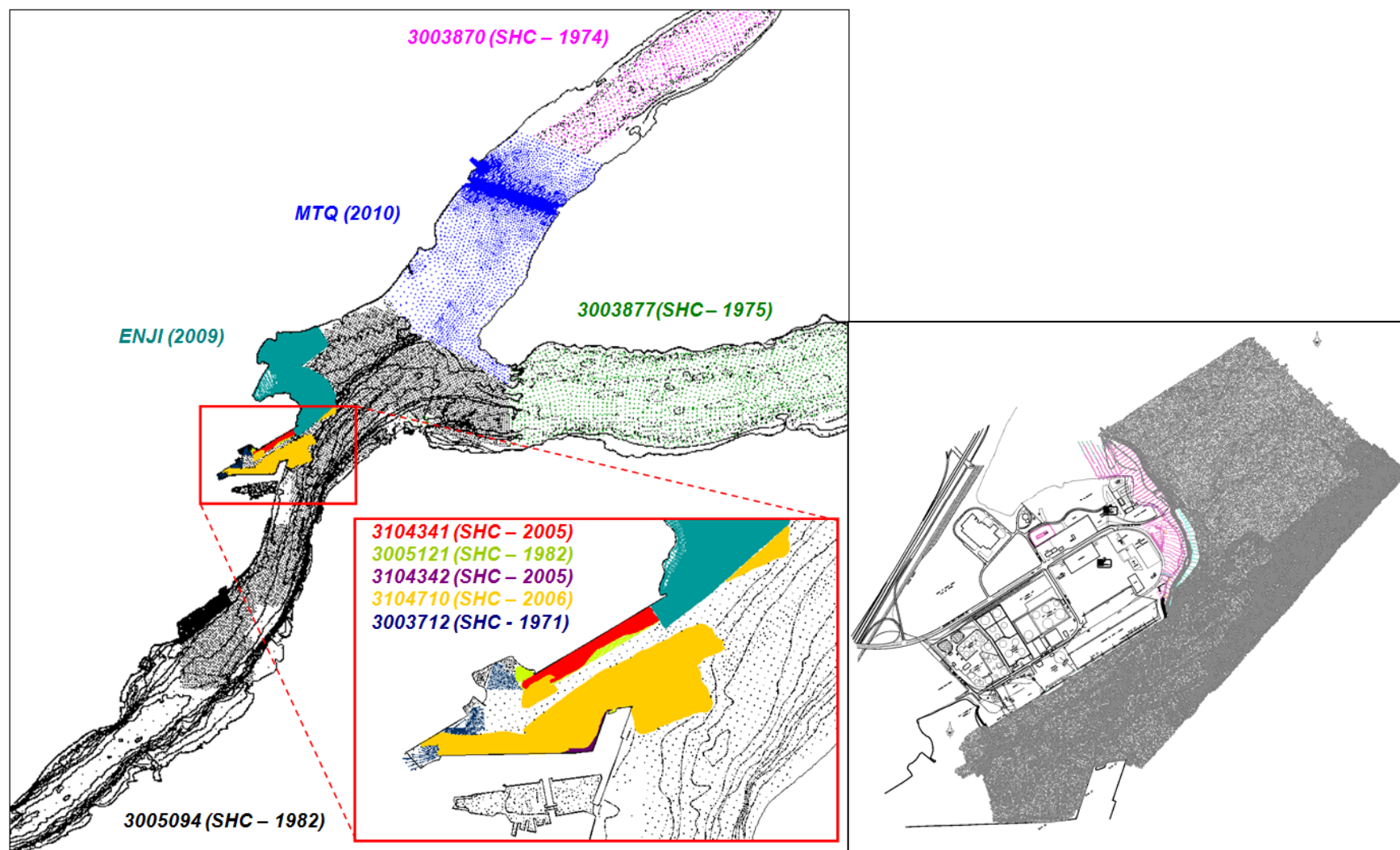
⁵ FREDSE, J (1984). *Turbulent boundary layers in wave current motion*. J. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 110, no NY10, pp. 1103-1120.

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.

Les relevés hydrographiques d'ensemble du SHC couvrant la pointe de Beauport sont relativement anciens (1982) et ne donnent aucune information dans la zone du rentrant sud-ouest et dans les portions de la pointe situées au-dessus du niveau marégraphique +1,5 m ZC. Dans le cadre de l'étude effectuée en 2010 par Lasalle|NHC⁶, des relevés additionnels avaient été effectués durant l'été 2009 par les Entreprises Normand Juneau (ENJI) afin de compléter la bathymétrie dans le rentrant sud-ouest et couvrir les élévations supérieures à celles du SHC. Les nouveaux relevés effectués en 2013 par le SHC et l'APQ couvraient une zone un peu moins étendue que celle documentée en 2009 (figure 4.1b).

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 4.2 pour l'ensemble du modèle et aux abords de la zone à l'étude. La figure 4.3 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.

⁶ DENAULT, C. ET VILLENEUVE, M. (2010) « Port de Québec – Extension du secteur Beauport, Étude des conditions hydrosédimentologiques », Rapport Groupe-Conseil LaSalle no 1744, avril 2010, préparé pour l'Administration portuaire de Québec.



a) Phase d'étude initiale

b) Intégration des relevés de 2013

Figure 4.1: Données utilisées dans le montage de la bathymétrie numérique

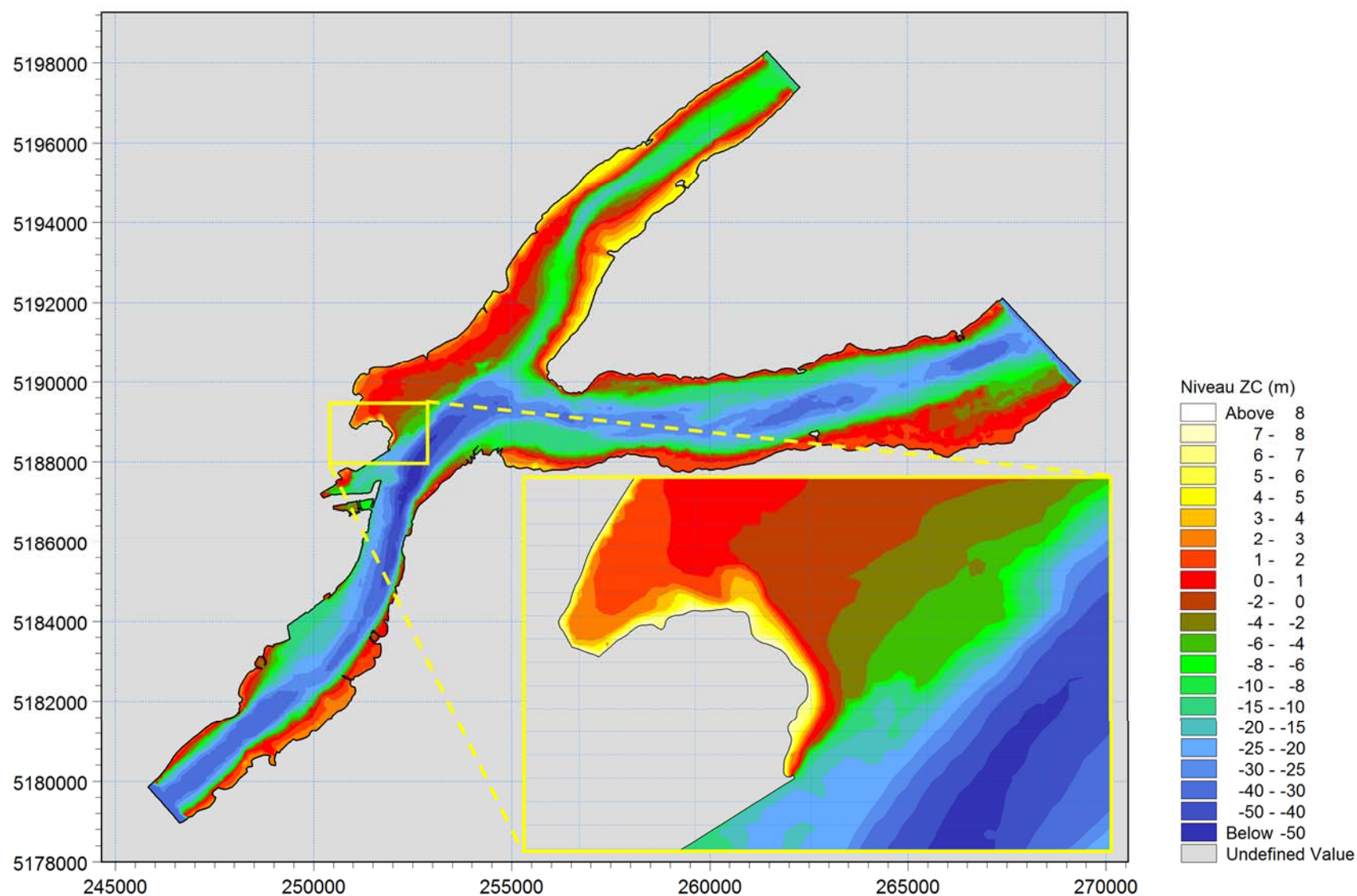


Figure 4.2: Bathymétrie numérique

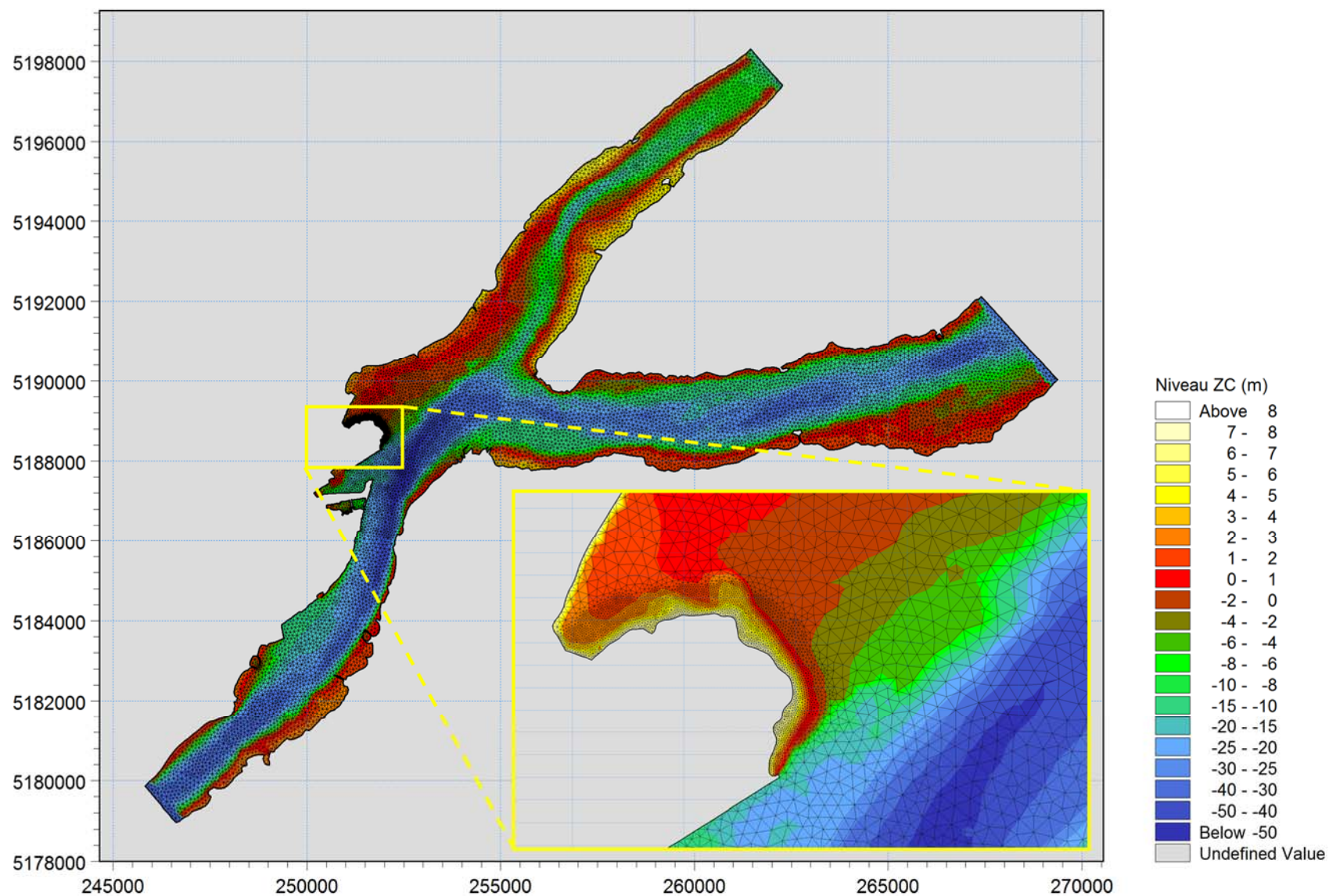


Figure 4.3: Maillage de la bathymétrie numérique

4.4 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 4.2), 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.

4.5 Paramètres de calculs

4.5.1 Paramètres hydrodynamiques

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.

4.5.2 Paramètres de 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. 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 & Janssen⁷ alors que celle de γ_1 est tirée de Holthuijsen et al.⁸. 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 lors de nos études antérieures pour évaluer l'influence du paramètre de frottement sur les fonds sur la dissipation de l'énergie des vagues dans le secteur de la plage projetée. 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.

4.5.3 Paramètres de transport sédimentaire

Conformément à nos études précédentes, un D_{50} de 0,2 mm a été utilisé pour l'ensemble des sédiments constituant la plage.

⁷ 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

⁸ 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.

5 ÉTUDE HYDROSÉDIMENTOLOGIQUE

5.1 Option V15-05

Les calculs de mouvements sédimentaires sous l'effet des tempêtes synthétiques (version longue, équivalent 49 jours) ont été reproduits (figure 5.1) sous forme d'une carte de différentiel d'élévation entre la géométrie de construction de la plage et la fin de la série de tempêtes accompagnées de changements de niveaux d'eau (marée). Les zones dans les teintes de rouge sont des zones qui ont été érodées (par exemple le haut de plage) et les zones dans les teintes de vert sont des zones qui ont été en sédimentation (par exemple le bas de plage). L'échelle de variation d'altitude dans la figure 5.1 est de l'ordre de 1,5 m (en érosion ou en accrétion).

Une légère dissymétrie du patron d'érosion/sédimentation a été détectée sur la plage de baignade de cette option, ce qui a entraîné le développement de l'option suivante.

Du côté nord-ouest du brise-lames, on constate le remaniement du banc de sable qui forme actuellement l'extrémité nord de la plage. On ne constate cependant pas de migration massive des sables vers la zone du rentrant sud-ouest.

5.2 Option V15-06

Les mêmes calculs de mouvements sédimentaires ont été faits pour l'option V15-06 que pour l'option V15-05. La figure 5.3, qui présente les résultats pour l'option V15-06, montre l'amélioration du bilan sédimentaire de cette option par rapport à la précédente (meilleur équilibre longitudinal des zones en érosion et accrétion). Il s'agit d'une version de la plage de baignade qui devrait être relativement optimale par rapport aux conditions hydrosédimentologiques de ce secteur de la baie de Beauport.

La nouvelle géométrie du brise-lames provoque également une légère diminution des mouvements sédimentaires au droit du banc de sable qui forme actuellement l'extrémité nord de la plage.

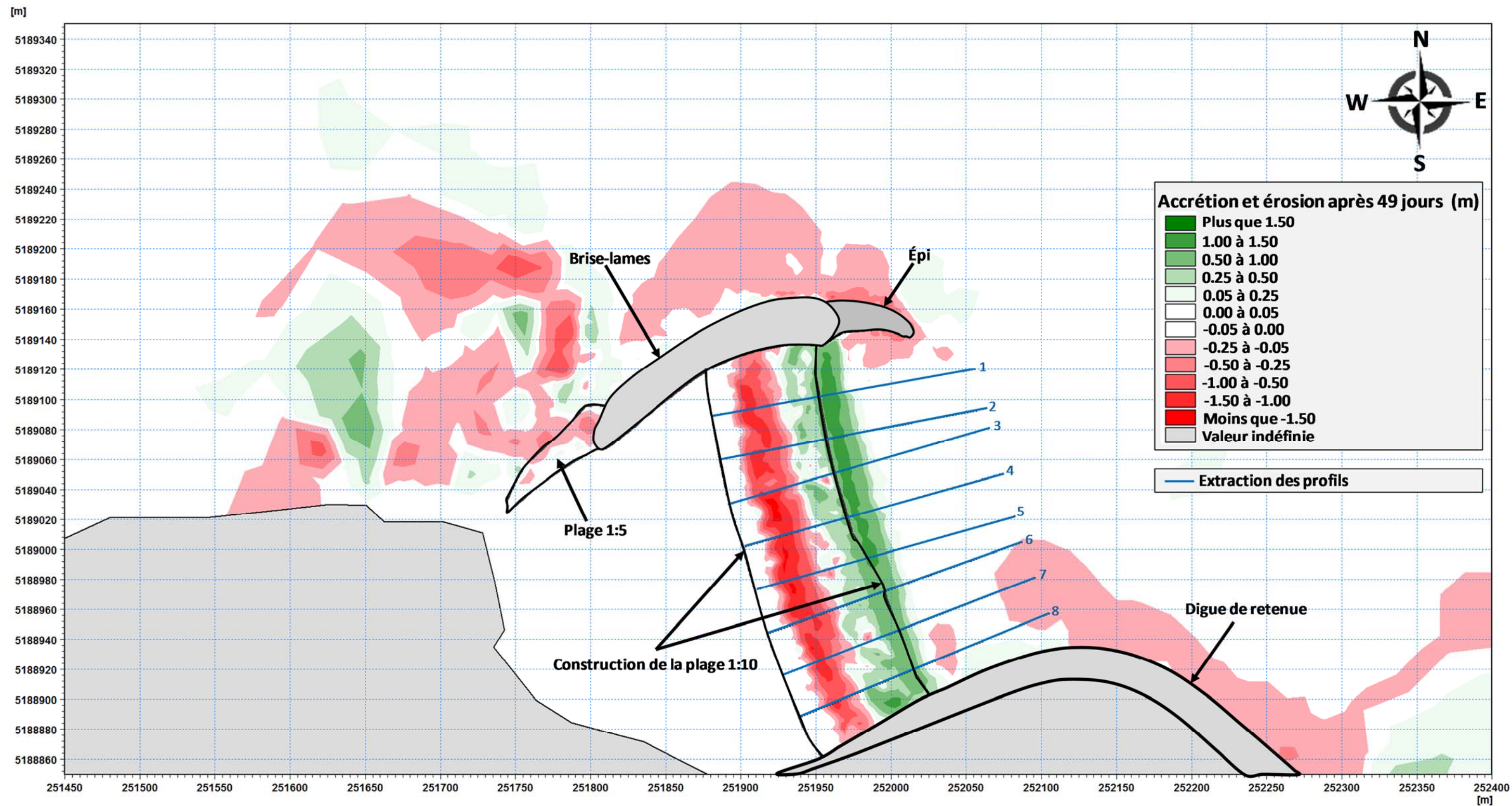


Figure 5.1 : Résultats de l'évaluation hydrosédimentologique de l'option V15-05

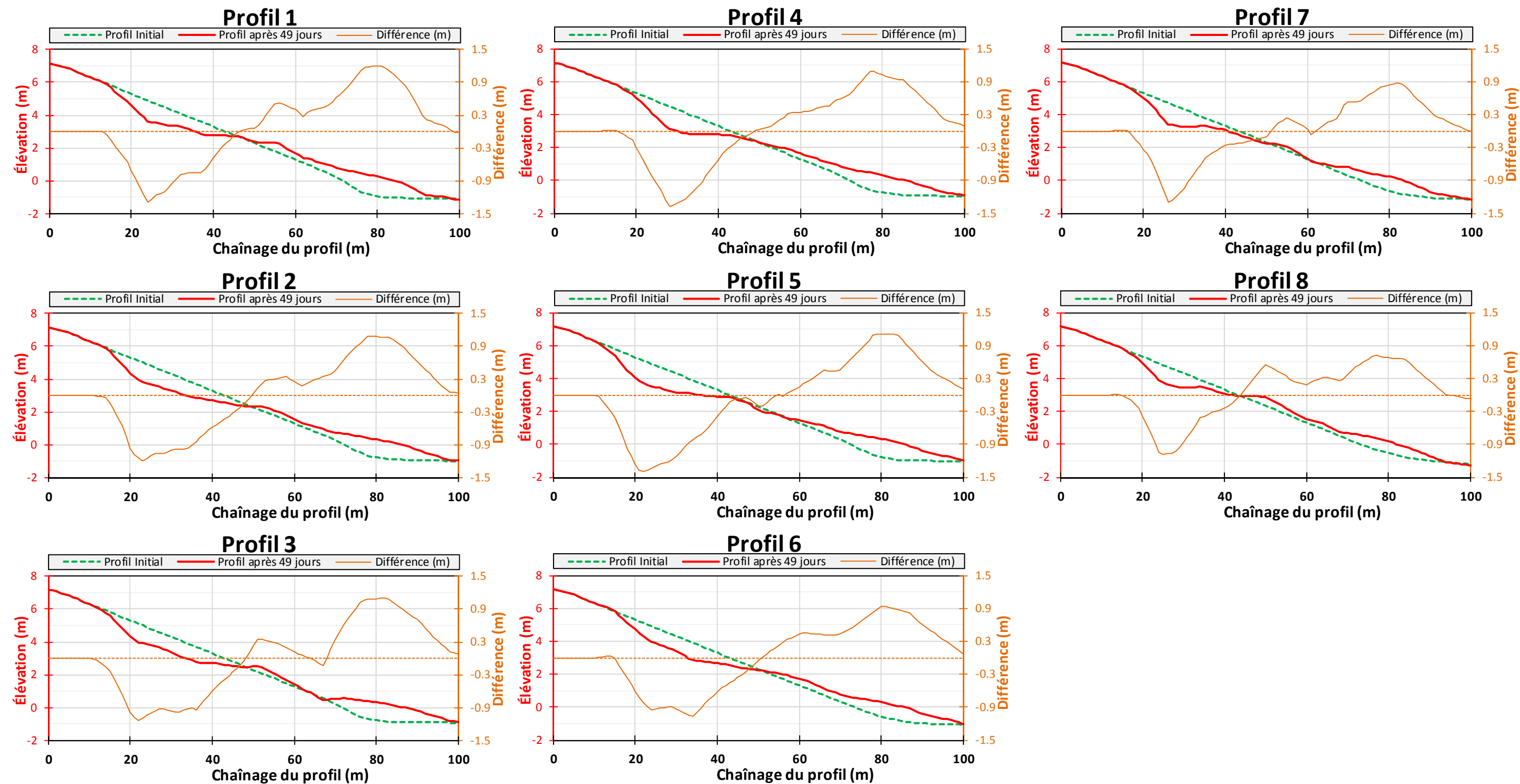


Figure 5.2 : Évolution des profils de la plage de l’option V15-05

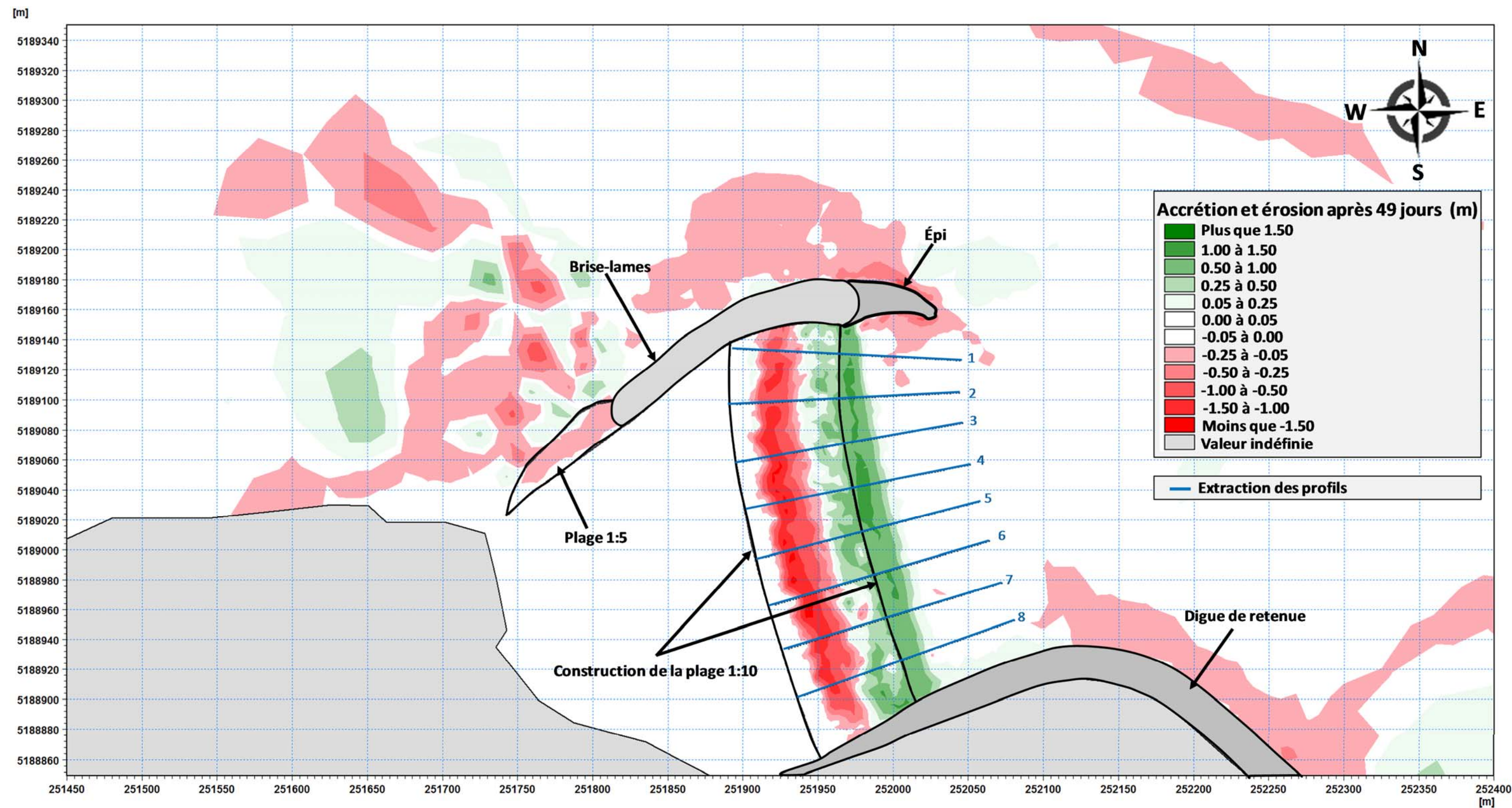


Figure 5.3: Résultats de l'évaluation hydrosédimentologique de l'option V15-06

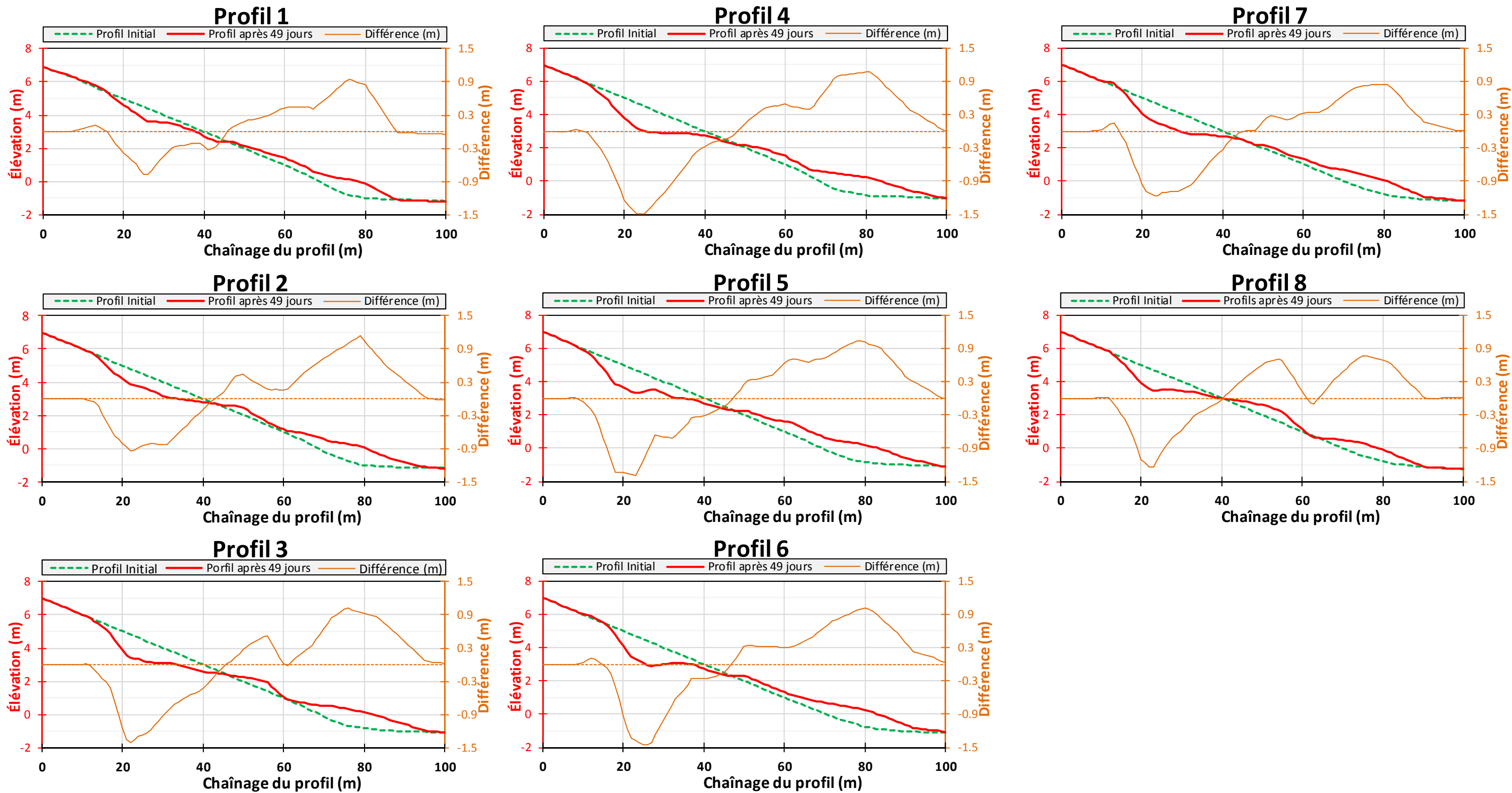


Figure 5.4: Évolution des profils de la plage de l’option V15-06

6 RENTRANT SUD-OUEST

6.1 Situation actuelle

Lors des fortes tempêtes du secteur est, le sable de la plage actuelle de Beauport est transporté du sud-est vers le nord-ouest pour alimenter le banc de sable qui se trouve à l'extrémité nord de la plage (figure 6.1). Lors de conditions d'agitation plus modérées, ce banc de sable est remodelé par les vagues avec un transport des sédiments principalement orienté vers la partie sud du rentrant sud-ouest.

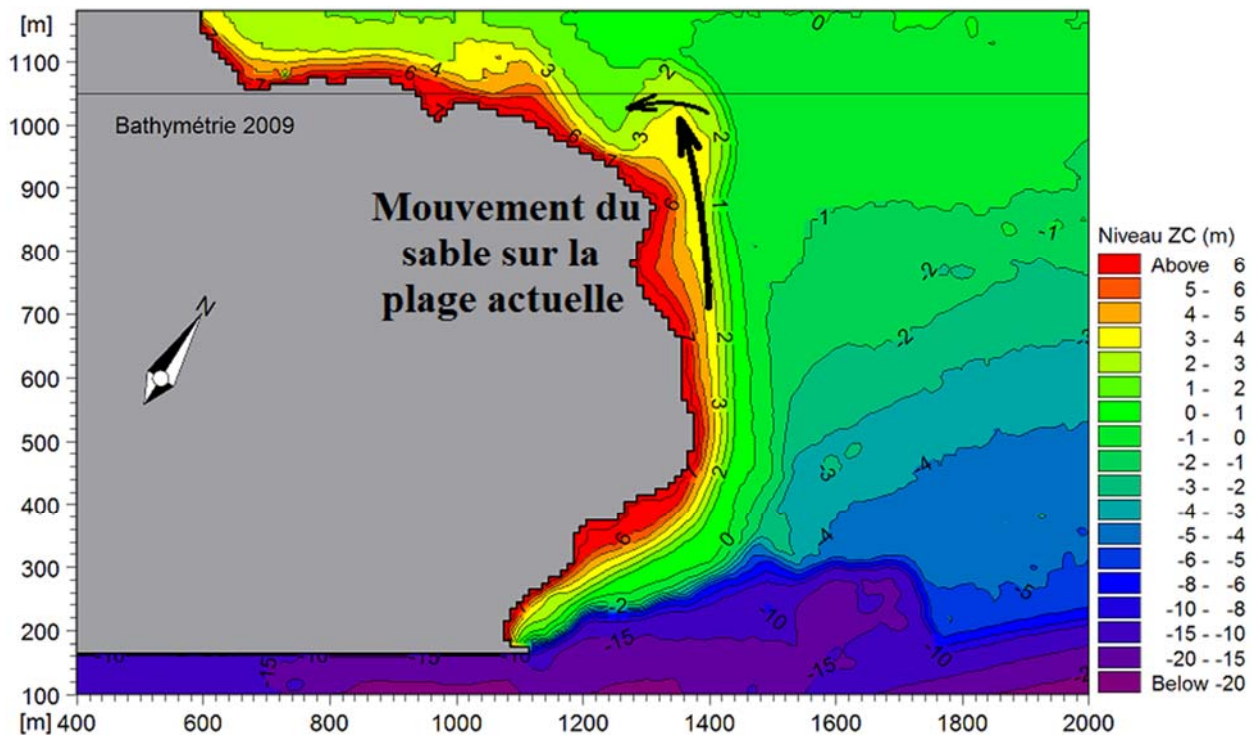


Figure 6.1: Mouvements du sable sur la plage actuelle

6.2 Zone protégée par le brise-lames

Le plan du rentrant sud-ouest, de la position du brise-lames et de la future plage dans l'option recommandée (V15-06) est reproduit à la figure 6.2 avec la rose des vents à la station de Beauport.

La figure 6.2 montre que le brise-lames est pratiquement orienté selon la direction principale des vents forts qui soufflent sur la baie de Beauport (ENE et NE).

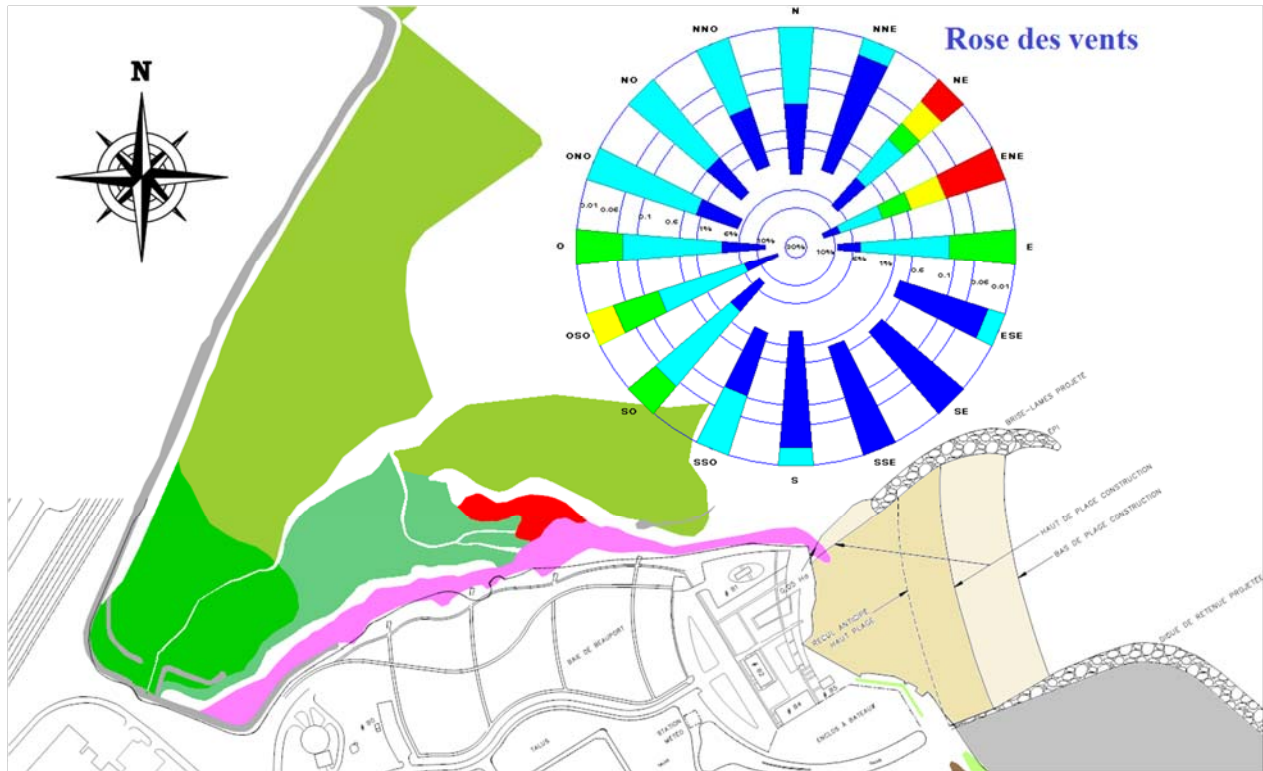


Figure 6.2 : Rentrant sud-ouest et brise-lames proposé (V15-06) – Rose des vents

Sur la figure 6.3, le même plan du rentrant sud-ouest a été reproduit avec la rose des vagues (dans la baie). On constate sur cette figure que les plus grandes vagues qui se produisent dans la baie de Beauport proviennent des secteurs est à nord-est, avec une dominance de l'est-nord-est. Lorsque ces vagues vont pénétrer dans le rentrant sud-ouest, la topographie des fonds va les faire réfracter. La présence du brise-lames va provoquer une légère amélioration de la protection des herbiers de la partie sud du rentrant sud-ouest contre les vagues de l'est. Par contre, le brise-lames de la plage n'aura aucun effet sur le rentrant sud-ouest pour ce qui est des vagues des secteurs est-nord-est et nord-est.

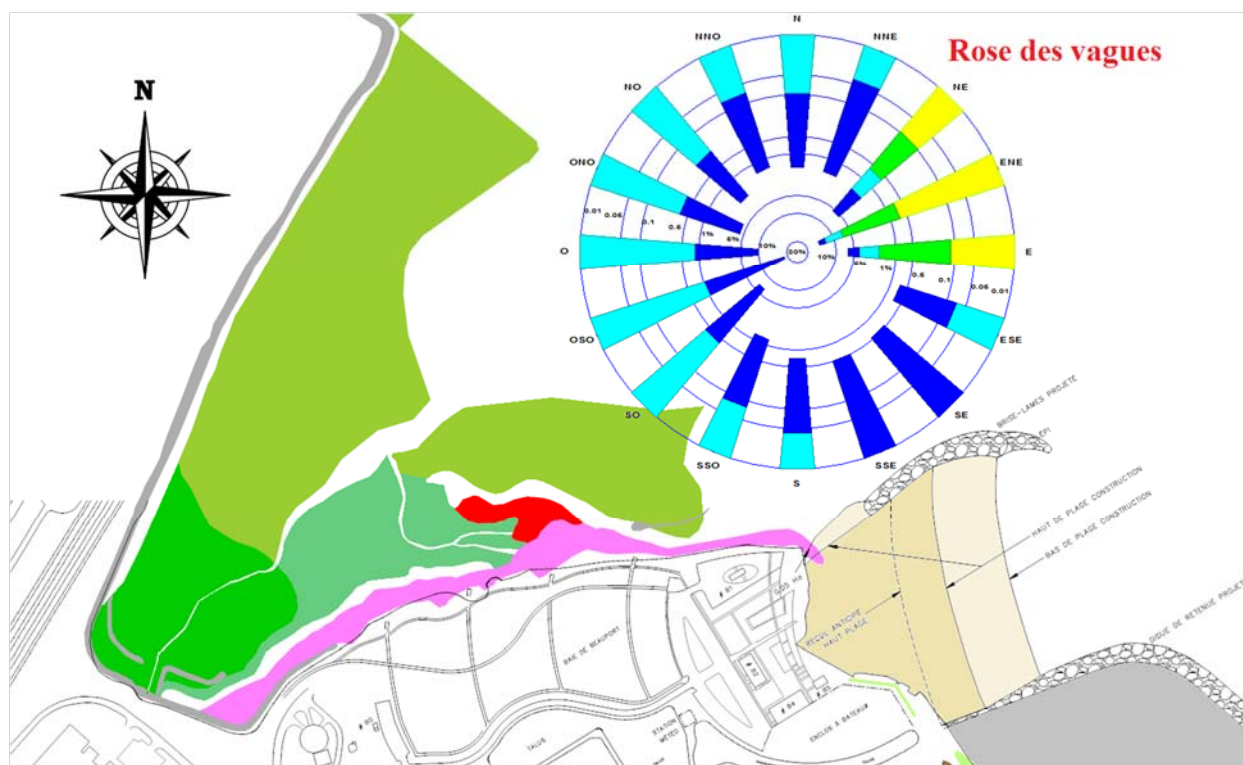


Figure 6.3 : Rentrant sud-ouest et brise-lames proposé (V15-06) – Rose des vagues

6.3 Effet du brise-lames sur le rentrant sud-ouest

6.3.1 Sédiments

Les figures 5.1 et 5.3 montrent que les vagues remettent en suspension les sédiments qui se trouvent du côté nord du brise-lames. Ce phénomène se produit déjà dans la configuration actuelle de la plage.

Avec la mise en place du brise-lames de la plage, la flèche de sable qui est la conséquence de la dérive littorale actuelle va progressivement s'étaler et une partie des sédiments qui constituent cette flèche littorale vont migrer vers le rentrant sud-ouest. Par contre, la présence du brise-lames va arrêter la dérive littorale qui alimentait cette flèche. Avec la construction de la nouvelle plage et de son brise-lames, les sédiments situés du côté nord du brise-lames vont donc essentiellement se stabiliser à moyen et long termes.

6.3.2 Végétation de marais

La construction du brise-lames de la plage devrait donc à moyen et long terme protéger la végétation du rentrant sud-ouest en stoppant la migration des sédiments qui proviennent de la plage actuelle.

7 COURANTS AUX ABORDS DE LA PLAGE

7.1 Courants de marée

Les figures 7.1 et 7.2 illustrent respectivement les courants de marée maximums de flot et de jusant prédits par le modèle numérique aux abords de la plage actuelle et de la future plage (variante V15-06). Les courants correspondent à une marée de vive-eau de 4,53 m de marnage.

Au flot, les vitesses maximales le long de plage actuelle (figure 7.1(a)), qui correspond à la portion nord de la pointe de Beauport, sont liées à la veine principale des courants de marée. Les vitesses aux abords immédiats du rivage sont faibles, mais elles augmentent à des valeurs beaucoup plus importantes à seulement quelques dizaines de mètres de la plage.

En conditions futures, la présence de l'extension portuaire au sud de la plage et du brise-lames au nord protège la nouvelle plage de l'action directe des courants de flot. Les vitesses maximales ne dépassent pas 0,25 m/s dans l'ensemble de la zone délimitée par les nouveaux aménagements et ces dernières sont liées à la formation d'un courant de retour généré par les courants de marée plus forts observés plus au large (figure 7.1(b)).

Au jusant, tant la plage actuelle que la future plage se situent en retrait de la veine principale des courants de marée. En conditions actuelles, les vitesses le long de la plage (moitié nord de la pointe) ne dépassent pas 0,25 m/s (figure 7.2(a)). Les vitesses le long de la nouvelle plage (figure 7.2(b)) sont du même ordre et, comme au flot, résultent de la formation d'un courant de retour dans la zone définie par les nouveaux aménagements.

En conditions futures, il importe de souligner que les courants de marée peuvent conduire à des vitesses d'écoulement relativement importantes à l'extrémité du brise-lames. Les vitesses aux abords immédiats de la nouvelle plage sont donc faibles mais des courants plus importants, de l'ordre de 0,25 à 0,35 m/s, sont observés en vive-eau à l'extrémité du brise-lames (figures 7.1(b) et 7.2(b)).

7.2 Courants dus aux vagues

Les figures 7.3 et 7.4 illustrent les champs de courants résultant de la superposition des courants de marée et des courants littoraux liés aux vagues de tempêtes. Les courants littoraux obtenus le long de la plage actuelle (figure 7.3) et de la future plage (figure 7.4) correspondent à une tempête de l'ENE avec des vents maximums d'un peu plus de 60 km/h.

En conditions actuelles, les courants littoraux relativement intenses sont dirigés vers le nord dans la portion nord de la pointe (le long de la plage actuelle) et vers le sud dans la portion sud, ce qui contribue à un transport littoral et une fuite de sédiments vers les deux extrémités de la pointe.

Tel que discuté précédemment, la variante V15-06 de la plage permet une nette diminution de l'intensité des courants et du transport littoraux.

7.3 Sécurité des usagers de la plage de baignade

En dehors des épisodes de fortes tempête du secteur est, les vitesses de courant modélisées dans le secteur de la nouvelle plage restent très faibles. Les utilisateurs qui resteront dans la zone de la plage ne seront pas exposés à des courants pouvant les mettre en danger.

7.4 Qualité de l'eau

La configuration relativement ouverte de l'option recommandée (V15-06) devrait permettre une recirculation régulière de l'eau aussi bien le long de la plage de baignade que dans le rentrant sud-ouest. De plus, lors des épisodes de tempête, surtout du secteur nord-est, la circulation de l'eau est accélérée par l'effet des vagues.

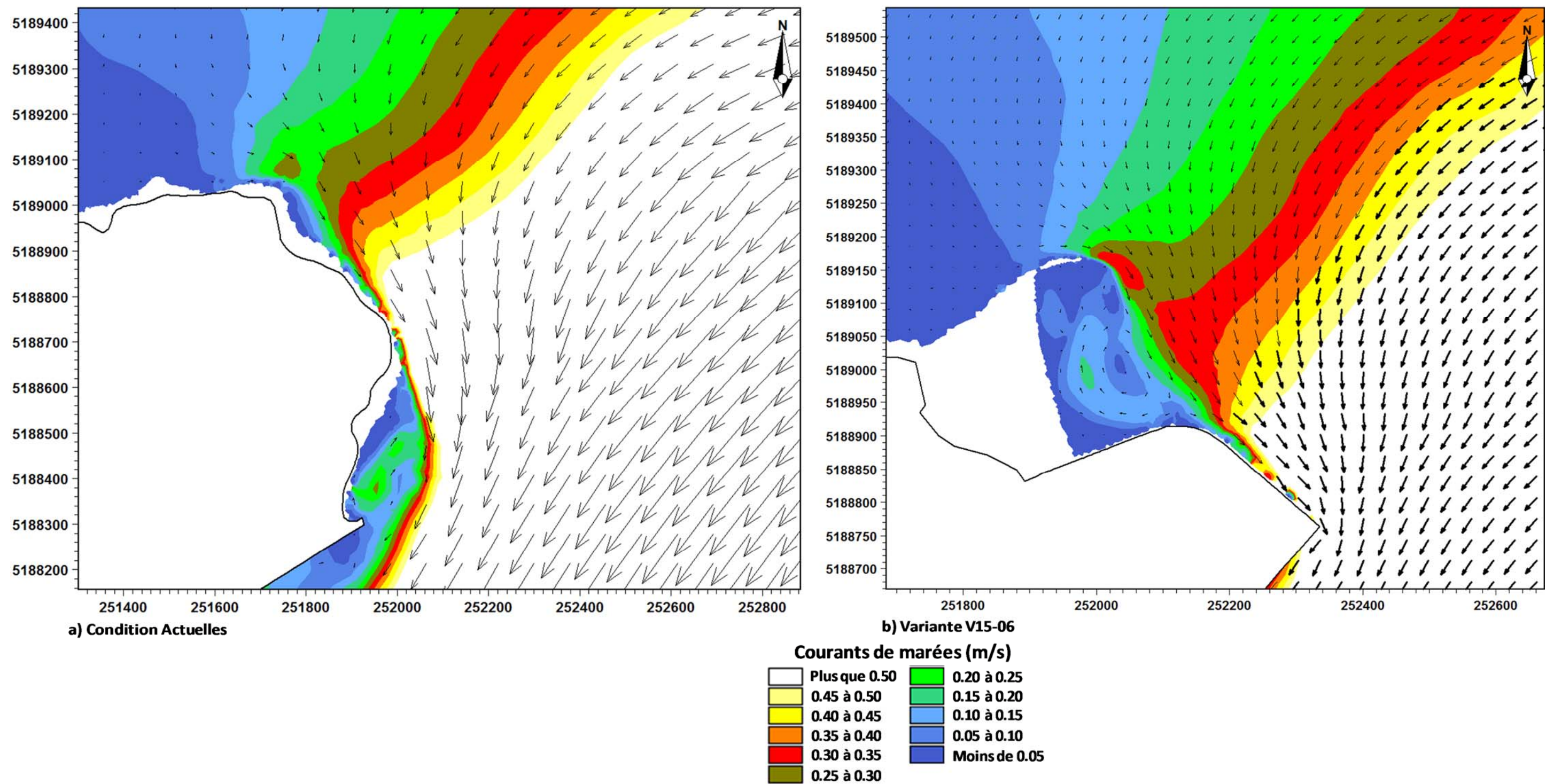


Figure 7.1 : Courants maximums de flot en marée de vive-eau (marnage 4,53 m)

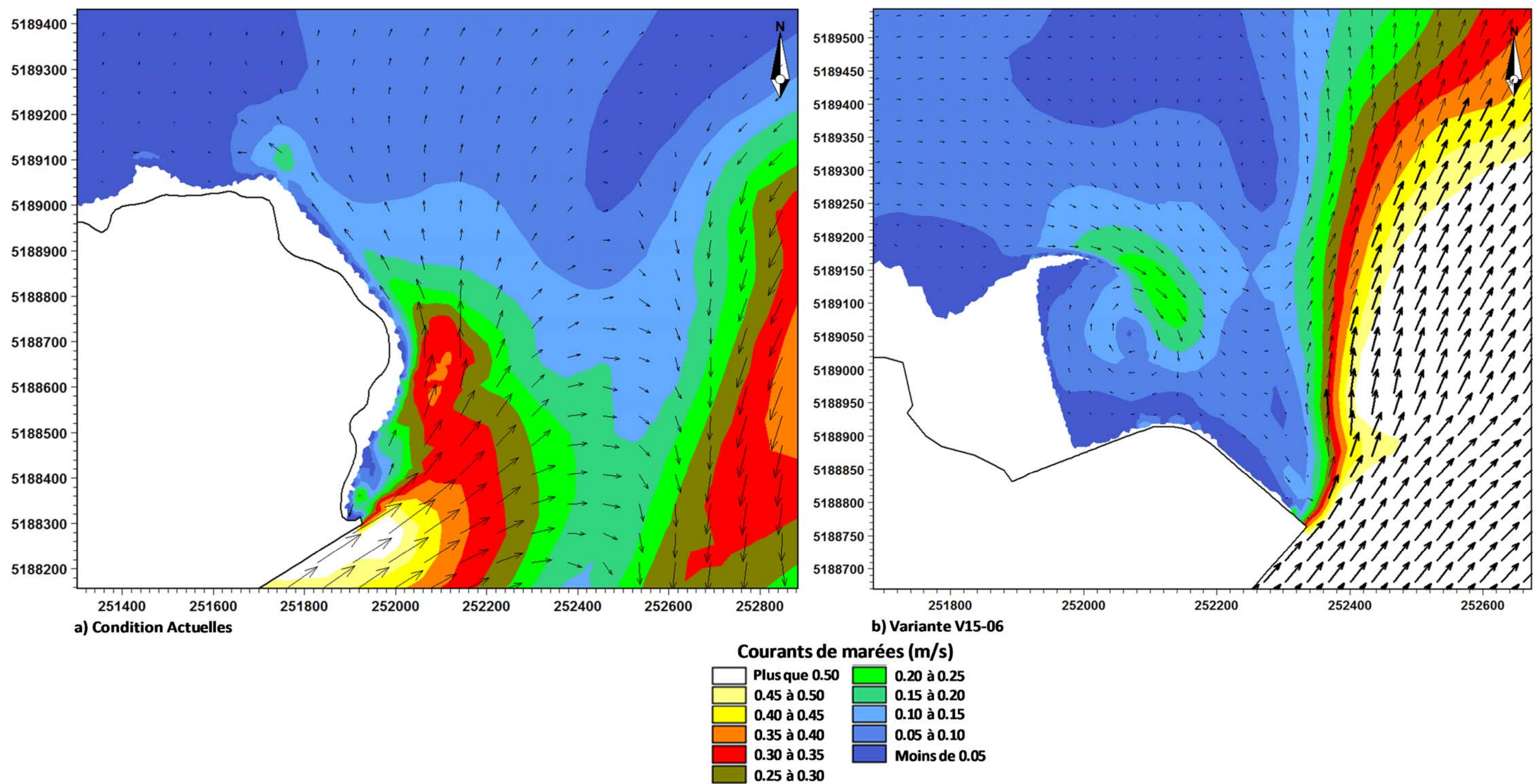


Figure 7.2 : Courants maximums de jusant en marée de vive-eau (marnage 4,53 m)

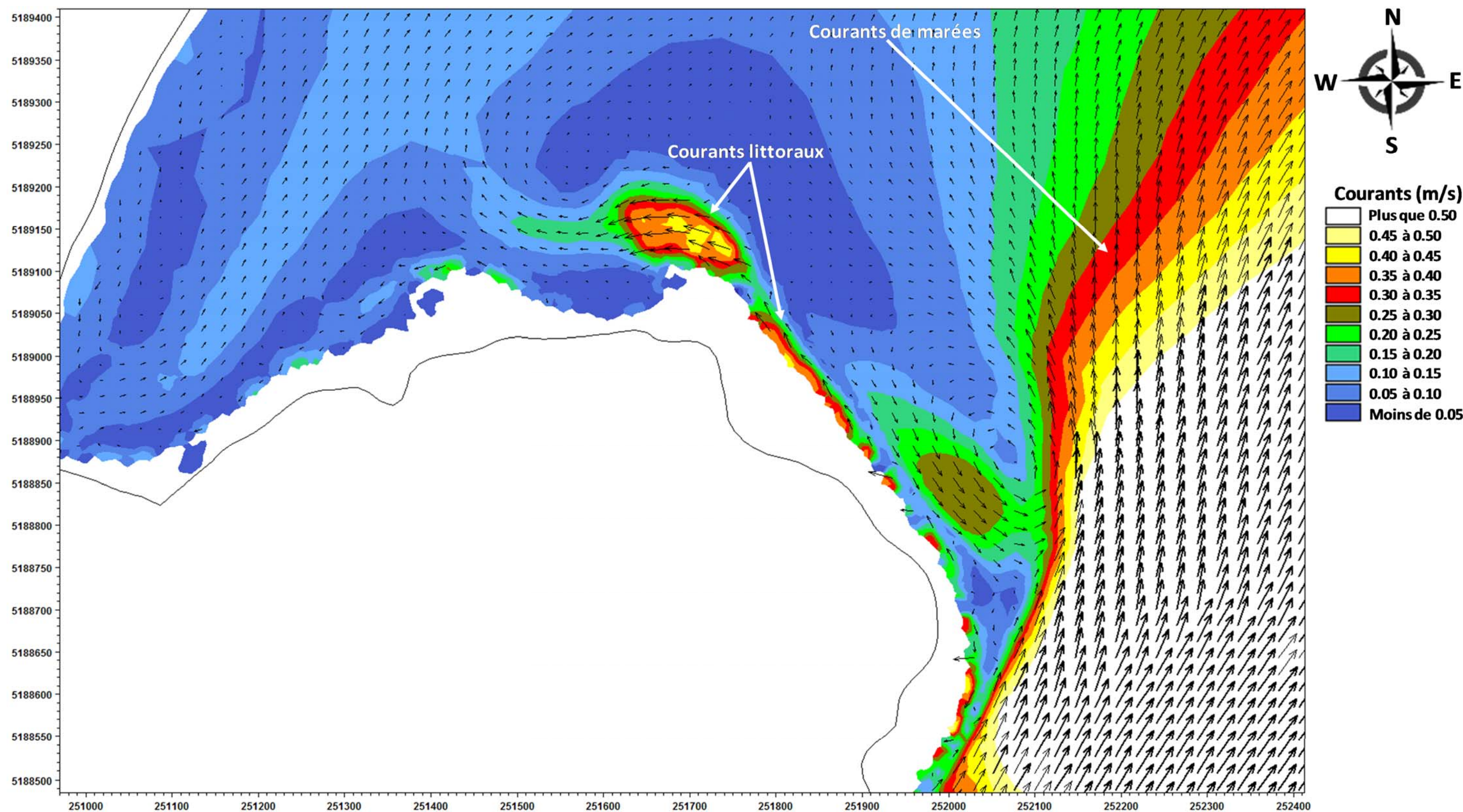


Figure 7.3: Courants littoraux induits par les vagues de tempêtes – Conditions actuelles

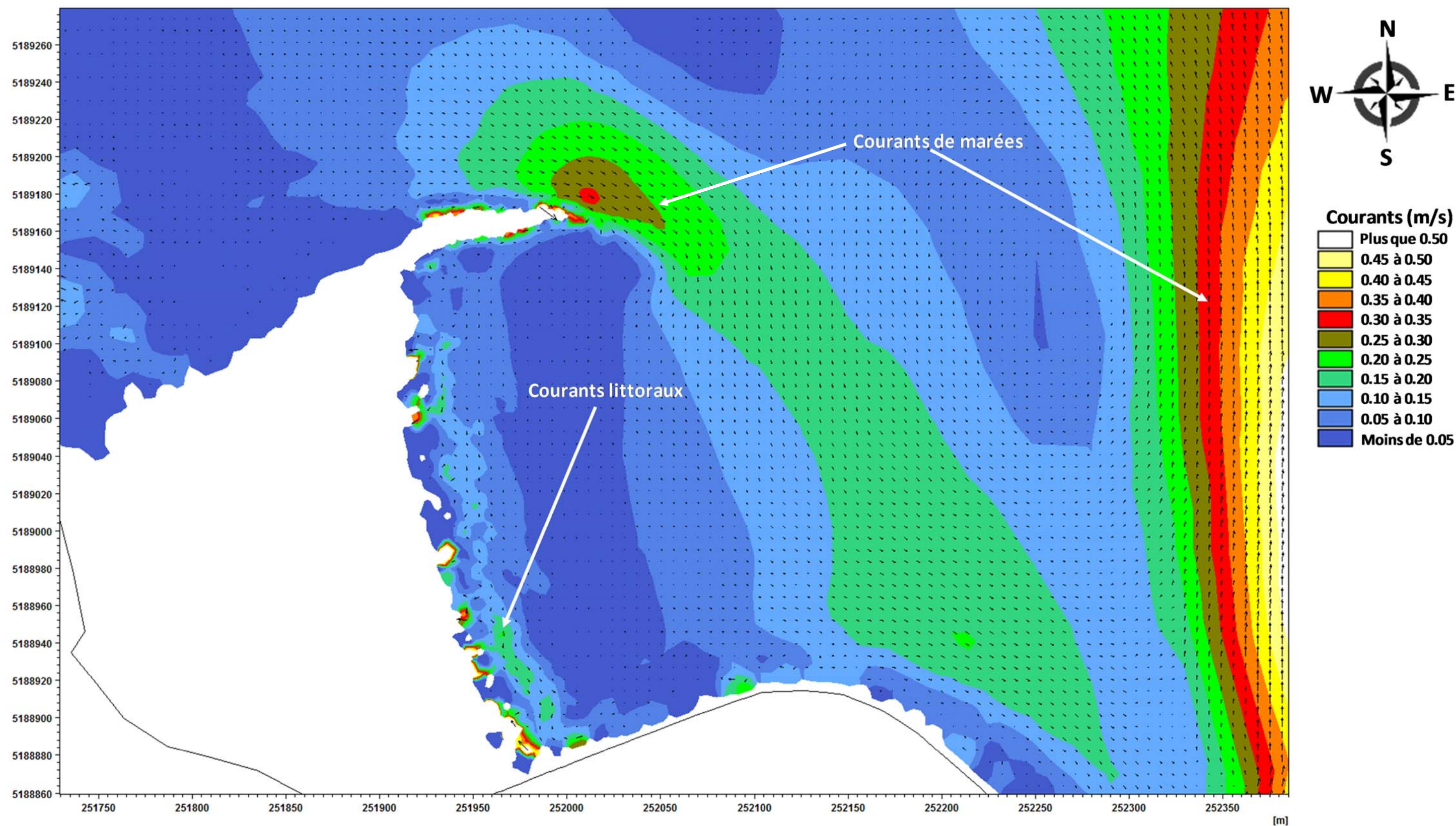


Figure 7.4: Courants littoraux induits par les vagues de tempêtes – Conditions futures (option V15-06)

8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

8.1 Conclusion

Une série de géométries de plage a été développée pour répondre aux demandes de l'APQ dans le cadre du réaménagement de la zone récréotouristique de Beauport. Ces géométries ont fait l'objet de discussions avec l'APQ dans le but de répondre le plus efficacement et rapidement à leurs besoins.

Deux options ont fait l'objet d'une évaluation des processus hydrosédimentaires. Les calculs montrent que l'option V15-05 présente un léger déséquilibre des processus sédimentaires se produisant sur la plage de baignade et que l'option V15-06 corrige ce déséquilibre.

La quantité de sédiments impliquée dans la construction de l'option V15-06 est de l'ordre de 220 000 m³.

8.2 Recommandations

La géométrie de plage recommandée est celle apparaissant dans l'option V15-06 (Annexe A).

ANNEXE « A »

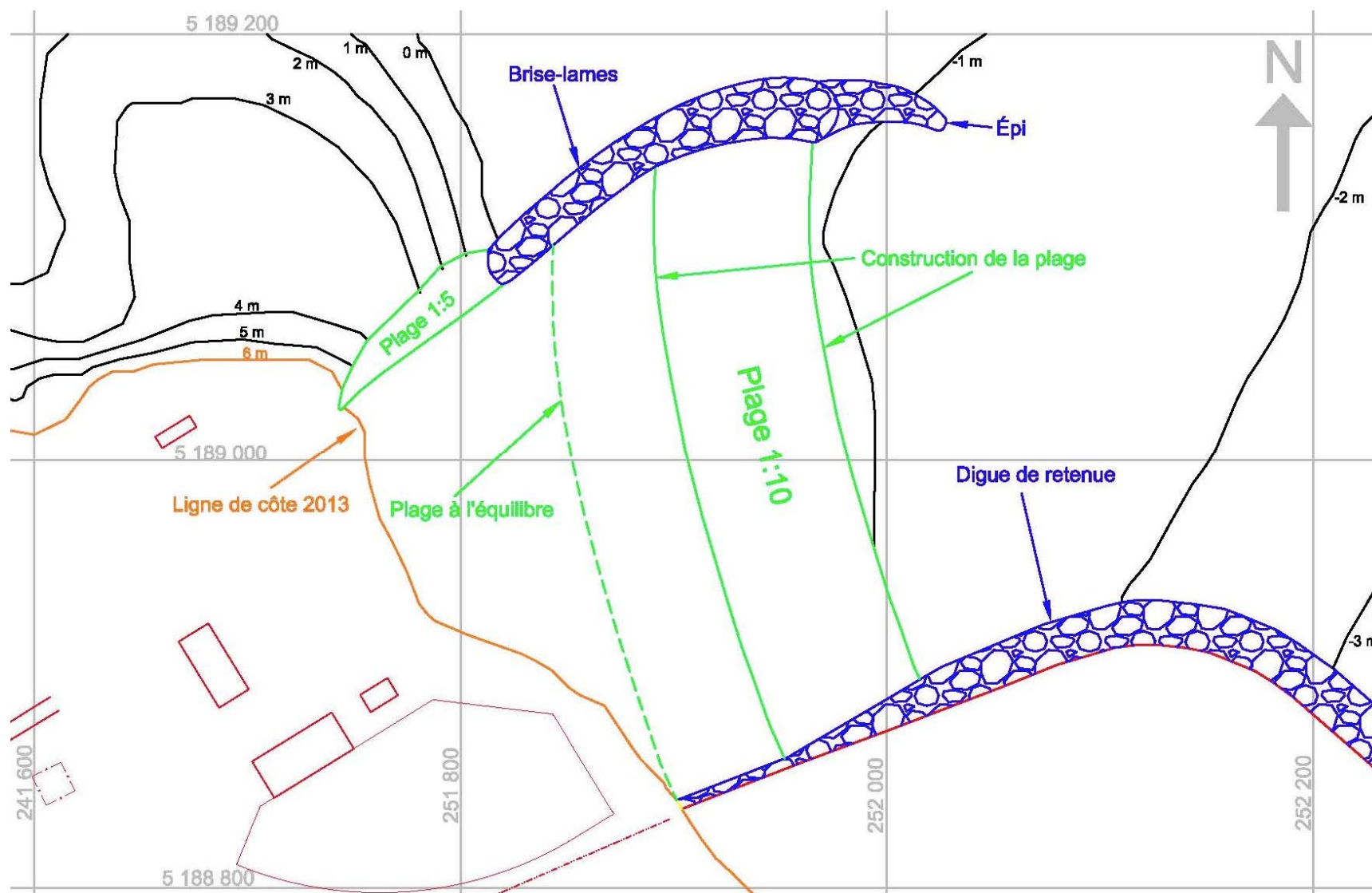


Figure A1 : Géométrie de la plage recommandée

ANNEXE « B »

Prévision de hausse des niveaux d'eau en fonction des changements climatiques

B Niveaux d'eau

B1 Sources de l'information

La Gestion des données scientifiques intégrées (GDSI) du ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) met à la disposition du public les niveaux d'eau enregistrés à ses stations sur Internet⁹.

Des stations de la GDSI sont disponibles à proximité du secteur Beauport :

- La station de référence de Lauzon¹⁰ (N° 3250) pour laquelle des données horaires sont disponibles en 1896 et 2012 (environ 527 000 valeurs horaires recueillies entre 1950 et 2012),
- La station du Vieux-Québec (N° 3248) qui opère depuis 2009 et qui a remplacé la station de Lauzon depuis 2012 (près de 30 000 données horaires).

Les données des deux stations du Service hydrographique du Canada (SHC) à Québec ont été utilisées pour illustrer les niveaux d'eau qui se sont produits à Beauport lors des tempêtes.

Le SHC donne une différence de 1,958 m entre le Zéro des cartes marines (ZC) et le Niveau moyen des mers (NMM-CGVD28) pour Lauzon, le ZC se situant sous le NMM à Québec.

B2 Bases de données de la station de Lauzon

L'évaluation des fréquences de dépassement des niveaux d'eau enregistrés à la station de Lauzon a été faite entre 1950 et 2012. La figure B.1 illustre cette analyse pour les « extrêmes hauts » observés pendant cette période.

D'après la base de données disponibles et en utilisant la régression logarithmique obtenue avec cette base de données, les niveaux d'eau ont été calculés pour les récurrences suivantes :

- | | | | |
|-----------------------------|------------|----|-------------|
| - Une heure par 50 années : | +6,94 m ZC | ou | +4,98 m NMM |
| - Une heure par 30 années : | +6,86 m ZC | ou | +4,90 m NMM |
| - Une heure par 10 années : | +6,68 m ZC | ou | +4,72 m NMM |
| - Une heure par 5 années : | +6,57 m ZC | ou | +4,61 m NMM |

⁹ <http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/index-fra.html>

¹⁰ <http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/inventory-inventaire/sd-ds-fra.asp?no=3250&user=isdm-gdsi®ion=LAU&ref=maps-cartes>

- Une heure par 2 années : +6,42 m ZC ou +4,46 m NMM
- Une heure par année : +6,30 m ZC ou +4,34 m NMM
- Douze heures par année : +5,90 m ZC ou +3,94 m NMM
- Une journée par année : +5,79 m ZC ou +3,83 m NMM

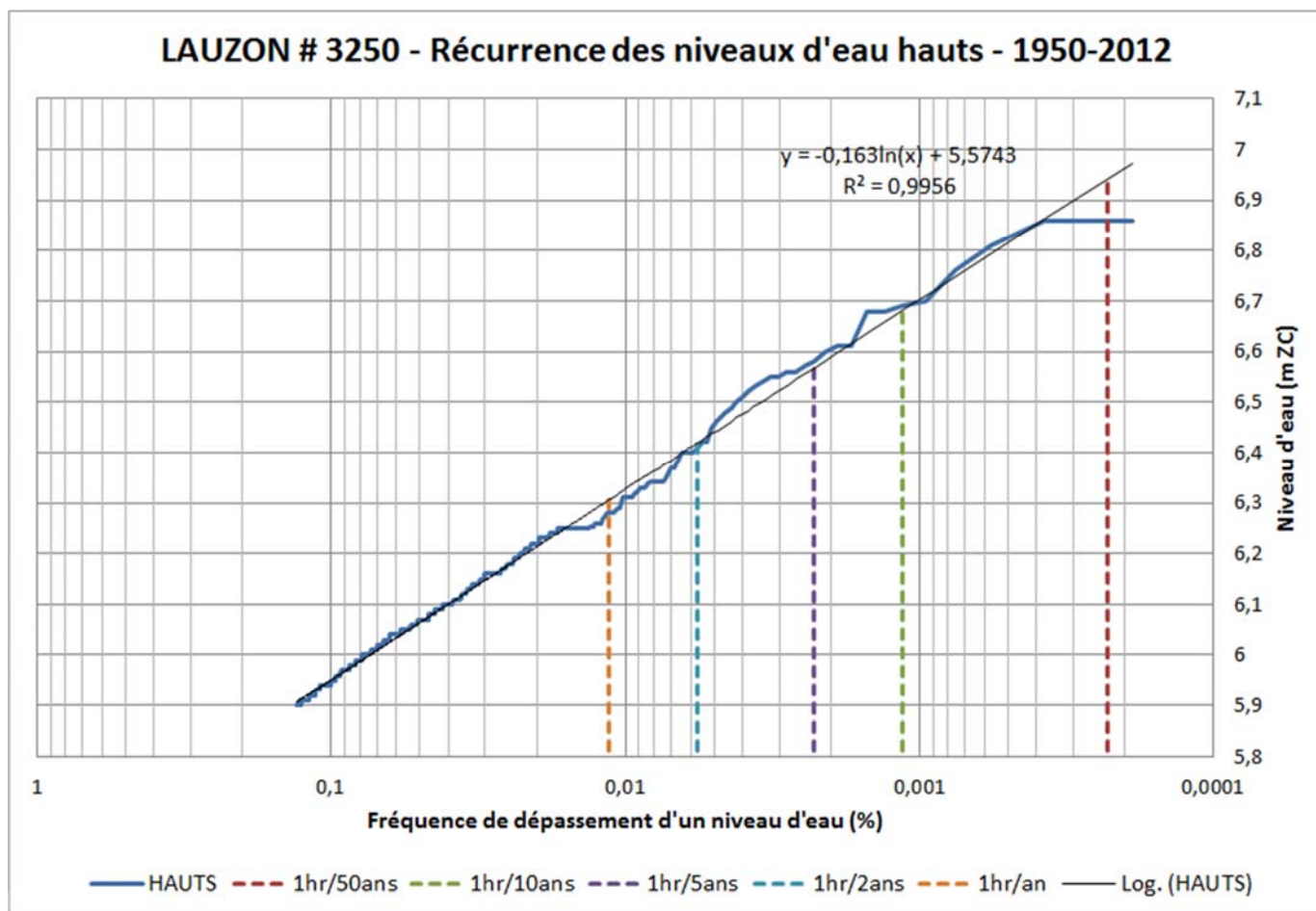


Figure B.1 Fréquences de dépassement des niveaux d'eau hauts à Lauzon (1950 et 2012)

B3 Influence des changements climatiques sur les niveaux d'eau hauts

Dans le cadre du dimensionnement d'infrastructures côtières qui devraient avoir une durée de vie utile de l'ordre d'une cinquantaine d'années, il est prudent de prendre en compte la hausse prévisible des niveaux d'eau en relation avec les changements climatiques. Les informations fournies par le GIEC¹¹ seront utilisées pour définir un taux de remontée des niveaux moyens des océans et l'appliquer aux niveaux d'eau extrêmes prévisibles dans le contexte du dimensionnement des infrastructures portuaires.

¹¹ Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (IPCC en Anglais)

Le cinquième rapport d'évaluation du GIEC a été publié en 2013 et 2014. En ce qui concerne l'évolution du niveau moyen des océans, plusieurs scénarios climatiques ont été analysés. La figure B.2, extraite du rapport synthèse¹², présente les courbes (moyenne et enveloppes) de l'évolution prévisible du niveau moyen des océans selon deux scénarios climatiques (RCP2.6 – optimiste et RCP8.5 – pessimiste/réaliste).

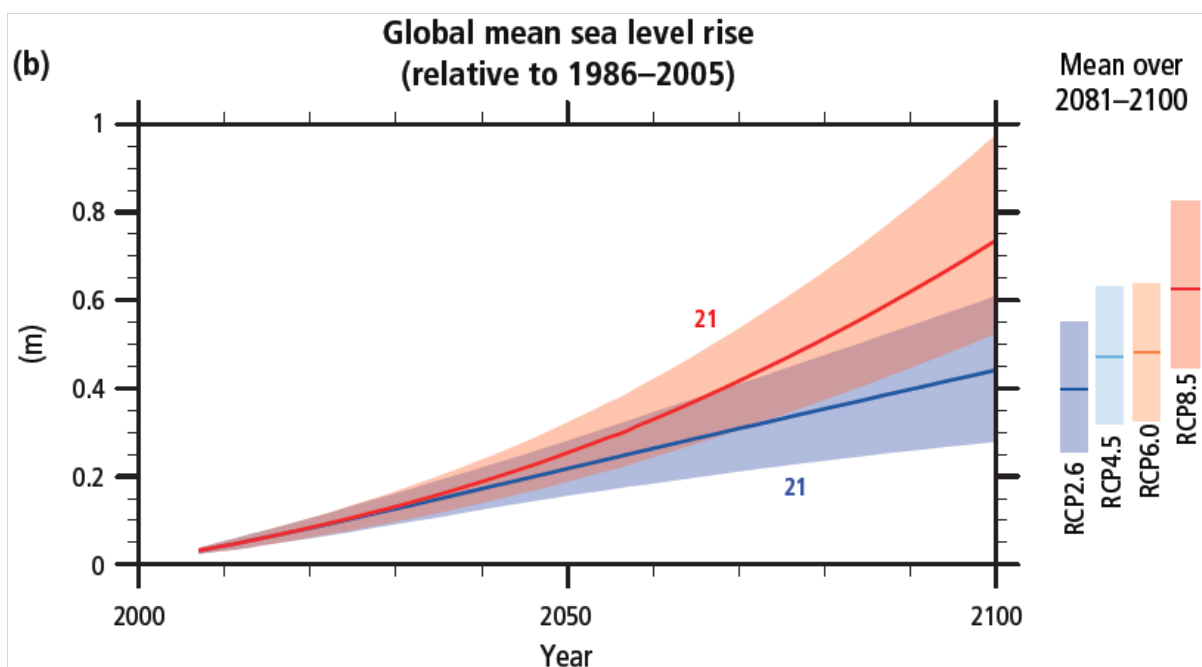


Figure B.2 Évolution du niveau moyen des mers selon le scénario climatique retenu

La figure B.3 présente la même information sous une forme différente, soit les enveloppes de valeurs à l'échéance 2081-2100 par rapport à la situation de 1986-2005. Cette figure est extraite du chapitre 13 du rapport scientifique¹³ (Assessment report).

¹² Climate change 2014 – Synthesis report – Summary for policymakers

(https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf)

¹³ WG1-AR5-Chapitre 13 « Sea level changes » (https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter13_FINAL.pdf)

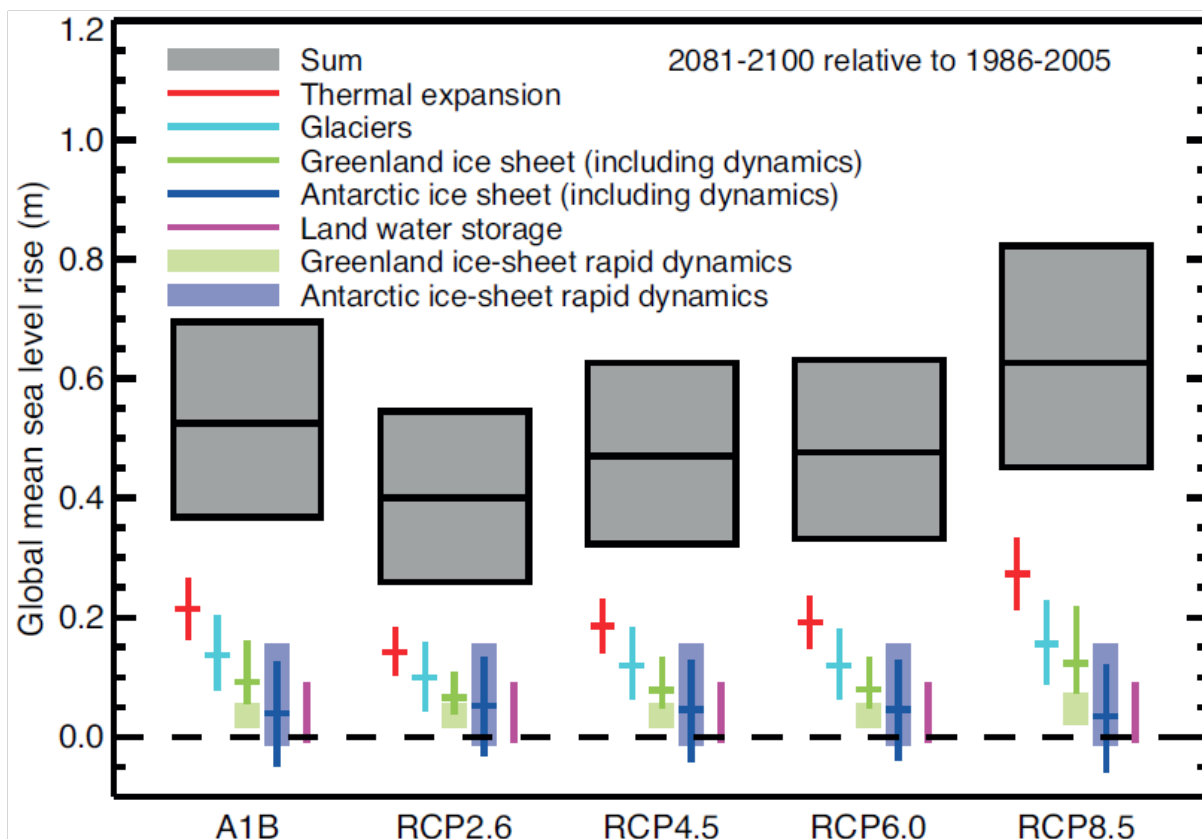


Figure B.3 Relèvement du niveau moyen des océans selon le scénario climatique retenu

La façon dont se déroulent les négociations en vue de la réduction d'émission de gaz à effet de serre et le niveau des engagements actuels de l'ensemble des gouvernements tendent à indiquer que c'est le pire scénario (RCP8.5) qui est probablement le plus réaliste pour l'instant. Du point de vue de l'ingénierie des ouvrages, il est également recommandé d'éviter les scénarios trop optimistes compte tenu des risques encourus.

Une courbe exponentielle a été ajustée sur la courbe moyenne du scénario RCP8.5 (figure B.2). La figure B.4 présente l'évolution (hausse) du niveau d'eau obtenue en fonction des années en prenant pour point de départ 2010. La ligne continue bleue représente l'évolution exponentielle alors que la courbe pointillée rouge représente l'évolution linéaire selon le taux de relèvement des niveaux d'eau actuellement observé. Aucune provision n'est incluse dans cette courbe pour la variation d'élévation de la croûte terrestre (relèvement isostatique).

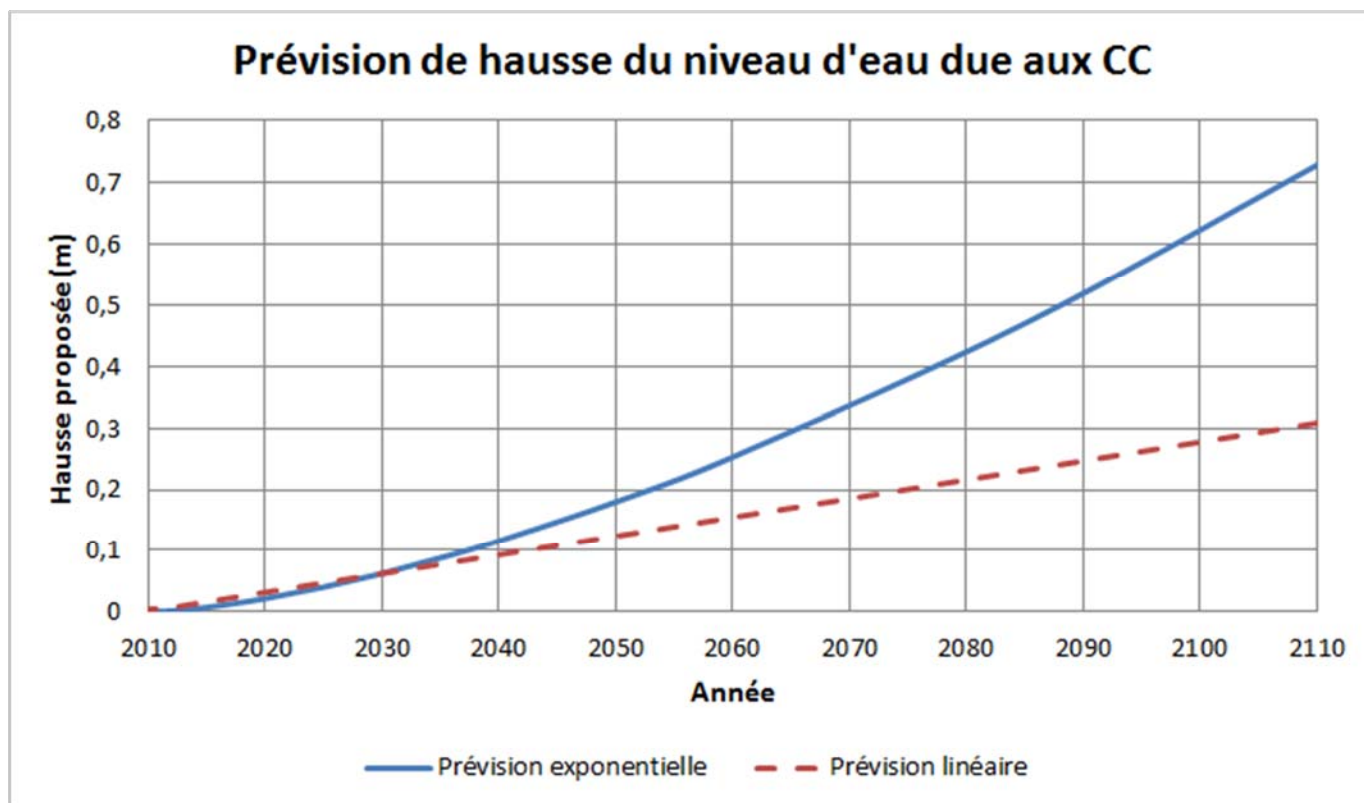


Figure B.4 Hausse de niveau d'eau proposée pour tenir compte des changements climatiques

Pour une échéance de 50 ans, cette courbe donne un rehaussement du niveau d'eau de 0,255 m.

B4 Relèvement isostatique dans la région de Québec

Ressources naturelles Canada (NRCan) met à la disposition du public un modèle permettant de calculer pour tout point au Canada le taux de mouvement de la croûte terrestre¹⁴.

Pour le site de la baie de Beauport, le taux de relèvement fourni par le modèle de NRCan est de 2,30 mm/an vers le haut. Il faudrait donc soustraire 115 mm (50 fois 2,3 mm) au rehaussement du niveau d'eau prévu à Beauport, ce qui donnerait un **rehaussement effectif du niveau d'eau de 0,14 m**.

¹⁴ <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/trx.php>

B5 Étude des hausses du niveau d'eau du MPO

Une étude récente¹⁵ a été publiée par Pêches et Océans Canada (MPO) à propos des valeurs de rehausse du niveau d'eau à considérer le long des côtes du Canada. Les tableaux 5b et 6b de cette étude donnent les chiffres suivants comme allocation de hausse de niveau d'eau à considérer à Saint-François IO pour le scénario RCP 8.5 et la période allant de 1995 à 2050 :

- 0,25 m pour la hausse non-corrigée du niveau d'eau et
- **0,16 m** pour la hausse des niveaux d'eau corrigée des mouvements de la croûte terrestre.

Les deux approches sont cohérentes. C'est la valeur corrigée recommandée par le MPO (0,16 m pour une échéance de 50 ans) qui sera retenue.

B6 Niveaux d'eau hauts recommandés à Québec

L'analyse des niveaux d'eau aux stations marégraphiques proches de Godbout indique que les concepteurs d'infrastructures côtières ou portuaires dans cette région du Saint-Laurent devraient se servir des niveaux d'eau suivants qui tiendraient compte de la hausse probable du niveau des océans dans les prochaines années :

- | | | | |
|-----------------------------|------------|----|--------------|
| - Une heure par 50 années : | +7,10 m ZC | ou | +5,14 m NMM |
| - Une heure par 30 années : | +6,91 m ZC | ou | +4,95 m NMM |
| - Une heure par 10 années : | +6,68 m ZC | ou | +4,72 m NMM |
| - Une heure par 5 années : | +6,57 m ZC | ou | +4,61 m NMM |
| - Une heure par 2 années : | +6,42 m ZC | ou | +4,46 m NMM |
| - Une heure par année : | +6,30 m ZC | ou | +4,34 m NMM. |

Il serait important de suivre l'évolution des prévisions de rehaussement de niveaux d'eau en relation avec les changements climatiques pour s'assurer de la pertinence des niveaux d'eau obtenus avec les recommandations officielles

¹⁵ Zhai L., B. Greenan, J. Hunter, T.S. James, G. Han, R. Thomson, and P. MacAulay 2014. Estimating Sea-level Allowances for the coasts of Canada and the adjacent United States using the Fifth Assessment Report of the IPCC. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean. Sci. 300: v + 146 pp.