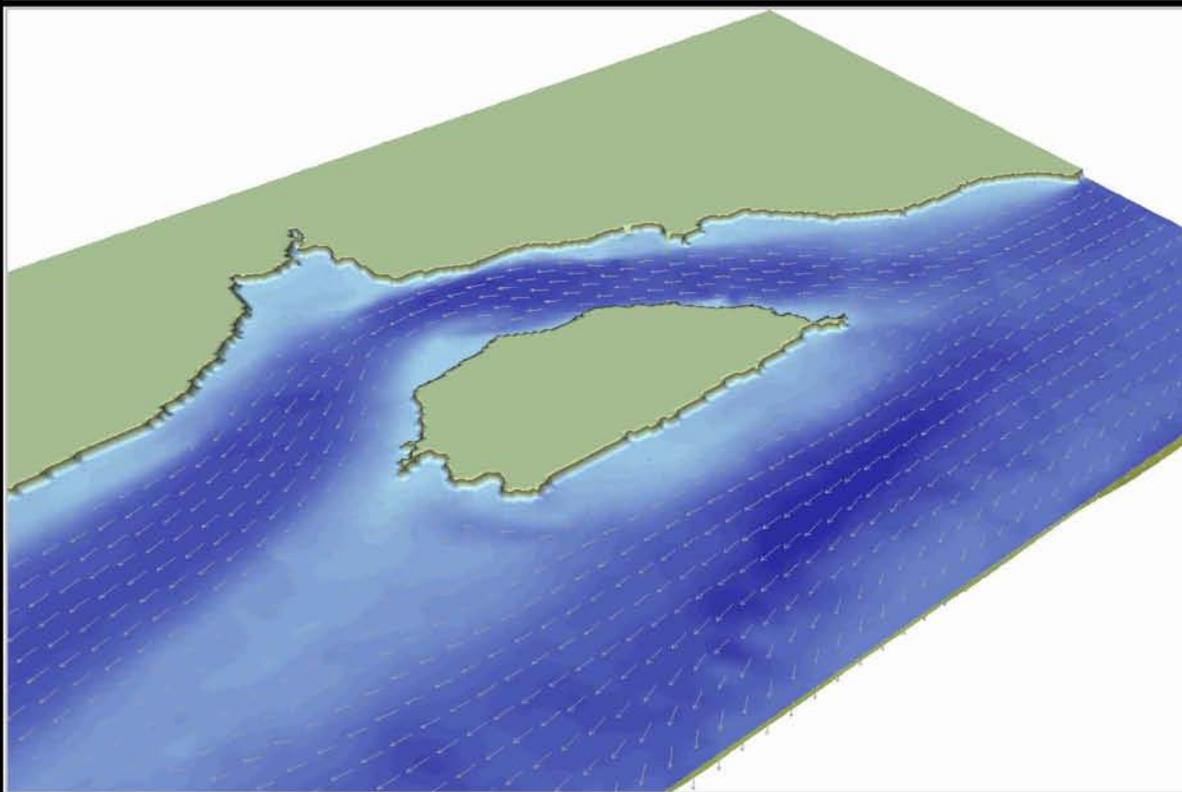


**Annexe 4 Rapport de modélisation numérique des
conditions hydrosédimentologiques
au quai de l'Île-aux-Coudres**



QUAI DU TRAVERSIER DE L'ISLE-AUX-COUDRES

**Modélisation numérique des conditions
hydrosédimentologiques**



Le Groupe-Conseil LaSalle Inc.

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

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

Site internet : www.gcl.qc.ca

Courrier électronique : gcl@gcl.qc.ca

Rapport préparé pour

DESSAU

pour le compte de

Société des traversiers du Québec

QUAI DU TRAVERSIER DE L'ISLE-AUX-COUDRES

Modélisation numérique des conditions hydrosédimentologiques

Rapport no 1689

Mai 2008

Préparé par :

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marc Villeneuve'.

Marc Villeneuve, ing.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Catherine Denault'.

Catherine Denault, ing.

207-105 (1005)

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	ii
1.0 INTRODUCTION.....	1
2.0 PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE.....	3
2.1 Mise en contexte.....	3
2.2 Études antérieures.....	4
2.3 Données disponibles	6
2.3.1 Relevés bathymétriques des abords du quai et de la marina.....	6
3.1.1 Relevés effectués pour la liaison sous-marine de 25 kV (1995)	16
3.1.2 Relevés effectués par Dessau (2007)	17
3.2 Approche préconisée.....	18
3.0 MODÉLISATION NUMÉRIQUE.....	19
3.1 Modèle de terrain.....	19
3.1.1 Limites de la zone modélisée	19
3.1.2 Données bathymétriques.....	21
3.1.3 Montage du modèle de terrain.....	21
3.2 Conditions aux limites.....	24
3.3 Paramètres de modélisation sédimentologique.....	25
4.0 RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION	29
4.1 Ajustements et validation du modèle hydrodynamique	29
4.2 Résultats de modélisation hydrodynamique	33
4.2.1 Champs des courants de vive-eau	33
4.2.2 Vitesses maximales des courants dans la zone à l'étude	38
4.3 Modélisation hydrosédimentologique – Résultats initiaux	40
4.4 Analyse de sensibilité	44
4.4.1 Représentation des zones érodables	44
4.4.2 Raffinement du maillage.....	49
4.4.3 Modélisation hydrodynamique tridimensionnelle.....	49
4.4.4 Formulation du modèle de transport solide	49
5.0 INCIDENCE SUR LES TRAVAUX DE DRAGAGE	51
5.1 Comparaison avec l'étude de Troude (2006) et sources d'incertitude	51
5.2 Travaux de dragage.....	56
5.2.1 Emprise du dragage initial	56
5.2.2 Dragage d'entretien	57
5.2.3 Utilisation des matériaux dragués	58
6.0 SOMMAIRE ET CONCLUSION.....	59
RÉFÉRENCES.....	61

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Secteur à l'étude.....	2
Figure 2 : Axe de transport des sables par les courants de jusant selon Troude (2006).....	5
Figure 3a : Sédimentation et érosion aux abords du quai du traversier.....	9
Figure 3b: Sédimentation et érosion aux abords du quai du traversier.....	10
Figure 3c : Sédimentation et érosion aux abords du quai du traversier.....	11
Figure 3d : Sédimentation et érosion aux abords du quai du traversier.....	12
Figure 3e : Sédimentation et érosion aux abords du quai du traversier.....	13
Figure 4a : Bathymétrie avant et après la construction du brise-lames et de la marina	14
Figure 4b : Évolution de la bathymétrie aux abords du brise-lames de la marina	15
Figure 5 : Caractérisation des sédiments de surface.....	16
Figure 6 : Emplacement des sédiments prélevés en octobre 2007	17
Figure 7 : Limites des modèles numériques existants	20
Figure 8 : Données bathymétriques disponibles dans le secetur de l'Isle-aux-Coudres.....	22
Figure 9 : Modèle de terrain – Maillages rectangulaires imbriqués (MIKE 21 NHD).....	23
Figure 10 : Modèle de terrain raccourci – Maillage flexible.....	26
Figure 11a : Conditions de marée imposées aux limites amont et aval des modèles	27
Figure 11b : Conditions de marée imposées aux limites amont et aval des modèles	28
Figure 12 : Ajustement de la rugosité des fonds.....	30
Figure 13 : Validation des niveaux d'eau prédits par le modèle numérique.....	30
Figure 14 : Courants maximums de jusant – Comparaison avec l'Atlas des courants du SHC.....	32
Figure 15a : Courants de marée – Flot	34
Figure 15b : Courants de marée – Jusant.....	35
Figure 15c : Courants de marée – Jusant.....	36
Figure 15d : Courants de marée – Flot	37
Figure 16 : Vitesses maximales des courants de vive-eau dans la zone à l'étude	39
Figure 17 : Limites initiales de la zone érodable (sable $D_{50} = 0,2$ mm)	40
Figure 18 : Simulation initiale – Patrons de sédimentation / érosion	42
Figure 19 : Évolution du taux sédimentation et du niveau des fonds (Simulation de 14 jours).....	43
Figure 20 : Zone érodable (sable $D_{50} = 0,2$ mm) définie d'après les levés de 1995.....	45
Figure 21 : Simulation –révisée – Patrons de sédimentation / érosion	47
Figure 22 : Simulation révisée - Évolution du taux sédimentation et du niveau des fonds	48
Figure 23 : Raffinement du maillage (secteur de l'île aux Coudres)	50
Figure 24a : Influence des ouvrages existants situés à l'amont et l'aval du quai.....	54
Figure 24b : Influence des ouvrages existants situés à l'amont et l'aval du quai.....	55

1.0 INTRODUCTION

La Société des Traversiers du Québec (STQ) réalise actuellement une étude d'impact dans le cadre d'un projet de dragage décennal pour son quai de l'Isle-aux-Coudres. La démarche vise à élargir l'emprise de la zone draguée d'environ 25 000 à 30 000 m² à compter de 2009, pour un total approximatif de 30 000 à 35 000 m², alors que les travaux de dragage annuels actuellement autorisés ne couvrent qu'une zone de 5 000 m² ou moins.

À l'amont du quai, un dépôt de sable longeant le brise-lames de la marina de l'Isle-aux-Coudres vient limiter l'aire de manœuvre des traversiers et il semble que l'importance de ce dépôt s'accroît d'année en année. L'augmentation de l'emprise des travaux de dragage vise essentiellement à assurer une aire de manœuvre pleinement sécuritaire pour les traversiers, ce qui devient difficile en présence du dépôt de sable et avec une emprise limitée à 5 000 m² pour le dragage.

Le présent rapport rend compte des travaux de modélisation numérique effectués par le Groupe-Conseil LaSalle en vue de mieux comprendre les conditions hydrodynamiques et sédimentologiques menant à l'ensablement du quai de l'Isle-aux-Coudres. De manière plus précise, la modélisation devait permettre de valider et d'optimiser le gabarit envisagé par la STQ pour les travaux de dragage d'approfondissement de 2009. Il s'agissait ensuite d'estimer la fréquence et l'importance des dragages récurrents et de faire un choix entre des dragages d'entretien annuels limités aux abords immédiats du quai (dans la zone d'intervention actuelle) ou s'étendant dans l'ensemble de la zone du dragage initial.

Les travaux de modélisation devaient notamment s'appuyer sur l'étude sédimentologique effectuée en 2005-2006 par M. Jean-Pierre Troude, de l'Université Laval, en étroite collaboration avec les représentants de la STQ dirigeant la traverse de l'Isle-aux-Coudres.

Le rapport est divisé en quatre parties. La section 2.0 résume d'abord la problématique et les données de terrain ou informations permettant de mieux la comprendre, puis décrit l'approche méthodologique adoptée pour la présente étude. La section 3.0 présente les principales caractéristiques et hypothèses de la modélisation numérique des conditions hydro-sédimentologiques. Les résultats de la modélisation sont présentés à la section 4.0 alors que la section 5.0 discute de l'incidence de ces résultats sur la définition et la planification des futurs travaux de dragage requis au quai de l'Isle-aux-Coudres.

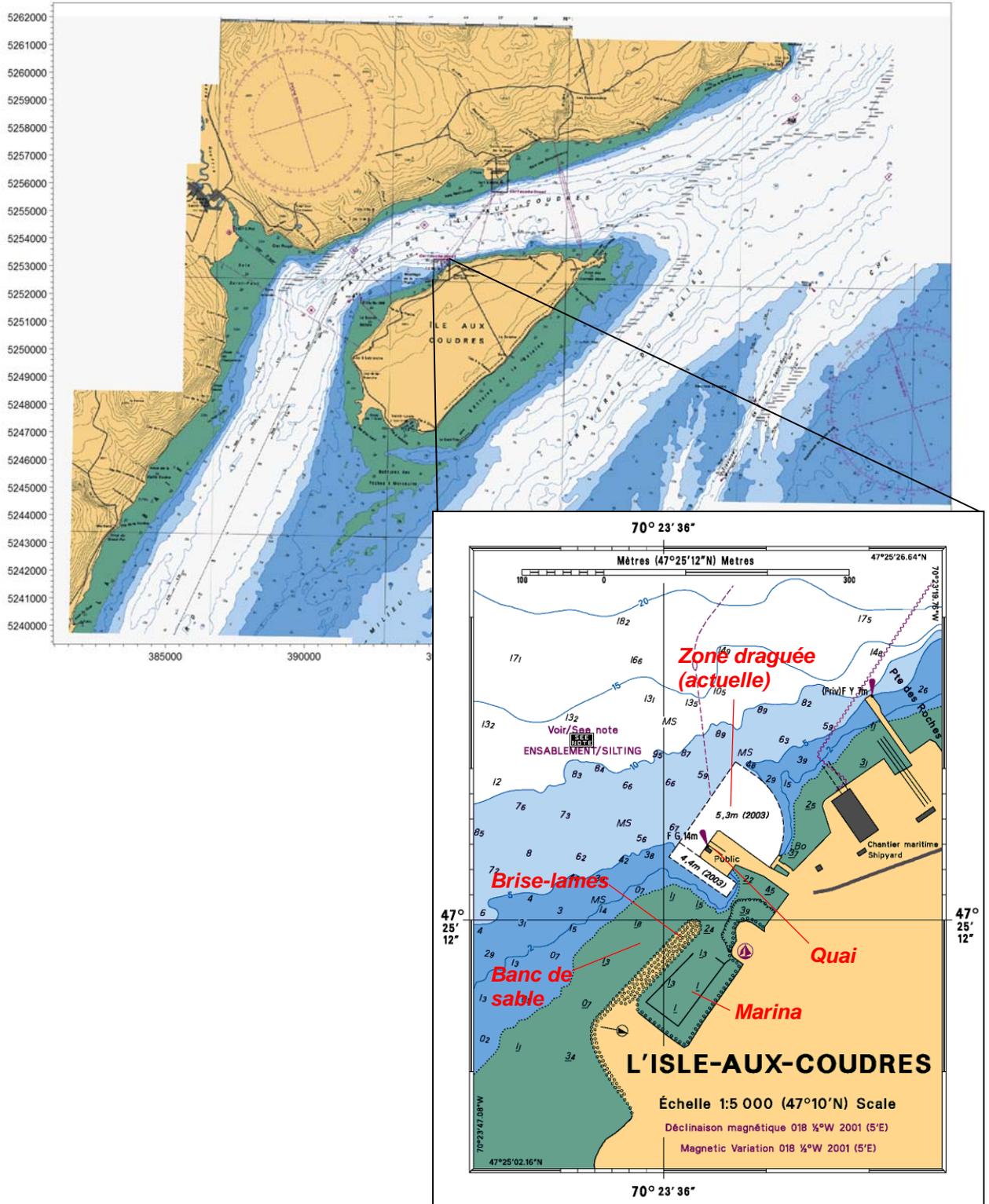


Figure 1 : Secteur à l'étude

2.0 PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE

2.1 Mise en contexte

Depuis 2001, le quai de l'Isle-aux-Coudres, qui était antérieurement propriété du Ministère des Travaux publics du Canada, appartient à la Société des traversiers du Québec (STQ) qui assure la liaison entre l'Isle-aux-Coudres et Saint-Joseph-de-la-Rive, du côté nord du Saint-Laurent.

Les approches du quai de l'Isle-aux-Coudres subissent une sédimentation naturelle qui réduit les profondeurs d'eau disponibles aux abords du quai et entrave l'accès du traversier au quai. Contrairement à la plupart des ports du bas Saint-Laurent, où la sédimentation est avant tout constituée de matériaux fins (silts et argiles), les sédiments déposés au quai de l'Isle-aux-Coudres sont majoritairement composés de sable.

Des dragages d'entretien annuels sont requis pour garantir un accès sécuritaire du traversier à l'Isle-aux-Coudres. Selon les données disponibles, l'ensablement des abords du quai n'est pas un phénomène récent et des dragages semblent avoir été requis depuis la mise en place de l'ouvrage. La STQ dispose de l'historique des volumes dragués depuis 1964.

Les principaux facteurs anthropiques ayant pu modifier le degré d'ensablement sont l'allongement du quai d'une quarantaine de pieds lors des travaux d'agrandissement de 1978 et, surtout, la mise en place en 1984 du brise-lames protégeant le havre de la marina. Sur la base des données bathymétriques disponibles, la section 2.3.1 décrit l'évolution des fonds aux abords de ce brise-lames.

Depuis la prise en charge du quai par la STQ en 2001, les dragages sont autorisés sur une base annuelle et limités à une zone de 5 000 m² ou moins. La figure 1 indique l'étendue du secteur pouvant être touché par les dragages d'entretien. La zone de dragage située à l'amont du quai n'offre pas une grande marge de manœuvre au traversier lorsque ce dernier doit contourner le quai par l'amont lors d'un accostage à marée montante (flot).

Selon la STQ, ce problème a augmenté ces dernières années avec l'augmentation continue de la hauteur et de l'étendue du banc de sable longeant le brise-lames de la marina. La STQ en conclut que des dragages d'entretien annuels limités à une emprise de 5 000 m² et moins ne suffisent plus à garantir un accès pleinement sécuritaire du traversier au quai de l'Isle-aux-Coudres.

Dans ce contexte La STQ, désire procéder à un dragage d'approfondissement initial couvrant environ 25 000 m² et effectuer par la suite les dragages d'entretien requis de manière périodique.

2.2 Études antérieures

Afin de mieux comprendre la dynamique sédimentaire régissant les approches du quai de l'Isle-aux-Coudres et de préciser ses besoins futurs en terme de dragage, la STQ a confié en 2005 une étude au Professeur Jean-Pierre Troude, spécialiste en sédimentologie de l'Université Laval [1]. L'étude portait à la fois sur l'ensablement affectant le quai du traversier et sur la sédimentation fine que subit par le havre de la marina (port de refuge).

Pour ce qui touche l'ensablement du quai du traversier, les conclusions de cette étude peuvent se résumer comme suit :

- L'absence de sable le long des berges rocheuses situées à l'amont et à l'aval des ouvrages portuaires de même que l'importance plus considérable de la sédimentation observée en amont du quai plutôt qu'en aval tendent à indiquer que l'ensablement provient principalement des courants de jusant, qui transportent les sédiments selon un axe ouest – est, entre les fonds sableux situés au large du mouillage de la Prairie et la zone délimitée par le quai du traversier et le brise-lames de la marina. Cet axe de transport, qui est illustré à la figure 2, est pratiquement à 45° de la direction du rivage.
- L'absence de sédiments le long des berges en aval du quai confirme que ce dernier agit comme un ouvrage d'interception des sables transportés par les courants de jusant.
- L'axe privilégié de transport sédimentaire est aligné avec les vagues des secteurs ouest et nord-ouest, qui se produisent avec force environ six semaines par année en moyenne. Toutefois, les statistiques indiquent que ces épisodes surviennent surtout en fin d'automne et en hiver, en présence de glace à la dérive, et leur influence sur le transport sédimentaire ne semble pas certaine. Il semble donc que les courants de marée soient la principale force régissant le transport sédimentaire. Les variations importantes de la salinité, qui sont mal connues, peuvent également influencer la dynamique sédimentaire du secteur.

- La réduction de l'ensablement observé à l'amont du quai passe par la réduction du volume du banc de sable longeant le brise-lames de la marina. Une telle réduction peut être obtenue par un dragage d'approfondissement initial, suivi de dragages d'entretien périodiques. M. Troude évoque également la mise en place d'un épi submergé freinant les apports sableux du large se dirigeant vers le quai.

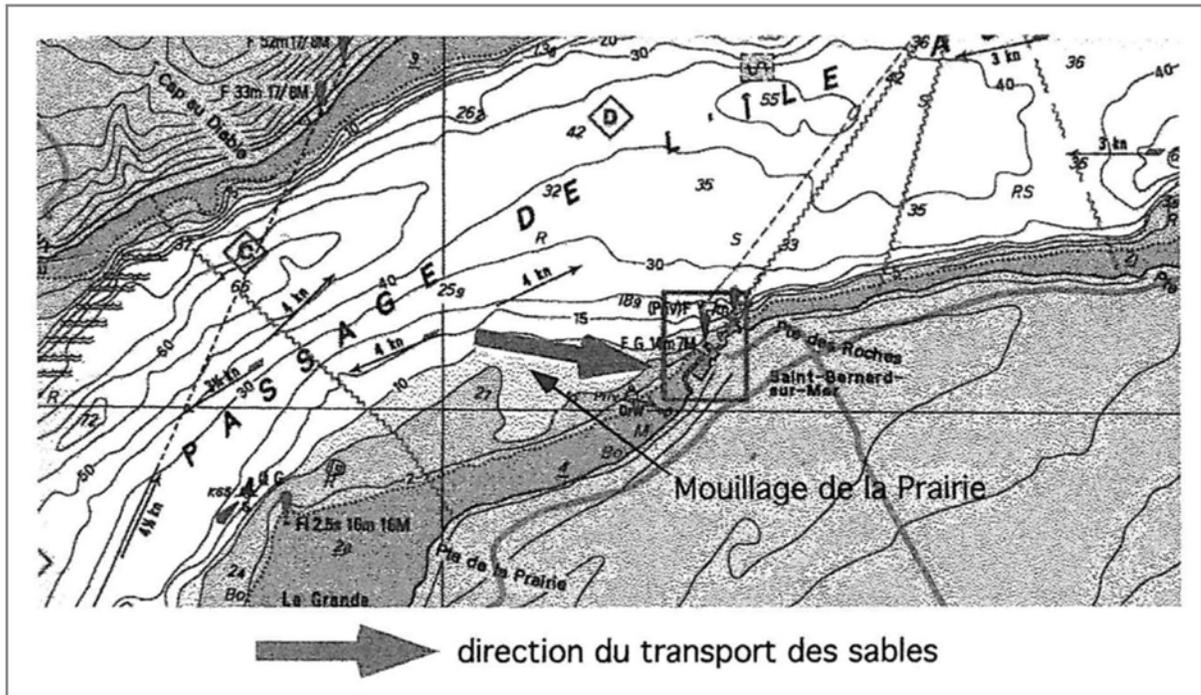


Figure 2 : Axe de transport des sables par les courants de jusant selon Troude (2006)

2.3 Données disponibles

2.3.1 Relevés bathymétriques des abords du quai et de la marina

La STQ dispose de relevés bathymétriques annuels de la zone à l'étude pour les périodes de 1985 à 2000 (plans papier fournis par Travaux Publics Canada) et 2001 à 2007 (plans en format numérique préparés par la STQ). Un plan papier de 1983 correspondant aux conditions bathymétriques avant l'aménagement de la marina et de son brise-lames nous a également été fournis.

Les plans préparés par Travaux Publics Canada (1985-2000) étaient avant tout destinés au contrôle des quantités de matériaux dragués et les données bathymétriques ne couvrent que la zone potentielle des dragages (indiquée à la figure 1). À partir de 2002, la STQ a toutefois élargi la zone des relevés bathymétriques annuels de manière à couvrir les abords du brise-lames de la marina et de suivre son évolution.

Les données bathymétriques peuvent donc être consultées de manière à mieux documenter deux aspects de la problématique :

- l'ensablement des abords du quai et les dragages d'entretien qui en résultent;
- l'évolution du banc de sable formé le long du brise-lames de la marina.

Les figures 3a à 3e présentent les patrons de sédimentation et d'érosion obtenus en comparant des relevés bathymétriques effectués à différentes dates. Cinq cas sont considérés : le premier (figure 3a) présente l'évolution des fonds sur une période de six mois, entre la fin du dragage de juin 2002 et le mois de décembre 2002. Le second cas (figure 3b) couvre l'intervalle de décembre 2002 à juin 2003. Les trois autres cas (figures 3c à 3e) se rapportent respectivement aux années 2005, 2006 et 2007 et illustrent l'évolution des bathymétries relevées au départ des glaces (avril de chaque année) et environ un mois après, en mai, avant le début des dragages d'entretien.

Pour l'ensemble des figures, les zones de sédimentation (rehaussement des fonds) sont identifiées en rouge et les zones d'érosion (abaissement des fonds) en bleu. Toutes les figures sont pertinentes pour l'analyse de la sédimentation aux abords immédiats du quai du traversier, sauf la figure 3b qui résulte de la comparaison de la bathymétrie avant et après un dragage d'entretien. Les abords ouest du quai montrent alors un abaissement important des fonds attribuable au dragage.

Les figures 3a, 3c, 3d et 3e indiquent toutes une sédimentation notable dans la zone draguée à l'amont du quai, au droit de l'entrée de la marina. Entre juin et décembre 2002 (6 mois), la figure 3a indique que l'épaisseur maximale des accumulations de sable obtenues dans ce secteur dépasse 2 m et atteint localement plus de 2,5 m.

En ne considérant qu'une période d'environ un mois avant les travaux de dragage, la sédimentation à cet endroit est moins importante mais demeure toutefois clairement visible aux figures 3c à 3e. Les accumulations maximales obtenues dans cette zone entre avril et mai varient de 50 à 60 cm pour les années 2005, 2006 et 2007.

L'examen des figures 3a à 3e révèle également les points suivants :

- L'ensablement est concentré à l'amont du quai. La tendance observée à l'aval du quai est moins claire : on observe de la sédimentation en 2002, 2005 et 2007 (figures 3a, 3c et 3e respectivement) alors que les relevés du printemps 2006 montrent plutôt de l'érosion (figure 3d). Il est à souligner que le traversier accoste généralement à l'aval du quai (rampe no 1). La sédimentation réduite ou même l'érosion indiquées de ce côté du quai par les relevés bathymétriques s'expliquent fort probablement par les chasses de sédiments causées par les jets d'hélices du traversier.
- En allant vers les portions les plus profondes couvertes par les relevés bathymétriques, on observe généralement une alternance des zones de sédimentation et d'érosion, et ce notamment pour les années 2006 et 2007. Ces résultats peuvent témoigner de la formation de dunes, une figure sédimentaire typique des fonds sableux soumis à des courants importants.
- Le long du brise-lames de la marina, les relevés de 2002 n'indiquent pas de changements tangibles de la bathymétrie. Toutefois, les autres relevés couvrant ce secteur montrent tous une tendance à la sédimentation.

Les figures 4a et 4b illustrent l'évolution de la bathymétrie de la zone à l'étude, entre 1983 et 2007. La figure 4a permet d'abord de comparer la bathymétrie obtenue avant la construction du brise-lames et de la marina (relevé du 15 juillet 2003, figure 4a(i)) avec celle du 14 avril 2005, qui est représentative des conditions plus récentes (figure 4a(ii)). La figure 4a(iii) illustre l'écart du niveau des fonds calculé d'après ces deux relevés.

Les écarts les plus importants sont observés aux abords immédiats du quai du traversier, où les fonds de 2005 sont de 3 à 6 m plus élevés qu'en 1983. Cette variation résulte toutefois des travaux de dragage d'entretien (les bathymétries de 1983 et 2005 ont respectivement été effectuées *après* et *avant* les dates usuelles de dragage) et ne reflètent pas l'évolution morphologique naturelle du secteur.

Le long de la face externe du brise-lames, à l'amont de l'aire touchée par les dragages d'entretien, il est cependant très clair que les fonds sont actuellement de 1 à 2 m plus élevés que ce qu'ils étaient en 1983. Ce rehaussement des fonds diminue vers le large, mais demeure encore clairement perceptible à la limite des relevés de 1983, soit à environ 75 m au large du brise-lames (figure 4a(iii)).

La figure 4a confirme donc que la présence du brise-lames a contribué à la formation d'un banc de sable le long de sa face externe. L'examen du relevé de 1983 indique également que le dragage d'entretien effectué à l'amont du quai pouvait à cette époque s'étendre légèrement sous l'emprise actuelle du brise-lames. La marge de manœuvre offerte au traversier était alors plus confortable que celle obtenue en présence du brise-lames.

Notons finalement que la figure 4a(iii) indique un approfondissement des fonds dans la zone correspondant au havre de la marina. Malgré l'envasement du havre, les fonds longeant le littoral sont donc actuellement moins élevés que les berges ne l'étaient avant la construction de la marina.

L'examen des bathymétries relevées entre 2002 et 2007 (figure 4b) indique par ailleurs que le banc de sable est actuellement près de son état d'équilibre, avec toutefois une tendance à la sédimentation déjà révélée par les figure 3a à 3e.

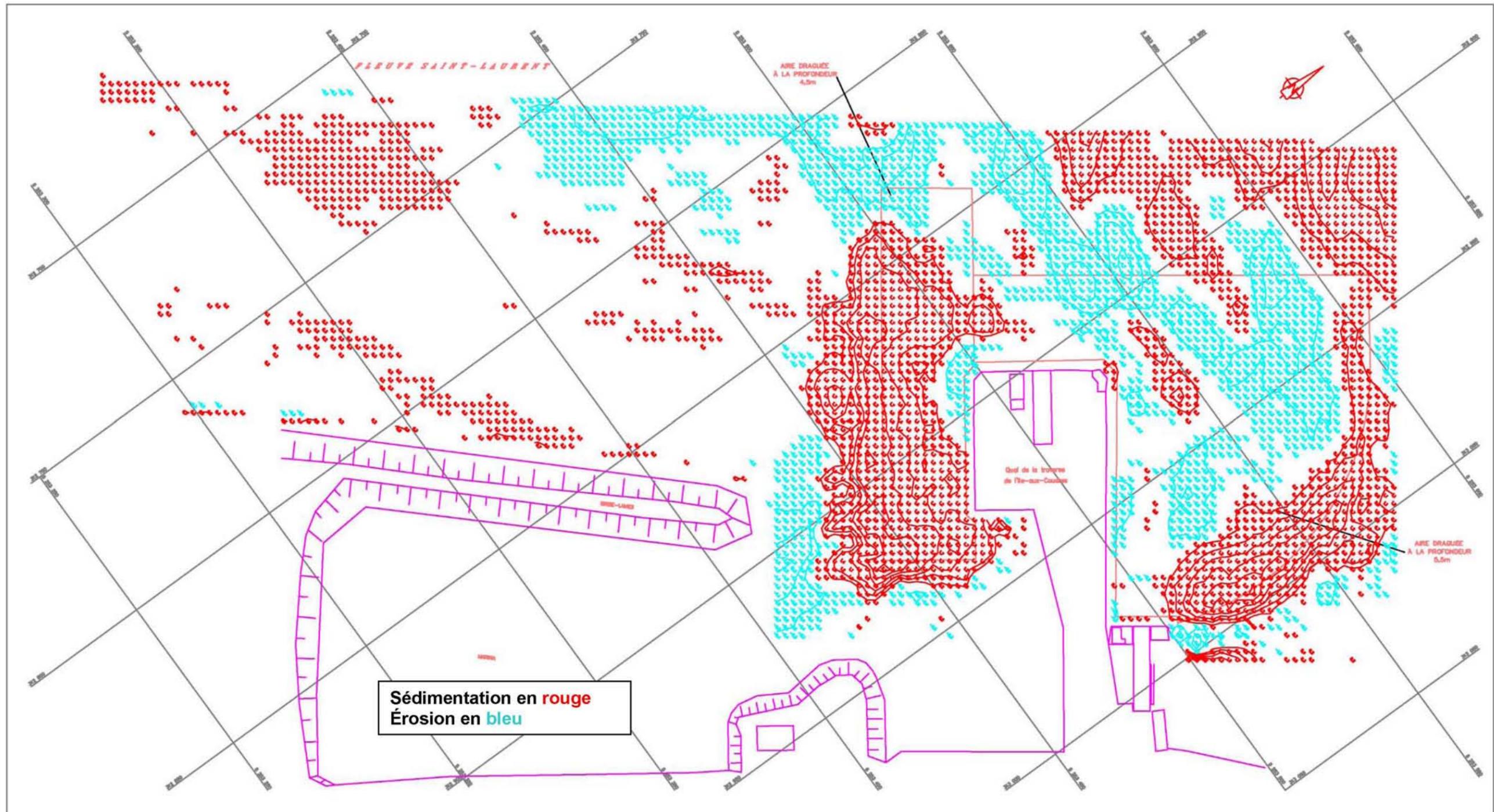


Figure 3a : Sédimentation et érosion aux abords du quai du traversier
 20 juin au 3 décembre 2002 (source : Entreprises Normand Juneau)

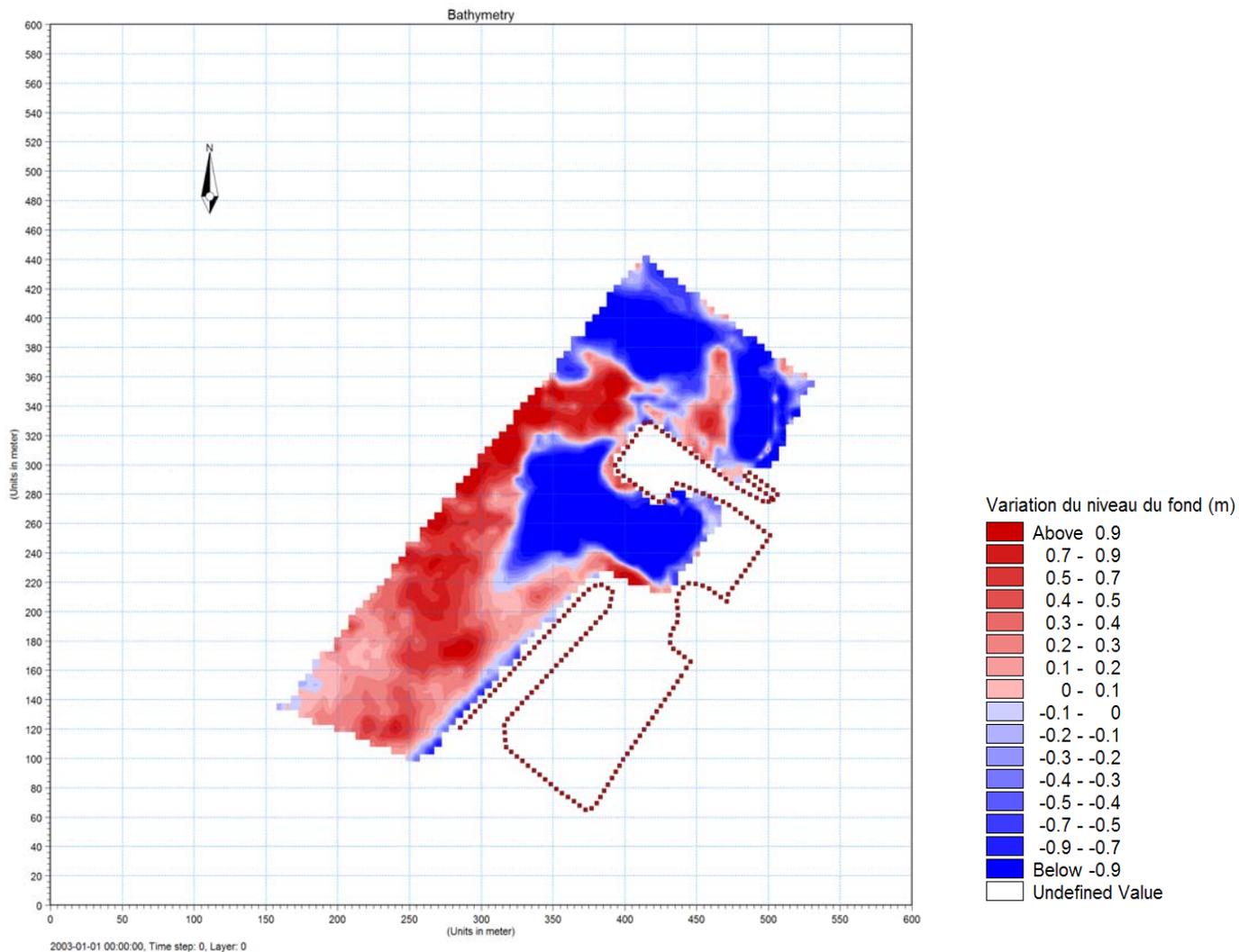


Figure 3b: Sédimentation et érosion aux abords du quai du traversier

3 décembre 2002 au 3 et 14 juin 2003

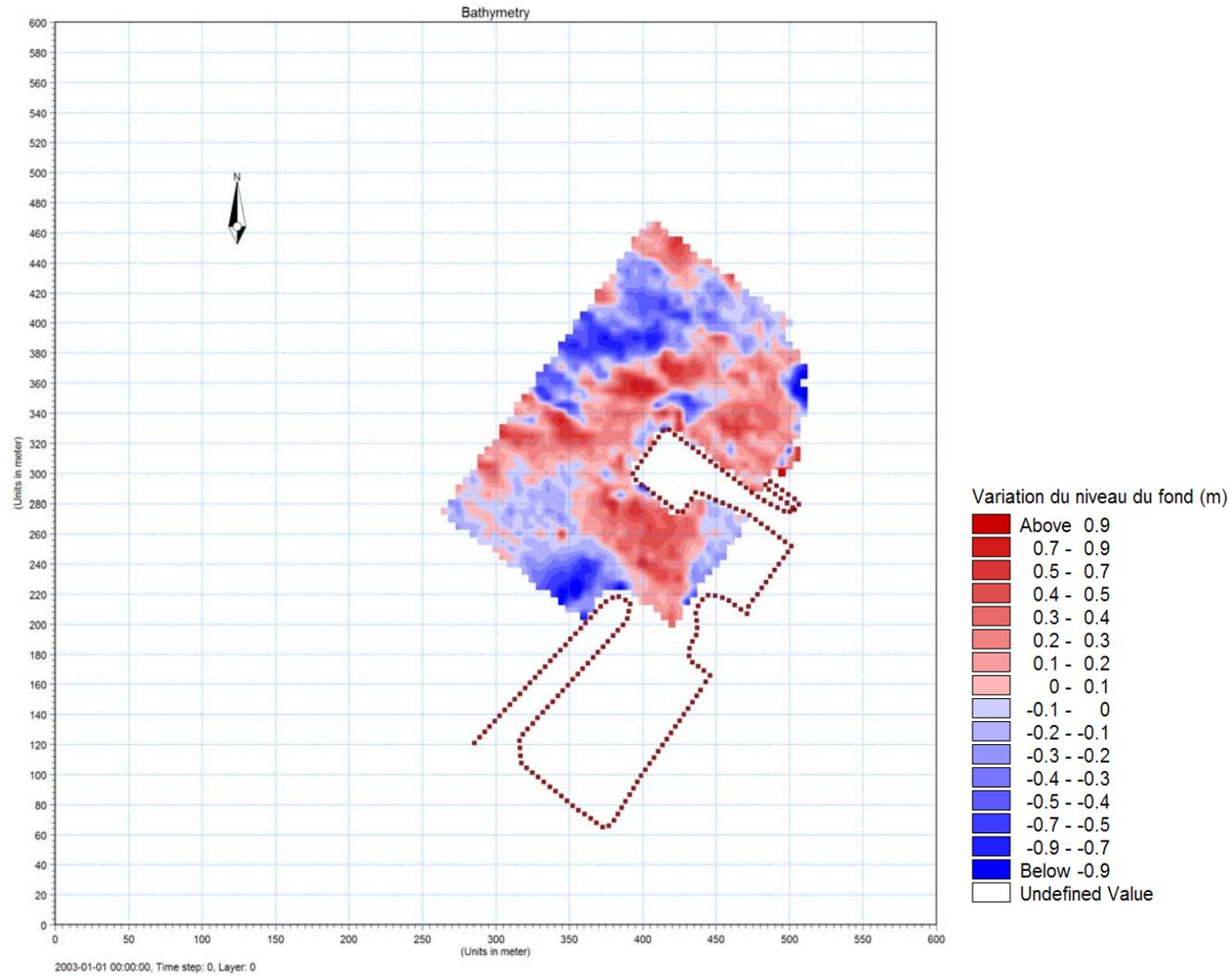


Figure 3c : Sédimentation et érosion aux abords du quai du traversier

14 avril au 27 mai 2005

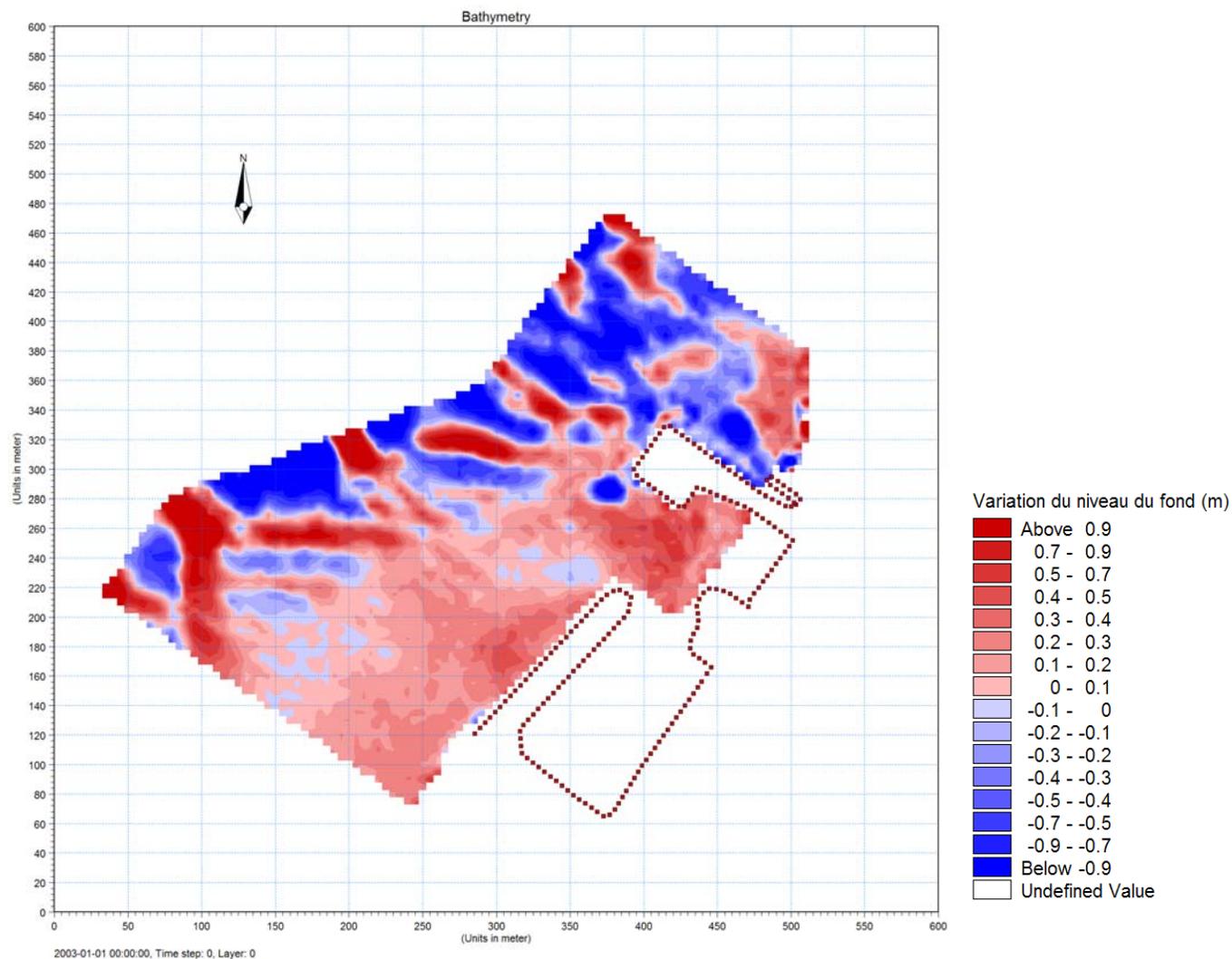


Figure 3d : Sédimentation et érosion aux abords du quai du traversier

7 avril au 8 mai 2006

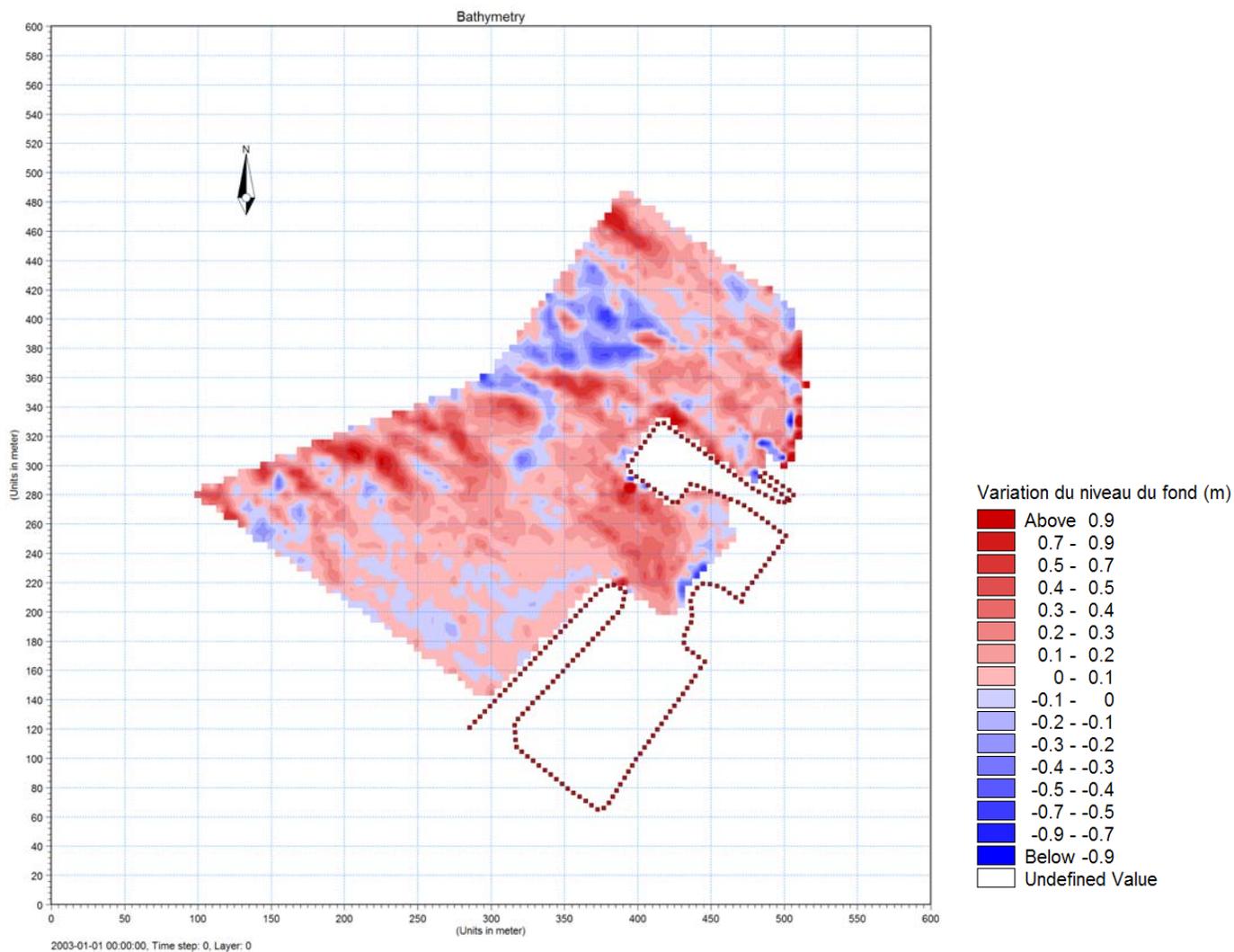


Figure 3e : Sédimentation et érosion aux abords du quai du traversier

19-20 avril au 12 mai 2007

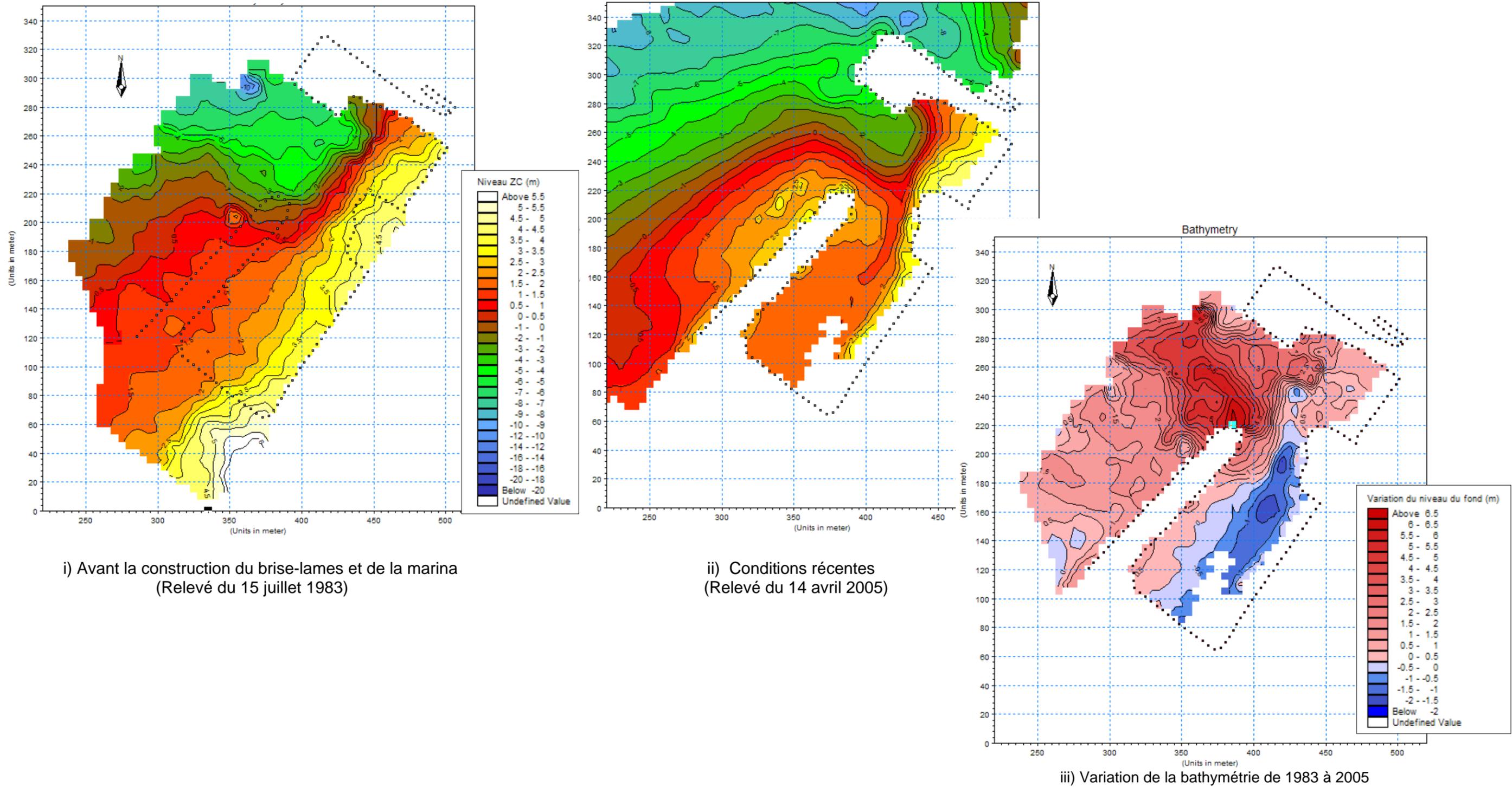
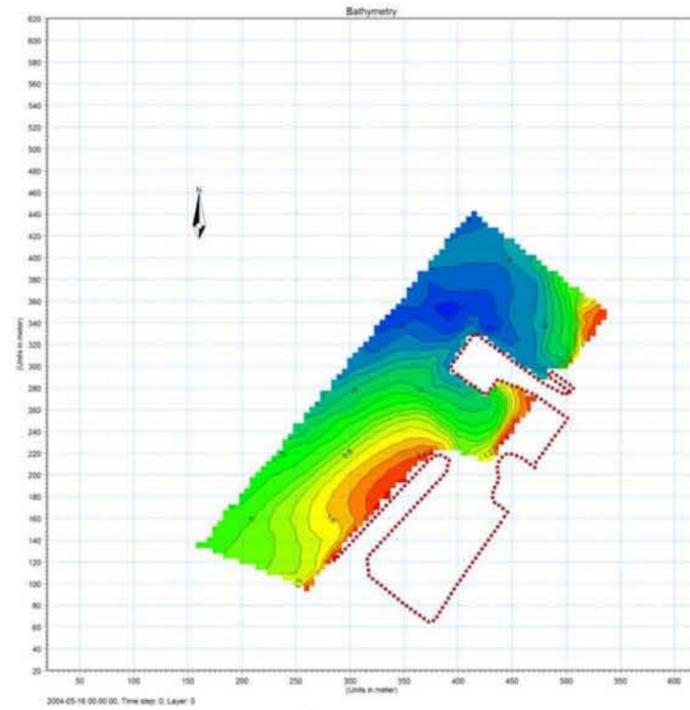
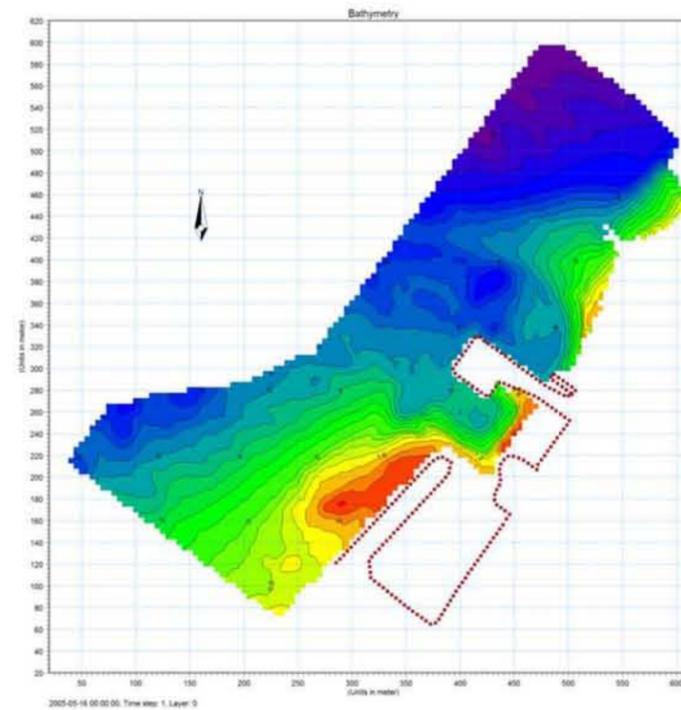


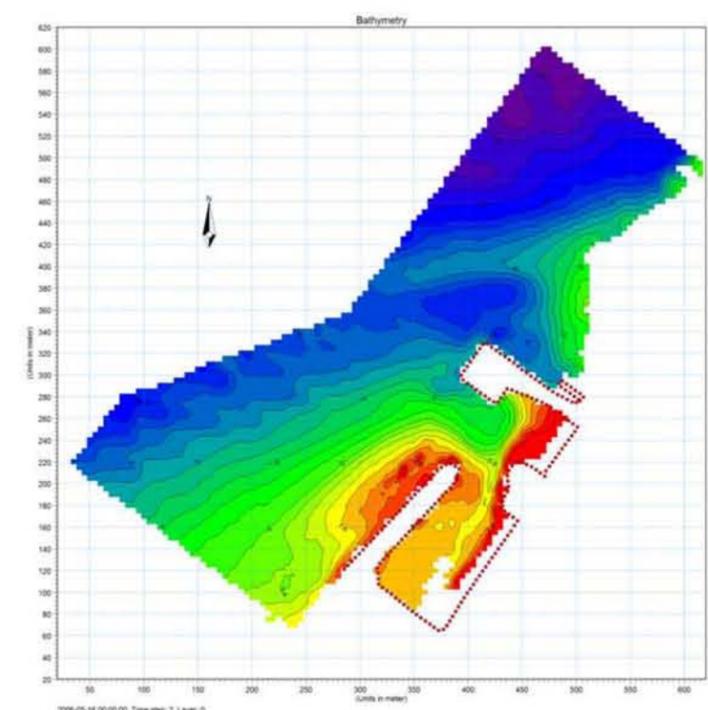
Figure 4a : Bathymétrie avant et après la construction du brise-lames et de la marina



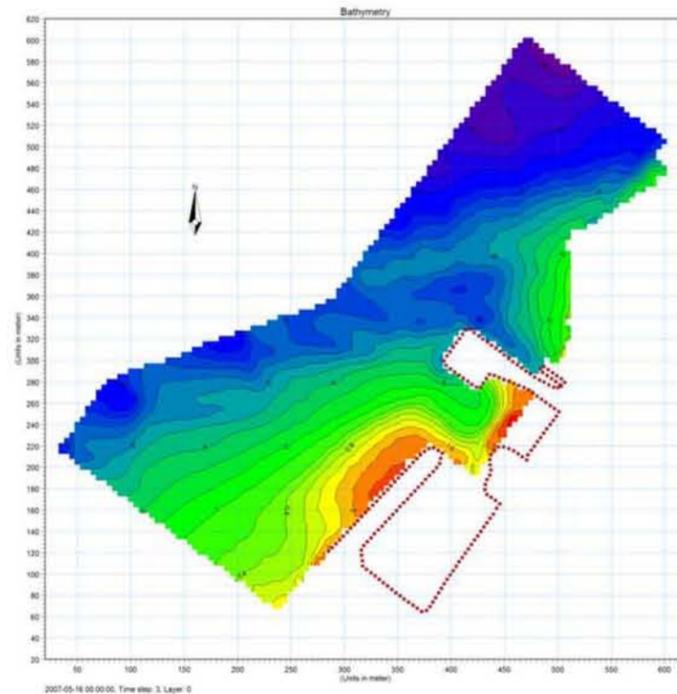
a) 3 décembre 2002



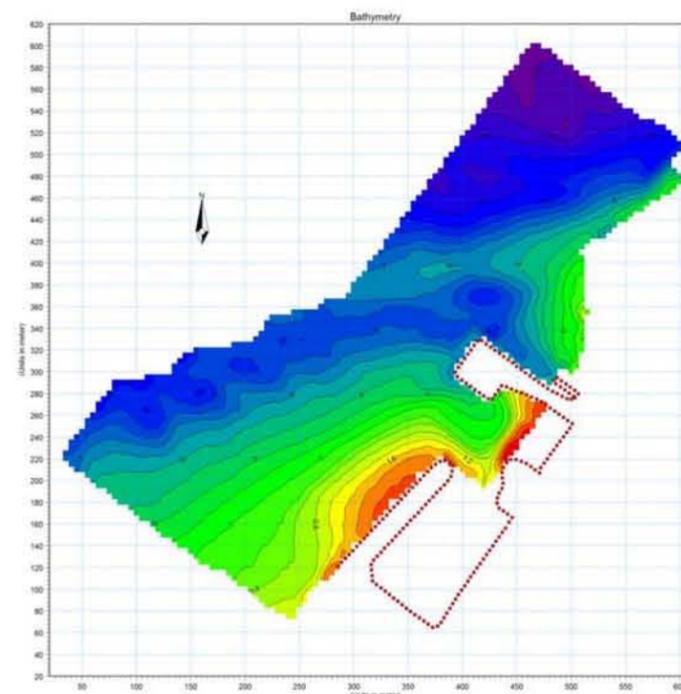
b) 3 et 14 juin 2003



c) 14 avril 2005



d) 7 avril 2006



e) 19-20 avril 2007

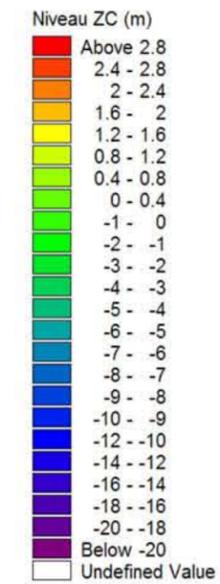


Figure 4b : Évolution de la bathymétrie aux abords du brise-lames de la marina

3.1.1 Relevés effectués pour la liaison sous-marine de 25 kV (1995)

Le Groupe-Conseil LaSalle a déjà été impliqué à titre d'expert dans l'analyse des conditions hydrodynamiques prévalant le long de la liaison de 25 kV installée au milieu des années '90 entre l'île aux Coudres et la rive nord du Saint-Laurent [2].

Des relevés de terrain, effectués notamment pour le concepteur de la liaison et le manufacturier du câble, comportaient de l'information sur la nature des fonds dans les divers axes considérés pour la mise en place de la liaison. La figure 5 illustre les résultats de relevés au sonar à balayage latéral effectués en 1995 par la firme Procéan [3] dans deux axes de traverse situés à proximité du quai de l'Isle-aux-Coudres.

Les relevés indiquent la prédominance des matériaux sableux dans le passage de l'île aux Coudres et révèlent également la présence de dunes importantes témoignant de courants et d'un transport sédimentaire relativement intenses.

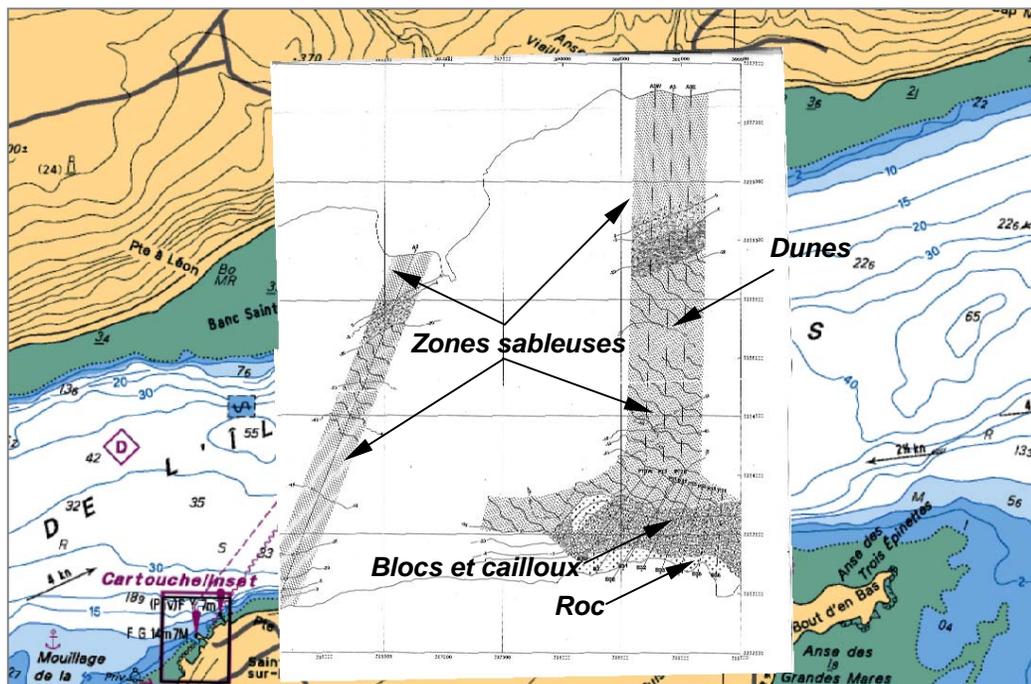


Figure 5 : Caractérisation des sédiments de surface

(Source : Procéan 1995 [3])

3.1.2 Relevés effectués par Dessau (2007)

Dans le cadre de l'étude d'impact effectuée par Dessau pour le compte de la STQ, des sédiments de fonds ont été prélevés lors de la campagne d'échantillonnage d'octobre 2007. La figure 6 indique l'emplacement des quatre échantillons ayant fait l'objet d'une analyse granulométrique. Cette dernière a montré pour l'ensemble des points des sédiments de taille très uniforme, avec un très faible étalement granulométrique. Le D_{50} était pratiquement constant à 0,22 mm et les D_{10} et D_{90} variaient respectivement de 0,12 à 0,16 mm et de 0,30 à 0,32 mm.

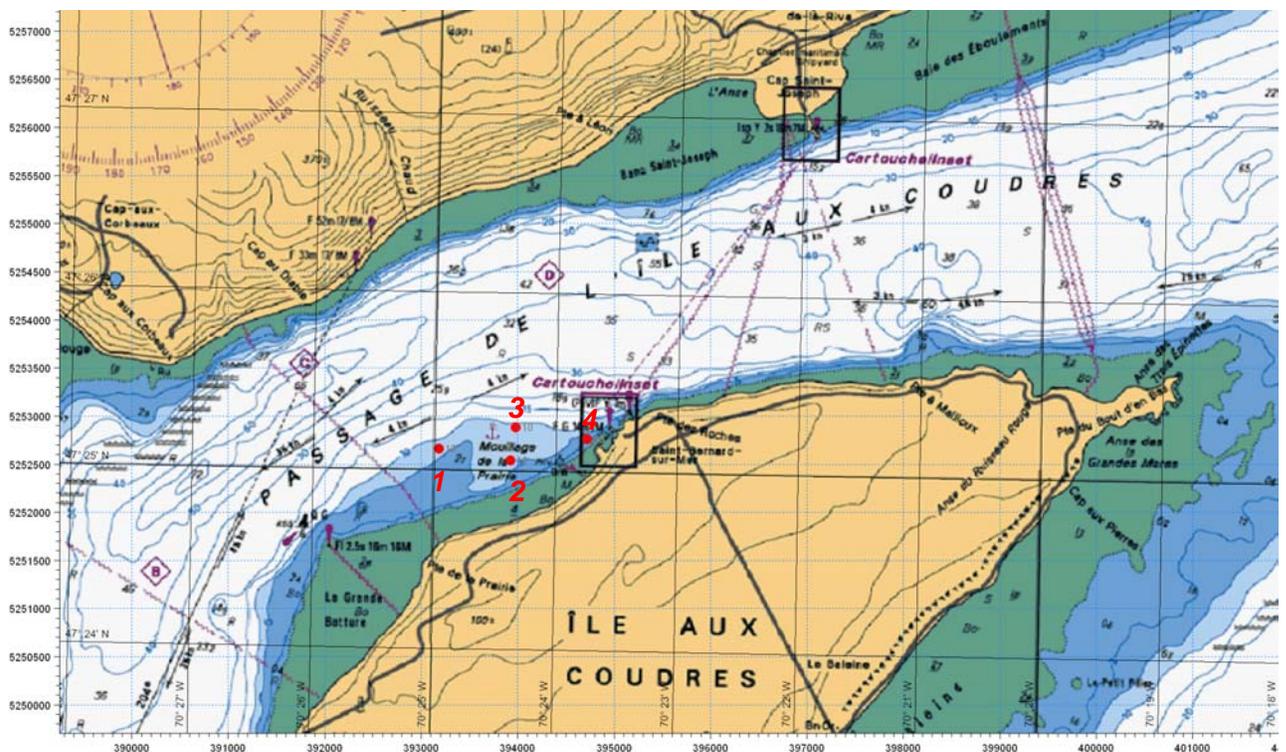


Figure 6 : Emplacement des sédiments prélevés en octobre 2007

3.2 Approche préconisée

Sur la base des données et de l'information disponibles, il a été décidé d'orienter la modélisation numérique vers la simulation des courants de marée et de leur influence sur le transport des sédiments et les processus d'érosion/sédimentation aux abords du quai du traversier.

Tel que convenu avec la STQ, les travaux de modélisation numérique devait tirer profit du modèle hydrodynamique bidimensionnel (MIKE 21) déjà monté par le Groupe-Conseil LaSalle, dans le cadre de l'étude de reconstruction du quai du traversier de Rivière-du-Loup [4].

3.0 MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Tous les travaux de modélisation numérique ont été réalisés à l'aide des divers modules du logiciel MIKE 21. Ce modèle commercial, conçu au Danemark par la firme DHI Water & Environment, jouit d'une réputation internationale et a été utilisé avec succès dans de nombreux projets impliquant la simulation des écoulements en milieux fluviaux, estuariens ou côtiers.

3.1 Modèle de terrain

3.1.1 Limites de la zone modélisée

Tel que mentionné précédemment, le modèle numérique s'appuie sur les travaux déjà effectués par le GCL dans le secteur de Rivière-du-Loup. Le modèle existant repose sur le module NHD (*Nested Hydrodynamics*) de MIKE 21, qui permet d'imbriquer des maillages de résolution variable pour représenter la bathymétrie.

Tel qu'indiqué à la figure 7, ce modèle reproduit plus de 150 km du Saint-Laurent, entre Pointe-aux-Orignaux et Pointe-au-Père. L'utilisation d'un modèle d'ensemble de cette envergure découle en partie de la disponibilité des données marégraphiques pour le réglage des limites du modèle mais elle vise surtout à assurer une distance suffisante des limites amont et aval par rapport au secteur d'intérêt. On réduit ainsi l'impact des imprécisions pouvant survenir à proximité de ces limites, où les conditions d'écoulement sont imposées plutôt que calculées par le modèle.

À l'approche du (des) secteur(s) à l'étude, la formulation du modèle NHD permet d'augmenter la résolution de la bathymétrie, en réduisant successivement la taille des cellules du modèle de terrain.

Dans le cadre de la présente étude, la démarche logique consistait a priori à étendre légèrement le modèle existant vers l'amont, de manière à englober le secteur de l'Isle-aux-Coudres. D'un point de vue hydraulique, l'emplacement de la limite amont de ce nouveau modèle est problématique car elle se situe dans une zone d'écoulement complexe (forte variation des courants entre le chenal nord et la portion sud de l'estuaire), comportant de nombreux haut-fonds et îles : îles et battures aux Loups marins en amont de l'île aux Coudres et îles aux Oies et aux Grues plus en amont.

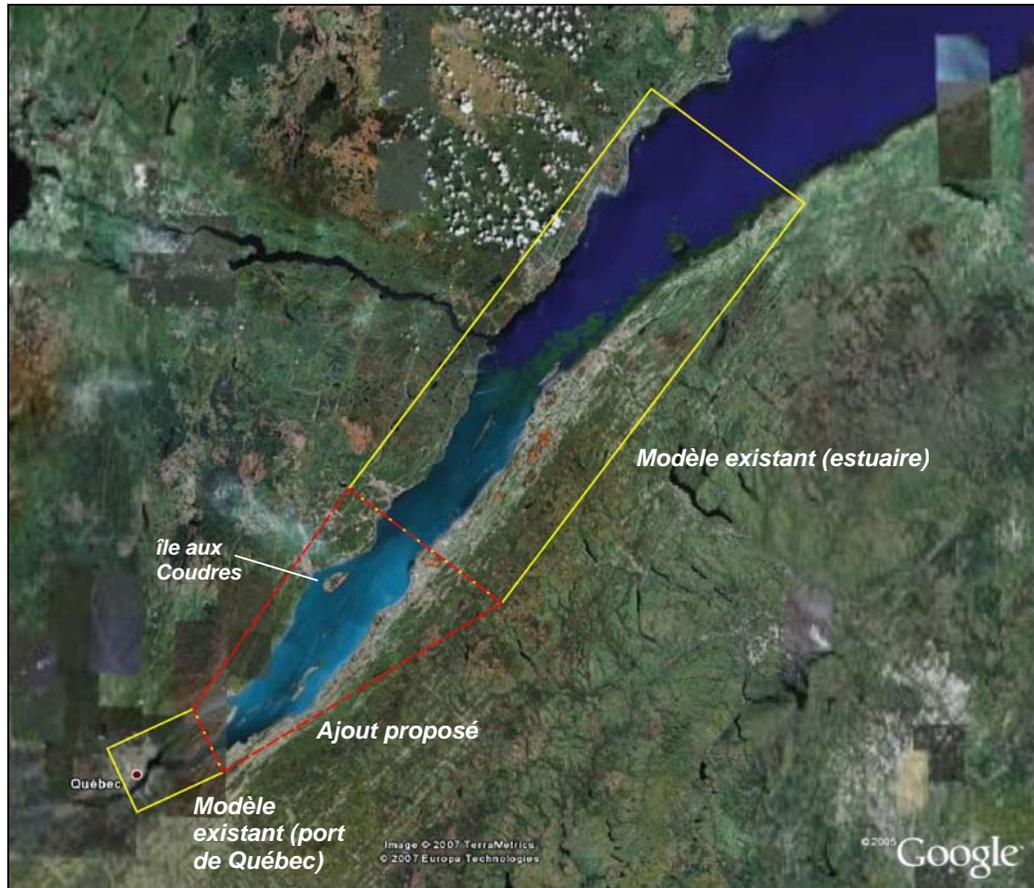


Figure 7 : Limites des modèles numériques existants

De plus, lors d'études antérieures menées pour l'Administration portuaire de Québec, le GCL avait développé un modèle numérique MIKE 21 s'étendant du pont de Québec jusqu'à la portion médiane de l'île d'Orléans (figure 7).

Aux fins de la présente étude, l'avenue de modélisation optimale d'un point de vue technique consistait à raccorder les deux modèles existants, en y ajoutant la portion médiane englobant l'île aux Coudres (figure 7). L'utilisation de ces modèles existants, dont les frontières amont et aval avaient déjà été ajustées, permettait également d'éviter les incertitudes et difficultés potentielles liées au montage d'un nouveau modèle limité aux abords immédiats de l'île aux Coudres.

3.1.2 Données bathymétriques

Les deux modèles existants incorporaient déjà l'ensemble des données bathymétriques les plus récentes disponibles au Service hydrographique du Canada (SHC), soit les informations figurant sur les cartes nautiques, complétés par les levés hydrographiques ayant servi à établir ces cartes.

La portion médiane joignant les deux modèles existants, entre l'île d'Orléans et la pointe aux Orignaux a été construite à l'aide des données numériques commandées au SHC :

- points bathymétriques et lignes de rivage des cartes nautique no 1233 et 1317;
- minutes hydrographiques no 3003624, 3003690, 3003692, 3003857, 3003870, 3003877, 3003945, datant de 1971 à 1975.

La figure 8 donne un aperçu des données disponibles dans le bief reliant les deux modèles numériques existants.

3.1.3 Montage du modèle de terrain

a) Modèle initial

Les nouvelles données bathymétriques ont été combinées aux deux modèles existants, de manière à obtenir une représentation d'ensemble du tronçon Québec – Pointe-au-Père. Tout au long de ce bief de près de 300 km, les données bathymétriques exprimées par rapport au zéro local des cartes marines ont été corrigées de manière à obtenir un modèle d'ensemble avec des élévations référencées au niveau moyen des mers (NMM ou zéro géodésique). Les corrections locales à apporter entre le zéro marégraphique et le NMM ont été obtenues auprès du SHC.

Le modèle de terrain ainsi obtenu est illustré à la figure 9. La résolution du modèle était de $\Delta x = \Delta y = 270$ m dans les portions du modèle les plus éloignées de l'île aux Coudres, puis augmentait successivement à 90, 30 puis 10 m à l'approche du quai du traversier. Un maillage de résolution $\Delta x = \Delta y = 90$ m était également utilisé à l'extrémité amont du modèle, en vue d'offrir une représentation satisfaisante de l'écoulement dans le secteur de Québec et les bras de l'île d'Orléans.

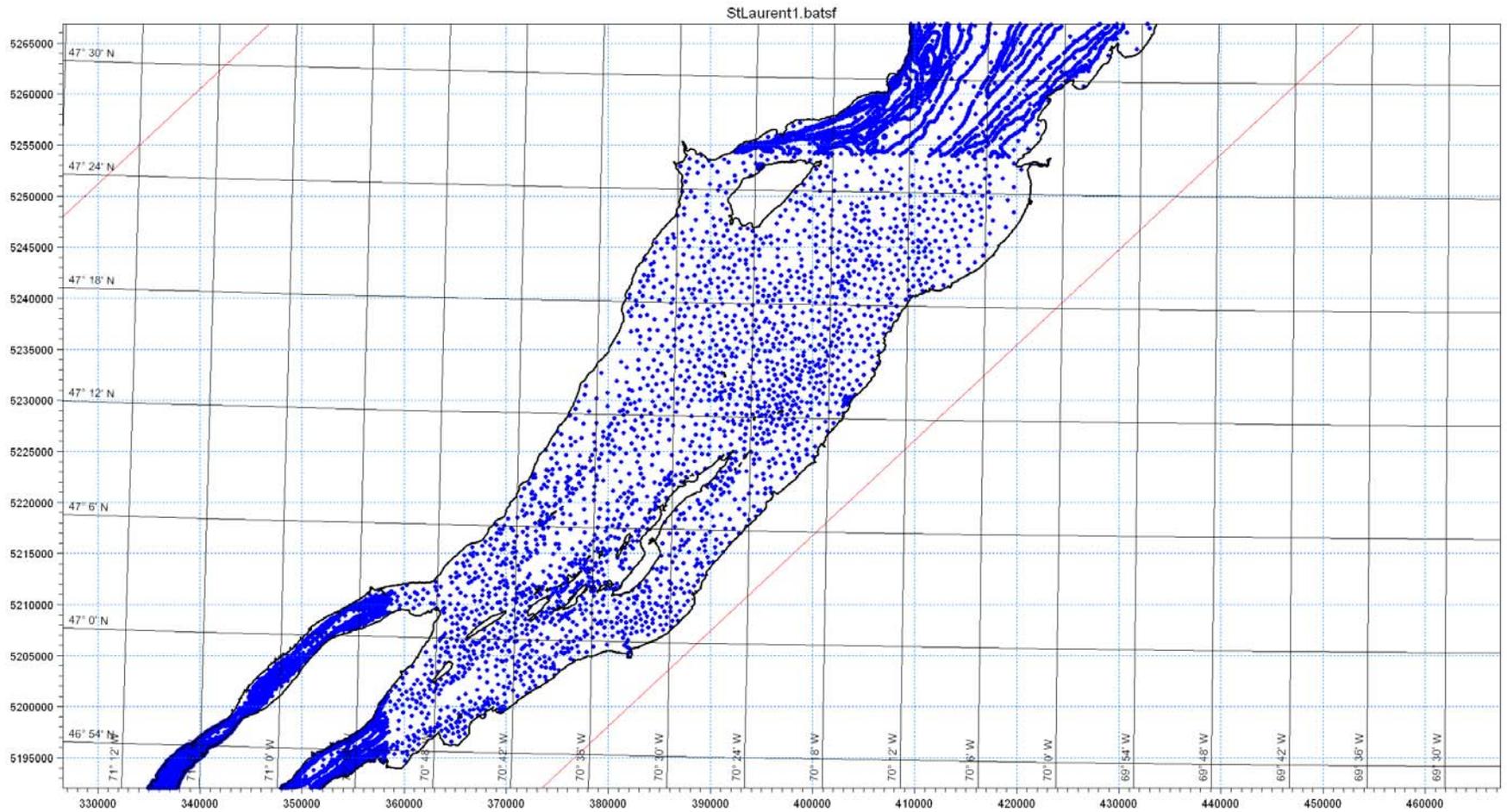


Figure 8 : Données bathymétriques disponibles dans le secteur de l'Isle-aux-Coudres

QUAI DU TRAVERSIER DE L'ISLE-AUX-COUDRES

Mai 2008

Modélisation des conditions hydrosédimentologiques

Rapport no 1689

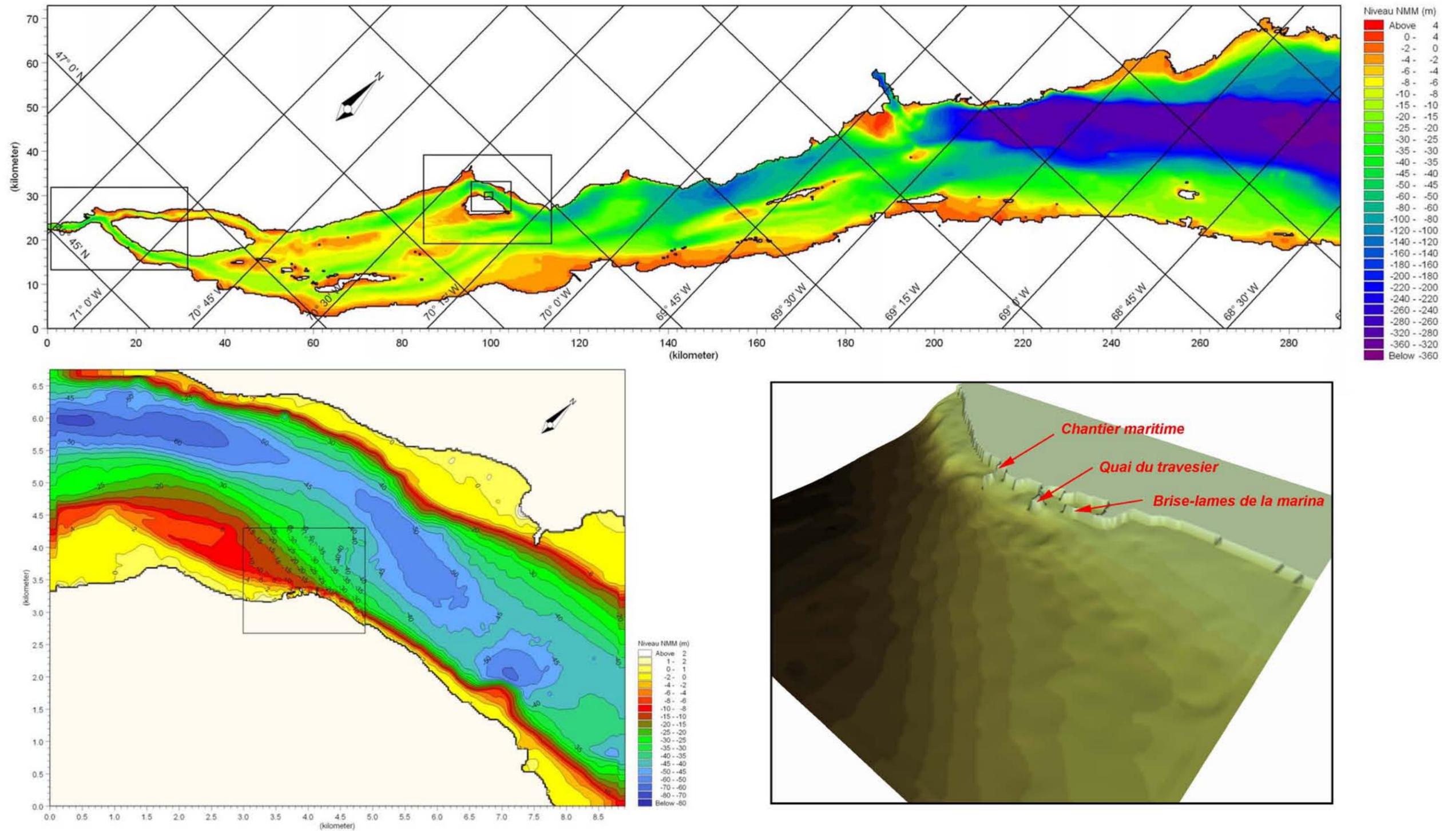


Figure 9 : Modèle de terrain – Maillages rectangulaires imbriqués (MIKE 21 NHD)

b) Modèle à maillage flexible

Les simulations hydrodynamiques ont d'abord été effectuées en présence du modèle de terrain décrit précédemment, à l'aide du module NHD de MIKE 21 (formulation aux différences finies).

La simulation de l'évolution morphologique des fonds (érosion/sédimentation) aux abords de l'Isle-aux-Coudres nécessitait toutefois l'utilisation du nouveau module hydrosédimentologique de MIKE 21, qui est basé sur une formulation aux volumes finies et une représentation de la bathymétrie numérique à l'aide d'un maillage flexible. À cause des temps de calcul plus importants associés à ce module, on a cherché à réduire l'étendue de la zone modélisée, sans toutefois affecter la précision des résultats obtenus au droit de l'Isle-aux-Coudres.

Les simulations comparatives ont montré qu'on pouvait supprimer toute la portion aval du modèle d'ensemble (tronçon Pointe-aux-Orignaux – Pointe-au-Père) sans affecter de manière significative les niveaux d'eau et les champs de courants prédits dans la zone à l'étude. Ce raccourcissement notable du modèle nécessitait quelques ajustements numériques au niveau de la frontière aval du modèle mais permettait en retour un gain appréciable dans les temps de calcul.

La figure 10 indique l'étendue du modèle à maillage flexible et illustre la densité du maillage utilisé pour la plupart des simulations hydrosédimentologiques.

3.2 Conditions aux limites

Le modèle d'ensemble aux différences finies, de même que le modèle plus court à maillage flexible fonctionnaient tous deux à partir des niveaux de la marée imposés aux limites amont et aval. Pour le modèle d'ensemble, ces limites étaient basées sur les données de niveaux du SHC pour le quai Irving (en aval du pont de Québec) et le marégraphe de Rimouski (Pointe-au-Père).

Pour le modèle court, la limite amont demeurait inchangée mais la limite aval était alimentée par les données marégraphiques de Pointe-aux-Orignaux.

La figure 11a illustre pour ces trois emplacements la variation du niveau d'eau (par rapport au NMM) correspondant à la marée de vive-eau du 11 et 12 juillet 2006. Ces conditions ont été utilisées pour le réglage et la validation des simulations hydrodynamiques. Il est à noter que la première portion du cycle de marée n'était destinée qu'à l'établissement des courants dans le

modèle. Les résultats proprement dits étaient présentés pour la seconde moitié du cycle, de 23 :30 le 11 juillet à 18 :20 le 12 juillet.

Pour obtenir une échelle de temps permettant de déceler plus clairement l'évolution morphologique des fonds, les simulations hydrosédimentologiques couvraient un cycle complet de morte-eau - vive-eau. La figure 11b illustre la période de 14 jours considérée, qui s'étend du 1^{er} au 15 septembre 2006.

3.3 Paramètres de modélisation sédimentologique

La modélisation du transport des sédiments et des processus d'érosion et sédimentation qui en résultent a été effectuée à l'aide du module *Sand Transport* de MIKE 21 FM (*Flexible mesh*). Pour toutes les simulations, le diamètre moyen des sédiments a été fixé à $D_{50} = 0,2$ mm et le transport des sédiments par les courants a été modélisé à l'aide des équations de Van Rijn [5], qui décrivent le transport en charriage et en suspension des sables.

Comme on le verra plus loin, la zone effectivement soumise à l'érosion et à la sédimentation a été limitée au passage de l'île aux Coudres. La prise en compte des processus morphologiques dans l'ensemble du secteur modélisé était inutile et compliquait les simulations.

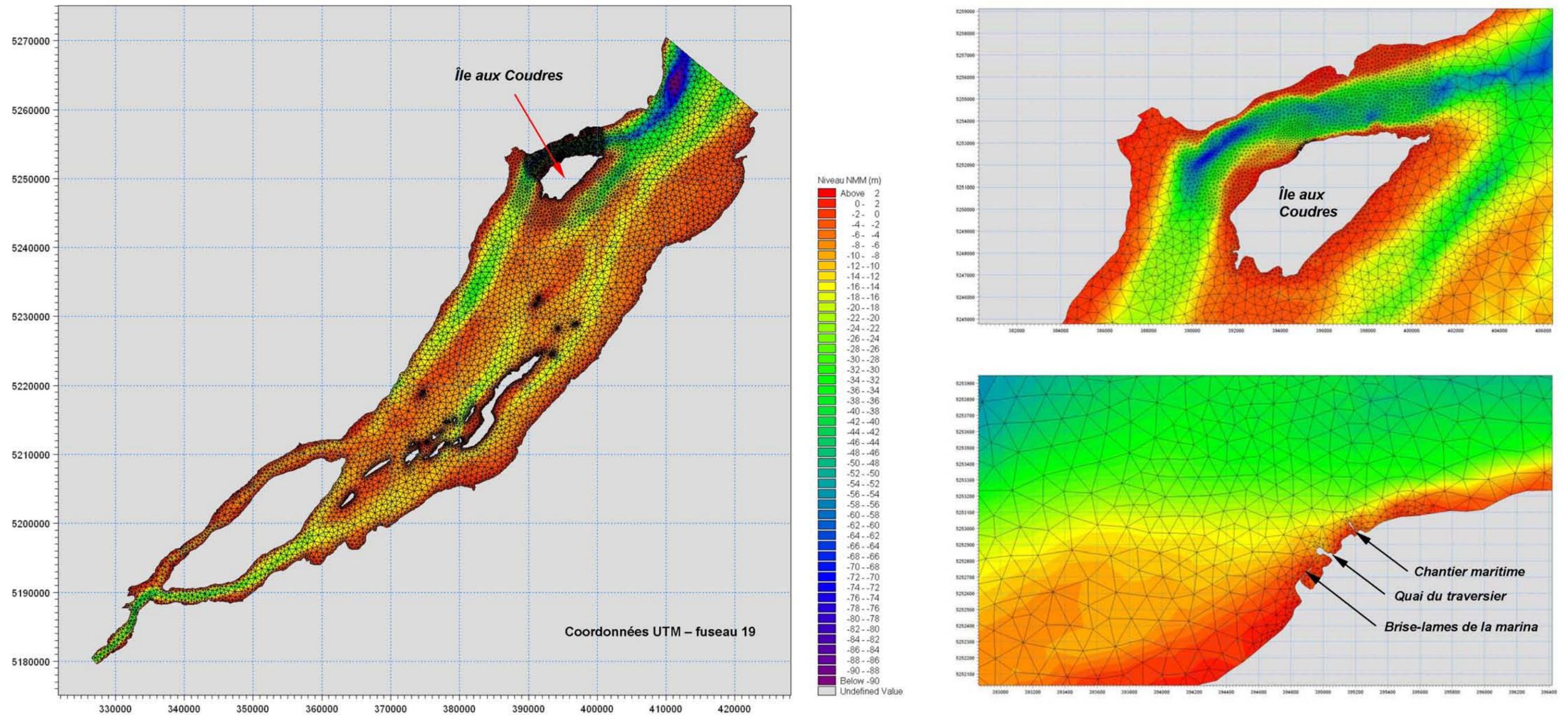


Figure 10 : Modèle de terrain raccourci – Maillage flexible

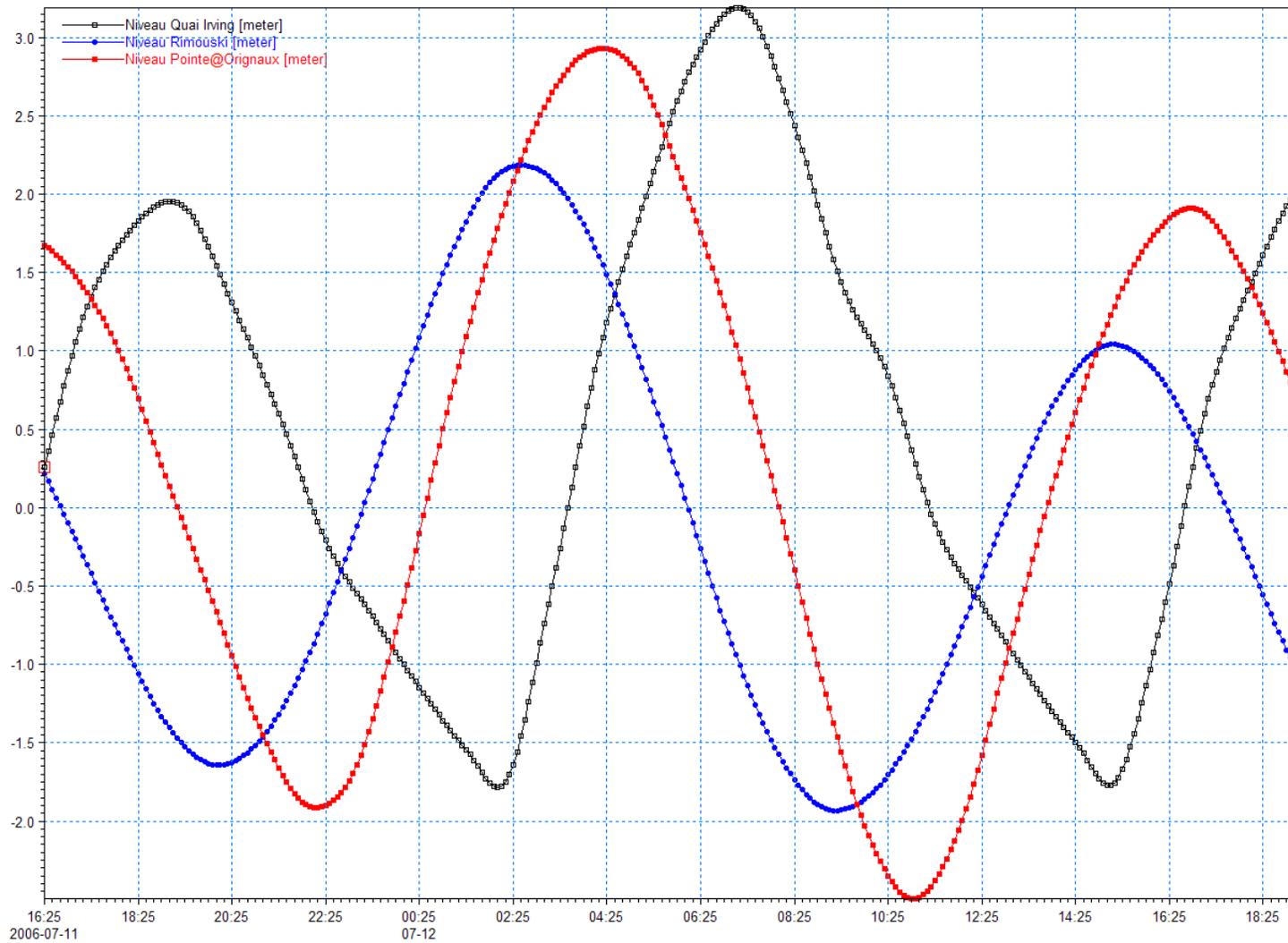


Figure 11a : Conditions de marée imposées aux limites amont et aval des modèles

Marée de vive-eau du 11 et 12 juillet 2006

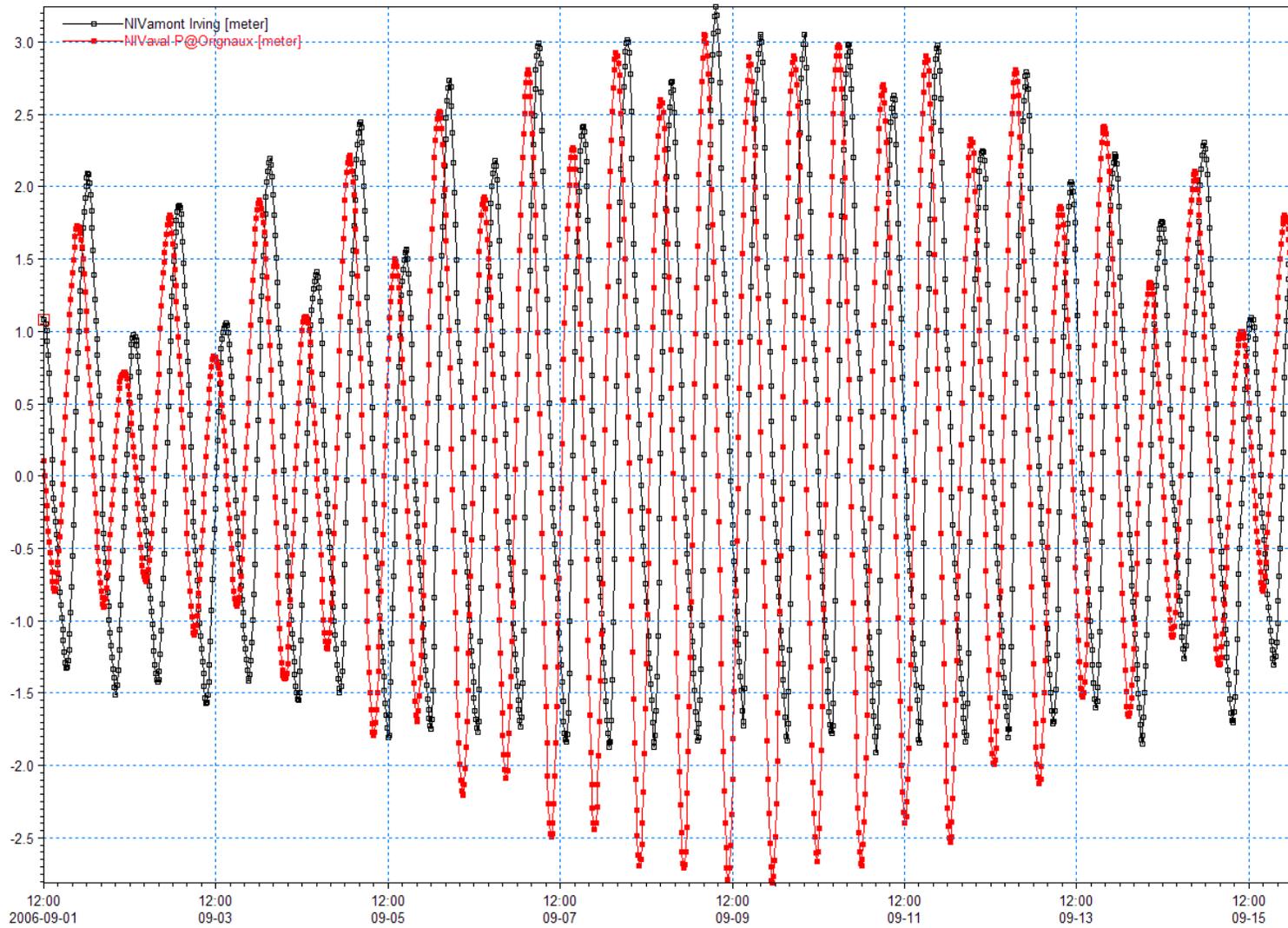


Figure 11b : Conditions de marée imposées aux limites amont et aval des modèles
 Cycle morte-eau – vive-eau du 1er au 15 septembre 2006

4.0 RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION

4.1 Ajustements et validation du modèle hydrodynamique

Les portions existantes amont (port de Québec) et aval (estuaire) du modèle d'ensemble avaient déjà fait l'objet de validations détaillées, basées sur des relevés des niveaux et courants effectués sur le terrain.

Dans le cadre de la présente étude, aucune donnée de terrain spécifique n'était disponible et la validation du modèle dans le secteur à l'étude a essentiellement été basée sur :

- les niveaux d'eau enregistrés par les marégraphes de Saint-Joseph-de-la-Rive et de Saint-François-de-l'Île-d'Orléans;
- les cartes des courants de surface données par l'Atlas des courants de marée du Service hydrographique du Canada [6].

La bathymétrie étant connue de manière relativement précise dans l'ensemble de la zone modélisée, les essais de validation ont avant tout porté sur l'ajustement de la rugosité des fonds dans les différentes portions du modèle et sur l'influence de paramètres numériques comme la viscosité turbulente.

La figure 12 illustre la répartition spatiale de la rugosité des fonds ayant conduit aux meilleurs résultats. La figure 13 présente la comparaison entre les niveaux d'eau prédits par le modèle numérique et ceux mesurés par le SHC à Saint-Joseph-de-la-Rive et Saint-François-de-l'île-d'Orléans.

À Saint-Joseph-de-la-Rive, localité située aux abords immédiats du site à l'étude, la concordance des niveaux est excellente. Les niveaux simulés et enregistrés à Saint-François-de-l'Île-d'Orléans montrent des écarts plus significatifs mais il importe de souligner que les valeurs enregistrées montrent déjà une certaine différence par rapport aux valeurs prédites par les tables de marée du SHC. Il est à noter que les niveaux d'eau imposés à la limite amont du modèle numérique (quai Irving) sont basés sur les prédictions de ces tables de marée.

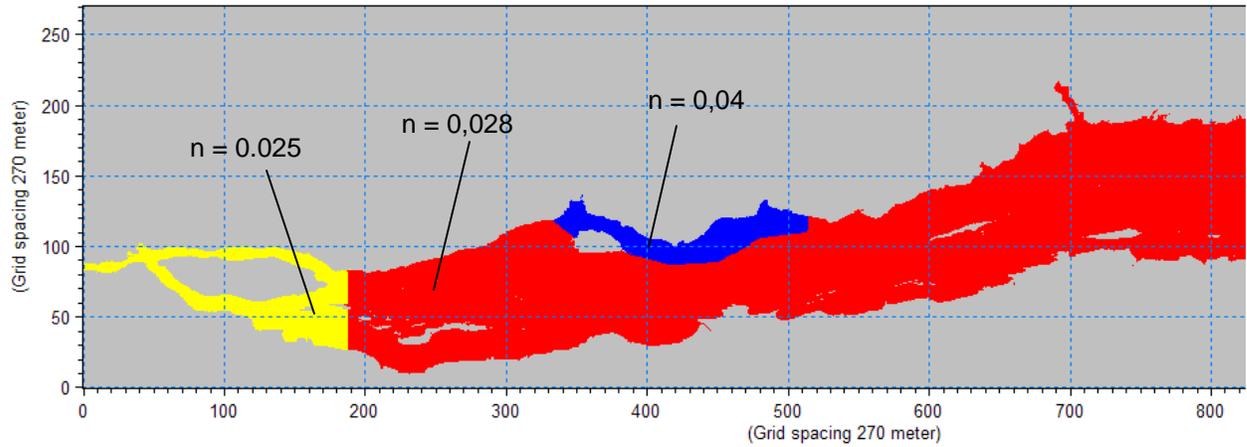


Figure 12 : Ajustement de la rugosité des fonds

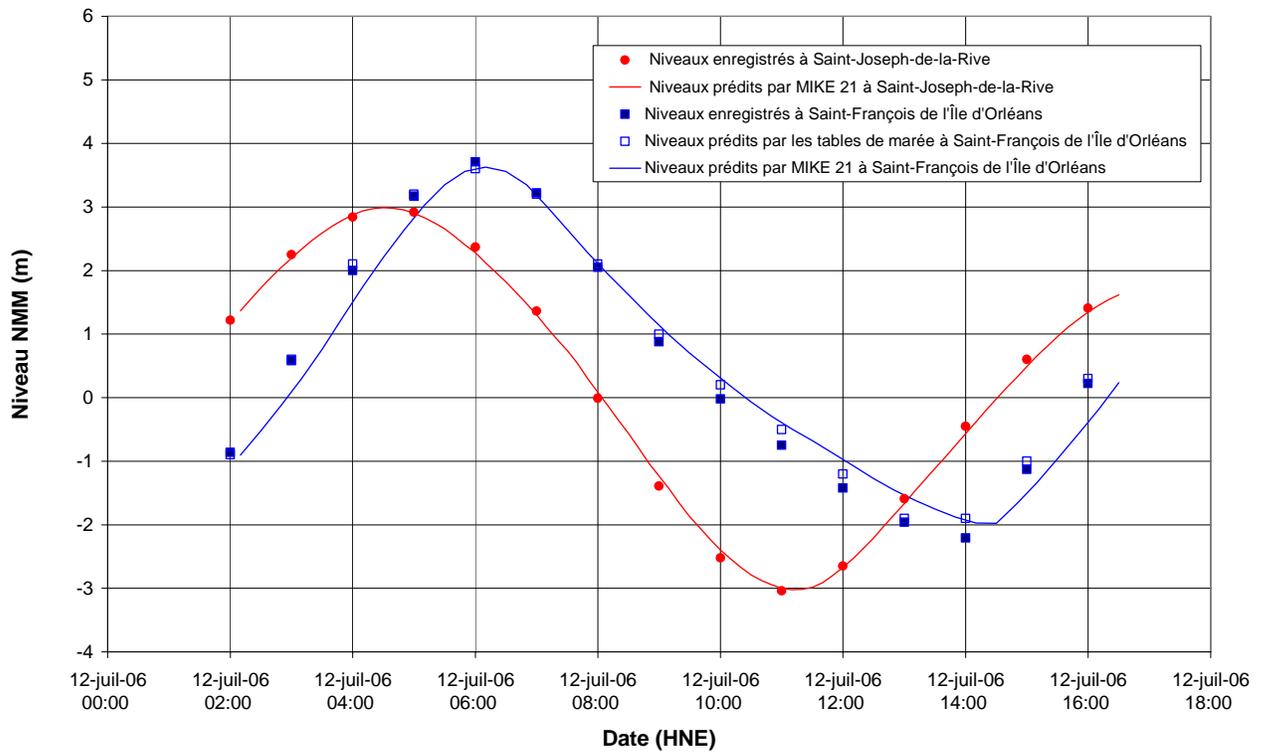
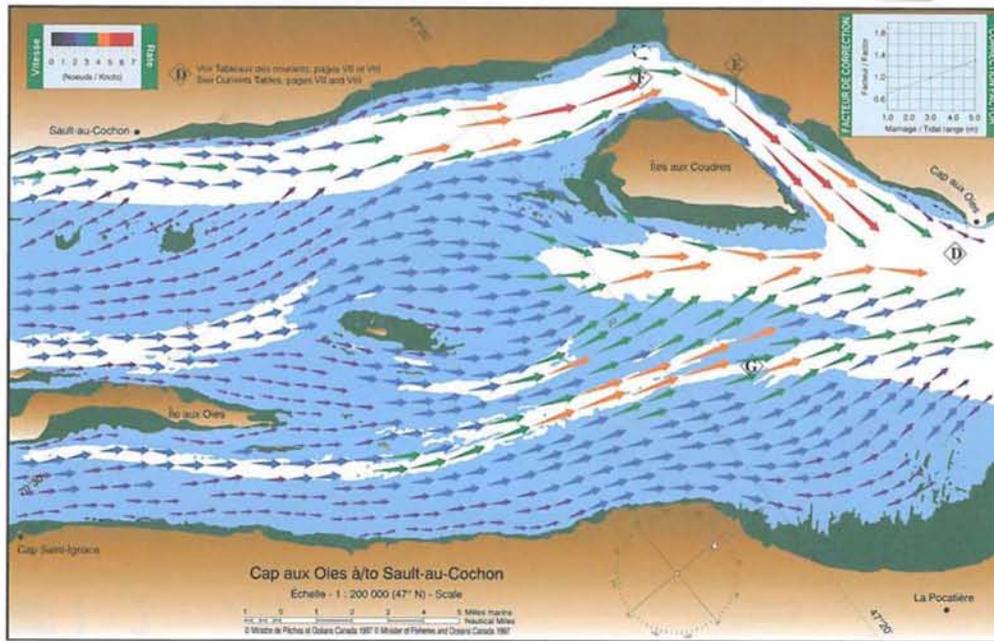


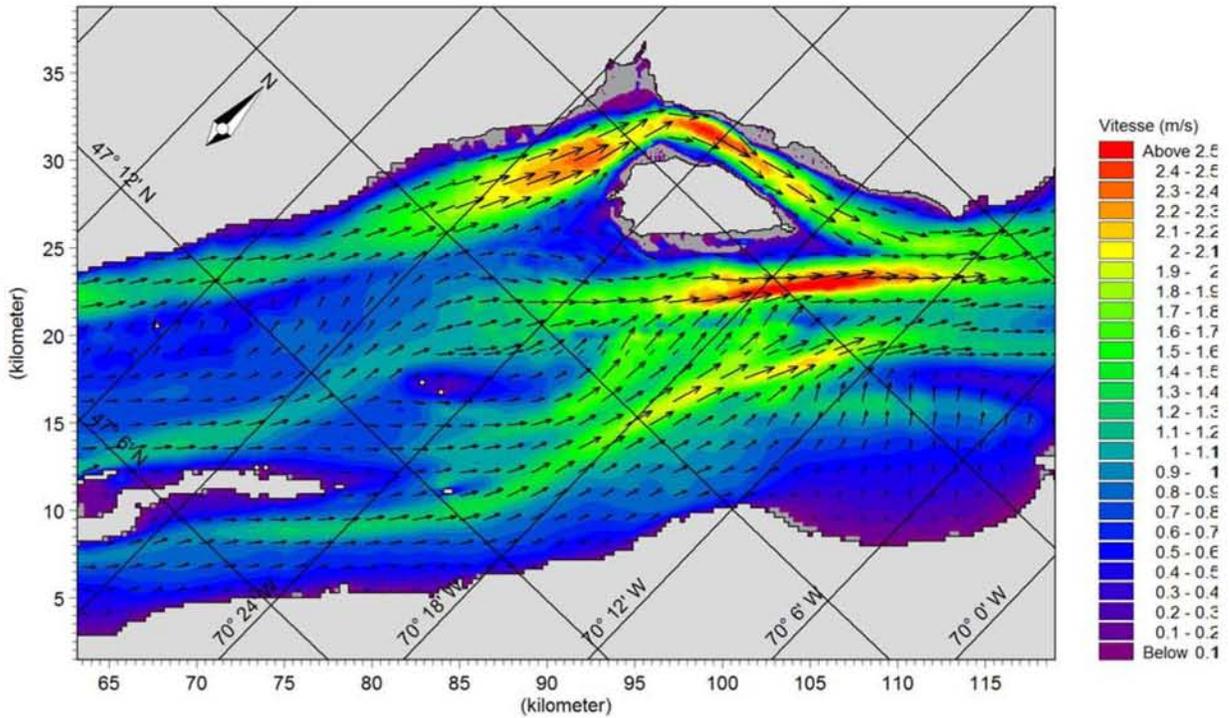
Figure 13 : Validation des niveaux d'eau prédits par le modèle numérique

La figure 14 compare les courants de jusant maximums prédits par MIKE 21 dans le secteur de l'île aux Coudres avec ceux figurant dans l'Atlas des courants de marée du SHC. La concordance générale est satisfaisante, tant du point de vue de l'intensité que de la direction des courants.

Il faut toutefois noter que, par rapport aux valeurs de l'Atlas, le modèle numérique tendait à surestimer les courants de jusant maximums dans le passage de l'île aux Coudres et à sous-estimer les courants maximums de flot dans cette même zone. Il faut d'une part garder à l'esprit que l'Atlas donne des courants représentatifs des conditions de surface, alors que le modèle MIKE 21 fournit des valeurs moyennes intégrées sur la verticale. D'autre part, ces écarts, qui pourrait notamment s'expliquer par les effets de densité (salinité/température) prévalant dans le passage de l'île aux Coudres, demeurent faibles en regard des incertitudes liées à la modélisation des processus sédimentaires.



a) Atlas des courants



b) Modèle MIKE 21

Figure 14 : Courants maximums de jusant – Comparaison avec l’Atlas des courants du SHC

4.2 Résultats de modélisation hydrodynamique

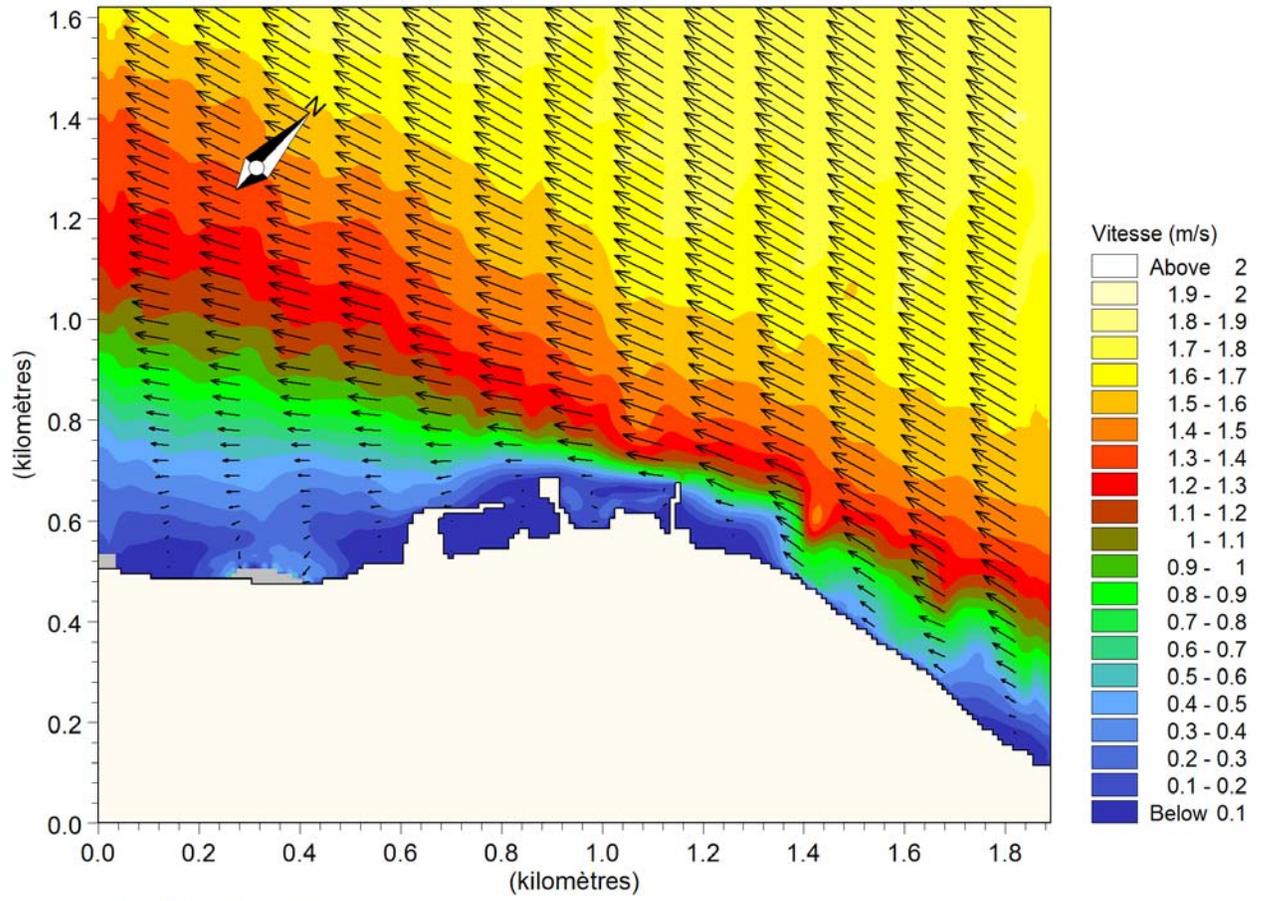
4.2.1 Champs des courants de vive-eau

Les figures 15a à 15d fournissent les champs de courants de marée de vive-eau prédits par le modèle numérique dans le passage de l'Isle-aux-Coudres, à proximité du quai du traversier. Au jusant, la figure 15b indique des courants orientés SO – NE sur le mouillage de la Prairie, à l'amont du quai du traversier et le long du brise-lames de la marina, alors que les courants du large s'effectuent plutôt selon un axe SSO-ENE.

Pour l'ensemble du jusant, la modélisation hydrodynamique n'indique pas véritablement de courants de marée orientés Ouest – Est aux abords du quai. Avant même de procéder à des simulations du transport sédimentaire, il apparaît alors que les courants prédits par le modèle pourront difficilement corroborer l'hypothèse de M. Troude, selon laquelle les sédiments arrivant au quai sont portés par les courants de jusant selon un axe Ouest – Est transportant les matériaux depuis les fonds situés au large du mouillage de la Prairie (cf. figure 2). En fait, le modèle indique plutôt des courants de jusant dont l'orientation tendraient à éloigner les sédiments du quai plutôt que de les accumuler contre sa face ouest (figure 15b).

Au flot par contre, les courants s'alignent plus perpendiculairement au quai du traversier et induisent dans son sillage (i.e. à l'amont du quai) un courant de retour avec des vitesses relativement faibles. Il est à souligner que ce type d'écoulement est propice à la sédimentation du côté amont de la tête du quai, puisque les sédiments qui sont portés par les courants de flot peuvent être « largués » par l'écoulement principal vers cette zone de décollement.

Sur la seule base des simulations hydrodynamiques, on pourrait donc s'attendre à des risques d'ensablement plus marqués au flot qu'au jusant, alors que les observations et conclusions de M. Troude font plutôt état d'un transport et d'une sédimentation survenant essentiellement au jusant.



07/12/2006 02:30:00

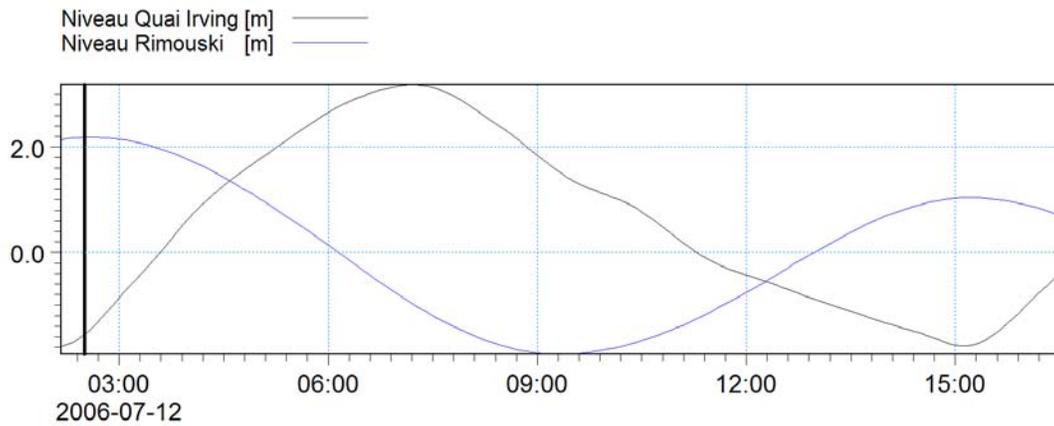


Figure 15a : Courants de marée – Flot

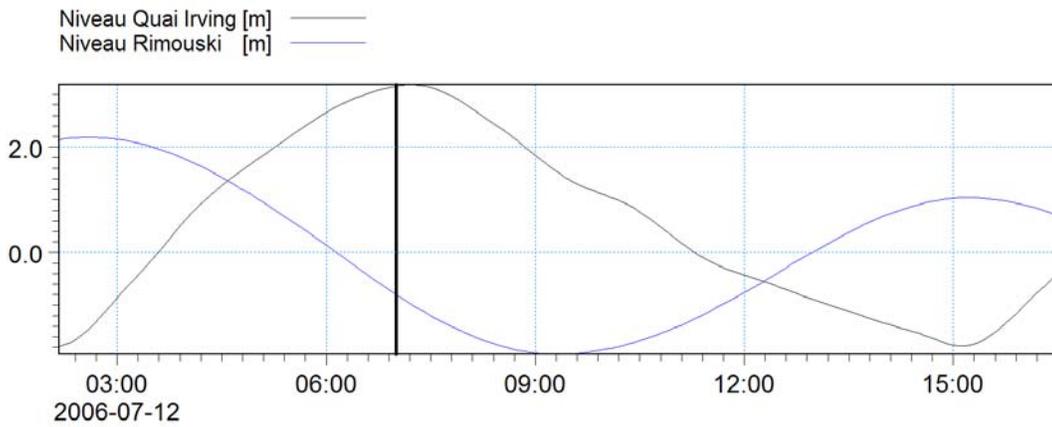
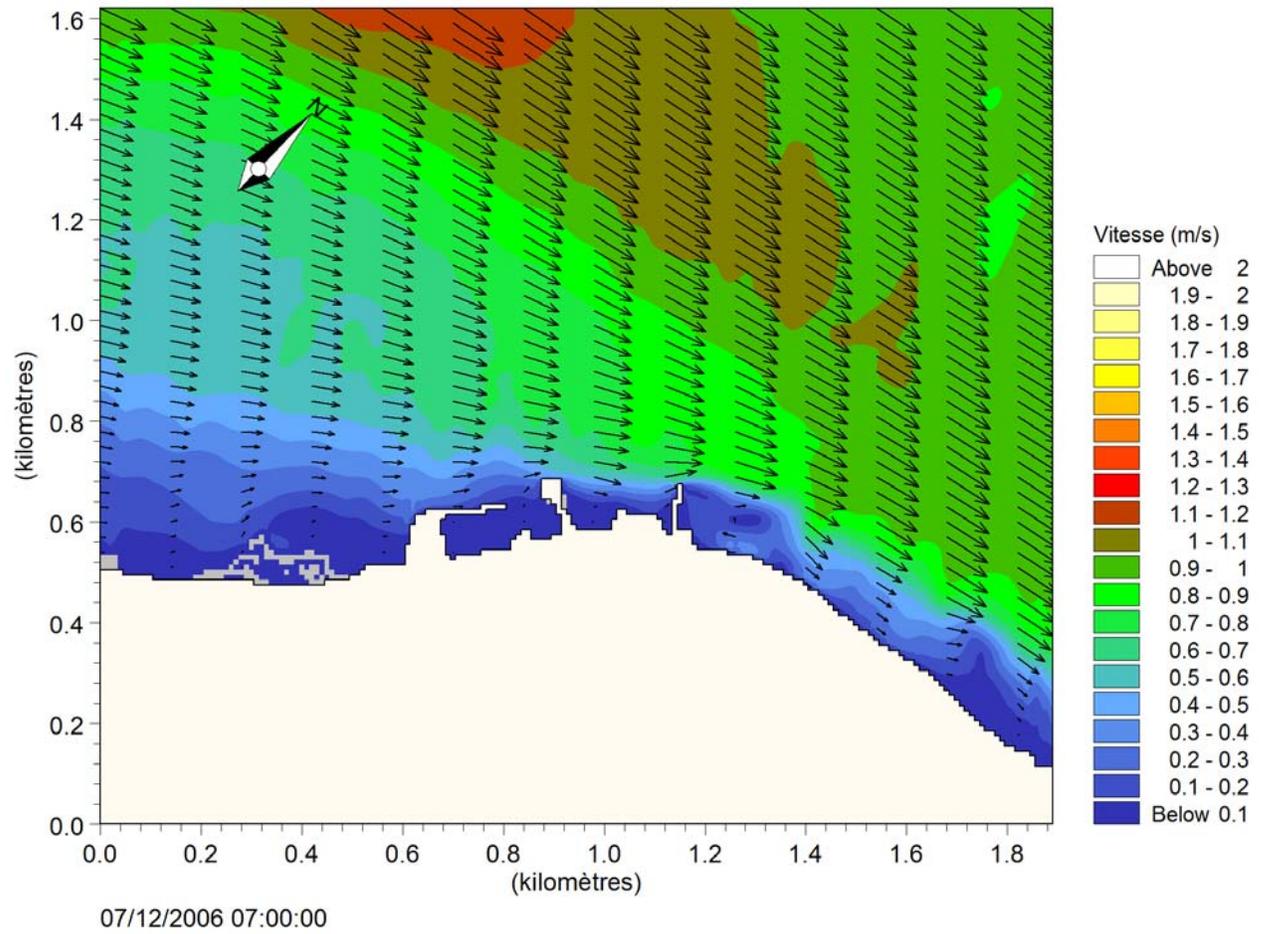


Figure 15b : Courants de marée – Jusant

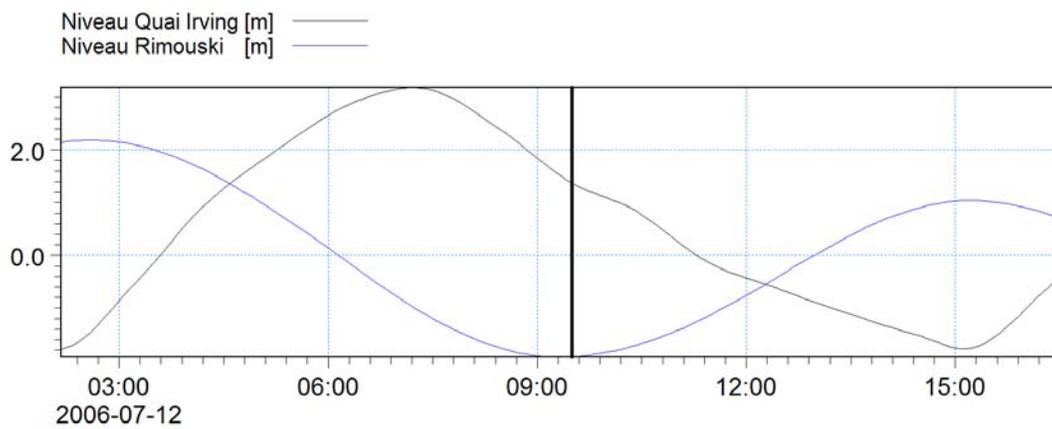
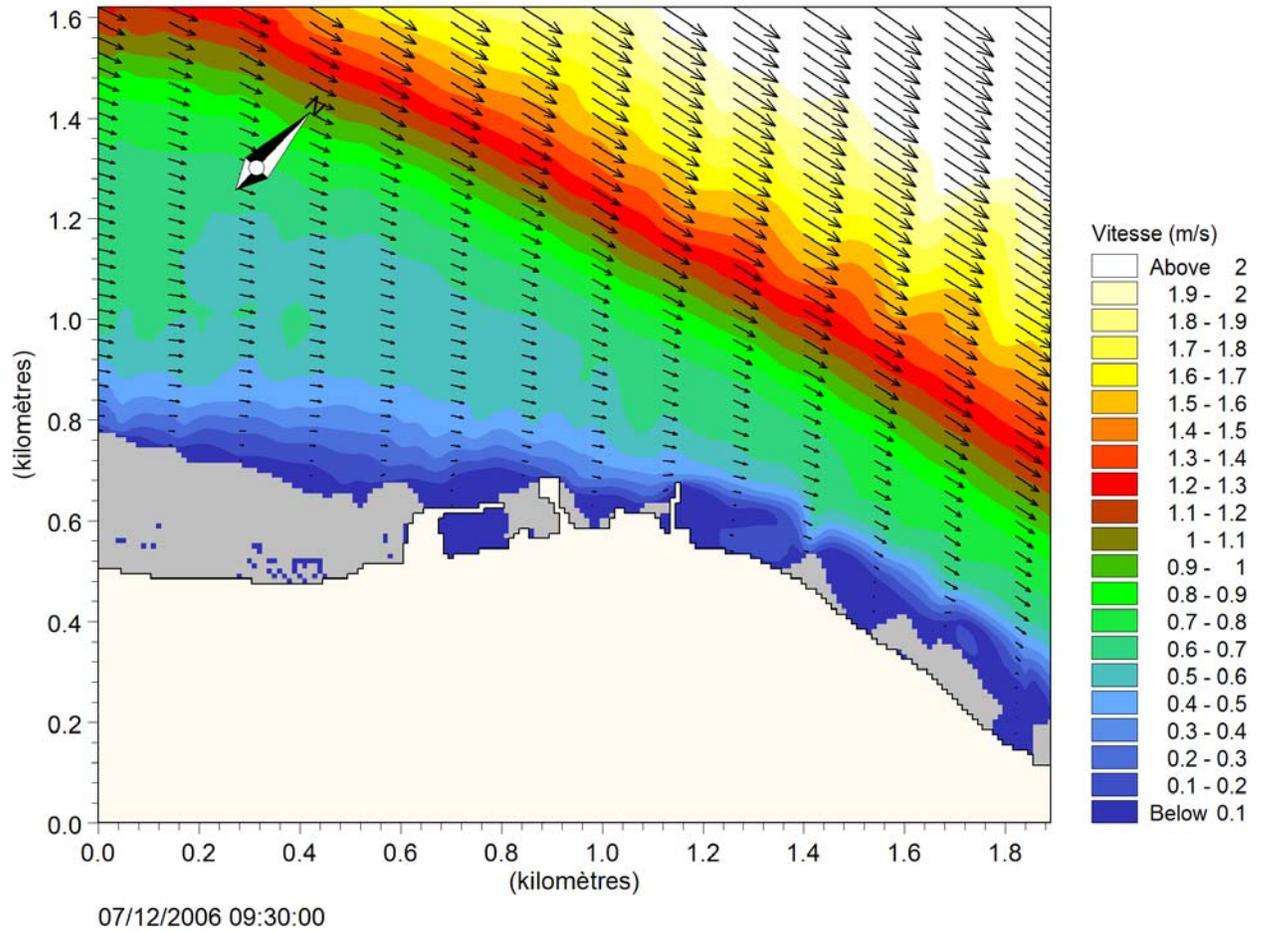


Figure 15c : Courants de marée – Jusant

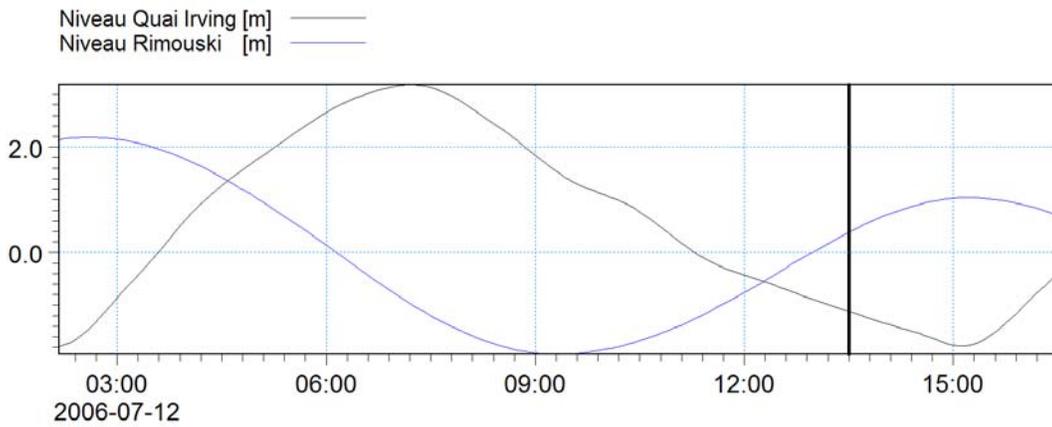
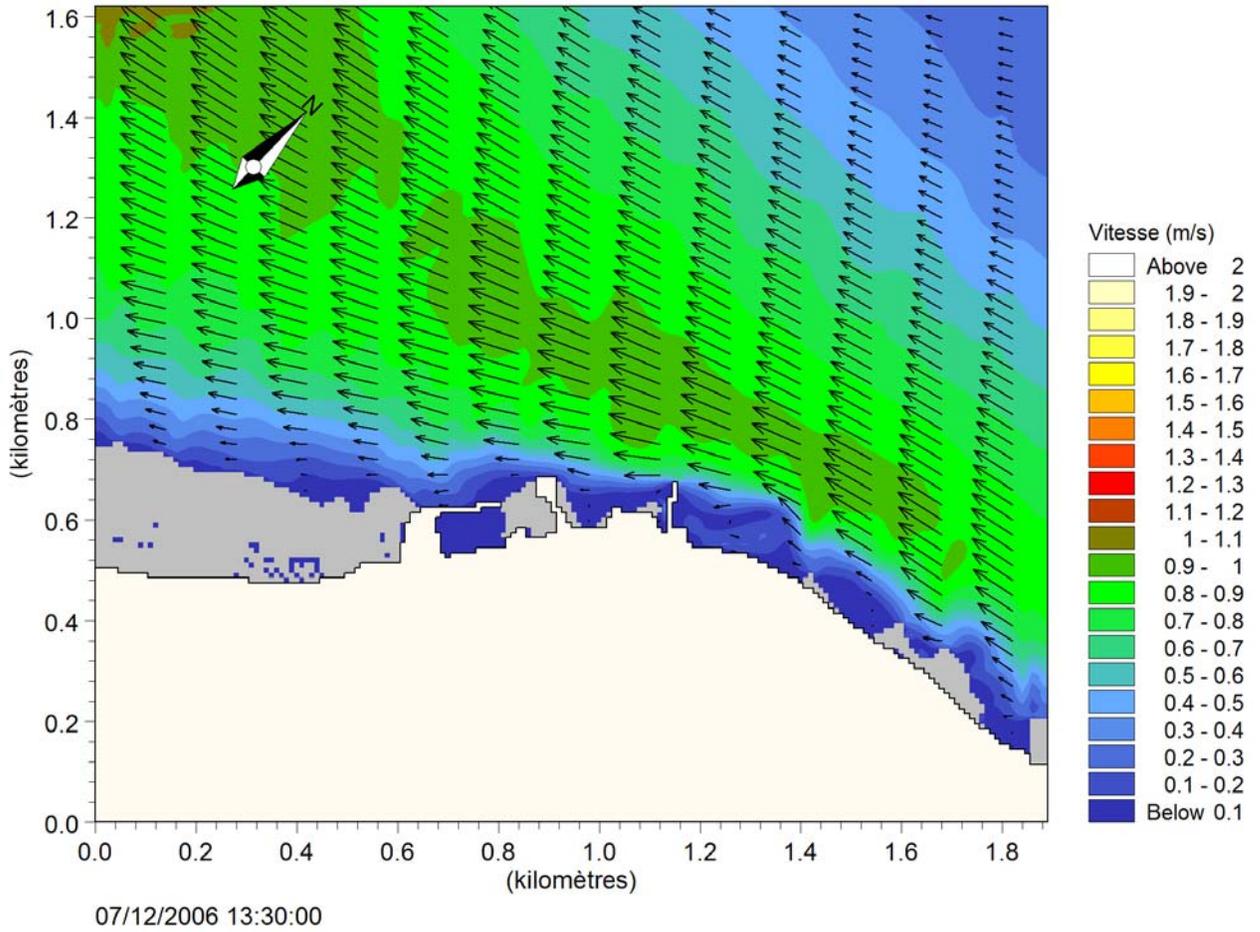


Figure 15d : Courants de marée – Flot

4.2.2 Vitesses maximales des courants dans la zone à l'étude

Sur la base des résultats de simulation hydrodynamique en conditions de vive-eau, il est intéressant d'obtenir une vue d'ensemble des vitesses maximales des courants de marée obtenues dans la zone à l'étude.

La figure 16 donne la valeur maximale des courants de vive-eau obtenus aux abords du quai du traversier. À titre informatif, la carte indique également l'emprise du dragage initial prévu par la Société des traversiers du Québec et la position d'un site où elle a envisagé de recharger la plage existante à l'aide d'une portion du sable qui serait recueilli lors du dragage initial. Ces questions seront abordées au chapitre 5.

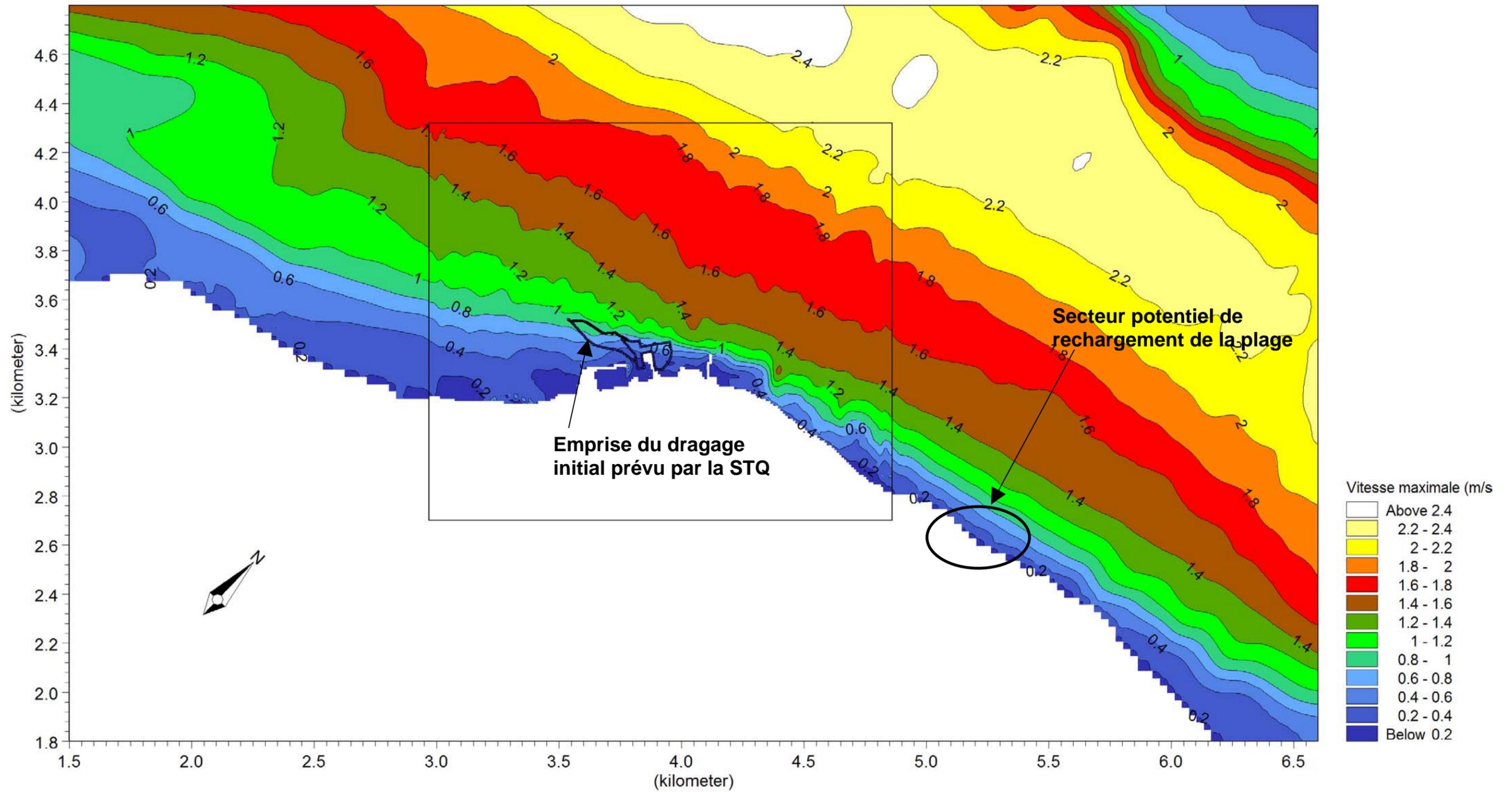


Figure 16 : Vitesses maximales des courants de vive-eau dans la zone à l'étude

4.3 Modélisation hydrosédimentologique – Résultats initiaux

Dans un premier temps, les simulations hydrosédimentologiques ont été effectuées en supposant la présence d'une couche sableuse de $D_{50} = 0,2$ mm dans l'ensemble du passage de l'île aux Coudres. Pour prendre en compte la présence des berges rocheuses, les sédiments érodables ont toutefois été limités aux profondeurs égales ou supérieures à 5 m par rapport au zéro marégraphique. La figure 17 illustre l'étendue de la couche affouillable ainsi prise en compte au modèle numérique.

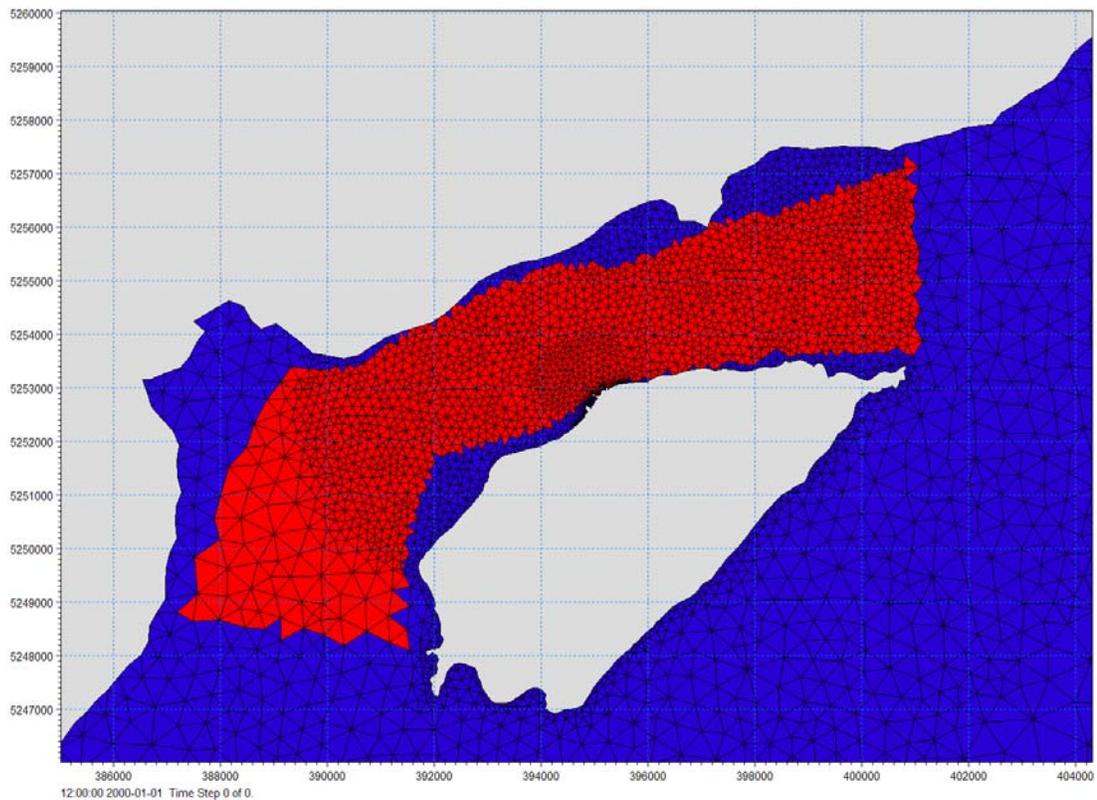


Figure 17 : Limites initiales de la zone érodable (sable $D_{50} = 0,2$ mm)

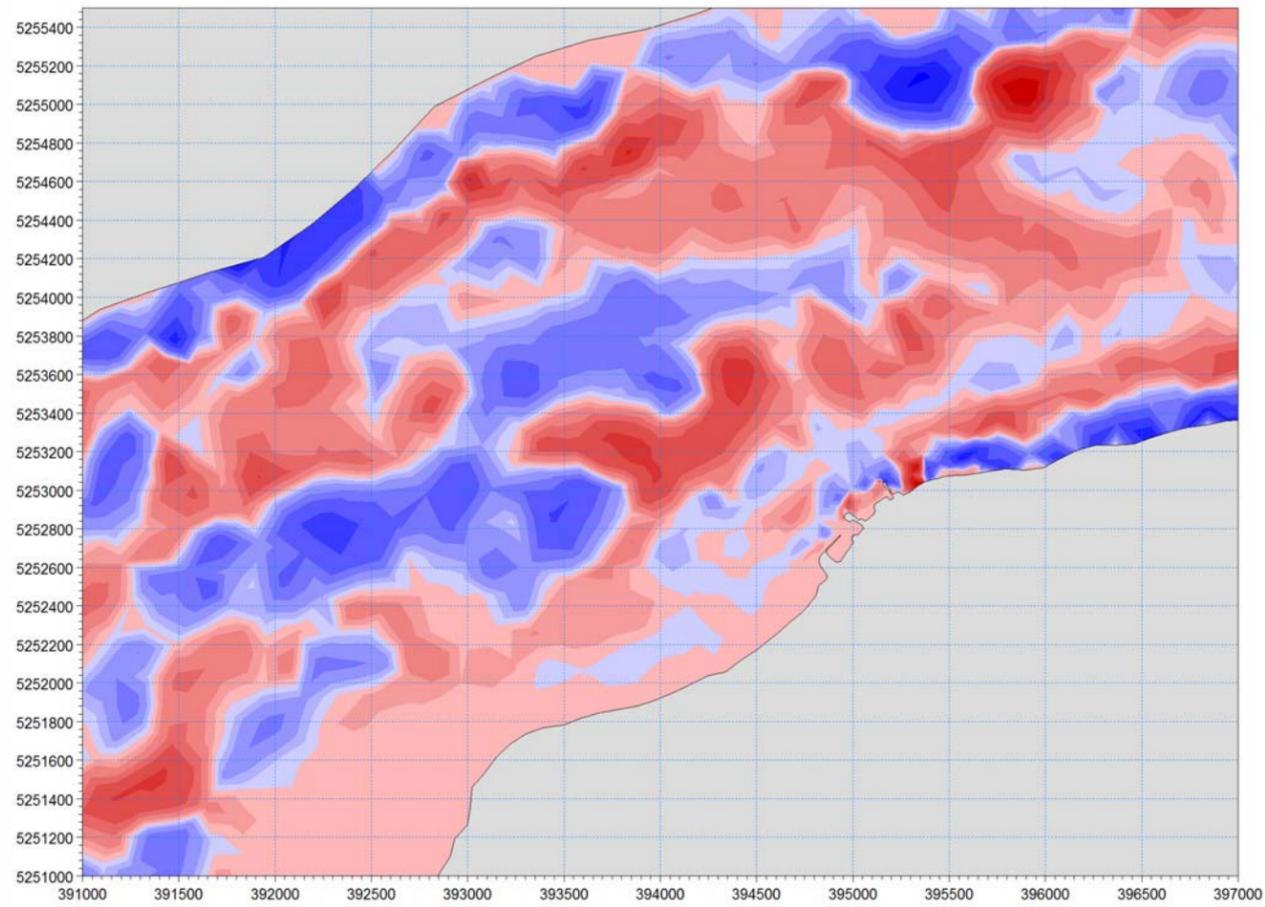
Les simulations hydrosédimentologiques couvraient un cycle complet de morte-eau - vive-eau s'étendant du 1er au 15 septembre 2006. Les résultats obtenus comprenaient la charge sédimentaire en charriage, en suspension et totale, le taux de changement du niveau du lit (en mètre par jour d'accumulation ou d'érosion) et l'écart cumulé du niveau des fonds par rapport à leur cote initiale. La figure 18 présente une carte de cette dernière variable pour l'ensemble de la zone d'intérêt et les abords immédiats du quai.

On observe d'abord de nombreuses alternances entre zones de sédimentation et zones en érosion. Ces résultats ne sont pas sans rappeler les écarts bathymétriques présentés aux figures 3a à 3e. Il importe également de souligner que les épaisseurs d'ensablement maximales cumulées aux abords du quai lors d'un cycle complet de morte-eau – vive-eau sont du même ordre que celles mesurées sur le site de 2005 à 2007, entre les relevés bathymétriques des mois d'avril et mai.

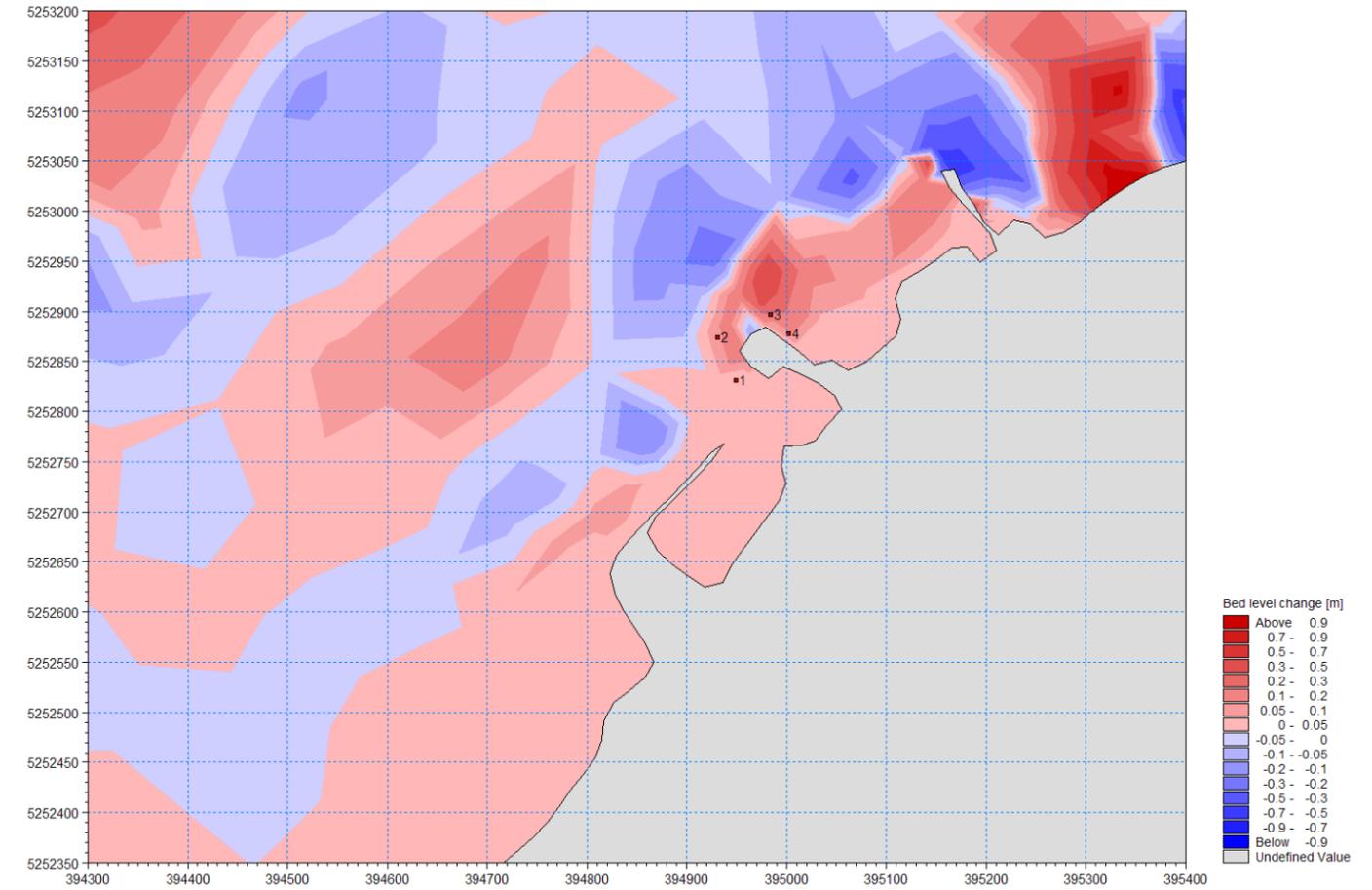
Les résultats de la figure 18 confirment également que les faces amont et aval du quai sont soumises à de l'ensablement sous l'effet des courants de marée. Il importe dans ce contexte de rappeler que la sédimentation effectivement documentée sur le site à l'aval immédiat du quai est probablement atténuée par l'effet de chasse des jets d'hélice du traversier, qui accoste plus fréquemment du côté aval du quai que sur sa face amont. Même si les relevés bathymétriques, de même que les observations de M. Troude tendent à indiquer une sédimentation plus importante à l'amont qu'à l'aval du quai, les résultats de la modélisation numérique ne permettent pas d'exclure un certain degré de sédimentation des abords aval du quai au cours du flot. Cette sédimentation serait toutefois en partie « effacée » en nature par l'action du traversier.

Afin de mieux comprendre l'interaction entre les conditions hydrodynamiques et les processus sédimentaires, quatre points témoins ont été sélectionnés aux abords du quai du traversier. L'emplacement de ces points est indiqué à la figure 18. Pour chacun de ces points, les graphiques de la figure 19 donnent la relation entre le niveau de la marée observé au droit du quai et les variables sédimentaires suivantes : taux d'érosion/sédimentation (figure 19a) et changement d'élévation du lit (figure 19b).

Ces graphiques confirment ce que les champs de courants du modèle hydrodynamique permettaient déjà de prévoir : la sédimentation obtenue aux abords du quai semble davantage associée aux courants de flot qu'aux courants de jusant. En effet, les taux de sédimentation les plus importants sont observés à marée montante (figure 19a) et le rehaussement des fonds lié à l'ensablement est plus marqué au flot (figure 19b).



a) Vue d'ensemble



b) Secteur à l'étude

Figure 18 : Simulation initiale – Patrons de sédimentation / érosion

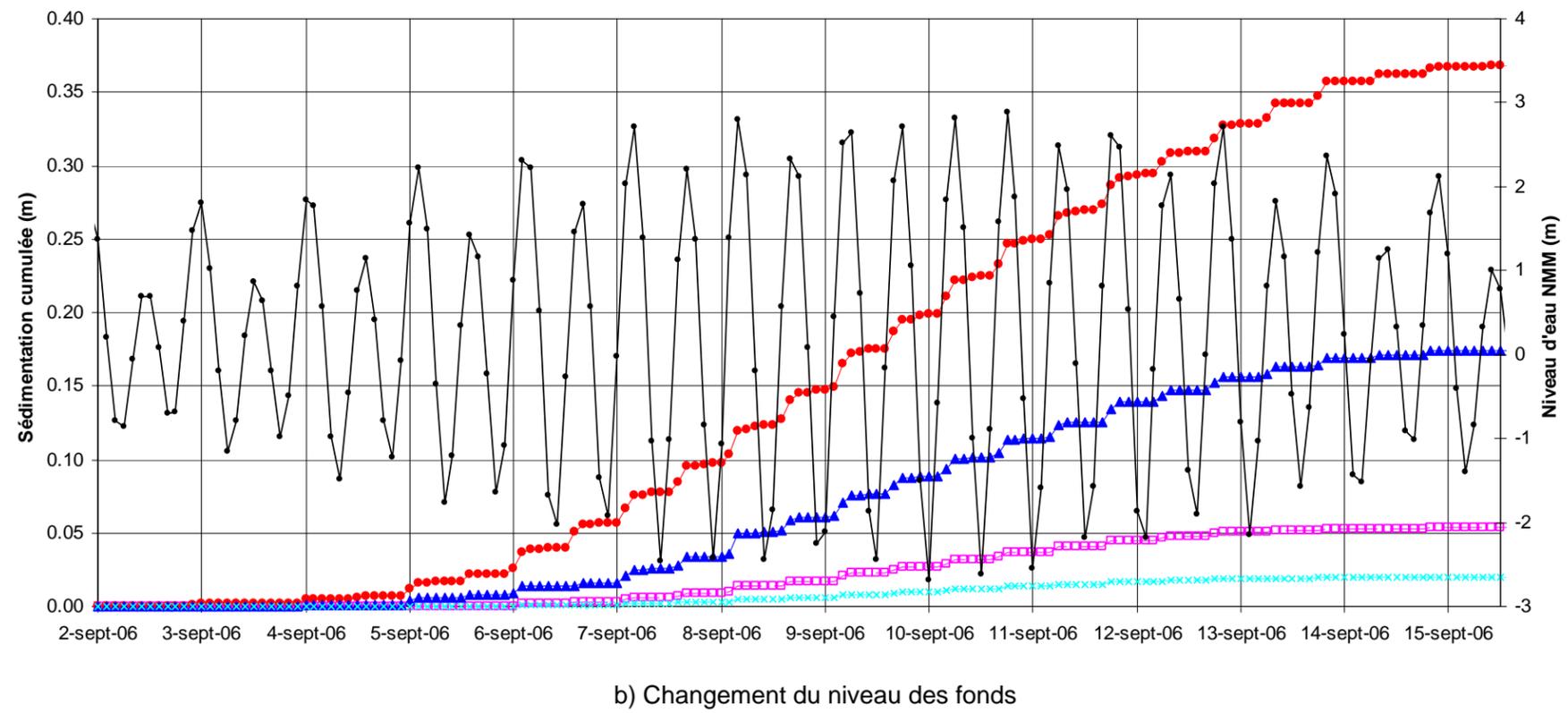
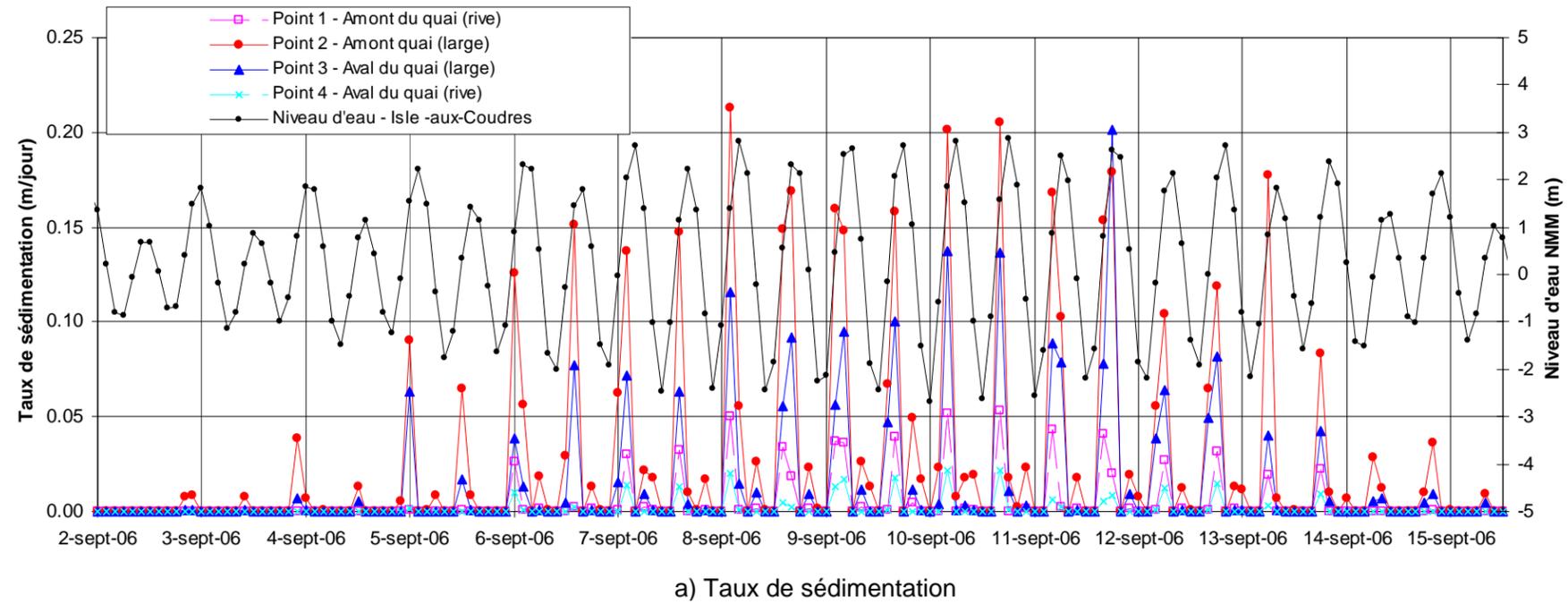


Figure 19 : Évolution du taux sédimentation et du niveau des fonds (Simulation de 14 jours)

4.4 Analyse de sensibilité

Les premiers résultats de simulation hydrosédimentologique ne concordaient pas avec les observations et conclusions de l'étude de M. J. P. Troude. Dans le but de comprendre la source de ces divergences ou, tout au moins de confirmer la tendance prédite par les premières simulations, divers essais de sensibilité ont été réalisés en modifiant certains paramètres de la modélisation.

4.4.1 Représentation des zones érodables

Comme on l'a mentionné à la section 4.3, les simulations initiales supposaient que les fonds du passage de l'île aux Coudres situés sous un niveau marégraphique de -5 m étaient tous constitués de sable de $D_{50} = 0,2$ mm et donc sujets à l'érosion (et à la sédimentation). Comme l'indique la figure 17, cette hypothèse conduisait à supposer que pratiquement toute la rive de l'île située à l'aval du quai était constituée de sable. L'étude de M. Troude, de même que les données recueillies lors de l'étude de la liaison de 25 kV (figure 5), indiquent au contraire que ces berges sont avant tout de nature rocheuse, et donc non érodables.

À la lumière des résultats initiaux, il semblait possible que la présence d'un lit sableux dans cette zone pouvait conduire à une surestimation des apports solides transportés vers le quai par les courants de flot. À l'amont du quai, l'hypothèse initiale de la figure 17 supposait au contraire une absence totale de matériau érodable le long des fonds peu profonds du mouillage de la Prairie. Une telle hypothèse tendait a priori à sous-estimer la charge sédimentaire transportée vers le quai par les courants de jusant.

Pour établir l'influence de cette hypothèse sur les résultats obtenus, une nouvelle cartographie de la zone érodable a été définie sur la base des relevés effectués en 1995 le long de deux sections-en-travers du passage de l'île aux Coudres [3]. La figure 20 illustre l'étendue de la zone sableuse définie comme condition initiale de la nouvelle simulation sédimentologique.

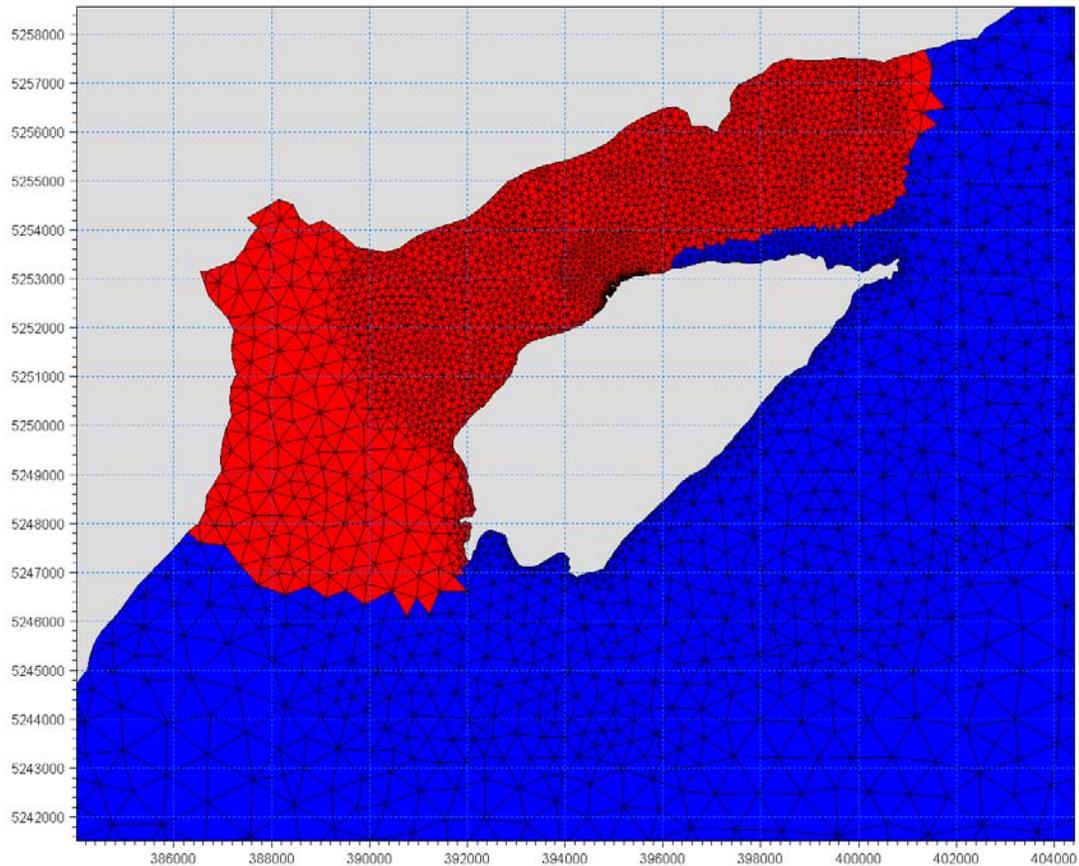


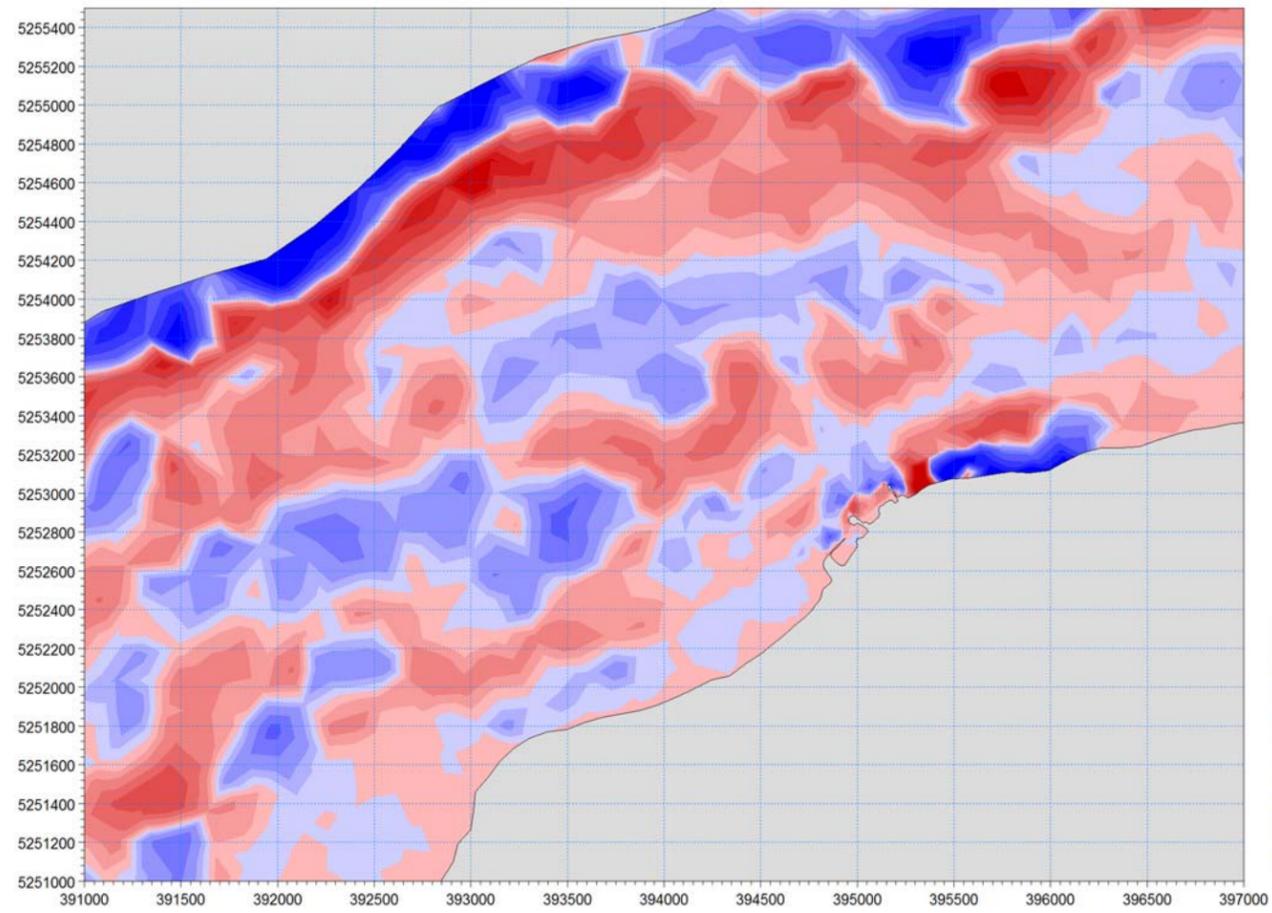
Figure 20 : Zone érodable (sable $D_{50} = 0,2$ mm) définie d'après les levés de 1995

La figure 21 donne la variation de la cote des fonds obtenus dans ces nouvelles conditions au terme d'un cycle complet de morte-eau – vive-eau. Malgré les changements apportés, les patrons de sédimentation et d'érosion demeurent très similaires à ceux déjà présentés à la figure 18 pour la simulation initiale.

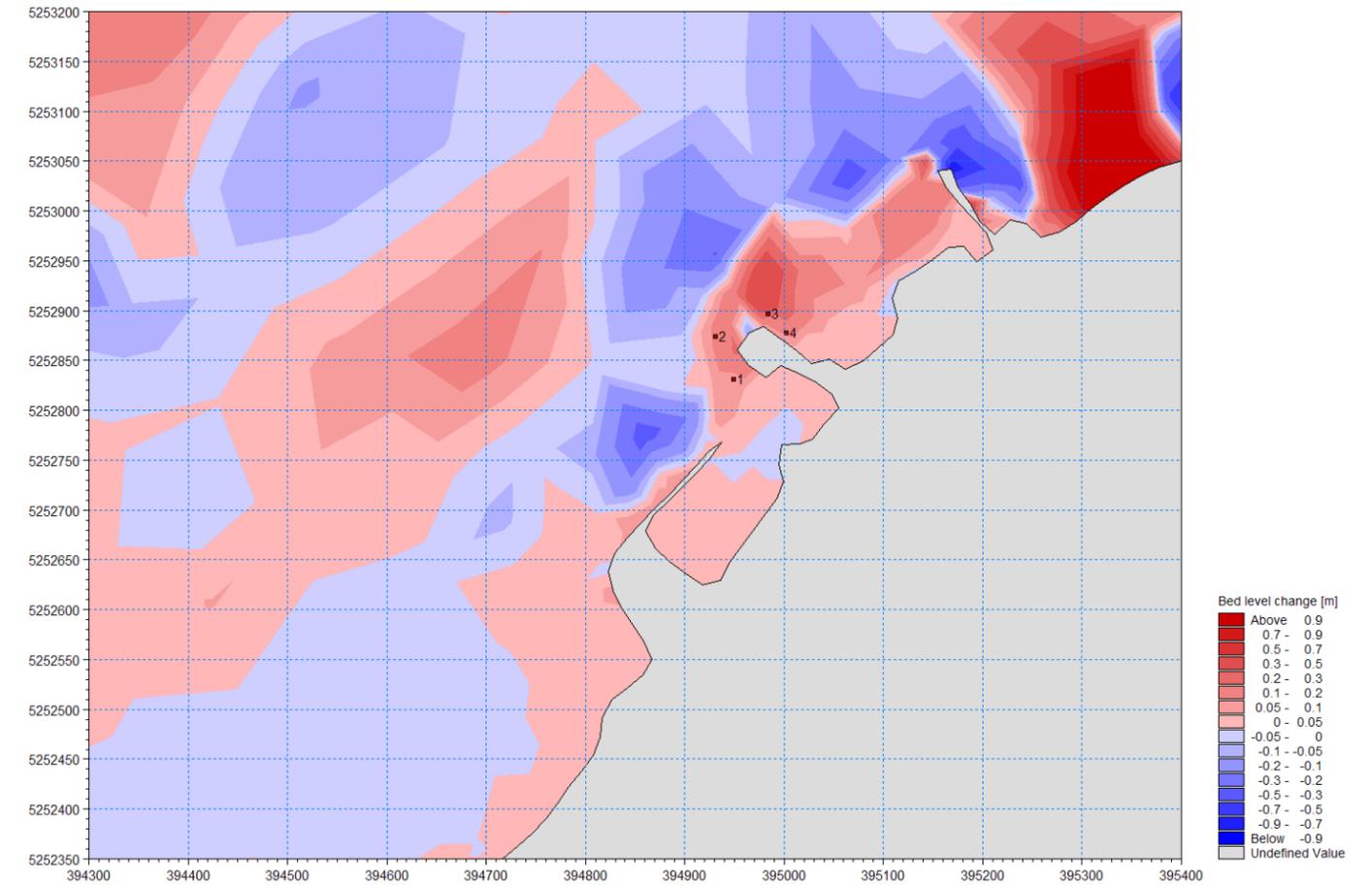
La figure 22 offre un portrait plus détaillé de la sédimentation obtenue en cours de simulation aux points de contrôle 2 et 3 déjà identifiés. Les graphiques comparent les résultats de la simulation initiale aux nouveaux résultats obtenus en modifiant l'étendue de la zone érodable.

La sédimentation obtenue à ces deux points lors du flot reste similaire à celle obtenue avec la simulation initiale. Cependant, la nouvelle simulation introduit une nette augmentation de la sédimentation s'effectuant au jusant, et ce particulièrement au point 2, situé à l'amont du quai. La figure 22b indique en effet à ce point que l'ensablement a conduit à un rehaussement du fond de près de 55 cm, alors que la simulation initiale ne donnait qu'un rehaussement d'environ 35 cm.

Les résultats du modèle numérique se rapprochent ainsi des conclusions de M. Troude, en montrant une intensification du transport sédimentaire obtenu au jusant. Toutefois, le modèle numérique prédit toujours une sédimentation plus marquée au flot qu'au jusant.

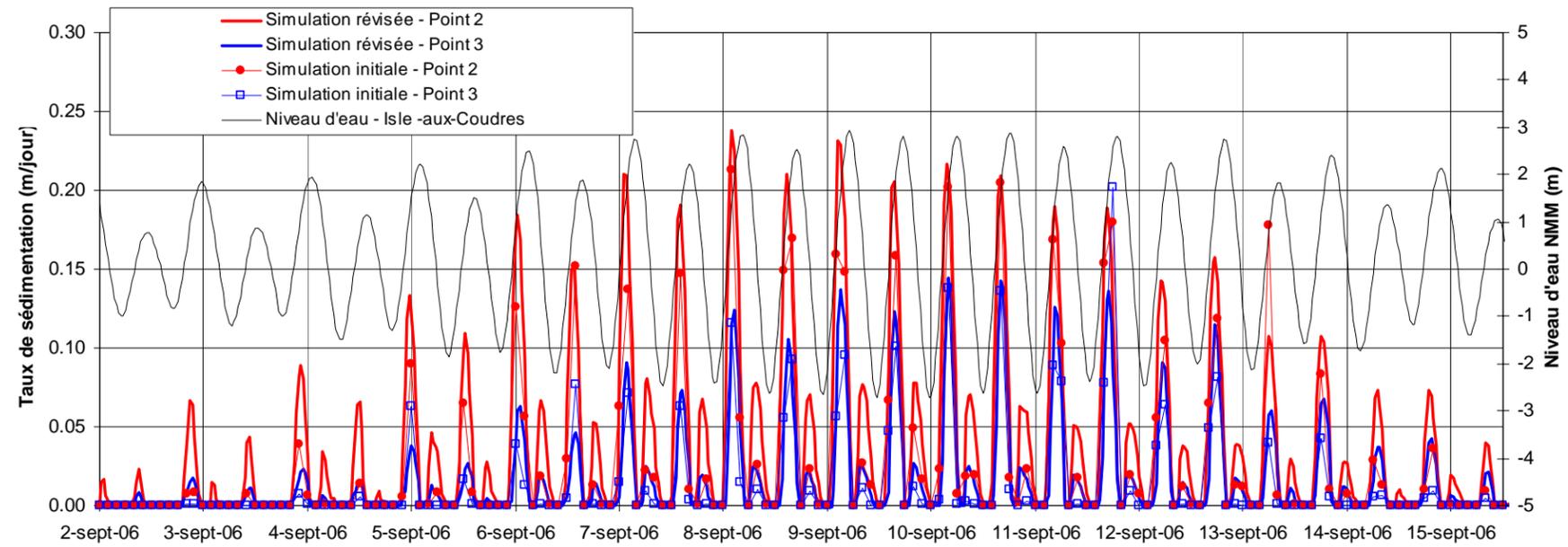


a) Vue d'ensemble

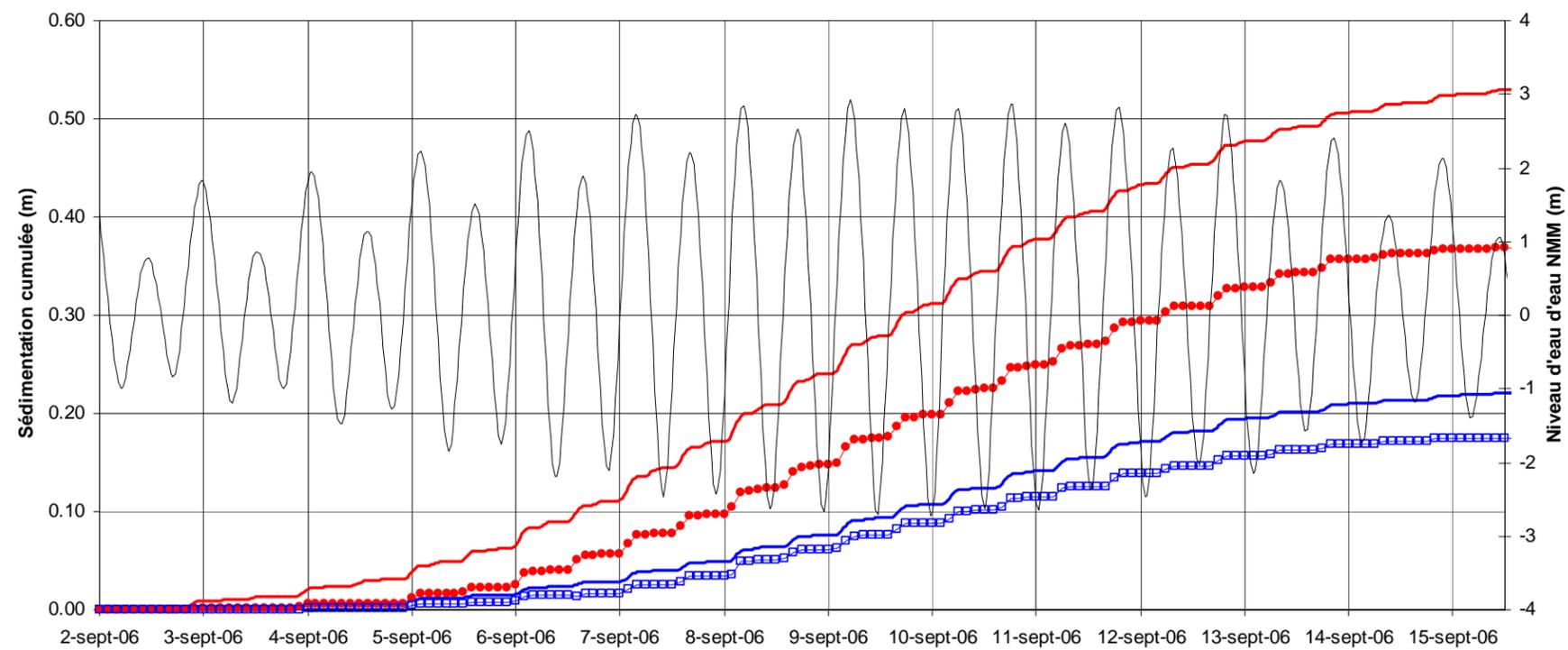


b) Secteur à l'étude

Figure 21 : Simulation –révisée – Patrons de sédimentation / érosion



a) Taux de sédimentation



b) Changement du niveau des fonds

Figure 22 : Simulation révisée - Évolution du taux sédimentation et du niveau des fonds

4.4.2 Raffinement du maillage

L'étude de sensibilité des résultats s'est poursuivie en reprenant un calcul en présence d'un maillage beaucoup plus fin dans l'ensemble de la zone modélisée (figure 23). Les résultats obtenus n'ont pas montré de changement tangible par rapport à ceux obtenus précédemment.

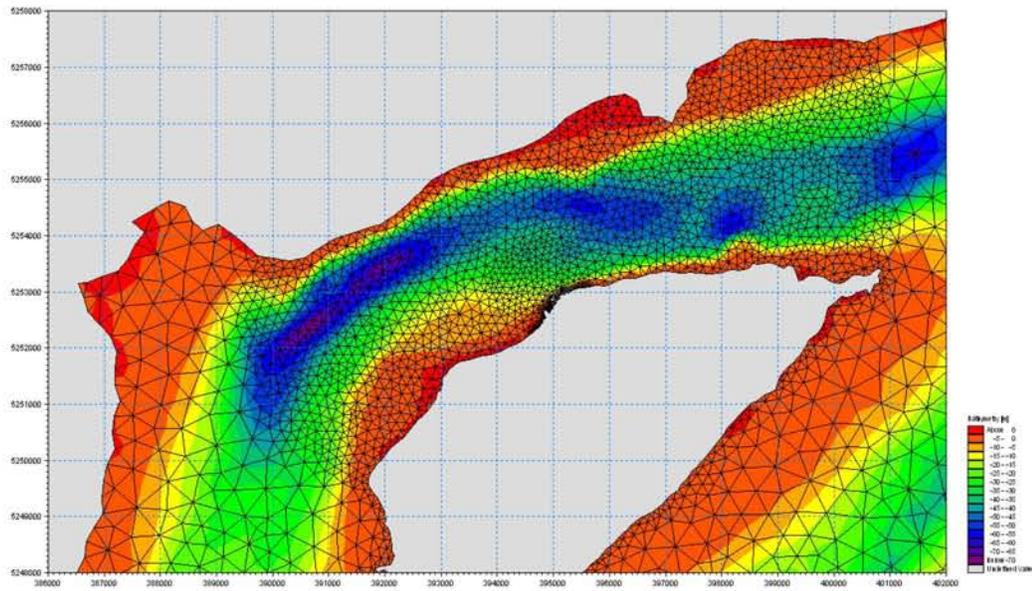
4.4.3 Modélisation hydrodynamique tridimensionnelle

Lors d'une réunion tenue en présence des représentants de la STQ et de Dessau ainsi que de M. Jean-Pierre Troude, il avait été évoqué que la schématisation bidimensionnelle de l'écoulement utilisée dans le modèle MIKE 21 pourrait expliquer l'absence à l'amont du quai de courants de jusant suffisamment obliques par rapport à ce dernier pour entraîner des sables depuis le large du mouillage de la Prairie.

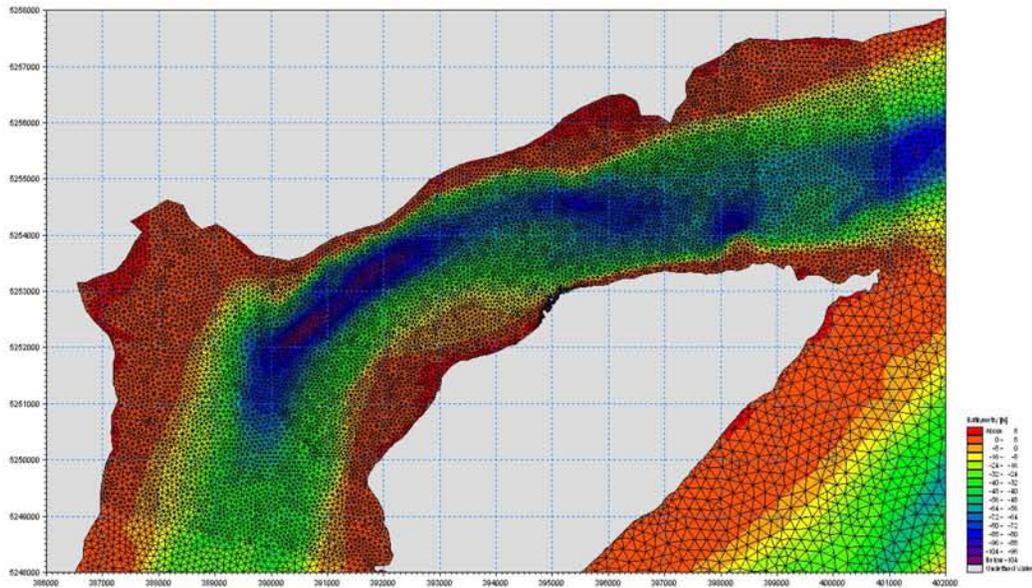
Pour vérifier cette hypothèse, une simulation préliminaire de la marée de vive-eau du 11-12 juillet 2006 a été reprise en utilisant le modèle hydrodynamique tridimensionnel MIKE 3. Les résultats du modèle 3D ont montré des courants de surface ayant une direction très similaire à celle des courants moyens prédits par MIKE 21. La nature des résultats des simulations hydrosédimentologiques ne semblait donc pas attribuable à la schématisation 2D des conditions hydrodynamiques.

4.4.4 Formulation du modèle de transport solide

Soulignons finalement qu'une modification du modèle de transport sédimentaire (formulation de Fredsoe et Engelund plutôt que celle de Van Rijn) n'a pas introduit de changements majeurs dans les résultats obtenus.



a) Maillage initial



b) Maillage raffiné

Figure 23 : Raffinement du maillage (secteur de l'île aux Coudres)

5.0 INCIDENCE SUR LES TRAVAUX DE DRAGAGE

5.1 Comparaison avec l'étude de Troude (2006) et sources d'incertitude

L'étude sédimentologique effectuée par M. J.-P. Troude pour le compte de la STQ trace un portrait convaincant de la dynamique sédimentaire conduisant à l'ensablement du quai de l'Isle-aux-Coudres.

Les travaux de modélisation numérique effectués dans le cadre de la présente étude ne permettent toutefois pas de corroborer la conclusion de M. Troude selon laquelle la sédimentation observée à l'amont du quai, près de l'entrée du port de refuge, est essentiellement attribuable aux apports sédimentaires transportés vers le quai par les courants de jusant agissant au large du mouillage de la Prairie. Pour effectivement transporter des sédiments vers le quai, ces courants devraient être orientés selon un axe Ouest – Est.

La modélisation hydrodynamique montre plutôt dans cette zone des courants maximums de jusant dirigés vers le nord-est ou l'est-nord-est. Une interaction directe des courants de marée avec le quai est plutôt obtenue au flot. Cette tendance est confirmée par les simulations sédimentologiques, qui prédisent un ensablement des abords du quai plus marqué au flot qu'au jusant.

Devant ces résultats contradictoires, il ne s'agit pas de mettre en doute les conclusions de M. Troude ni d'ailleurs les résultats de la modélisation numérique. Il faut avant tout réaliser que le passage de l'île aux Coudres représente un bief extrêmement complexe d'un point de vue hydrosédimentologique. Comme le soulignait l'étude de M. Troude, il est très difficile de confirmer le régime sédimentaire du secteur à l'étude sans l'aide de données de terrain. Il faut également ajouter que des relevés visant à caractériser la dynamique sédimentaire en milieu estuarien sont généralement complexes.

Parmi les facteurs qui pourraient expliquer les écarts obtenus entre les résultats de la modélisation et les conclusions avancées par M. Troude, on doit mentionner :

- Les effets liés à la stratification importante (salinité et température) des écoulements. Ces phénomènes peuvent conduire à des conditions hydrodynamiques très différentes de celles prédites par un modèle bidimensionnel ou même celles obtenues à l'aide d'un

modèle tridimensionnel supposant une densité homogène de la colonne d'eau. Ces effets de stratification, qui sont peu documentés dans le secteur de l'île aux Coudres, peuvent également avoir une influence notable sur la dynamique sédimentaire, bien qu'en général de tels effets agissent d'avantage sur les sédiments fins que sur les matériaux plus grossiers.

- L'influence potentielle des vagues de tempêtes de l'ouest et du nord-ouest sur le transport des sables vers le quai. Il faut rappeler d'une part que le modèle numérique ne tenait pas compte de l'action des vagues mais également souligner d'autre part qu'un ensablement notable (environ 30 cm) a été obtenu à l'amont du quai entre avril et mai pour les années 2005, 2006 et 2007 (cf. figure 3). Il est raisonnable de supposer que les tempêtes des secteurs ouest et nord-ouest, qui se produisent surtout en automne et en hiver, ne peuvent entièrement expliquer cet ensablement printanier.

Pour l'interprétation et l'analyse à long terme de la dynamique sédimentaire affectant le quai du traversier, des questions peuvent également être soulevées quant à l'influence exercée par la mise en place du brise-lames de la marina sur les conditions de sédimentation. En d'autres mots, on peut se demander si le banc de sable nuisant actuellement aux manœuvres du traversier se serait de toutes façons formé en l'absence du brise-lames. Pour tenter de répondre au moins partiellement à cette question, la simulation d'une marée de vive-eau a été reprise en supprimant le brise-lames, de même que les installations portuaires du chantier maritime situé à quelques centaines de mètres à l'aval du quai.

Les figures 24a et 24b présentent les courants maximums de jusant et de flot obtenus avec et sans ces ouvrages. Les résultats de simulation indiquent en premier lieu que les abords amont du quai du traversier sont, dans les conditions actuelles, soumis à des courants de jusant moins intenses qu'avant la construction de la marina. En effet, comme l'indique la figure 24a, les vitesses maximales en bout de quai, qui ne dépassent pas 0,1 à 0,2 m/s en conditions actuelles, étaient de 0,3 à 0,4 m/s en l'absence du brise-lames. Cet abaissement significatif des vitesses des courants de marée, de même que la réduction de l'agitation des vagues obtenue le long de la face amont du quai en présence du brise-lames, tendent évidemment à augmenter le potentiel de sédimentation à l'amont du quai.

Des observations similaires peuvent être formulées quant à l'impact exercé par la présence du chantier maritime lors du flot. Comme l'indique la figure 24b, les courants de flot obtenus le long de la face amont du quai du traversier ont été passablement réduits par la mise en place du quai du chantier maritime.

Ces résultats obtenus en l'absence d'ouvrages existants peuvent sembler hypothétiques, mais ils permettent en retour de mieux comprendre les changements survenus dans la dynamique sédimentaire des abords du quai du traversier suite à la mise en place d'ouvrages plus récents, de part et d'autre de ce quai. Sur cette base, il est plus facile de comprendre pourquoi les besoins en dragage de la STQ au quai de l'Isle-aux-Coudres sont aujourd'hui plus importants qu'il y a vingt ou trente ans.

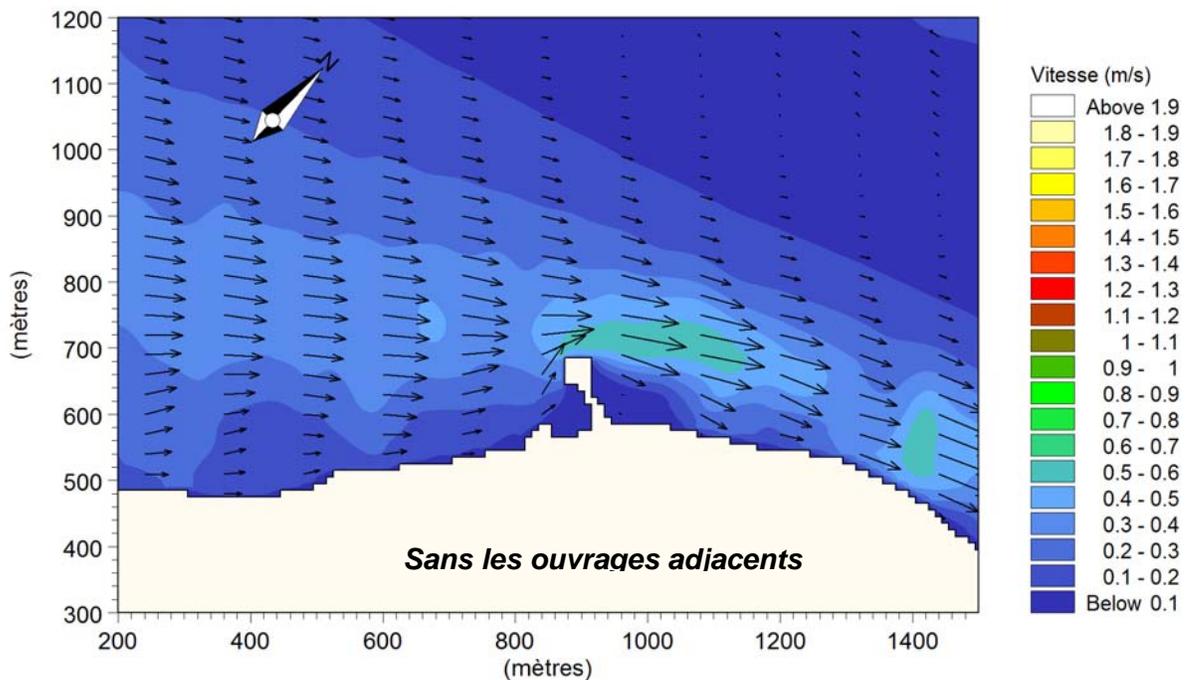
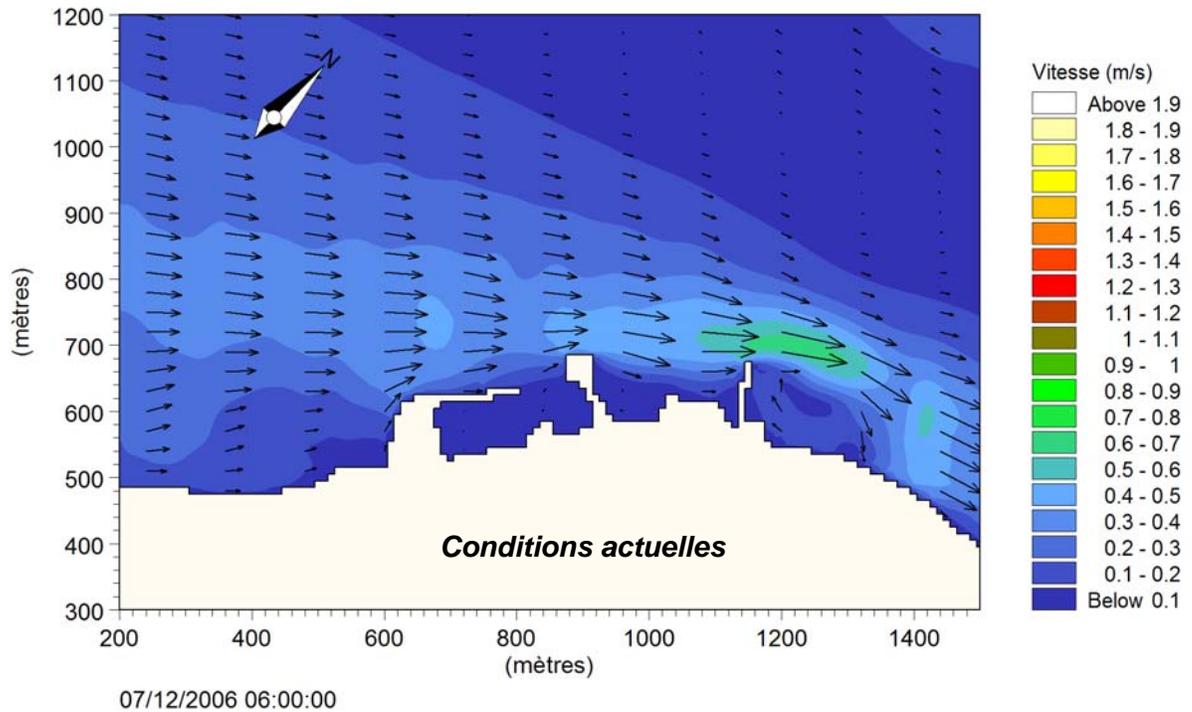


Figure 24a : Influence des ouvrages existants situés à l'amont et l'aval du quai

Courants de jusant

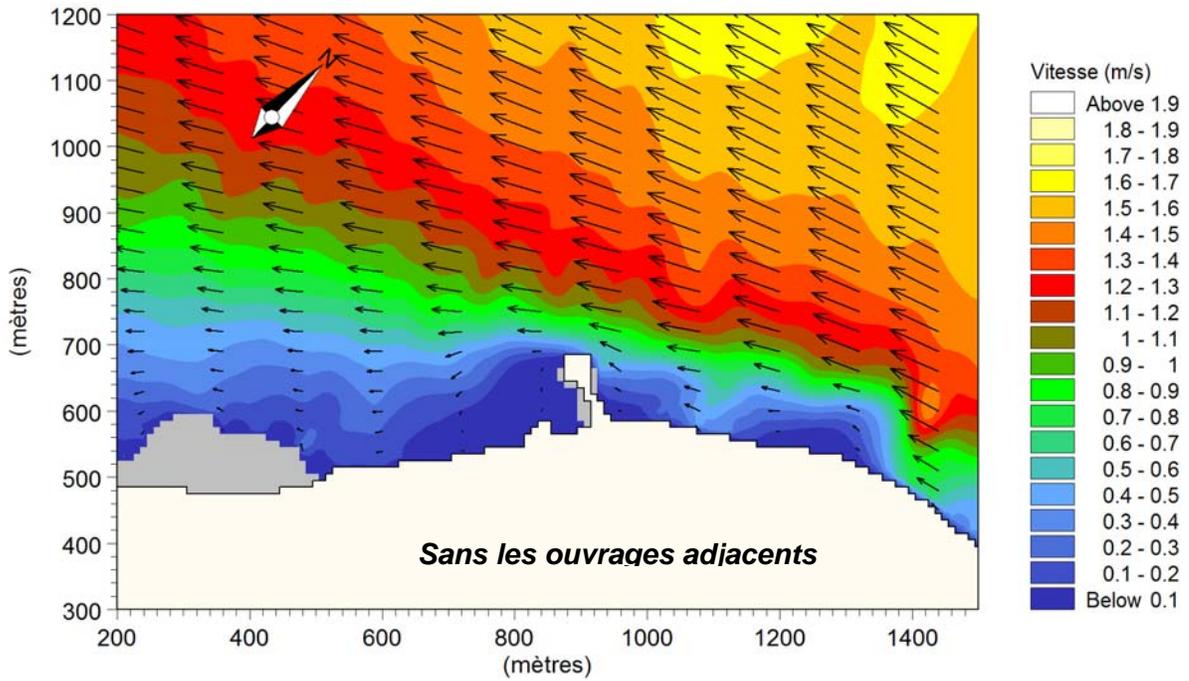
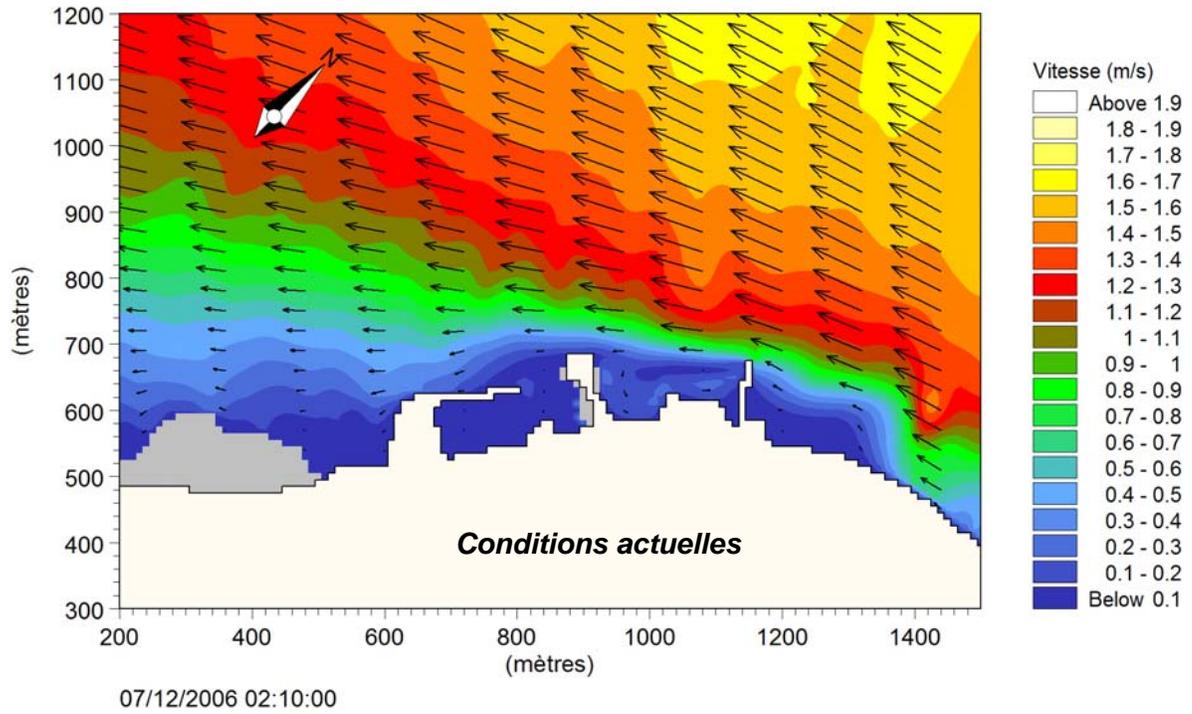


Figure 24b : Influence des ouvrages existants situés à l'amont et l'aval du quai
Courants de flot

5.2 Travaux de dragage

5.2.1 Emprise du dragage initial

Un dragage d'approfondissement initial s'étendant au delà de l'emprise actuellement autorisée semble absolument requis. En effet, il est clair que le banc de sable formé au fil des ans le long du brise-lames de la marina limite de manière inacceptable la marge de manœuvre du traversier approchant le quai depuis l'amont.

La figure 16 illustre l'emprise du dragage d'approfondissement proposé de concert par la STQ et les spécialistes en environnement de la firme Dessau. Par rapport à la zone actuelle de dragage, l'emprise est agrandie vers l'amont, au large du brise-lames de la marina. L'aire draguée a été définie de manière à fournir un espace de manœuvre adéquat au traversier et à s'harmoniser le mieux possible avec les fonds naturels avoisinants.

Les vitesses maximales des courants de vive-eau obtenus en conditions actuelles dans l'emprise de cette nouvelle aire de dragage sont indiquées à la figure 16. Le modèle numérique prédit des courants maximums d'environ 0,2 m/s dans la portion de l'aire draguée située aux abords immédiats du quai. Plus au large, les courants de marée maximums obtenus dans l'emprise du dragage deviennent plus importants, atteignant des valeurs de 0,6 à 0,9 m/s le long de la limite au large du dragage (isobathe -5 m par rapport au zéro marégraphique). Sur la base de ces résultats, il est évident que la sédimentation sera moins prononcée dans la portion du dragage située la plus au large.

L'approfondissement des fonds résultant du dragage tend généralement à réduire les vitesses d'écoulement par rapport aux valeurs obtenues avant le dragage. L'écart entre les courants avant et après dragage augmente avec la dénivelée entre les fonds naturels et dragués et devient donc plus significatif à l'approche du littoral. Pour réduire cet écart, et les risques accrus de sédimentation qui en résultent, l'aire draguée doit s'harmoniser le mieux possible avec la morphologie des fonds naturels et la direction des courants de marée, en évitant surtout de créer un « trou » dans la bathymétrie naturelle. La géométrie proposée par la STQ est satisfaisante de ce point de vue et les courants de marée obtenus dans l'aire draguée devraient être similaires à ceux prédits en conditions actuelles.

Dans le but de garantir une aire de manœuvre suffisante et d'assurer une certaine réserve pour l'accumulation des sédiments avant que ces derniers n'atteignent le quai, il semble difficile de réduire l'emprise du dragage initial indiquée à la figure 16.

Il importe également de souligner que la pente des talus joignant le fond de la zone draguée aux fonds naturels devra être suffisamment douce pour éviter les discontinuités de l'écoulement (décollement, courant de retour) pouvant conduire au remaniement de ces talus. La pente maximale ne devrait pas dépasser 1V : 4H.

5.2.2 Dragage d'entretien

À la lumière de l'ensemble des informations disponibles, il est très difficile de définir avec certitude quelle devrait être la stratégie optimale à court et moyen termes pour les dragages d'entretien.

L'élimination du banc de sable devrait assurément limiter l'ensablement des abords du quai, surtout au cours des premières années suivant le dragage initial. Une meilleure connaissance du volume et de la fréquence des dragages d'entretien ne pourra toutefois être obtenue qu'en poursuivant, pour l'ensemble du secteur dragué, les suivis bathymétriques déjà mis en œuvre par la STQ en conditions actuelles.

Les deux premières années suivant le dragage initial, des relevés devraient être effectués avant la prise des glaces (décembre) ainsi qu'avant et après les éventuels dragages d'entretien (au printemps et en été respectivement). Au cours des années suivantes, le suivi pourrait être limité à des bathymétries avant et après dragage.

Si les bathymétries montrent un ensablement progressif de la zone draguée depuis l'amont vers l'aval, on pourra conclure à une sédimentation induite essentiellement par les courants de jusant. L'entretien périodique de la zone draguée pourra alors s'étendre vers sa limite amont. Si par contre l'ensablement s'effectue à la fois à l'amont et l'aval de la zone draguée, on pourra soupçonner une sédimentation issue des courants de jusant et de flot. La stratégie de dragage pourrait alors se concentrer davantage sur les abords immédiats du quai.

Toutefois, les relevés bathymétriques ne permettront peut-être pas ces distinctions et, sur la base des données disponibles, il semble que l'approche optimale sera un dragage annuel combinant les abords immédiats du quai et la zone longeant le brise-lames. Cette dernière permet à la fois de garantir une aire de manœuvre suffisante au traversier et constitue un « réservoir » à sédiments dont l'entretien régulier limitera probablement les besoins de dragage aux abords immédiats du quai.

Mentionnons également que dans le présent contexte, les travaux de dragage semblent nettement préférables à la mise en place d'un ouvrage submergé visant à contrôler les apports sédimentaires, tel qu'évoqué dans le rapport de M. Troude. L'éventuelle efficacité d'un tel dispositif n'est aucunement appuyée par les résultats de la modélisation numérique, ni par des données de terrain rigoureuses.

On doit ajouter à ces incertitudes, les coûts de construction ainsi que les risques liés à la navigation et à l'impact des glaces. Comme le souligne M. Troude, une telle avenue poserait également des problèmes liés à l'empiètement en milieu marin et, même dans l'hypothèse où le dispositif fonctionnait bien, des travaux d'entretien périodiques (dragages) pourraient s'avérer nécessaires pour enlever les sédiments accumulés au pied de l'épi submergé. Sur la base de ces éléments, il semble clairement préférable d'abandonner cette option.

5.2.3 Utilisation des matériaux dragués

En cours de projet, les intervenants de la STQ et de Dessau avaient évoqué la possibilité de tirer avantage des matériaux dragués pour le rechargement d'une plage située en amont du quai. Il faut toutefois rappeler que les matériaux dragués seront relativement fins (D_{50} de l'ordre de 0,2 mm) et sensibles à l'érosion.

Comme l'indique la figure 16, les courants maximums de marée calculés le long de cette plage varient d'environ 0,3 m/s en bordure du littoral à plus de 0,5 m/s une cinquantaine de mètres plus au large. De telles conditions, jumelées à l'agitation due aux vagues de tempêtes, semblent peu propices à la mise en place de sables fins le long du littoral. Les observations effectuées par Dessau sur le site montrent d'ailleurs que cette plage est actuellement constituée de matériaux plus grossiers (sables grossiers, graviers, galets), plus compatibles avec les conditions hydrodynamiques du site.

6.0 SOMMAIRE ET CONCLUSION

La Société des traversiers du Québec (STQ) réalise actuellement une étude d'impact dans le cadre d'un projet de dragage décennal au quai de l'Isle-aux-Coudres. Le projet prévoit notamment d'étendre l'emprise du dragage vers l'amont, en vue d'éliminer le banc de sable formé au fil des ans le long du brise-lames de la marina et de garantir une aire de manœuvre suffisante au traversier.

Dans le cadre de ce projet, la STQ avait déjà effectué en 2006 une étude visant à identifier les grandes lignes de la dynamique sédimentaire du secteur et les causes potentielles de la sédimentation observée aux abords du quai du traversier (étude du Professeur J.P. Troude [1]).

La STQ a confié au Groupe-Conseil LaSalle une étude de modélisation numérique visant à simuler les conditions hydrosédimentologiques prévalant dans la zone à l'étude, en vue notamment de confirmer les conclusions de l'étude sédimentaire initiale et de mieux définir les besoins futurs de dragage.

L'étude du Groupe-Conseil LaSalle a mené à des conclusions pouvant se résumer comme suit :

- Les données bathymétriques disponibles confirment clairement la formation d'un banc de sable devant le brise-lames de la marina, à l'amont immédiat du quai du traversier. Les relevés indiquent également une sédimentation notable des abords amont du quai du traversier, dans le prolongement aval de ce banc de sable. La tendance à la sédimentation est moins évidente à l'aval du quai, mais il ne faut pas négliger l'effet potentiel des jets d'hélice du traversier, puisque ce dernier utilise plus fréquemment le poste à quai aval que celui situé en tête du quai.
- La modélisation hydrosédimentologique montre une sédimentation des abords du quai sous l'action des courants de jusant et de flot, alors que l'étude sédimentaire initiale [1] concluait plutôt à un transport sédimentaire s'effectuant essentiellement au jusant.
- Les conclusions différentes obtenues au terme de l'étude initiale et de la présente étude compliquent passablement la définition précise des besoins futurs de dragage.

- Sur la base des résultats obtenus et des informations disponibles, il apparaît toutefois évident qu'en présence du banc de sable qui s'est formé le long du brise-lames depuis la construction de la marina, en 1983, le gabarit de dragage actuel n'offre plus une marge de manœuvre suffisante au traversier. Un agrandissement de l'emprise du dragage semble donc impératif, non seulement pour des raisons de navigation, mais également pour limiter aux abords du quai la sédimentation accrue résultant de la présence du banc de sable.
- Des simulations hydrodynamiques effectuées sans le brise-lames ont révélé que la zone située à l'amont de la tête du quai du traversier était soumise à des courants plus importants avant la construction de la marina que dans les conditions actuelles. Ces résultats tendent à indiquer que le banc de sable actuellement observé le long du brise-lames ne se serait pas nécessairement formé en l'absence de ce dernier. Il est donc normal dans ce contexte que les besoins de dragage pour le quai du traversier soient plus importants aujourd'hui qu'ils ne l'étaient avant la mise en place de la marina.
- Une définition plus précise des stratégies et besoins futurs de dragages d'entretien passent par un suivi bathymétrique serré de l'aire du dragage initial, notamment dans les deux premières années suivant les travaux

RÉFÉRENCES

- [1] TROUDE, J. P. (2006), *Municipalité de l'Isle-aux-Coudres – Étude sédimentaire quai des traversiers et au port de refuge*. Rapport final préparé pour le compte de la Société des traversiers du Québec et la Corporation Havre Jacques-Cartier Île-aux-Coudres inc.
- [2] SAUCET, J.-P. (1999), *Liaison sous-marine 25 kV de l'Île-aux-Coudres – Expertise technique*, Rapport Groupe-Conseil LaSalle no 1386, préparé pour le compte d'Hydro-Québec, Territoire Montmorency
- [3] PROCEAN (1995), *Relevés géophysiques et hydrographiques – Liaison sous-marine 25 kV – Île-aux-Coudres*, Rapport préparé pour SNC-Shawinigan.
- [4] VILLENEUVE, M. (2004), *Reconstruction du quai de Rivière-du-Loup – Modélisation numérique des conditions hydrodynamiques*, Rapport du Groupe-Conseil LaSalle préparé pour la coentreprise Tecsuit-LaSalle-Hamelin pour le compte de la Société des traversiers du Québec.
- [5] VAN RIJN, L. C. (1989), *Handbook of Sediment Transport by Currents and waves*, Rapport H461, Delft Hydraulics.
- [6] SERVICE HYDROGRAPHIQUE DU CANADA (1997), *Atlas des courants de marée – Estuaire du Saint-Laurent, du cap de Bon-Désir à Trois-Rivières*, Pêches et Océans Canada.