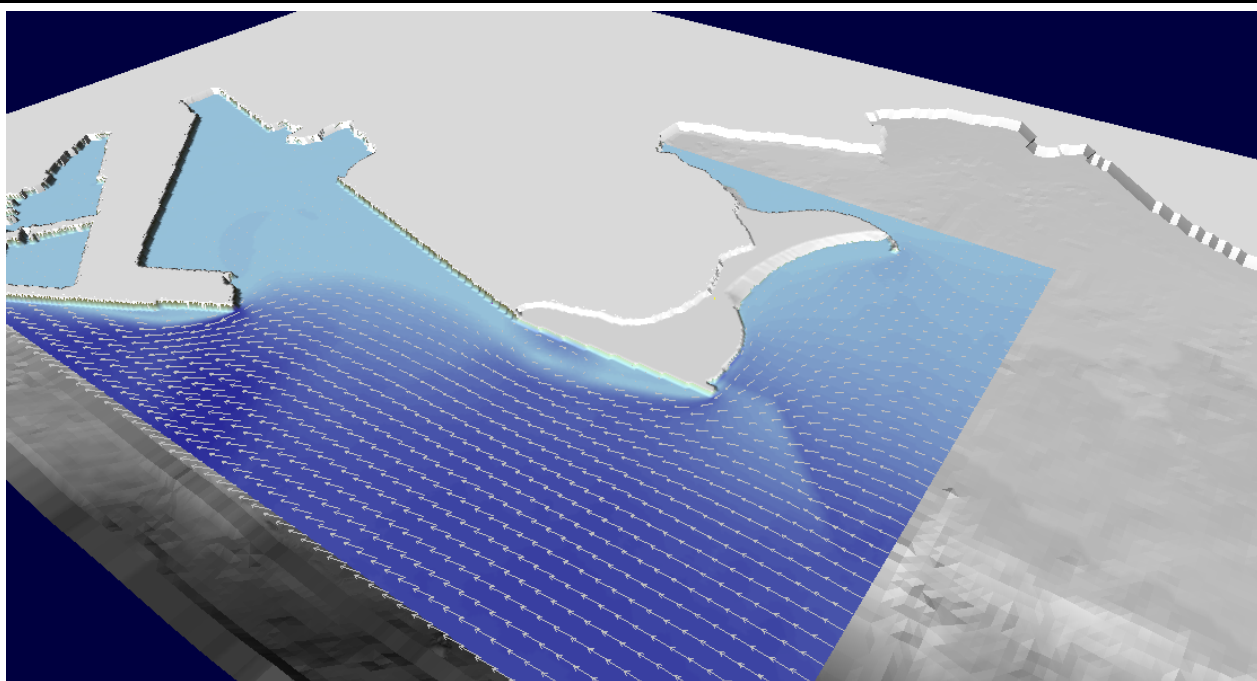


Administration portuaire de Québec



PORT DE QUÉBEC

Canada



PORT DE QUÉBEC

Nouvelles infrastructures portuaires Beauport 2007 (J-4161)

Modélisation numérique des conditions hydrauliques



Le Groupe-Conseil LaSalle

Rapport no 1657
Août 2007



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 présenté à

Administration portuaire de Québec (APQ)

PORT DE QUÉBEC

Nouvelles infrastructures portuaires

Beauport 2007 (J-4161)

Modélisation numérique des conditions hydrauliques

Rapport no 1657

Août 2007

<Original signé par>

Préparé par :

Marc Villeneuve, ing.

414-101 (985)

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	ii
LISTE DES PHOTOGRAPHIES	ii
1.0 INTRODUCTION.....	1
2.0 AMÉNAGEMENTS À L'ÉTUDE	2
2.1 Terminal pour liquides en vrac au droit du quai no 50	2
2.2 Approfondissement des quais no 51, 52 et 53	3
2.3 Extension du secteur portuaire Beauport	3
3.0 MODÉLISATION NUMÉRIQUE.....	5
3.1 Modélisation hydrodynamique	5
3.1.1 Limites de la zone modélisé	5
3.1.2 Bathymétrie	6
3.1.3 Scénarios modélisés	7
3.1.4 Conditions aux limites.....	7
3.1.5 Paramètres de calcul.....	8
3.2 Modélisation des vagues et des courants littoraux.....	8
3.3 Validation du modèle numérique	9
4.0 QUAIS AVEC DUCS D'ALBE	13
4.1 Conditions hydrodynamiques	13
4.2 Conditions de navigation	15
5.0 APPROFONDISSEMENT DES QUAIS 51, 52 ET 53.....	17
5.1 Modification de la bathymétrie	17
5.2 Conditions hydrodynamiques	17
6.0 EXTENSION DU SECTEUR PORTUAIRE BEAUPORT	21
6.1 Problématiques.....	21
6.2 Variantes de base.....	23
6.3 Variantes optimisées	27
6.3.1 Définition des variantes	27
6.3.2 Vagues et courants littoraux.....	29
6.3.3 Courants de marée.....	30
6.4 Conditions de navigation	33
6.5 Orientation de la nouvelle ligne de quais.....	34
7.0 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	38
RÉFÉRENCES.....	40
LEXIQUE	41
ANNEXE A.....	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Port de Québec – Secteur Beauport.....	2
Figure 2 : Localisation des trois projets d'aménagement à l'étude	3
Figure 3 : Bathymétrie et limites du modèle hydrodynamique	10
Figure 4 : Données bathymétriques – Minutes hydrographiques fournies par le SHC	11
Figure 5 : Estuaire de la rivière Saint-Charles - Vue tridimensionnelle de la bathymétrie	12
Figure 6 : Rivière Saint-Charles – Station 02PD010 – Hydrogrammes 1969-2001	13
Figure 7 : Terminal pour liquides en vrac – Aménagement avec ducs d'Albe	14
Figure 8 : Terminal pour liquides en vrac avec ducs d'Albe – Vitesses maximales des courants ..	16
Figure 9 : Approfondissement des quais 51 à 53 – Bathymétrie avant et après dragage	19
Figure 10 : Approfondissement des quais 51 à 53 – Vitesses maximales des courants	20
Figure 11 : Extension du secteur portuaire Beauport – Variantes de base.....	25
Figure 12 : Variantes de base – Régime local des vagues.....	26
Figure 13 : Optimisation de l'extension portuaire.....	28
Figure 14 : Optimisation de l'extension portuaire– Simulation des vagues.....	31
Figure 15 : Optimisation de l'extension portuaire– Simulation des courants littoraux.....	32
Figure 16 : Extension portuaire – Variante D2 - Vitesses maximales des courants	35
Figure 17 : Influence de l'orientation de la nouvelle ligne – Conditions au flot	36
Figure 18 : Influence de l'orientation de la nouvelle ligne – Conditions au jusant.....	37

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photo 1 : Pointe de Beauport vue depuis l'est – Été 2005.....	22
---	----

1.0 INTRODUCTION

L'Administration portuaire de Québec (APQ) étudie actuellement en phase d'avant-projet trois scénarios d'aménagement touchant les quais du secteur Beauport. Trois aménagements, qui pourraient être réalisés séparément ou en conjonction, sont actuellement à l'étude :

- la mise en place de nouveaux postes à quai sur ducs d'albe près du quai 50, en vue de l'aménagement d'un terminal pétrolier;
- l'approfondissement de la profondeur draguée au droit des quais 51 à 53;
- l'extension vers le nord-est du secteur portuaire Beauport, avec la mise en place de deux nouveaux quais (54 et 55).

L'APQ a mandaté la firme CIMA+ pour l'ingénierie préliminaire de ces projets et l'évaluation de leurs coûts et contraintes environnementales [1]. Le Groupe-Conseil LaSalle (GCL) a pour sa part été chargé de réaliser les travaux de modélisation numérique visant à évaluer les conditions hydrauliques qui résulteraient de la présence de ces nouveaux aménagements.

Le présent rapport rend compte de cette étude du GCL, qui s'inscrit dans la continuité des travaux déjà effectués en 2006 pour le projet d'extension du secteur Beauport [2]. La méthodologie et les résultats sont présentés selon cinq sections distinctes. Le chapitre 2 décrit les aménagements à l'étude et le chapitre 3 présente le montage du modèle de terrain de même que les principaux outils de modélisation hydraulique utilisés. Les chapitres 4 à 6 traitent respectivement des résultats obtenus pour chacun des trois projets d'aménagement.

Les trois projets d'aménagement sont situés dans le secteur Beauport (figure 1). Les quais 50 à 53 forment actuellement une ligne continue de 1 055 m de longueur qui délimite la rive nord de l'estuaire de la rivière Saint-Charles.

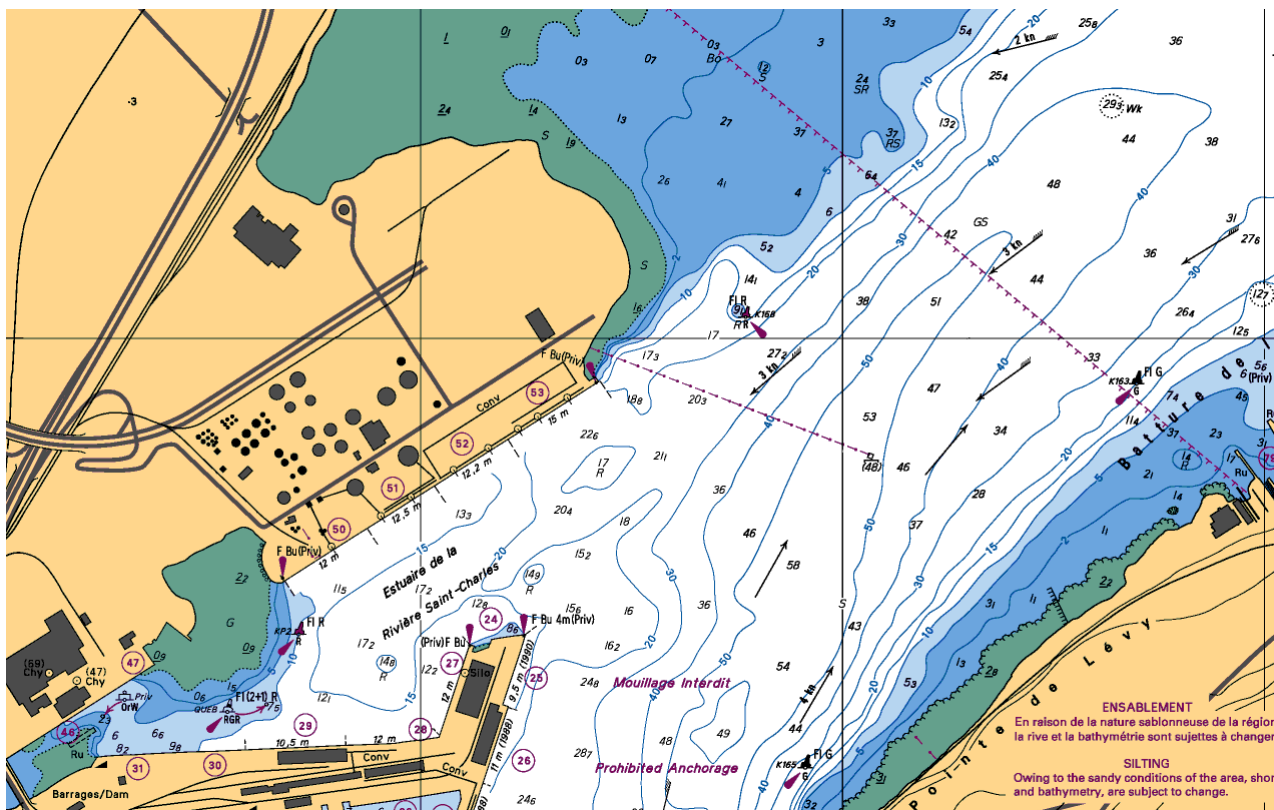


Figure 1 : Port de Québec – Secteur Beauport

Parmi ses projets d'expansion, l'APQ envisage l'aménagement d'un terminal pétrolier impliquant de nouveaux postes à quai dans l'estuaire de la rivière Saint-Charles, au droit du quai no 50. L'accès terrestre s'effectue à l'aide d'un pont monté sur ducs d'Albe et la configuration étudiée au modèle numérique prévoit un axe pratiquement parallèle à la ligne des quais 50 à 53 (figure 2).

2.2 Approfondissement des quais nos 51, 52 et 53

Selon les derniers relevés bathymétriques disponibles (datant de 2005), la profondeur minimale observée à la jonction des quais 50 et 51 est de $-12,5$ m par rapport au zéro marégraphique. La seconde option d'aménagement considérée dans la présente étude consiste à assurer une profondeur de $-15,5$ m le long des quais 51 à 53 (figure 2).



Figure 2 : Localisation des trois projets d'aménagement à l'étude

2.3 Extension du secteur portuaire Beauport

L'extension vers le nord-est du secteur portuaire de Beauport représente une des principales avenues d'expansion du port de Québec. Le prolongement rectiligne de la ligne des quais 50 à 53, qui serait souhaitable vis-à-vis des opérations de transbordement, ne peut être considéré à cause de l'interaction trop marquée qui résulterait, en eau libre et surtout en présence de glace, entre les nouveaux quais et les courants maximums de flot et de jusant observés dans le chenal principal du fleuve.

Sur la base des études sur modèle réduit réalisées au GCL dans les années '80 et de l'étude plus récente du GCL utilisant la modélisation numérique [2], l'APQ projette actuellement une extension de 610 m, orientée à 17° par rapport à la ligne des quais existants (figure 2).

La présente étude doit permettre une analyse plus détaillée de l'influence de l'angle des nouveaux quais sur les conditions hydrodynamiques. Il est à souligner que l'avant-projet prévoit maintenant de draguer les fonds à -16,0 m le long des quais, alors que nos derniers travaux de modélisation utilisaient plutôt une valeur de -15,0 m.

L'étude de cette option d'aménagement devra également permettre de mieux définir les limites en plan de la portion nord-est du nouveau remblai, le long des battures de Beauport. Dans les conditions d'aménagement actuelles, la limite nord-est de la péninsule comporte une plage qui est utilisée à des fins récréatives, notamment par les amateurs de planche à voile.

3.0 MODÉLISATION NUMÉRIQUE

La modélisation numérique est effectuée à l'aide des divers modules du modèle bidimensionnel 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 Modélisation hydrodynamique

La modélisation des courants repose sur le module NHD (Nested Hydrodynamics) de MIKE 21, qui permet d'imbriquer des maillages de résolution variable pour représenter la bathymétrie. Les zones d'intérêt sont modélisées à l'aide d'un maillage relativement fin alors que le maillage plus grossier adopté pour le champ éloigné permet d'optimiser les temps de calcul.

Le modèle utilisé pour l'étude de 2006 [2] a été repris intégralement, avec des modifications importantes visant à raffiner la bathymétrie dans l'estuaire de la rivière Saint-Charles, afin de bien évaluer les conditions hydrauliques associées à l'approfondissement des quais 50 à 53 et à la mise en place des ducs d'Albe.

3.1.1 Limites de la zone modélisée

La figure 3 illustre l'étendue de la zone couverte par le modèle numérique hydrodynamique. La limite amont du modèle 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. Ces limites coïncident avec celles du modèle physique du port exploité par le GCL de 1972 à 1990. On peut ainsi bénéficier pour le réglage du modèle numérique des résultats de la modélisation physique, de même que des relevés in situ de 1971 qui avaient servi à l'étalonnage du modèle réduit.

La configuration adoptée permet également d'assurer une distance suffisante des limites amont et aval du modèle par rapport aux secteurs d'intérêt, 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.

Afin d'obtenir une bathymétrie numérique suffisamment précise dans les secteurs à l'étude, tout en évitant les temps de calcul excessifs pouvant résulter de l'application d'un maillage trop fin à

l'ensemble de la zone modélisée, des maillages de résolution variable ont été mis à profit. Comme l'indique la figure 3, trois niveaux de maillage ont été utilisés :

- i. Maillage d'ensemble de 24 km par 14 km utilisant des cellules carrées de $\Delta x = \Delta y = 63$ m.
- ii. Maillage secondaire de $\Delta x = \Delta y = 21$ m couvrant l'ensemble du secteur Beauport.
- iii. Maillage fin de $\Delta x = \Delta y = 7$ m englobant l'estuaire de la Saint-Charles, et la zone d'extension des quais 50 à 53.

3.1.2 Bathymétrie

Les données bathymétriques de base utilisées pour le montage du modèle numérique MIKE 21 ont été obtenues auprès du Service hydrographique du Canada (SHC) ou de son fournisseur Nautical Data International (NDI) :

- Cartes marines nos 1316 et 1317 en format numérique (Autocad).
- Pour l'ensemble du port et les battures de Beauport, minutes hydrographiques no 3005094 datant de 1982.
- Pour l'estuaire de la Saint-Charles et le secteur Beauport :
 1. minutes no 3003712 (16 au 29 octobre 1971)
 2. minutes no 3005121 (1982)
 3. minutes no 3004341 (4 juillet 2005)
 4. minutes no 3004342 (30 juin 2005)
 5. minutes no 3004710 (15 juin 2006)

La figure 4 illustre la zone couverte par chacun des fichiers de minutes hydrographiques. Les profondeurs ont été exprimées par rapport au zéro des cartes à Québec et positionnées dans le système de coordonnées géographiques UTM (zone 19).

La figure 5 offre une vue tridimensionnelle de la bathymétrie de l'estuaire de la Saint-Charles et des abords de la pointe de Beauport.

Il est important de souligner qu'aux abords de la pointe de Beauport, les données bathymétriques utilisées (i.e. minutes hydrographiques de 1982) ne couvraient pratiquement pas les fonds situés au-dessus du niveau marégraphique +1,5 m. La morphologie de la pointe pour les niveaux bathymétriques dépassant cette cote a donc dû être schématisée. En phase ultérieure du projet, il est fortement recommandé de mieux documenter la topographie/bathymétrie de la zone littorale.

3.1.3 Scénarios modélisés

L'ensemble des simulations a été effectué pour un scénario de marée de vive-eau¹. Comme on le verra plus loin, les résultats obtenus n'ont pas nécessité la prise en compte d'autres conditions marégraphiques.

La marée modélisée correspondait aux conditions de vive-eau du 22 juin 1971, qui avaient été reproduites au modèle physique du port et avaient fait l'objet de relevés détaillés sur le terrain, en préparation de l'exploitation du modèle réduit. Avec un marnage de 5,2 m, cette marée n'est excédée qu'environ 5% du temps.

Il est à noter qu'indépendamment de la date de cet épisode de marée, les résultats fournis par le modèle numérique sont évidemment applicables à tout cycle de marée de vive-eau ayant une amplitude similaire.

3.1.4 Conditions aux limites

Les *conditions aux limites* d'un modèle hydraulique représentent les paramètres de niveau d'eau, de débit ou de vitesse d'écoulement 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.

La marée de vive-eau a été induite au modèle numérique en imposant les conditions aux limites suivantes :

¹ Voir le lexique à la fin du texte pour la définition des principaux termes techniques utilisés dans le présent rapport.

- débit à la limite amont;
- débit dans le bras nord de l'île d'Orléans;
- niveau d'eau dans le bras sud de l'île d'Orléans.

3.1.5 Paramètres de calcul

Les simulations hydrodynamiques ont été effectuées avec un pas de temps fixé à $\Delta t = 4$ s. Les simulations débutaient à 1 :00 le 22 juin 1971 et se terminaient 25,5 heures plus tard, le 23 juin 1971 à 2 :30. Le cycle de marée enregistré en nature entre 0 :00 et 13 :00 le 22 juin 1971 était en fait imposé deux fois, le premier cycle servant essentiellement à « réchauffer » le modèle numérique. Les résultats présentés proviennent du second cycle de marée, qui s'étend alors de 13 :00 le 22 juin à 2 :30 le 23 juin 1971.

Pour l'ensemble des simulations, la rugosité des fonds a été fixée à $n = 0,03$ et on a conservé les mêmes paramètres de viscosité turbulente que dans nos études précédentes, soit une valeur de $3 \text{ m}^2/\text{s}$ pour le maillage d'ensemble ($\Delta x = \Delta y = 63 \text{ m}$) et de $0,3 \text{ m}^2/\text{s}$ dans les maillages imbriqués.

3.2 Modélisation des vagues et des courants littoraux

Le régime des vents et des vagues applicable au site de la baie de Beauport avait déjà été établi par la professeur Yvon Ouellet, de l'Université Laval, dans le cadre de notre étude de 2006 [2]. Des ajustements ont été apportés à cette analyse, en vue notamment de prendre en compte l'ensemble des données disponibles à la station météo de la pointe de Beauport. Ces questions sont abordées dans le rapport de CIMA+ [1].

La transformation des vagues du large à l'approche du littoral sous l'effet de la réfraction et du déferlement a été simulée par le GCL à l'aide du module SW (Spectral Waves) de MIKE 21. Les contraintes de radiation des vagues fournies par ce modèle ont ensuite permis de simuler les courants induits par les vagues le long de la pointe de Beauport.

La figure 4 illustre l'étendue de la zone considérée pour cette modélisation. Il est à noter que le module SW de MIKE 21 utilise un maillage flexible aux volumes finis.

3.3 Validation du modèle numérique

Le modèle hydrodynamique du port de Québec exploité par le GCL a déjà fait l'objet d'une validation détaillée. Ces éléments ont déjà été présentés dans notre rapport de 2006 [2] et ne sont pas repris ici.

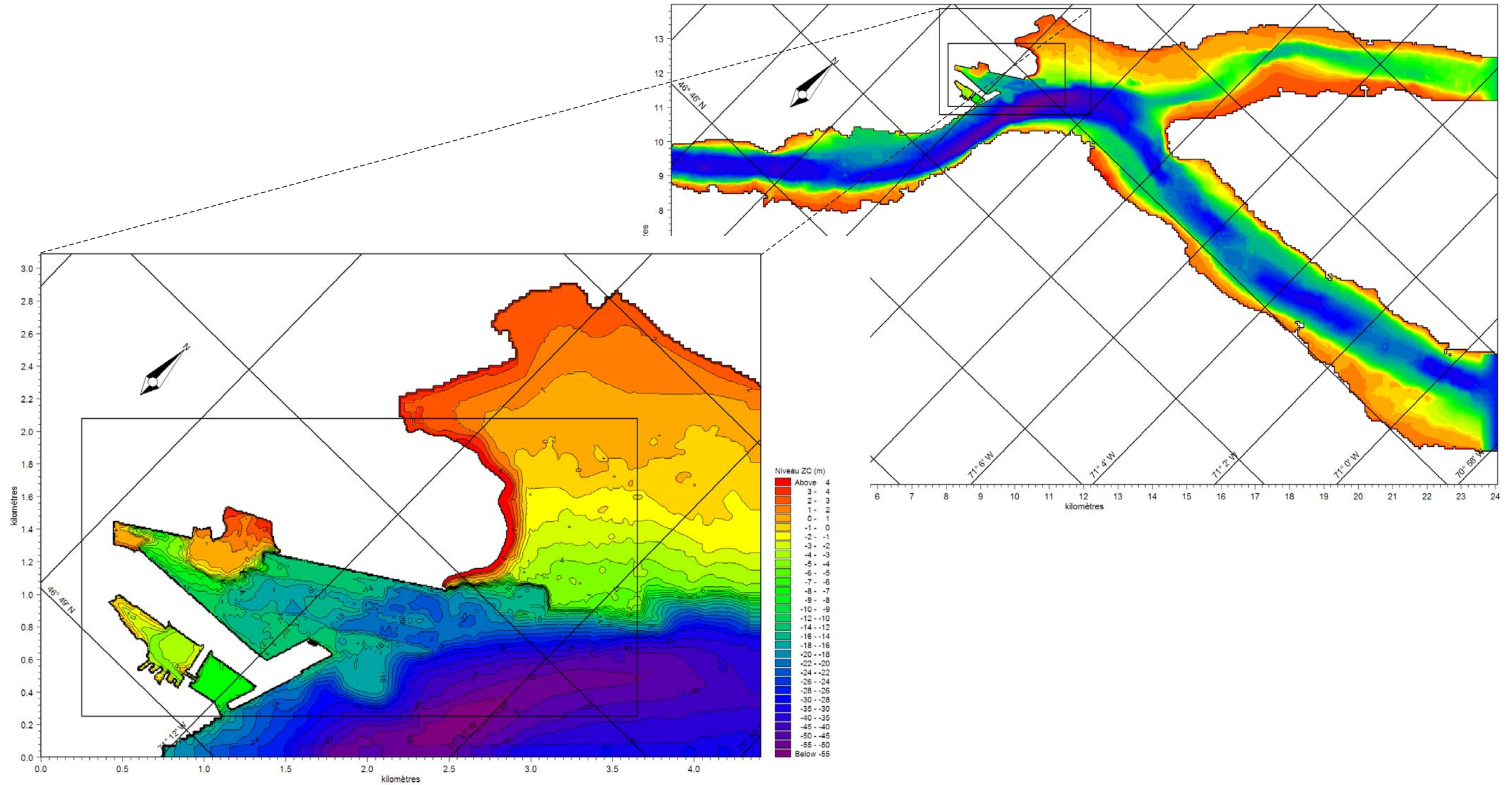
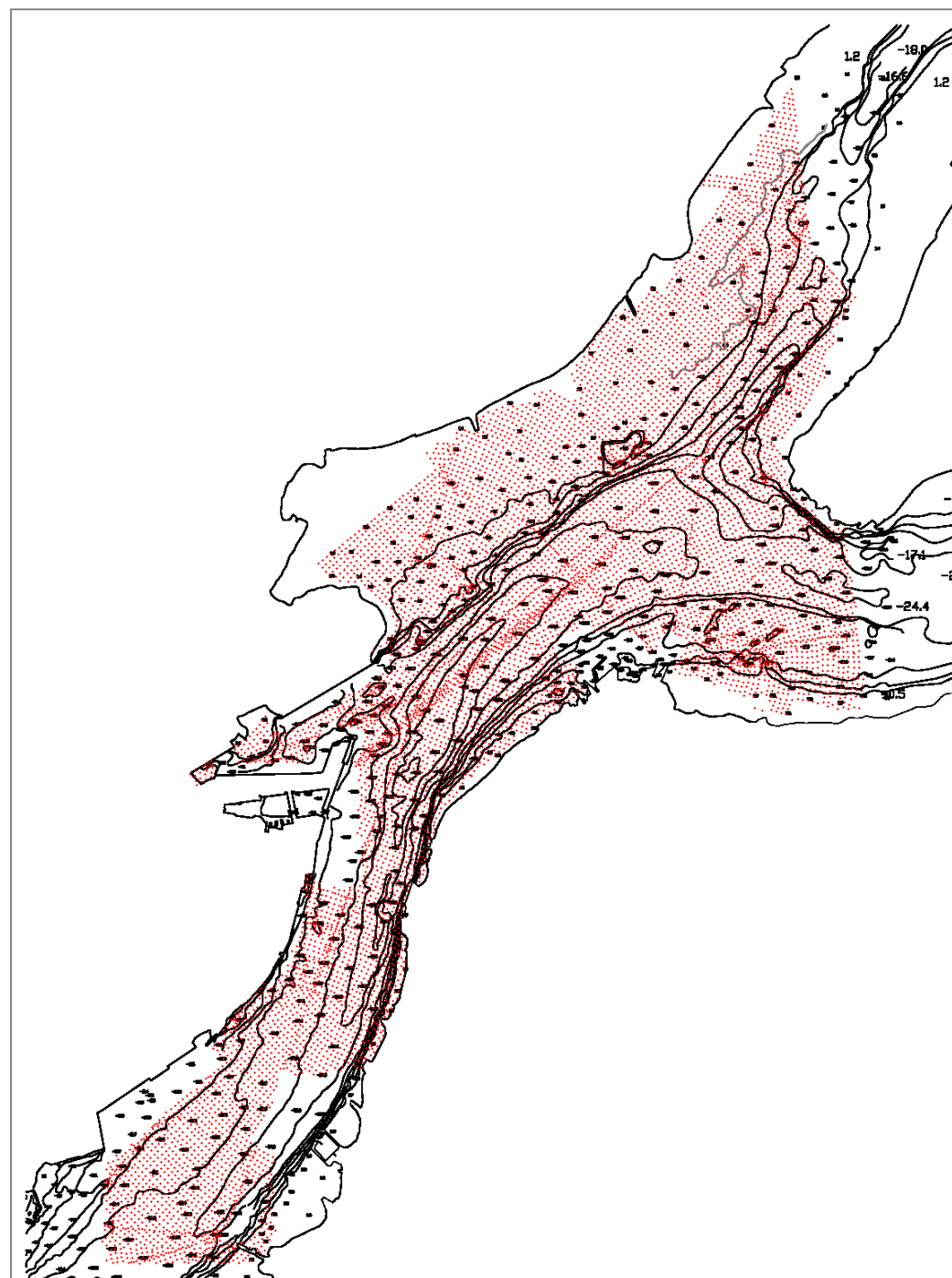
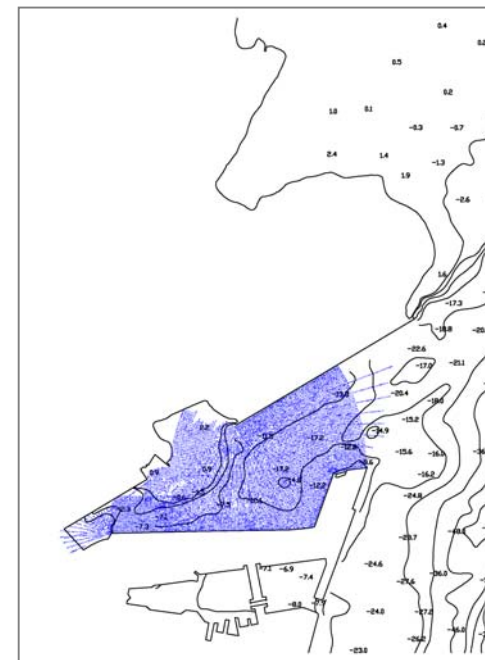


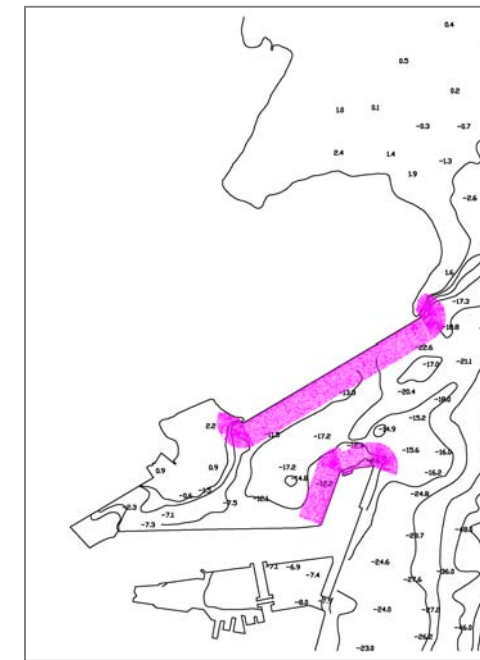
Figure 3 : Bathymétrie et limites du modèle hydrodynamique



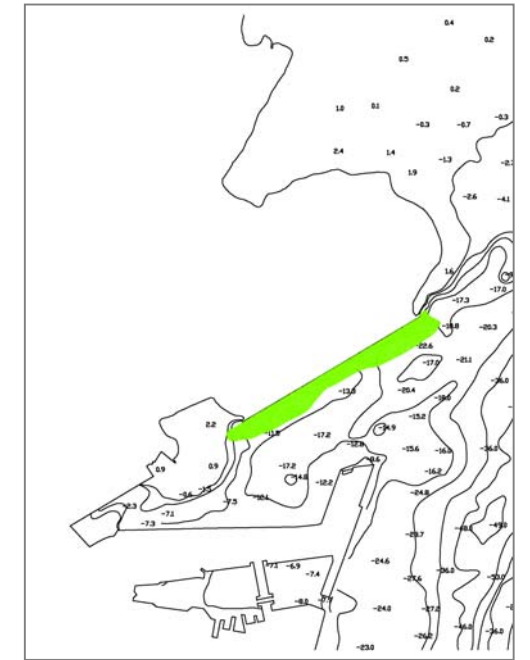
a) Relevé no 3005094 (1982)



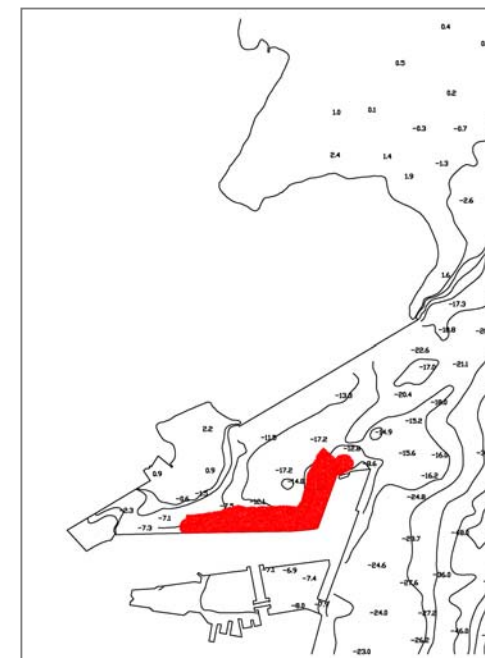
b) no 3003712 (1971)



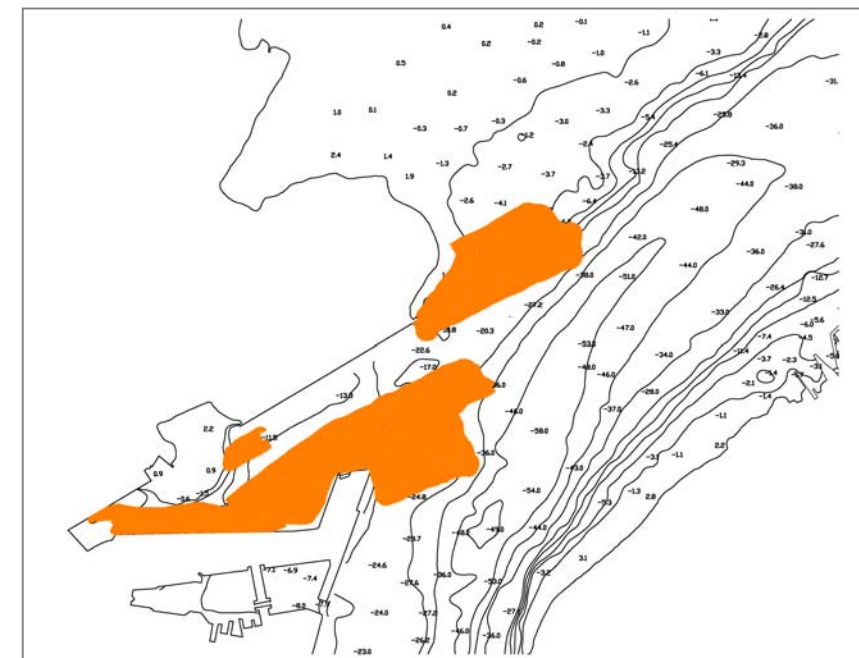
c) no 3005121 (1982)



d) no 3004341 (2005)



e) no 3004342 (2005)



f) no 3004710 (2006)

Figure 4 : Données bathymétriques – Minutes hydrographiques fournies par le SHC

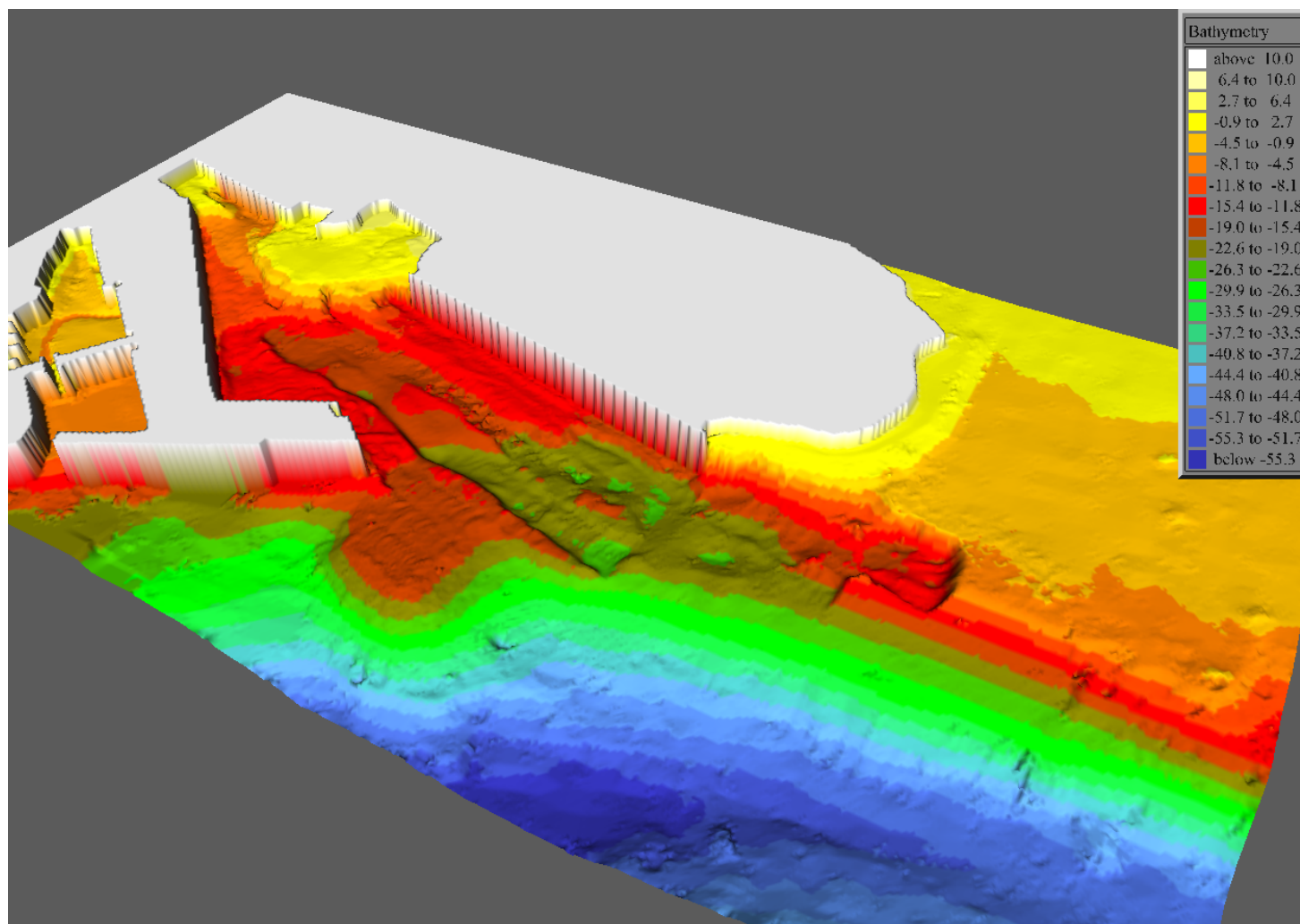


Figure 5 : Estuaire de la rivière Saint-Charles - Vue tridimensionnelle de la bathymétrie

4.0 QUAIS AVEC DUCS D'ALBE

4.1 Conditions hydrodynamiques

D'un point de vue hydraulique, la mise en place des ducs d'Albe peut a priori créer une légère entrave à l'écoulement de l'estuaire de la rivière Saint-Charles. L'impact réel de cet aménagement sur les conditions hydrodynamiques ne dépend pas uniquement des courants de marée mais doit également prendre en compte le débit de la rivière.

La figure 6 présente les hydrogrammes enregistrés sur la Saint-Charles (en amont de la rivière Lorette) de 1969 à 2001. La pointe de la crue de printemps atteint environ $35 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne et ne dépasse que rarement $70 \text{ m}^3/\text{s}$.

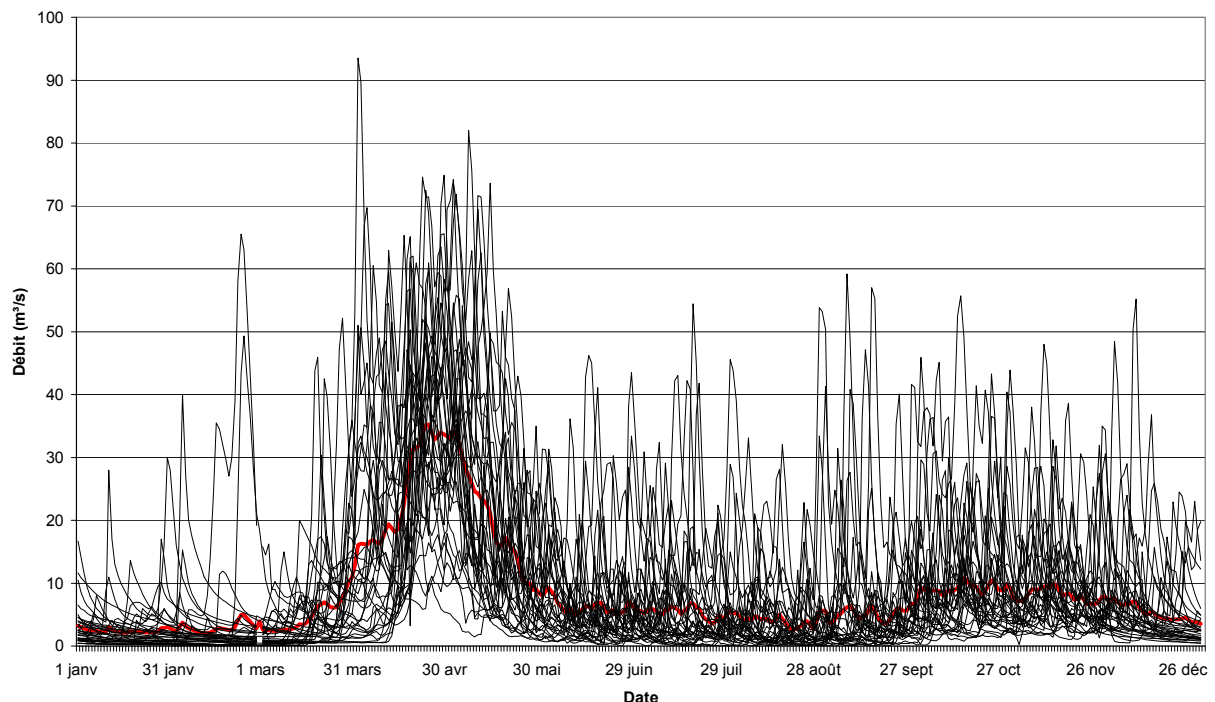


Figure 6 : Rivière Saint-Charles – Station 02PD010 – Hydrogrammes 1969-2001

La figure 7 illustre l'aménagement simulé au modèle numérique, qui correspond à l'option 2 proposée par CIMA+ [1], avec des structures en caisson¹.

¹ Cette variante a par la suite été abandonnée au profit d'une configuration avec pieux tubés qui, d'un point de vue hydraulique, réduit l'interaction hydrodynamique des structures avec les courants.

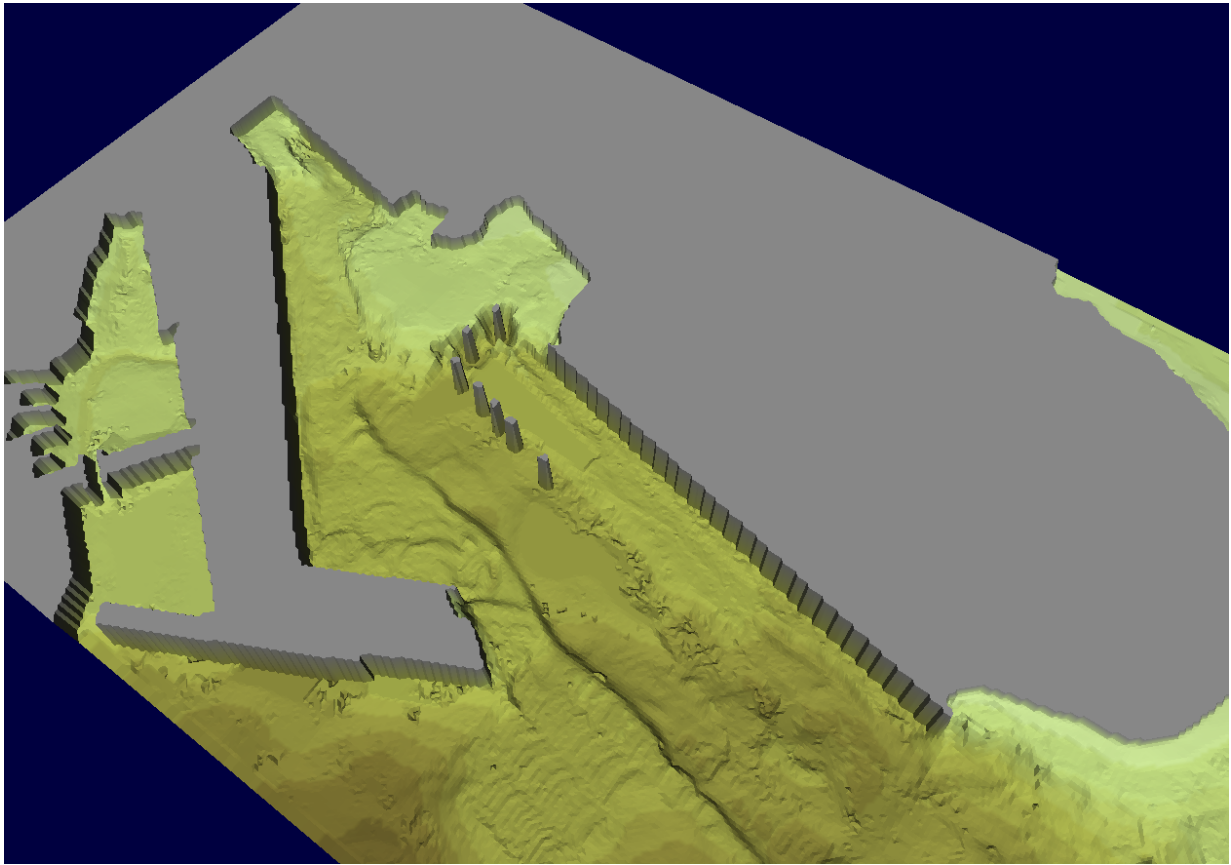


Figure 7 : Terminal pour liquides en vrac – Aménagement avec ducs d'Albe
(option 2 de CIMA+)

La figure 8b illustre les vitesses maximales obtenues dans l'estuaire de la rivière Saint-Charles en présence des ducs d'Albe, avec la marée de vive-eau du 22 juin 1971 combinée à un débit de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ dans la rivière Saint-Charles.

En comparant ces résultats avec ceux obtenus en conditions actuelles (figure 8a), on observe que le débit de la rivière entraîne uniquement une augmentation des vitesses aux abords immédiats du barrage, avec des courants maximums de 0,3 à 0,4 m/s, obtenus à marée basse.

Plus à l'aval, l'importance du débit fluvial tend plutôt à réduire l'intensité des courants maximums obtenus entre le barrage et le quai 50. En effet, les vitesses maximales dans cette zone ne dépassent pas 0,05-0,10 m/s en présence du débit de crue, alors que des courants maximums d'environ 0,15 m/s sont observés avec les courants de marée sans le débit fluvial.

Ces résultats indiquent simplement que les courants de marée sont plus importants au flot qu'au jusant et que le débit fluvial conduit à un (très) léger ralentissement des courants de flot dans l'estuaire.

La figure 8b, de même que l'animation des champs des courants annexée au présent rapport, montrent que les ducs d'Albe se trouveront dans la zone d'influence du courant de retour déjà observé dans la portion amont de l'embouchure. Les vitesses maximales obtenues aux abords des pieux seront de l'ordre de 0,15 à 0,25 m/s. Ces valeurs relativement faibles ne posent pas de problèmes relatifs à la navigation ou aux conditions d'accostage, mais comme on l'a mentionné précédemment, elles devront être prises en compte dans l'évaluation des risques de dispersion des matériaux remis en suspension lors des travaux de dragage requis pour les nouveaux aménagements.

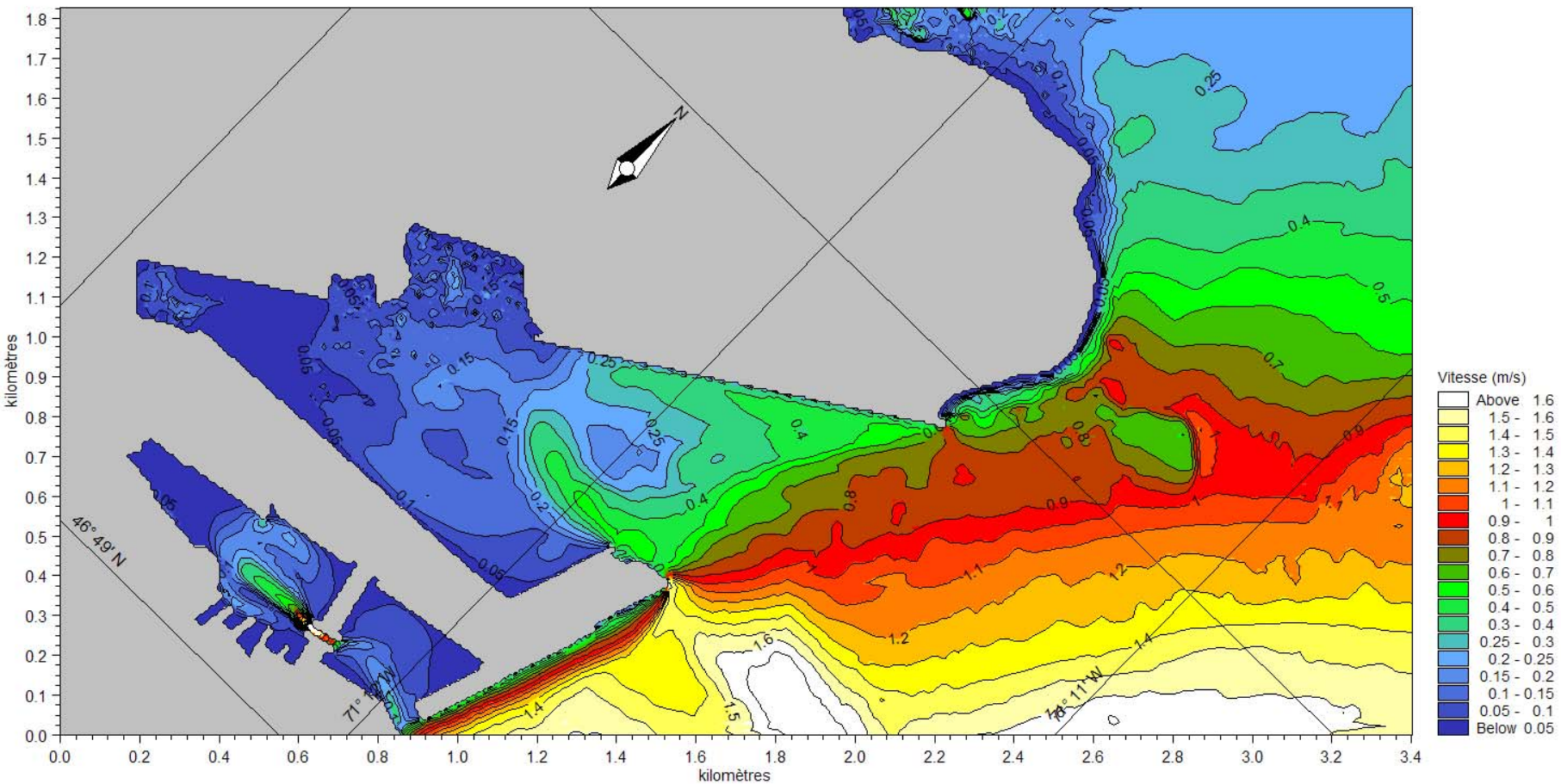
Mentionnons également que la présence du barrage intercepte une portion importante des apports sédimentaires de la rivière Saint-Charles. La présence des ducs d'Albe ne modifiera pas la dynamique sédimentaire actuelle de l'estuaire.

4.2 Conditions de navigation

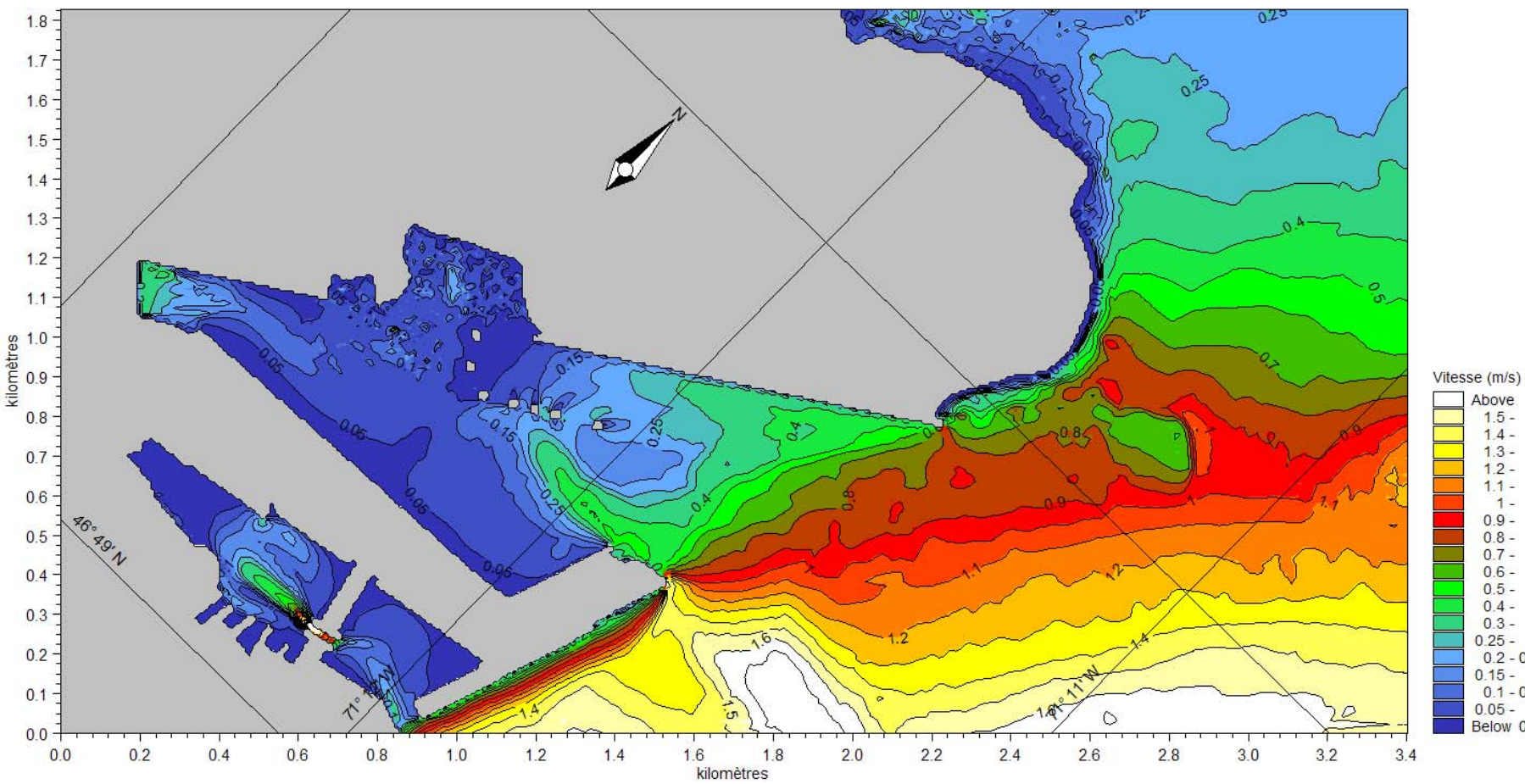
Lors de la rencontre du 4 avril 2007 organisée par l'APQ en présence de représentants des pilotes du Saint-Laurent, ces derniers ont souligné que les conditions de navigation à l'intérieur de l'estuaire de la Saint-Charles ne posaient pas de problèmes particuliers. Les courants en eau libre y sont très faibles et la présence de glace thermique limite les risques associés aux glaces à la dérive (« chariot » de glace).

Les précautions prises lors de l'accès aux quais de l'estuaire concernent plutôt les conditions d'écoulement prévalant dans le chenal principal du fleuve, au moment d'entrer dans l'estuaire, que les conditions dans l'estuaire proprement dit.

À la lumière de ces observations, les seules questions soulevées par les nouveaux postes vis-à-vis des conditions de navigation touchent la proximité des nouveaux aménagements avec les quais existants des deux rives de l'estuaire. Cette question est abordée dans le rapport de CIMA+ [1].



a) Conditions actuelles



b) En présence des ducs d'Albe

Figure 8 : Terminal pour liquides en vrac avec ducs d'Albe – Vitesses maximales des courants

5.0 APPROFONDISSEMENT DES QUAIS 51, 52 ET 53

5.1 Modification de la bathymétrie

Le relevé bathymétrique du 4 juillet 2005 (fichier no 3004341 du SHC) indique que la profondeur minimale devant les quais 51 et 53 est de $-12,5$ m, près de l'extrémité amont du quai 51. En se déplaçant vers l'aval, une profondeur de -15 m est atteinte à partir du centre du quai 52 et les profondeurs maximales sont d'environ -16 m le long du quai 53.

La figure 9 offre une vue tridimensionnelle de la bathymétrie actuelle, puis d'une bathymétrie modifiée, avec dragage au niveau $-15,5$ m devant les quais nos 51 à 53. L'écart entre les deux bathymétries correspond à un volume relativement important de $130\,000\text{ m}^3$. Il importe toutefois de souligner que l'approfondissement du front des quais ne crée pas une fosse par rapport aux fonds environnants. A priori, il est raisonnable de supposer que les conditions de sédimentation obtenues en conditions futures ne seront pas sensiblement modifiées par le nouvel aménagement.

5.2 Conditions hydrodynamiques

La figure 10 compare les vitesses maximales des courants obtenues au cours d'un cycle de marée de vive-eau avant et après le dragage devant les quais 51 à 53. Le cédérom annexé au présent rapport contient des animations des champs des courants (vitesses et direction) correspondants à ces deux conditions. Toutes les simulations ont été réalisées avec un débit nul dans la rivière Saint-Charles. Comme on l'a constaté à la section 4.1, le débit de la rivière n'exerce pratiquement pas d'impact sur le régime des courants de l'estuaire, qui est dominé par la marée.

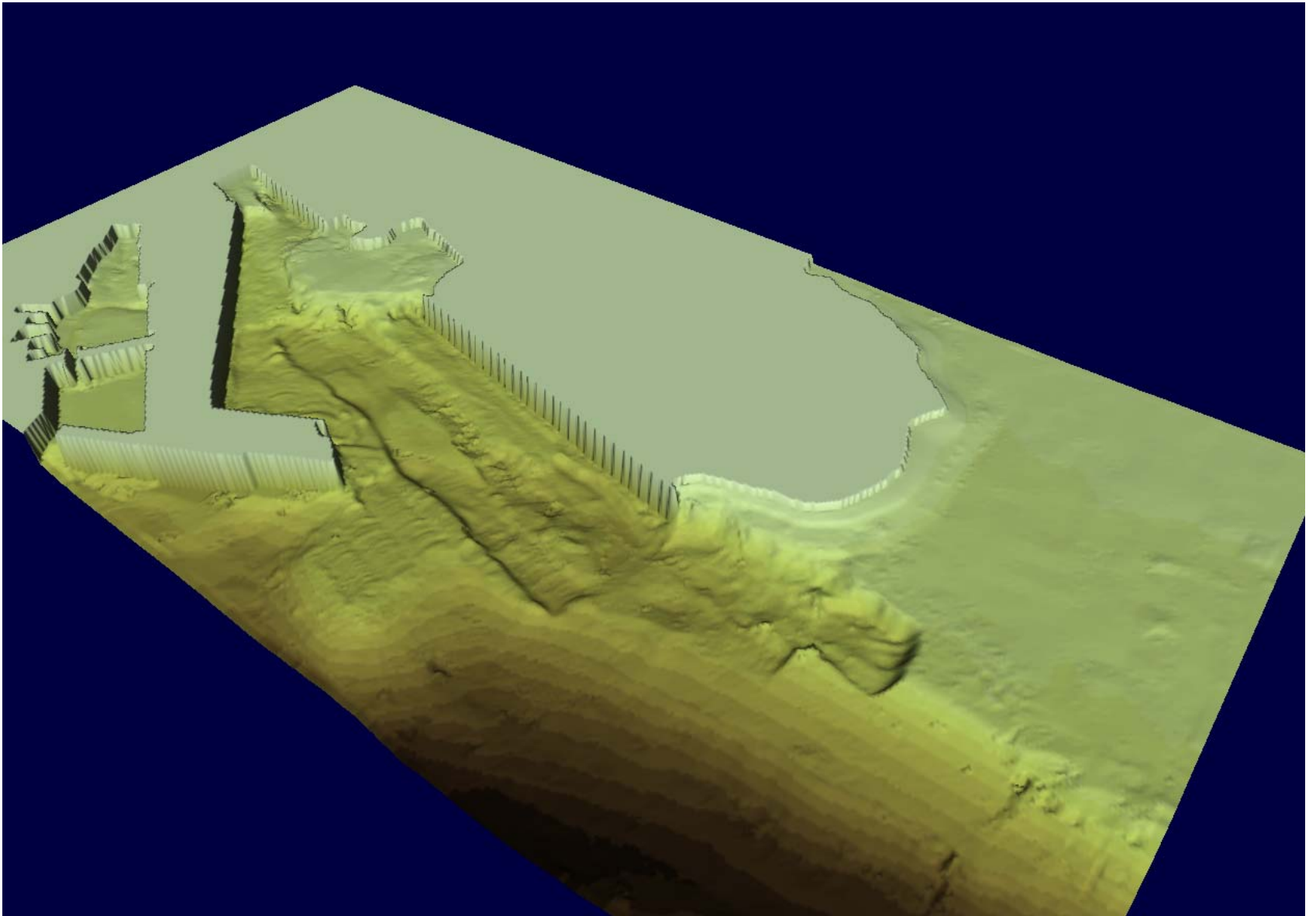
La figure 10 indique d'abord que le dragage n'exerce aucune incidence tangible sur les courants de marée maximums obtenus dans l'estuaire de la rivière Saint-Charles. Tant en conditions actuelles que futures, les courants maximums de vive-eau obtenus en amont de l'extrémité du quai no 50 ne dépassent pas $0,2\text{ m/s}$.

La portion aval de l'estuaire montre des concentrations de vitesses le long des quais 24 et 52-53, avec une zone centrale de faibles vitesses. Ces conditions découlent de la formation d'un courant de retour à l'entrée de l'estuaire (voir animations ci-jointes). Ce courant, qui est induit par la veine

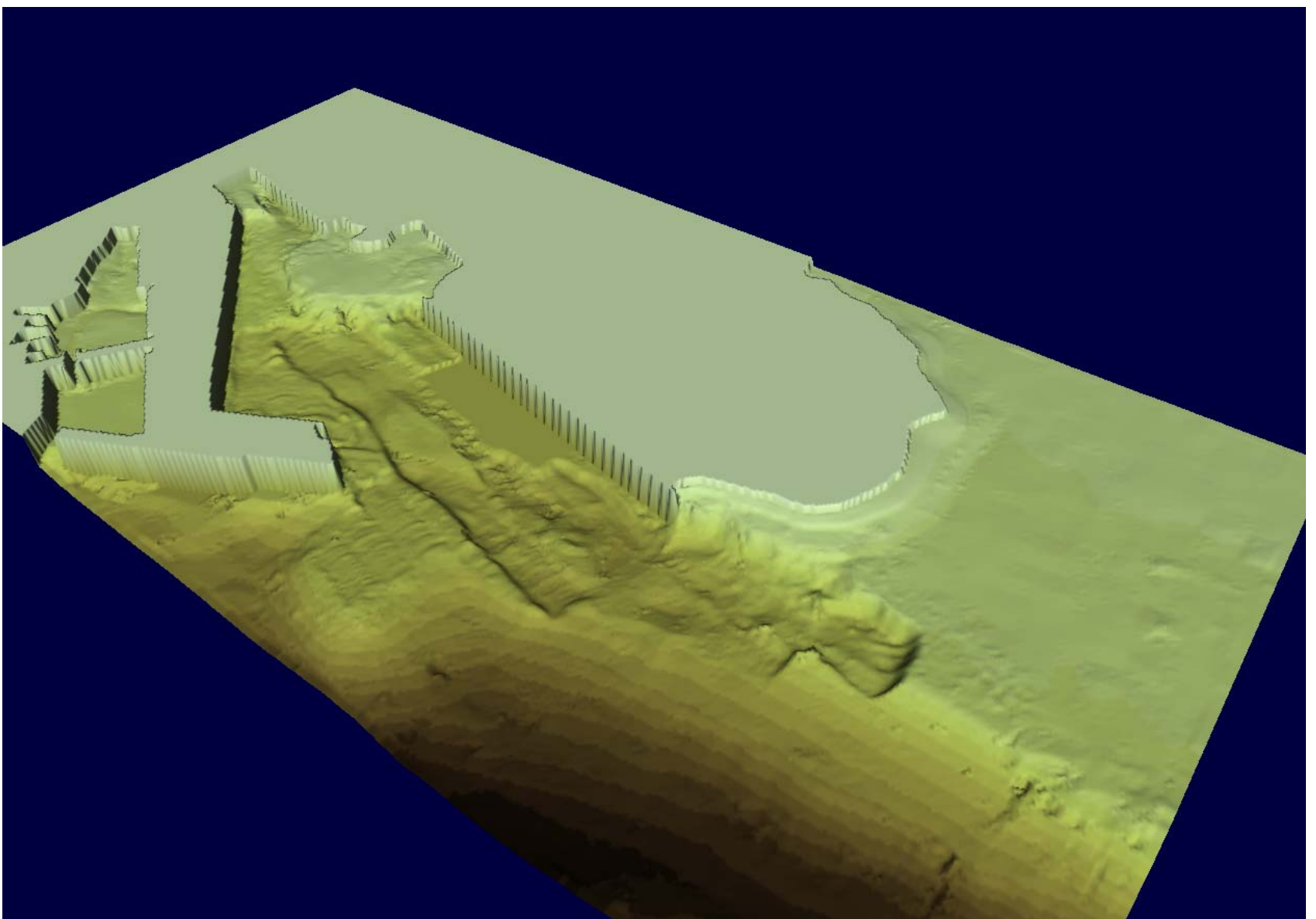
d'écoulement principal du fleuve, crée une circulation dans le sens horaire au flot et anti-horaire au jusant. Ce phénomène est bien documenté par les relevés de courantométrie effectués par Procéan en 1994 [3].

Les vitesses maximales de ce courant de retour atteignent 0,5 à 0,6 m/s. De telles conditions devront être prises en compte lors des éventuels travaux de dragage, en vue de bien contrôler et limiter la dispersion des matériaux remis en suspension au site du dragage.

Mentionnons finalement que l'approfondissement des quais 51, 52 et 53 n'introduira aucune modification tangible aux régimes actuels des glaces et des sédiments dans l'estuaire de la Saint-Charles.

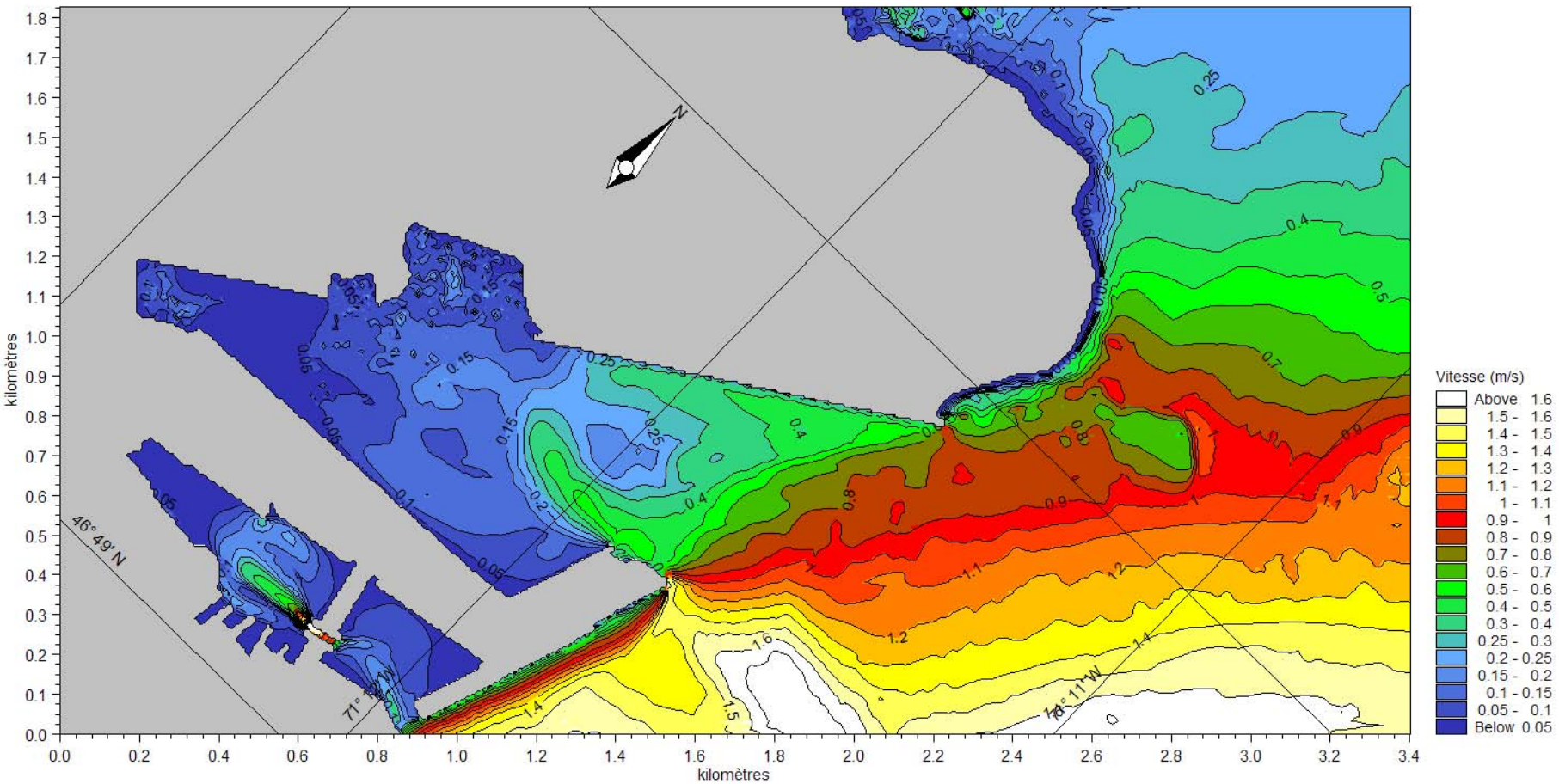


a) Conditions actuelles

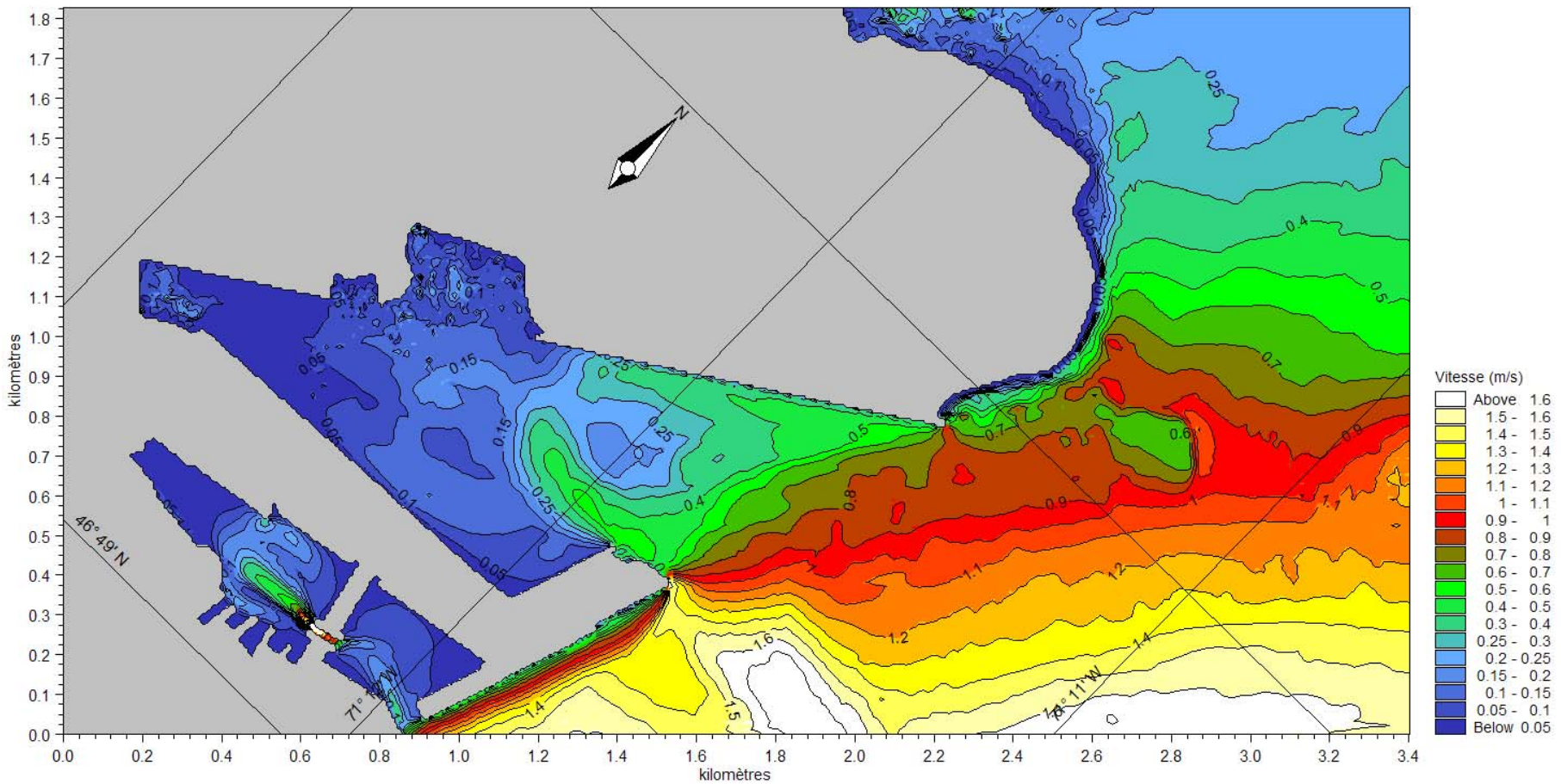


b) Après dragage à -15,5 m devant les quais 51 à 53

Figure 9 : Approfondissement des quais 51 à 53 – Bathymétrie avant et après dragage



a) Conditions actuelles



b) Après dragage à -15,5 m devant les quais 51 à 53

Figure 10 : Approfondissement des quais 51 à 53 – Vitesses maximales des courants

6.0 EXTENSION DU SECTEUR PORTUAIRE BEAUPORT

6.1 Problématiques

La présente étude s'est penchée sur deux problématiques de nature hydraulique soulevées par l'extension portuaire du secteur Beauport :

- On doit d'une part préciser l'angle formé par la nouvelle ligne des quais 54 et 55 par rapport à l'axe existant des quais 50 à 53. Cet angle était maintenu à 17° dans les dernières études effectuées par l'APQ et le GCL.
- La forme en plan de l'extension portuaire doit évidemment répondre aux besoins fonctionnels du port, mais elle doit aussi offrir une transition adéquate avec la zone récréative adjacente, de manière à procurer un site satisfaisant pour les divers usagers et d'assurer la pérennité des berges.

Notre étude de 2006 [2] soulevait des questions relatives à la dynamique sédimentaire de la configuration actuelle de la pointe de Beauport. Certaines données disponibles, de même que les résultats de la modélisation numérique, montraient un potentiel significatif d'érosion lié au transport littoral lors de tempêtes des secteurs ENE et E.

Par contre, l'APQ ne faisait état d'aucun travail majeur de protection des berges (sauf aux abords immédiats du quai no 53) dans les 36 ans d'existence de la péninsule et il était ainsi difficile de conclure à une instabilité généralisée des berges.

Les photos du site obtenues dans le cadre du présent projet par l'entremise de M. Yann Ropars semblent toutefois confirmer la tendance à l'érosion. Ces photos, prises en 2003 alors que M. Ropars était à l'emploi de Travaux publics Canada, montrent en effet des talus en recul et la présence d'éléments plus grossiers le long de la portion centrale de la pointe. Suite à l'érosion des sédiments les plus fins, ces matériaux plus grossiers (graviers, cailloux), qui étaient également présents dans le remblai initial de l'aire portuaire, ont créé un pavage offrant une certaine protection aux berges. Ces observations sont présentées par M. Ropars dans le rapport de CIMA+ [1].

Sur la base des données actuellement disponibles, il semble toutefois clair que les berges sableuses de la pointe subissent une érosion et un transport littoral notables lors d'épisodes venteux des secteurs ENE ou E. Ce transport littoral conduit à la formation de la flèche sableuse qui progresse vers le rentrant sud-ouest (photo 1).

Dans ce contexte, l'extension du secteur portuaire projeté par l'APQ devrait viser l'aménagement d'une nouvelle plage offrant des conditions de stabilité accrues par rapport à l'état actuel.



Photo 1 : Pointe de Beauport vue depuis l'est – Été 2005
(source : APQ)

6.2 Variantes de base

Les variantes initialement étudiées dans le cadre de la présente étude s'inspiraient directement de l'extension prise en compte à ce jour dans les projets de l'APQ, soit une nouvelle ligne de quais de 610 m de longueur, formant un angle de 17° avec les quais 50 à 53, avec un secteur portuaire s'étendant sur 375 m derrière la ligne de façade des nouveaux quais.

La variante A, illustrée à la figure 11a, correspond à cette configuration, mais comporte également la mise en place d'une jetée à la limite nord de la pointe. Cette jetée agit comme un épi vis-à-vis du transit littoral et vise ainsi à stopper le transit littoral et le recul de la plage qui en résulte dans les conditions actuelles. L'ouvrage proposé permet également de mieux protéger le rentrant sud-ouest de l'agitation des vagues, favorisant ainsi un meilleur épanouissement de cette zone de marais. Les fonds sont dragués à -16 m devant les nouveaux quais, conformément au schéma discuté lors de la réunion avec les pilotes (prolongement de 150 m dans l'axe des quais, suivi d'un axe à 45° pour rejoindre la bathymétrie naturelle) et aux précisions géométriques fournies ultérieurement par CIMA+ (talus d'excavation de 1V :5H, berme de 18 m dans l'axe des caissons, etc.)

Comme on l'avait souligné lors de notre étude de 2006 [2], l'absence d'une forme mieux profilée entre l'extension portuaire et la plage actuelle conduit à une nette diminution des vagues agissant contre cette plage par vents des secteurs ENE et E.

La figure 12 (cartes (a) et (b)) permet de comparer les vagues obtenues le long de la plage, avant et après la mise en place de la variante A de l'extension. Les simulations effectuées avec MIKE 21 SW supposaient une vague de direction $75,75^\circ$ (direction intermédiaire entre les directions ENE et E) ayant une hauteur significative de 0,8 m et une période de pointe de 4 secondes. Comme on l'avait souligné lors de notre étude antérieure [2], ces conditions s'apparentent aux vagues maximales régissant la dynamique sédimentaire de la pointe de Beauport. Le niveau d'eau était fixé à +5,0 m, soit une valeur légèrement inférieure aux niveaux maximums de pleine mer des grandes marées.

Les cartes couleurs donnant la hauteur significative et la direction locales des vagues indiquent clairement la décroissance des vagues agissant sur la plage suite à l'aménagement de l'extension portuaire. En effet, la vague au large de 0,8 m conduit à une hauteur correspondante de 0,55 à 0,60 m aux abords immédiats de la plage actuelle. En présence de la variante A, plus

de la moitié de la plage est soumise à des vagues inférieures à 0,40 m, avec des valeurs devenant de moins en moins élevées à l'approche de l'extension portuaire.

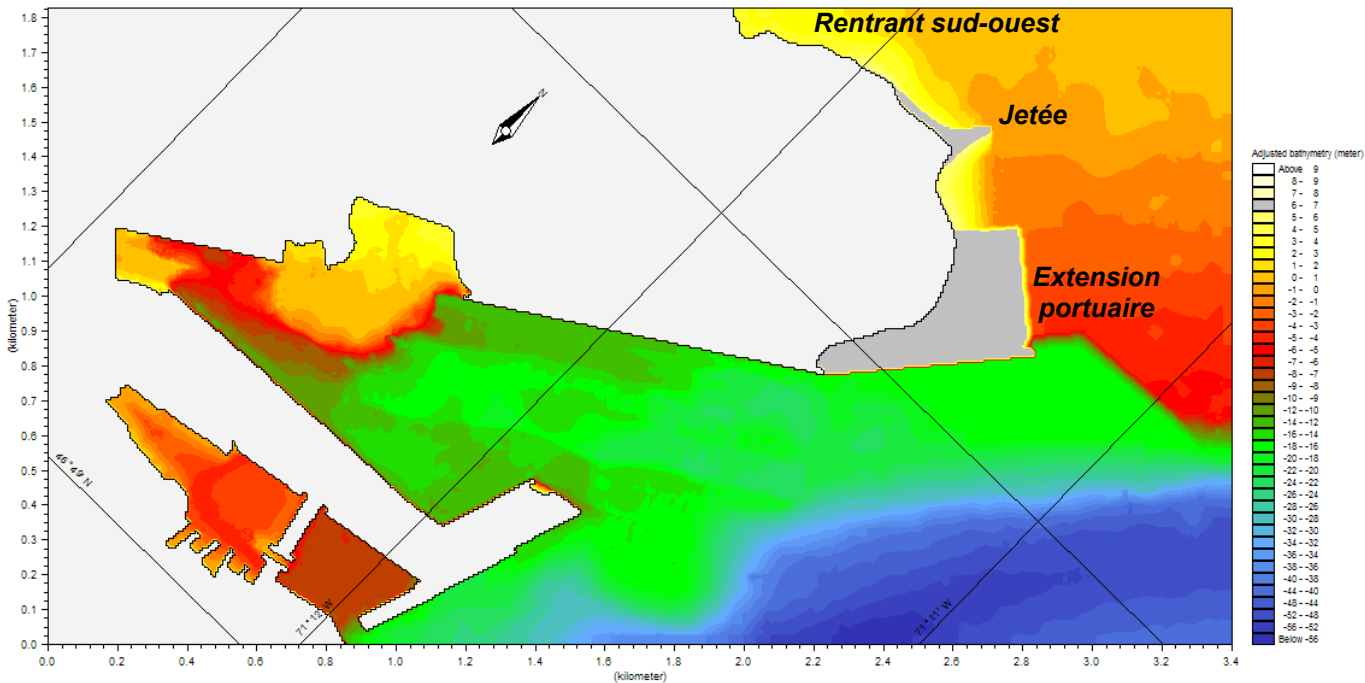
Ces conditions sont d'une part problématiques d'un point de vue sédimentaire, puisque la portion adossée à l'aire portuaire risque de subir de la sédimentation fine incompatible avec un environnement de plage. D'autre part, cet enclavement de la plage risque de compliquer les conditions de navigation des plaisanciers (dériveurs et planches à voile), qui devront contourner le coin de l'extension portuaire pour aller vers le large ou revenir à la plage.

Les variantes B et C de l'extension portuaire sont illustrées aux figures 11b et 11c respectivement. Ces schémas d'aménagement visent essentiellement à mieux profiler la transition entre l'aire portuaire et la plage, de manière à maintenir le long de cette dernière un niveau d'agitation compatible avec une plage sableuse. Les deux variantes remplacent le coin nord de l'aire portuaire par un arrondi qui empiète dans la zone portuaire et réduit ainsi sa superficie.

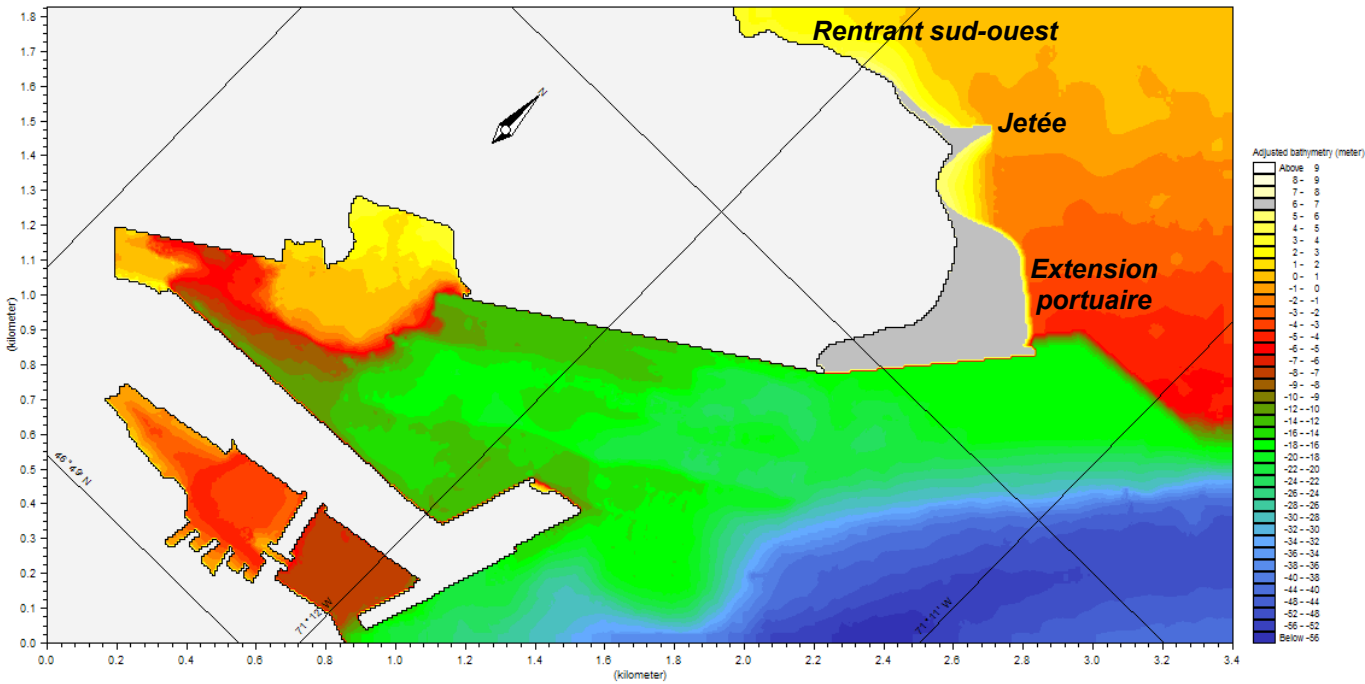
Comme l'indique la figure 12, l'influence de ce profilage est déjà visible avec la variante B, qui conduit au droit de la plage à une augmentation des vagues déjà observées avec la variante A. La portion sud de la plage demeure toutefois soumise à des vagues nettement inférieures à celles obtenues en conditions actuelles.

Des résultats plus satisfaisants sont cependant obtenus en arrondissant davantage la transition entre l'aire portuaire et la plage. L'option d'aménagement C conduit le long de la plage à des vagues de 50 à 60 cm de hauteur (figure 12d), pratiquement équivalentes à celles observées en conditions actuelles (figure 12a).

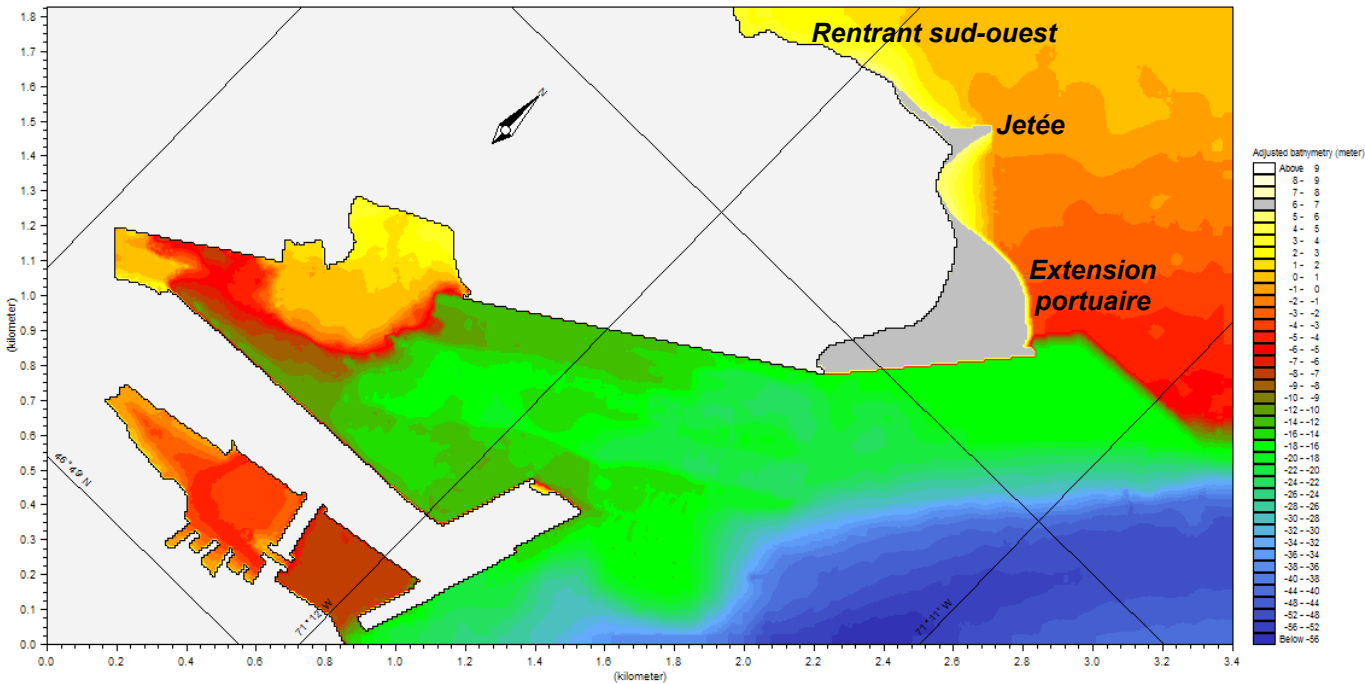
D'un point de vue strictement hydraulique, la variante C permettait donc une amélioration notable des conditions obtenues au droit de la plage. Toutefois, les calculs de volumes de déblai/remblai effectués par CIMA+ [1] ont indiqué que cet aménagement était inacceptable puisqu'il comportait un excédent des volumes de dragage de l'ordre de 400 000 m³. La disposition d'un tel volume en eau libre ne pouvant être considérée d'un point de vue environnemental, la superficie totale de l'extension devait ainsi être considérablement augmentée pour favoriser un équilibre des volumes de déblai/remblai.



a) Variante A

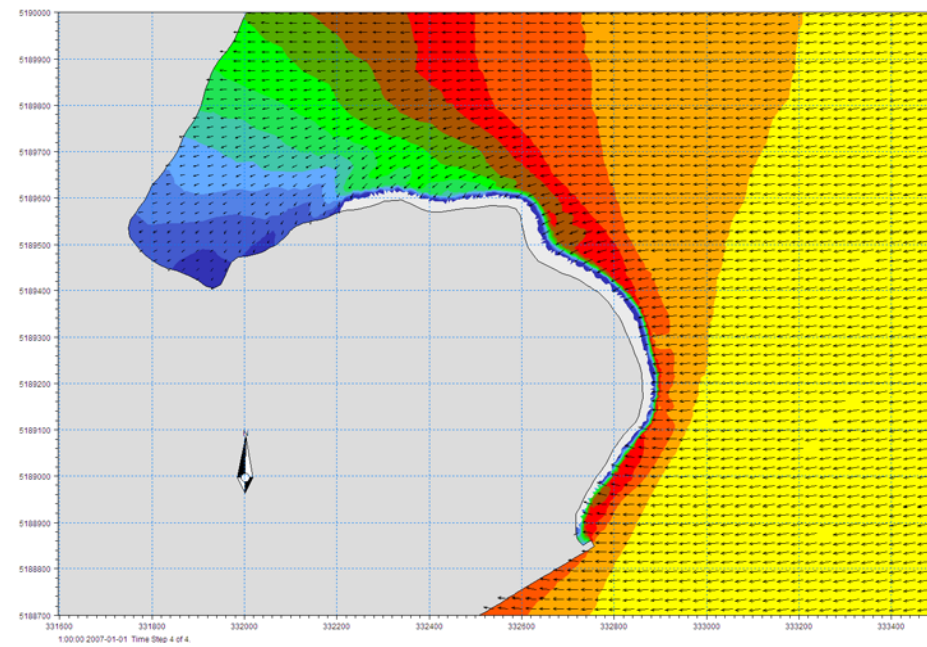


b) Variante B

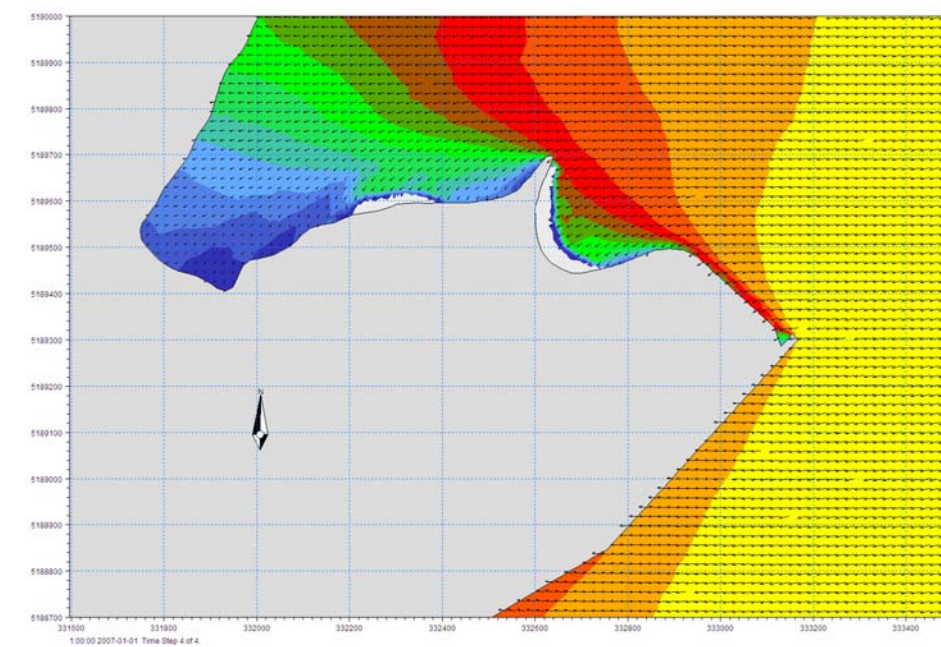


c) Variante C

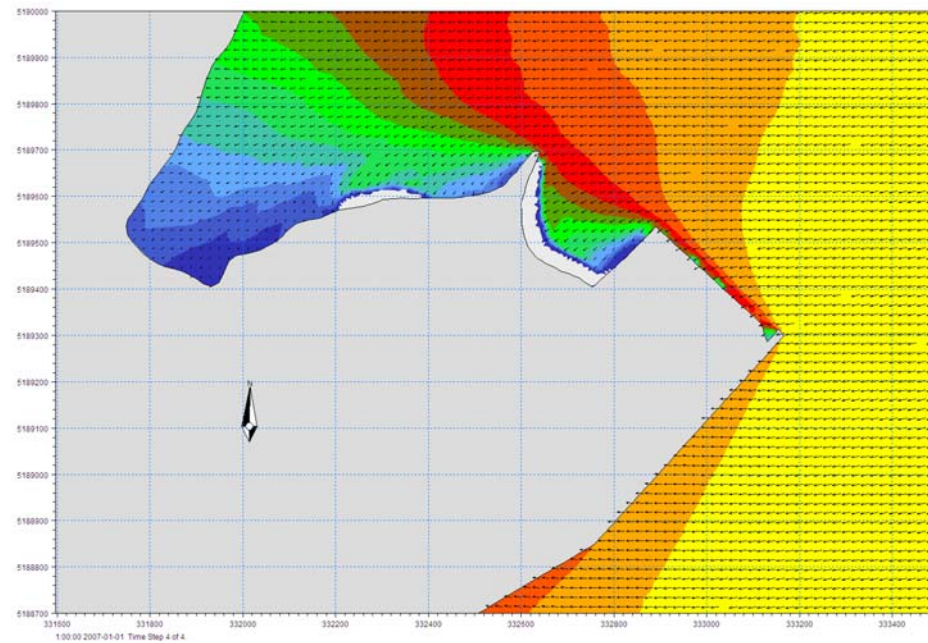
Figure 11 : Extension du secteur portuaire Beauport – Variantes de base



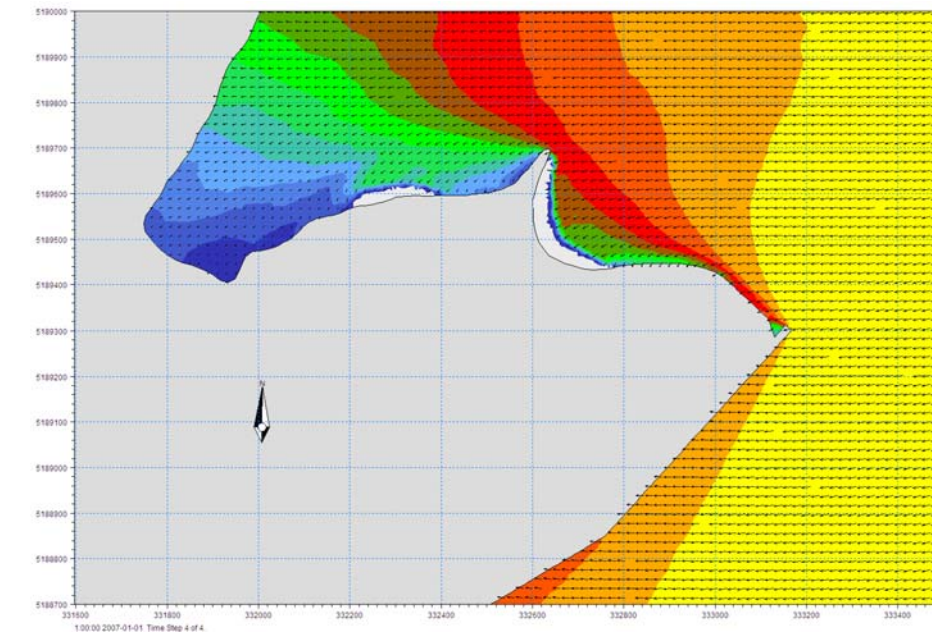
a) Conditions actuelles



c) Variante B



b) Variante A



d) Variante C

Figure 12 : Variantes de base – Régime local des vagues
Vagues du large $H_s = 0,8$ m – $T_p = 4$ s – Direction = 78,75 degrés

6.3 Variantes optimisées

6.3.1 Définition des variantes

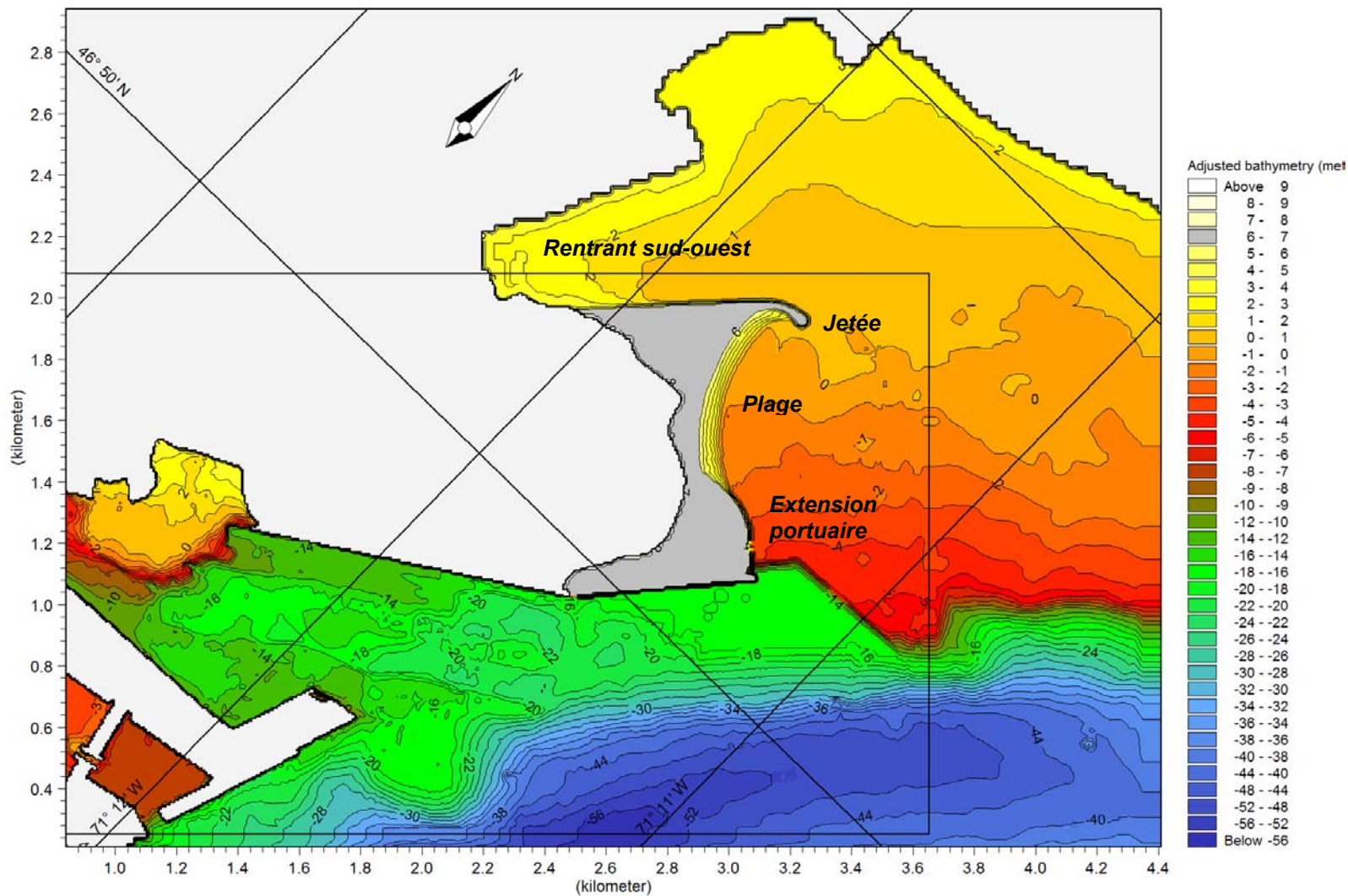
Comme on vient de le mentionner, les variantes initiales de l'extension portuaire étudiées au modèle numérique n'offraient pas une superficie suffisante pour disposer de l'ensemble des matériaux dragués sous forme de remblai.

Pour éviter l'enclavement de la plage, il était évident a priori que l'augmentation de la superficie des remblais devait surtout être appliquée à l'arrière de l'aire portuaire, dans la zone récréative (plage et jetée). D'un point de vue hydrosédimentologique, il devenait également intéressant de chercher à orienter la nouvelle plage plus perpendiculairement aux vagues de l'ENE et de l'E, dans le but de minimiser le transport littoral et les risques de remaniement de la plage.

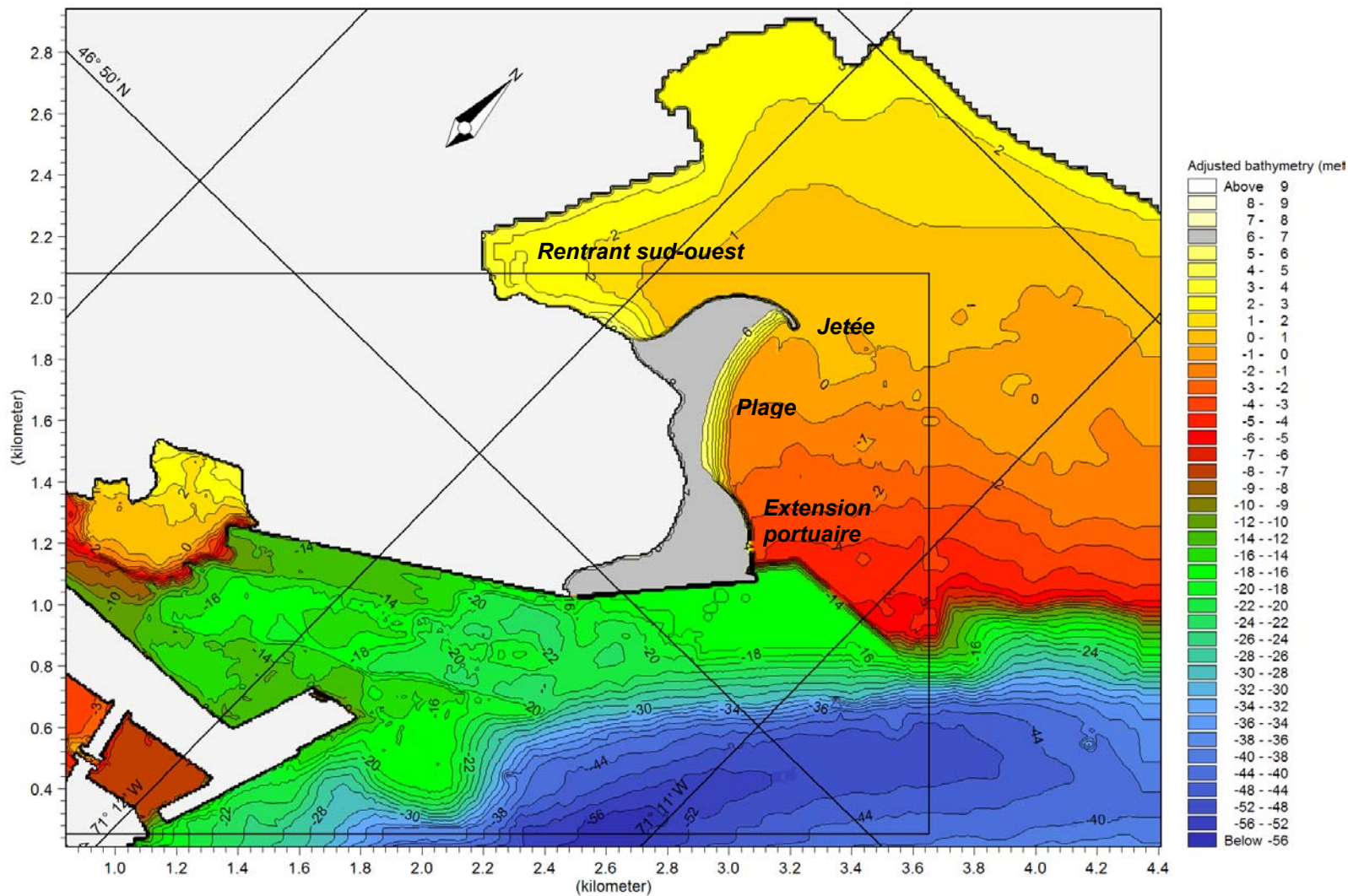
Les représentants du GCL et de CIMA+ ont donc travaillé en collaboration en vue de définir une variante d'aménagement optimale du point de vue de l'hydraulique, des volumes de déblai/remblai et des aspects environnementaux. La figure 13 illustre les deux principales variantes étudiées au modèle numérique.

Les deux configurations reprennent l'aire portuaire de la variante C, mais avec une augmentation notable de la longueur de la plage et de la jetée. La nouvelle plage, qui fait plus de 600 m de long, est environ trois fois plus longue que celle qui est actuellement utilisée par les plaisanciers. Elle permet également d'augmenter la superficie de la zone de marais du rentrant sud-ouest.

Les deux nouvelles variantes, appelées D1 et D2, ne diffèrent que par l'orientation de la ligne de plage et par la forme offerte à la portion protégée du rentrant sud-ouest. La variante D1 est conforme aux plans de CIMA+ présentés à l'APQ lors de la réunion du 19 avril 2007. La variante D2 est basée sur les échanges subséquents ayant eu lieu entre le GCL et CIMA+.



a) Variante D1



b) Variante D2

Figure 13 : Optimisation de l'extension portuaire

6.3.2 Vagues et courants littoraux

Suite au raffinement de l'analyse du régime des vagues du large effectuée par MM. Yvon Ouellet et Yann Ropars (experts en génie côtier) pour le compte de CIMA+, les variantes D-1 et D-2 ont été étudiées pour deux cas de vagues du large :

- Vagues de l'ENE avec $H_s = 0,76$ m et $T_p = 3,9$ s
- Vagues de l'EST avec $H_s = 0,71$ m et $T_p = 3,9$ s

Il est à noter que ces conditions de vagues sont très similaires à celles qui avaient été utilisées en première analyse pour les variantes A, B et C. En vue de maximiser les courants littoraux, les nouvelles simulations ont toutefois été effectuées en abaissant le niveau d'eau moyen de +5,0 à +3,5 m. En effet, pour une hauteur et une période de vague données, un niveau d'eau moyen trop élevé peut atténuer le déferlement des vagues et le transport littoral qui en résulte.

Les figures 14 et 15 présentent respectivement les vagues et courants littoraux prédits dans ces conditions par le modèle MIKE 21 pour les variantes D1 et D2. À des fins de comparaison, les figures illustrent également les résultats correspondant aux conditions d'aménagement actuelles.

La figure 14 montre que les vagues obtenues le long de la nouvelle plage des variantes D1 et D2 conservent des hauteurs significatives similaires à celles obtenues en conditions actuelles le long de la pointe de Beauport. Toutefois, la nouvelle plage offre un alignement plus perpendiculaire par rapport aux vagues induites par les vents dominants de l'ENE et de l'E.

Ce réalignement se traduit, à la figure 15, par une réduction tangible de l'intensité et, surtout, de l'emprise des courants littoraux simulés avec les variantes D1 que D2 par rapport à ceux obtenus en conditions initiales. L'alignement et la forme en croissant de la plage proposée par les deux variantes conduisent à une portion de berge où le courant littoral est pratiquement nul, à cause de la rencontre des courants opposés provenant des deux extrémités de la plage. Cette atténuation des courants littoraux est évidemment favorable pour la stabilité de la plage.

Pour les vagues de l'ENE, la variante D2 déplace cette zone de faibles vitesses vers le sud de la plage et les courants maximums observés de part et d'autre sont sensiblement réduits par rapport à ceux prédits avec la variante D1. Pour les vagues de l'Est, la plage n'est plus longée par des courants orientés vers le sud et les 150 derniers mètres de la portion nord de la plage se situent dans une zone de faibles courants littoraux.

L'alignement de la plage proposé par la variante D2 apparaît à cet égard légèrement préférable à celui de la variante D1, mais les écarts observés ne sont pas considérables et il est difficile de départager ces deux options du strict point de vue de l'hydraulique.

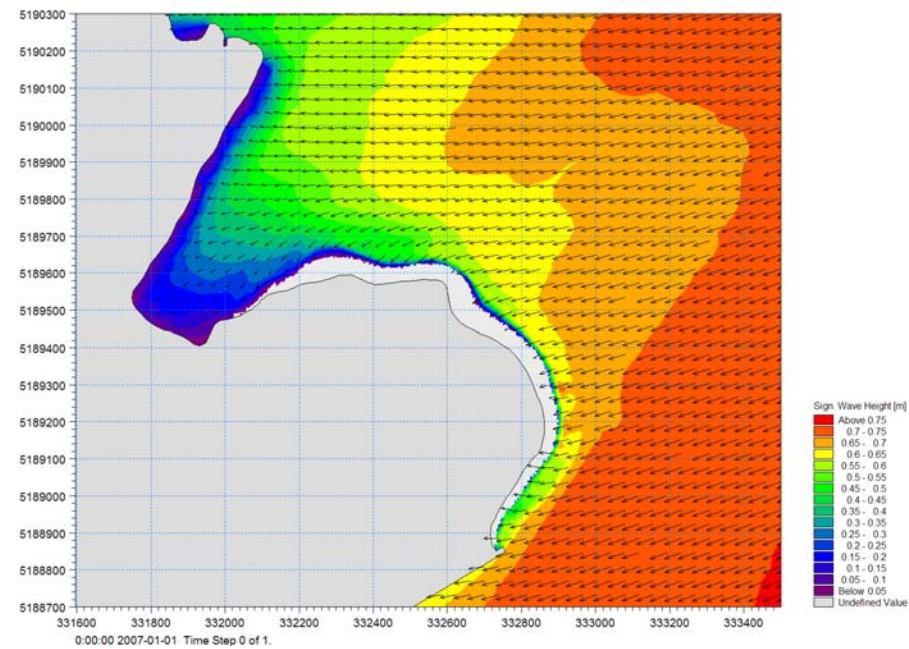
6.3.3 Courants de marée

Le cédérom joint au présent rapport présente sous forme d'animations numériques les champs des courants de marée obtenus pour un cycle complet de vive-eau, en présence des variantes D1 et D2.

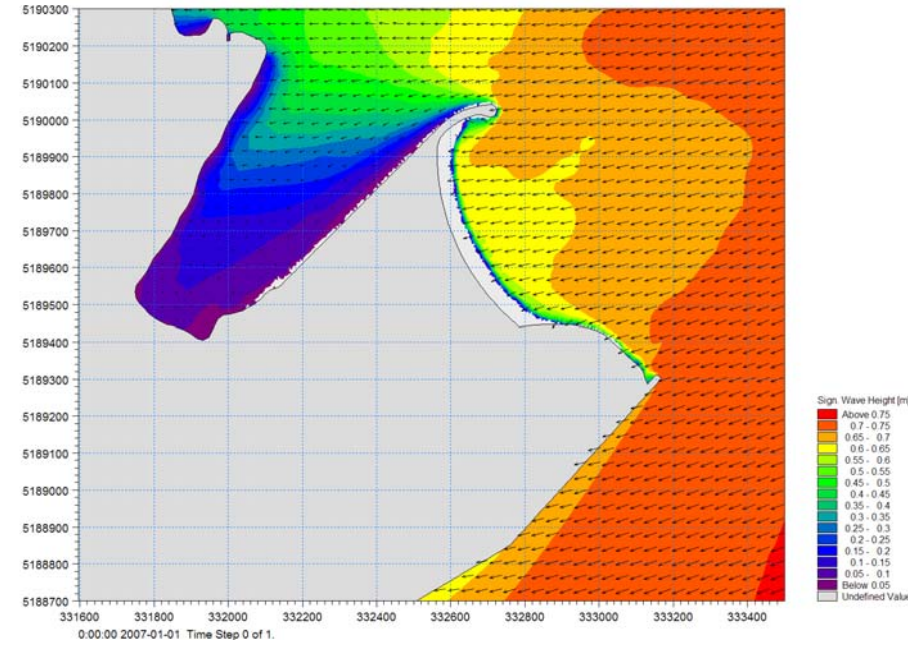
L'annexe A offre des extraits de ces animations permettant une comparaison complète des courants de flot et de jusant correspondant aux conditions actuelles et aux conditions futures avec la variante D2.

La figure 16 compare finalement les courants maximums de vive-eau simulés avec l'aménagement actuel et la variante D2. Comme on l'avait souligné lors de l'étude de 2006, les courants de marée sont pratiquement négligeables le long de la nouvelle plage.

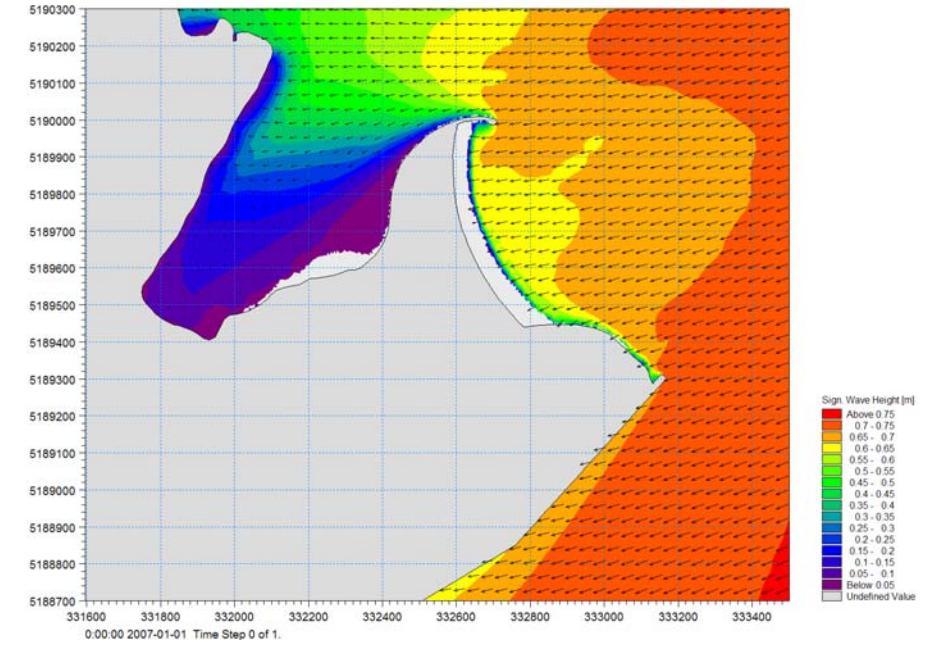
Vagues de l'ENE – $H_s = 0,76 \text{ m}$ – $T_p = 3,9 \text{ s}$



a) Conditions actuelles

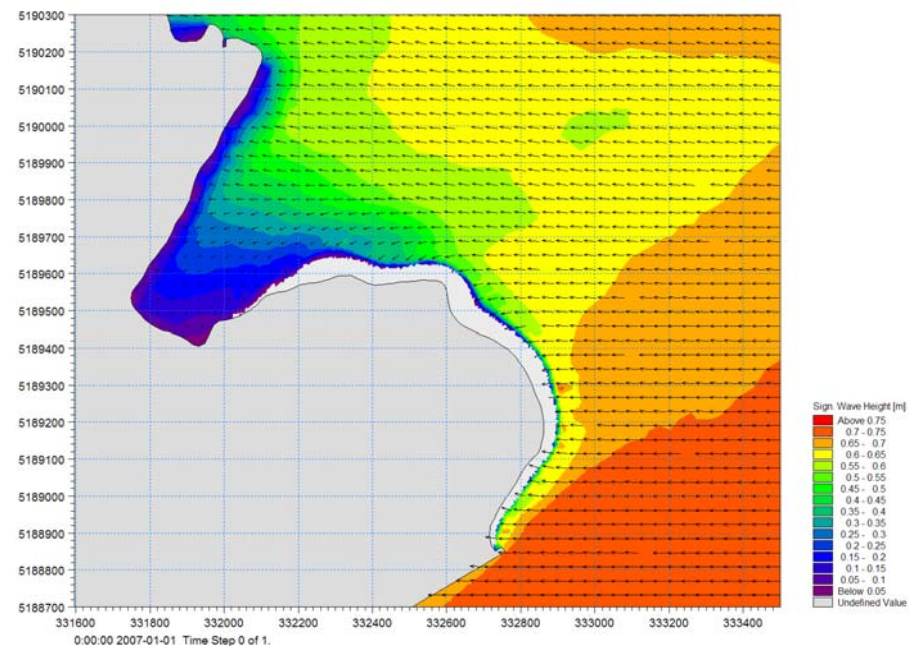


b) Variante D1

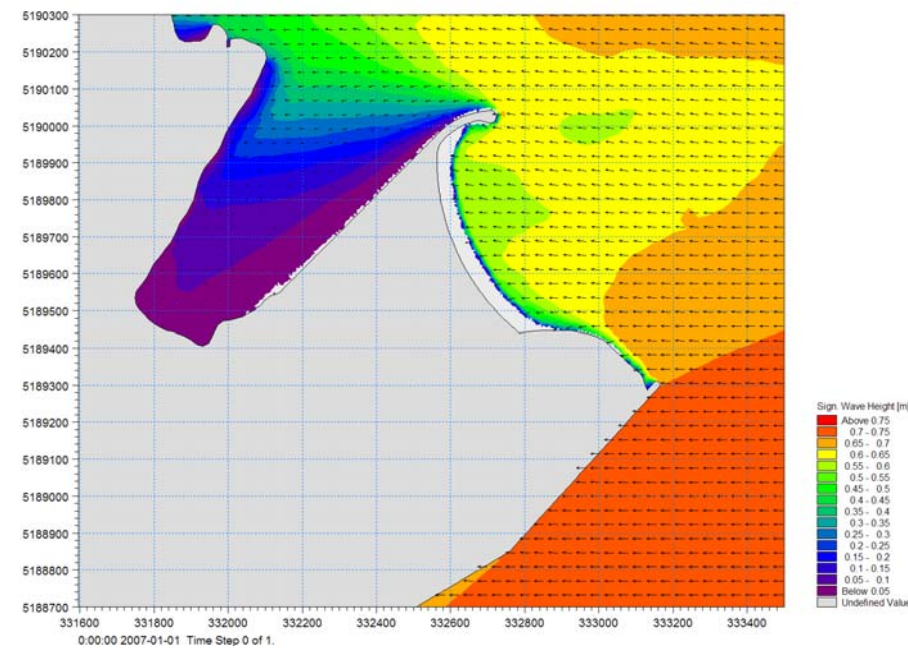


c) Variante D2

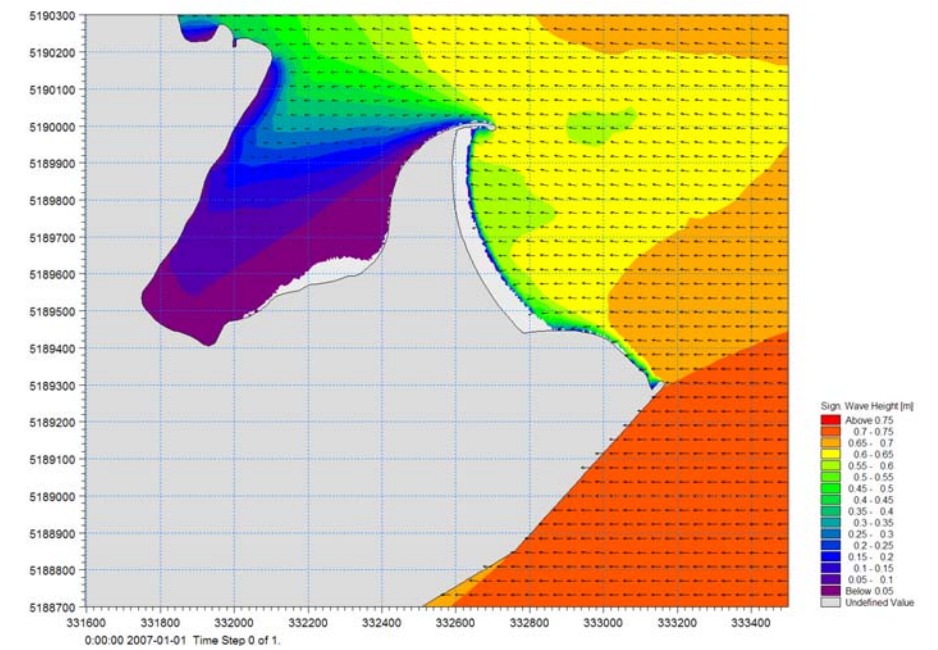
Vagues de l'EST – $H_s = 0,71 \text{ m}$ – $T_p = 3,9 \text{ s}$



d) Conditions actuelles



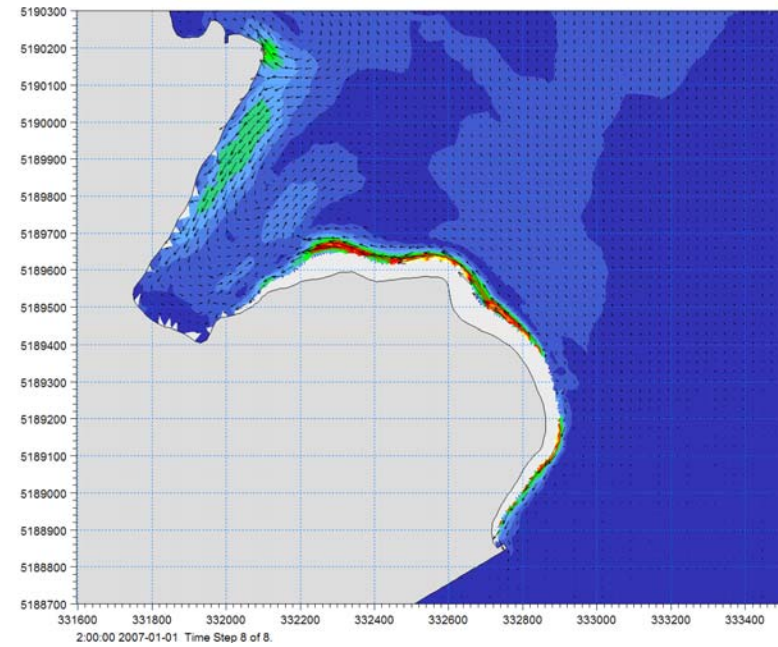
e) Variante D1



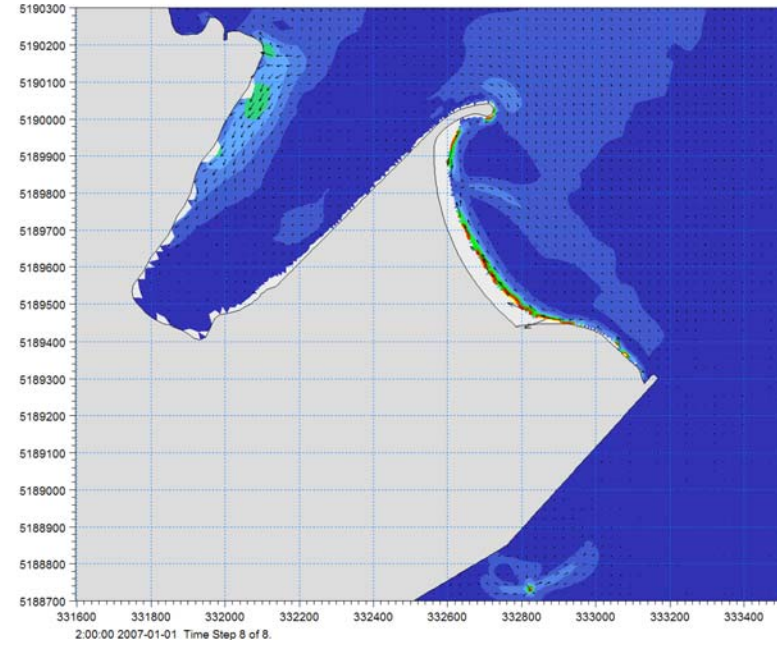
f) Variante D2

Figure 14 : Optimisation de l'extension portuaire – Simulation des vagues

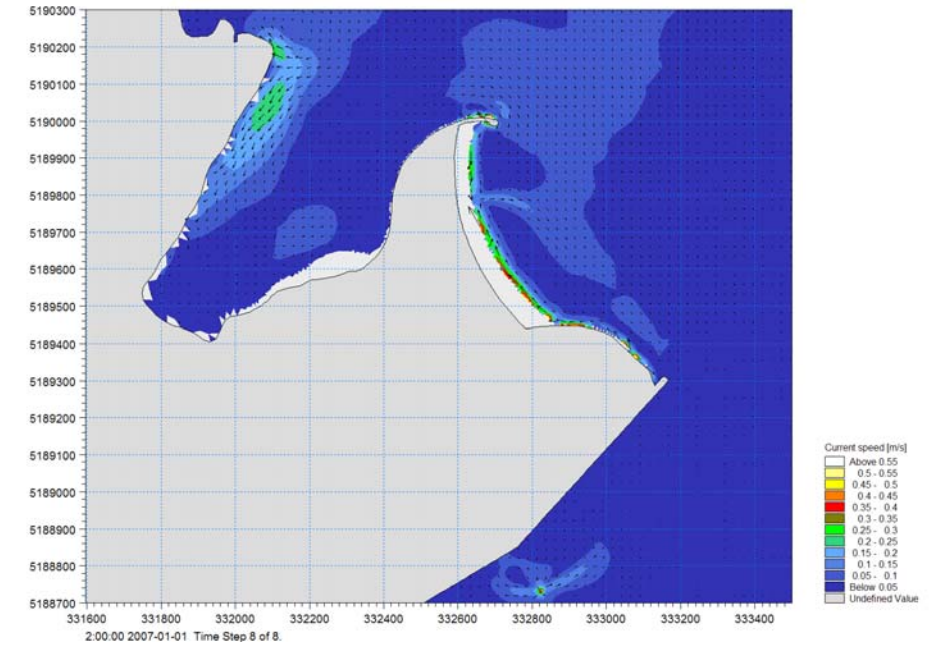
Vagues de l'ENE – $H_s = 0,76 \text{ m}$ – $T_p = 3,9 \text{ s}$



a) Conditions actuelles

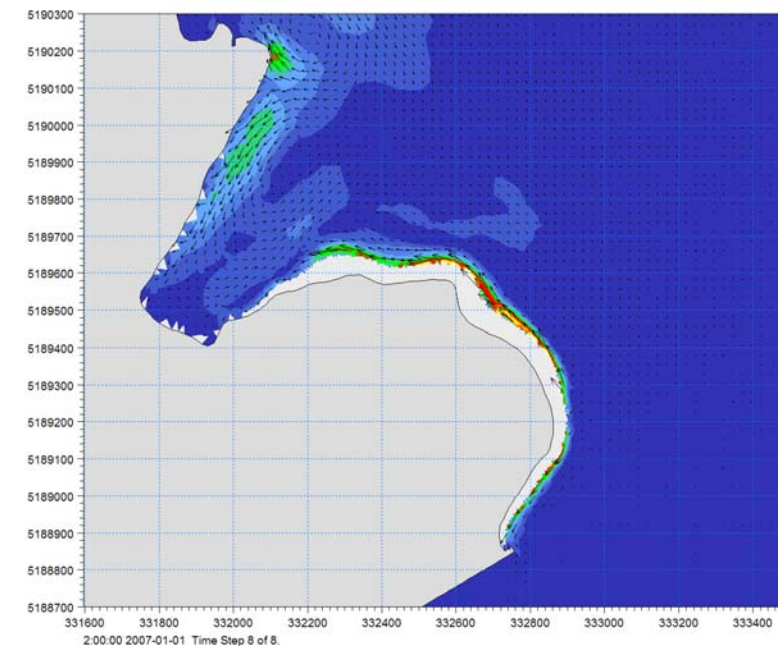


b) Variante D1

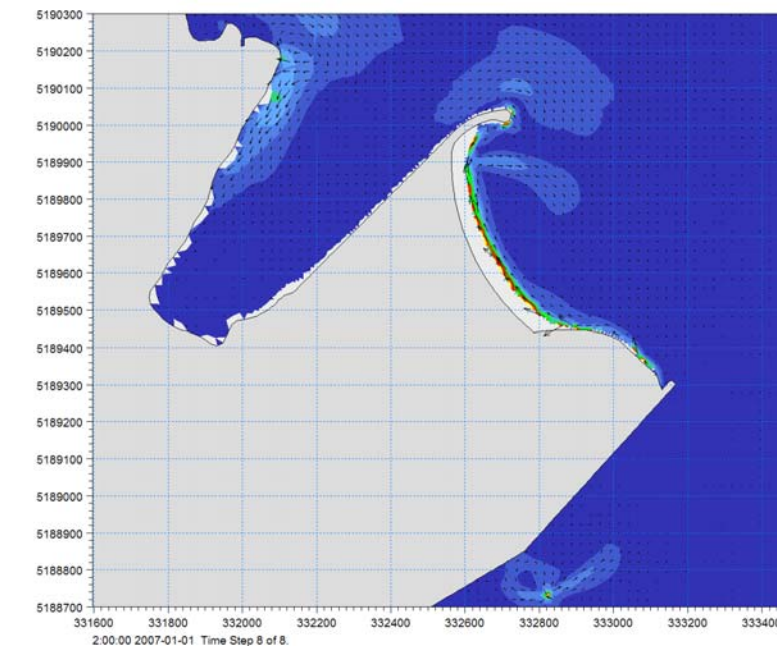


c) Variante D2

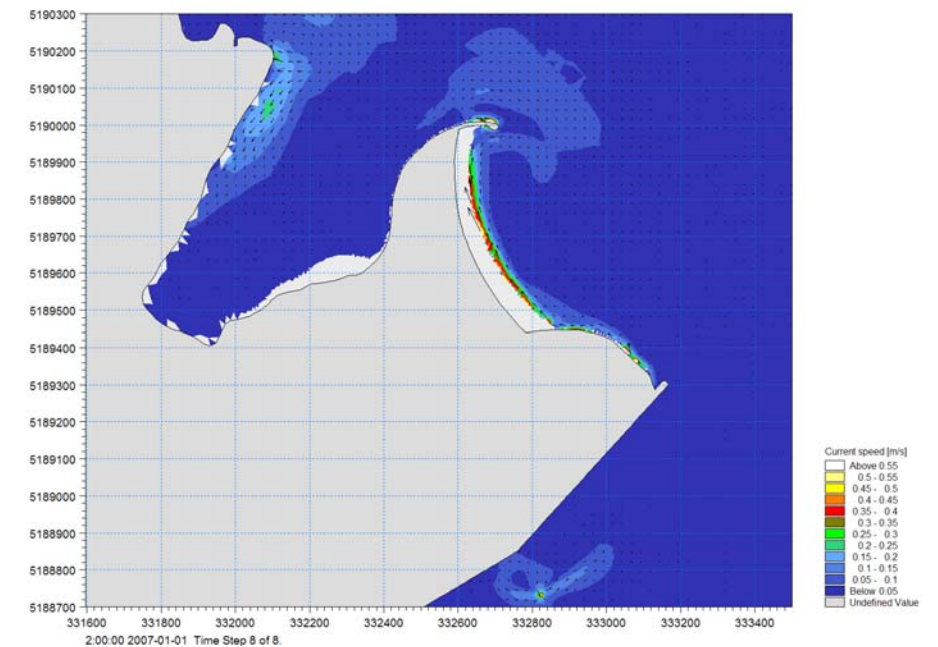
Vagues de l'EST – $H_s = 0,71 \text{ m}$ – $T_p = 3,9 \text{ s}$



d) Conditions actuelles



e) Variante D1



f) Variante D2

Figure 15 : Optimisation de l'extension portuaire – Simulation des courants littoraux

6.4 Conditions de navigation

Lors de la rencontre avec les pilotes, ces derniers avaient souligné que l'accostage hivernal au quai 53 n'était pas particulièrement problématique, puisque l'ensemble de l'estuaire de la rivière Saint-Charles était généralement couvert de glace statique. En relation avec les nouveaux quais 54 et 55, des remarques importantes doivent toutefois être formulées.

En premier lieu, les conditions hydrodynamiques actuellement vécues aux quais 52 et 53 ne sont aucunement transposables aux futurs quais. En effet, alors que les quais existants bénéficient des courants relativement faibles observés dans l'estuaire de la Saint-Charles, les nouveaux quais se situent beaucoup plus près de la veine d'écoulement principal des courants de flot et de jusant du fleuve.

Comme l'indique la figure 16b, les vitesses maximales observées au droit des quais 54 et 55 dépassent 0,8 m/s et sont ainsi plus de deux fois plus élevées que celles observées devant les quais 52 et 53, qui ne dépassent pas 0,3 à 0,4 m/s. On remarque également que la présence des nouveaux quais augmente sensiblement les courants maximums à l'entrée de l'estuaire, le long des quais 24, 52 et 53.

Au cours du flot, les abords des nouveaux quais seront, pendant environ une vingtaine de minutes, animés par un courant de retour formé par le décollement induit à l'extrémité du quai no 55. Ce phénomène, qui est clairement visible à la figure 17a, n'est pas observé en conditions actuelles au quai 53 et pourrait avoir un certain impact sur les conditions d'accostage.

En conditions hivernales, l'analyse des données disponibles (photos aériennes, images satellites, etc.) initiée lors de notre étude de 2006 [2] a été poursuivie par M. Ropars, ing. pour CIMA+ [1]. Il apparaît que les nouveaux postes à quai seront effectivement sous l'emprise de la glace de batture lors de conditions hivernales moyennes. On ne doit toutefois pas négliger les périodes de la prise des glaces et de la débâcle, pendant lesquelles des impacts directs des glaces à la dérive surviendront contre les nouveaux quais et les navires accostés (ou en approche). De telles conditions ne sont pas observées aux quais 52 et 53 qui demeurent presque entièrement en retrait de la trajectoire principale des glaces à la dérive.

6.5 Orientation de la nouvelle ligne de quais

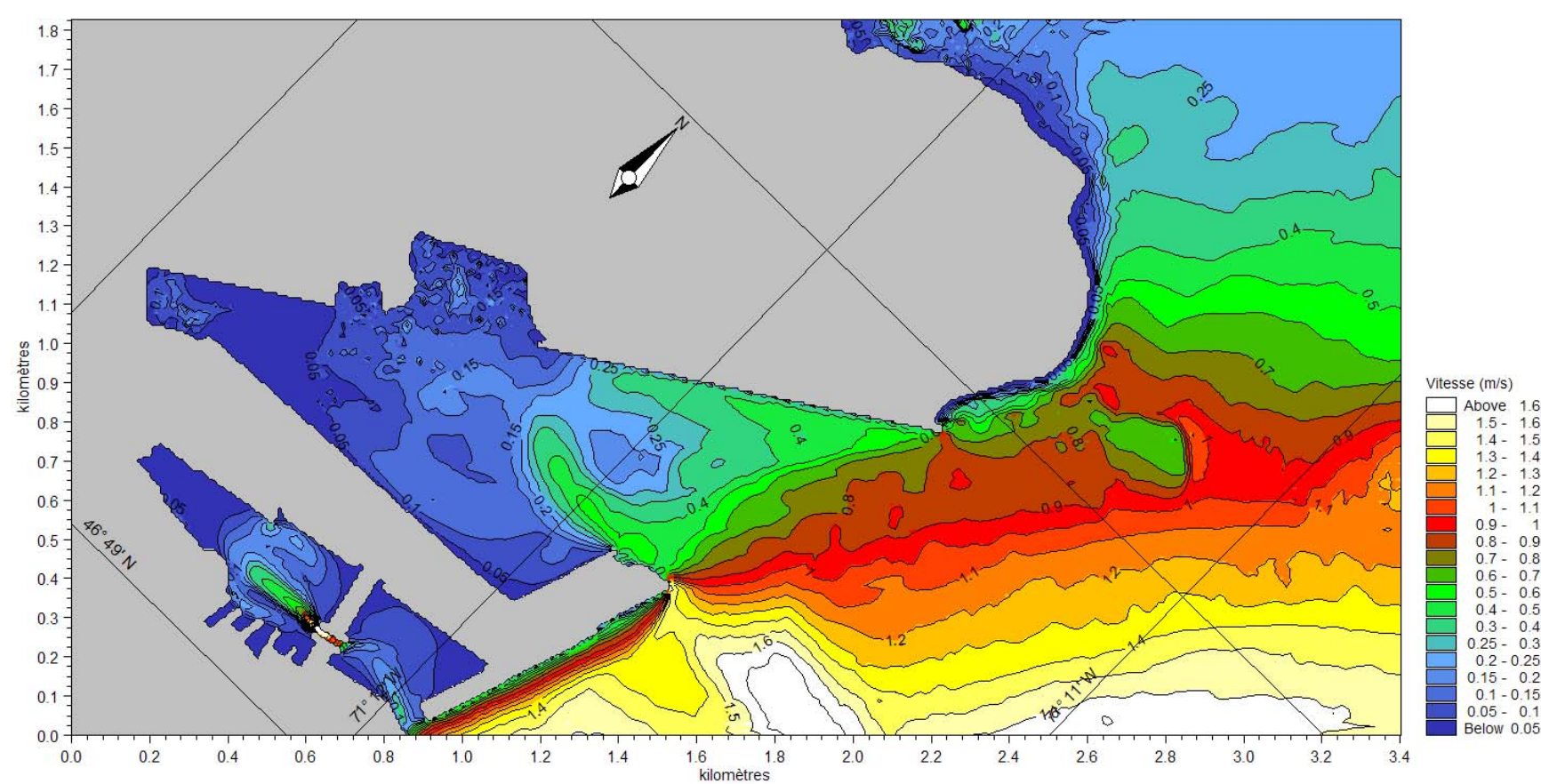
Le dernier volet de la présente étude visait à confirmer l'orientation de la nouvelle ligne de quais par rapport à celle des quais existants. Comme on l'a mentionné précédemment, les études antérieures (modèles réduit et numérique) avaient conduit l'APQ à conserver un angle de 17°.

Sur la base des éléments présentés à la section précédente, il est évident que les nouveaux postes à quai seront soumis à des conditions de navigation plus ardues qu'aux quais 52 et 53, et ce tant en eau libre qu'en conditions hivernales. Dans cette optique, une éventuelle réduction de l'angle de 17° doit s'effectuer avec prudence. D'autre part, il faut garder à l'esprit que les calculs de CIMA+ indiquent que chaque degré de réduction de cet angle offre un gain de 90 000 m³ en volume de dragage.

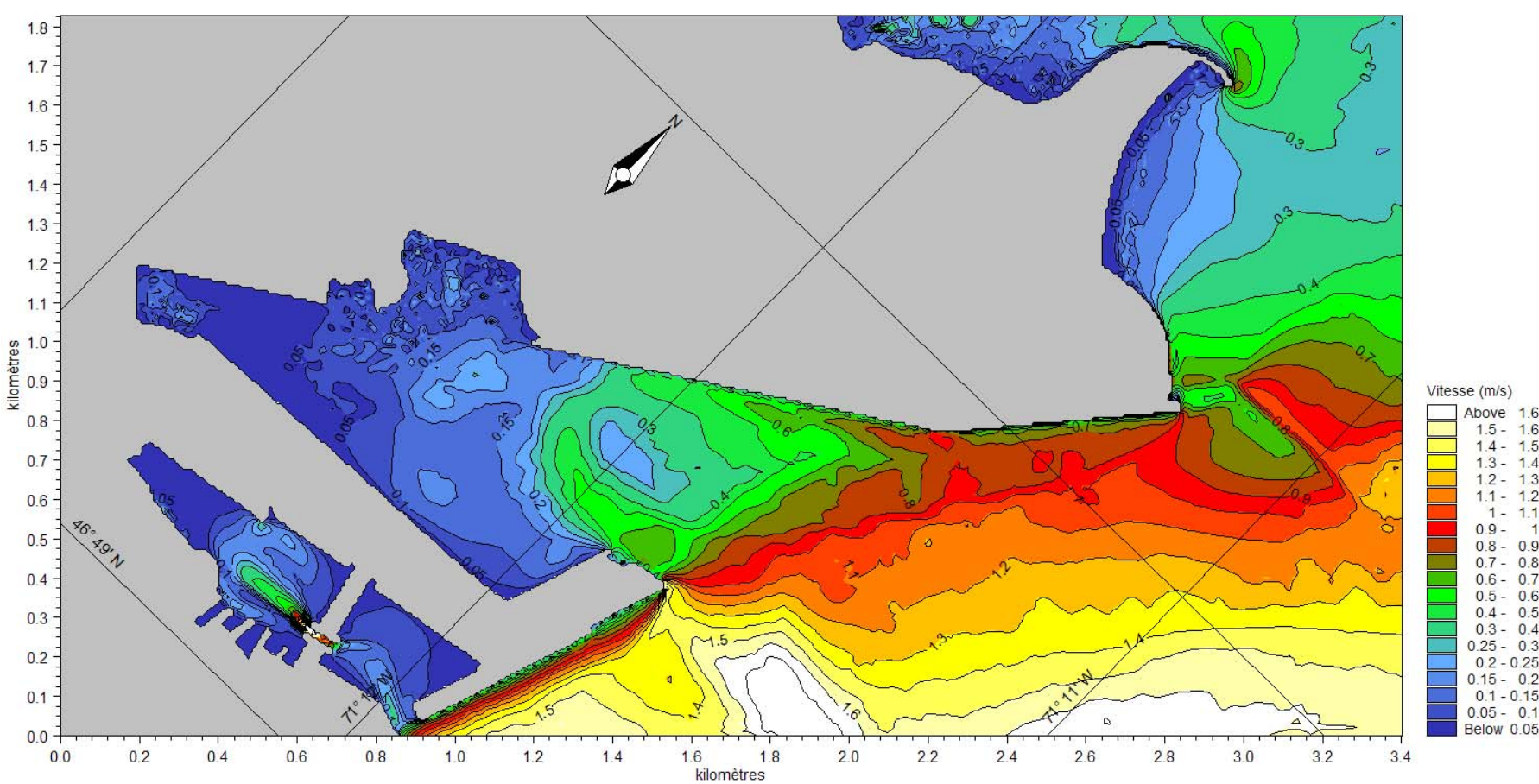
Des simulations hydrodynamiques ont ainsi été reprises en réduisant l'angle de 17° à 15°. Les figures 17 et 18 illustrent les champs de courants de vive-eau obtenus pour ces deux configurations à des moments clés du flot et du jusant. La carte des courants de flot (figure 17) illustre la formation du courant de retour devant les nouveaux quais et celle correspondant au jusant (figure 18) coïncide avec les courants maximums obtenus le long de ces quais à marée descendante.

Malgré les mises en garde formulées vis-à-vis des conditions de navigation associées aux nouveaux quais, l'impact hydrodynamique causé par une réduction de l'angle des nouveaux quais de 17° à 15° demeure trop marginal pour rejeter la variante à 15°.

Une nouvelle ligne de quais formant un angle de 15° ou 16° par rapport aux quais existants peut donc être acceptée d'un point de vue hydraulique. Il apparaît toutefois trop risqué de réduire cet angle en deçà de 15°.

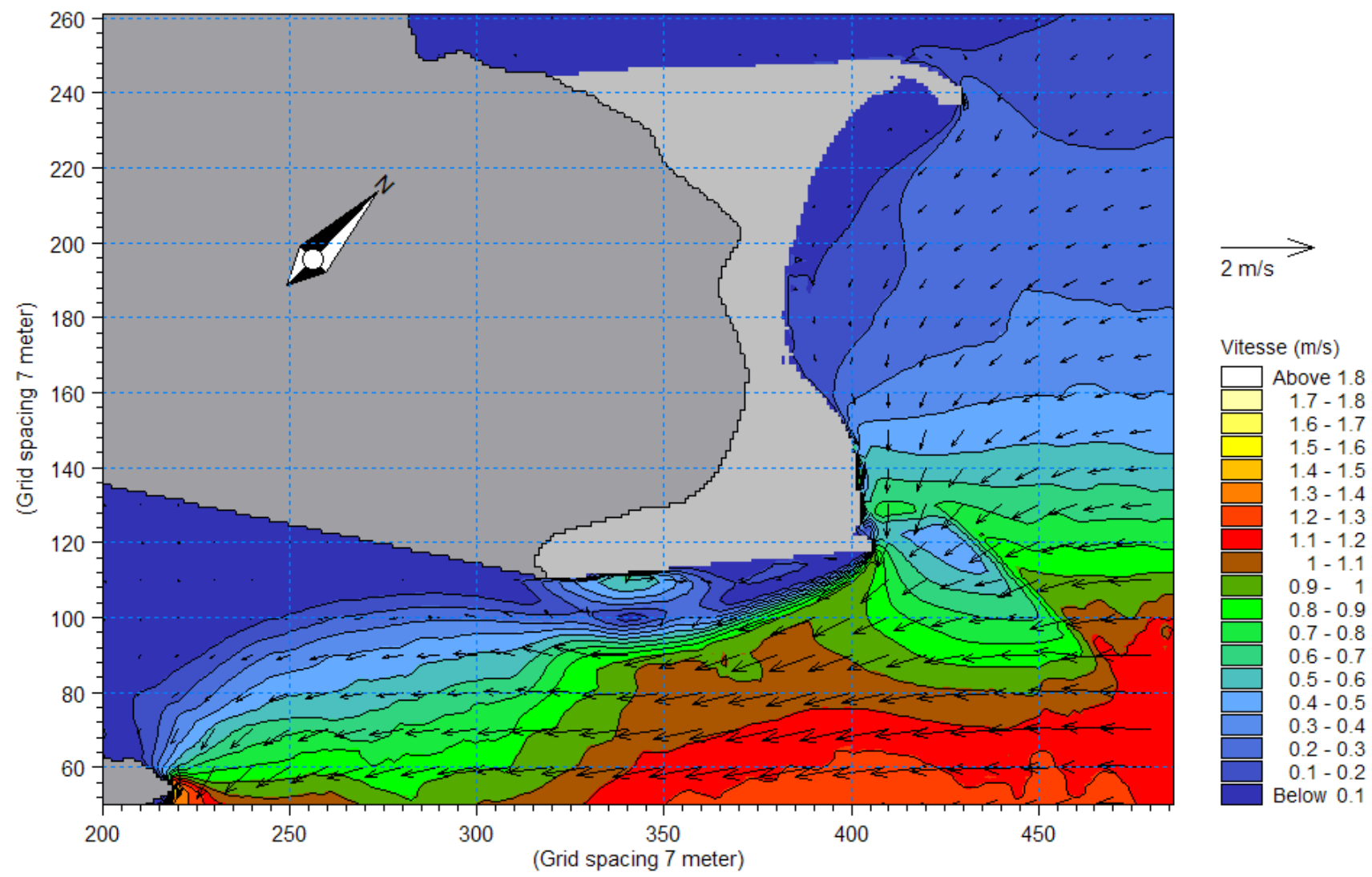


a) Conditions actuelles

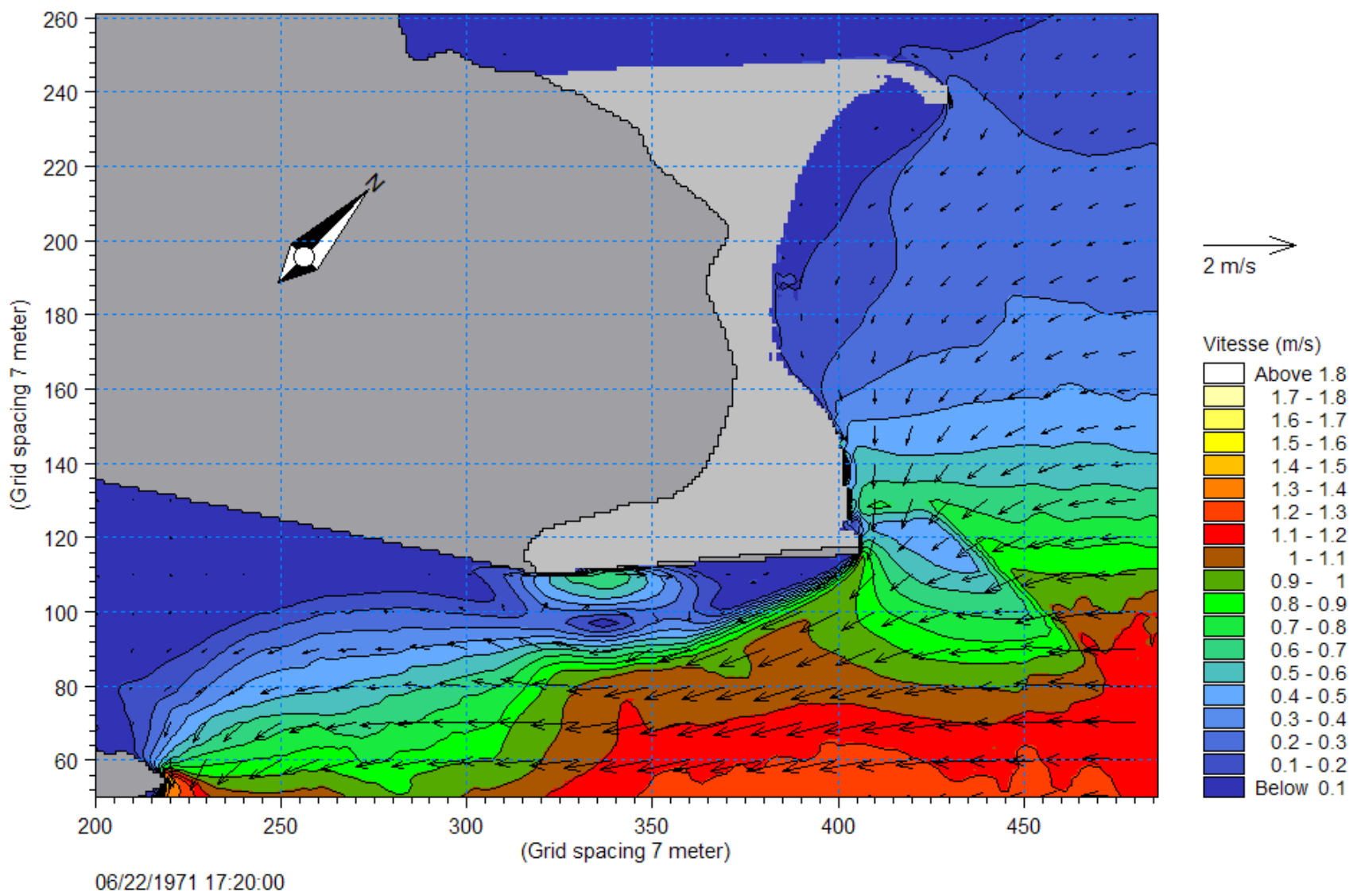


b) Conditions futures

Figure 16 : Extension portuaire – Variante D2 - Vitesses maximales des courants

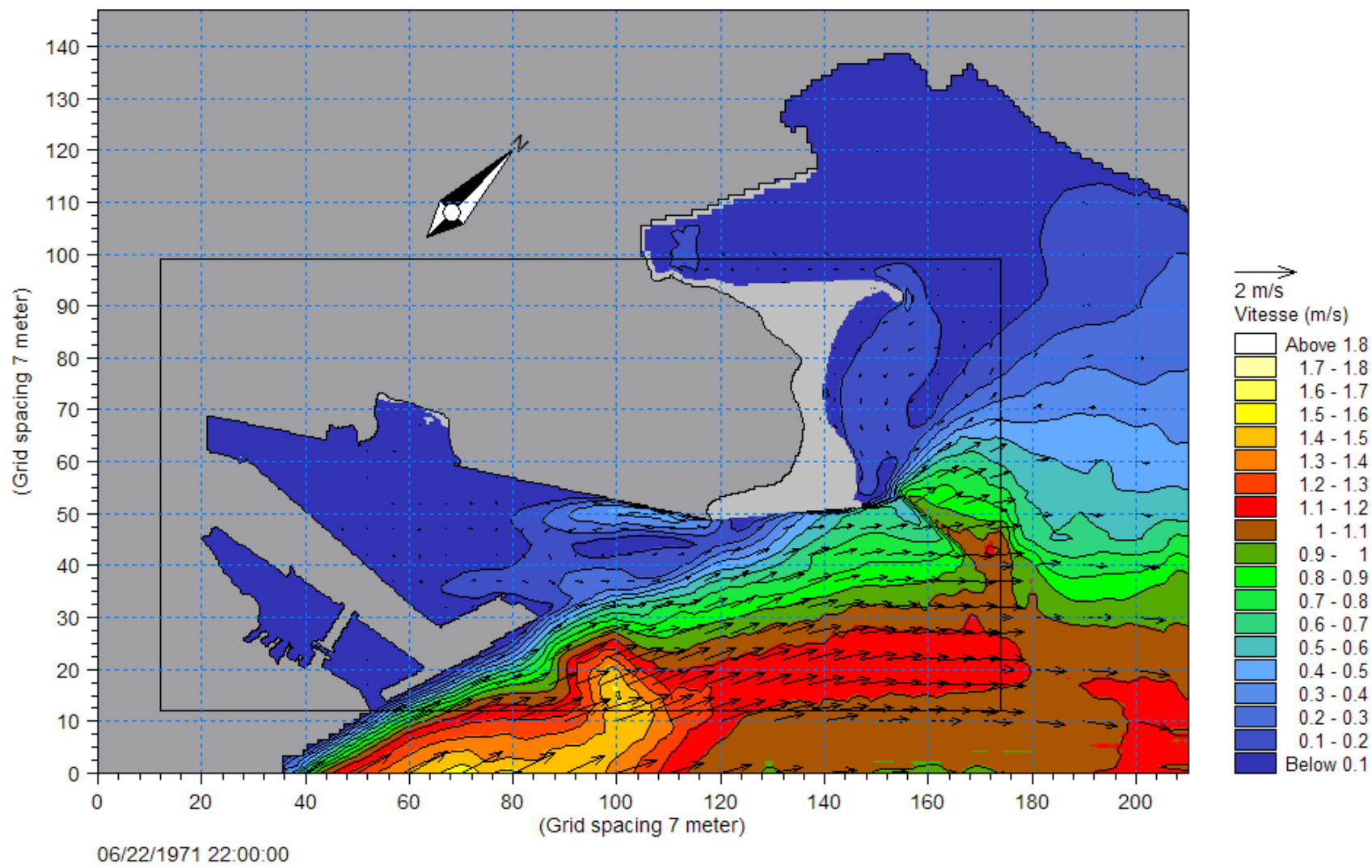


a) Avec angle de 17 degrés

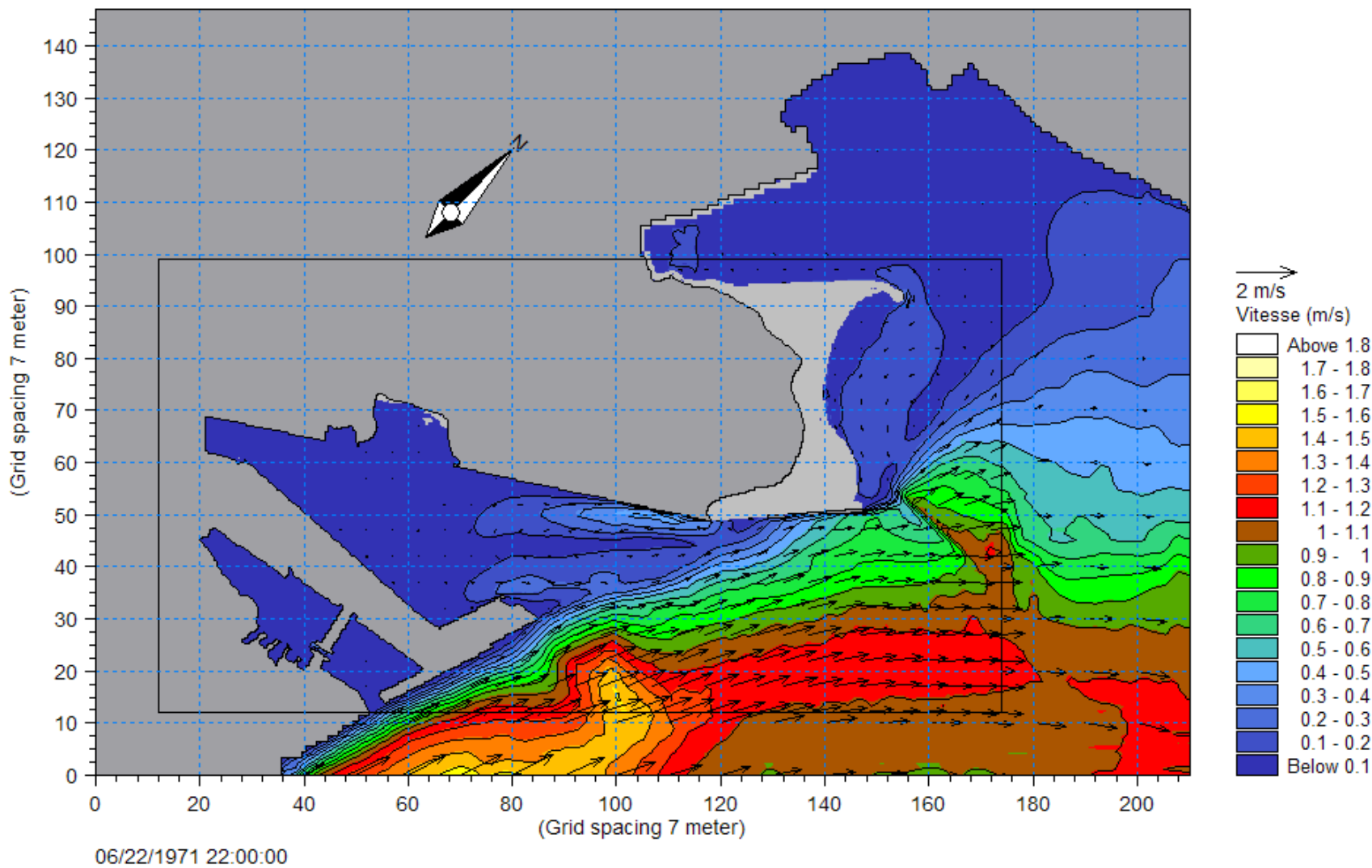


b) Avec angle réduit à 15 degrés

Figure 17 : Influence de l'orientation de la nouvelle ligne – Conditions au flot



a) Avec angle de 17 degrés



b) Avec angle réduit à 15 degrés

Figure 18 : Influence de l'orientation de la nouvelle ligne – Conditions au jusan

7.0 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'Administration portuaire de Québec (APQ) a confié au Groupe-Conseil LaSalle le mandat d'établir les conditions hydrauliques associées à ses projets d'expansion dans le secteur Beauport. L'étude s'est appuyée sur la modélisation numérique des conditions hydrodynamiques et de vagues et a porté sur trois projets :

- l'approfondissement de la profondeur draguée au droit des quais 51 à 53;
- la mise en place de nouveaux postes à quai sur ducs d'albe près du quai 50, en vue de l'aménagement d'un terminal pour liquides en vrac;
- l'extension vers le nord-est du secteur portuaire Beauport, avec la mise en place de deux nouveaux quais (54 et 55).

Les résultats obtenus conduisent à des conclusions pouvant se résumer comme suit :

- L'aménagement du terminal pour liquides en vrac, de même que l'approfondissement des quais 51 à 53, n'auront aucune influence tangible sur les conditions hydrodynamiques de l'estuaire de la rivière Saint-Charles.
- Le dragage à la cote -15,5 m des quais 51 à 53 ne crée pas véritablement une fosse par rapport aux fonds avoisinants et n'introduit donc pas de risques d'accroissement marqué de la sédimentation devant ces quais.
- Tant pour les ducs d'Albe que pour l'approfondissement devant les quais 51 à 53, des précautions devront être prises lors des travaux en vue de minimiser la remise en suspension des sédiments dragués, qui pourraient être transportés vers le fleuve par les courants de marée observés dans la portion aval de l'estuaire.
- L'extension portuaire du secteur Beauport doit prévoir une transition entre l'aire portuaire et la zone récréative évitant l'enclavement de la plage et les problèmes de sédimentation qui pourraient en résulter.

- La variante optimale de l'extension comporte une zone récréative plus étendue que dans les concepts initiaux. Le concept proposé vise aussi à bonifier le rentrant sud-ouest et à stabiliser la plage en lui donnant une meilleure orientation par rapport aux vagues issues des secteurs ENE et E, qui dominent la dynamique sédimentaire du secteur. La forme de l'aménagement permet d'équilibrer les volumes de dragage et de remblai, et d'éviter ainsi les rejets en eau libre.
- En phase ultérieure du projet, il est recommandé de procéder à des relevés détaillés de la topographie/bathymétrie de la zone littorale de la pointe de Beauport. En effet, les données disponibles ayant été utilisées au modèle numérique sont relativement anciennes (1982) et ne couvrent pas les portions de la pointe situées au-dessus du niveau marégraphique +1,5 m.
- Des considérations liées aux conditions de navigation aux abords des quais actuels et projetés, appuyées par des simulations hydrodynamiques, indiquent que l'angle des nouveau quais par rapport aux quais existants peut être réduit de 17° à 15°.

RÉFÉRENCES

- [1] CIMA+ (2007), « *Port de Québec – Nouvelles infrastructures portuaires – Étude de préféabilité - Beauport 2007, J-4161* », Rapport no Q07459A préparé pour l'Administration portuaire de Québec, 97 p. + 15 annexes.
- [2] VILLENEUVE, M. ET N. HOSSAINI (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 Groupe-Conseil LaSalle no 1605, avril 2006, préparé pour l'Administration portuaire de Québec.
- [3] PROCÉAN (2006), « *Mesure de courants et évaluation de la quantité et de la qualité des matières en suspension à la sortie de l'estuaire de la rivière Saint-Charles (Port de Québec)* », Rapport présenté à Environnement Canada, Janvier 1994.

LEXIQUE

Marées

Flot : Champ des courants associé à la marée montante.

Jusant : Champ des courants associé à la marée descendante.

Marée de vive-eau : Marée de forte amplitude obtenue environ tous les quinze jours, lorsque la terre, la lune et le soleil sont alignés.

Marée de morte-eau : Marée de faible amplitude obtenue environ tous les quinze jours, lorsque la terre, la lune et le soleil forment un angle droit.

Vagues

Réfraction : Transformation des vagues à l'approche du littoral sous l'effet de la diminution de la profondeur et de la morphologie des fonds marins.

Contrainte de radiation : Principal mécanisme expliquant le transport sédimentaire le long des côtes, les contraintes de radiation correspondent à des flux de quantité de mouvement générés par des vagues approchant le littoral de manière oblique.

Modélisation numérique

Pas de temps : Intervalle de temps utilisé par les modèles numériques pour la résolution des équations régissant la mécanique des fluides.

Rugosité des fonds : Importance des aspérités ou irrégularités des fonds marins, qui contribue à dissiper l'énergie de l'écoulement ou des vagues.

Viscosité turbulente : Paramètre utilisé dans la formulation des modèles numériques bidimensionnels et qui agit sur l'importance des décollements et courants de retour simulés par le modèle.

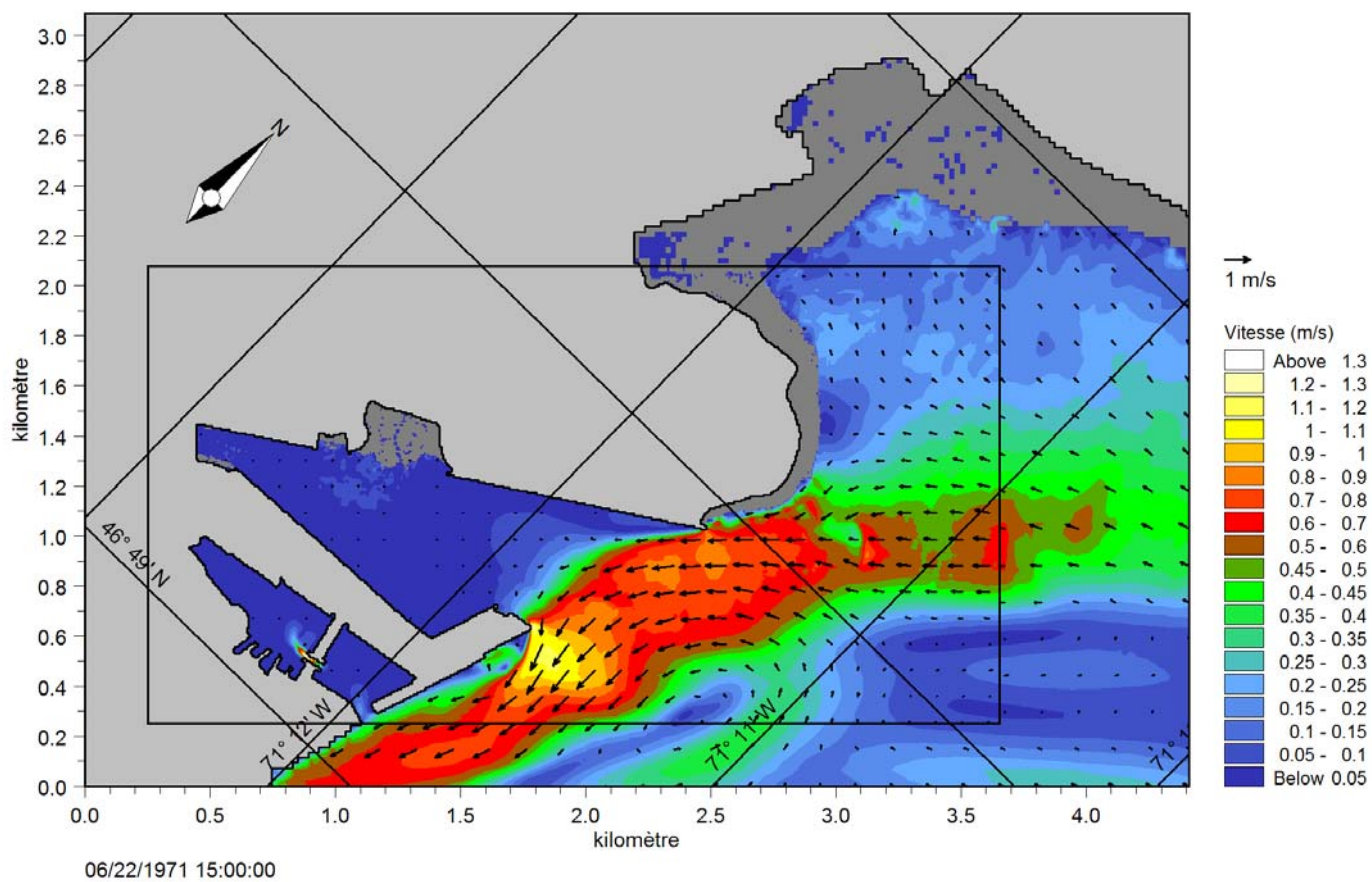
Hydrodynamique

Décollement : Portion d'un écoulement demeurant en retrait de la veine principale d'écoulement. Les décollements sont habituellement générés par l'interaction entre l'écoulement et un corps solide.

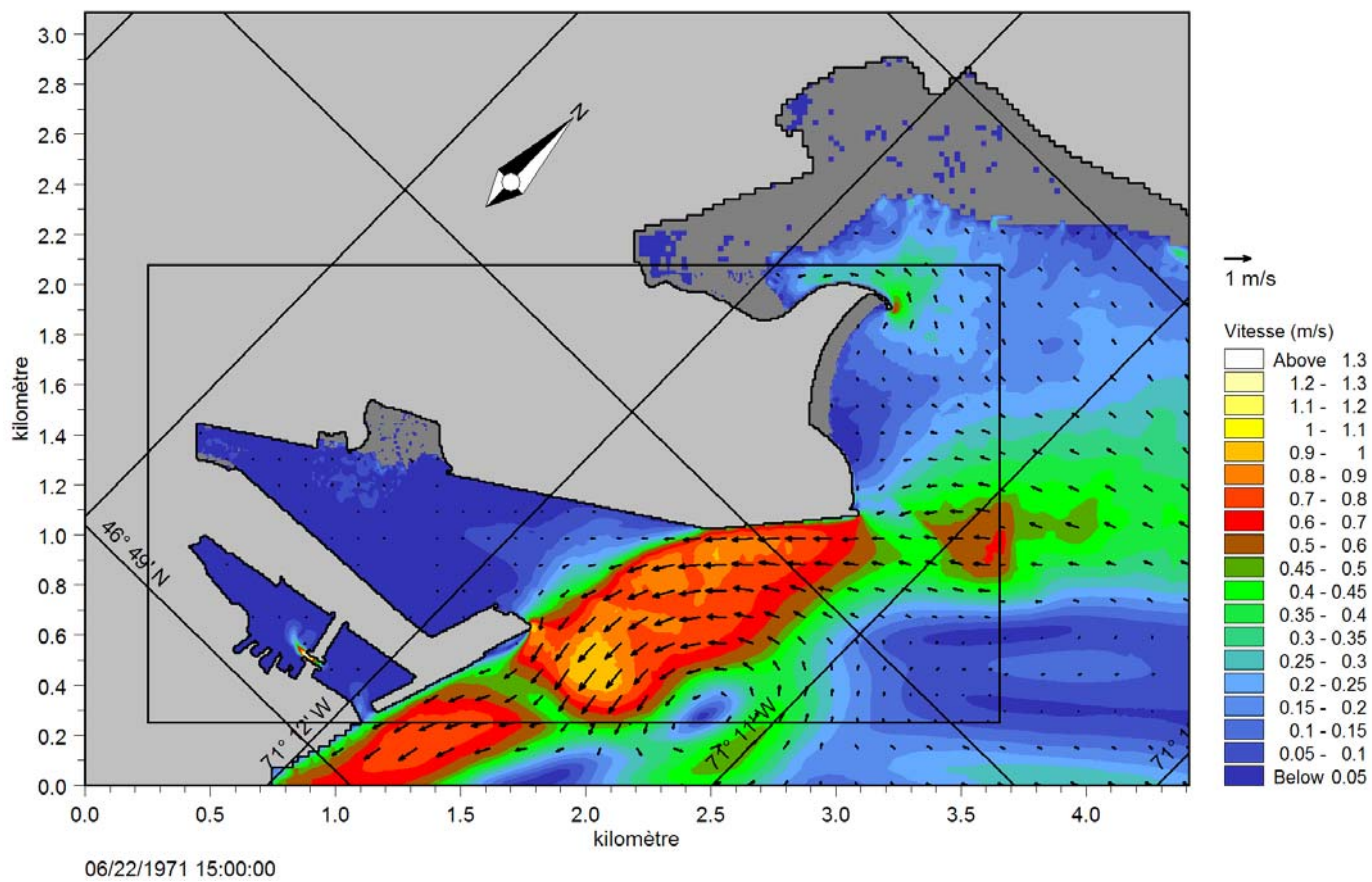
Courant de retour : Courant décrivant une trajectoire circulaire, souvent généré dans les zones de décollement.

ANNEXE A :

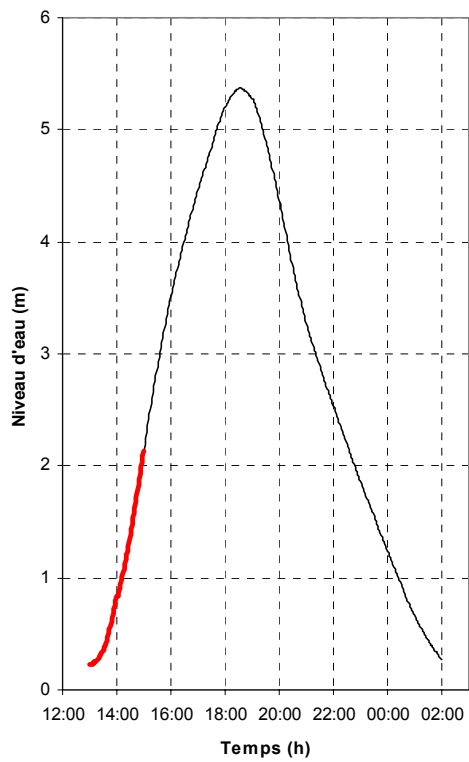
Cartes des courants de marée de vive-eau en conditions actuelles et futures



a) Conditions actuelles



b) Conditions futures (variante D2)



Cycle de marée de vive-eau



Le Groupe-Conseil LaSalle

CLIENT :



PORT DE QUÉBEC

Canada

PROJET :

PORT DE QUÉBEC

Nouvelles infrastructures portuaires
Beauport 2007 (J-4161) - Modélisation
numérique des conditions hydrauliques

TITRE :

Cartes des courants de marée de vive-
eau en conditions actuelles et futures

PRÉPARÉ PAR :

GC - MV

REF. CLIENT :

J-4161

REF. LASALLE :

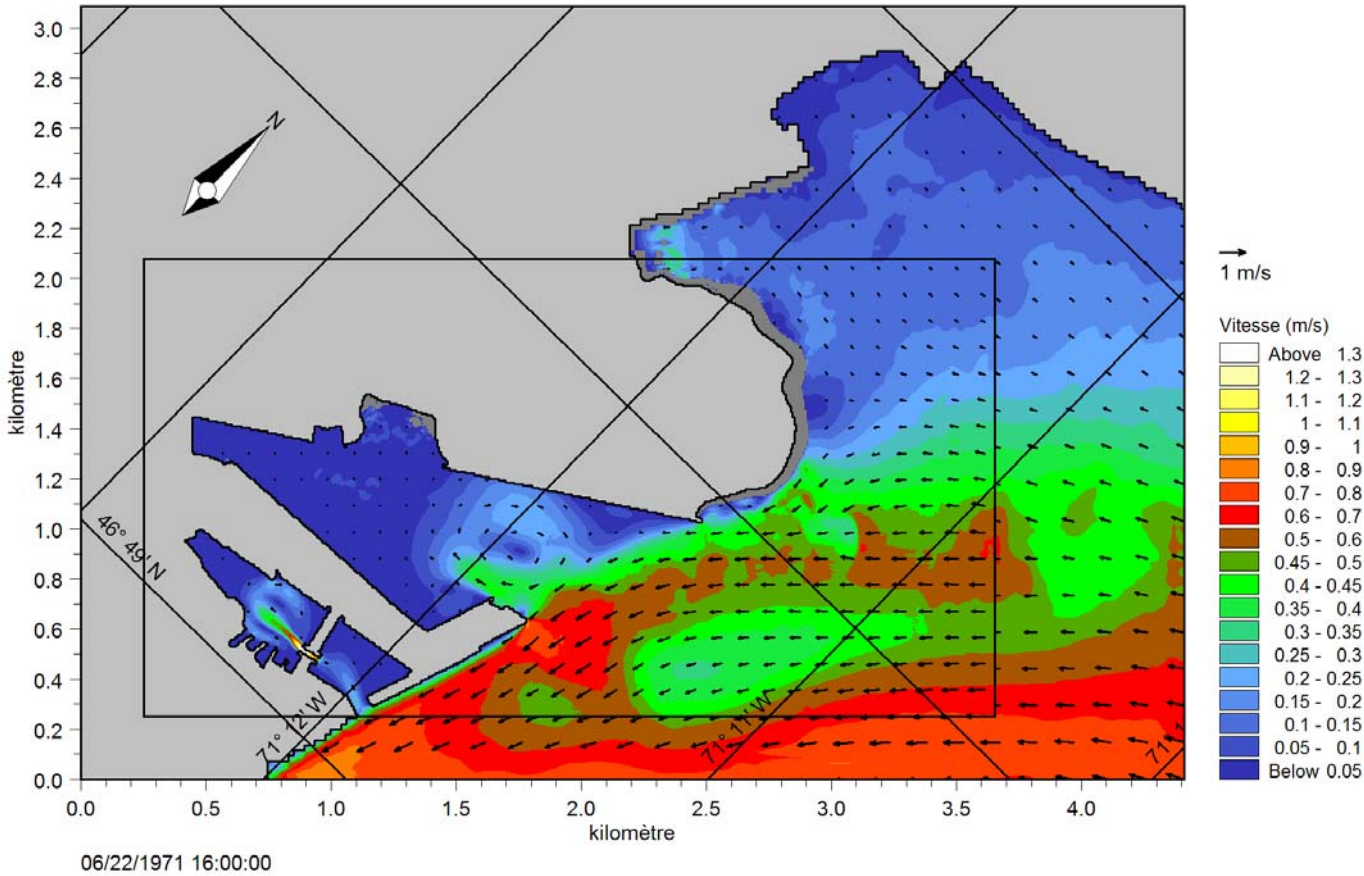
414-101

DATE :

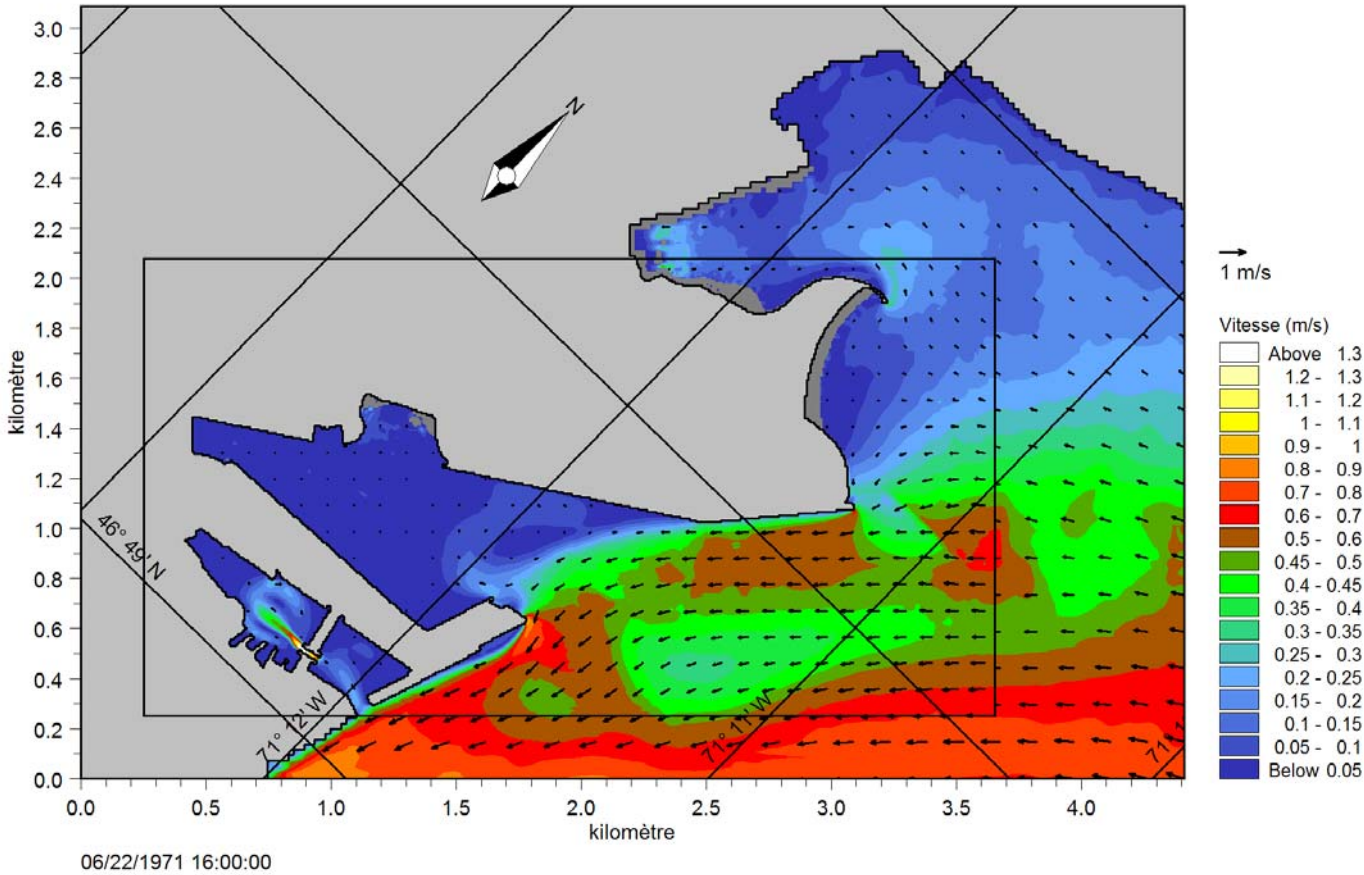
Août 2007

FIGURE :

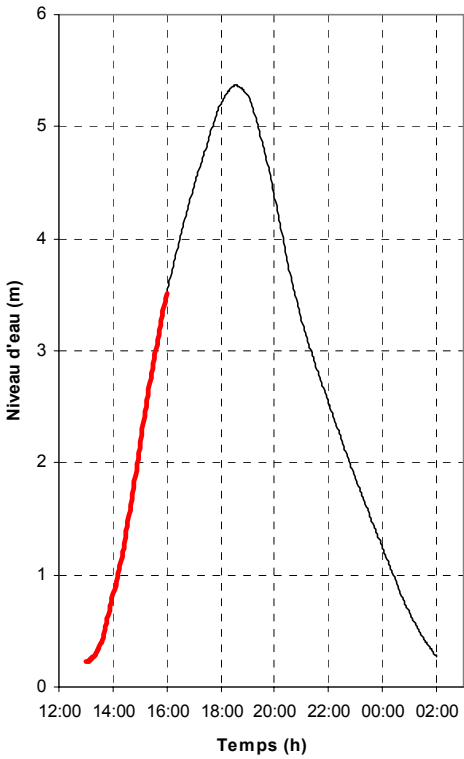
A1



a) Conditions actuelles

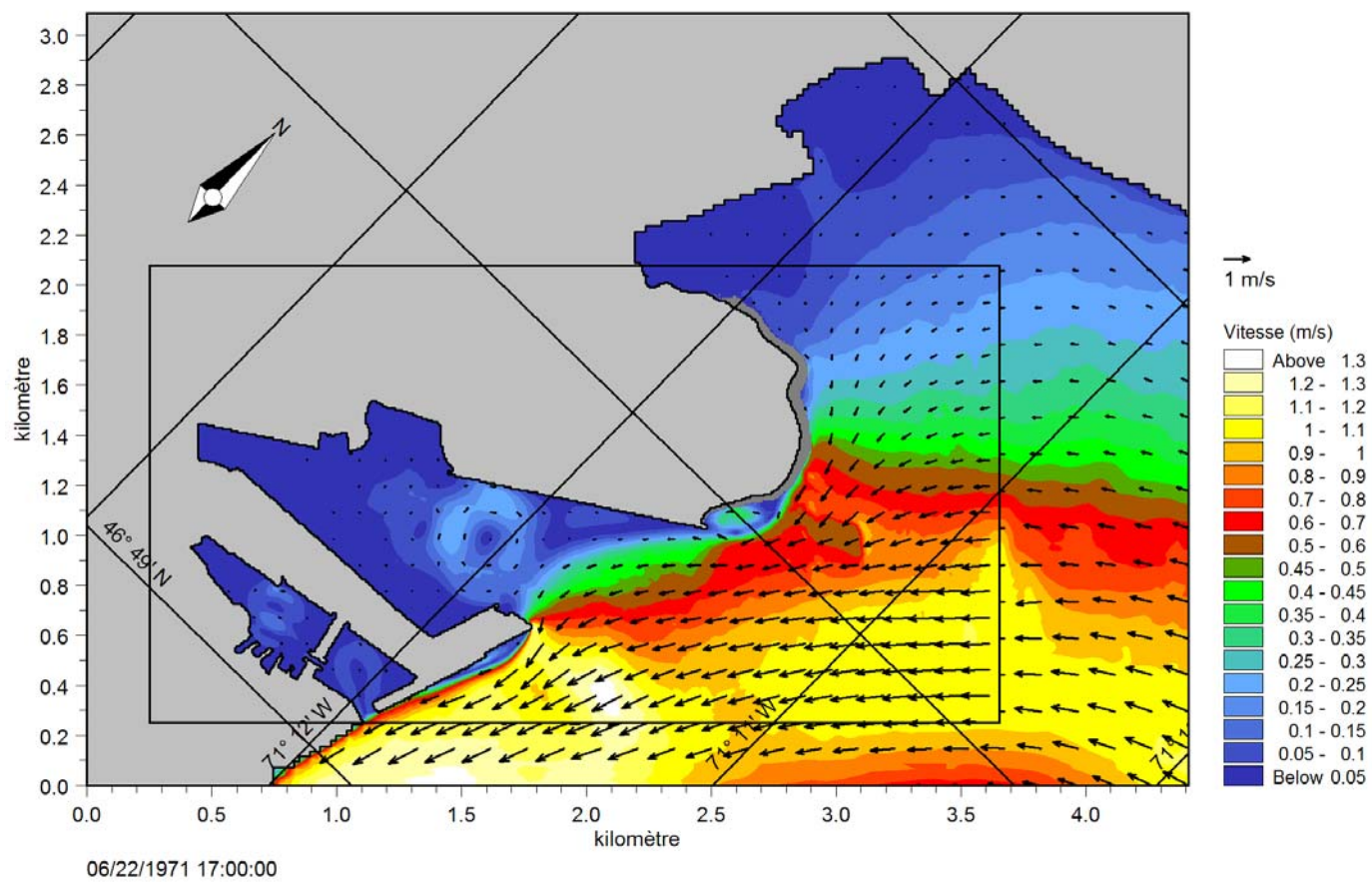


b) Conditions futures (variante D2)

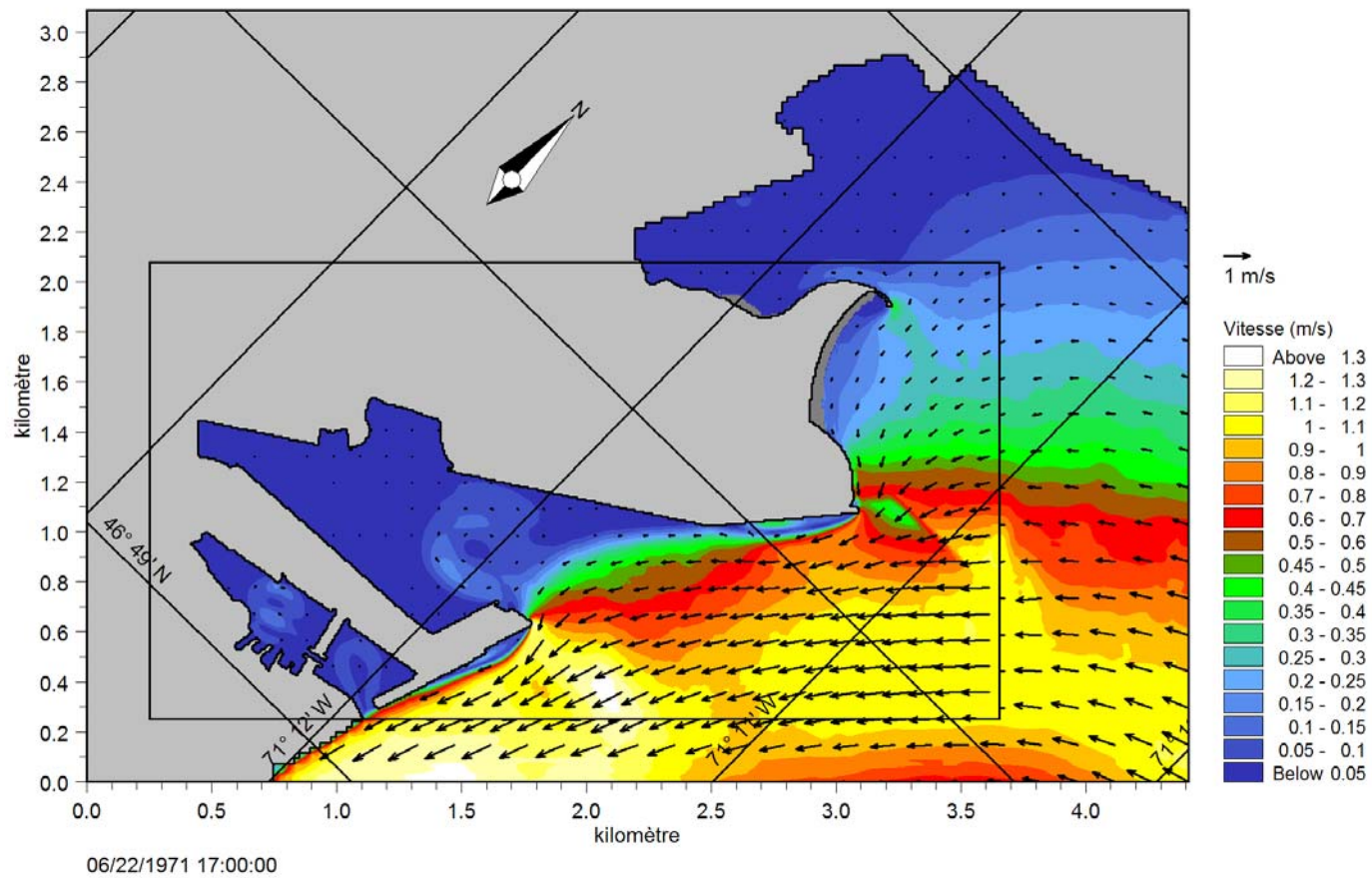


Cycle de marée de vive-eau

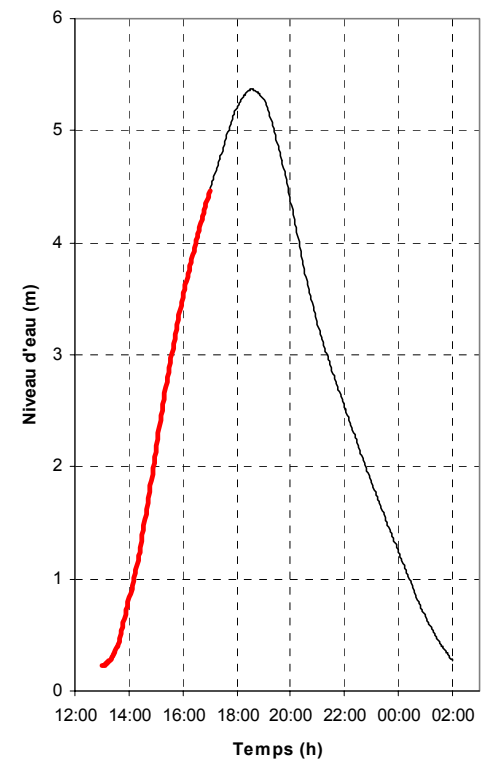
 Le Groupe-Conseil LaSalle		
CLIENT : PORT DE QUÉBEC Canada		
PROJET : PORT DE QUÉBEC Nouvelles infrastructures portuaires Beauport 2007 (J-4161) - Modélisation numérique des conditions hydrauliques		
TITRE : Cartes des courants de marée de vive- eau en conditions actuelles et futures		
PRÉPARÉ PAR : GC - MV	REF. CLIENT : J-4161	REF. LASALLE : 414-101
DATE : Août 2007		FIGURE : A2



a) Conditions actuelles



b) Conditions futures (variante D2)



Cycle de marée de vive-eau



Le Groupe-Conseil LaSalle

CLIENT :



PORT DE QUÉBEC

Canada

PROJET :

PORT DE QUÉBEC

Nouvelles infrastructures portuaires
Beauport 2007 (J-4161) - Modélisation
numérique des conditions hydrauliques

TITRE :

Cartes des courants de marée de vive-
eau en conditions actuelles et futures

PRÉPARÉ PAR :

GC - MV

REF. CLIENT :

J-4161

REF. LASALLE :

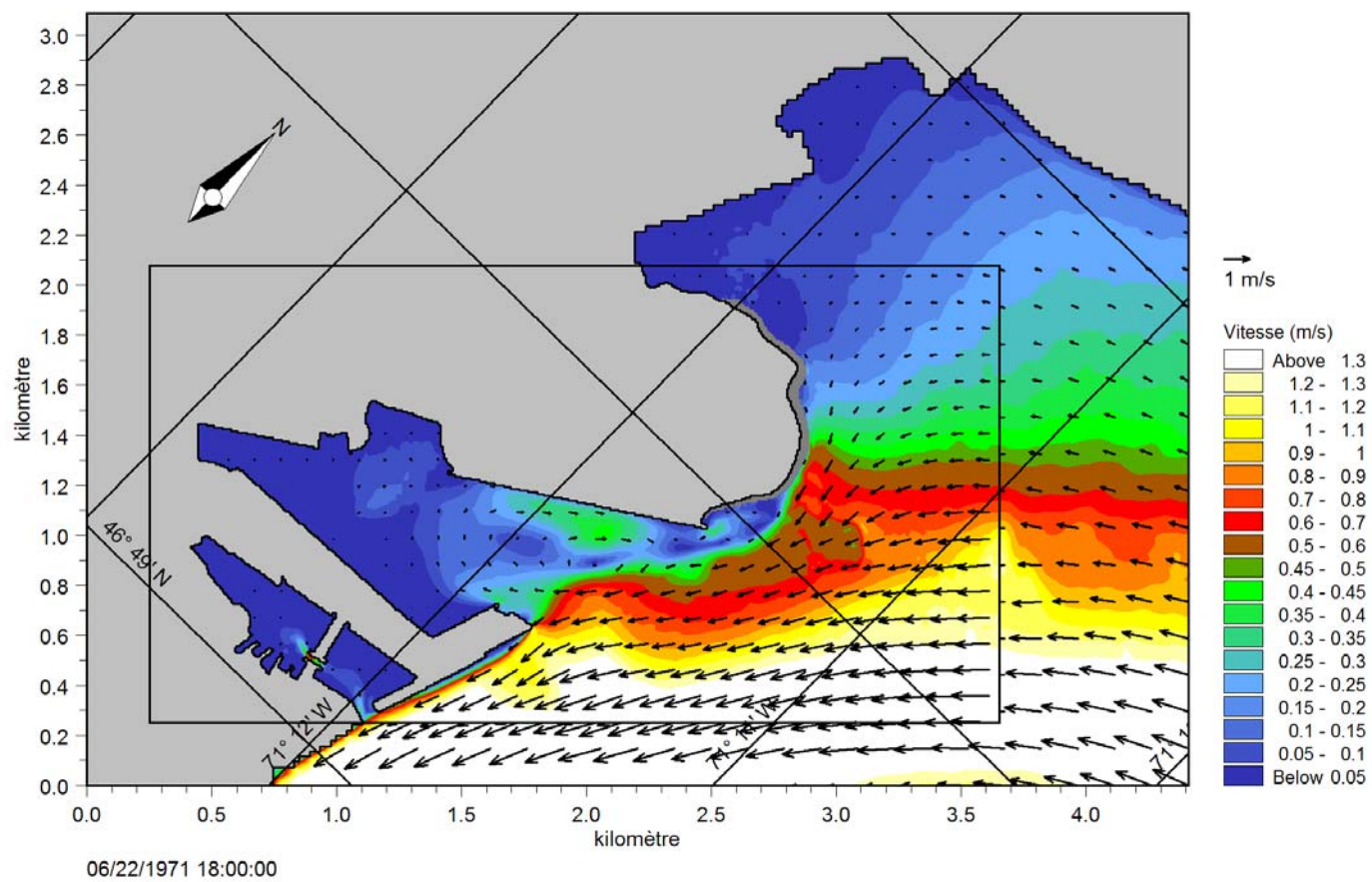
414-101

DATE :

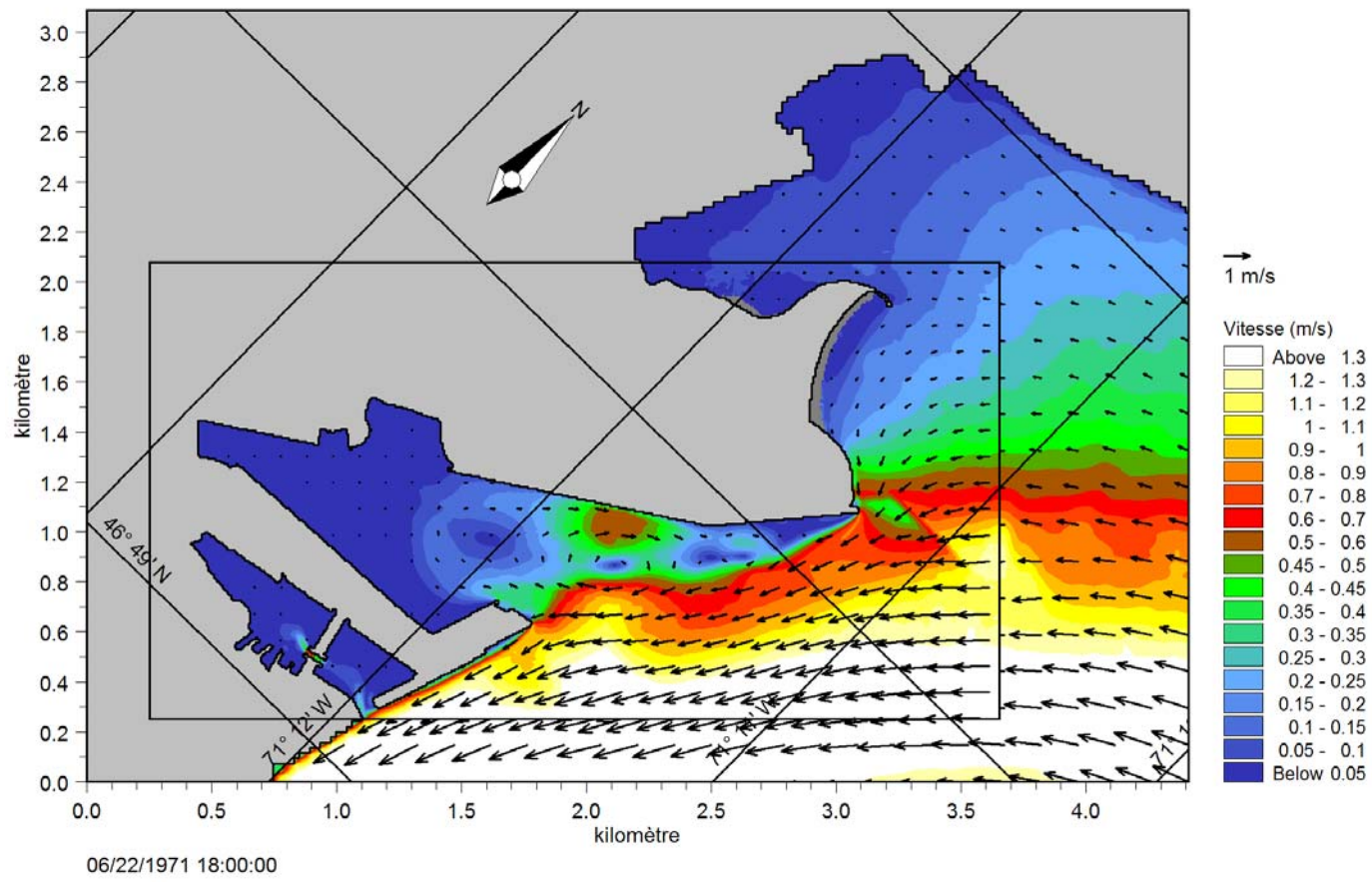
Août 2007

FIGURE :

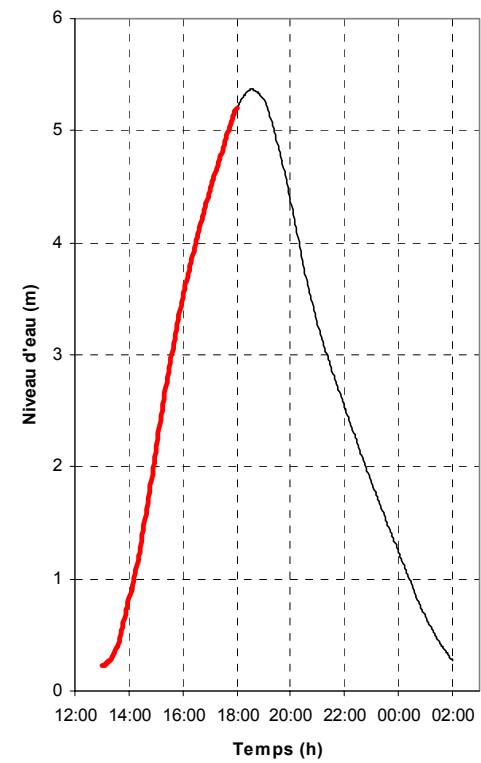
A3



a) Conditions actuelles



b) Conditions futures (variante D2)



Cycle de marée de vive-eau



Le Groupe-Conseil LaSalle

CLIENT :



PORT DE QUÉBEC

Canada

PROJET :

PORT DE QUÉBEC

Nouvelles infrastructures portuaires
Beauport 2007 (J-4161) - Modélisation
numérique des conditions hydrauliques

TITRE :

Cartes des courants de marée de vive-
eau en conditions actuelles et futures

PRÉPARÉ PAR :

GC - MV

REF. CLIENT :

J-4161

REF. LASALLE :

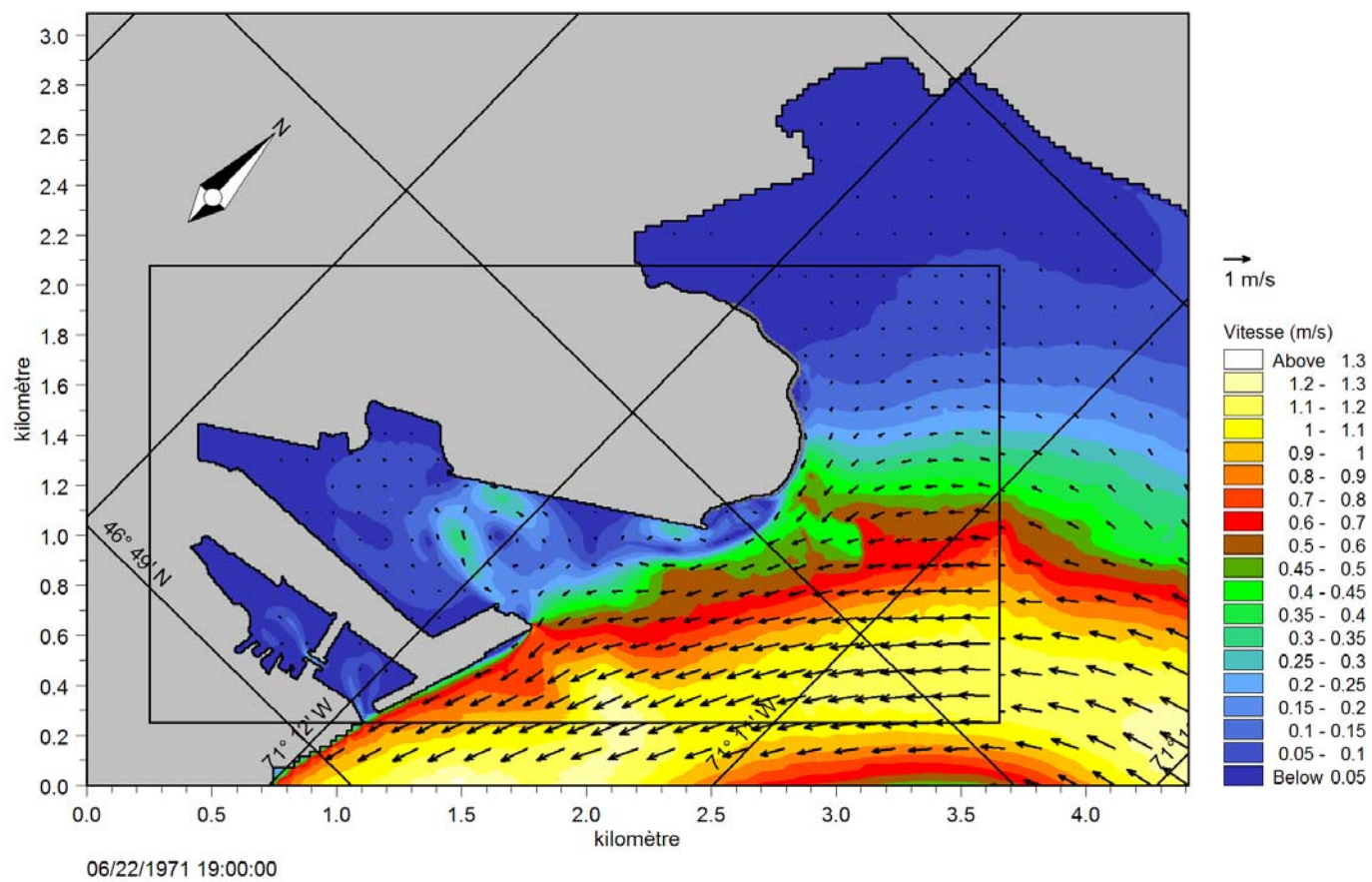
414-101

DATE :

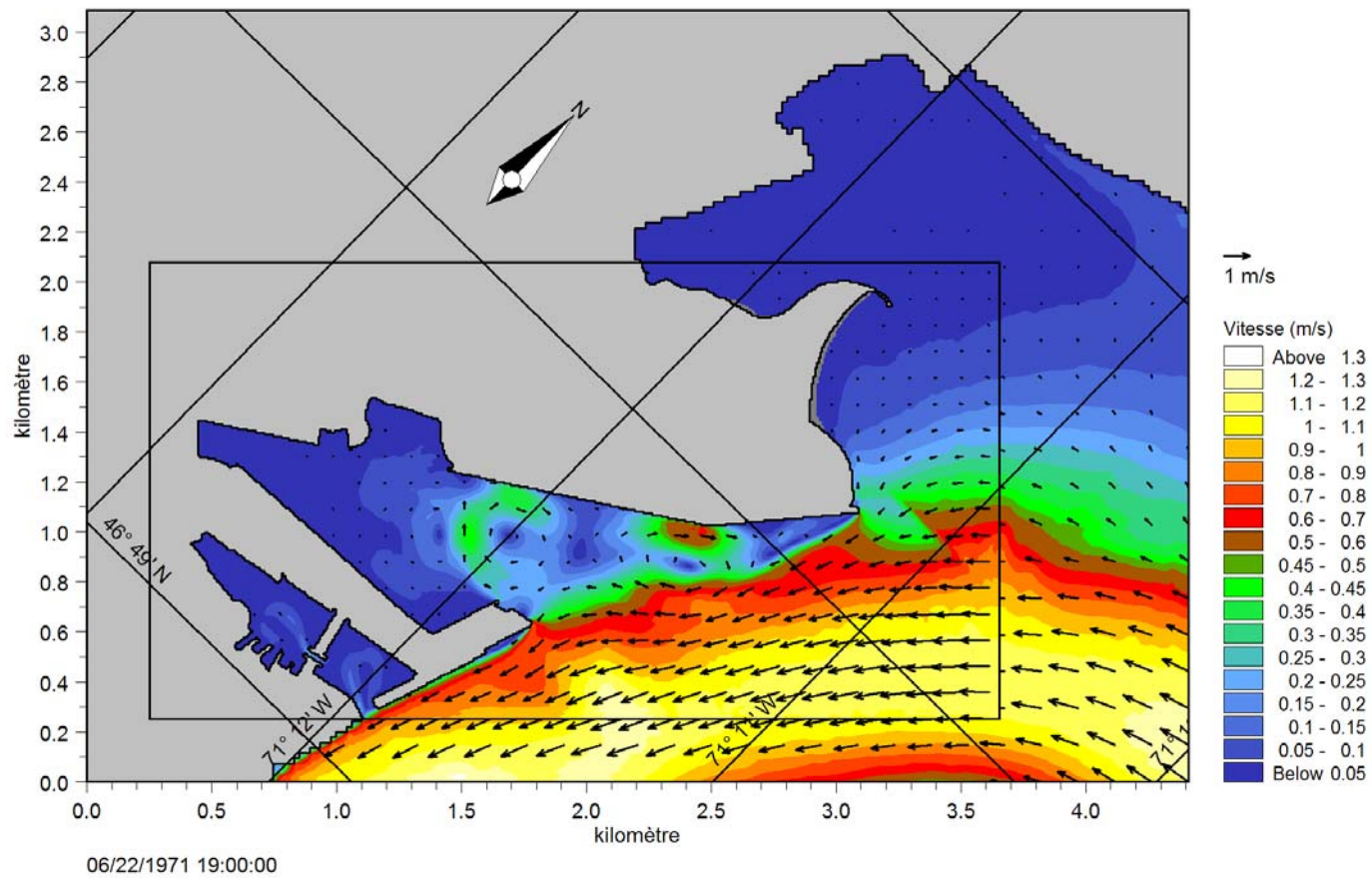
Août 2007

FIGURE :

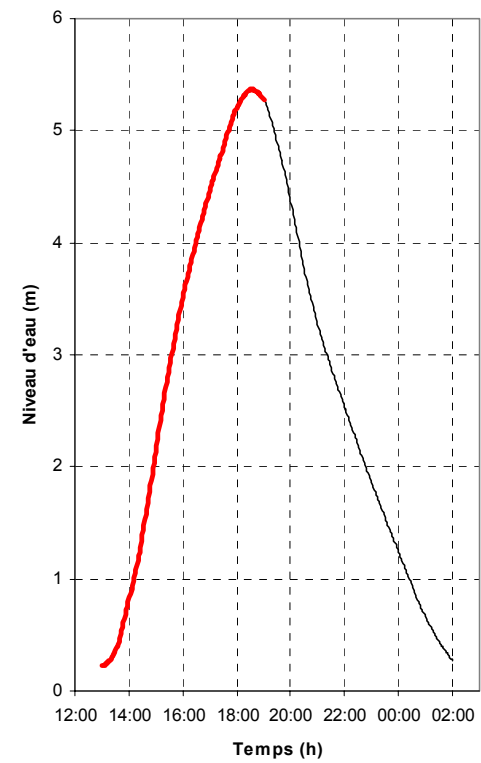
A4



a) Conditions actuelles



b) Conditions futures (variante D2)



Cycle de marée de vive-eau



Le Groupe-Conseil LaSalle

CLIENT :



PORT DE QUÉBEC

Canada

PROJET :

PORT DE QUÉBEC

Nouvelles infrastructures portuaires
Beauport 2007 (J-4161) - Modélisation
numérique des conditions hydrauliques

TITRE :

Cartes des courants de marée de vive-
eau en conditions actuelles et futures

PRÉPARÉ PAR :

GC - MV

REF. CLIENT :

J-4161

REF. LASALLE :

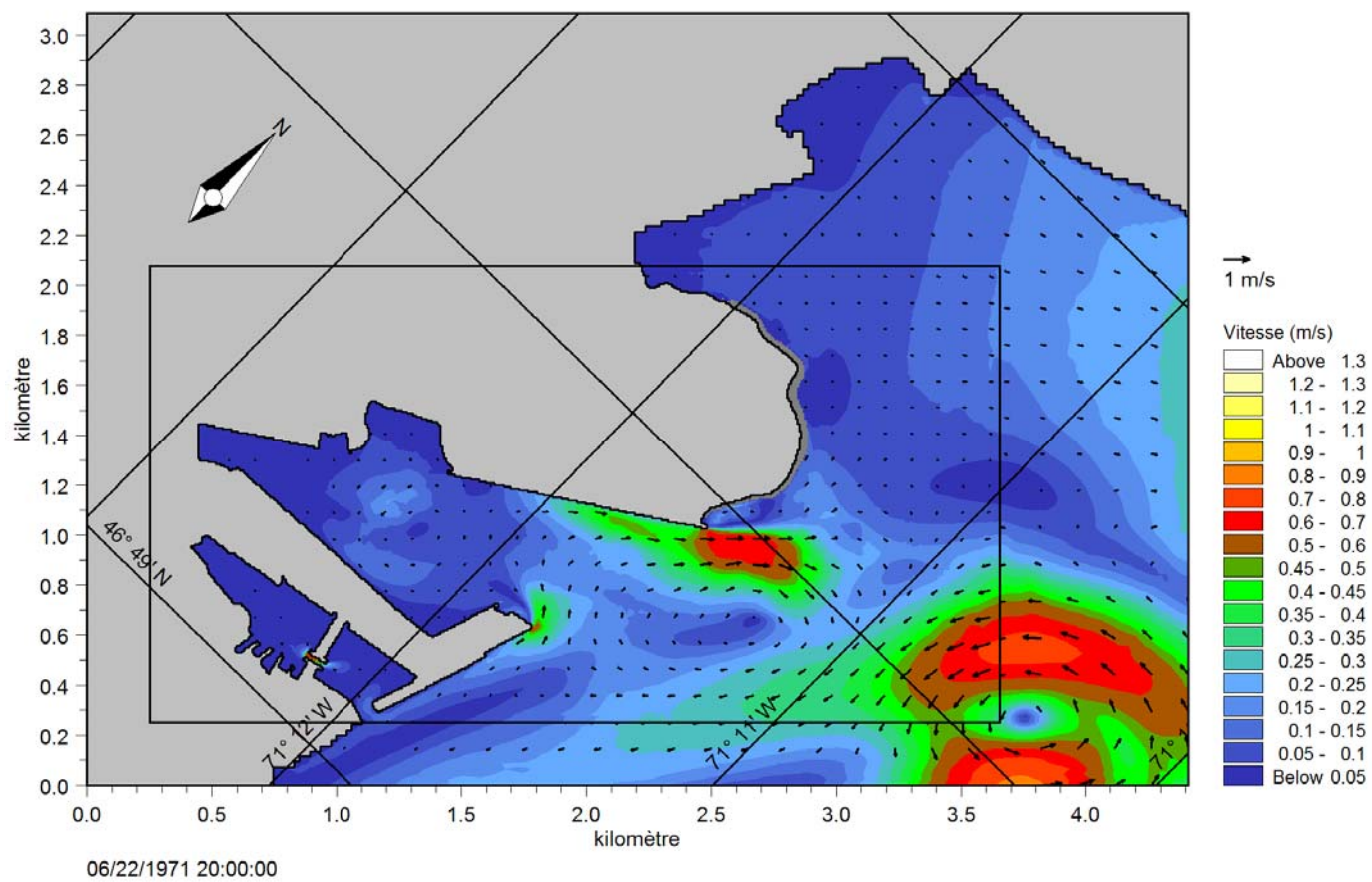
414-101

DATE :

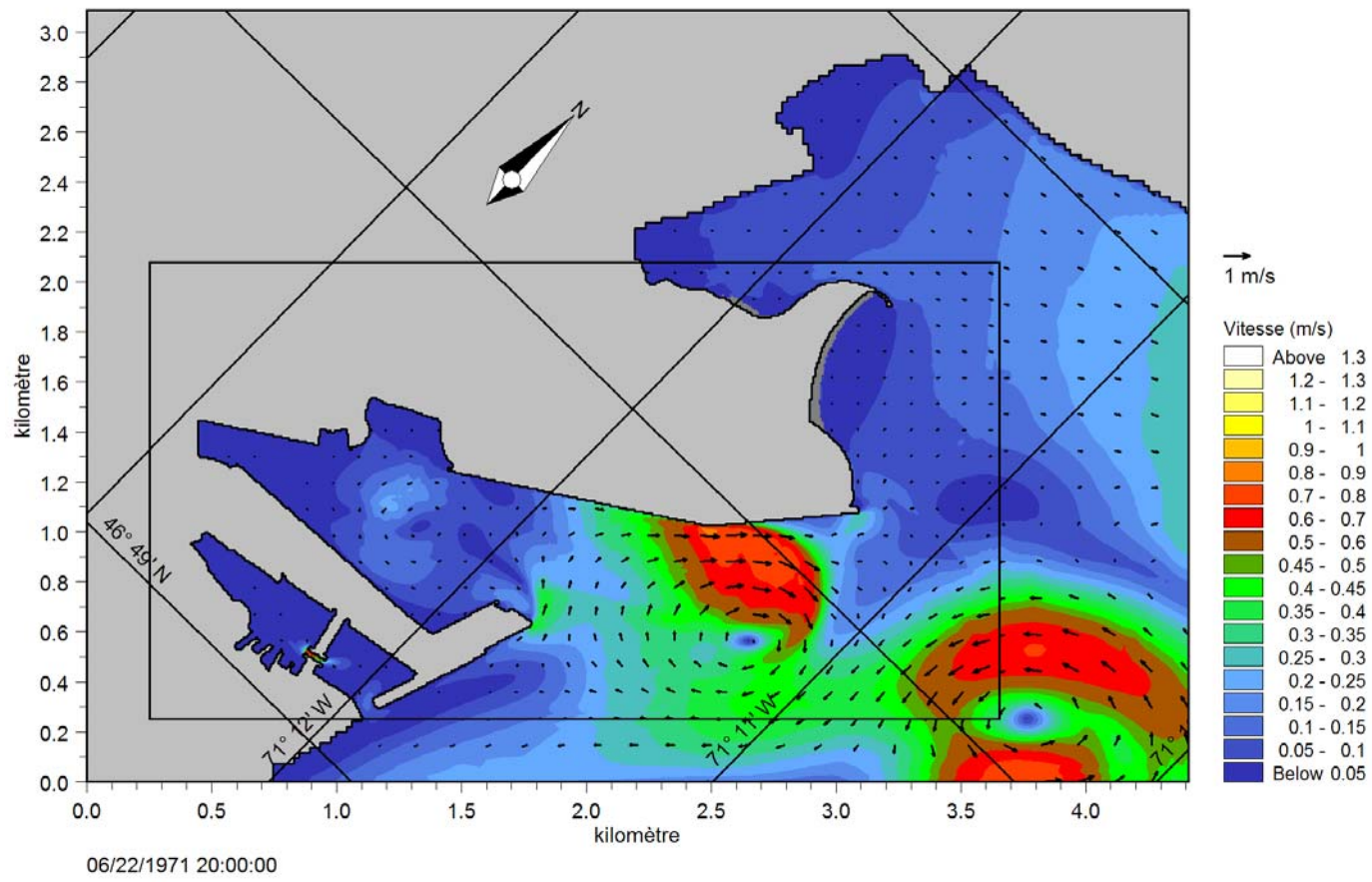
Août 2007

FIGURE :

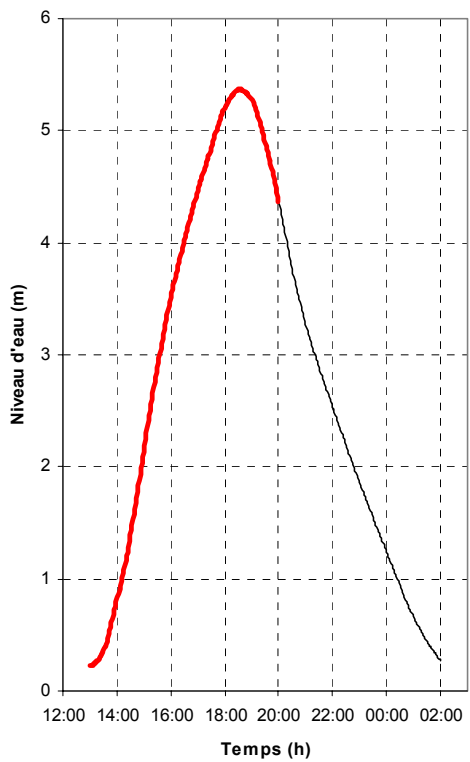
A5



a) Conditions actuelles



b) Conditions futures (variante D2)



Cycle de marée de vive-eau



Le Groupe-Conseil LaSalle

CLIENT :



PORT DE QUÉBEC

Canada

PROJET :

PORT DE QUÉBEC

Nouvelles infrastructures portuaires
Beauport 2007 (J-4161) - Modélisation
numérique des conditions hydrauliques

TITRE :

Cartes des courants de marée de vive-
eau en conditions actuelles et futures

PRÉPARÉ PAR :

GC - MV

REF. CLIENT :

J-4161

REF. LASALLE :

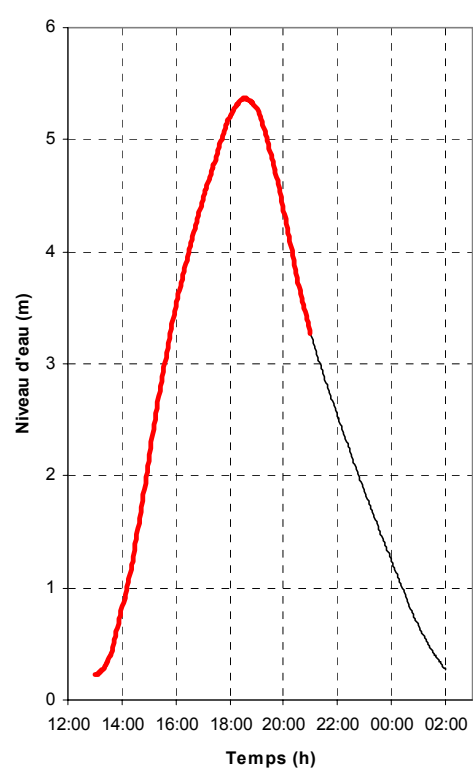
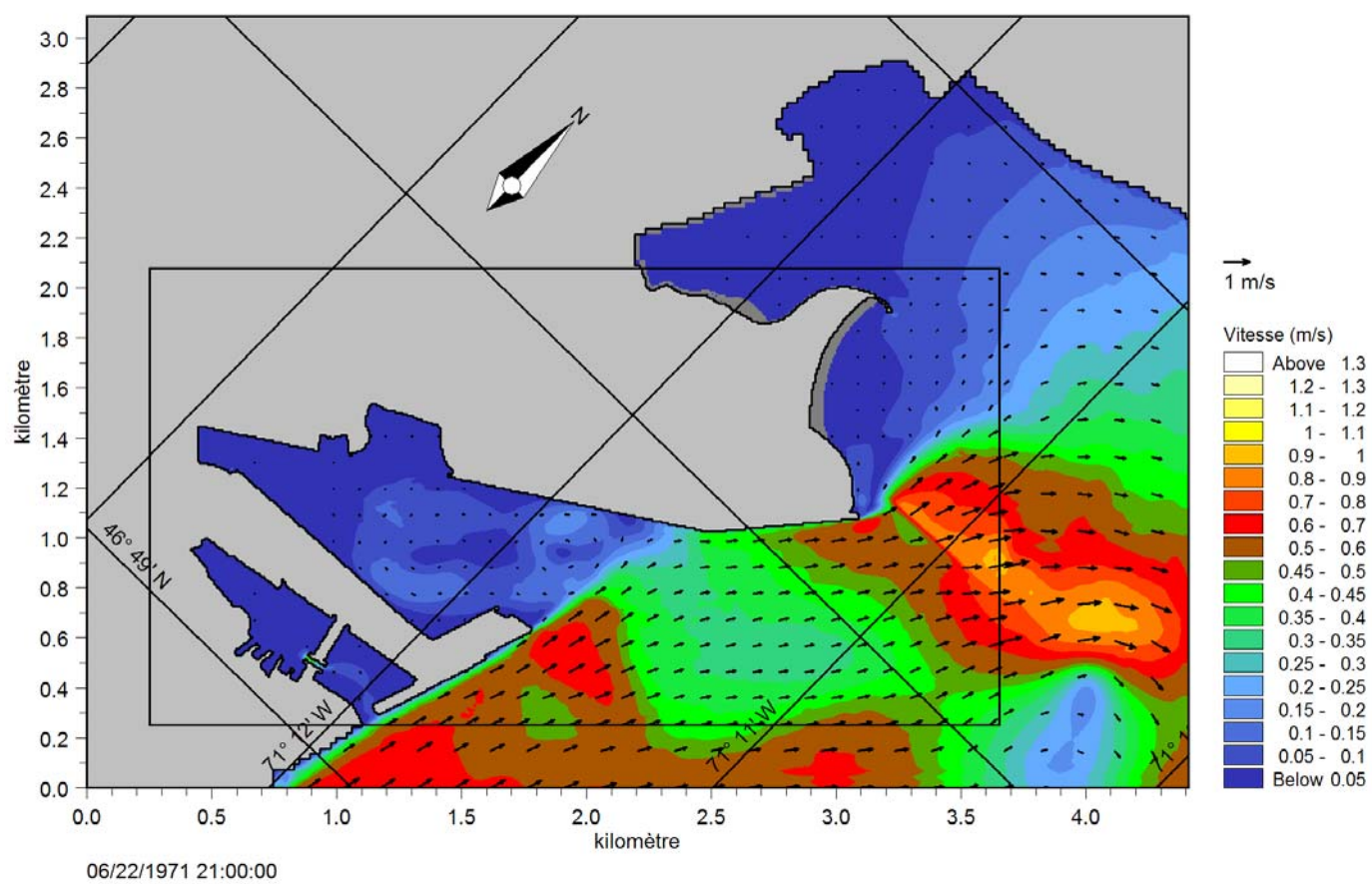
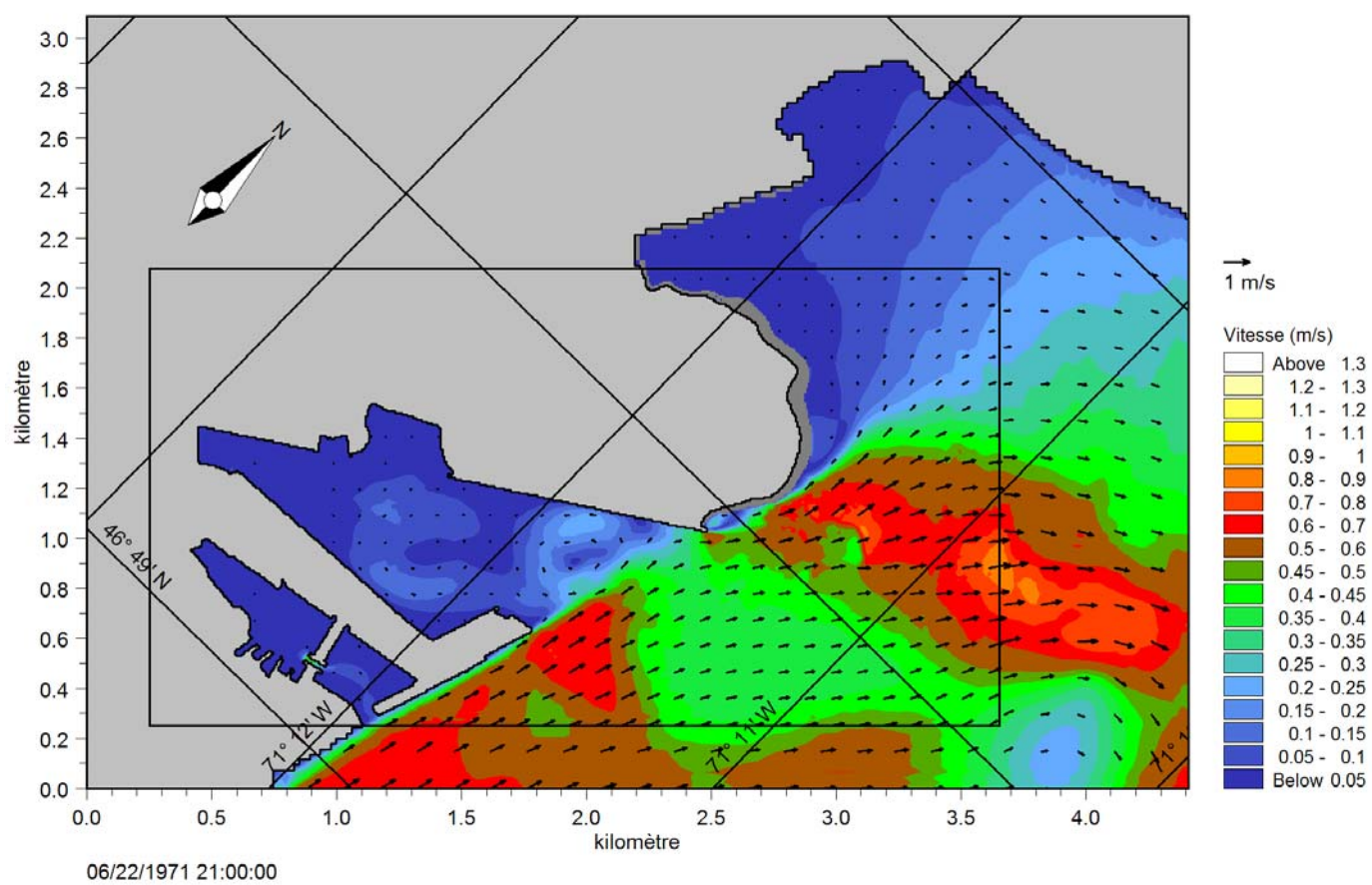
414-101

DATE :

Août 2007

FIGURE :

A6



Le Groupe-Conseil LaSalle

CLIENT :



PORT DE QUÉBEC

Canada

PROJET :

PORT DE QUÉBEC

Nouvelles infrastructures portuaires
Beauport 2007 (J-4161) - Modélisation
numérique des conditions hydrauliques

TITRE :

Cartes des courants de marée de vive-eau en conditions actuelles et futures

PRÉPARÉ PAR :

GC - MV

REF. CLIENT :

J-4161

REF. LASALLE :

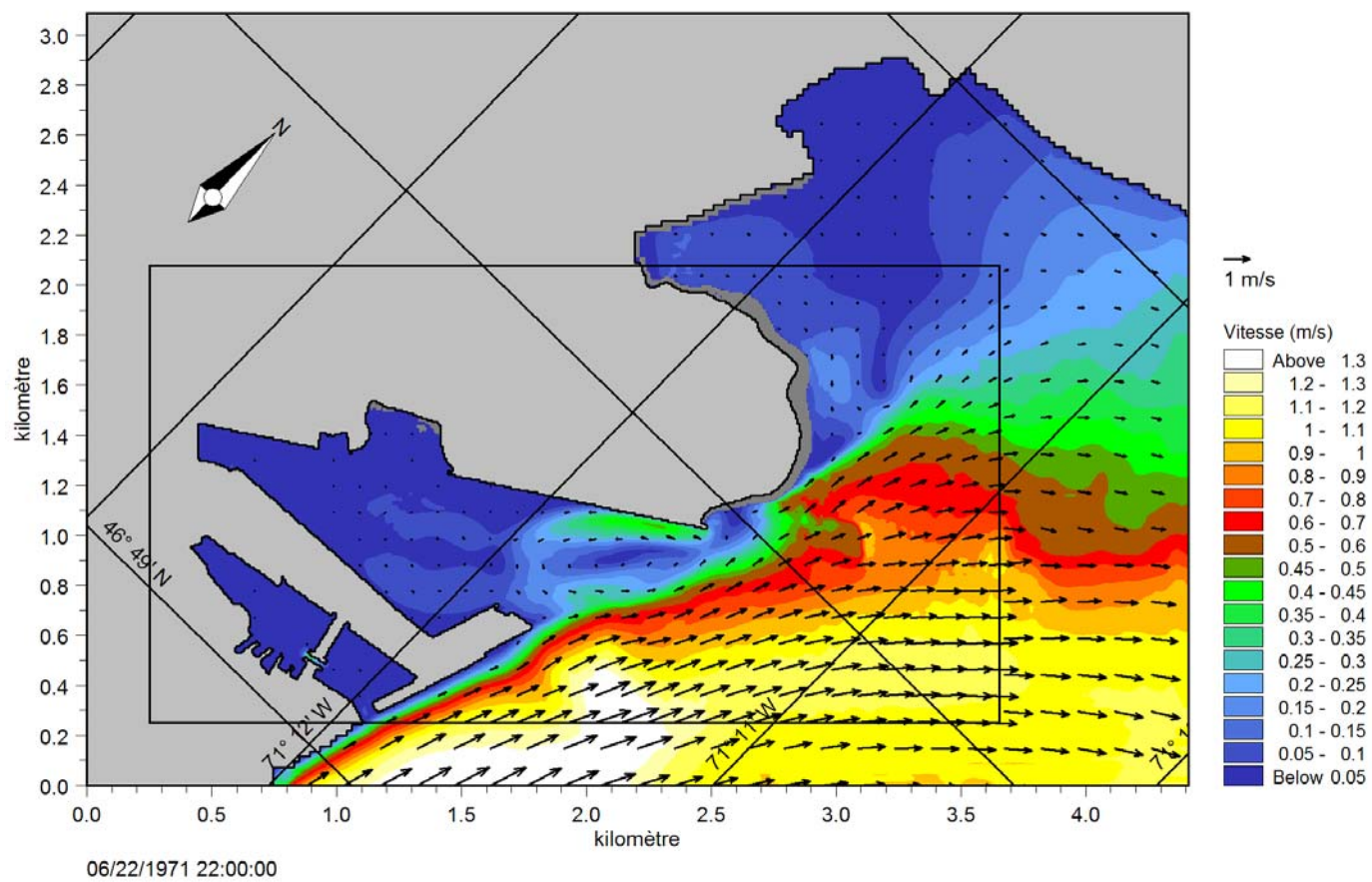
414-101

DATE :

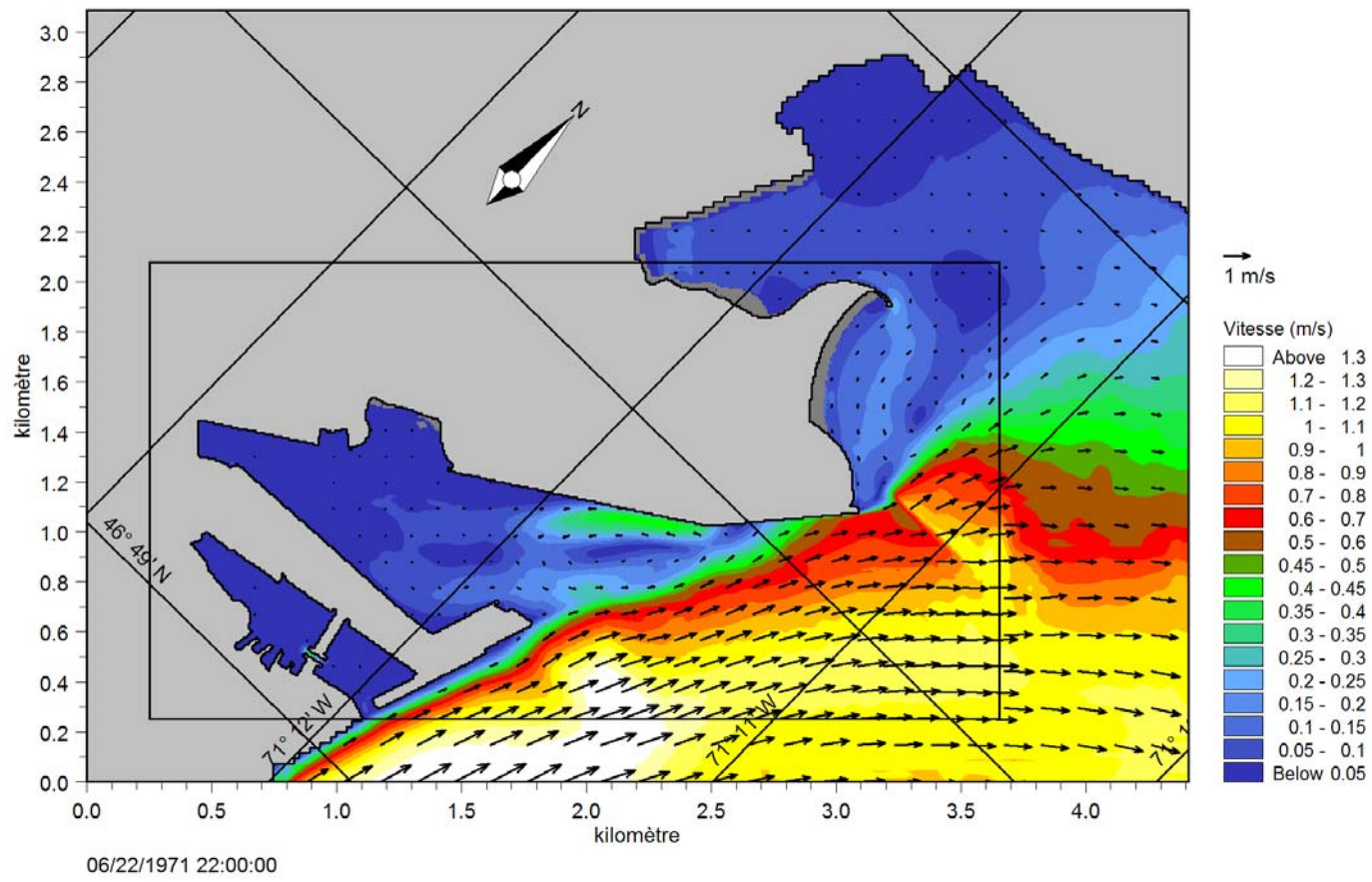
Août 2007

FIGURE :

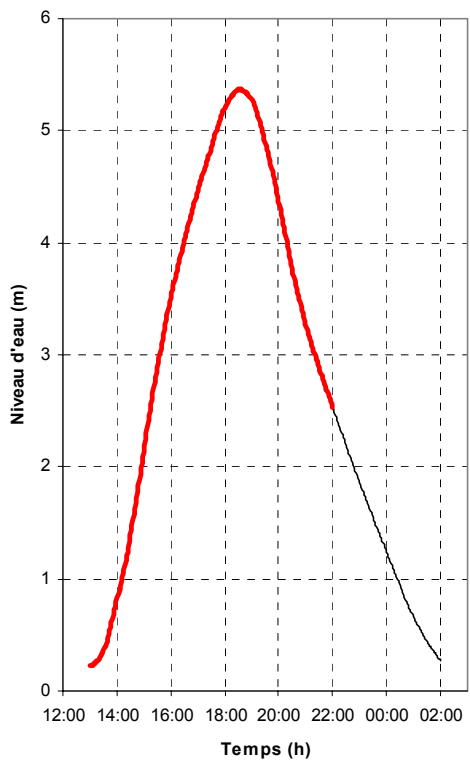
A7



a) Conditions actuelles



b) Conditions futures (variante D2)



Cycle de marée de vive-eau



Le Groupe-Conseil LaSalle

CLIENT :



PORT DE QUÉBEC

Canada

PROJET :

PORT DE QUÉBEC

Nouvelles infrastructures portuaires
Beauport 2007 (J-4161) - Modélisation
numérique des conditions hydrauliques

TITRE :

Cartes des courants de marée de vive-
eau en conditions actuelles et futures

PRÉPARÉ PAR :

GC - MV

REF. CLIENT :

J-4161

REF. LASALLE :

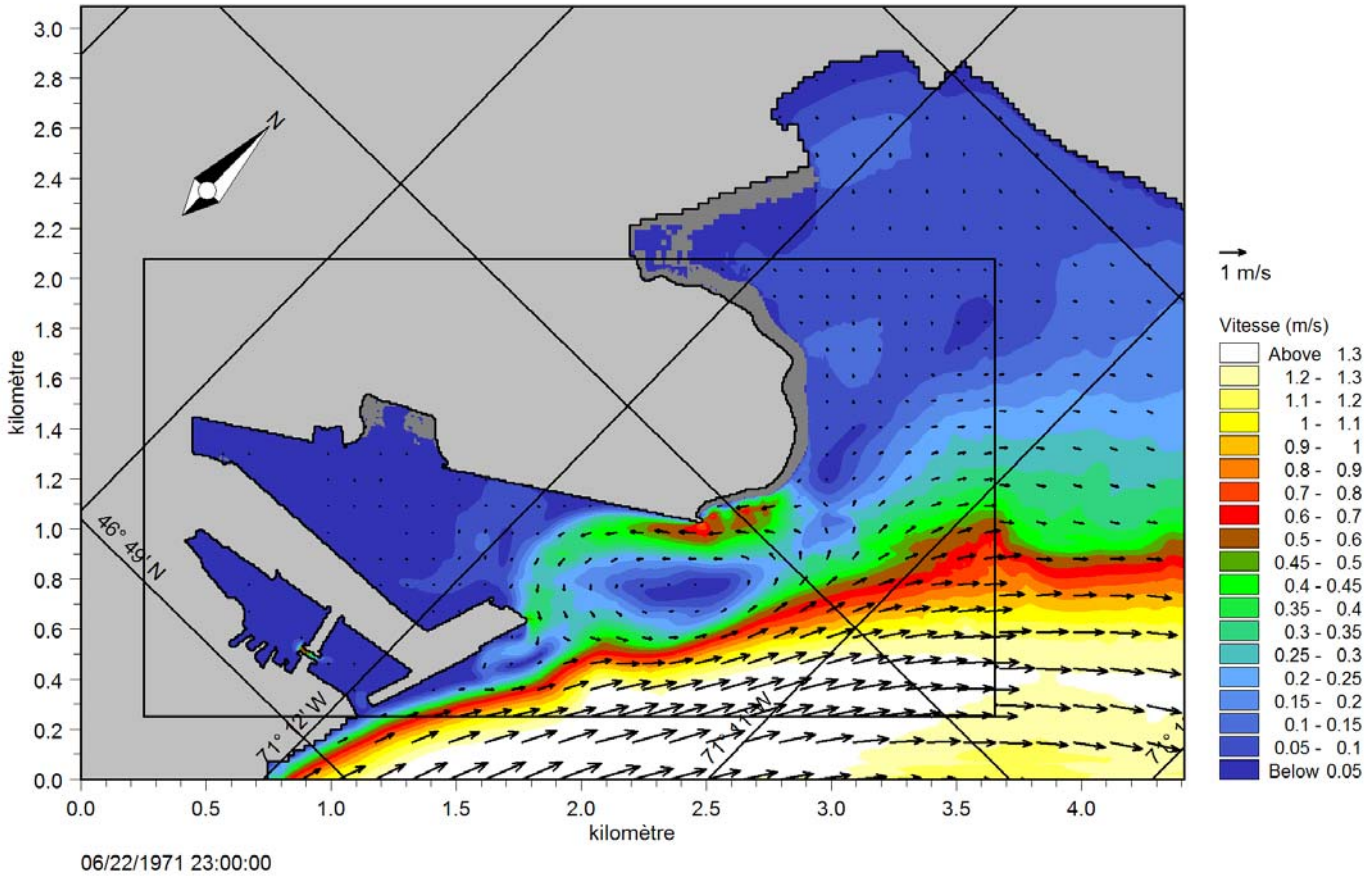
414-101

DATE :

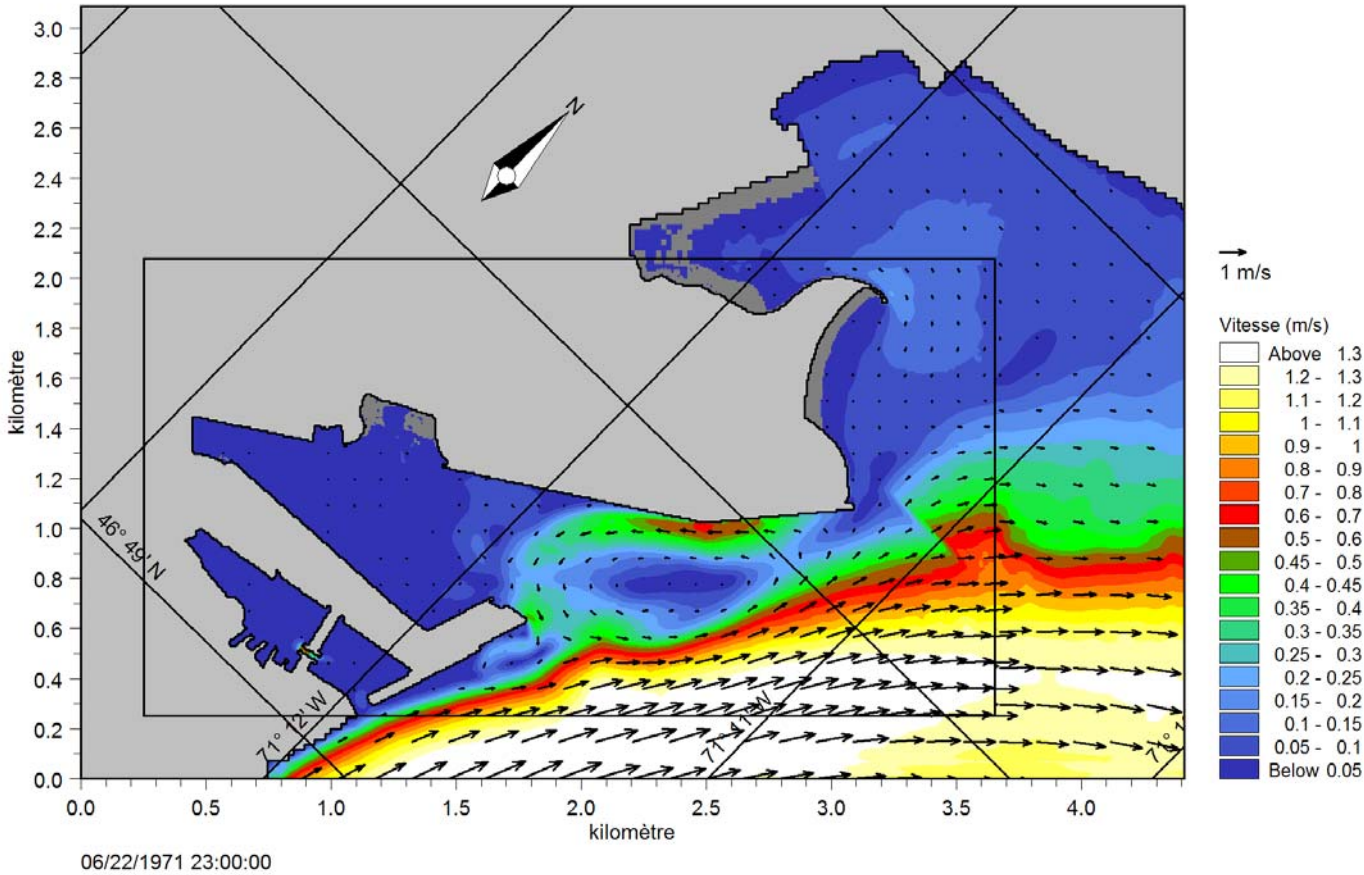
Août 2007

FIGURE :

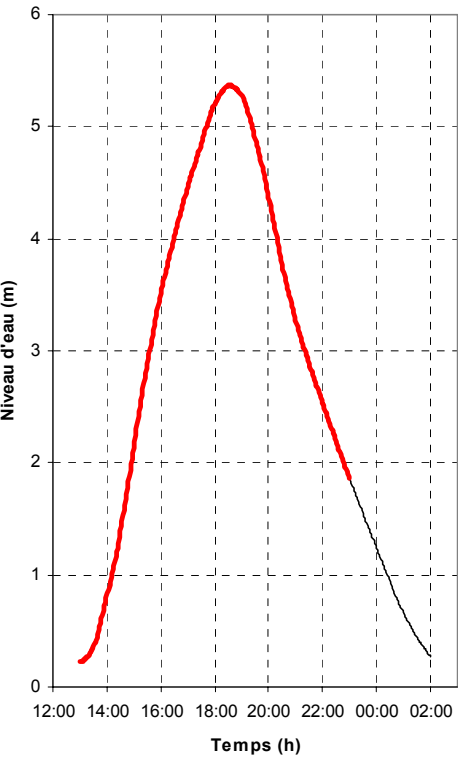
A8



a) Conditions actuelles

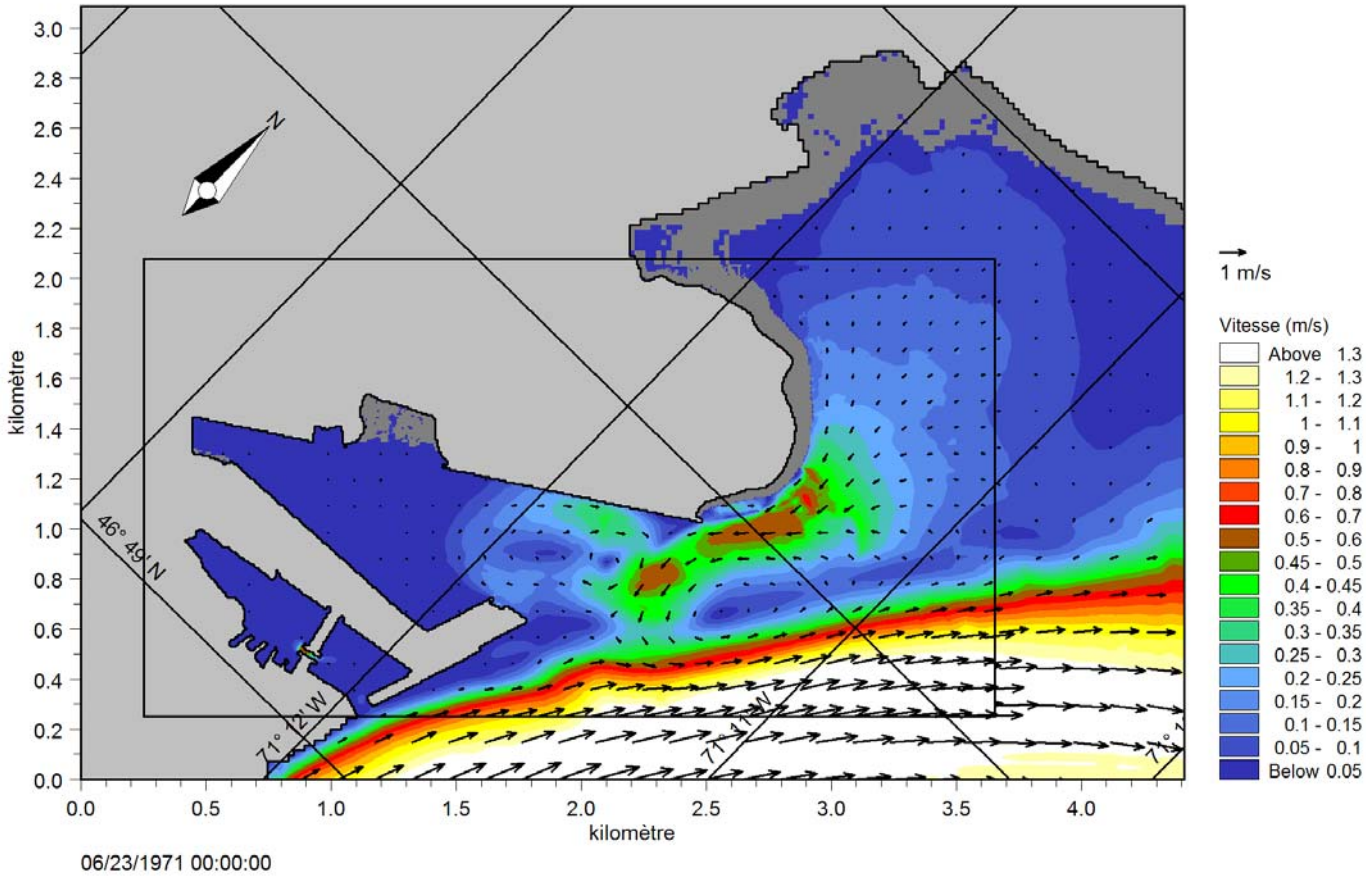


b) Conditions futures (variante D2)

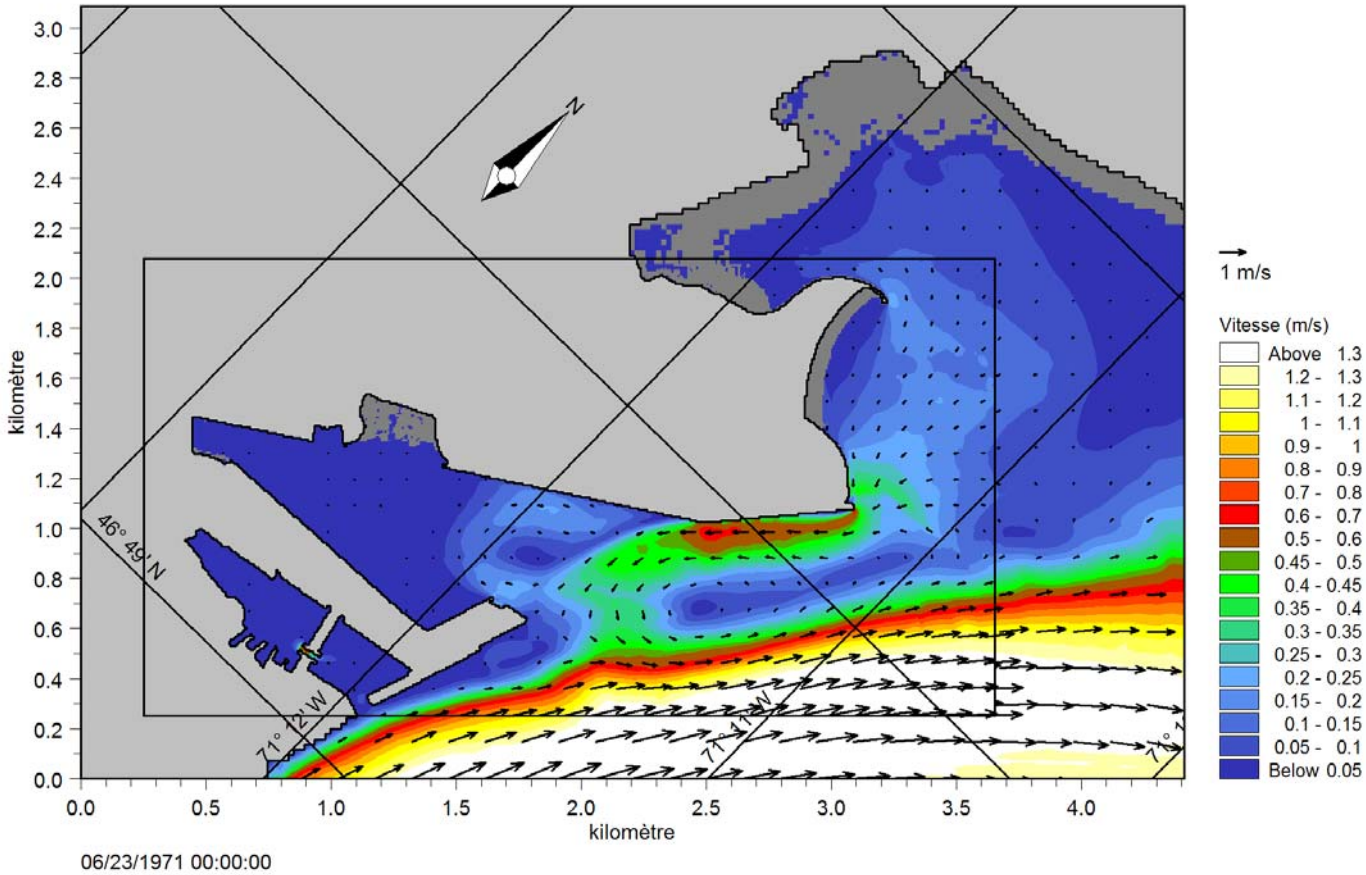


Cycle de marée de vive-eau

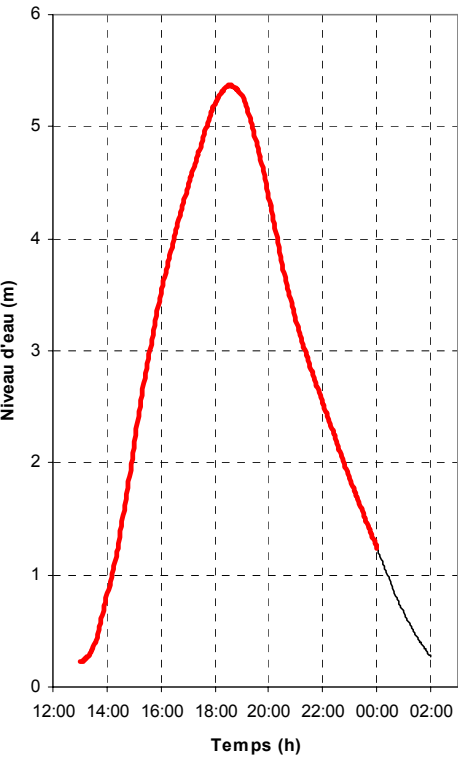
 Le Groupe-Conseil LaSalle		
CLIENT :  PORT DE QUÉBEC Canada		
PROJET : PORT DE QUÉBEC Nouvelles infrastructures portuaires Beauport 2007 (J-4161) - Modélisation numérique des conditions hydrauliques		
TITRE : Cartes des courants de marée de vive- eau en conditions actuelles et futures		
PRÉPARÉ PAR : GC - MV	REF. CLIENT : J-4161	REF. LASALLE : 414-101
DATE : Août 2007		FIGURE : A9



a) Conditions actuelles

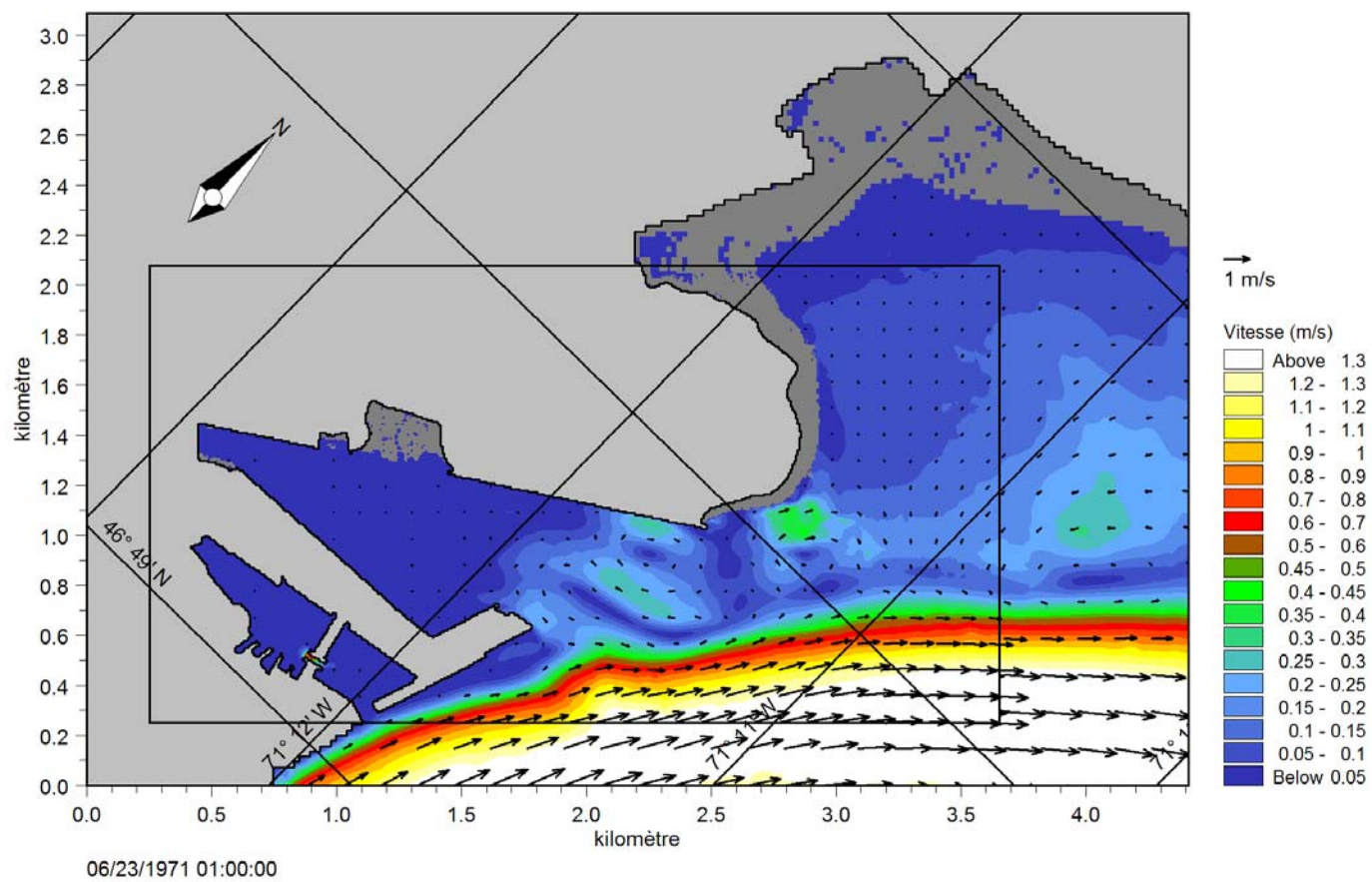


b) Conditions futures (variante D2)

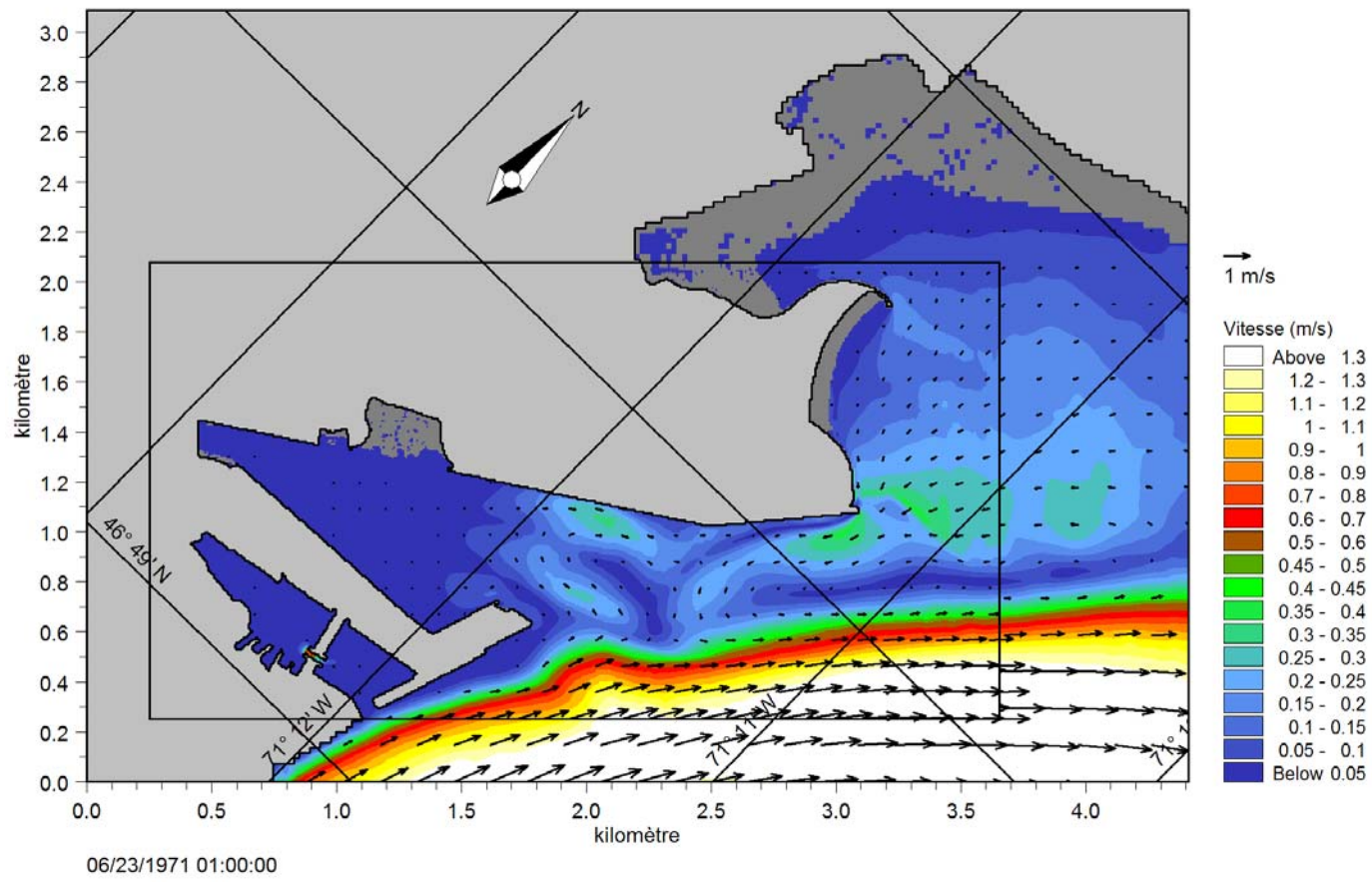


Cycle de marée de vive-eau

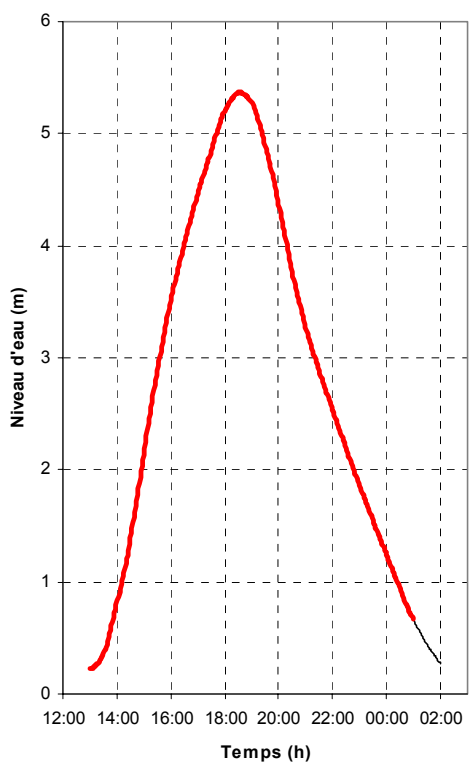
 Le Groupe-Conseil LaSalle		
CLIENT :  PORT DE QUÉBEC Canada		
PROJET : PORT DE QUÉBEC Nouvelles infrastructures portuaires Beauport 2007 (J-4161) - Modélisation numérique des conditions hydrauliques		
TITRE : Cartes des courants de marée de vive- eau en conditions actuelles et futures		
PRÉPARÉ PAR : GC - MV	REF. CLIENT : J-4161	REF. LASALLE : 414-101
DATE : Août 2007		FIGURE : A10



a) Conditions actuelles



b) Conditions futures (variante D2)



Cycle de marée de vive-eau



Le Groupe-Conseil LaSalle

CLIENT :



PORT DE QUÉBEC

Canada

PROJET :

PORT DE QUÉBEC

Nouvelles infrastructures portuaires
Beauport 2007 (J-4161) - Modélisation
numérique des conditions hydrauliques

TITRE :

Cartes des courants de marée de vive-
eau en conditions actuelles et futures

PRÉPARÉ PAR :

GC - MV

REF. CLIENT :

J-4161

REF. LASALLE :

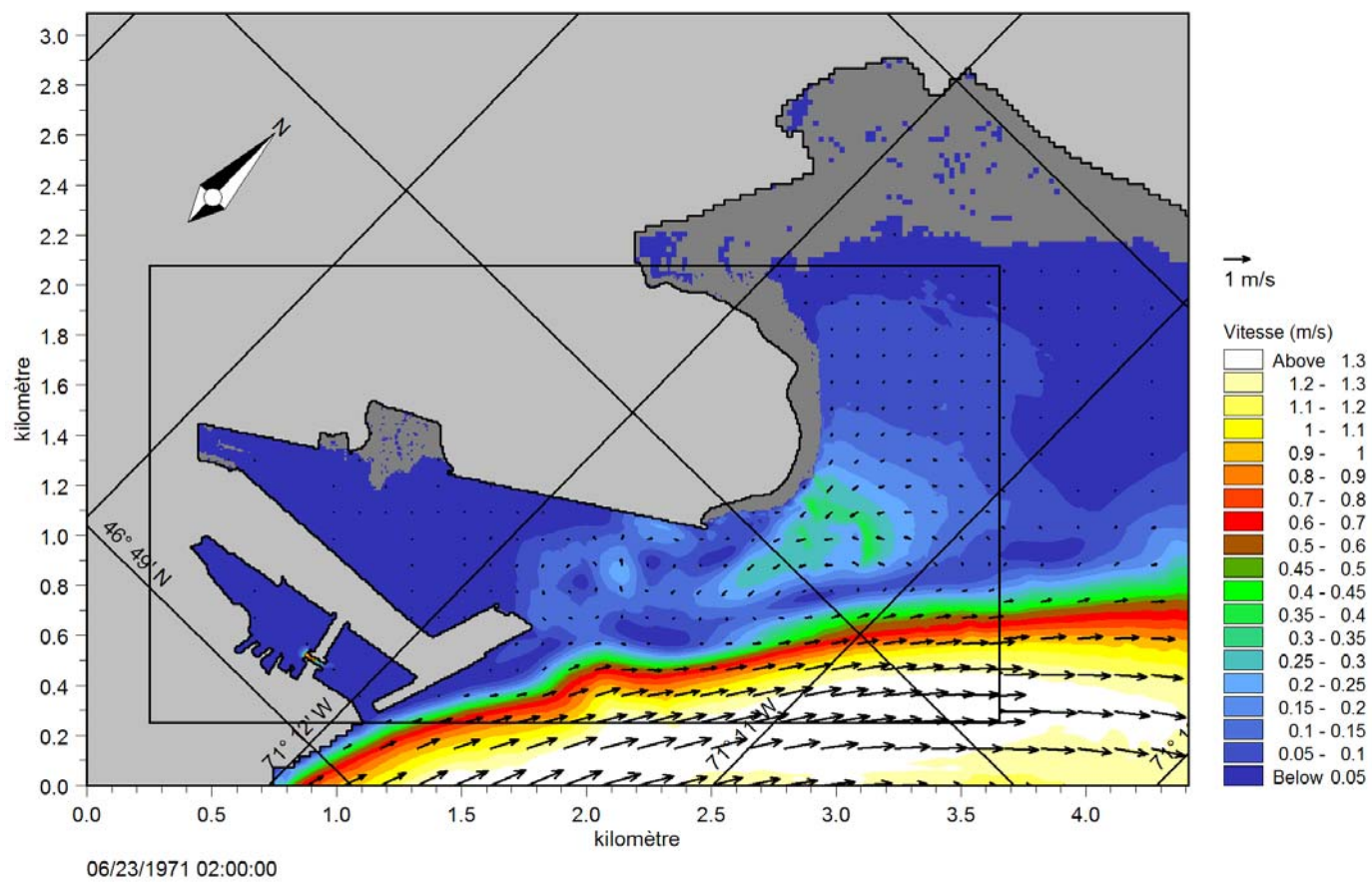
414-101

DATE :

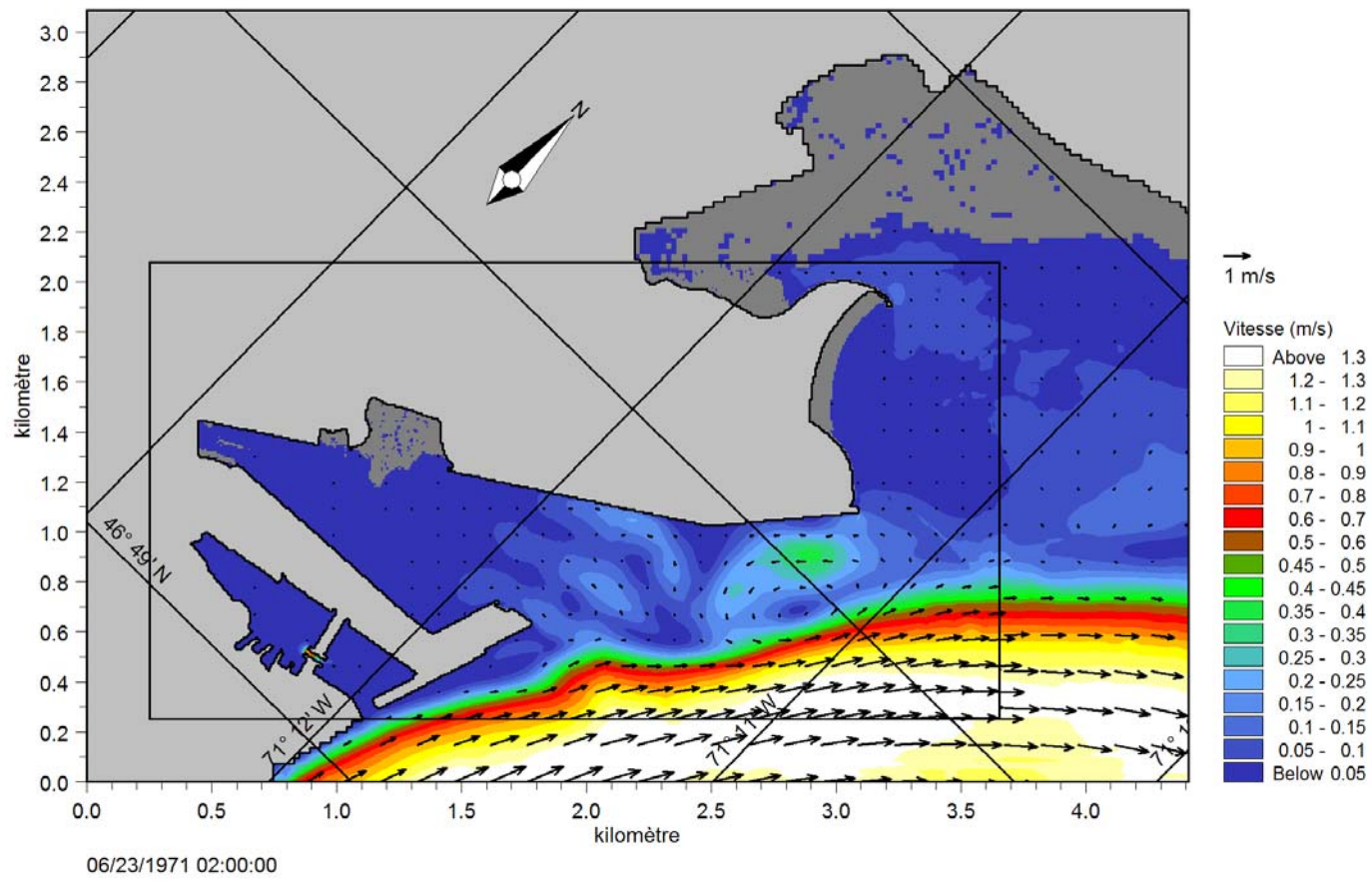
Août 2007

FIGURE :

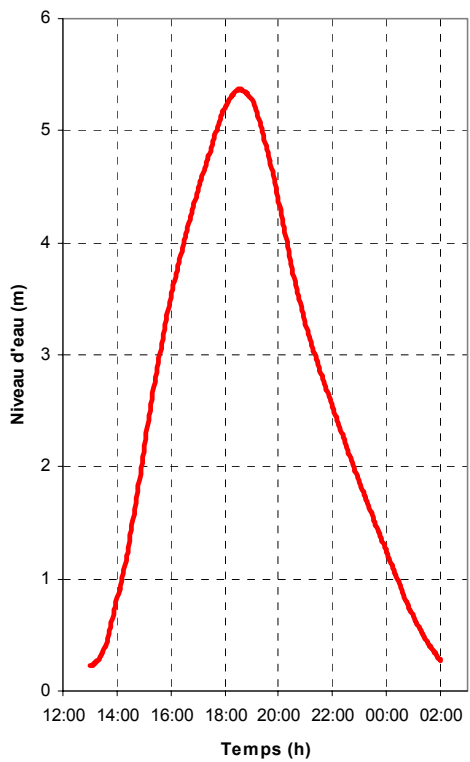
A11



a) Conditions actuelles

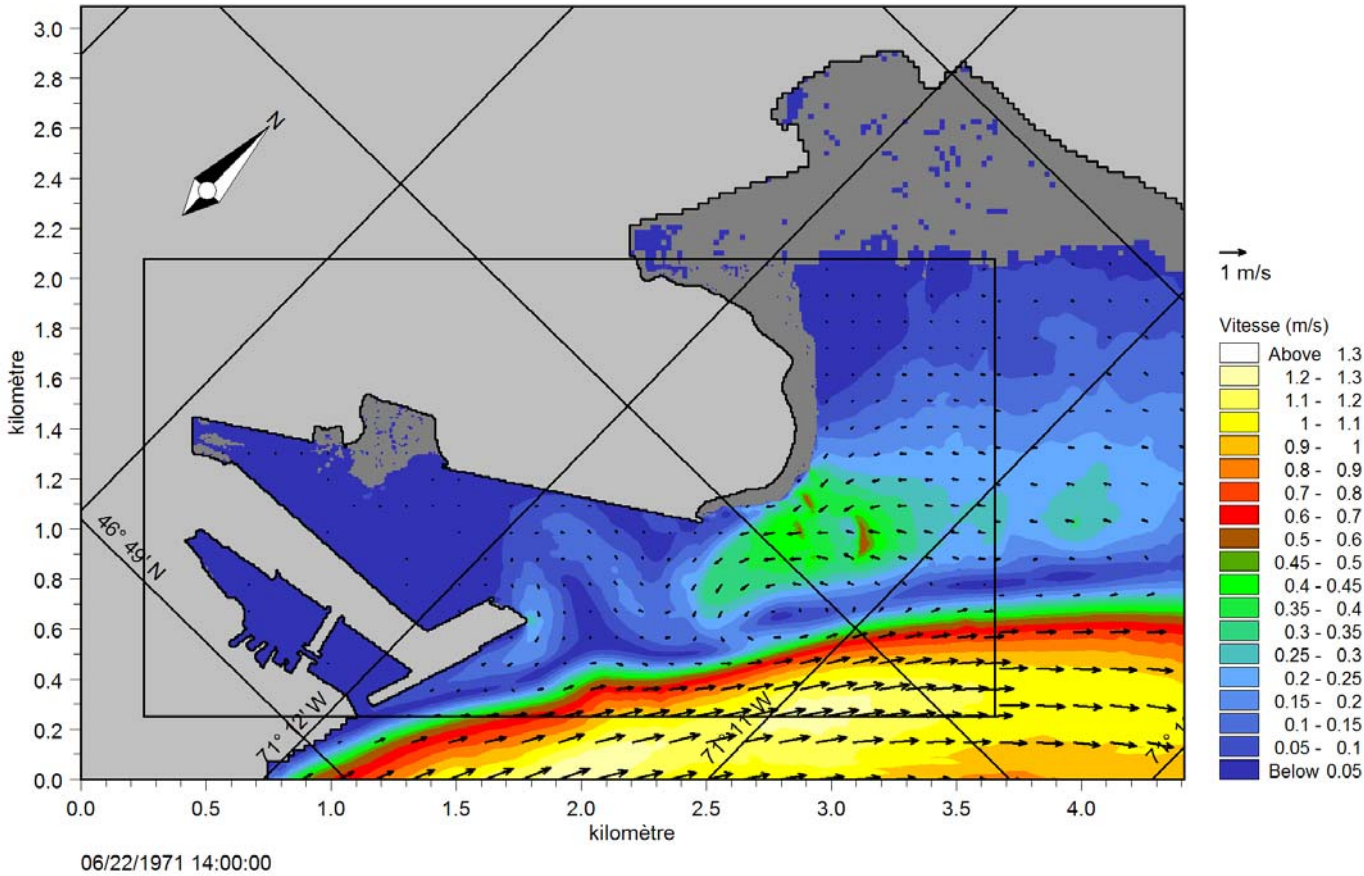


b) Conditions futures (variante D2)

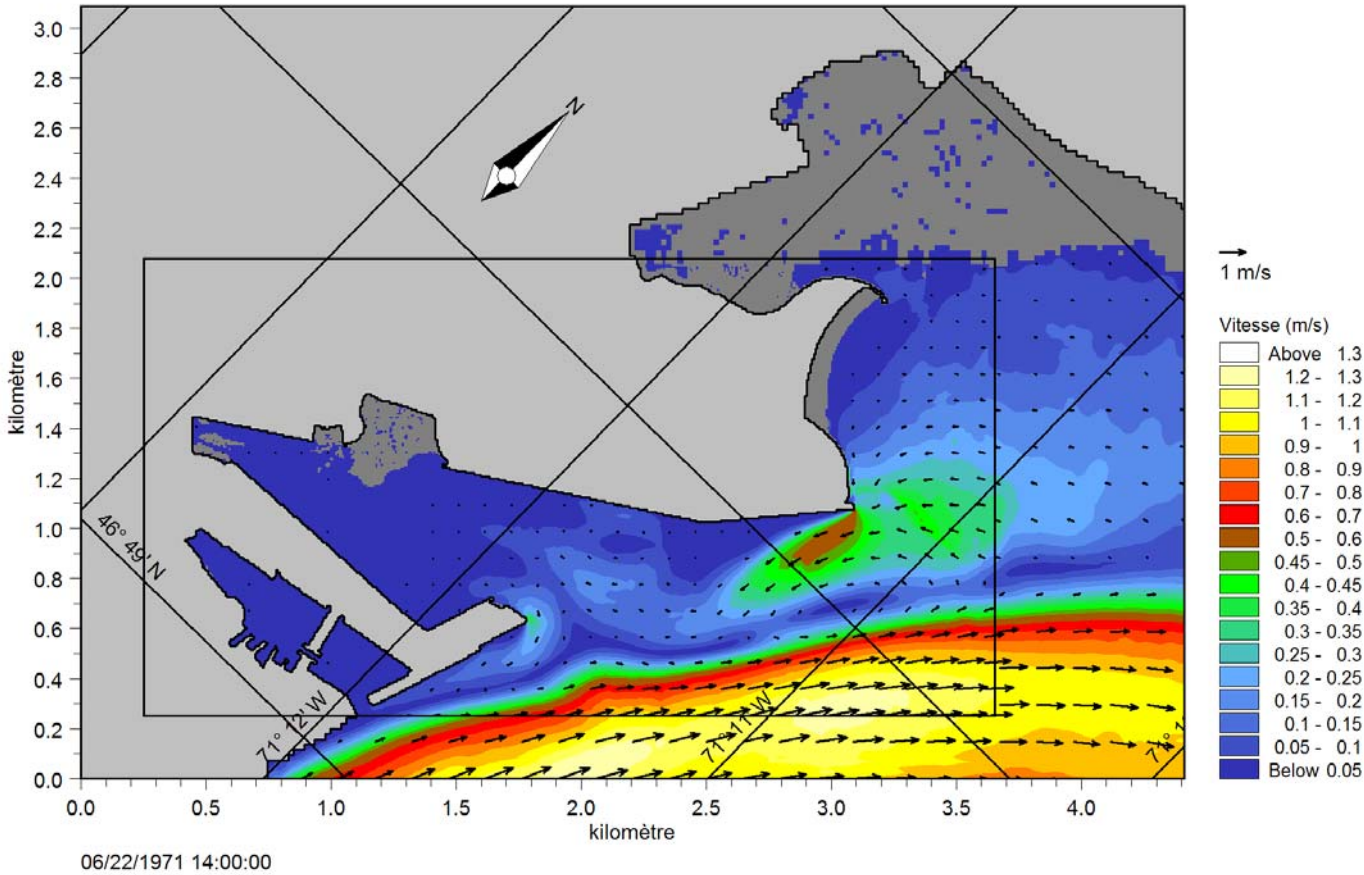


Cycle de marée de vive-eau

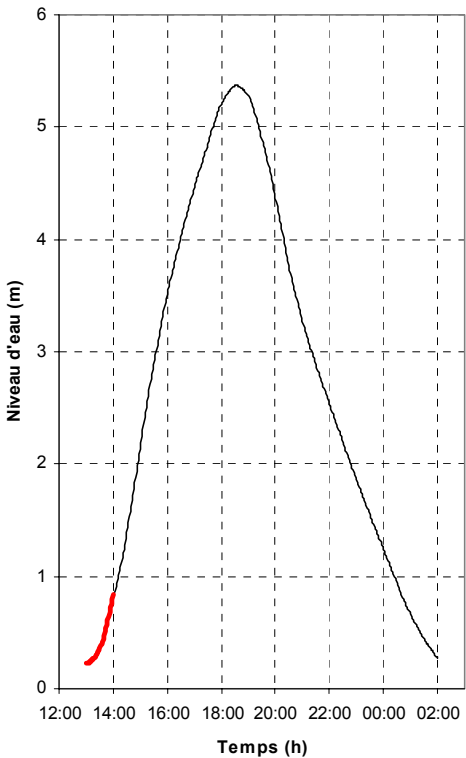
 Le Groupe-Conseil LaSalle		
CLIENT : 		
PROJET : PORT DE QUÉBEC Nouvelles infrastructures portuaires Beauport 2007 (J-4161) - Modélisation numérique des conditions hydrauliques		
TITRE : Cartes des courants de marée de vive- eau en conditions actuelles et futures		
PRÉPARÉ PAR : GC - MV	REF. CLIENT : J-4161	REF. LASALLE : 414-101
DATE : Août 2007		FIGURE : A12



a) Conditions actuelles



b) Conditions futures (variante D2)



Cycle de marée de vive-eau

 Le Groupe-Conseil LaSalle		
CLIENT :  PORT DE QUÉBEC Canada		
PROJET : PORT DE QUÉBEC Nouvelles infrastructures portuaires Beauport 2007 (J-4161) - Modélisation numérique des conditions hydrauliques		
TITRE : Cartes des courants de marée de vive- eau en conditions actuelles et futures		
PRÉPARÉ PAR : GC - MV	REF. CLIENT : J-4161	REF. LASALLE : 414-101
DATE : Août 2007		FIGURE : A13