



PORT DE QUÉBEC – EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT

Mise au point de la variante finale des plages

Modélisation numérique des conditions hydrosédimentologiques



9620, rue Saint-Patrick, LaSalle (Québec) Canada H8R 1R8

Téléphone : (514) 366-2970 / Télécopieur : (514) 366-2971

Site Internet : www.lasalleNHC.com

Courrier électronique : info@lasalleNHC.com

***Rapport présenté à
Administration portuaire de Québec***

**PORT DE QUÉBEC – EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Mise au point de la variante finale des plages
Modélisation des conditions hydrosédimentologiques**

- Final -

Rapport no 1873

Décembre 2014

Préparé par : <Originale signée par>

<Originale signée par>

Catherine Denault, ing.

Nicholas Gallant, ing. Jr

No OIQ : 129802

No OIQ : 5047189

<Originale signée par>

Marc Villeneuve, ing.

No OIQ : 46139

414-105 (1247)

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	iv
1.0 INTRODUCTION.....	1
2.0 MISE EN CONTEXTE	3
2.1 Zone à l'étude.....	3
2.2 Description du projet et études antérieures.....	4
2.3 Objectifs	5
3.0 SYNTHÈSE ET ANALYSE DES DONNÉES DISPONIBLES.....	8
3.1 Dynamique sédimentaire	8
3.2 Données granulométriques.....	11
3.3 Données bathymétriques et topographiques.....	11
3.3.1 Comparaison 2009-2013.....	12
3.3.2 Transects de plage	13
3.4 Épisodes de tempêtes	22
3.5 Niveaux de marée	22
3.6 Plan des aménagements par Hatch-Mott-MacDonald.....	23
3.7 Rencontre avec les utilisateurs du site.....	23
4.0 MODÉLISATION NUMÉRIQUE	26
4.1 Modules de modélisation numérique	26
4.1.1 Module hydrodynamique - MIKE 21 FM.....	26
4.1.2 Module de vagues - MIKE 21 SW	27
4.1.3 Module de transport sédimentaire - MIKE 21 ST	27
4.2 Zone modélisée	28
4.3 Numérisation de la bathymétrie	28
4.4 Conditions aux limites.....	34

TABLE DES MATIÈRES (suite)

4.5	Paramètres de calculs	34
4.5.1	Paramètres hydrodynamiques	34
4.5.1.1.	Frottement sur les fonds	34
4.5.1.2.	Viscosité turbulente	34
4.5.2	Paramètres de vagues	35
4.5.2.1.	Déferlement.....	35
4.5.2.2.	Frottement	35
4.5.3	Paramètres de transport sédimentaire	35
4.5.3.1.	Paramètres généraux	35
4.5.3.2.	Granulométrie.....	36
5.0	VARIANTES ÉTUDIÉES (Phase d'étude initiale)	37
5.1	Simulations préliminaires – Conditions actuelles	37
5.2	Concept et paramètres de conception	41
5.3	Variante étudiée – Volume de remblai de 650 000 m ³	42
5.3.1	Variante préliminaire: variante 1 et 2	42
5.3.2	Variante 3	43
5.3.3	Variante 4 et 5	44
5.3.4	Variante 6 et 6b	45
6.0	COMPARAISON DES CONDITIONS ACTUELLES ET FUTURES (VARIANTE 6B)	51
6.1	Tempête synthétique de l'ENE	51
6.1.1	Courants	51
6.1.2	Vagues	52
6.1.3	Changements morphologiques	52
6.2	Tempêtes du NE, de l'E et de l'OSO.....	53

TABLE DES MATIÈRES (suite)

7.0	OPTIMISATION FINALE – VARIANTES 2014	60
7.1	Contexte	60
7.2	Variantes à l'étude	60
7.3	Scénarios de modélisation	62
7.4	Résultats initiaux – Tempête synthétique de l'ENE	63
7.5	Raffinement de l'approche de modélisation	66
7.6	Simulation à long terme – Variante 2014-V5	67
7.7	Variante recommandée	68
7.8	Plage de kitesurf	69
8.0	CONCLUSIONS.....	72
	RÉFÉRENCES	74
	ANNEXE A – Dessins fournis par la firme CRI pour la modélisation des ouvrages	
	ANNEXE B – Vue en plan et en coupes de l'aménagement proposé (variante 6b)	

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Port de Québec – Secteur Beauport	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2 : Pointe de Beauport – Variante d'aménagement 2010	6
Figure 3 : Écarts de niveau entre le modèle de terrain 2005 et le modèle de terrain 1987	9
Figure 4 : Visite du site à l'automne 2009 - Composition des sédiments observés sur le site 10	
Figure 5 : Courbes granulométriques des forages dans la zone de dragage.....	15
Figure 6 : Modèle de terrain 2009	16
Figure 7 : Modèle de terrain 2013	17
Figure 8 : Écart de niveau bathymétrique 2013-2009.....	18
Figure 9 : Transects 1 à 6 - Bathymétries de 2013 et 2009	19
Figure 10 : Transects 7 à 12 - Bathymétries de 2013 et 2009	20
Figure 11 : Transects 13 à 18 - Bathymétries de 2013 et 2009	21
Figure 12 : Limites du modèle numérique et stations marégraphiques.....	24
Figure 13 : Variantes proposées par Lasalle NHC en 2007 et 2010, et variante Hatch-Mott-MacDonald.....	25
Figure 14 : Données utilisées dans le montage de la bathymétrie numérique	31
Figure 15 : Bathymétrie numérique	32
Figure 16 : Maillage de la bathymétrie numérique.....	33
Figure 17 : Tempête de mars 2008 - Érosion et déposition pour les conditions d'aménagement actuelles	38
Figure 18 : Dix-huit tempêtes du secteur ENE (1999-2013) - Érosion et déposition pour les conditions d'aménagement actuelles	39
Figure 19 : Tempête ponctuelle de l'ENE (23 m/s) - Érosion et déposition pour les conditions d'aménagement actuelles	40

LISTE DES FIGURES (suite)

Figure 20 : Vue en plan des variantes 1, 2 et 3.....	46
Figure 21 : Vue en plan des variantes 4 et 5.....	47
Figure 22 : Courants en présence de la variante 5.....	48
Figure 23 : Vue en plan des variantes 6 et 6b.....	49
Figure 24 : Courants en présence de la variante 6.....	50
Figure 25 : Courants de marée au flot en conditions actuelles et futures	54
Figure 26 : Courants de marée au jusant en conditions actuelles et futures.....	55
Figure 27 : Vagues à marée basse en conditions actuelles et futures.....	56
Figure 28 : Vagues à marée haute en conditions actuelles et futures	57
Figure 29 : Patrons d'érosion et de déposition en conditions actuelles et futures.....	58
Figure 30 : Patrons d'érosion et de déposition pour les vagues de l'ENE, du NE, de l'E et de l'OSO	59
Figure 31 : Nouvelle variante proposée par l'APQ (bleu) avec variante 6b (rouge)	61
Figure 32 : Variantes 2014-V1 et 2014-V5	62
Figure 33 : Transport littoral net le long des plages actuelles et projetées	65
Figure 34 : Profils initial et final de la nouvelle plage - Section no 4	68
Figure 35 : Évolution morphologique de la nouvelle plage	69
Figure 36 : Évolution morphologique de la plage de kitesurf	70
Figure 37 : Protection de la plage de kitesurf – Modification du brise-lames	71

1.0 INTRODUCTION

L'Administration portuaire de Québec (APQ) poursuit actuellement son projet d'extension du secteur portuaire Beauport. Au-delà des enjeux touchant directement les besoins et objectifs du port, ce projet comporte un important volet récréo-touristique comprenant notamment l'aménagement, à l'aide des sédiments dragués lors de la construction des nouveaux quais, de plages destinées à la baignade et aux sports nautiques.

Les impacts hydrodynamiques et sédimentologiques liés à ce projet ont fait l'objet ces dernières années d'études de modélisation numérique réalisée par Lasalle|NHC (anciennement le Groupe-Conseil LaSalle), voir réf. [1], [2] et [3]. En collaboration avec les Consultants Ropars Inc. (CRI), l'étude la plus récente, achevée en 2010, définissait le dimensionnement final de l'extension portuaire et une configuration préférentielle des plages. L'aménagement proposé minimisait les risques d'érosion de la plage par rapport aux conditions actuelles, et ajoutait une seconde plage du côté du rentrant sud-ouest destinée aux adeptes du kitesurf.

Plus récemment, l'APQ a confié à la firme Hatch-Mott-MacDonald un mandat d'estimation préliminaire du coût des travaux de l'extension portuaire proposée. Au cours de ce mandat, la configuration de l'extension a été passablement modifiée et la variante proposée a conduit à un déséquilibre important entre le volume de remblai requis et le volume de matériaux rendus disponibles par les dragages d'accès des nouveaux quais.

L'APQ désire aujourd'hui finaliser la configuration de l'extension portuaire dans le secteur des plages, en vue de passer aux phases d'avant-projet et projet. Pour ce faire, il importe de définir des géométries de plages permettant de minimiser les risques d'érosion et d'offrir une stabilité accrue par rapport aux conditions actuelles, et ce tout en assurant un équilibre entre les déblais et les remblais.

Réalisée en étroite collaboration avec la firme CRI, la présente étude repose sur des simulations intégrées des divers processus hydrodynamiques et sédimentaires affectant les plages en conditions actuelles et futures.

La méthodologie et les résultats sont présentés en six sections. La section 2 offre d'abord une description du projet et des objectifs de la présente étude. La section 3 présente ensuite les données de base utilisées pour les travaux d'analyse et de modélisation numérique. La section 4 résume l'approche préconisée lors de la mise en œuvre du modèle hydrosédimentologique.

La section 5 décrit ensuite les résultats de simulation obtenus en conditions actuelles et présente les principales variantes d'aménagement des plages développées en première phase d'étude, sur la base d'un volume de 650 000 m³ disponible pour le remblai de la zone récréotouristique. La section 6 compare systématiquement les conditions hydrodynamiques et sédimentaires obtenues pour l'aménagement actuel et la variante proposée au terme de cette première phase d'étude (variante 6B).

Suite à la remise de la première version du présent rapport, en février 2014, l'APQ a décidé, en juin 2014, d'abaisser à 400 000 m³ le volume de remblai utilisé pour la zone récréotouristique, dans le but notamment de limiter la distance entre la plage principale et les infrastructures riveraines existantes. La section 7 du présent rapport rend compte de l'optimisation finale de l'extension, sur la base de cette nouvelle hypothèse de volume.

2.0 MISE EN CONTEXTE

2.1 Zone à l'étude

Le projet d'expansion du port de Québec est situé dans 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 destinée à la baignade. Une flèche sableuse importante caractérise son extrémité nord. Une deuxième plage, du côté du rentrant sud-ouest, est utilisée par les adeptes de kitesurf.



2.2 Description du projet et études antérieures

Le projet d'extension portuaire du secteur Beauport consiste en la construction de nouveaux postes à quai (quais 54 et 55) en eau profonde dans le prolongement du quai 53, et d'un poste à type ducs d'Albe dans l'embouchure de la rivière Saint-Charles. Le projet comporte également un important volet récréotouristique, avec l'aménagement dans la portion nord de l'extension d'un parc et de plages destinées à la baignade et aux sports nautiques.

Au cours des dernières années, les conditions hydrodynamiques et sédimentologiques liées à ce projet ont fait l'objet d'études de modélisation numérique réalisées par Lasalle|NHC (anciennement le Groupe-Conseil LaSalle):

- En 2006 (réf. [1]), les premiers travaux de modélisation numérique ont permis d'étudier l'impact de l'angle des nouveaux quais sur les conditions hydrodynamiques à proximité de ces quais. Des premières variantes d'aménagement ont également été développées en vue de reproduire en conditions futures une plage soumise à des conditions hydrosédimentologiques similaires à celles agissant sur la plage existante. Au-delà de la ligne des quais, la définition de l'extension portuaire demeurerait toutefois préliminaire, ignorant notamment le volume des matériaux disponibles suite au dragage requis devant les nouveaux quais;
- Au terme d'une nouvelle étude réalisée en 2007 (réf. [2]), une configuration préférentielle de l'extension portuaire a été définie en collaboration avec les représentants de la firme d'ingénierie CIMA+. La variante retenue répondait aux besoins fonctionnels du port, permettait d'équilibrer les volumes de remblai avec ceux dragués devant les nouveaux quais, et surtout, était conçue de manière à minimiser les risques d'érosion de la nouvelle plage;
- Finalement, en 2010 (réf. [3]), une nouvelle étude réalisée en collaboration avec les Consultants Ropars Inc. (CRI) a été réalisée dans le but de finaliser le dimensionnement de l'extension portuaire mise au point en 2007, en cherchant notamment à minimiser les risques d'érosion et à confirmer la pérennité accrue de la plage proposée par rapport aux conditions actuelles. En cours d'étude, un

changement important a été apporté à l'aménagement étudié pour mieux répondre aux besoins de tous les utilisateurs du site. Une seconde plage a ainsi été aménagée du côté nord de la pointe, le long du rentrant sud-ouest, pour maintenir un accès à l'eau aux adeptes du kitesurf.

La configuration de l'extension portuaire finalement retenue au terme de l'étude complétée par Lasalle|NHC et CRI en 2010 est illustrée à la figure 2. Les installations portuaires sont inchangées par rapport à la proposition de 2007 et consistent en une nouvelle ligne de quai longue de 610 m formant un angle de 17° avec les quais 50 à 53, avec des fonds dragués à -16 m ZC¹ devant les quais. La plage principale est longue de 475 m et est orientée de manière à diminuer les courants littoraux et l'érosion qui en résulte en présence de vagues de tempêtes issues de l'est (E) et de l'est-nord-est (ENE). La jetée située à la limite nord de la plage agit comme un épi visant à freiner le transport littoral qui, en conditions actuelles, tend à déplacer le sable érodé le long de la plage vers le rentrant sud-ouest. Finalement, une deuxième plage est aménagée pour les kitesurfers à l'ouest de la plage principale.

2.3 Objectifs

En prévision des prochaines phases du projet, la configuration optimale de l'extension portuaire dans le secteur des plages doit maintenant être finalisée. Pour ce faire, il importe de définir des géométries de plages permettant de minimiser les risques d'érosion et d'offrir une stabilité accrue par rapport à la plage actuelle, et ce tout en respectant les volumes de remblai (matériaux provenant du dragage requis devant les nouveaux quais) disponibles pour l'aménagement du secteur des plages.

¹ (ZC) indique un niveau exprimé par rapport au zéro des cartes. À Québec, l'écart entre le zéro des cartes et le niveau géodésique (ou niveau moyen des mers (NMM)) est de 1,96 m. À la demande de l'APQ, les niveaux énoncés dans ce rapport et fournis sur les plans sont exprimés par rapport au zéro des cartes.

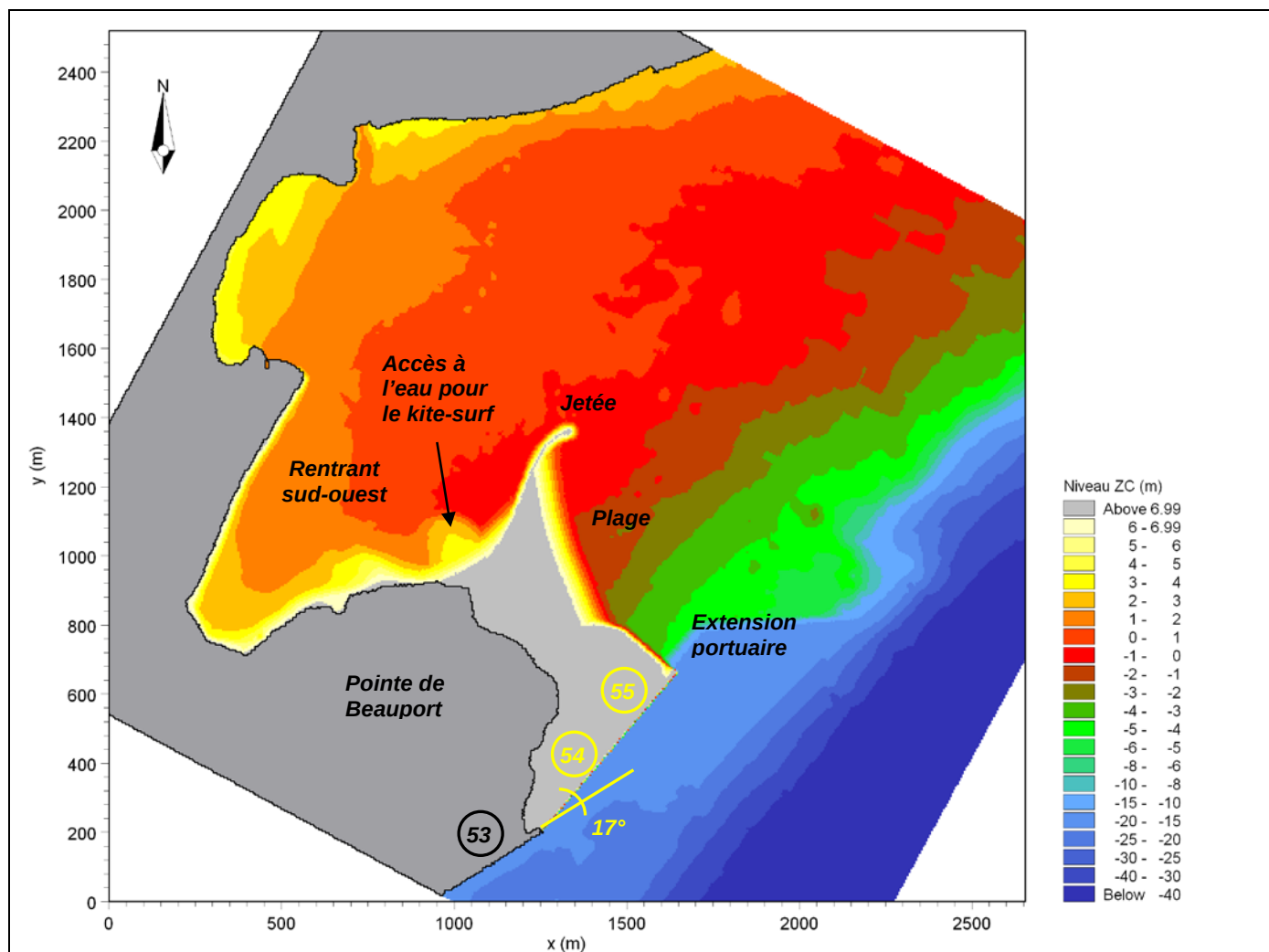


Figure 2 : Pointe de Beauport – Variante d'aménagement 2010

Plus spécifiquement, la présente étude vise les objectifs suivants:

- L'actualisation des paramètres de modélisation, intégrant notamment les nouvelles données topographiques et bathymétriques de la plage et les données granulométriques les plus récentes;
- L'optimisation de l'approche de modélisation et des outils numériques mis en œuvre dans le but d'obtenir une simulation intégrée des divers processus hydrodynamiques et sédimentaires affectant les plages en conditions actuelles et futures, visant également à permettre des simulations à plus long terme;
- Une rencontre avec un utilisateur expérimenté de la plage actuelle de kitesurf, en vue de bien saisir les particularités actuelles du site et les paramètres devant idéalement être conservés en conditions futures;
- La définition, en appui avec la firme CRI, de la forme optimale des futures plages;
- La préparation de plans AutoCAD illustrant la variante recommandée pour permettre à la firme en charge de la prochaine phase du projet d'intégrer les plages dans la conception de l'extension portuaire.

3.0 SYNTHÈSE ET ANALYSE DES DONNÉES DISPONIBLES

Diverses sources d'informations et de nouvelles données sont devenues disponibles depuis l'étude de 2010. Les sections suivantes présentent la synthèse et l'analyse des données disponibles.

3.1 Dynamique sédimentaire

Dans le cadre de l'étude réalisée par Lasalle|NHC en 2010 [3], une analyse de photos aériennes (effectuée par la firme Cima+) et une visite du site ont permis d'identifier les principales caractéristiques de l'évolution morphologique et de la dynamique sédimentaire de la pointe de Beauport. Un bref rappel de ces informations est présenté dans les paragraphes suivants.

La comparaison des modèles de terrain résultant de l'analyse des photos aériennes datant de 1987 et 2005 montre que la plage de Beauport a subi des changements morphologiques notables pendant cette période. Les écarts de niveau entre les deux modèles de terrain (figure 3) montrent une nette tendance à l'érosion dans la portion sud de la pointe, et à la déposition dans la portion nord de celle-ci. Les sables érodés le long de la plage migrent vers le nord, menant à la création de la flèche sableuse bien visible en conditions actuelles (voir figure 1). Une portion des sables contourne cette flèche et vient s'accumuler dans les zones calmes du rentrant sud-ouest.

Les observations visuelles faites sur le site appuient les conclusions déduites de la comparaison des modèles de terrain. Dans la partie sud de la pointe, la plage comporte une fraction importante de matériaux grossiers. L'érosion des sédiments plus fins n'a laissé en place que des sédiments de plus gros calibre. On observe également dans cette zone un recul important des talus dans le haut de plage. Dans la section médiane de la plage, la proportion de sable est plus élevée et les cailloux et graviers qui s'y trouvent sont de taille moins importante que dans la zone située plus au sud. Finalement, plus au nord, et du côté du rentrant sud-ouest, les sédiments sont majoritairement composés de sable (figure 4). Le long de la plage, il y a transfert de la partie fine des sédiments du sud vers le nord.

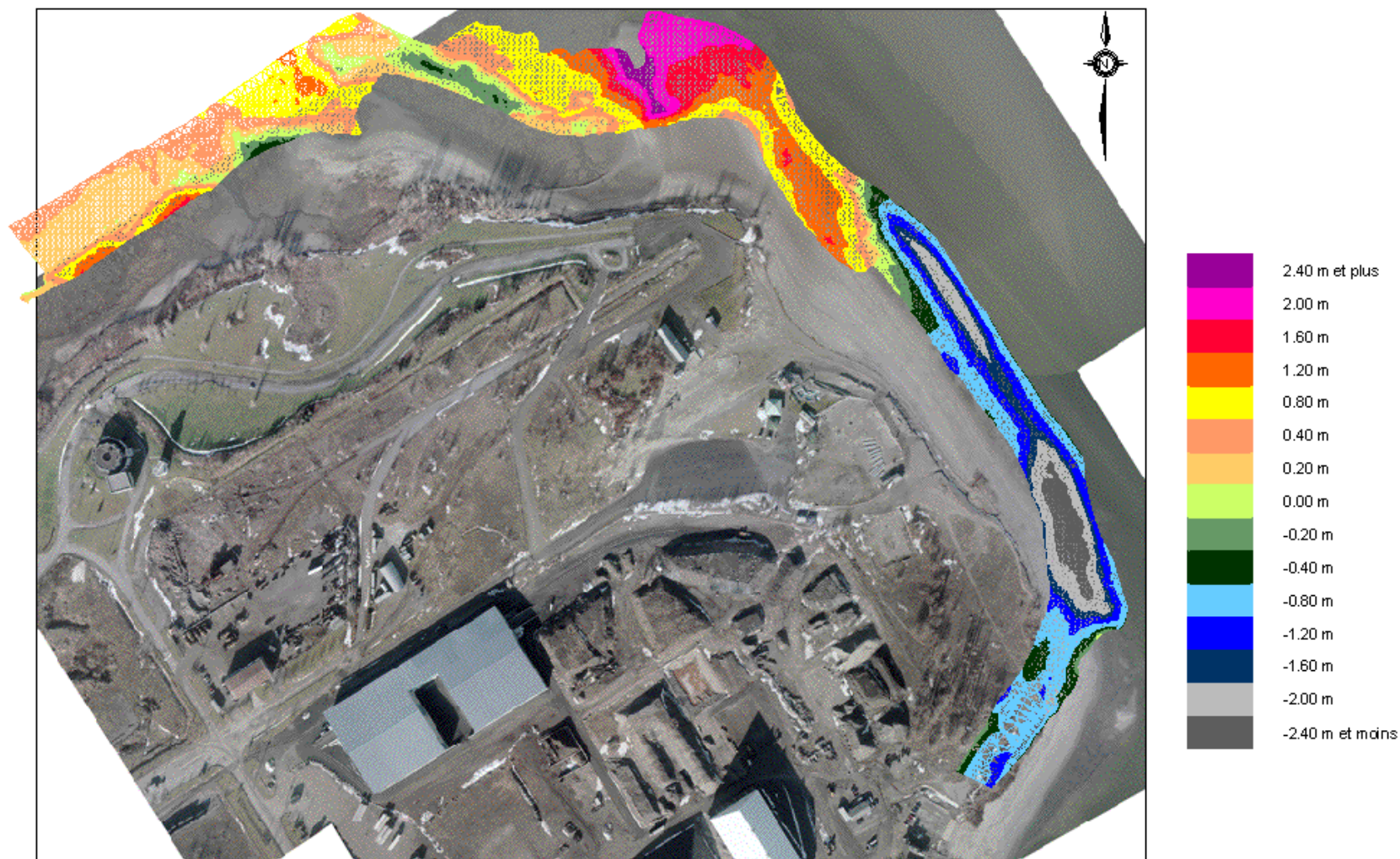


Figure 3 : Écarts de niveau entre le modèle de terrain 2005 et le modèle de terrain 1987



Figure 4 : Visite du site à l'automne 2009 - Composition des sédiments observés sur le site

D'après le transport sédimentaire observé, le moteur principal de l'érosion réside dans l'agitation et les courants littoraux créés par les vagues de tempêtes issues des secteurs nord-est (NE) à est (E).

3.2 Données granulométriques

Les données granulométriques résultant de l'analyse des forages effectués dans le cadre de la caractérisation environnementale de la zone à l'étude ont été fournies par la firme CRI. Le rapport d'étude de la firme CRI donne plus de détails à ce sujet (réf. [4]).

La figure 5 illustre les courbes granulométriques des sédiments qui se trouvent dans la zone qui sera draguée. D'après ces courbes, le diamètre moyen des sables qui seront disponibles pour le remblai des nouvelles plages est de l'ordre de 0,5 mm.

3.3 Données bathymétriques et topographiques

Au moment de débiter la présente étude, l'APQ nous avait fourni de nouveaux relevés bathymétriques effectués dans la zone à l'étude par le Service hydrographique du Canada (SHC), en août 2013.

Ces relevés étaient malheureusement très fragmentaires pour les niveaux supérieurs aux isobathes 0 à +2 m ZC, fort probablement à cause des profondeurs d'eau insuffisantes par rapport au tirant d'eau du bateau effectuant les sondages. En l'absence d'information dans la zone littorale, les nouveaux relevés ne permettaient donc pas d'évaluer l'évolution morphologique de la plage depuis la réalisation des relevés précédents, en 2009.

Les nouveaux relevés n'apportant pas véritablement de nouvelle information par rapport à ceux, plus complets, de 2009, il avait été décidé en début d'étude de réaliser l'optimisation des nouvelles variantes en présence des données bathymétriques et topographiques de 2009. Les simulations ayant mené au développement de la variante 6b (650 000 m³ de remblai) ont donc été effectuées avec le modèle de terrain basé sur les données de 2009.

La version initiale du présent rapport recommandait d'ailleurs de reprendre de nouveaux relevés dans la zone littorale, en préconisant une couverture similaire à celle des sondages de 2009.

Lorsque l'APQ a décidé de réduire le volume des matériaux alloué au secteur des plages (i.e. de 650 000 à 400 000 m³), ses représentants nous ont toutefois fournis des relevés effectués dans la zone littorale, en juillet et août 2013. Ces informations ont alors été combinées aux dernières données bathymétriques du SHC (août 2013) pour mettre à jour le modèle de terrain utilisé pour nos simulations. L'optimisation finale de l'extension portuaire (section 7) intègre donc les données bathymétriques les plus récentes dans la zone à l'étude.

3.3.1 Comparaison 2009-2013

Pour connaître l'évolution morphologique de la pointe de Beauport au cours des dernières années, une comparaison a été effectuée entre les données bathymétriques complètes de 2013 et celles de 2009 utilisées lors de notre dernière étude.

Les figures 6 et 7 présentent respectivement les modèles de terrain obtenus aux abords de la plage actuelle à partir des relevés de 2009 et 2013, alors que la figure 8 présente les écarts entre ces deux bathymétries. Sur la majeure partie de la plage actuelle, la comparaison indique clairement des conditions érosives (illustrées en rouge sur la figure), avec des abaissements des fonds de 0,5 à 1,0 m dans la portion centrale de la plage. De tels résultats expriment un recul considérable de la plage pour une période relativement court de 4 ans.

Contrairement à l'analyse des photos aériennes de 2005 et 1987, dont les résultats sont indiqués à la figure 3, la comparaison des bathymétries de 2013 et 2009 montrent une tendance érosive sur presque l'ensemble de la plage, et non seulement sur la portion sud. Une nette tendance à la sédimentation (rehaussement des fonds indiqués en vert sur la figure 8) n'est observée qu'aux abords de la flèche sableuse, qui a nettement progressée vers le nord entre 2009 et 2013. Les résultats de la figure 8 semblent montrer que la croissance de la flèche sableuse s'effectue à partir des sables érodés dans la portion nord de la plage.

Cette tendance à la sédimentation moins marquée que dans la comparaison 2005-1987 tend à indiquer que l'ensemble de la plage actuelle est en recul, les sables érodés dans la portion sud de la plage étant transportés vers le large et ceux érodés dans la portion nord se déplaçant vers le rentrant sud-ouest via la flèche sableuse.

Pour les deux périodes d'analyse, le constat est clair : la plage actuelle n'est pas en équilibre et, par surcroît, l'érosion de sa portion nord contribue à l'ensablement du rentrant sud-ouest

Outre les changements morphologiques le long de la plage, la comparaison 2013-2009 révèle d'autres modifications notables de la bathymétrie :

- Sur l'ensemble de la batture, la figure 8 montre un léger rehaussement des fonds, de l'ordre de 0 à 25 cm; il est difficile d'expliquer cet écart, qui indiquerait une sédimentation nette sur la batture, autrement que par la précision des relevés ou, plus probablement, par les variations saisonnières des conditions hydro-sédimentologiques liées à la présence de glace et à la crue du Saint-Laurent;
- Une érosion notable est indiquée entre 2009 et 2013 le long des quais 52 et 53; ces écarts sont toutefois liés aux travaux de dragage et ne témoignent pas de l'évolution naturelle de la morphologie des fonds;
- Derrière l'extrémité du quai 53, la figure 8 montre une érosion importante. Cette dernière ne résulte toutefois que de l'absence de données en 2013 dans ce secteur localisé.

3.3.2 Transects de plage

À la demande de la firme CRI, des transects (sections-en-travers) ont été extraits des modèles de terrain 2009 et 2013 afin de connaître les pentes de la plage actuelle et son évolution au cours des dernières années.

Au total, dix-huit transects ont été définis le long de la plage actuelle, suivant un espacement de 25 m dans la portion nord de la plage, et 50 m dans la portion plus au sud. Les figures 9,

10 et 11 illustrent la localisation de ces transects et les profils correspondants extraits des bathymétries de 2009 et 2013.

La comparaison des profils de 2013 et 2009 confirment essentiellement les résultats déjà observés, soit des conditions érosives sur la majeure partie de la plage. Les pentes sont plus raides dans la portion sud de la plage que dans sa portion nord, ce qui indique une sollicitation accrue par les vagues dans la portion sud de la plage. Au pied de la plage, et sur une distance importante vers la batture, l'ensemble des profils montrent de l'ensablement, une tendance déjà observée à la figure 8 mais dont l'explication n'est pas claire.

Il existe diverses équations théoriques ou empiriques pour calculer le profil à l'équilibre d'une plage à partir des caractéristiques du matériel la constituant (réf. [4]). En version très simplifiée, la pente d'équilibre de la plage est déterminée en fonction du diamètre médian des matériaux (D_{50}). Par analogie, pour une pente de plage donnée, il est également possible de calculer le D_{50} des sédiments. Cet exercice a été réalisé par la firme CRI pour chacun des transects de la plage de Beauport.

L'analyse a démontré une grande variabilité des diamètres caractéristiques le long de la plage, allant de 0,6 mm (transects 4 à 6) à 20 mm (transect 13). Ce résultat est cohérent avec les sédiments observés sur le site (figure 4). Pour la conception des futures plages, on retient de cette analyse que les pentes des transects 4 à 6 ont un diamètre caractéristique très près de celui des sédiments qui seront utilisés pour construire les nouvelles plages (0,6 mm versus 0,5 mm).

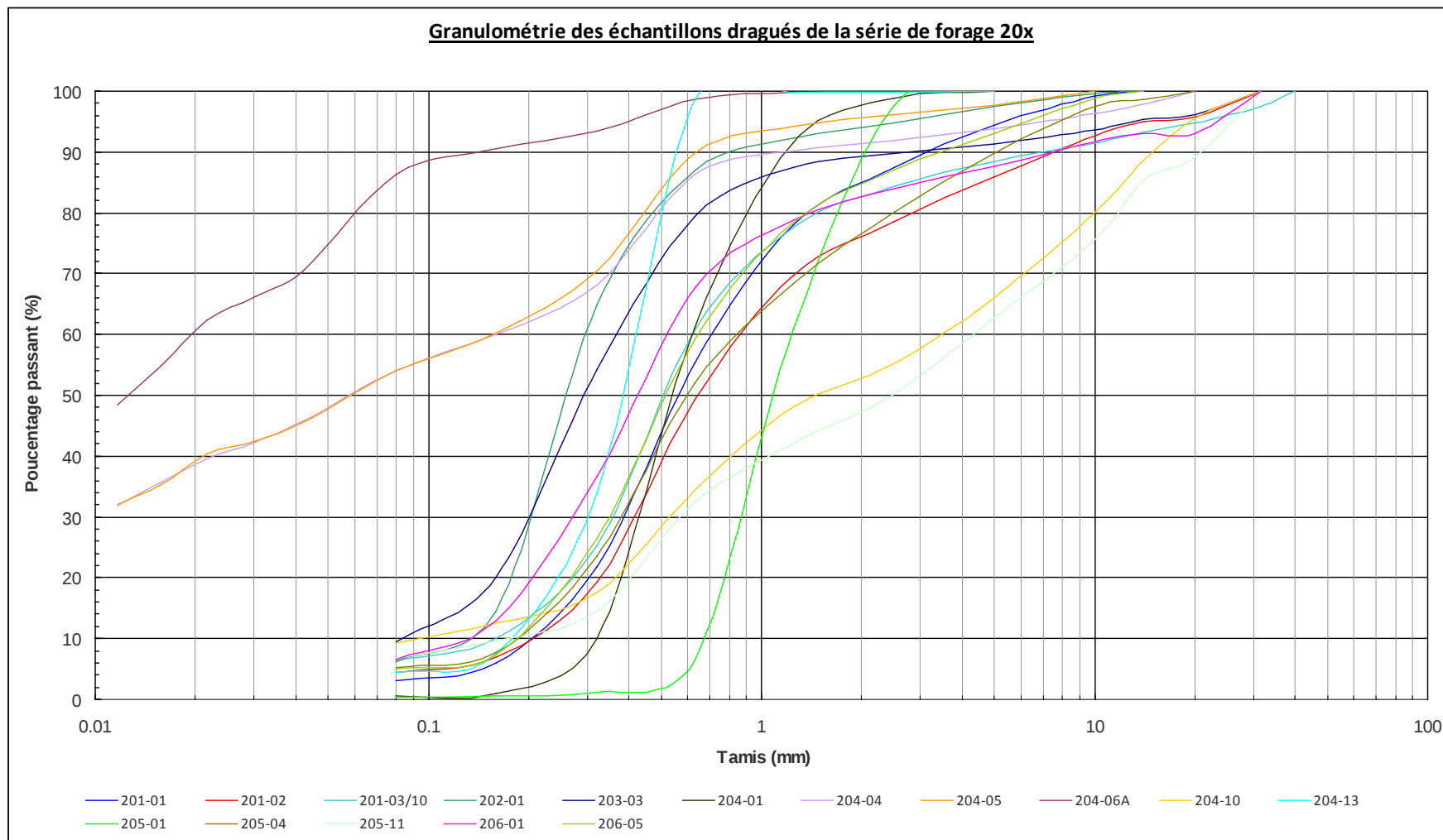


Figure 5 : Courbes granulométriques des forages dans la zone de dragage

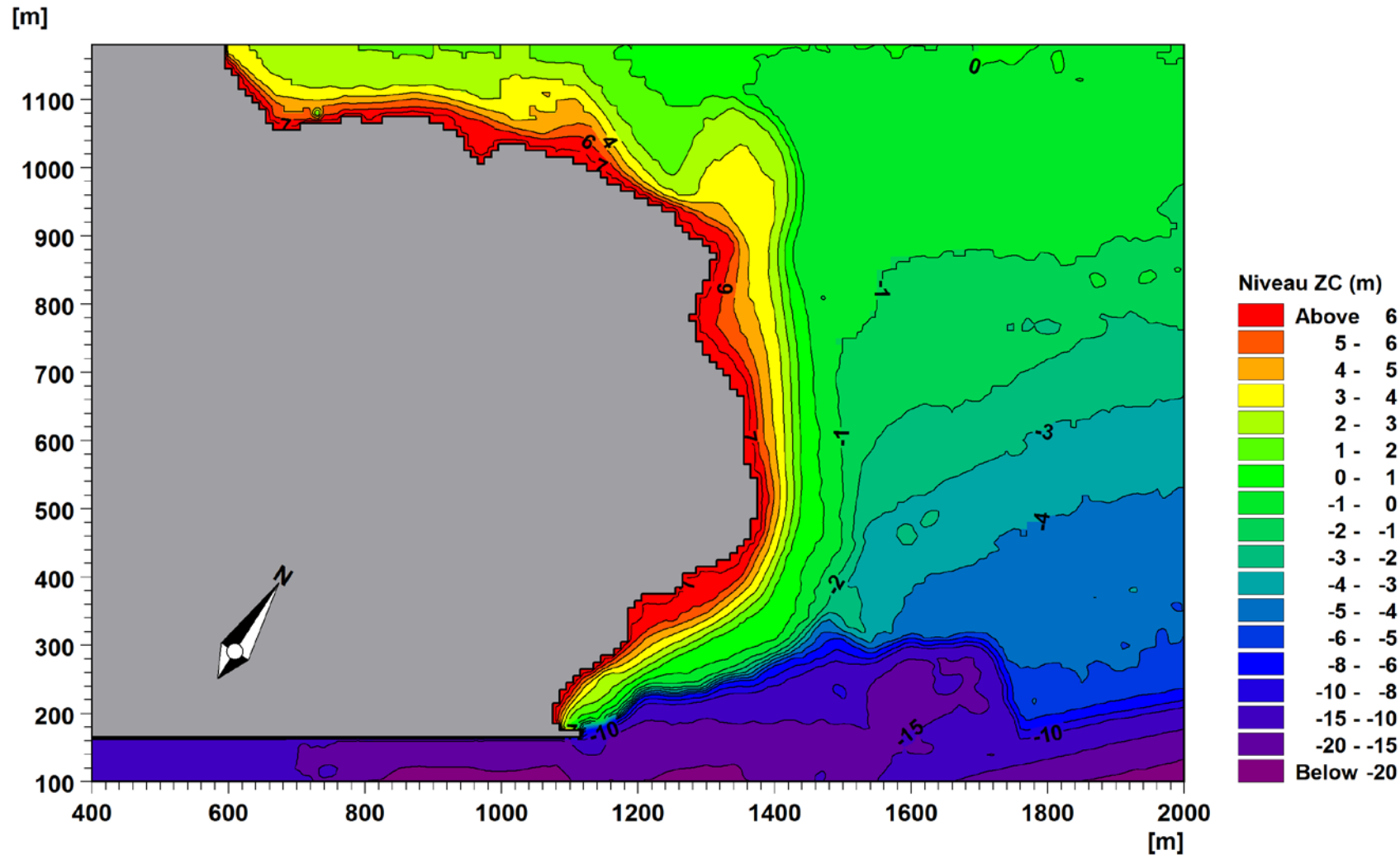


Figure 6 : Modèle de terrain 2009

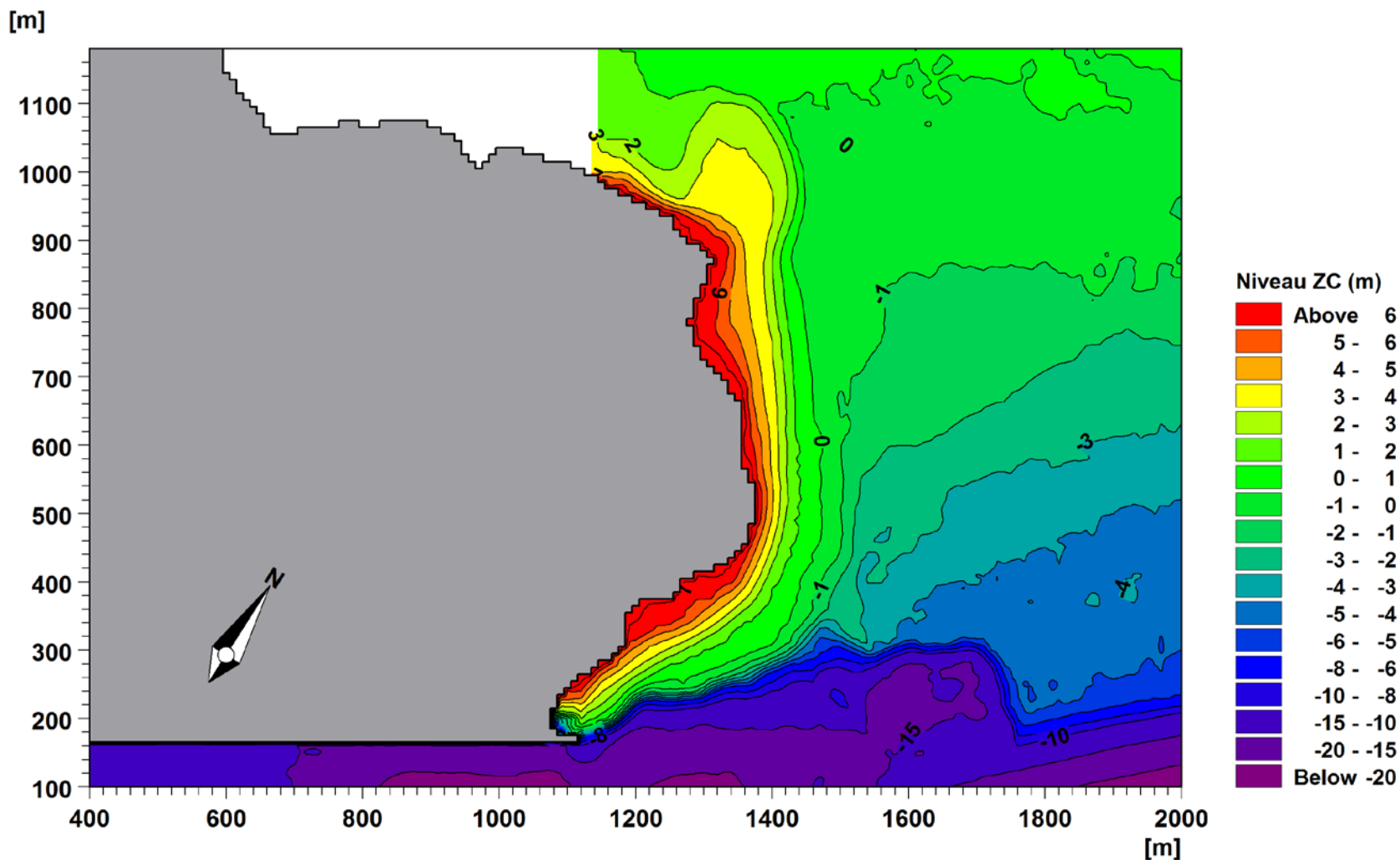


Figure 7 : Modèle de terrain 2013

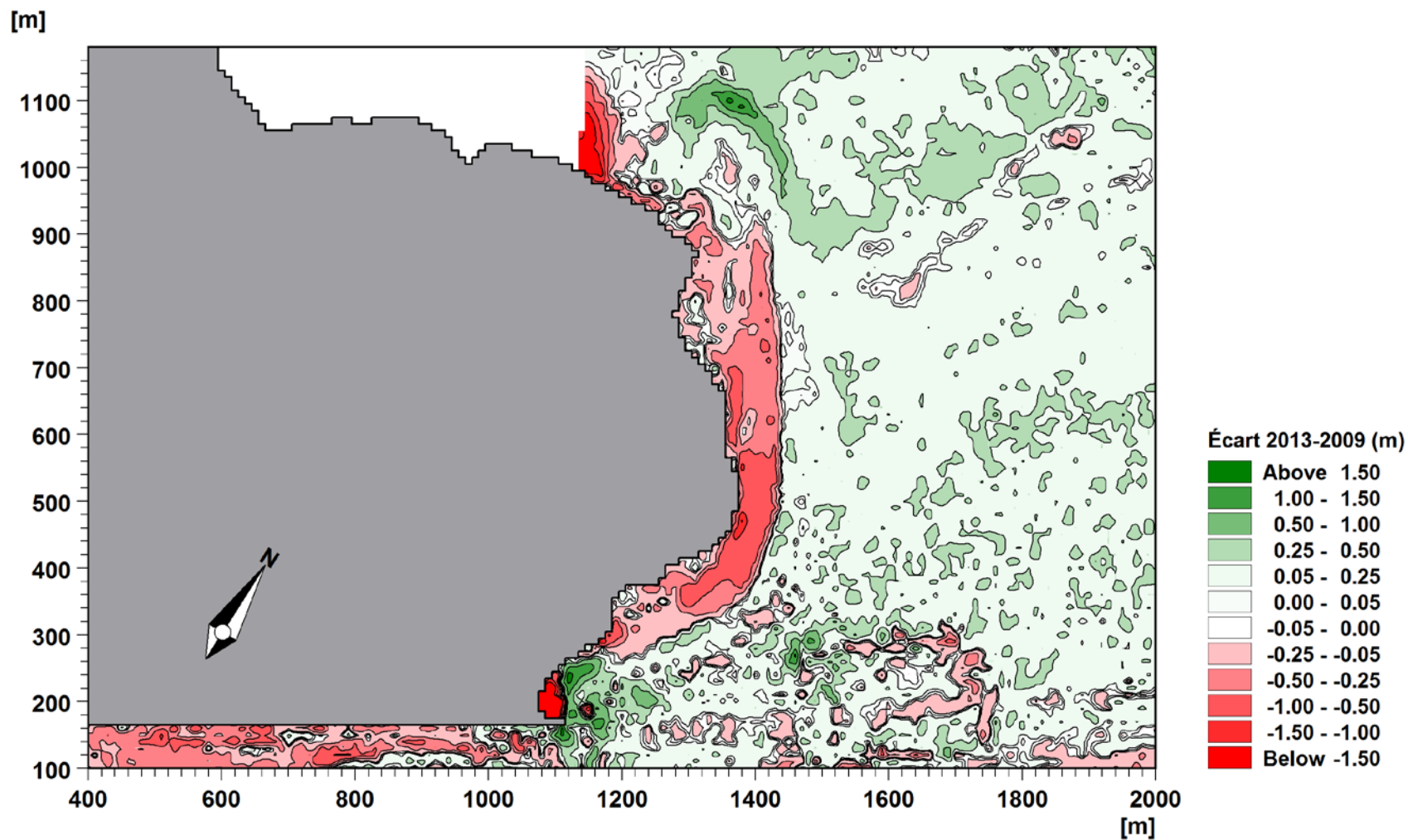


Figure 8 : Écart de niveau bathymétrique 2013-2009

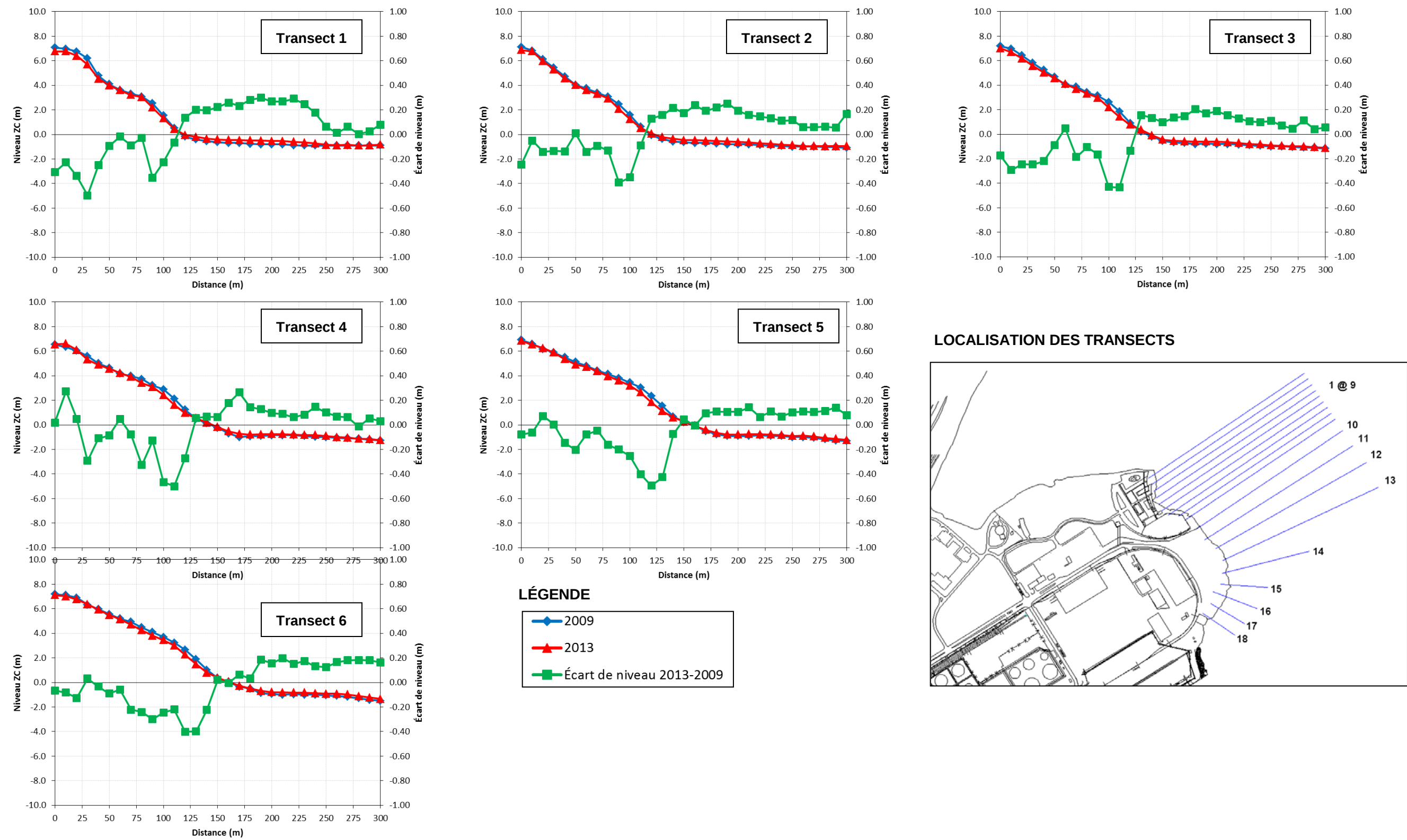
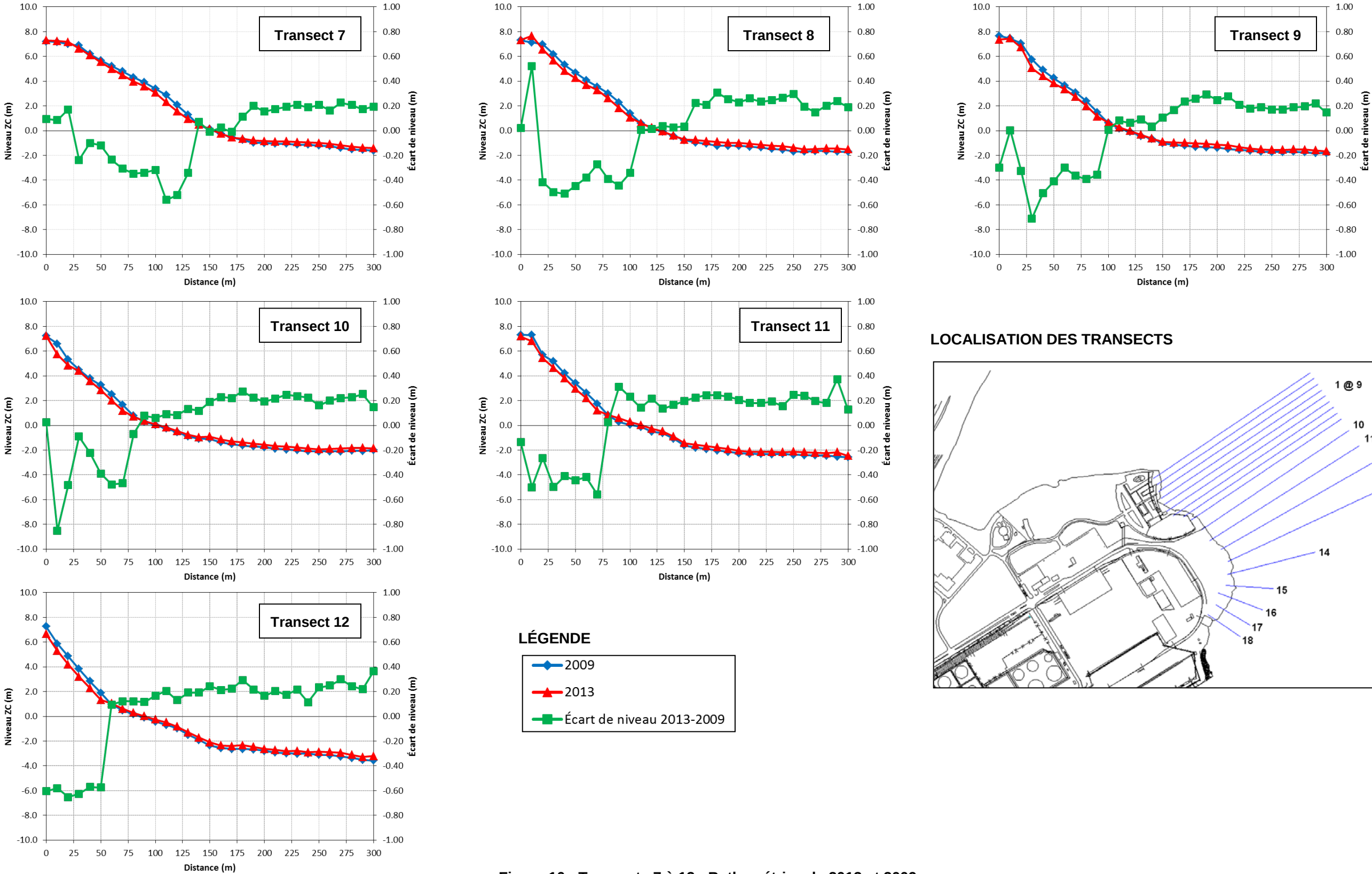


Figure 9 : Transects 1 à 6 - Bathymétries de 2013 et 2009



LOCALISATION DES TRANSECTS

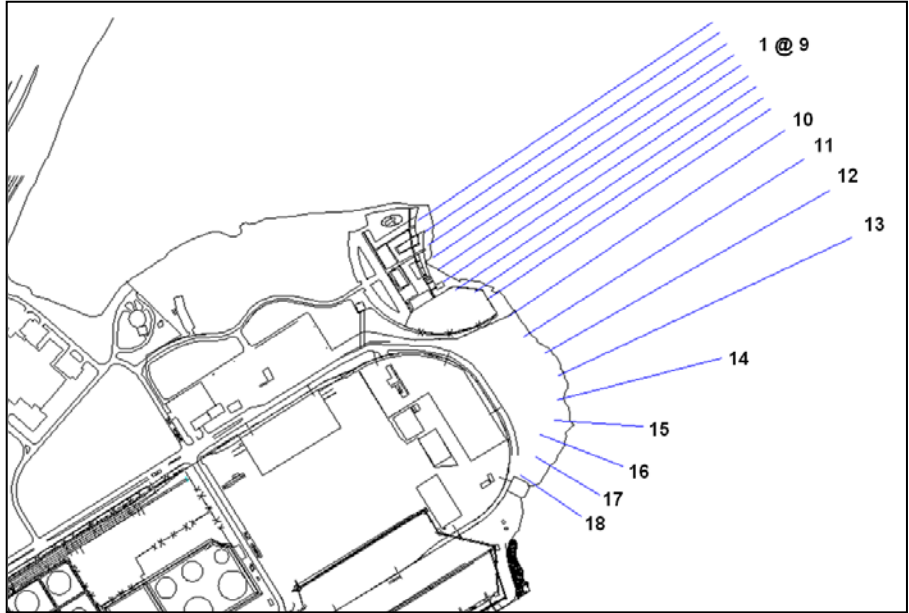
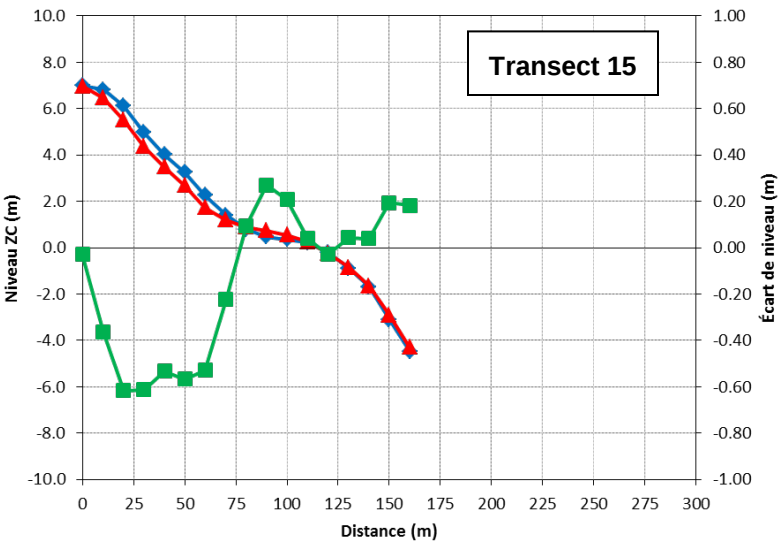
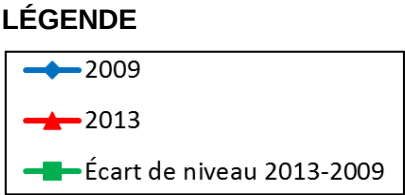
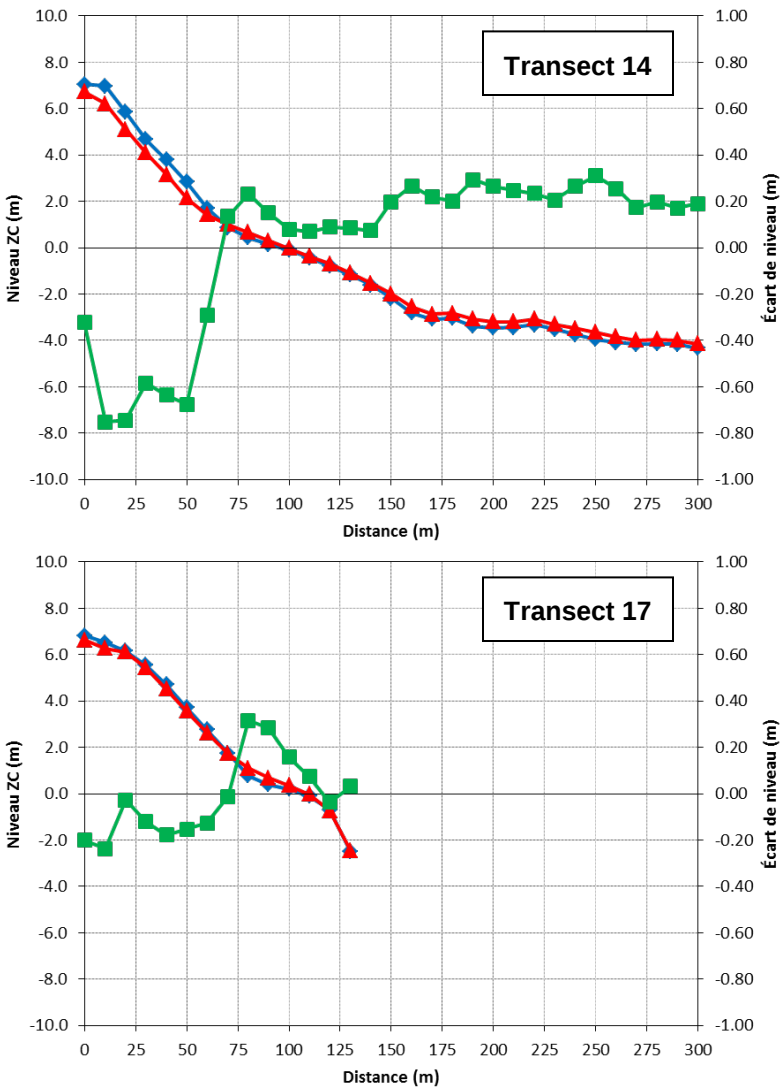
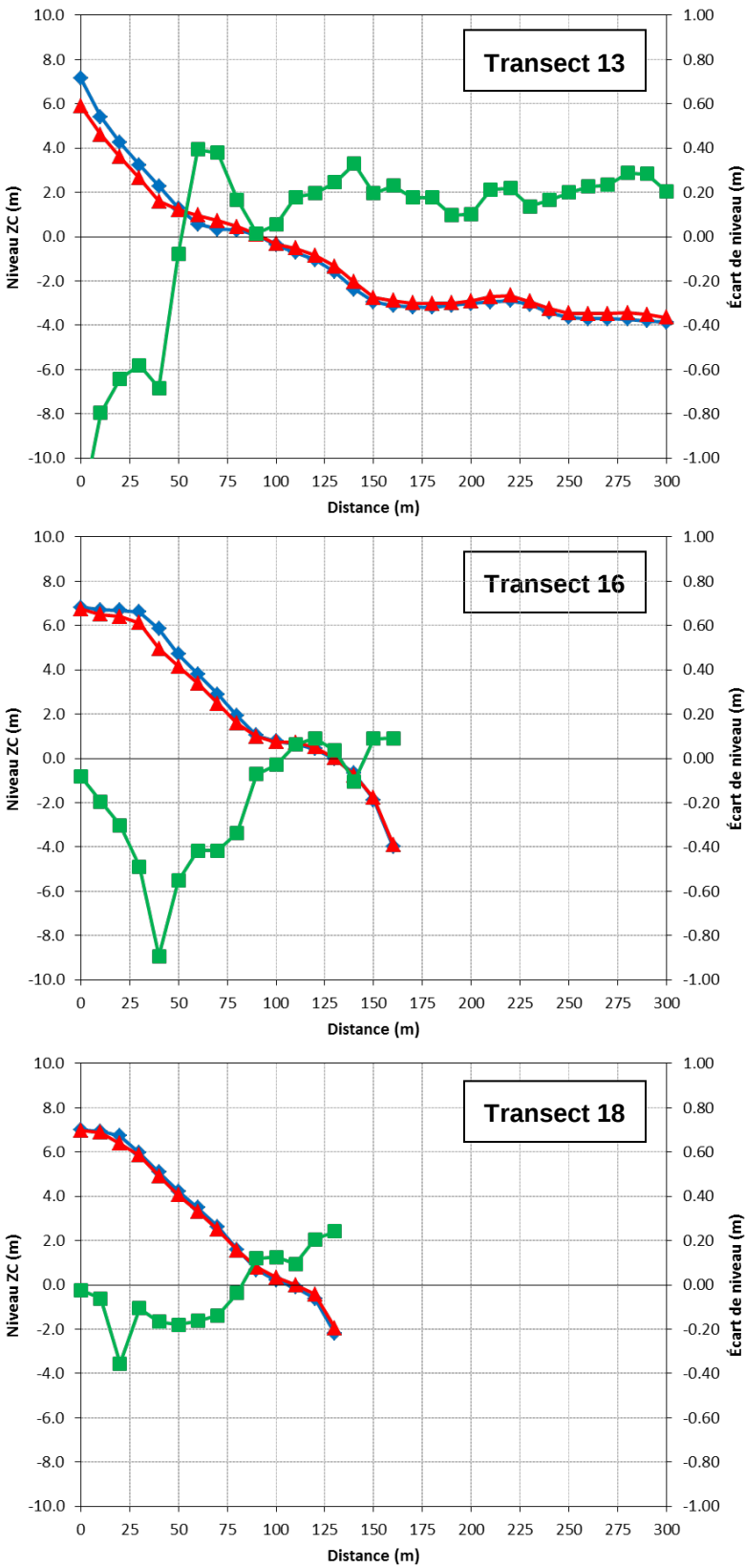


Figure 10 : Transects 7 à 12 - Bathymétries de 2013 et 2009



LOCALISATION DES TRANSECTS

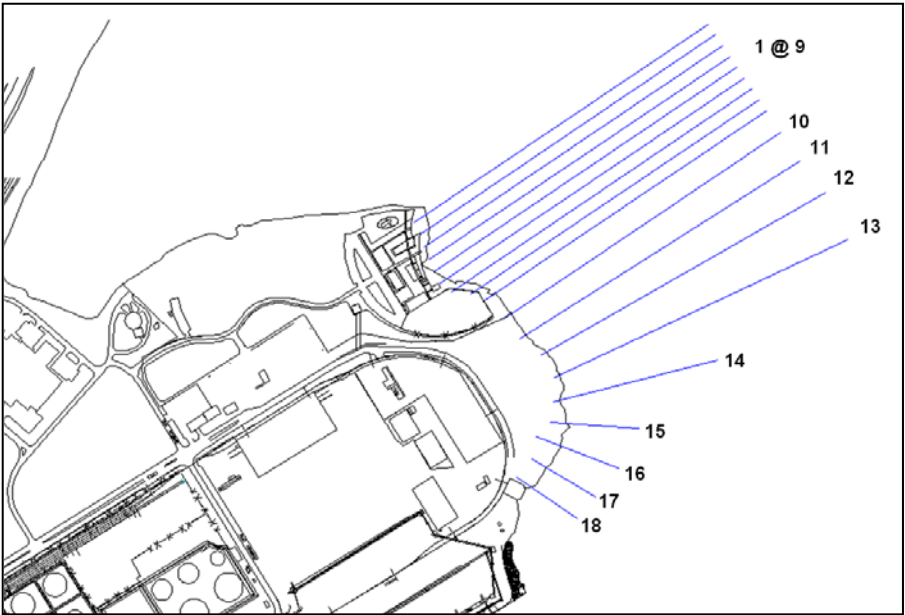


Figure 11 : Transects 13 à 18 - Bathymétries de 2013 et 2009

3.4 Épisodes de tempêtes

Lors des études précédentes de 2007 et 2010, les simulations de transport sédimentaire utilisaient des épisodes de tempête isolée, en provenance d'une direction donnée, soit l'est (E) ou l'est-nord-est (ENE). Afin de mieux prédire le comportement morphologique des plages actuelles et futures, l'approche de modélisation a cette fois-ci été modifiée pour intégrer plusieurs épisodes de tempêtes.

La firme CRI a ainsi passé en revue les données météorologiques recueillies à la station de Beauport lors des treize années de données disponibles (199-2013) et a identifié les épisodes de tempête les plus marquants pendant cette période pour les vents issus du secteur général ENE et les vents issus du secteur général SO (réf. [4]). Au total, 18 épisodes de 48 heures ont été identifiés pour le secteur nord-est, et 14 épisodes de 48 heures ont été identifiés pour le secteur sud-ouest. Placées l'une à la suite de l'autre, ces tempêtes forment des séries temporelles de 36 jours pour le NE¹ et de 28 jours pour le SO.

À noter que les vents horaires présentant les plus grandes vitesses dans la base de données des vents à Beauport proviennent de l'ENE et atteignent 80 km/h (22,2 m/s).

3.5 Niveaux de marée

Les niveaux de marée prédits à différents endroits le long du fleuve Saint-Laurent sont connus grâce aux tables de marée. Offertes sous forme de document publié annuellement par Pêches et Océans Canada, elles sont également disponibles en ligne pour les deux dernières années et l'année en cours. À noter que des niveaux d'eau mesurés sont également disponibles, mais que ceux-ci ne sont offerts qu'à un nombre limité de stations, et pour des périodes souvent très courtes.

Pour reconstituer les séries temporelles de niveaux de marée correspondant aux épisodes de tempêtes décrits à la section précédente (entre 1999 et 2013), une demande a été adressée

¹ Lors des simulations hydrosédimentologiques, les périodes de transition entre chacune des tempêtes ont mené à une durée totale de 49 jours pour la modélisation des treize années de tempêtes du secteur NE.

au Service hydrographique du Canada (SHC) afin d'obtenir les composantes harmoniques utilisées dans la prévision des signaux de marée des treize dernières années aux stations coïncidant avec l'emplacement des limites du modèle numérique (figure 12).

Après des délais administratifs considérables, le SHC a fourni les données demandées et les signaux de marée ont pu être reconstitués aux stations de Sainte-Anne-de-Beaupré (station 3087), Montmorency (station 3095), Saint-Laurent-de-l'île-d'Orléans (station 3110) et Quai Irving (station 3264).

3.6 Plan des aménagements par Hatch-Mott-MacDonald

L'APQ a confié à la firme Hatch-Mott-MacDonald un mandat d'estimation préliminaire (classe C) du coût des travaux de l'extension portuaire issue des études de 2007 et 2010. Au cours de ce mandat, la configuration de l'aménagement a toutefois été passablement modifiée par rapport aux variantes proposées antérieurement. La figure 13 compare les variantes d'aménagement 2007, 2010 et celle de Hatch-Mott-MacDonald. La géométrie du nouveau terminal portuaire est inchangée, mais l'épi protecteur des plages (ou brise-lames) est significativement déplacé vers le large.

3.7 Rencontre avec les utilisateurs du site

Tel que mentionné précédemment, le présent mandat prévoyait une rencontre avec les utilisateurs du site actuel, notamment les adeptes de planche à voile et de kitesurf. Une première rencontre a eu lieu le 23 janvier 2014 avec des représentants de la firme Gestev, qui gère les installations récréo-touristiques de la pointe de Beauport. Lors de cette rencontre, tenue en présence du représentant de l'APQ et de M. Yann Ropars, de la firme CRI, il avait été convenu d'obtenir auprès des usagers du site une liste des points à prendre en compte lors de la mise au point de la variante finale des plages. Au moment de produire le présent rapport, ces informations n'avaient toutefois pas été obtenues.

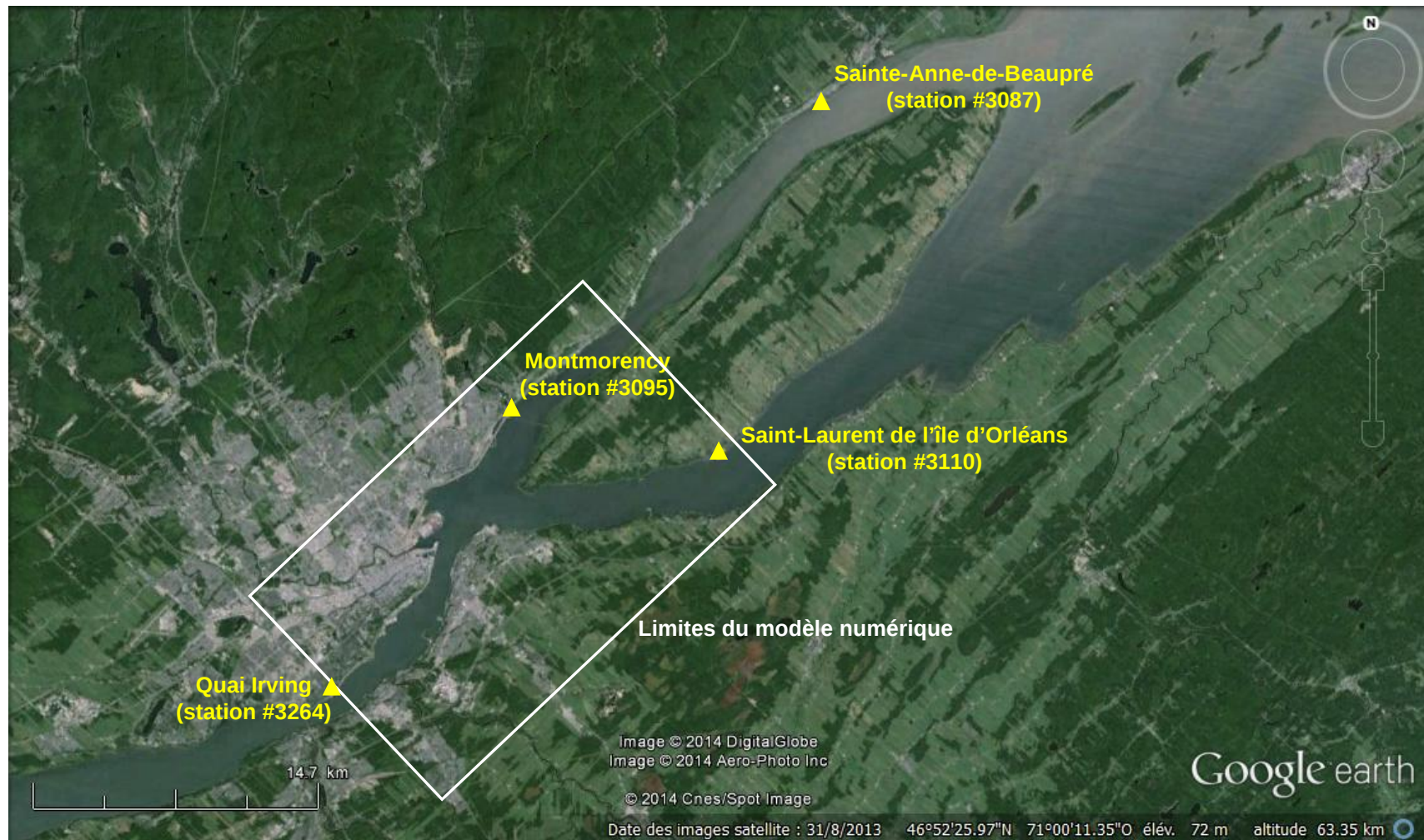


Figure 12 : Limites du modèle numérique et stations marégraphiques

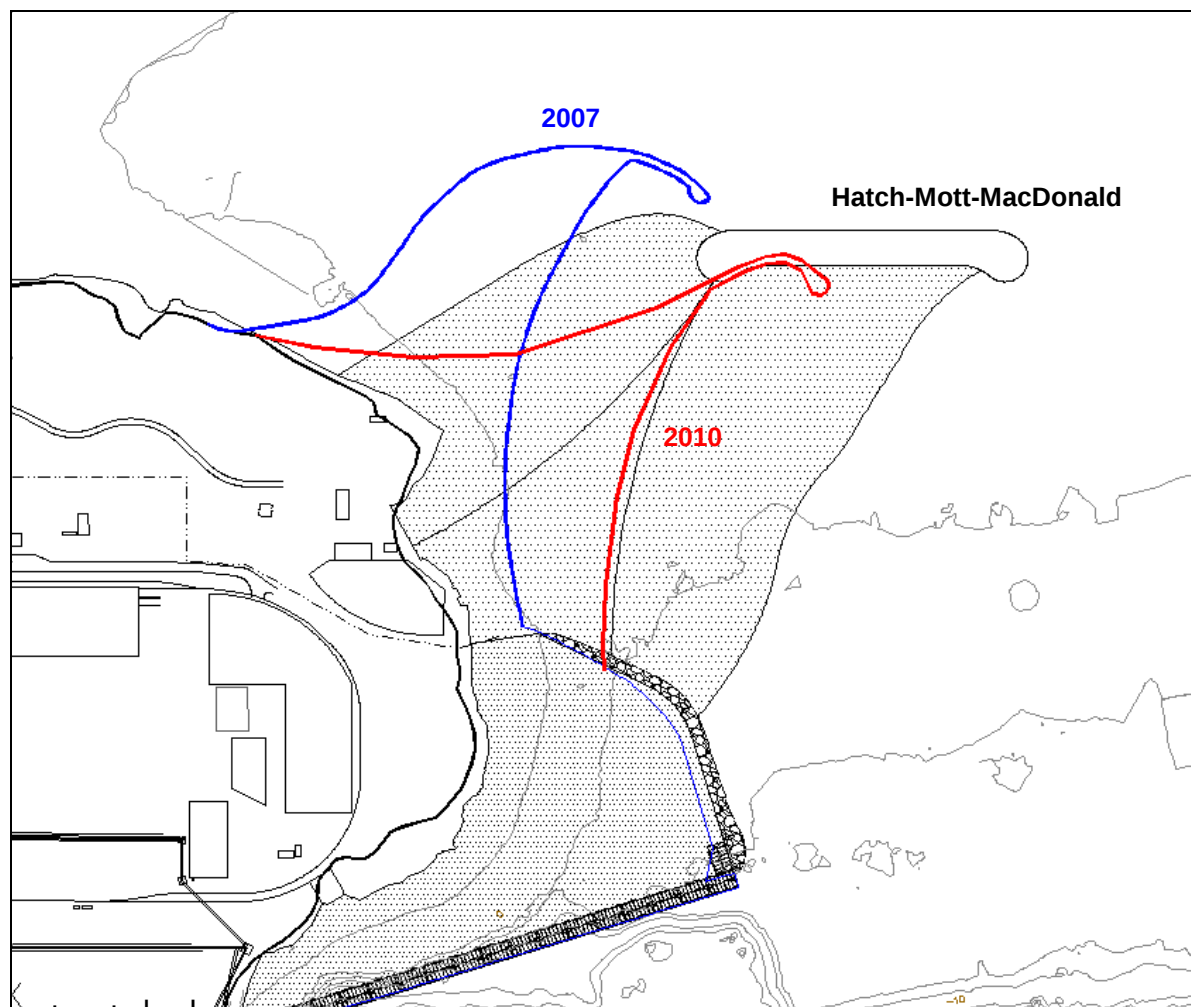


Figure 13 : Variantes proposées par Lasalle|NHC en 2007 et 2010, et variante Hatch-Mott-MacDonald

4.0 MODÉLISATION NUMÉRIQUE

L'étude de 2010 réalisée par le Groupe-Conseil LaSalle mettait en œuvre une séquence de modélisation relativement complexe pour parvenir à la modélisation du transport sédimentaire. Un modèle global hydrodynamique était d'abord mis en fonction pour prédire les effets de marée (niveaux d'eau et courants). Un modèle local était ensuite défini pour la zone d'étude en vue de simuler la transformation des vagues du large et de générer les contraintes agissant le long du littoral. Ce modèle local était ensuite remis en œuvre dans le modèle hydrodynamique dans le but de prédire les courants littoraux. Une dernière étape de modélisation consistait ensuite à utiliser le module sédimentaire de MIKE 21 pour prédire les taux de transport. Seuls des épisodes de courte durée étaient simulés.

La complexité de cette approche de modélisation, qui était inévitable avec les versions initiales des modules de MIKE 21 (maillage aux différences finies), conduit à des temps de calcul clairement incompatibles avec la réalisation de simulations à plus long terme. La formulation la plus à jour de MIKE 21 (maillage flexible aux volumes finis) permet toutefois une intégration presque complète de ces diverses étapes de modélisation et permet de simplifier considérablement l'approche de modélisation.

Pour ces raisons, il a été décidé de modifier le modèle numérique du port de Québec utilisé précédemment. Dans la présente étude, un seul domaine de calcul est utilisé pour mettre en œuvre les différents modules de MIKE 21.

4.1 Modules de modélisation numérique

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 Fredsoe (réf. [5]).

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 12 illustre l'étendue de la zone couverte par le modèle numérique. Celle-ci est identique à l'étendue du modèle hydrodynamique global utilisé en 2010. 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 14a) :

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 : 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 ajoutées au modèle bathymétrique.

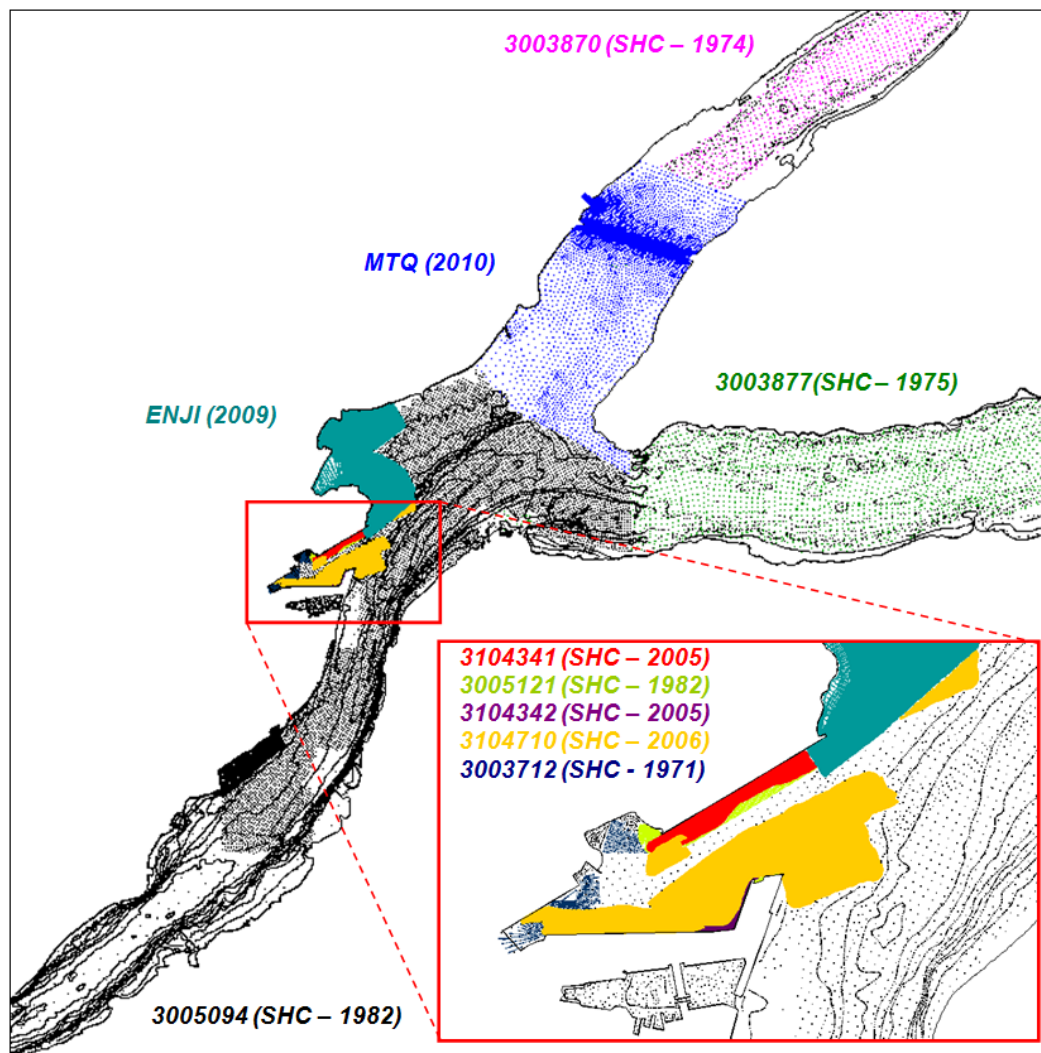
Les relevés hydrographiques d'ensemble du SHC couvrant la pointe de Beauport sont relativement anciens (1982) et ne donnent aucune information dans la zone du rentrant sud-ouest et dans les portions de la pointe situées au-dessus du niveau marégraphique +1,5 m ZC. Tel que mentionné précédemment, pour le mandat de 2010, 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 14b).

Tel que mentionné précédemment, les simulations effectuées en première phase de la présente étude (sections 5 et 6) n'intégraient pas les données de 2013, l'APQ ne nous ayant pas encore fourni les relevés effectués dans la zone d'intérêt, le long du littoral de la pointe de Beauport.

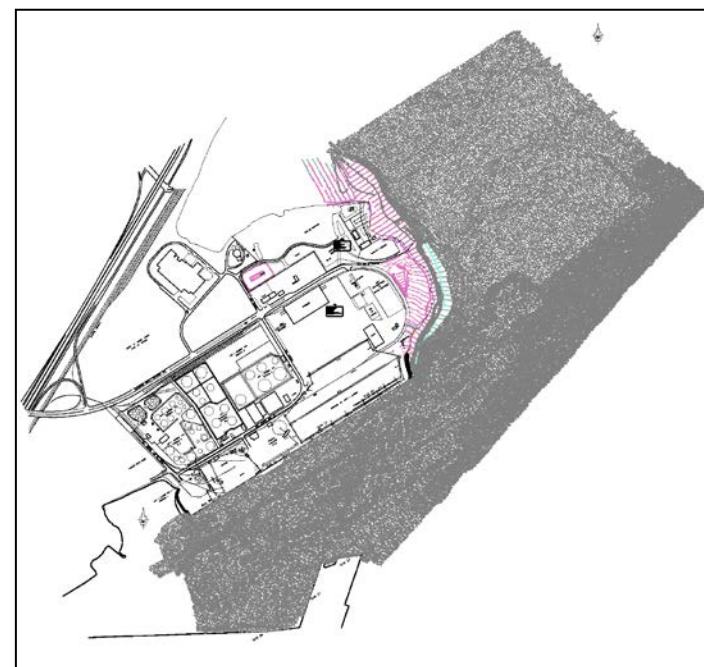
Toutefois pour le développement de la variante finale d'aménagement (volume de remblai de 400 000 m³), l'ensemble des relevés de 2013 (figure 14b) ont été intégrés au modèle de terrain. Les résultats de ces simulations sont présentés à la section 7.

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 15 pour l'ensemble du modèle et aux abords de la zone à l'étude. La figure 16 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) Phase d'étude initiale



b) Intégration des relevés de 2013

Figure 14 : Données utilisées dans le montage de la bathymétrie numérique

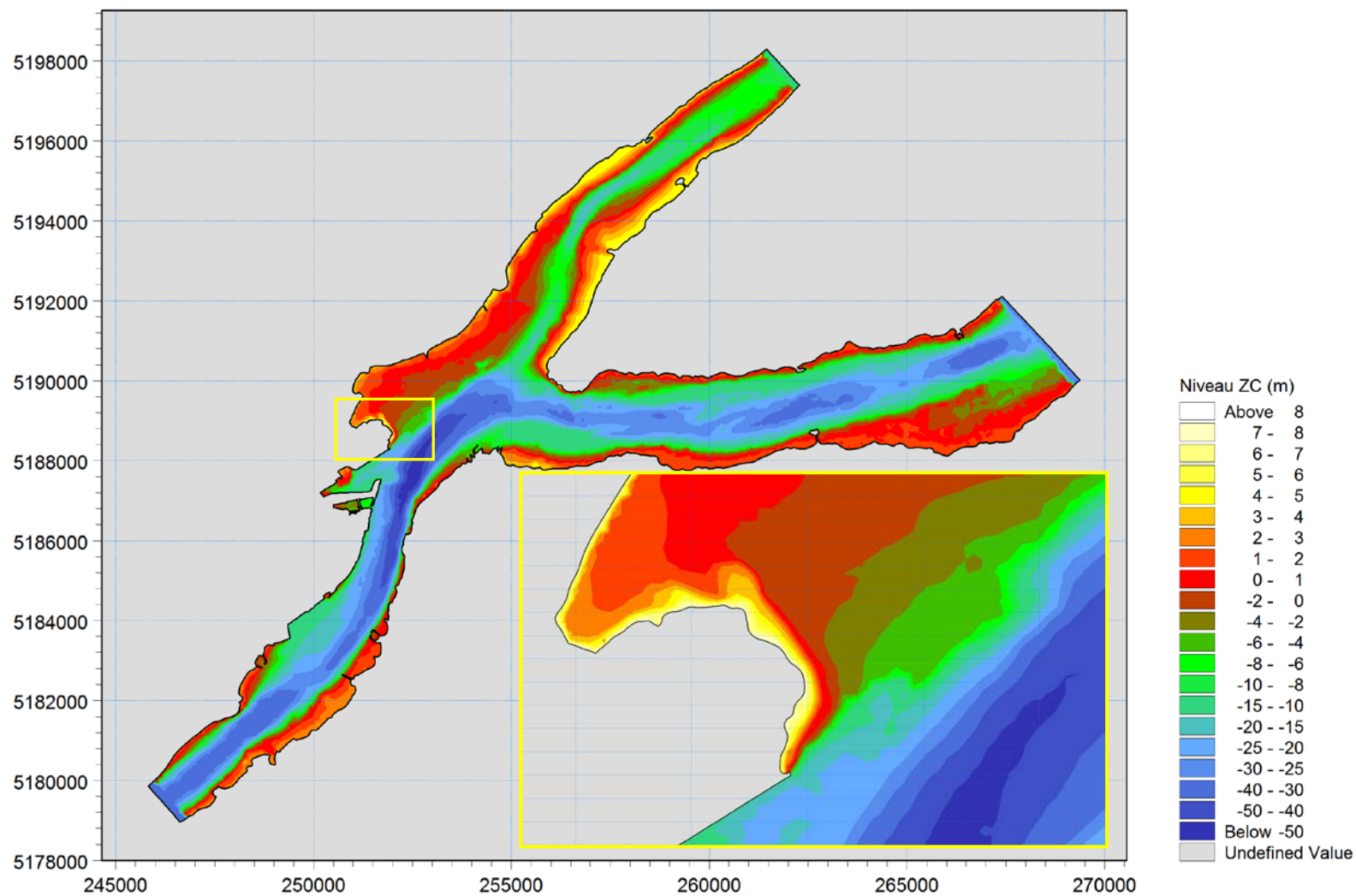


Figure 15 : Bathymétrie numérique

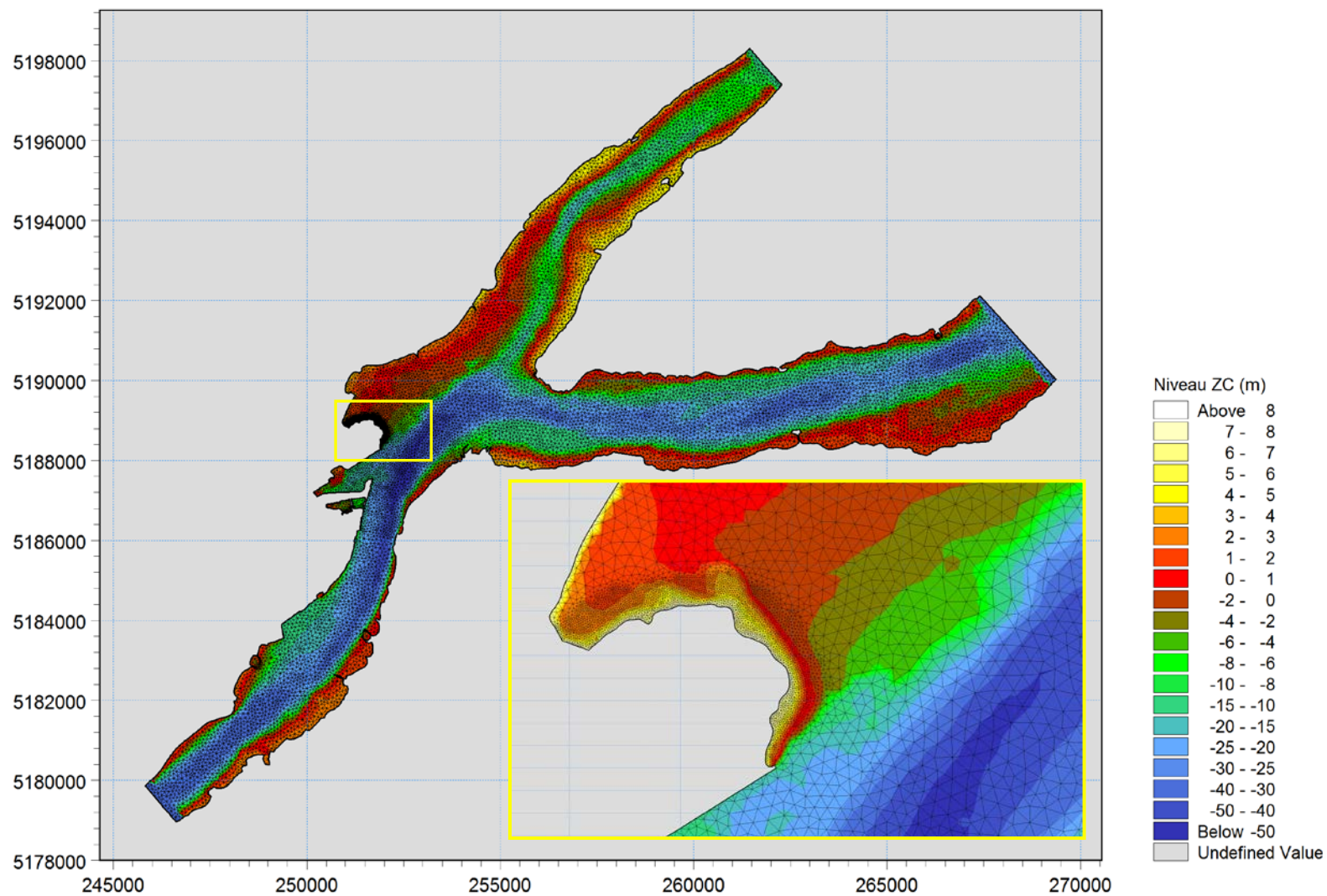


Figure 16 : Maillage de la bathymétrie numérique

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 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.

4.5 Paramètres de calculs

4.5.1 Paramètres hydrodynamiques

4.5.1.1. *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.

4.5.1.2. *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

4.5.2.1. 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 (réf. [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 (réf. [6]) alors que celle de γ_1 est tirée de Holthuijsen et al. (réf. [7]). Les paramètres γ_1 et γ_2 influencent respectivement les limites de cambrure et de profondeur d'eau conduisant au déferlement.

4.5.2.2. 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.

4.5.3 Paramètres de transport sédimentaire

4.5.3.1. 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.

4.5.3.2. Granulométrie

Dans les études précédentes réalisées par Lasalle|NHC, un D_{50} de 0,2 mm était utilisé. Dans l'attente de données plus récentes, les simulations de cette étude ont d'abord aussi été effectuées avec ce même diamètre.

L'analyse granulométrique transmise par la suite a révélé qu'un diamètre de 0,5 mm était plus représentatif des sédiments retrouvés sur le site (cf. section 3.2). Certaines simulations initiales ont donc été reprises avec ce nouveau diamètre. 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 pour ne pas avoir à reprendre les simulations déjà complétées, notamment celles à long terme.

5.0 VARIANTES ÉTUDIÉES (Phase d'étude initiale)

5.1 Simulations préliminaires – Conditions actuelles

Afin de confirmer la validité de l'approche de modélisation intégrée, une simulation des conditions d'aménagement actuelles a d'abord été réalisée pour une tempête centrée sur l'ENE, survenue le 8 mars 2008. Le vent de cette tempête a atteint une pointe de 78 km/h et a dépassé 50 km/h pendant environ douze heures. Outre le réglage des différents paramètres du modèle, cette simulation avait également pour but de vérifier la durée maximale des séries temporelles pouvant être raisonnablement prises en compte dans les simulations à long terme.

Une fois les paramètres de simulation et le maillage du modèle bathymétrique jugés satisfaisants, le modèle développé pour l'épisode de tempête de mars 2008 a été soumis à la série temporelle de longue durée des tempêtes du secteur général ENE. Tel que mentionné à la section 3.4, cette série regroupe les 18 tempêtes les plus significatives observées à la station météo Beauport au cours des treize dernières années. Placées l'une à la suite de l'autre, ces treize années de tempêtes représentent un épisode synthétique d'une durée de 49 jours (36 jours de tempêtes proprement dites avec en plus les périodes de transition entre chaque événement visant à éviter les instabilités numériques). Les temps de calcul pour cette simulation se sont révélés relativement longs (environ une semaine au total). Cette simulation à long terme offrait donc peu de flexibilité comme outil d'analyse pour le développement et l'optimisation d'une nouvelle variante d'aménagement.

La stratégie de modélisation a donc été révisée pour mettre au point un scénario de tempête ponctuelle permettant d'obtenir des patrons d'érosion et de déposition similaires à ceux obtenus au terme de la série synthétique de 13 années de tempêtes du secteur ENE, avec des durées de simulation raisonnables. La direction dominante de l'est-nord-est (ENE) a été utilisée, avec des vents forts de 23 m/s appliqués en continu pendant cinq jours.

Les figures 17 à 19 présentent les patrons d'érosion et de déposition prédits par le modèle numérique au terme des trois simulations décrites plus hauts.

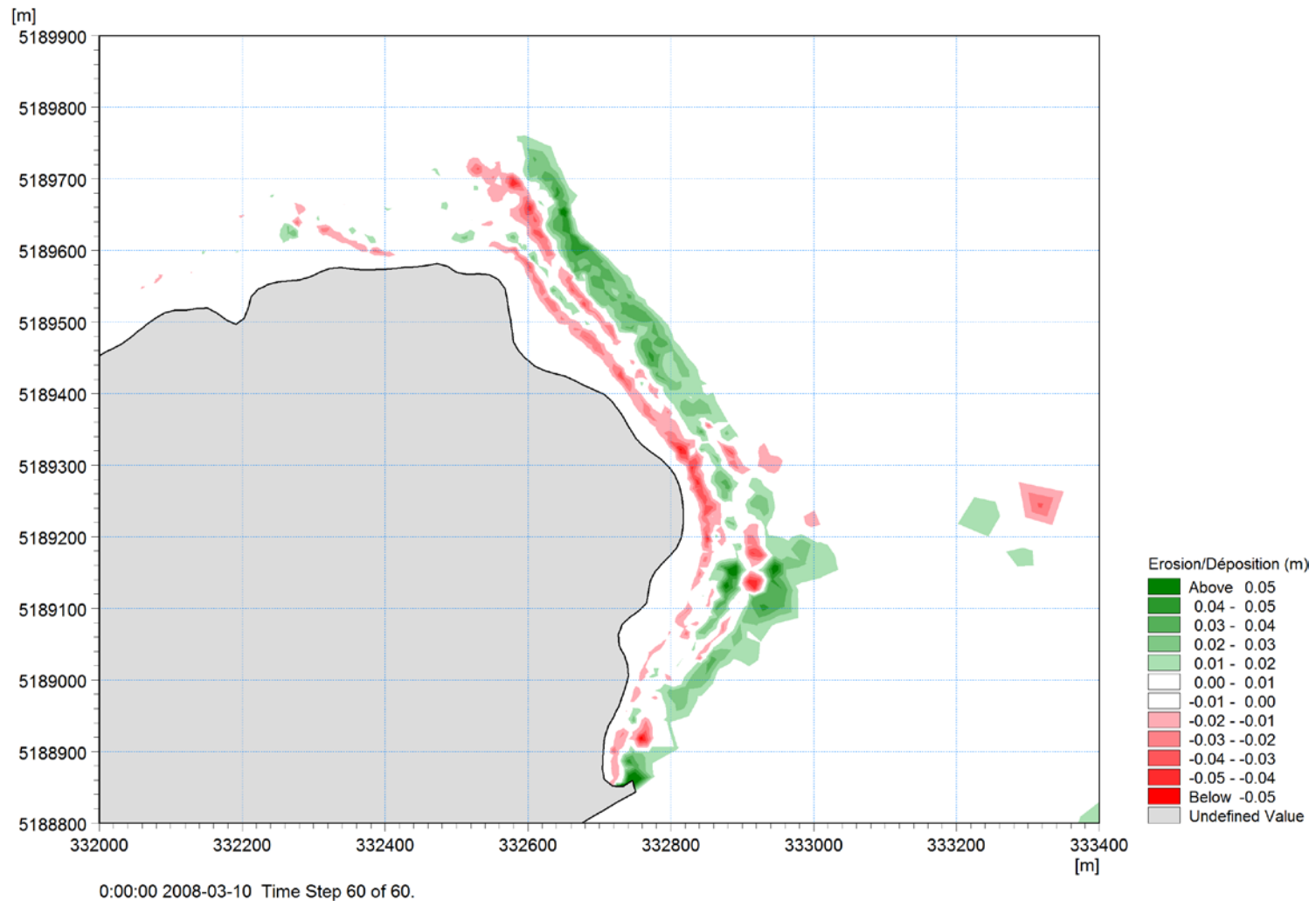


Figure 17 : Tempête de mars 2008 - Érosion et déposition pour les conditions d'aménagement actuelles

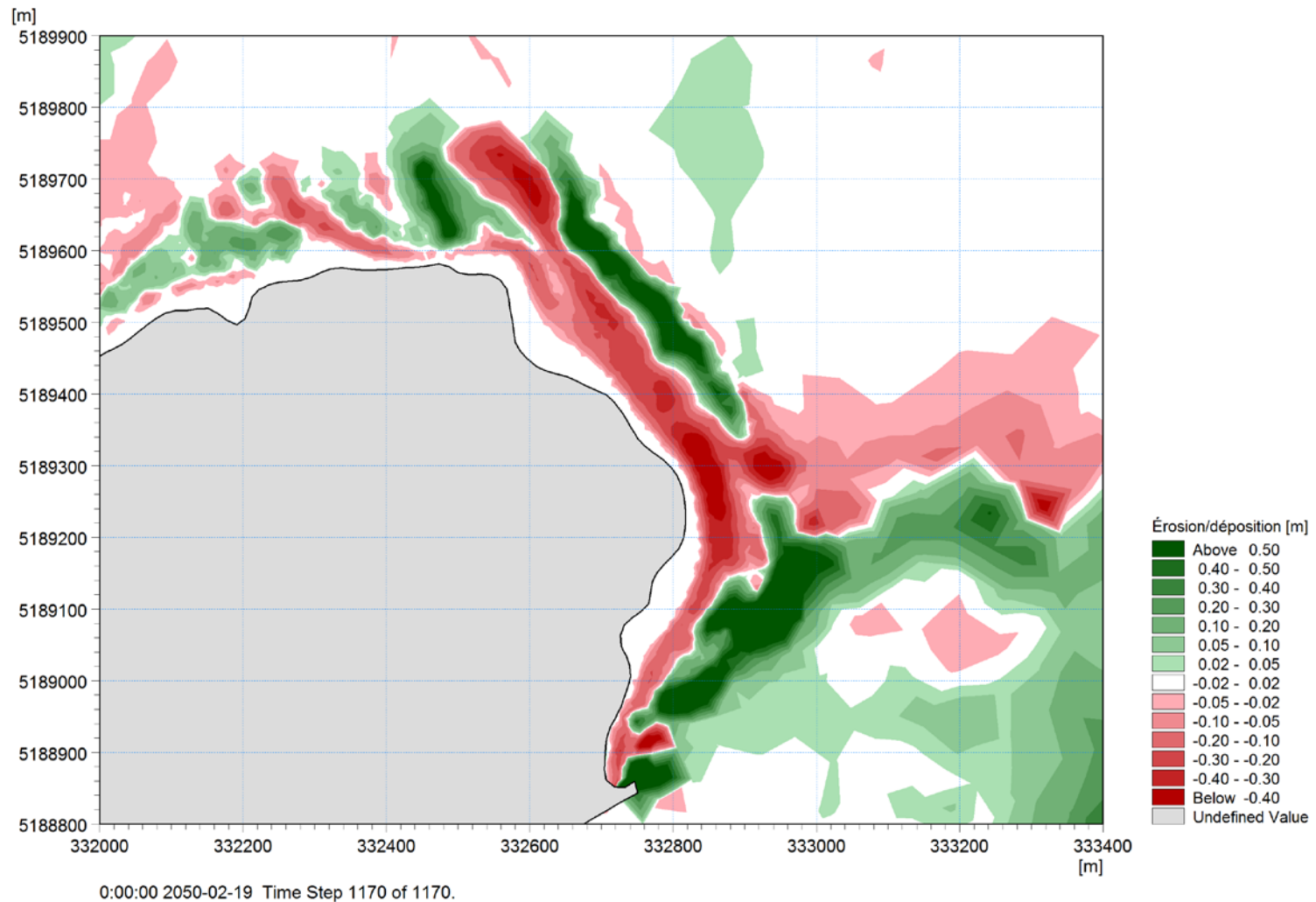


Figure 18 : Dix-huit tempêtes du secteur ENE (1999-2013) - Érosion et déposition pour les conditions d'aménagement actuelles

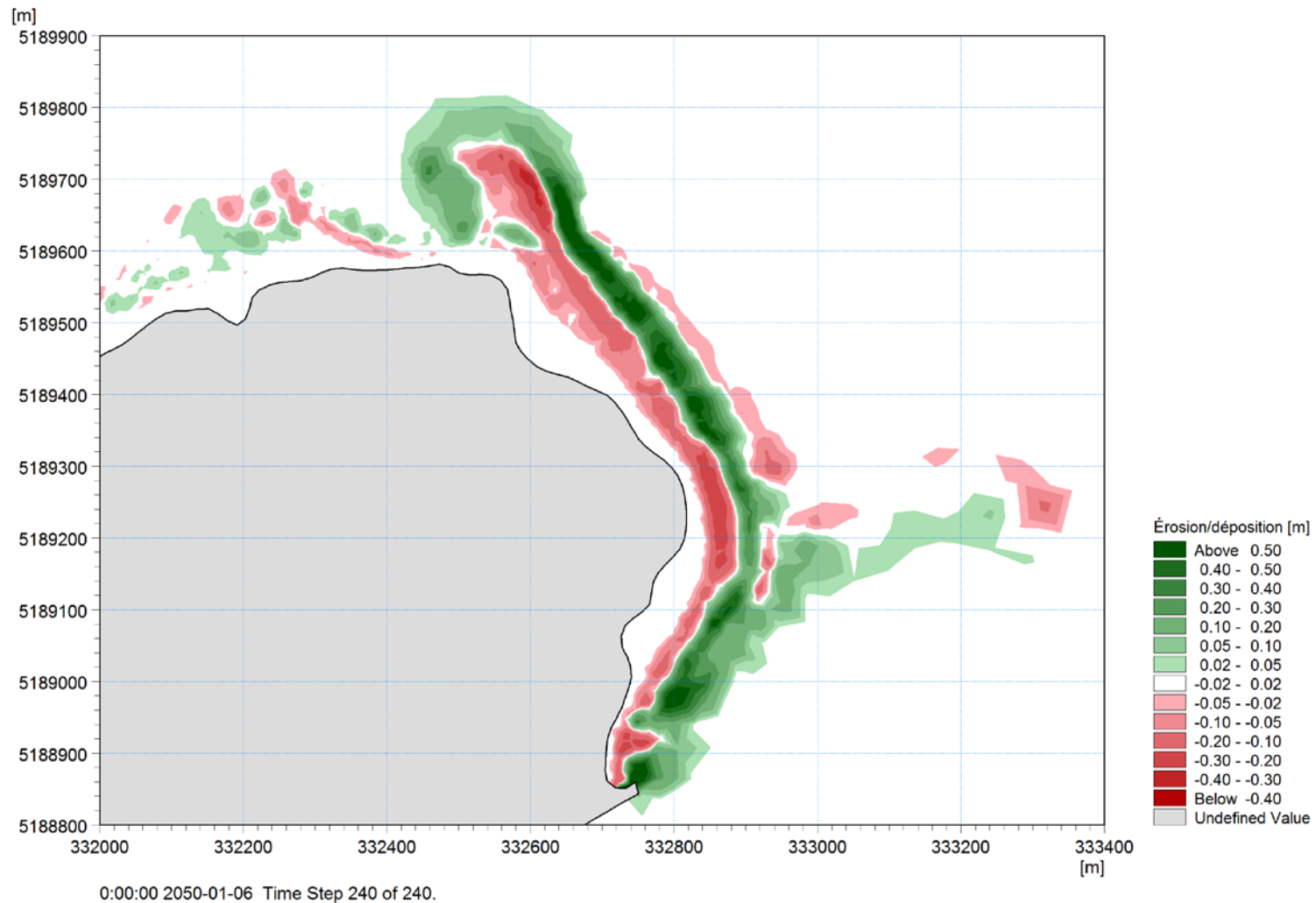


Figure 19 : Tempête ponctuelle de l'ENE (23 m/s) - Érosion et déposition pour les conditions d'aménagement actuelles

Les figures 17 à 19 illustrent les patrons d'érosion et de déposition des fonds prédits par le modèle sédimentaire au terme de chacune de ces simulations. Dans les trois cas, on observe des tendances similaires, avec une nette érosion du haut de plage (profondeur de l'érosion illustrée en rouge sur les figures) et de la déposition dans la portion inférieure de la plage. Les trois simulations montrent également la migration d'une portion des sédiments érodés vers l'extrémité nord de la plage. Les simulations, surtout celle de la tempête ponctuelle de l'ENE (figure 19), montrent clairement une progression vers le rentrant sud-ouest de la flèche sableuse observée dans les conditions actuelles, et ce conformément aux résultats obtenus en comparant les bathymétries de 2009 et 2013 (figure 8).

Malgré sa durée beaucoup plus courte, la tempête synthétique de l'ENE montre des tendances très similaires aux résultats de la simulation à long terme. Il a donc été décidé de conserver cette tempête pour comparer les variantes d'aménagement entre elles.

Des simulations à long terme (treize années de tempêtes) ont uniquement été reprises en fin d'étude afin de comparer la stabilité de la plage principale obtenue en conditions actuelles et en conditions futures, en présence des variantes d'aménagement retenues.

5.2 Concept et paramètres de conception

Les différentes variantes de plage décrites dans la section suivante ont été mise au point en collaboration avec la firme CRI.

Le concept général comprend une nouvelle plage construite au large de la plage actuelle (plage principale), délimitée au sud par l'enrochement protégeant l'extension portuaire et au nord par un brise-lames. Cette plage confinée ("pocket beach") est exposée à des conditions de vagues et de courants relativement uniformes, et offre ainsi une meilleure stabilité et durabilité que la plage actuelle. Une deuxième plage, destinée aux adeptes de kitesurf, est placée au nord-ouest de la nouvelle plage principale.

Plus précisément, les principaux critères de conception utilisés dans l'élaboration des nouvelles plages ont été les suivants:

- Volume de remblai disponible: $650\,000\text{ m}^3 \pm 15\%$ (donnée fournie par l'APQ)¹;
- Niveau en crête des plages: +7,3 m ZC, soit le niveau extrême 1:50 ans en considérant les effets des changements climatiques;
- Érosion minimisée dans le secteur du brise-lames;
- Pente de construction des plages de 10% tendant avec le temps vers une pente d'équilibre des plages ressemblant à celle des transects 4 à 6;
- Géométrie d'ensemble des plages et du brise-lames procurant une stabilité latérale globale des sédiments. On cherche ainsi à minimiser le transport sédimentaire vers le nord observé en conditions actuelles.

Les critères de conception sont décrits plus en détails dans le rapport d'étude de la firme CRI (réf. [4]).

5.3 Variantes étudiées – Volume de remblai de $650\,000\text{ m}^3$

Avant d'être soumise à des simulations hydrosédimentologiques, chaque variante a d'abord été mise en plan et modélisée par Lasalle|NHC afin de valider l'équilibre des volumes de remblai et de déblai. Dans certains cas, les travaux de modélisation n'ont pas été poursuivis au-delà de cette première étape, le calcul des volumes étant trop éloigné de la valeur cible de $650\,000\text{ m}^3$.

5.3.1 Variantes préliminaires: variantes 1 et 2

La figure 20 illustre la configuration des deux premières variantes élaborées par la firme CRI. Elles se caractérisent par un brise-lames à l'intersection des plages de baignade (zone 2) et

¹ Tel que mentionné précédemment, ce volume a été réduit à $400\,000\text{ m}^3$ suite à la remise de la version initiale du présent rapport. Les résultats portant sur ce nouvel aménagement d'emprise réduite sont présentés à la section 7.

de kitesurf (zone 3), au bout duquel s'ajoute un épi visant à minimiser les effets de bout (accélérations locales). Le haut de plage (zone 1) est horizontal à un niveau de +7,3 m ZC.

Ces deux premières propositions étaient sommaires et avaient pour but de fixer l'ordre de grandeur des volumes de remblai requis par chacune. À ce stade, les pentes de talus des ouvrages en enrochement n'étaient pas modélisées (murs verticaux), et les pentes de plage étaient approximatives, simplement déterminées par les lignes de haut et de bas de plage fournies par la firme CRI.

Les volumes de ces variantes calculés dans MIKE 21 s'élèvent respectivement à 585 800 m³ (variante 1) et 740 600 m³ (variante 2).

5.3.2 Variante 3

Sur la base des volumes calculés pour les variantes 1 et 2, une troisième variante, située à une position intermédiaire entre les deux variantes précédentes, a été élaborée.

Pour la variante 3, les pentes de talus des ouvrages en enrochement et les pentes de plage ont été modélisées avec plus de précision, selon les informations suivantes:

- Niveau en crête du brise-lames: +7,5 m ZC;
- Pente latérale du brise-lames: 1V:1,5H
- Pente latérale l'épi: 1V:2H
- Pente des plages 2 et 3: 10%

Les dessins de la firme CRI ayant servi de base à la modélisation de cette variante sont présentés à l'annexe A.

La pente des plages de 10%, désormais incluse dans la géométrie de la variante 3, est en réalité plus forte que la pente d'équilibre théorique des sédiments retrouvés sur le site. Le concept développé ici consiste à construire initialement une pente de plage plus forte, qui se remodelera sous l'effet des tempêtes. On s'attend ainsi à une érosion du haut de plage, avec un transfert des sédiments vers le bas de plage (voir coupe A-A à l'annexe A). Ces

mouvements de sédiments contribueront à stabiliser la plage selon un profil plus naturel (voir chapitre 7, réf. [4]).

Le volume calculé dans MIKE 21 pour la variante 3 est de 490 000 m³. La variante 3, développée pour avoir un volume intermédiaire aux variantes 1 et 2, a mené de façon inattendue à un volume inférieur à celui de la variante 1. En examinant de plus près la configuration de chaque variante, c'est la pente de plage de 10%, non modélisée pour les variantes 1 et 2, qui s'est avérée être à l'origine de cet écart de volume.

5.3.3 Variantes 4 et 5

Les variantes 4 et 5 ont été développées pour se rapprocher du volume cible de 650 000 m³. Par rapport à la variante 3, le brise-lames est déplacé vers le nord-est et la plage est légèrement tournée dans le sens horaire. La plage de kitesurf est déplacée vers le nord (figure 21).

La modélisation a d'abord été faite pour la variante 5, dont le volume s'est avéré approprié, soit environ 670 000 m³. La modélisation des vagues et des courants pour cette variante a donc été effectuée pour les mêmes conditions que celles simulées en conditions actuelles, pour la tempête synthétique de l'ENE (cf. section 5.1). Les courants de marée et de vagues obtenus pour cette variante sont illustrés à marée haute à la figure 22.

On observe très clairement une accélération locale au nez de l'épi, qui est pratiquement dans l'axe des vagues de l'ENE. Une zone de vitesses plus rapide est également observée directement au sud de l'épi, ce qui n'est pas souhaitable compte tenu de la proximité du brise-lames.

À ce stade, il a donc été décidé d'abandonner la variante 4 et de mettre au point une nouvelle famille de variantes, permettant de mieux protéger l'épi et le nord de la plage principale.

5.3.4 Variantes 6 et 6b

Pour la variante 6, la géométrie en plan de l'épi a été modifiée pour inclure une légère courbe permettant de mieux protéger l'extrémité de l'épi et la partie nord de la plage (figure 23). Pour diminuer les courants littoraux dans la portion nord de la plage, la plage principale a également été pivotée d'environ 3 degré dans le sens antihoraire. Finalement, en vue de minimiser les risques d'érosion à la rencontre de la plage principale et de la plage de kitesurf, advenant une érosion majeure du haut de plage, le brise-lames a été allongé de 15 m à son extrémité ouest. Le volume de sédiments associés à la variante 6 est de 652 000 m³.

La figure 24 présente les courants de marée et de vagues obtenus en présence de la variante 6, au même instant de marée que celui présenté pour la variante 5. Les modifications apportées aux ouvrages répondent aux objectifs recherchés et permettent de minimiser efficacement les courants dans la section nord de la plage. Pour la plage principale, la variante 6 procure une géométrie de plage jugée entièrement satisfaisante.

Pour mieux protéger l'extrémité ouest du brise-lames contre un hypothétique recul du haut de plage de kitesurf, on a par la suite choisi de modifier légèrement la variante 6. La variante 6b propose ainsi une plage de kitesurf qui protège davantage le brise-lames à l'extrémité est de la plage (figure 24).

La variante 6b était la variante d'aménagement retenue en phase initiale de l'étude. Les simulations plus détaillées en présence de la variante 6b, et la comparaison avec les conditions actuelles d'aménagement, font l'objet du chapitre suivant.

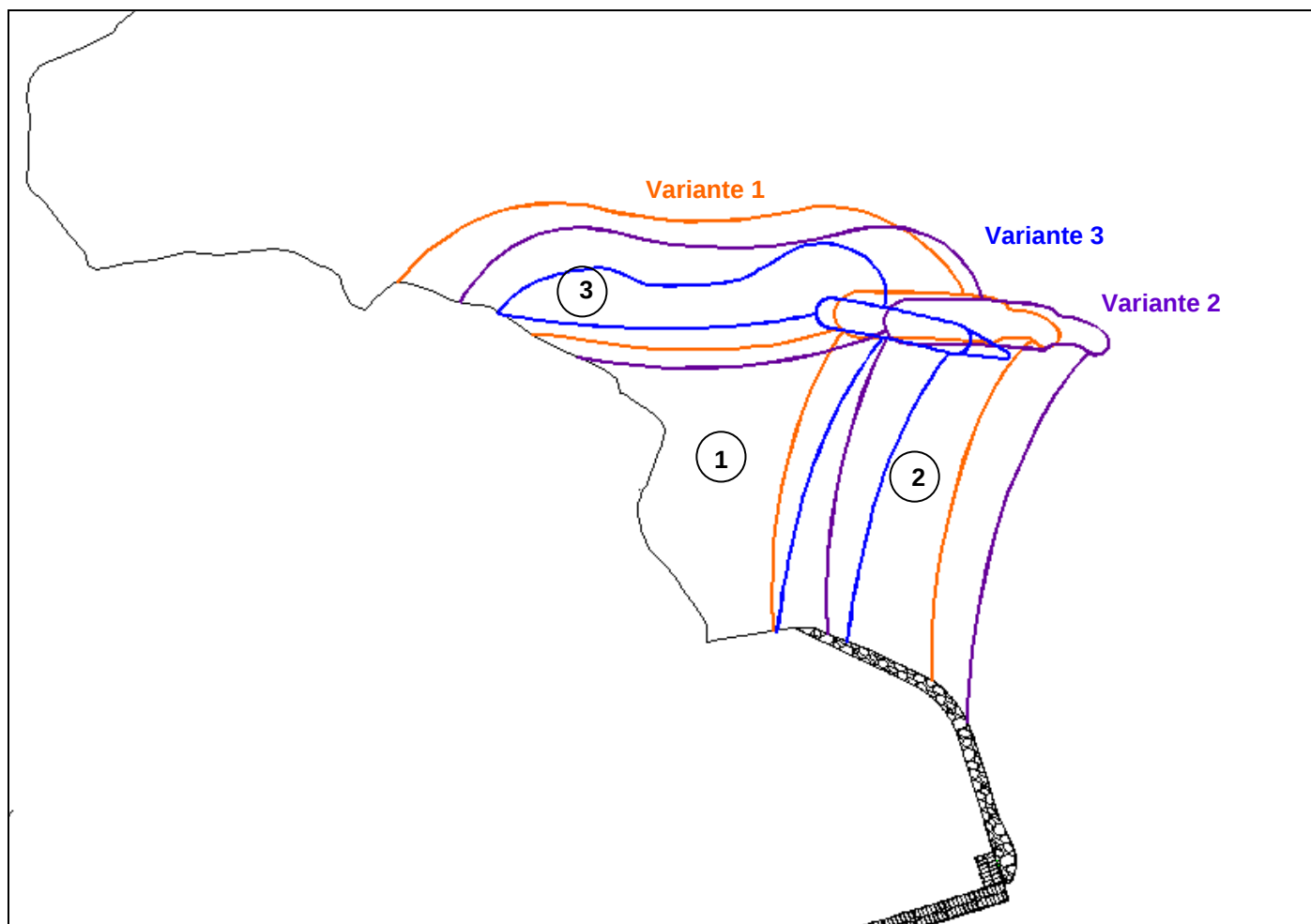


Figure 20 : Vue en plan des variantes 1, 2 et 3

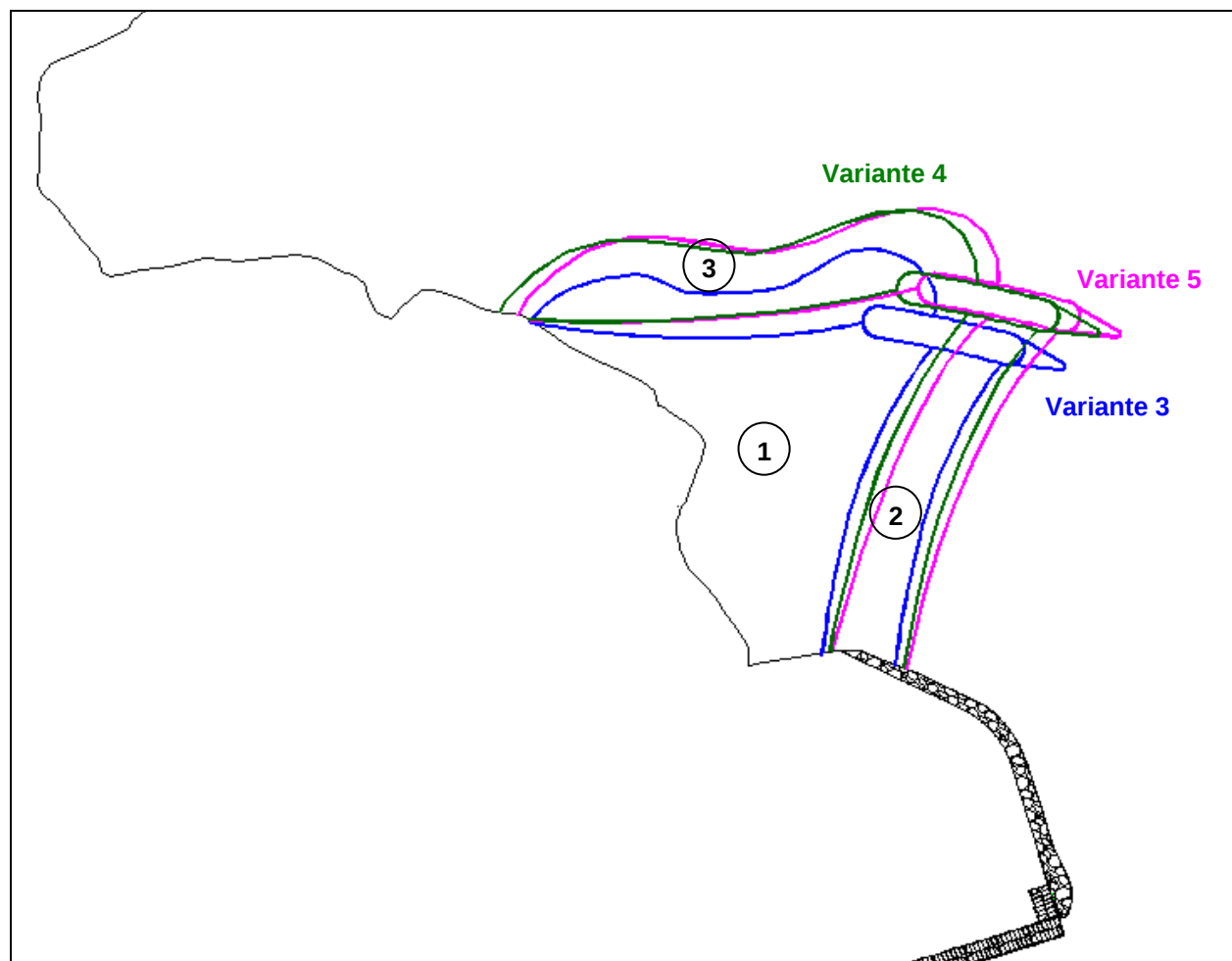


Figure 21 : Vue en plan des variantes 4 et 5

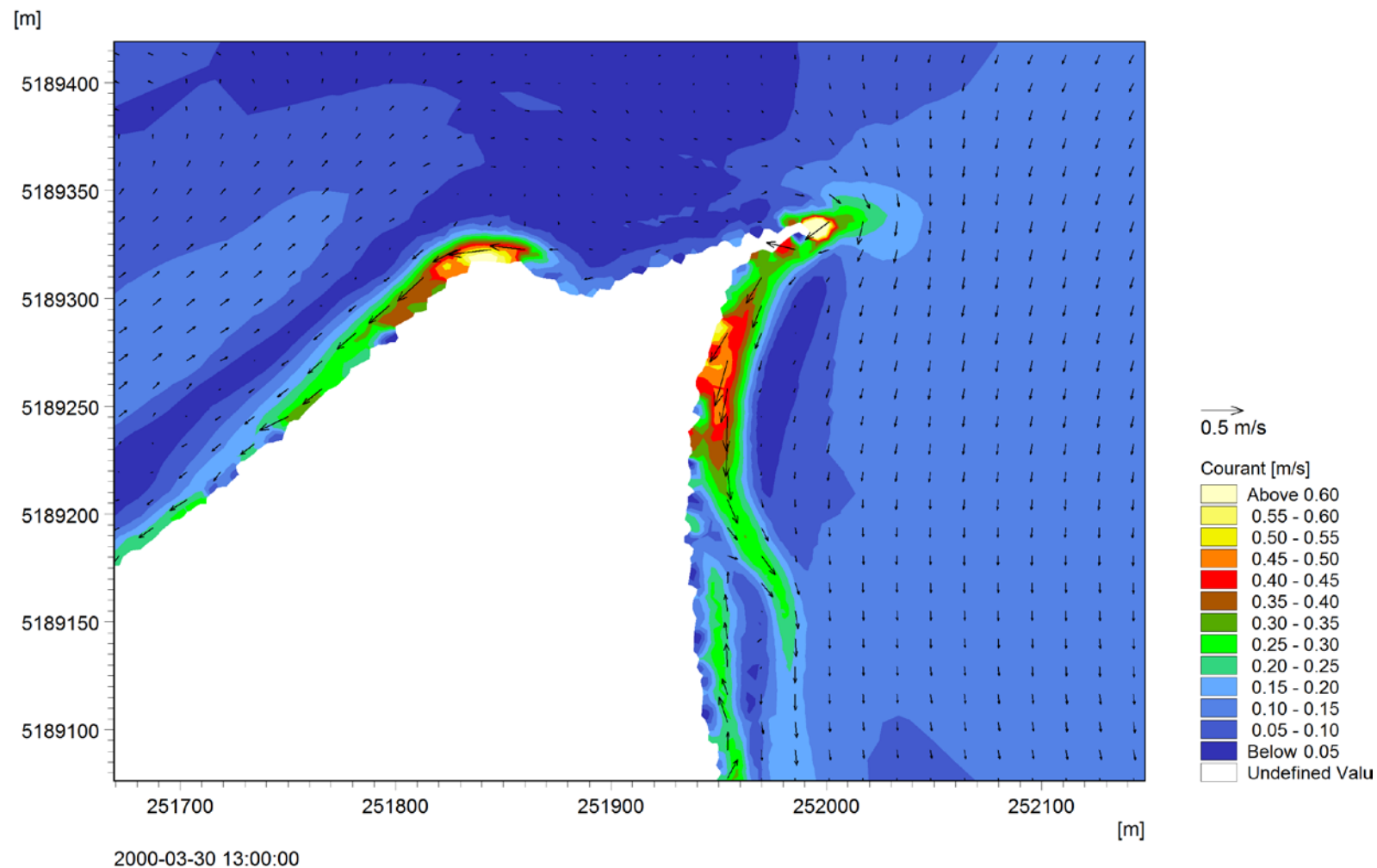


Figure 22 : Courants en présence de la variante 5

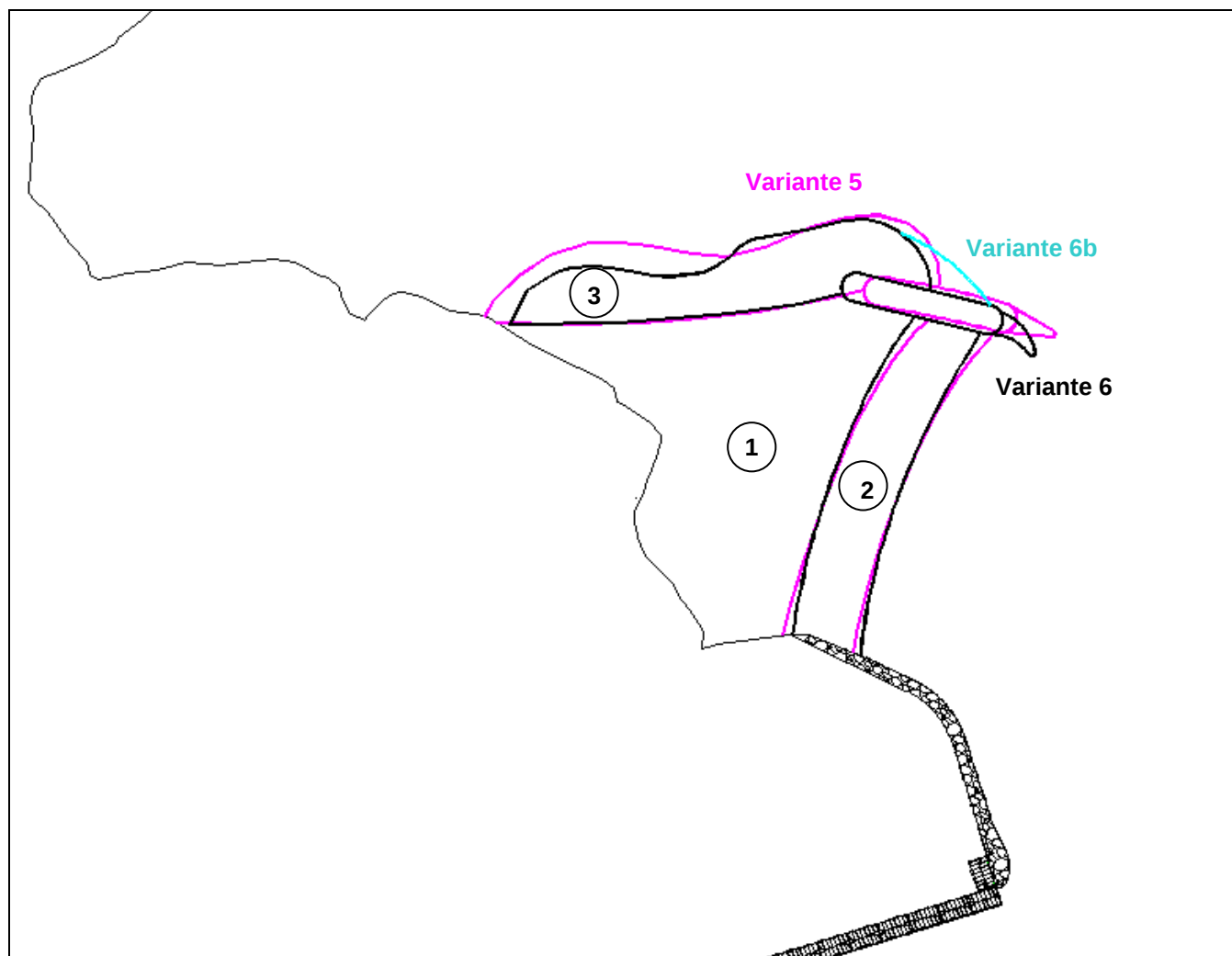


Figure 23 : Vue en plan des variantes 6 et 6b

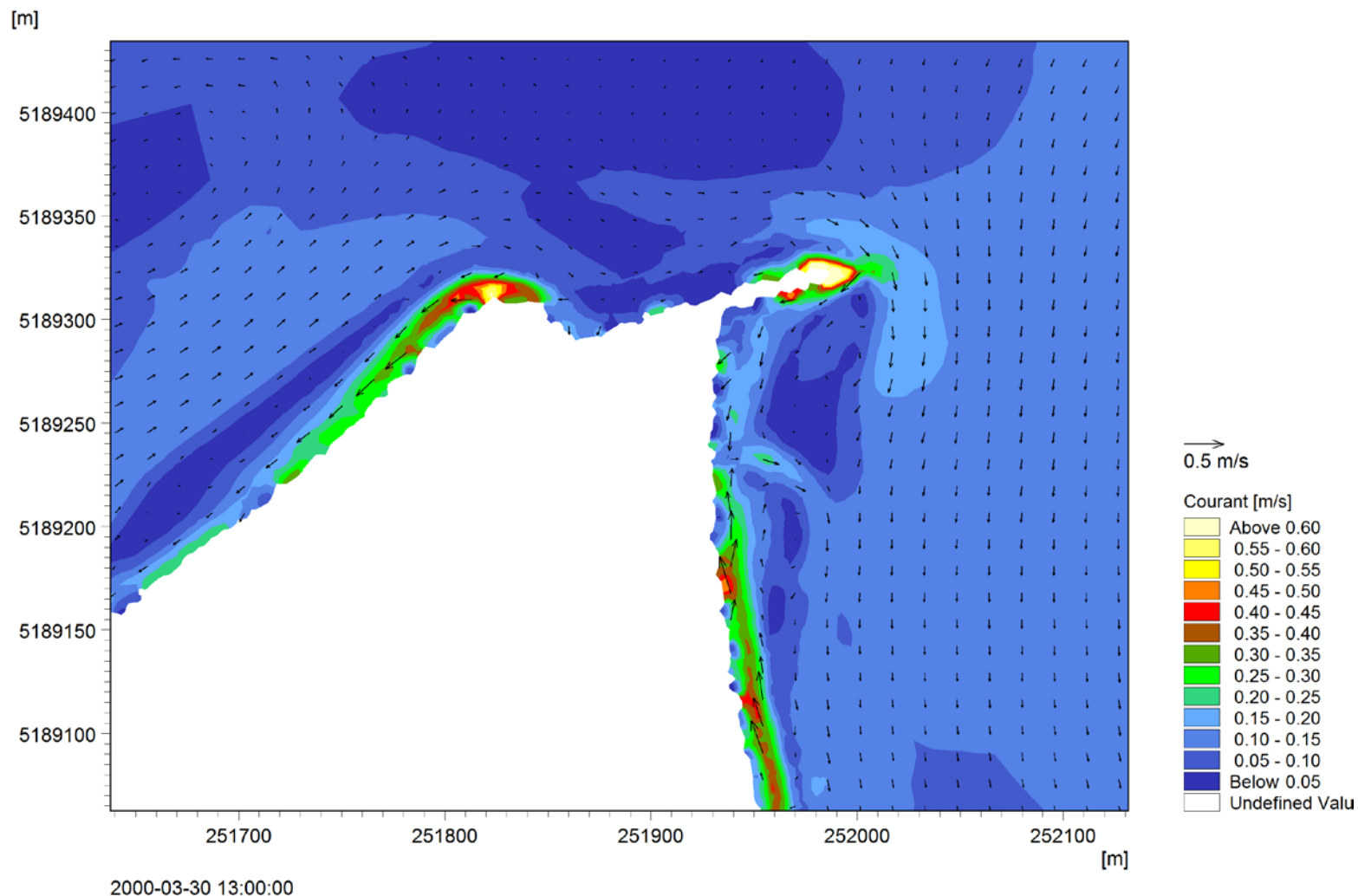


Figure 24 : Courants en présence de la variante 6

6.0 COMPARAISON DES CONDITIONS ACTUELLES ET FUTURES (VARIANTE 6B)

Pour compléter l'analyse et le choix de la variante finale des ouvrages, les résultats de modélisation hydrosédimentologiques obtenus en conditions actuelles et en présence des futurs ouvrages ont été comparés. En première phase d'étude, il importe de rappeler que la variante d'aménagement futur des plages supposait un volume de remblai de 650 000 m³. L'ensemble des résultats présenté dans la présente section repose sur cette hypothèse.

Tel que mentionné précédemment, l'APQ a par la suite décidé de limiter ce volume à 400 000 m³. L'optimisation finale, basée sur ce nouveau volume, est présentée à la section 7.

Les tempêtes de l'ENE jouant un rôle majeur dans la dynamique sédimentaire du site, on a d'abord concentré l'analyse sur les résultats de modélisation obtenus avec une tempête de l'ENE. On a ainsi conservé l'approche de modélisation utilisée précédemment, soit une tempête synthétique de l'ENE avec une vitesse de vent de 23 m/s soufflant en continu pendant cinq jours. Les résultats en termes de courants, vagues et changements morphologiques des plages sont présentés à la section 6.1.

Par la suite, des simulations complémentaires ont été effectuées pour des tempêtes en provenance du nord-est (NE), de l'est (E) et de l'ouest-sud-ouest (OSO). Les résultats obtenus pour ces directions n'apportant pas d'éléments significatifs à l'analyse, ceux-ci ne sont discutés que brièvement à la section 6.2.

6.1 Tempête synthétique de l'ENE

6.1.1 Courants

L'approche de modélisation intégrée utilisée dans la présente étude combine les courants de marée aux courants induits par les vagues (courants littoraux). Les figures 25 et 26 comparent les courants obtenus au flot et au jusant pour les conditions actuelles et futures d'aménagement. Chaque figure comprend une vue générale de la zone à l'étude et une vue plus rapprochée sur les plages.

Le réalignement de la plage proposée dans la variante 6b permet une réduction tangible de l'emprise et de l'intensité des courants littoraux le long de la plage principale, tant au flot qu'au jusant. On observe que les courants agissant le long de la nouvelle plage sont non seulement réduits, mais aussi que leur direction est beaucoup moins uniforme qu'en conditions actuelles. Ainsi, à l'extrémité nord de la plage, les courants sont plus faibles et en direction opposée à ceux obtenus en conditions actuelles.

Du côté du rentrant sud-ouest, les courants sont très similaires dans la baie. Près du brise-lames, on observe une petite zone de vitesses de l'ordre de 0,5 m/s. Celle-ci est toutefois de moindre emprise et moins élevée que les vitesses observées en conditions actuelles au droit de la flèche sableuse.

6.1.2 Vagues

Les figures 27 et 28 présentent l'aspect typique de la direction et de la hauteur des vagues obtenues pour les conditions actuelles et futures d'aménagement pour deux instants du cycle de marée, soit la marée basse et la marée haute.

Les vagues obtenues le long de la plage principale en présence de la variante 6b conservent des hauteurs significatives similaires à celles obtenues en conditions actuelles. Le long de la plage de kitesurf, la protection offerte par le brise-lames et l'épi fait en sorte que les vagues sont légèrement réduites par rapport aux conditions actuelles du côté du rentrant sud-ouest.

6.1.3 Changements morphologiques

La figure 29 présente les patrons d'érosion et de déposition obtenus au terme des cinq jours de tempête simulés pour les conditions actuelles et futures d'aménagement. Les zones en rouge indiquent des secteurs ayant subi de l'érosion, et les zones en vert, des secteurs ayant accumulé des sédiments.

La comparaison des vues d'ensemble montre que les mouvements sédimentaires au droit de la plage principale de la variante 6b sont beaucoup plus confinés qu'en conditions actuelles. Il n'y a pas de fuite importante de sédiments à partir de la plage principale. Le concept de « pocket beach » à la base du concept de la variante 6b donne les résultats escomptés.

Un autre résultat intéressant se situe dans la bande d'accumulation retrouvée au bas de la bande d'érosion le long de la plage principale. L'effet de transfert des sédiments du haut de plage vers le bas de plage est bien simulé par le modèle numérique. La nouvelle orientation de la plage fait en sorte que ce transfert se fait de façon uniforme tout le long de la plage.

Du côté du rentrant sud-ouest, la plage de kitesurf subit une certaine réorganisation, mais celle-ci demeure peu importante compte tenu de l'importance de la tempête modélisée.

6.2 Tempêtes du NE, de l'E et de l'OSO

D'autres simulations ont été effectuées pour vérifier la mobilité des sédiments avec des vagues de tempêtes en provenance des secteurs NE, E et OSO. Les simulations du NE et de l'E avaient pour but de valider et de tester la sensibilité des résultats obtenus avec la tempête de l'ENE. Une force de tempête identique à celle de l'ENE a donc été utilisée (5 jours avec des vents de 23 m/s). La simulation des vagues en provenance de l'OSO visait surtout à examiner la stabilité de la plage de kitesurf. Les tempêtes de l'OSO étant généralement plus faibles, le vent a été ajusté pour refléter des conditions réalistes sur le site, soit des vagues de 0,5 m à l'entrée du rentrant sud-ouest.

La figure 30 présente les patrons d'érosion obtenus pour les vagues de tempêtes décrites plus hauts. Pour faciliter l'exercice de comparaison, les résultats en provenance de l'ENE, déjà présentés à la figure 29, sont repris à la figure 30a. À noter que l'échelle de couleur de la figure 30d est différente, les changements morphologiques causés par la tempête de l'OSO étant beaucoup moins importants que ceux des tempêtes des secteurs E à NE. La comparaison des résultats fait ressortir les points suivants :

- La tempête de l'E a un effet très similaire à la tempête de l'ENE sur la plage principale, et pratiquement aucun effet sur la plage de kitesurf;
- La tempête du NE a un effet très similaire à la tempête de l'ENE sur la plage principale et sur la plage de kitesurf;
- La tempête de l'OSO n'a pratiquement aucun effet sur la plage principale. Les mouvements sédimentaires le long de plage de kitesurf sont faibles et de l'ouest vers l'est.

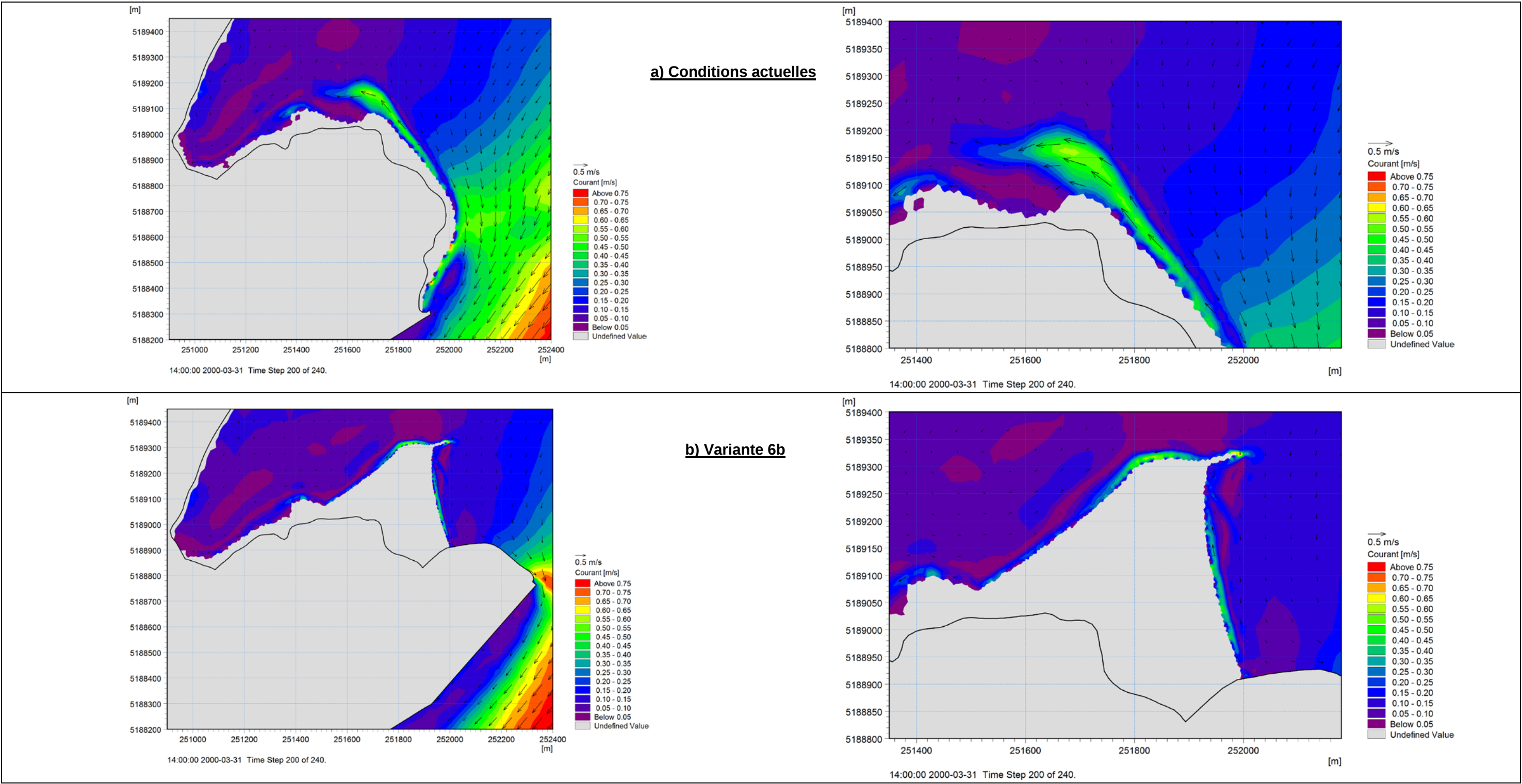


Figure 25 : Courants de marée au flot en conditions actuelles et futures

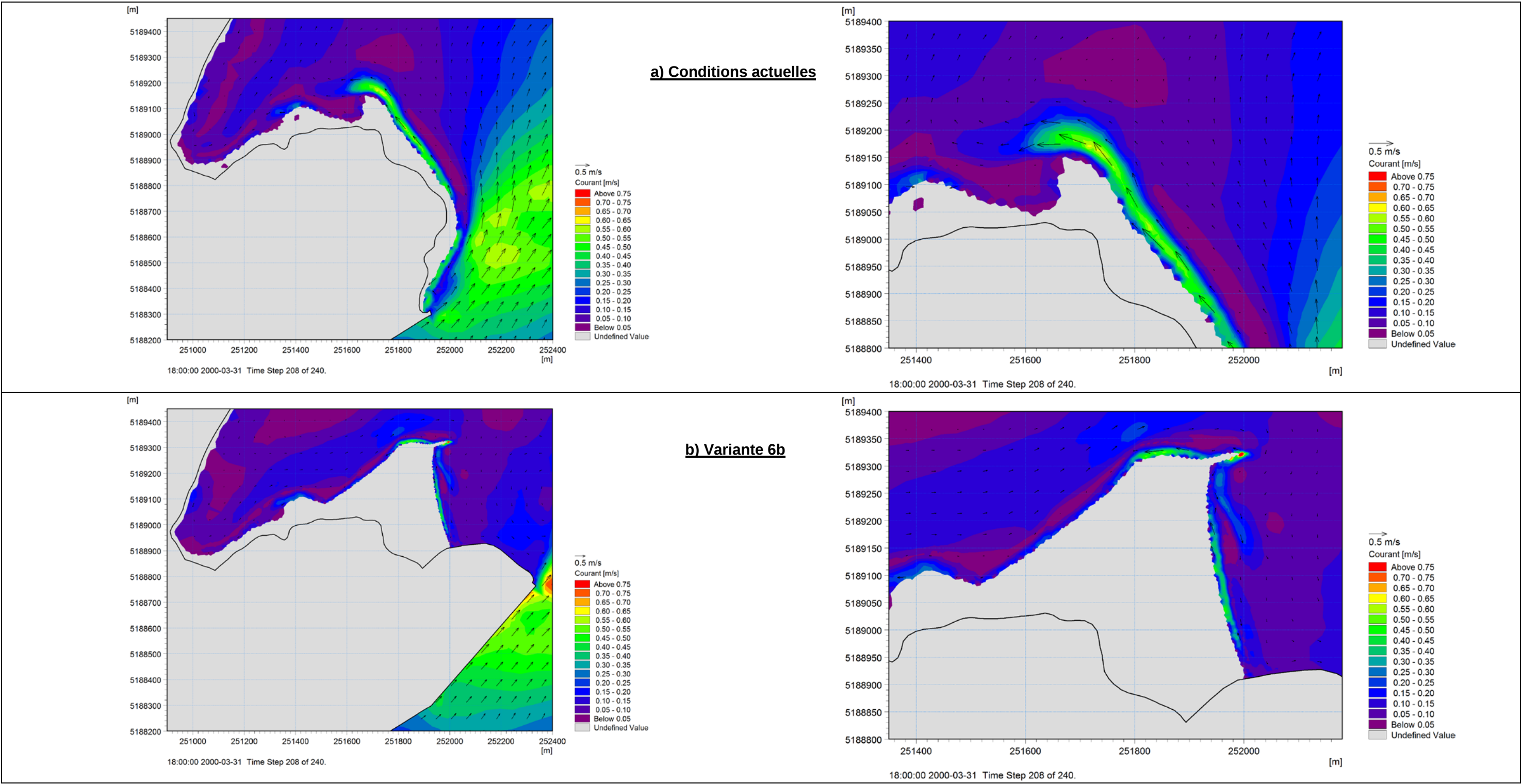


Figure 26 : Courants de marée au jusant en conditions actuelles et futures

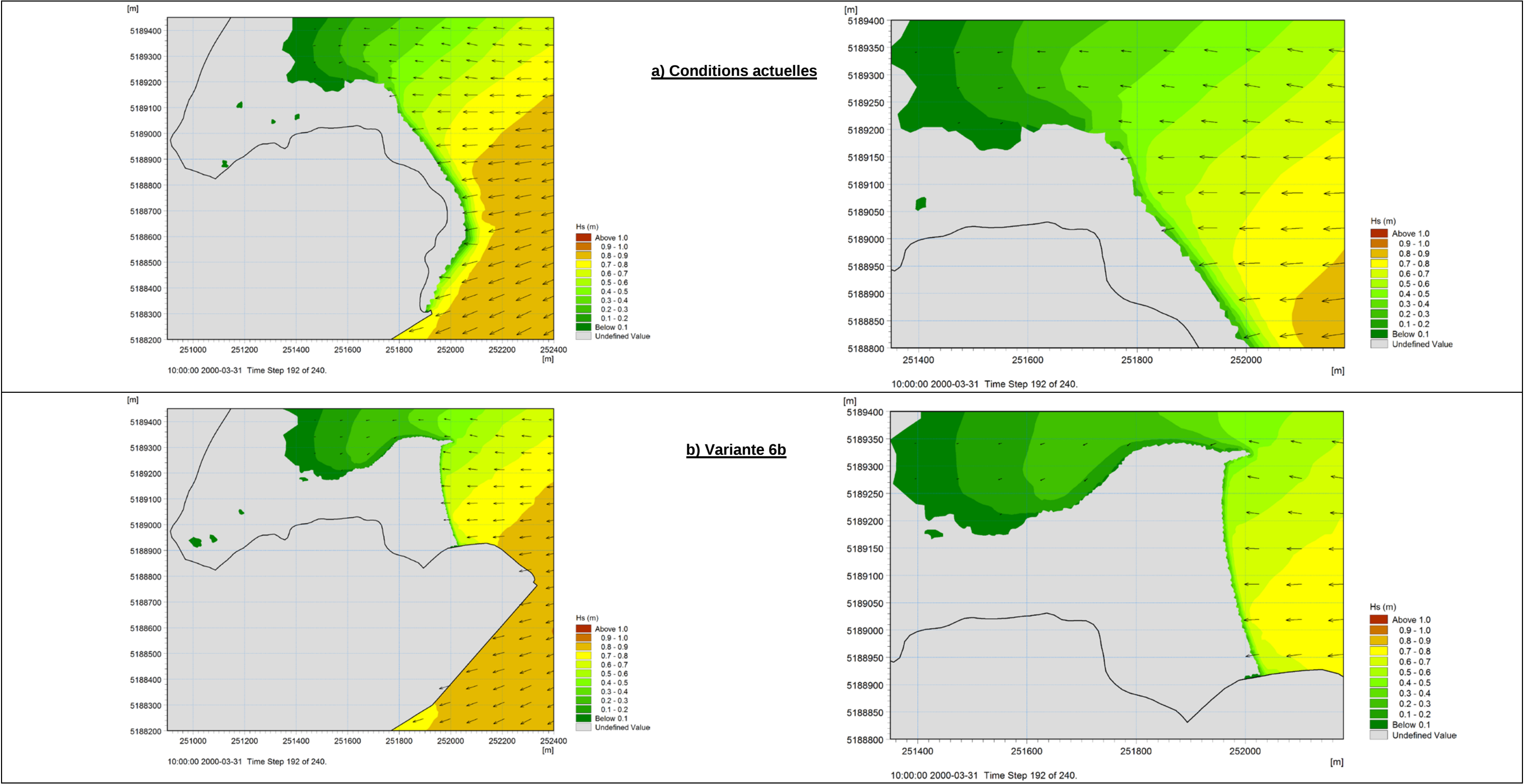


Figure 27 : Vagues à marée basse en conditions actuelles et futures

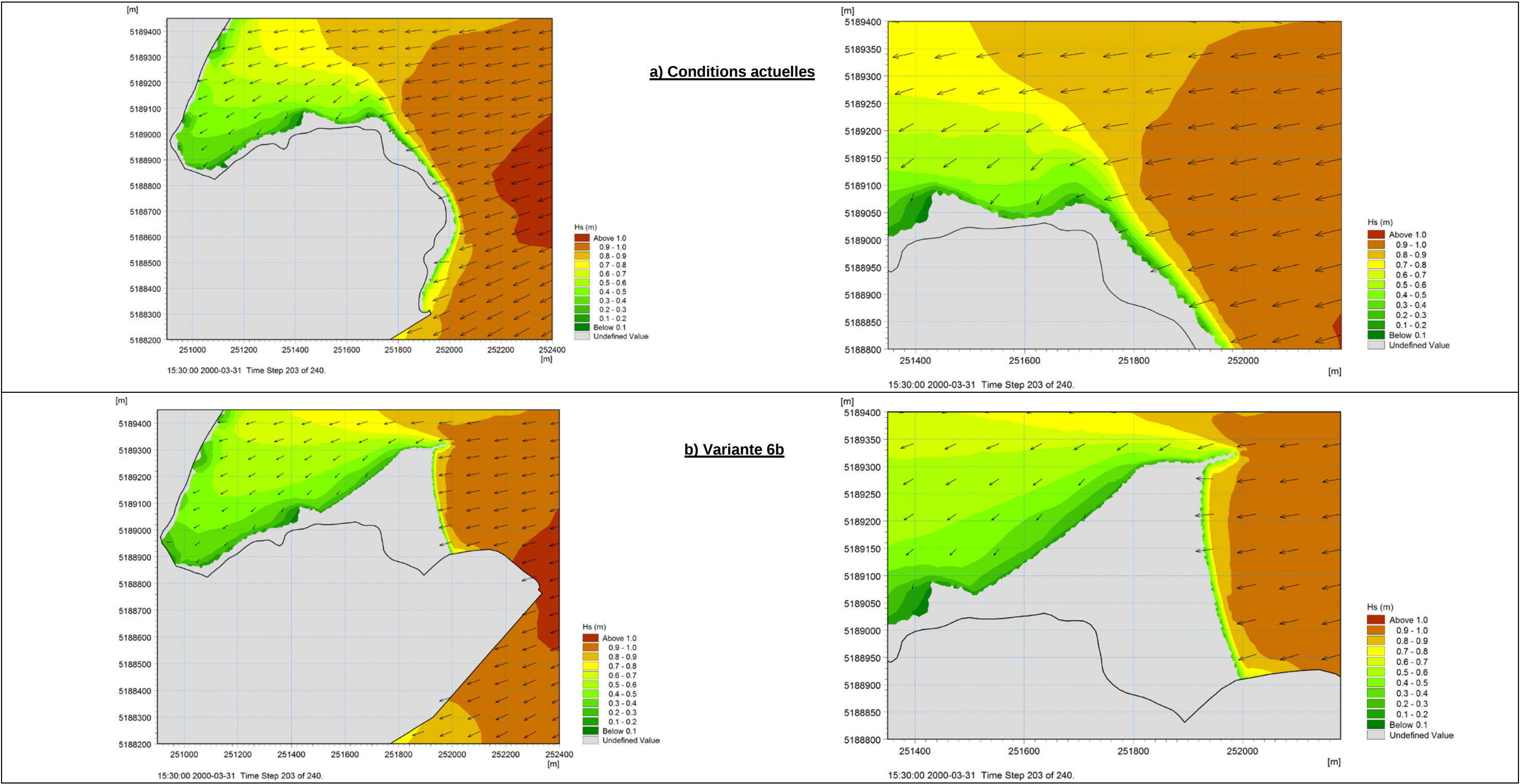


Figure 28 : Vagues à marée haute en conditions actuelles et futures

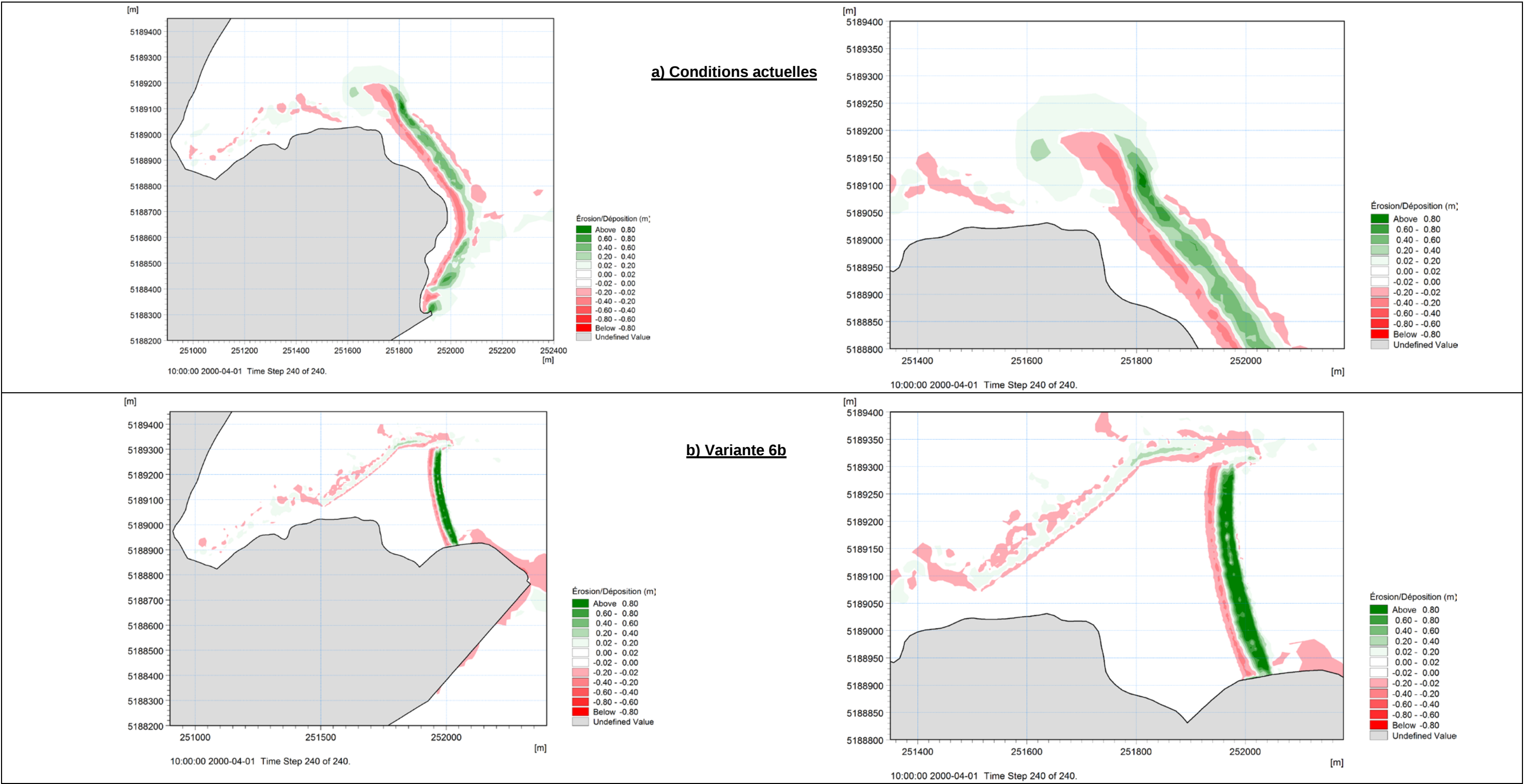


Figure 29 : Patrons d'érosion et de déposition en conditions actuelles et futures

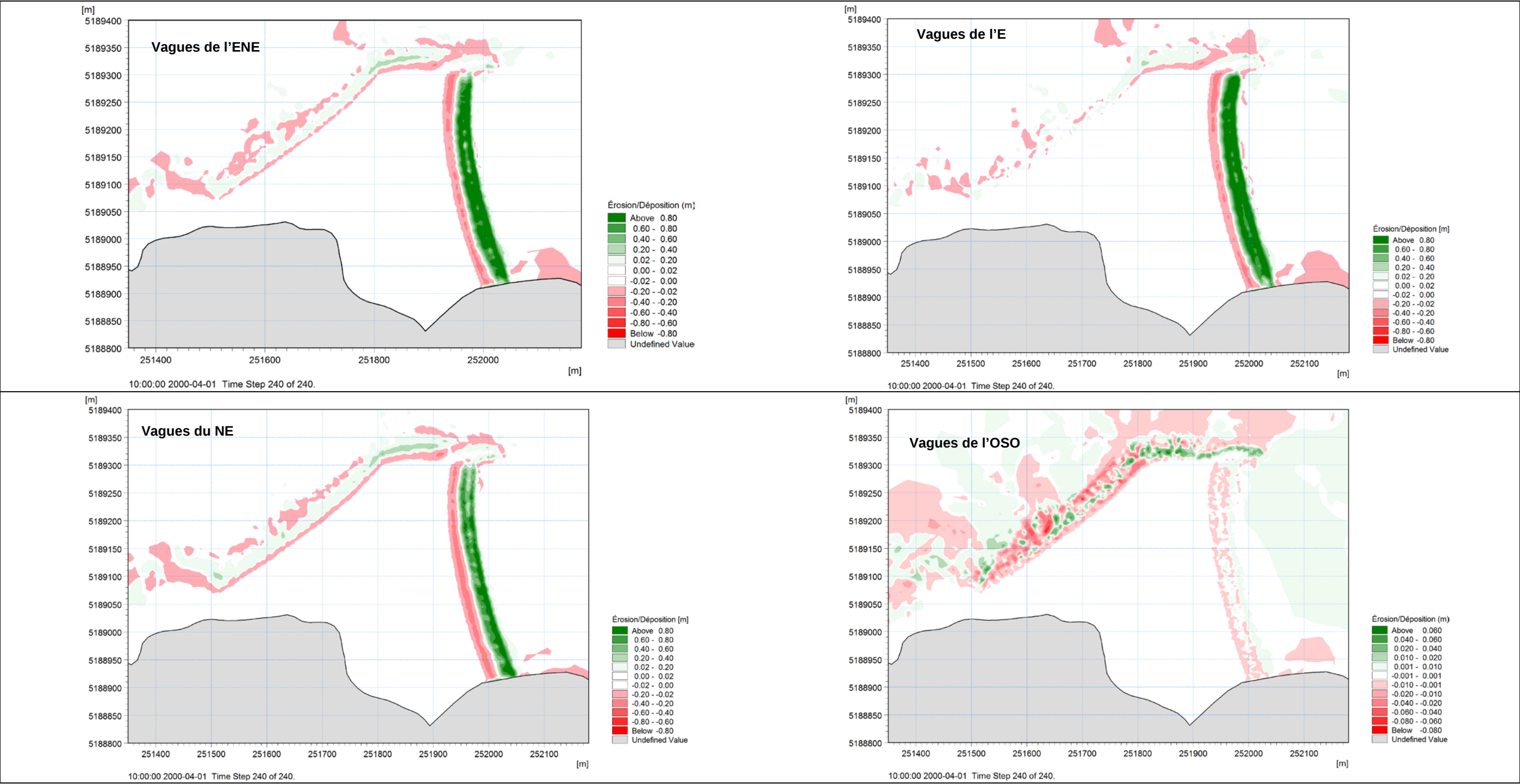


Figure 30 : Patterns d'érosion et de dépôt pour les vagues de l'ENE, du NE, de l'E et de l'OSO

7.0 OPTIMISATION FINALE – VARIANTES 2014

7.1 Contexte

Suite à la remise initiale du présent rapport, en février 2014, l'APQ a pris la décision de limiter à 400 000 m³ le volume de matériaux dragués alloué au remblai de la zone récréotouristique. Des simulations supplémentaires devenaient nécessaires pour finaliser la géométrie de la nouvelle plage, dont la longueur était légèrement réduite par rapport à celle de la variante 6b et qui se trouvait maintenant plus près de la plage actuelle.

Au moment de débiter les nouvelles simulations, l'APQ a également mis à notre disposition des relevés effectués dans la zone littorale, le long de la plage actuelle, au cours de l'été 2013. Tel que mentionné précédemment, la combinaison de ces nouveaux relevés avec ceux effectués plus au large par le SHC (également en 2013) a permis une mise à jour du modèle de terrain dans la zone à l'étude. Les simulations finales (variantes 2014 avec volume de remblai de 400 000 m³) ont donc été effectuées en présence de la bathymétrie de 2013, alors que les simulations précédentes (variantes 6b et précédentes avec 650 000 m³ de remblai) utilisaient les données de 2009.

7.2 Variantes à l'étude

La figure 31 compare le nouvel aménagement proposé par l'APQ avec la variante finale proposée au terme de l'optimisation initiale (variante 6b).

De concert avec CRI, des retouches initiales ont été apportées à la variante proposée par l'APQ, essentiellement pour assurer que le recul du haut de la plage principale ne s'effectue pas au-delà de l'extrémité ouest du brise-lames. En effet, la pente de mise en place de la plage, qui est fixée à 10%, est plus raide que la pente d'équilibre qui résultera de l'effet des vagues et de la variation du niveau d'eau. Il faut donc s'attendre dans les premières années suivant la mise en place initiale du remblai à un adoucissement de la pente se traduisant par un recul du haut de plage.

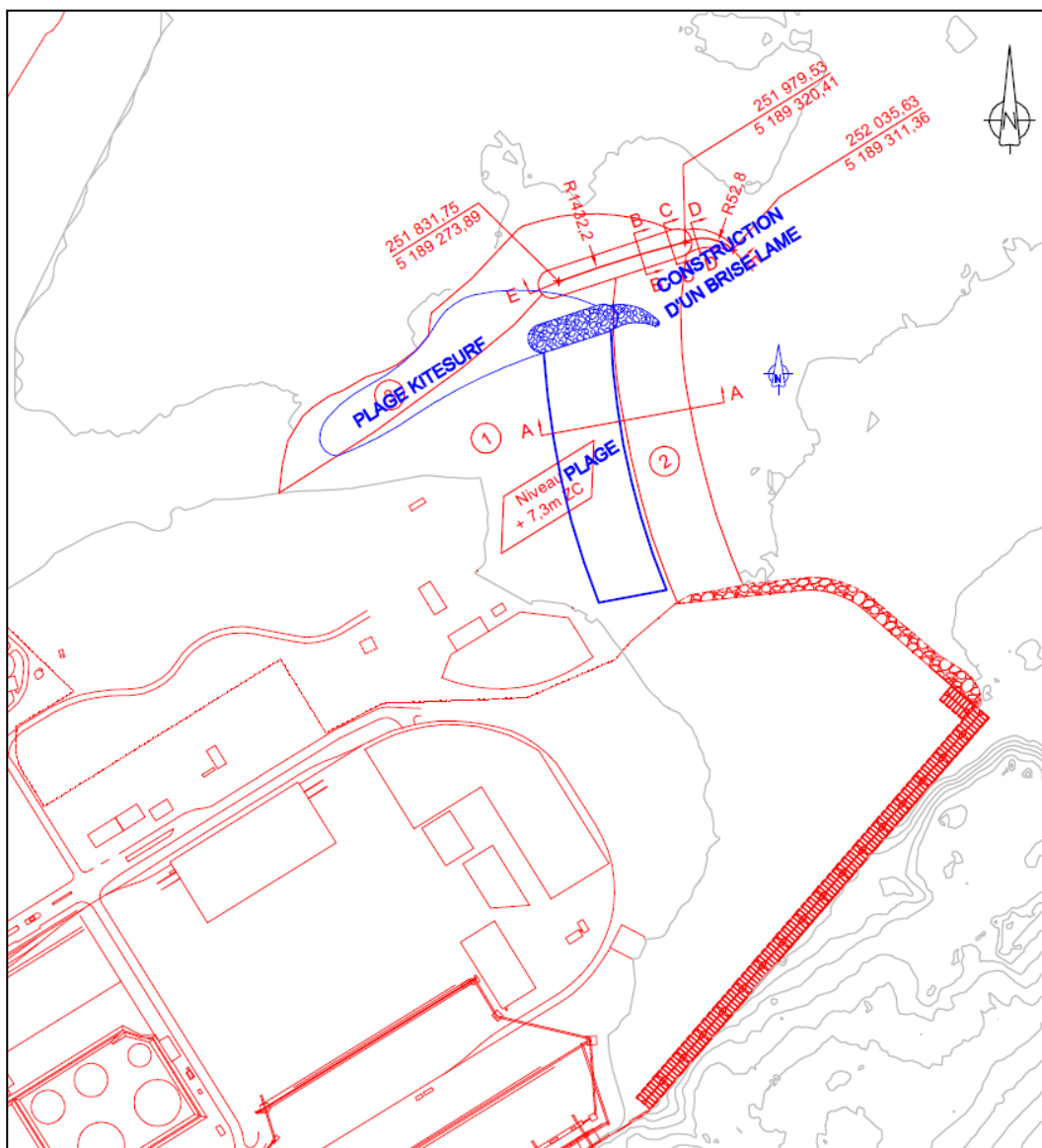


Figure 31 : Nouvelle variante proposée par l'APQ (bleu) avec variante 6b (rouge)

Pour compenser ce recul, la pente de construction de la plage doit être déplacée vers le large. La figure 32 illustre (en rouge) la variante 2014-V1 proposée par CRI comme point de départ des nouvelles simulations. Afin de minimiser le transport littoral sous l'effet des vagues des tempêtes de l'ENE, cette configuration a été raffinée en cours d'étude pour finalement aboutir à la variante 2014-V5, également illustrée à la figure 32 (en vert).

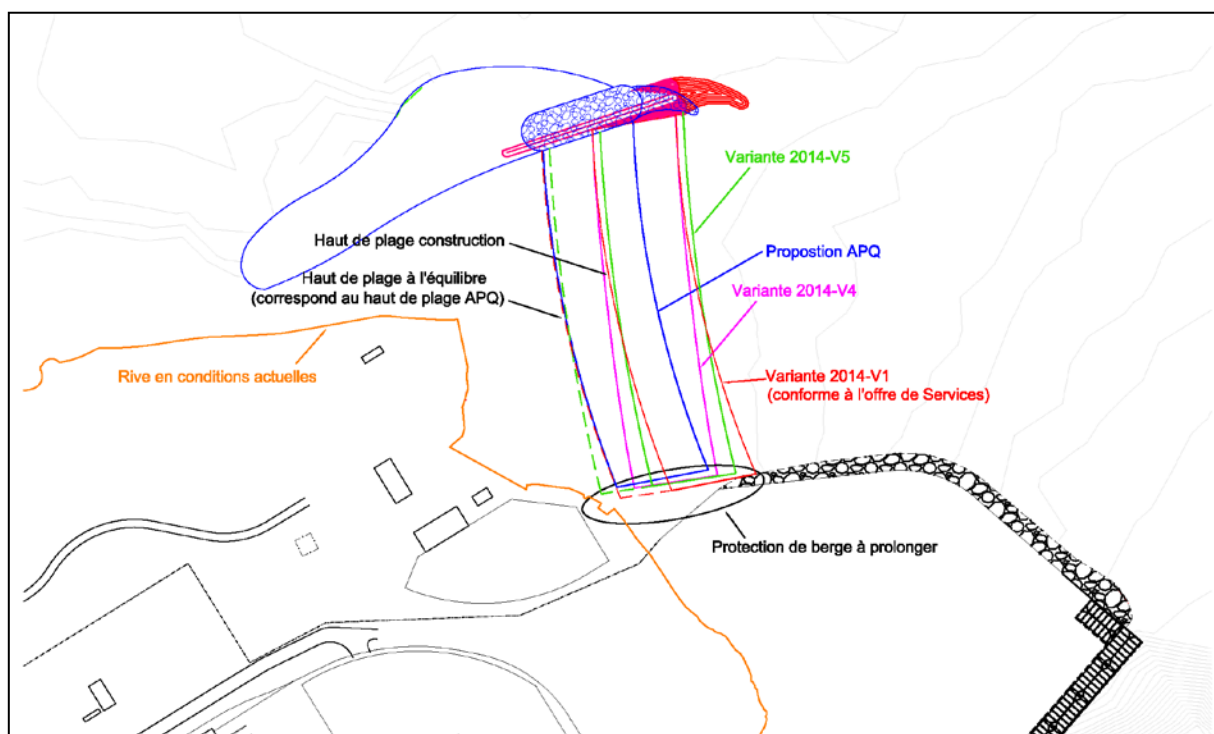


Figure 32 : Variantes 2014-V1 et 2014-V5

Ces deux variantes conduisent à un volume de 400 000 m³ pour l'ensemble du remblai de la zone récréotouristique. Il est à noter que ce volume a été évalué en présence de la bathymétrie de 2013, en supposant des pentes de 10% pour la mise en place initiale des deux plages (principale et kitesurfer) et un niveau de +7,3 m ZC pour la portion supérieure du remblai.

7.3 Scénarios de modélisation

Comme en phase initiale du projet, une part importante des simulations a été réalisée pour une tempête de l'ENE impliquant 5 jours de vents forts (vitesse constante de 23 m/s ou 83 km/h). Comme on l'avait mentionné à la section 5.1, une telle tempête menait le long de la plage actuelle à des patrons d'érosion et de déposition similaires à ceux obtenus pour un événement synthétique regroupant les 18 tempêtes d'importance du secteur général ENE recensés à la station météo Beauport de 1999 à 2013.

L'avantage de la tempête de cinq jours résidait évidemment dans la réduction importante des temps de calcul par rapport à la série de 18 tempêtes, qui s'étalait sur une durée totale de 49 jours.

Ces simulations à plus long terme, intégrant les tempêtes de la période 1999-2013, ont toutefois été effectuées pour la variante d'aménagement la plus prometteuse (variante 2014-V5).

7.4 Résultats initiaux – Tempête synthétique de l'ENE

Comme on l'a déjà souligné, les données disponibles concernant l'évolution de la pointe de Beauport (photos aériennes, relevés bathymétriques) montrent un recul notable de la plage actuelle. L'orientation de la ligne de côte par rapport aux vagues des tempêtes dominantes de l'ENE conduit à un transport littoral dans les portions nord et sud de la plage. Dans la portion nord, les matériaux transportés contribuent à la formation d'une flèche sableuse clairement visible, qui s'avance de plus en plus dans le rentrant sud-ouest. Dans la portion sud, les courants littoraux sont orientés vers le sud et conduisent à une érosion importante de la plage, les matériaux érodés étant transportés au-delà de la ligne des quais, dans les zones draguées beaucoup plus profondes.

Dans ce contexte, le principal objectif poursuivi en vue de maximiser la pérennité de la nouvelle plage consiste à minimiser le transport littoral. Pour ce faire, on cherche à obtenir un angle d'incidence des vagues perpendiculaire à la plage. Le transport sédimentaire s'effectue alors perpendiculairement à côte et tend essentiellement à adoucir la pente de la plage vers un profil d'équilibre, plutôt que de transporter le sable parallèlement à la plage.

La figure 33 illustre le transport littoral obtenu à sept transects (sections-en-travers) couvrant l'ensemble de la plage actuelle. Le graphique exprime le volume sédimentaire transporté parallèlement au haut de plage, en direction nord (valeurs positives) et en direction sud (valeurs négatives). Ces résultats, basés sur la simulation de la tempête de 5 jours de l'ENE, illustrent bien la tendance déjà observée, soit un transport littoral important vers le nord et le sud dans les portions nord et sud de la plage respectivement.

Comme on l'a indiqué précédemment, ce transport marqué par tempête de l'ENE tend à éroder la portion sud de la plage et à transporter le sable de la portion nord vers le rentrant sud-ouest.

La figure 33 présente également les résultats correspondants obtenus avec la variante initiale 2014-V1 proposée dans notre offre de services de juin 2014. Il apparaît de prime abord que la nouvelle géométrie de la plage (forme et orientation) introduit une réduction marquée du transport littoral. Le volume maximal transporté vers le nord est de moins de 300 m³ (section 4), alors qu'une valeur trois fois plus élevée, de 950 m³, est obtenue le long de la plage actuelle (section 3).

La nouvelle plage conduit donc à une réduction marquée du transport littoral et des risques subséquents de déplacement massif des sédiments le long du littoral. Toutefois, à l'ensemble des sept sections considérées, le transport littoral, bien que fortement réduit par rapport aux conditions actuelles, s'effectue pratiquement toujours du sud vers le nord de la plage, sauf à la section 7 (figure 33).

Afin d'atténuer cette tendance, la variante 2014-V4 (figure 32) diminue la courbure de la plage 2014-V1, afin d'aligner cette dernière avec les vagues incidentes de l'ENE. Comme l'indique la figure 33, cette légère modification permet pratiquement de neutraliser le transport littoral, avec un léger transport net vers le nord aux sections 1 à 3, un transport net pratiquement nul à la section 4 et un léger transport vers le sud aux sections 5 et 6.

La variante 2014-V5, illustrée à la figure 32, est très similaire à la variante 2014-v4. Elle ne comporte qu'un léger déplacement vers le large, visant à minimiser le risque d'érosion de la berge actuelle, suite au recul initial de la nouvelle plage. De plus, la courbure des extrémités de la plage est très légèrement modifiée, dans le but de réduire davantage le transport littoral encore observé avec la variante 2014-v1 vers les extrémités de la plage.

Il est à noter que la variante 2014-V5 représente un volume de sable de 399 430 m³, soit une valeur à toute fin pratique égale au volume cible de 400 000 m³. De concert avec la firme CRI, il a été décidé d'adopter la variante 2014-v5 pour la suite des simulations.

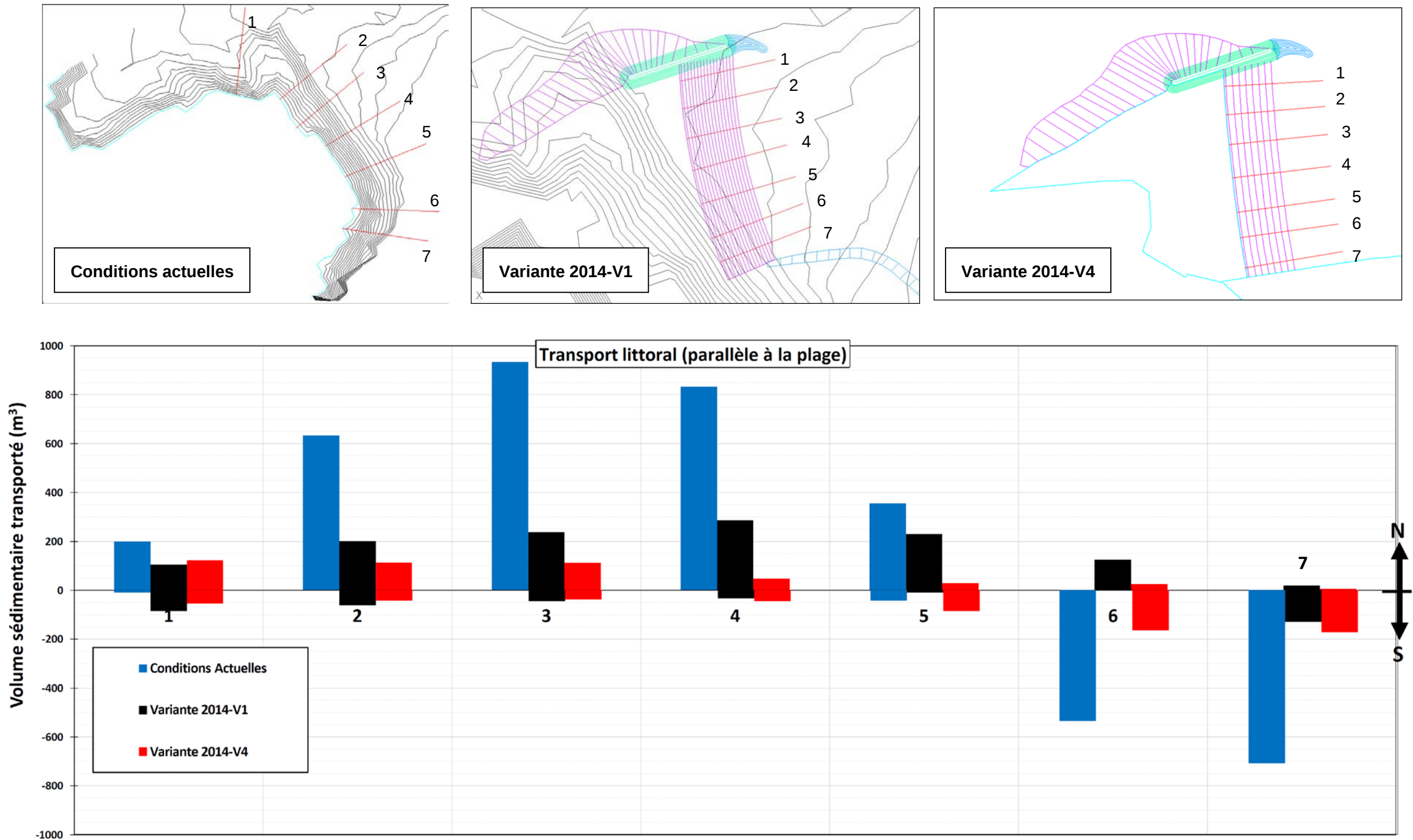


Figure 33 : Transport littoral net le long des plages actuelles et projetées
(Tempête de l'ENE de jours avec vent de 23 m/s)

7.5 Raffinement de l'approche de modélisation

L'analyse détaillée des nouveaux résultats de modélisation, tout comme ceux obtenus avec les simulations initiales (sections 5 et 6), montrait que les simulations de cinq jours n'étaient pas suffisamment longues pour bien montrer le recul du haut de plage qui résulterait de l'adoucissement de la pente de la plage sous l'effet des vagues et du marnage.

Une amélioration de la représentativité des résultats a pu être obtenue pour les simulations à plus long terme des tempêtes observées pendant la période 1999-2013, mais encore une fois, les modèles hydro-sédimentologiques semblaient sous-estimer le recul de la plage et ne parvenaient pas à bien simuler l'évolution de la plage initiale (pente de 10%) vers le profil d'équilibre prévue par la théorie (voir réf. [4]).

Ce problème a pu être en grande partie résolu en modifiant l'approche de modélisation. Les simulations initiales permettaient une modélisation intégrée de l'ensemble des processus en cours, mais la mise en œuvre des modules de calcul s'effectuait de manière séquentielle :

- i. Simulation des niveaux de marée (bathymétrie initiale);
- ii. Simulation des vagues générées par le vent et des contraintes de radiation (bathymétrie initiale);
- iii. Simulation des courants (courants de marée et littoraux) et du transport sédimentaire avec évolution morphologique de la bathymétrie.

Le recul maximal des berges obtenu à l'aide de cette approche était limité par le fait que la simulation des vagues, et des contraintes générant les courants littoraux, s'effectuait toujours sur la base de la bathymétrie initiale.

Pour palier à ce problème, les simulations finales ont été reprises en effectuant l'ensemble des simulations en mode dynamique, c'est-à-dire en appliquant chacun des modules de calcul (hydrodynamique, vagues et transport des sédiments/morphologie) à chaque pas de temps du calcul.

L'action des vagues n'était donc plus limitée à l'emprise de la bathymétrie initiale et pouvait alors simuler des reculs plus importants de la plage. Cette amélioration de la simulation du recul du talus initial a aussi nécessité le raffinement, dans les paramètres de modélisation des hypothèses prises en compte pour l'effondrement des talus.

7.6 Simulation à long terme – Variante 2014-V5

La variante 2014-V5 a été soumise à une simulation à long terme intégrant les 18 tempêtes du secteur général ENE enregistrées à la station météo Beauport entre 1999 et 2013. Cette simulation couvrait une période de 49 jours (incluant les transitions de quelques heures imposées entre chacune des tempêtes), avec des niveaux d'eau variant de 0,29 m à 5,82 m ZC, pour une valeur moyenne de 2,65 m.

À titre d'exemple, la figure 34 présente les profils initial et final obtenu à la section-en-travers (transect) no 4, qui est située au centre de la nouvelle plage. La modélisation permet effectivement de bien représenter l'adoucissement du profil, qui résulte de l'érosion du haut de plage et du déplacement des sédiments vers le bas de plage. Comme l'indique la figure 34, le volume érodé est très similaire au volume déposé dans la section-en-travers, ce qui confirme l'absence d'un déséquilibre du transport littoral.

Au niveau d'eau moyen de 2,65 m, le modèle prédit un recul d'environ 20 m de la plage après la séquence de 18 tempêtes du secteur ENE. La faible pente observée entre les chaînages 40 et 70 m correspond pratiquement à la pente de 1,4% prédite pour un profil à l'équilibre avec des sables de 0,2 mm (réf. [4]). Cette pente d'équilibre ne se prolonge pas vers le large et, sur la base des résultats de modélisation, il semble que la nouvelle plage n'a pas atteint son état d'équilibre au terme de la simulation à long terme. Même s'il peut être affecté par un certain degré d'imprécision, ce résultat confirme néanmoins l'importance de suffisamment déplacer le talus de construction initiale de la plage vers le large, afin de laisser un espace suffisant pour le recul du haut de plage.

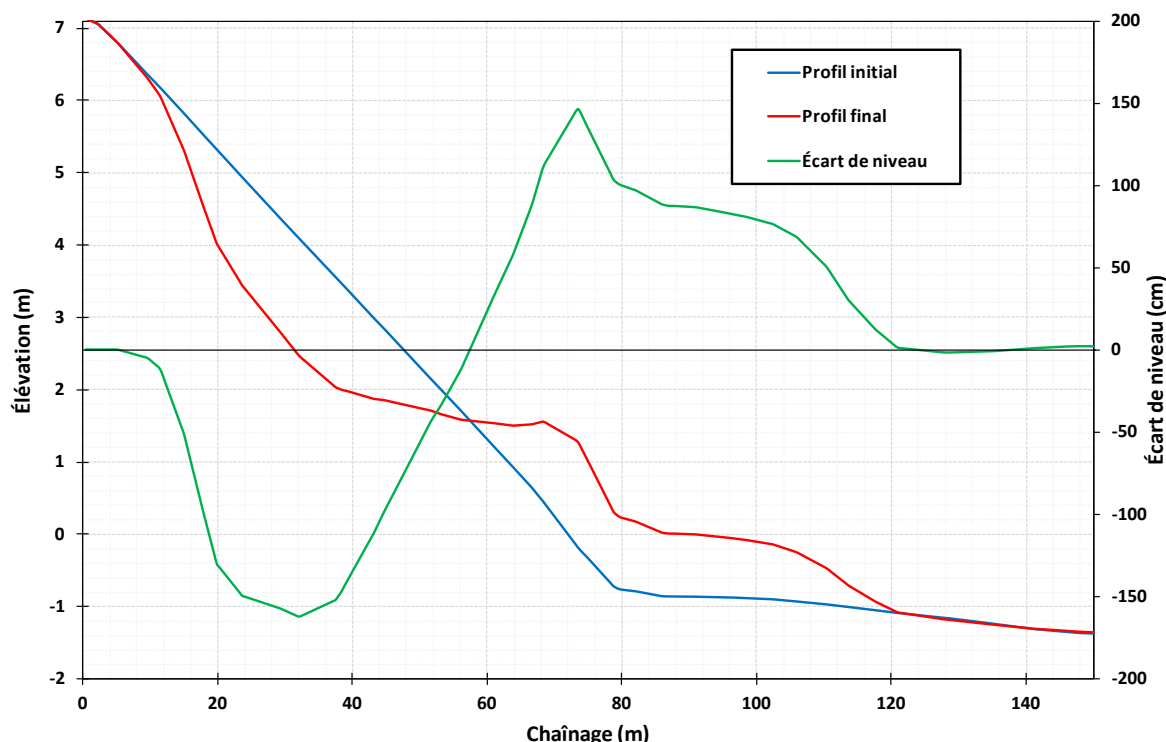


Figure 34 : Profils initial et final de la nouvelle plage - Section no 4
(Variante 2014-V5 - Simulation à long terme)

La figure 35 illustre l'évolution morphologique des abords de la plage principale (variante 2014-V5) au terme de la simulation à long terme. Ces résultats confirment la prédominance du transport sédimentaire perpendiculaire à la plage, qui conduit essentiellement à l'adoucissement de la pente de construction de la plage.

7.7 Variante recommandée

Sur la base des nouvelles simulations hydrosédimentologiques, la variante 2014-V5 est recommandée. L'annexe B présente les dessins détaillés de cet aménagement.

Pour les tempêtes de l'ENE, qui dictent la dynamique sédimentaire de la pointe de Beauport, la nouvelle plage est alignée perpendiculairement à la direction générale de propagation des vagues et limite ainsi l'importance des courants littoraux vers le sud et le nord. Ces courants sont responsables, en conditions actuelles, du recul notable de la plage indiqué par l'ensemble des relevés disponibles.

En conditions futures, l'essentiel du transport sédimentaire s'effectuera perpendiculairement à la nouvelle plage, contribuant ainsi à adoucir la pente initiale de construction de la plage. La possibilité de fuite de sédiments vers les extrémités de la plage principale sera non seulement limitée par son orientation mais également par l'effet de confinement offert au nord par le brise-lames et l'épi et au sud par le nouveau terminal portuaire.

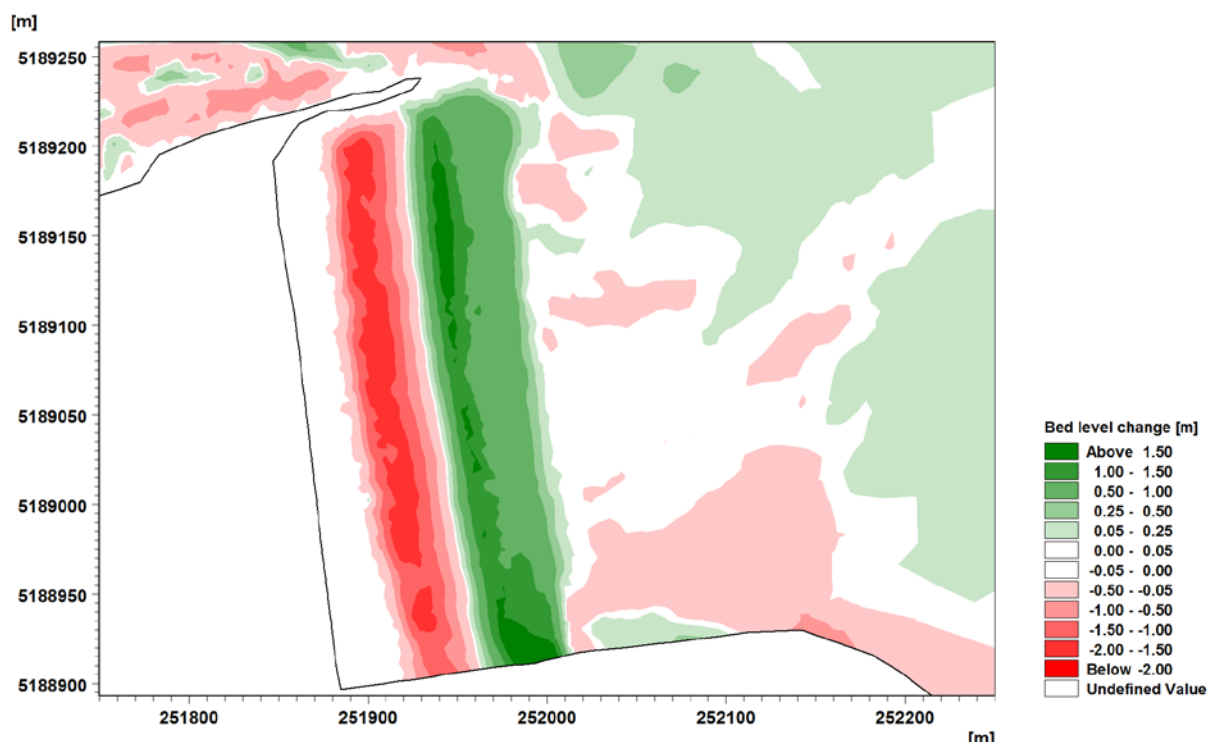


Figure 35 : Évolution morphologique de la nouvelle plage
(Variante 2014-V5 - Simulation à long terme)

7.8 Plage de kitesurf

Par rapport à la variante retenue en première phase de l'étude (i.e. avec volume de 650 000 m³), la réduction de l'emprise du nouvel aménagement proposé par l'APQ conduit à un déplacement vers le sud du brise-lames en enrochement situé à l'extrémité nord de la plage. Comme l'indique la figure 31, la plage de kitesurf est maintenant moins reculée par rapport au brise-lames et se trouve ainsi plus exposée à l'action des vagues du NE et de l'E.

En présence de sable ayant un D_{50} de 0,2 mm, les simulations à long terme prédisent une érosion notable de la plage de kitesurf ainsi que des abords immédiats du brise-lames (Figure 36). L'érosion à proximité du brise-lames peut-être prévenue par une protection d'enrochement, mais une stabilité accrue de la plage nécessiterait probablement une reconfiguration du brise-lames.

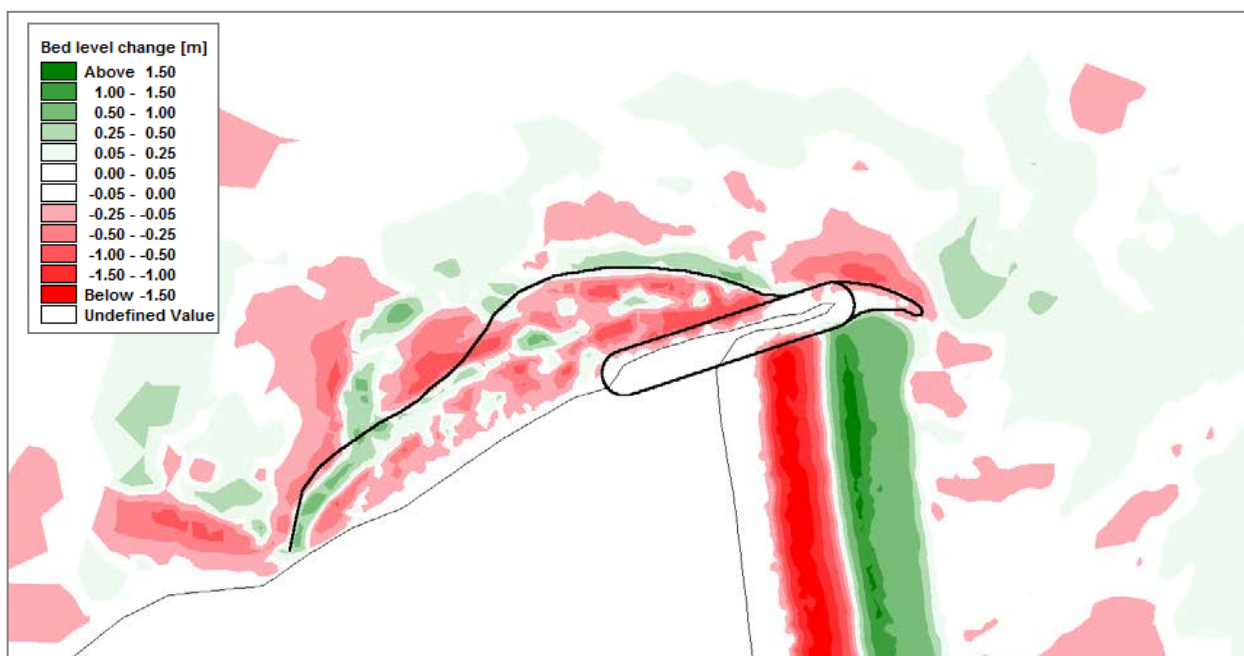
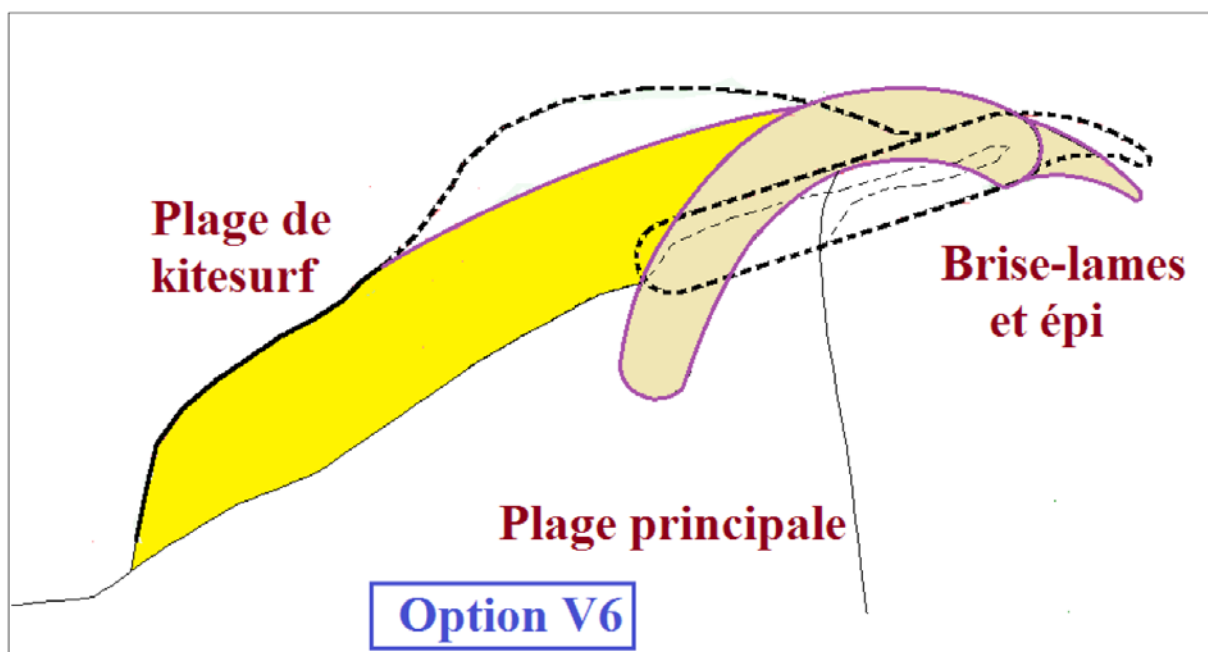
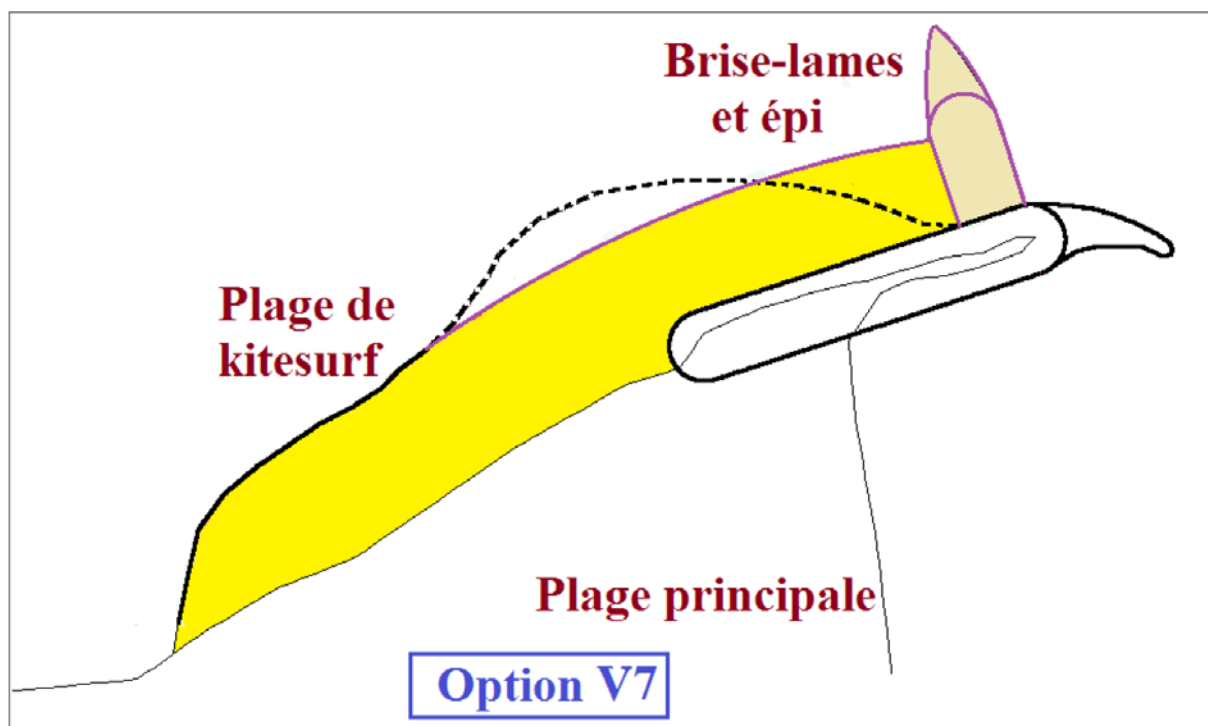


Figure 36 : Évolution morphologique de la plage de kitesurf
(Variante 2014-V5 - Simulation à long terme)

La firme CRI a proposé deux options en vue d'accroître la protection de la plage de kitesurf. La première consiste à construire un brise-lames supplémentaire, perpendiculaire au brise-lames initial (variante 2014-V6, Figure 37a) et la seconde comporte un brise-lames incurvé de manière à mieux protéger la plage de kitesurf (variante 2014-V6, Figure 37b). Tel que mentionné à la référence [4], la variante 2014-V7 apparaît préférable à cause de l'entrave potentielle à la navigation causée par le nouvel ouvrage de la variante 2014-V6.



a) Variante 2014-V6



b) Variante 2014-V7

Figure 37 : Protection de la plage de kitesurf – Modification du brise-lames

8.0 CONCLUSIONS

Dans le cadre de son projet d'extension du secteur portuaire Beauport, l'Administration portuaire de Québec (APQ) a confié à Lasalle|NHC un mandat visant à finaliser la configuration de l'extension dans le secteur des plages, en vue de passer aux phases d'avant-projet et projet. L'étude, effectuée en étroite collaboration avec la firme CRI, visait à définir une géométrie de plages permettant de minimiser les risques d'érosion et d'offrir une stabilité accrue par rapport aux conditions actuelles, et ce tout en assurant un équilibre entre les déblais et les remblais.

En phase initiale de l'étude, il était supposé qu'un volume de 650 000 m³ de matériaux dragués étaient disponibles pour le remblai du secteur des plages. La variante d'aménagement proposée (variante 6b) au terme de cette phase comportait une plage principale suivant un axe général nord-sud et une plage longeant le rentrant sud-ouest, destinée plus spécifiquement aux adeptes du kitesurf. Un brise-lames et un épi en enrochement sont situés à la jonction des deux plages.

Suite à la remise de la version initiale du présent rapport, l'APQ a décidé de limiter à 400 000 m³ le volume de remblai alloué à l'aménagement du secteur des plages. Des nouveaux relevés de la zone littorale bordant la plage actuelle ont également été mis à notre disposition pour cette nouvelle phase d'étude. La variante 2014-V5 obtenue au terme de cette nouvelle optimisation s'inspire de la variante 6b et comporte les mêmes éléments de base (plage principale, plage de kitesurf et brise-lames), mais avec une emprise réduite.

Les simulations hydrosédimentologiques ont permis de développer une géométrie minimisant le transport littoral vers les extrémités de la nouvelle plage lors des tempêtes du secteur général ENE. Ces tempêtes sont déterminantes pour la dynamique sédimentaire de la pointe de Beauport et les courants littoraux qu'elles génèrent le long de la plage actuelle expliquent le recul relativement important de la plage observée au fil des ans.

La possibilité de fuite de sédiments vers les extrémités de la nouvelle plage sera non seulement limitée par son orientation mais également par l'effet de confinement offert au nord par le brise-lames et l'épi et au sud par le nouveau terminal portuaire.

Le transport sédimentaire aux abords de la nouvelle plage s'effectuera principalement perpendiculairement au littoral et conduira simplement à un adoucissement de la pente initiale mise en place lors de la construction de la plage.

La stabilité à long terme de la plage sera donc clairement améliorée par rapport à celle de la plage actuelle.

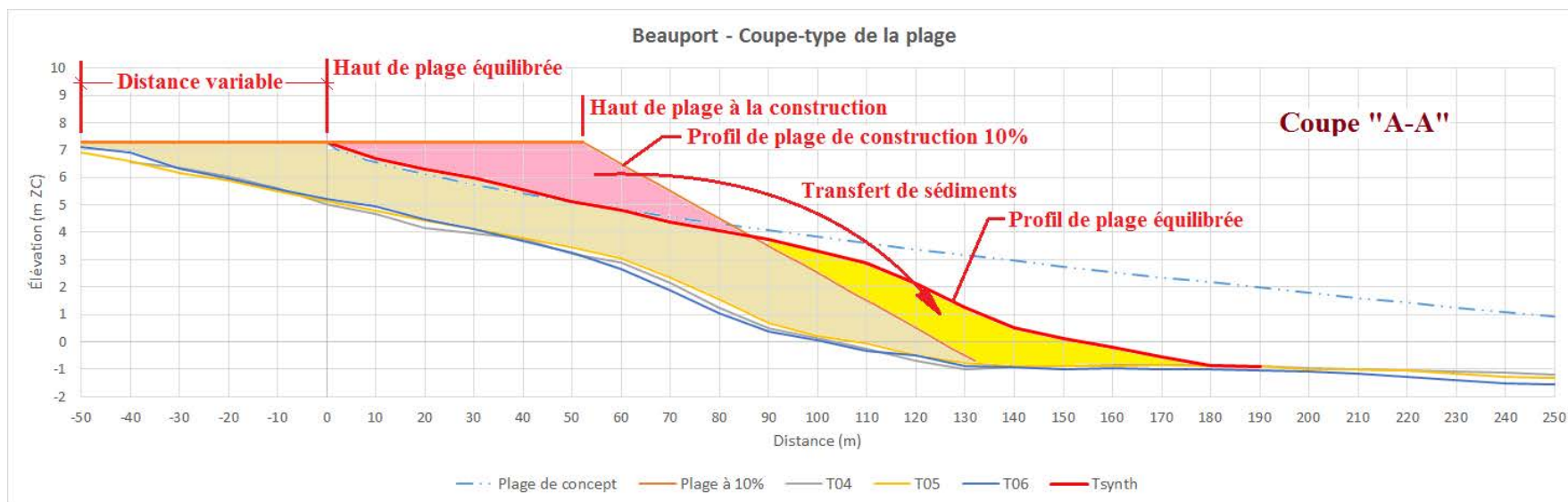
Dans la variante 2014-V5, la plage destinée aux adeptes de kitesurf sera plus vulnérable aux vagues du NE et de l'E que dans la variante 6b. Selon l'analyse effectuée par la firme CRI (réf. [4]), une légère retouche à la géométrie du brise-lames permettra d'accroître le niveau de protection de cette plage.

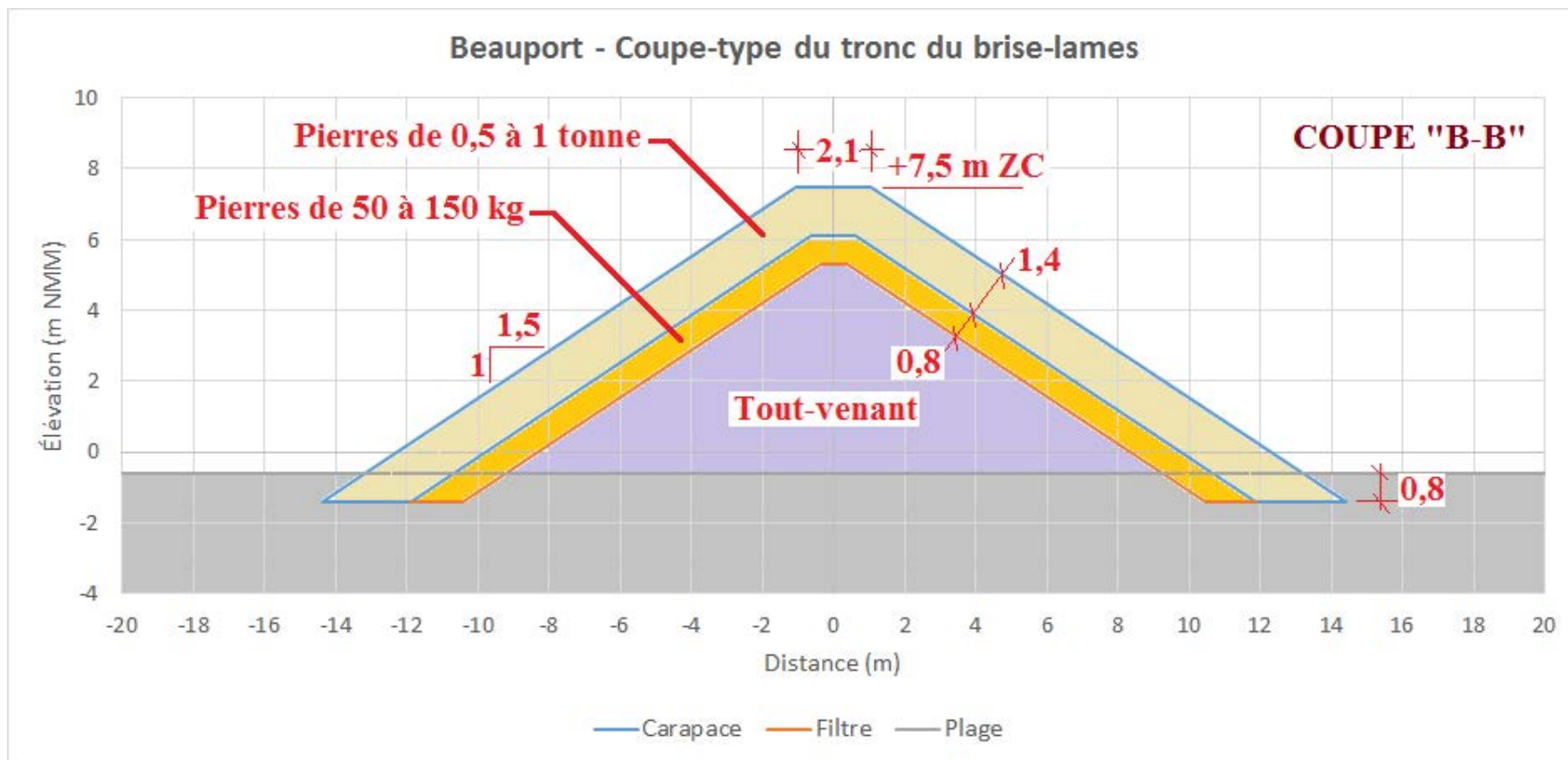
RÉFÉRENCES

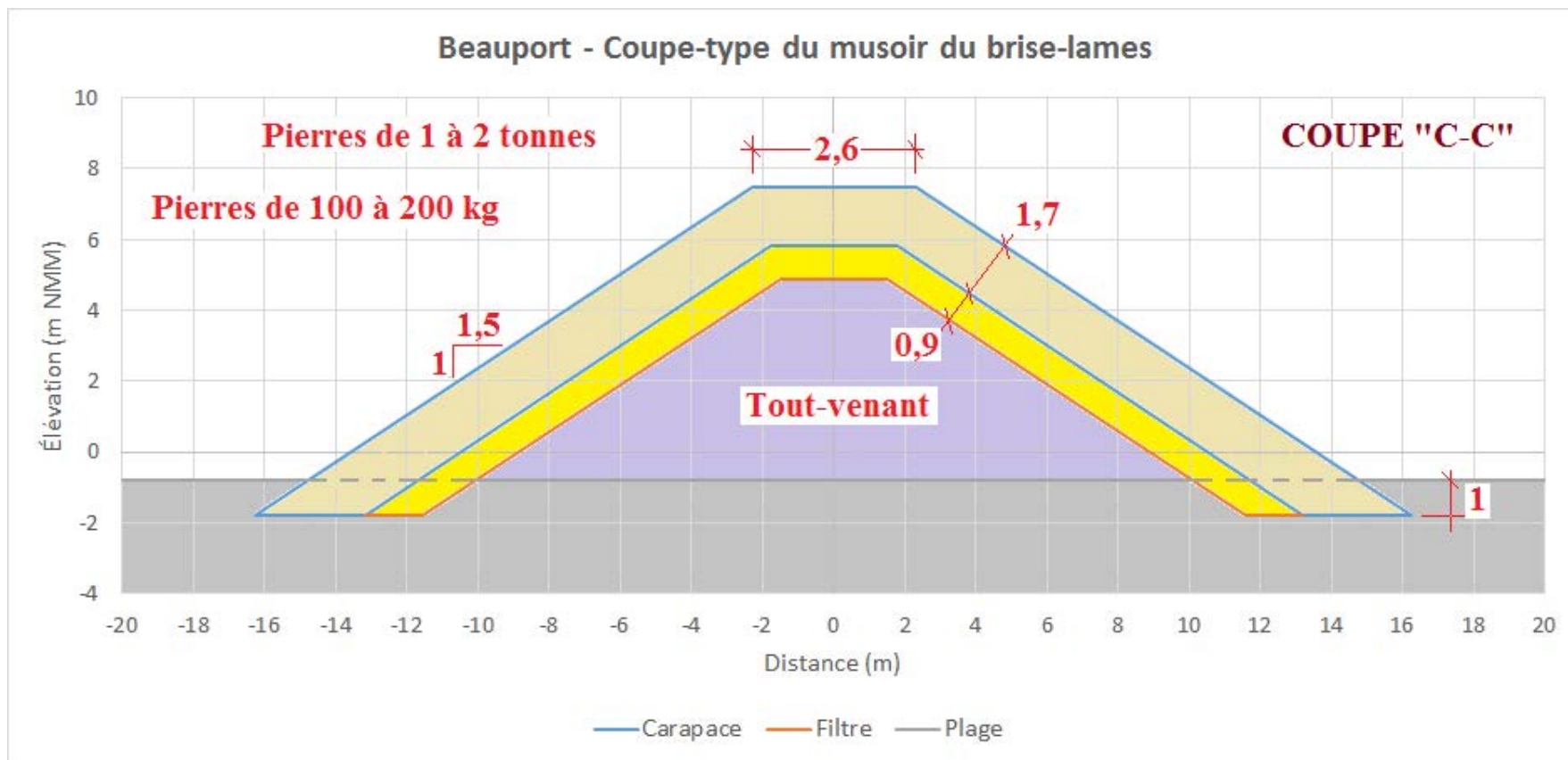
- [1] VILLENEUVE, M. ET HOSSAINI N. (2006). *Port de Québec – Legs fédéral de 2008 – Site de la baie de Beauport – Impacts de l'extension du secteur portuaire de Beauport sur les conditions hydrosédimentologiques locales*. Rapport du Groupe-Conseil LaSalle no 1605 préparé pour l'Administration portuaire 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] ROPARS, Y. (2014). *Port de Québec – Étude de configuration finale de la plage - Nouvelles infrastructures portuaires – Secteur de Beauport, Québec*. Rapport technique préliminaire préparé pour l'Administration portuaire de Québec, Novembre 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.

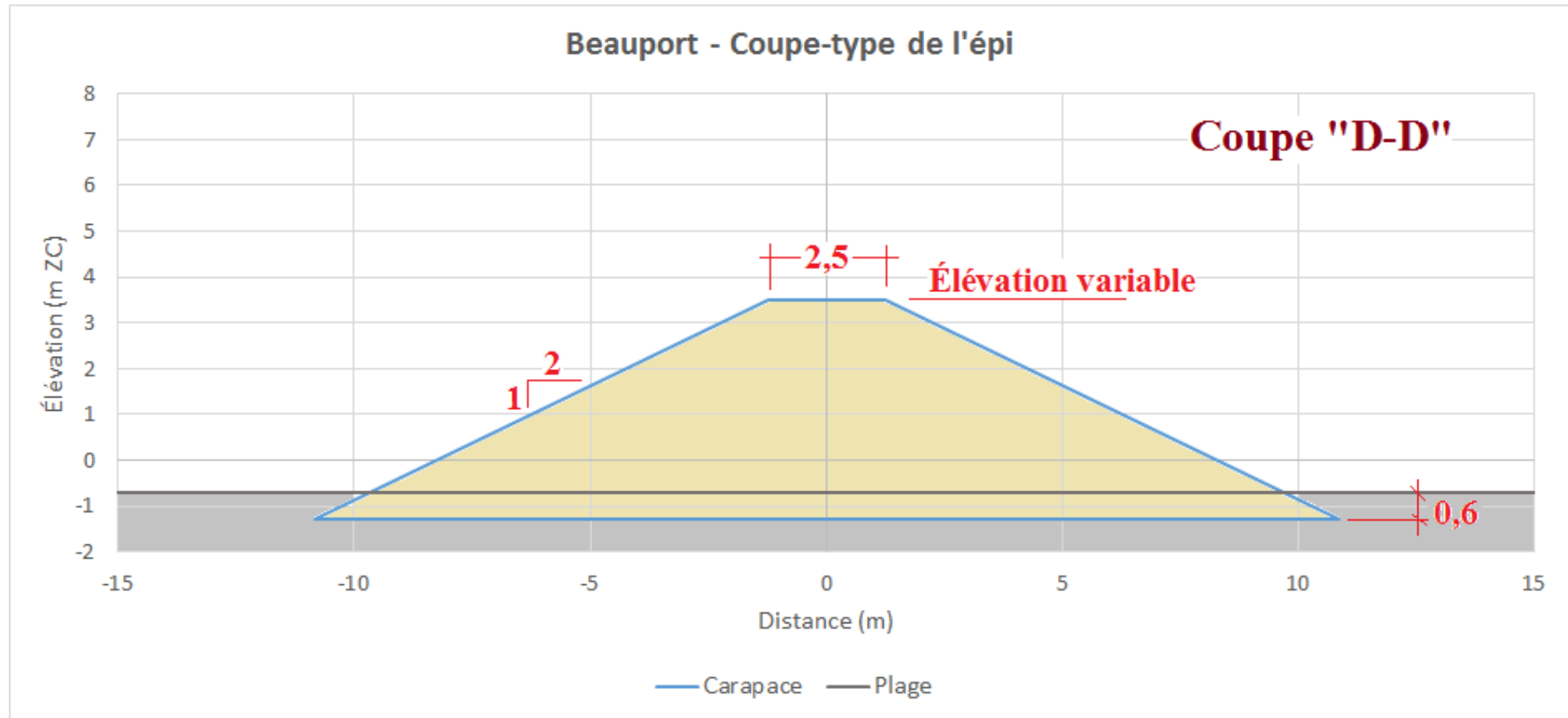
- ANNEXE A -

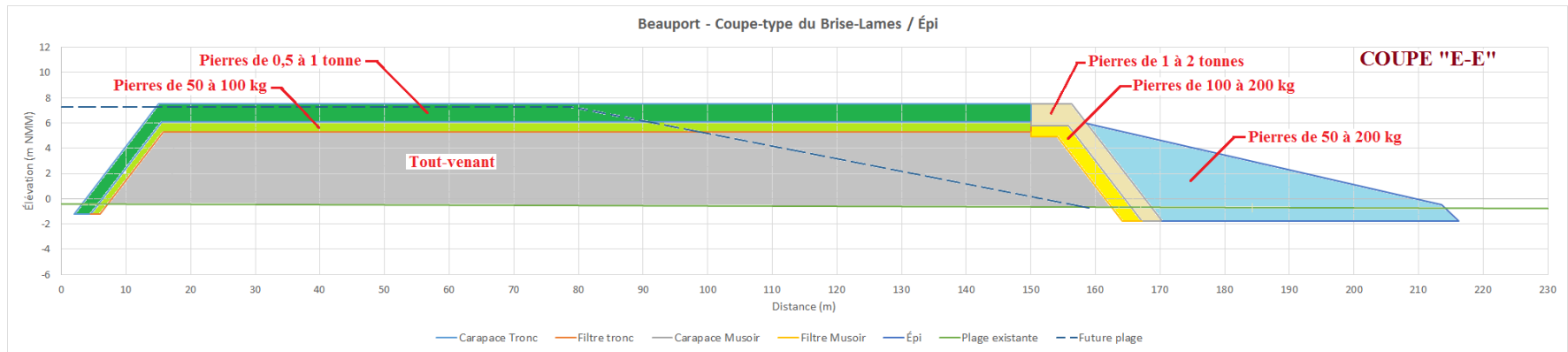
Dessins fournis par la firme CRI pour la modélisation des ouvrages











- ANNEXE B -

Vue en plan et en coupes de l'aménagement proposé (variante 2014-V5)