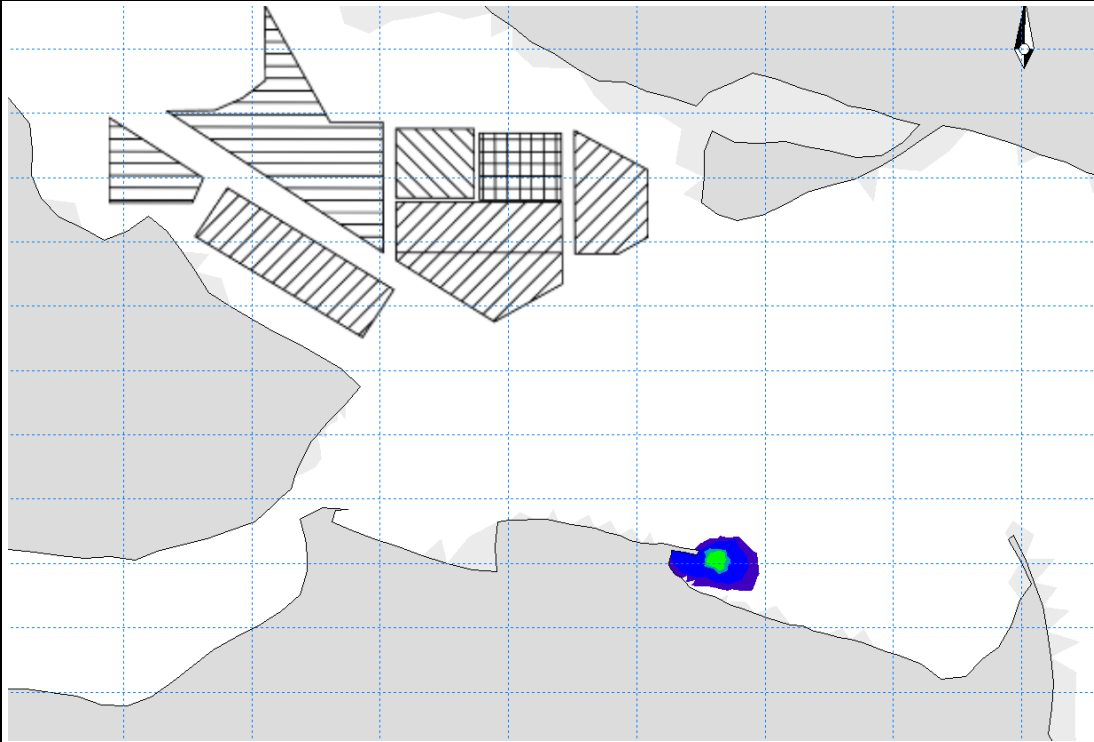




Travaux publics et
Services gouvernementaux
Canada

Public Works and
Government Services
Canada



QUAI DE GASPÉ – SANDY BEACH

Modélisation numérique de la dispersion des sédiments dragués



Groupe-Conseil LaSalle

Rapport no 1768
Novembre 2010



Groupe-Conseil LaSalle Inc.

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

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

Internet: www.gcl.qc.ca

e-mail: gcl@gcl.qc.ca

Rapport présenté à



Travaux publics et
Services gouvernementaux
Canada

Public Works and
Government Services
Canada

QUAI DE GASPÉ – SANDY BEACH
Modélisation numérique de la dispersion des matériaux dragués

Rapport no 1768

Novembre 2010

Préparé par :

Marc Villeneuve, ing.

Tristan Aubel, ing.

009-111 (1113)

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	iii
LISTE DES FIGURES	iv
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	4
3.0 DONNÉES DE BASE	7
3.1 Études antérieures.....	7
3.2 Données bathymétriques.....	7
3.3 Température et salinité.....	9
3.4 Courants.....	16
3.4.1 Pettigrew et al. (1991).....	16
3.4.2 Koutitonsky et al. (2001).....	18
3.4.3 Gagnon (2010).....	19
3.5 Marée.....	20
3.6 Vent.....	22
3.7 Vagues.....	25
3.8 Débit des rivières.....	26
4.0 MODÉLISATION DE L'HYDRODYNAMIQUE ET DES GRADIENTS DE DENSITÉ	27
4.1 Outils de modélisation.....	27
4.2 Limites du modèle et bathymétrie numérique.....	27
4.3 Conditions aux limites.....	32
4.3.1 Température – Salinité.....	32
4.3.2 Niveaux de marée.....	32
4.3.3 Débits des rivières.....	32
4.3.4 Vent.....	32
4.4 Conditions initiales.....	33
4.5 Paramètres de modélisation.....	33
4.5.1 Durée des simulations et pas de temps.....	33
4.5.2 Rugosité des fonds.....	33
4.5.3 Viscosité turbulente.....	33
4.6 Scénarios simulés.....	33
4.7 Résultats.....	34
4.7.1 Données de validation.....	34
4.7.2 Résultats – Simulation de base.....	35

TABLE DES MATIÈRES (suite)

5.0	MODÉLISATION DE LA DISPERSION DES SÉDIMENTS DRAGUÉS	38
5.1	Outil de modélisation	38
5.2	Hypothèses de base	39
5.2.1	Volume dragué et cadence des travaux	39
5.2.2	Caractéristiques des sédiments dragués	40
5.2.3	Pertes et remise en suspension des sédiments au site de dragage	41
5.2.4	Vitesses de chute	42
5.2.5	Concentration des contaminants	42
5.3	Conditions initiales et aux limites	44
5.4	Paramètres de modélisation	44
5.5	Résultats - Simulation de base	44
5.6	Sensibilité des résultats	48
5.6.1	Type de drague	48
5.6.2	Localisation des travaux	50
5.6.3	Circulation et gradients de densité dans la baie de Gaspé	52
5.6.4	Débits des rivières	55
5.6.5	Vagues et vents locaux	58
5.6.6	Caractéristiques granulo-chimiques	58
5.6.7	Critère de limitation de l'étendue des panaches	60
5.7	Scénario d'accident - Renversement de la barge	62
6.0	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	64
	RÉFÉRENCES.....	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Courants maximums de flot et de jusant dans le havre de Gaspé.....	17
Tableau 2 : Hydrologie des affluents du havre et de la baie de Gaspé	26
Tableau 3 : Débits correspondant aux périodes de simulation du modèle de l'OGSL.....	26
Tableau 4 : Pertes de sédiments au site des travaux de dragage	39
Tableau 5 : Caractéristiques des sédiments dragués	40
Tableau 6 : Vitesses de chute des sédiments et concentrations imposées au site des travaux de dragage	43

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Plan de localisation	2
Figure 2 : Étendue de la zone à draguer.....	3
Figure 3 : Baie et havre de Gaspé - Levés bathymétriques disponibles.....	9
Figure 4 : Couverture du modèle global de l'OGSL dans le secteur à l'étude	11
Figure 5 : Profils verticaux de la température et de la salinité à l'entrée de la baie de Gaspé	14
Figure 6 : Évolution de la température à l'entrée de la baie de Gaspé	15
Figure 7 : Campagne de mesures de Pettigrew (1991) – Emplacement des courantomètres	16
Figure 8 : Suivi d'un flotteur dérivant – 25 juin 2009	19
Figure 9 : Niveaux de marée.....	21
Figure 10 : Localisation de l'aéroport de Gaspé (station de référence pour le vent)	22
Figure 11 : Rose des vents à l'aéroport de Gaspé.....	23
Figure 12 : Épisode de vent calme – Septembre 1997	24
Figure 13 : Vent soutenu sortant de la baie – Novembre 1997.....	24
Figure 14 : Vent soutenu entrant dans la baie – Août 1997.....	25
Figure 15 : Limites du modèle et montage de la bathymétrie numérique	28
Figure 16 : Discrétisation spatiale	29
Figure 17 : Vue tridimensionnelle de la bathymétrie d'ensemble.....	30
Figure 18 : Bathymétrie numérique – Havre de Gaspé.....	31
Figure 19 : Simulation de base – Courants maximums au flot.....	36
Figure 20 : Simulation de base – Courants maximums au jusant.....	37
Figure 21 : Localisation des travaux de dragage – Simulation de base.....	45
Figure 22 : Vue en plan du panache de dispersion – Simulation de base avec dragage hydraulique	46

LISTE DES FIGURES (suite)

Figure 23 : Coupe verticale du panache – Simulation de base avec dragage hydraulique	47
Figure 24 : Vue en plan du panache de dispersion – Dragage mécanique	49
Figure 25 : Coupe verticale du panache – Dragage mécanique	50
Figure 26 : Taille maximale du panache (dragage mécanique) – Influence de la position de la drague	51
Figure 27 : Dragage hydraulique – Cas de base et épisode de vent soutenu du NO	53
Figure 28 : Conditions d'écoulement en période de crue des rivières Dartmouth et York	56
Figure 29 : Dragage hydraulique – Cas de base et épisode de crue	57
Figure 30 : Cas de base avec un vent du SSE de 30 km/h	59
Figure 31 : Cas de base avec critère de concentration ambiante de 0,60 µg/L de cuivre	61
Figure 32 : Panache de dispersion formé par le renversement d'une barge de 120 m ³ dans la zone A	63

1.0 INTRODUCTION

Transports Canada envisage de réaliser un projet de restauration de sédiments contaminés près de son installation portuaire dans le havre de Gaspé (figure 1). Plus précisément, le projet consiste à draguer 37 700 mètres cubes de sédiments en place sur une superficie approximative de 60 000 mètres carrés, au sud et à l'est du quai commercial (figure 2).

Des préoccupations ont été formulées par le milieu, entre autres par les mariculteurs, concernant les risques de remise en suspension et de dispersion des sédiments dragués. En vue de répondre aux questions soulevées, Transports Canada a confié à Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (TPSGC) la supervision d'une étude visant à prédire l'impact potentiel des travaux de restauration.

Le Groupe-Conseil LaSalle a été mandaté par TPSGC en vue de prédire les panaches de dispersion associés aux travaux de dragage. L'étude repose sur l'utilisation d'un modèle numérique tridimensionnel reproduisant la circulation dans l'ensemble de la baie et du havre de Gaspé. Un module de transport sédimentaire se greffe ensuite au modèle hydrodynamique, en vue de prédire l'étendue et la concentration des panaches de matières en suspension et de contaminants.

Le présent rapport rend compte de l'étude du Groupe-Conseil LaSalle selon quatre sections distinctes. La section 2 résume d'abord les grandes lignes des caractéristiques hydrodynamiques de la baie de Gaspé et identifie plus clairement les objectifs de l'étude. Les données sur lesquelles reposent les travaux de modélisation sont ensuite présentées à la section 3. La section 4 décrit le montage du modèle numérique et présente les résultats de la modélisation de l'hydrodynamique (niveaux d'eau et courants) et des gradients de densité dans la zone à l'étude. La modélisation des panaches de dispersion fait ensuite l'objet de la section 5.

Il importe finalement de souligner l'importante collaboration apportée à la réalisation de cette étude par M. Jean-Pierre Savard, Océanographe.

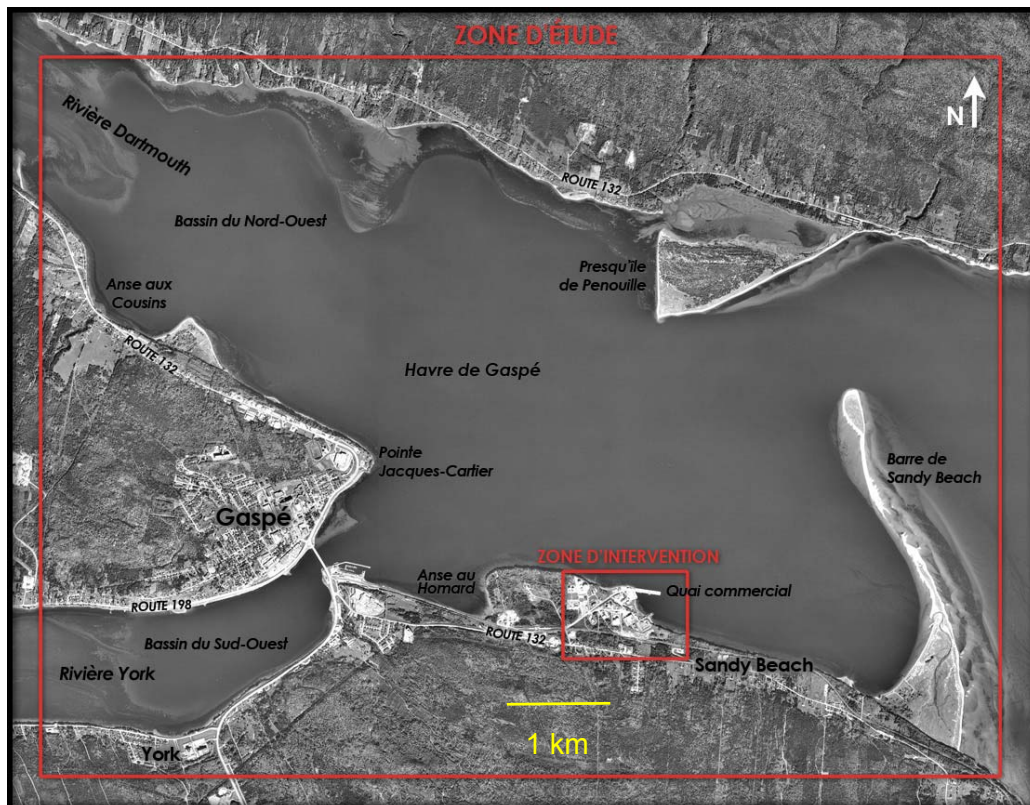
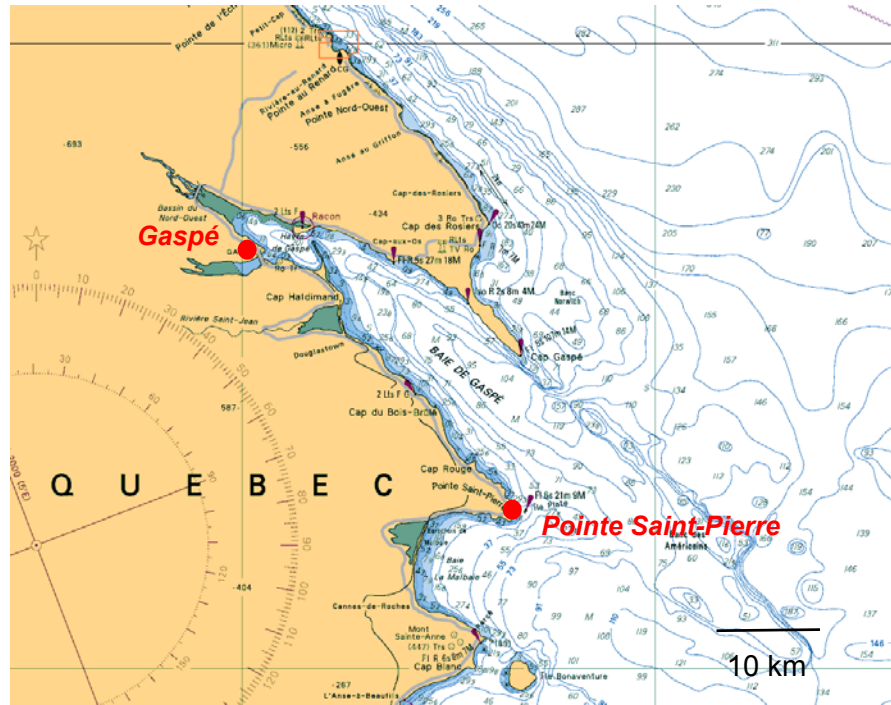


Figure 1 : Plan de localisation

QUAI DE GASPÉ – SANDY BEACH

Modélisation numérique de la dispersion des sédiments dragués

Rapport no 1768



Figure 2 : Étendue de la zone à draguer

QUAI DE GASPÉ – SANDY BEACH

Modélisation numérique de la dispersion des sédiments dragués

Rapport no 1768

2.0 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

L'hydrodynamique de la baie et du havre de Gaspé est relativement complexe. Les champs d'écoulement, et par conséquent le potentiel de dispersion des sédiments en suspension, dépendent de plusieurs forces motrices pouvant interagir de manière complexe, sans qu'aucune d'elles ne domine clairement les autres. Ces forces dictant la circulation générale des eaux dans la baie de Gaspé sont bien identifiées dans la revue des études effectuée par Savard (2002) pour le compte de TPSGC et incluent notamment :

- Les courants de marée;
- Les courants induits par le vent;
- L'agitation et les courants dus aux vagues;
- Les courants de densité résultant de la stratification verticale de la température et de la salinité; de tels gradients sont observés près de la surface, à cause du mélange de l'eau des rivières York, Dartmouth (et Saint-Jean) avec celle de la baie, et à des profondeurs plus importantes (une vingtaine de mètres), à cause de la stratification des eaux du Golfe pénétrant dans la baie;
- La circulation océanographique à grande échelle dans le Golfe, qui conditionne les champs d'écoulement à l'entrée de la baie.

La modélisation numérique de panaches de dispersion associés à des travaux de dragage en milieux fluvial, estuarien ou côtier nécessite rarement la mise en œuvre d'un modèle numérique tridimensionnel. L'approche préconisée consiste généralement à supposer que, sous l'effet des courants et/ou des vagues, le panache se mélange rapidement à toute la colonne d'eau et que son transport s'effectue essentiellement en plan. Le modèle bidimensionnel (en x et y) intègre alors la vitesse d'écoulement sur la verticale en chaque point du domaine.

Une telle approche est difficilement applicable au cas de la baie et du havre de Gaspé car les données et études disponibles indiquent clairement que les gradients verticaux de la salinité et de la température peuvent conduire à des courants tout aussi importants (et même davantage) que ceux induits par la marée et les vagues.

Tel que stipulé au devis d'étude préparé par TPSGC, un modèle tridimensionnel devient alors nécessaire pour pouvoir reproduire cette stratification ainsi que les changements de la vitesse et de la direction des courants qu'elle peut causer sur la verticale (axe z), en un point (x, y) donné du domaine de calcul. Le modèle utilisé doit non seulement permettre une représentation tridimensionnelle des écoulements mais également prendre en compte les équations régissant le transport de la salinité et de la température de l'eau.

Suite à la remise en suspension des matériaux dragués, le caractère tridimensionnel de l'écoulement peut s'avérer particulièrement problématique si les gradients de densité parviennent à confiner et à transporter les contaminants sur d'importantes distances. Cette préoccupation s'applique d'avantage à la portion des contaminants libérée sous forme dissoute plutôt qu'à celle demeurant sous forme particulaire. L'offre de services préparée par le Groupe-Conseil LaSalle (GCL) comportait d'ailleurs un volet optionnel portant sur la simulation de l'advection-dispersion des contaminants dissous. Des analyses chimiques effectuées parallèlement à la présente étude sur divers échantillons du site n'ont toutefois pas révélé de concentrations problématiques de ces contaminants.

Le modèle numérique MIKE 3, décrit à la section 4.1, est parfaitement adapté à la simulation tridimensionnelle des écoulements dans le havre de Gaspé et des panaches de dispersion causés par les travaux de dragage. Il importe également de mentionner que la formulation tridimensionnelle permet de distinguer le mode de remise en suspension des sédiments associés aux dragages hydraulique et mécanique. Dans le premier cas, la source de sédiments est en effet concentrée près du fond, aux abords de la tête de la drague, alors que les pertes de matériaux associées au dragage mécanique avec benne preneuse tendent plutôt à s'étaler sur toute la colonne d'eau lors de la remontée de la benne.

Dans ce contexte, l'étude effectuée par le GCL visait les objectifs suivants :

- Monter un modèle numérique tridimensionnel permettant une représentation satisfaisante des principaux phénomènes dictant l'hydrodynamique et la circulation des masses d'eau dans le havre et la baie de Gaspé;
- Intégrer à la modélisation hydrodynamique un module de transport sédimentaire permettant de simuler la dispersion des panaches de sédiments fins formés par les travaux de dragage, en tenant compte des caractéristiques de ces sédiments et des hypothèses liées aux travaux (taux de dragage et pertes relatives de matériaux);

QUAI DE GASPÉ – SANDY BEACH

Modélisation numérique de la dispersion des sédiments dragués

Rapport no 1768

-
- Effectuer les simulations pour un éventail de scénarios hydrodynamiques (vents, marées, vagues, débits des rivières, températures, salinités) permettant d'identifier l'impact potentiel des travaux de restauration des sédiments sur les sites avoisinants de maréculture;
 - Proposer des mesures permettant d'éliminer ou de contrôler ces impacts : identification des conditions hydrodynamiques indésirables et souhaitables lors du dragage, mise en place de modes de confinement, suivi des panaches, etc.

3.0 DONNÉES DE BASE

3.1 Études antérieures

Dans le cadre du présent mandat, TPSGC a fourni au GCL des études antérieures relatives à l'hydrodynamique et à la circulation dans le havre et la baie de Gaspé :

- Revue des données et des études disponibles et établissement d'un modèle conceptuel pour la circulation des eaux du havre de Gaspé par Savard, 2002;
- Études et recherches effectuées en 2000-2002 par l'Institut des sciences de la mer de Rimouski – ISMER pour le compte de la Société de développement de l'industrie maricole (SODIM) (Koutintonsky et al., 2001; Koutintonsky, 2001, 2002);
- Étude des aspects sédimentologiques avec caractérisation des habitats aquatiques et du milieu physique (Environnement Illimité, 2005).

Une description complète du projet de restauration des sédiments du quai de Gaspé/Sandy Beach est présentée dans le rapport d'évaluation environnementale préalable préparé récemment par la firme Dessau (Gaudette et al., 2009). Le rapport de surveillance des travaux de nettoyage du quai effectué en 2001 par la firme Robert Hamelin et associés (Ostiguy, 2001) donne aussi des informations concernant la qualité des sédiments.

Une nouvelle étude effectuée pour le compte d'Environnement Canada et touchant la dispersion des effluents d'eau usée issus de la Ville de Gaspé nous a également été fournie en cours de mandat par TPSGC (Gagnon, 2010).

3.2 Données bathymétriques

La représentation numérique de la bathymétrie de la zone à l'étude est fondamentale pour la modélisation numérique des écoulements et des transports sédimentaires.

La baie et le havre de Gaspé figurent sur deux cartes du Service hydrographique du Canada (SHC) :

- La carte no 4485 (échelle 1/75 000) qui couvre la pointe Est de la péninsule gaspésienne et comprend l'ensemble de la baie de Gaspé;

- La carte no 4416 qui couvre le havre de Gaspé (échelle 1/12 000) et les abords immédiats du quai de Gaspé (échelle 1/4 000).

En vue de maximiser la résolution du modèle bathymétrique, nous avons répertorié, avec la collaboration du SHC, l'ensemble des fichiers de levés (minutes) hydrographiques ayant servi de base à ces cartes. La figure 3 illustre l'emplacement et l'étendue de chacun de ces fichiers.

Les levés d'ensemble de la baie sont récents (2005), sauf le long de la rive sud où ils datent de 1966. Dans le havre proprement dit, des données récentes sont disponibles aux abords de la pointe de Sandy Beach, du quai de Gaspé et de l'embouchure de la rivière York, mais les levés couvrant l'ensemble du havre datent de 1960 (figure 2).

Après examen de l'information disponible, les données suivantes ont été utilisées pour le montage de la bathymétrie numérique :

- Pour l'ensemble de la baie et du havre, une grille de résolution 50 m par 50 m fournie par le SHC et intégrant l'ensemble des levés les plus récents;
- Pour maximiser la résolution dans le havre, on a également utilisé les fichiers de levés du SHC no 3003083 (1960) et 3101101 (1996);
- Pour les abords immédiats du quai, les levés nos 3104206 (2004) et 3105303 (2007) nous ont été fournis par TPSGC.

Les lignes de rivage en format numérique issues des cartes 4485 et 4416 ont également été obtenues auprès du SHC.

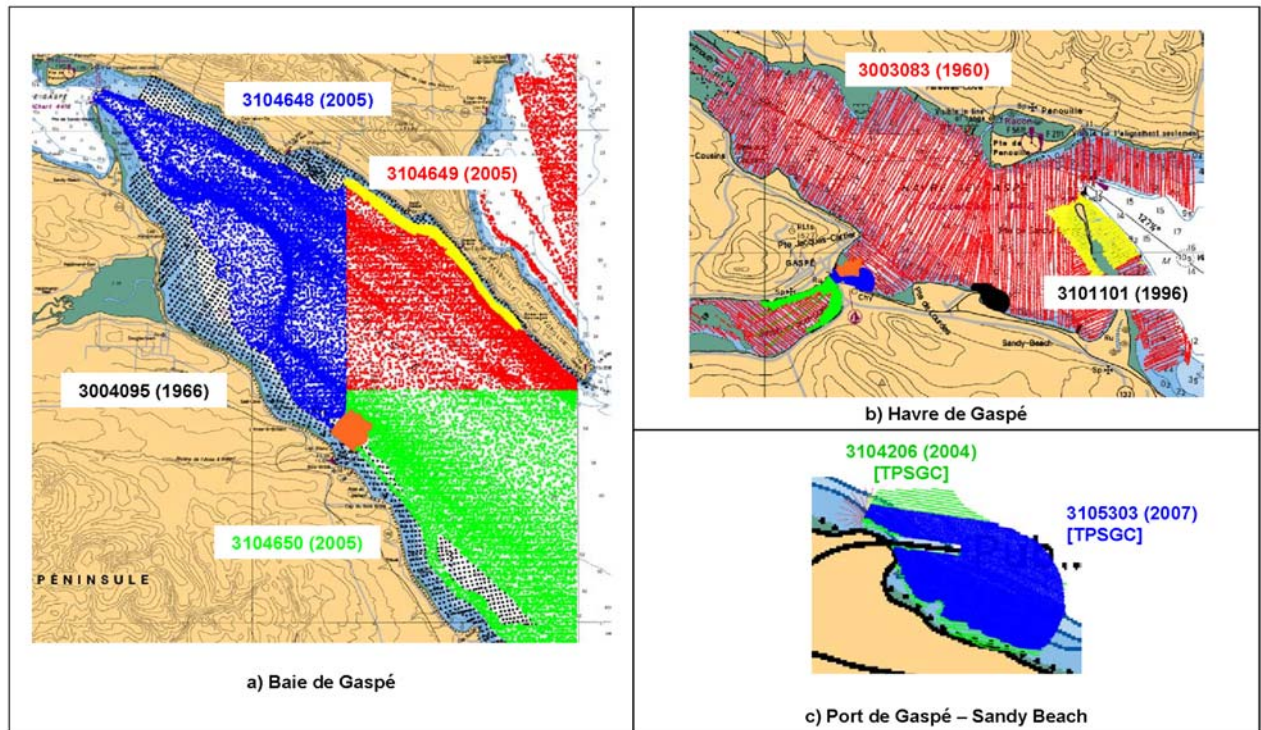


Figure 3 : Baie et havre de Gaspé - Levés bathymétriques disponibles

3.3 Température et salinité

Une des principales difficultés liées à la mise en œuvre d'un modèle tridimensionnel tenant compte de la stratification de la température et de la salinité de la masse d'eau réside dans la détermination de ces paramètres aux limites du modèle (et ce pour toute la durée de la simulation) et dans l'ensemble du modèle à l'instant où débute la simulation.

Contrairement aux données relatives à la marée, au vent ou au débit des rivières qui peuvent être obtenues auprès de divers services gouvernementaux (voir sections suivantes), aucune donnée détaillée n'est disponible dans le domaine public concernant la température et la salinité des eaux du golfe du Saint-Laurent.

L'étude de Savard (2002) cite la campagne de relevés réalisée dans le havre de Gaspé durant l'été 1990 par Pettigrew et al. (1991). Des séries chronologiques du courant, de la température et de la salinité ont été obtenues à cinq stations, du 29 mai au 4 juillet 1990.

QUAI DE GASPÉ – SANDY BEACH

Modélisation numérique de la dispersion des sédiments dragués

Les résultats présentés sous forme de graphiques ne font toutefois l'objet d'aucune analyse. Malgré leur intérêt indéniable, ces relevés demeurent néanmoins ponctuels (et relativement limités dans le temps) et se prêtent mal à une généralisation des conditions de salinité et de température pouvant être imposées aux limites du modèle numérique.

L'étude de Koutitonsky et al. (2001) a donné lieu à une campagne de mesures plus complète de la température et de la salinité de la baie de Gaspé, mais nous ne disposons pas de ces données sous un format suffisamment détaillé pour qu'elles puissent servir de base à nos simulations. Par ailleurs, la campagne effectuée à l'automne 2000 n'était pas nécessairement représentative de la gamme complète des conditions hydro-météorologiques pouvant dicter les courants de densité qui prévaudront dans la baie et le havre de Gaspé au moment des travaux de dragage.

Dans ce contexte, nous avons recherché une approche nous permettant d'obtenir un portrait le plus complet possible de l'évolution de la température et de la salinité de la zone à l'étude, offrant à la fois une résolution adéquate et une couverture étendue dans le temps. Pour ce faire, nous avons fait appel aux résultats du modèle global de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent conçu à l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER) et exploité dans le cadre du groupement de l'Observatoire global du Saint-Laurent (OGSL).

Ce modèle utilise une formulation tridimensionnelle similaire à celle du modèle MIKE 3 utilisé pour la présente étude, mais couvre une zone beaucoup plus étendue englobant l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent. La grande emprise du modèle s'accompagne toutefois d'une résolution spatiale beaucoup trop grossière pour la modélisation de la baie de Gaspé. La figure 4 illustre la position des mailles de calcul de ce modèle dans le secteur à l'étude. Chaque maille correspond à un carré de 5 km de côté. La résolution verticale est de 5 m.

Grâce à la collaboration de l'ISMER, nous avons pu obtenir les résultats du modèle global (niveau d'eau, vitesse, salinité, température) à chacun des points de maillage de ce modèle, pour trois épisodes devant couvrir la gamme complète des conditions de densité pouvant avoir un effet potentiel sur la circulation dans la baie et le havre de Gaspé en période d'eau libre.

Sur la base du modèle conceptuel établi par Savard (2002), nous avons identifié trois épisodes correspondant à une période prolongée de vent calme, puis à des vents soutenus issus des secteurs dominants du Nord-Ouest (NO) et du Sud-Est (SE), qui tendent respectivement à pousser les eaux de surface vers l'extérieur et l'intérieur de la baie. La recherche de ces épisodes s'est limitée à l'année 1997 pour laquelle l'ISMER disposait déjà en archive de résultats complets de modélisation.

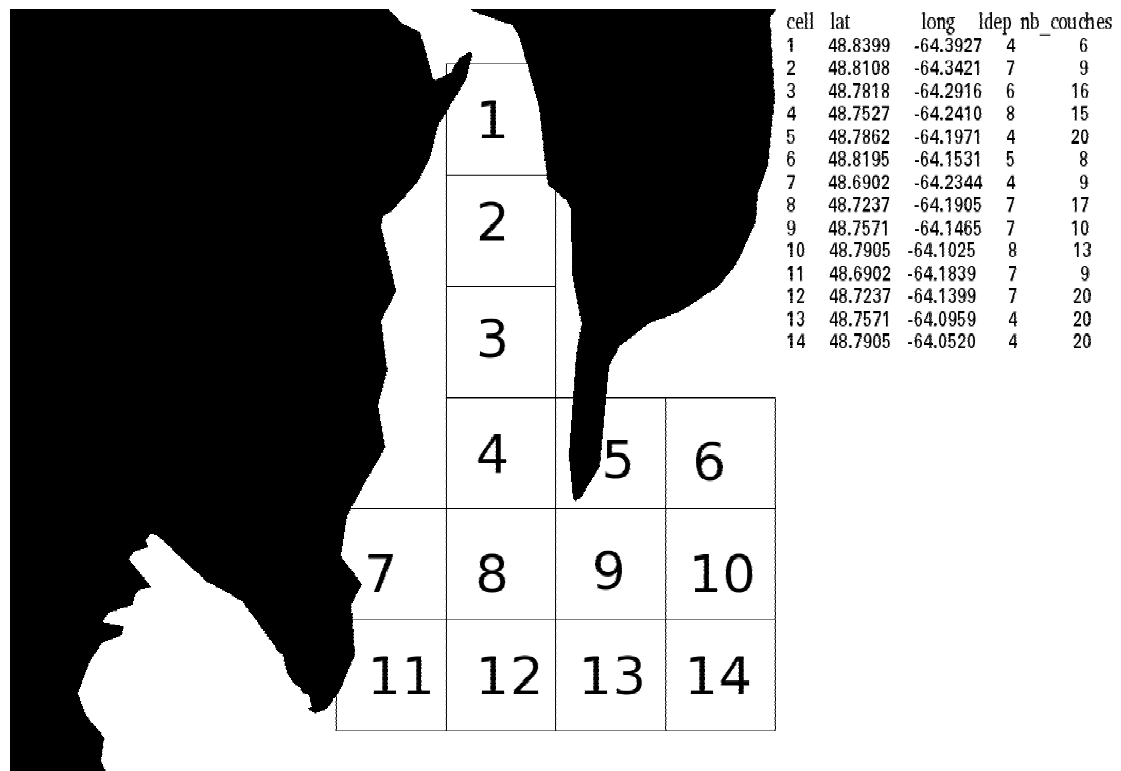


Figure 4 : Couverture du modèle global de l'OGSL dans le secteur à l'étude

En analysant les données de vent de l'aéroport de Gaspé (voir section 3.6), trois épisodes ont été identifiés :

- Cas A = Vent calme - 12 au 15 septembre 1997;
- Cas B = Vent NO sortant de la baie - 12 au 14 novembre 1997;
- Cas C = Vent SE entrant dans la baie - 22 au 23 août 1997.

La figure 5 illustre l'évolution des profils de température et de salinité prédits par le modèle global à l'entrée de la baie (cellule no 8 à la figure 4) pour ces trois épisodes. Sur chacun des graphiques, les profils sont présentés avec un intervalle de 12 heures.

Les graphiques indiquent en premier lieu les tendances générales de la stratification en été et en automne. Les profils d'août et septembre montrent en effet des gradients importants de la température sur la verticale alors que le profil de novembre révèle une plus grande uniformité.

Un examen plus poussé de ces profils révèle des phénomènes intéressants. Par vent du NO (figure 5b), les températures observées près du fond montrent un réchauffement tangible avec le temps, accompagné d'une baisse simultanée de la salinité. De telles conditions sont assimilables en termes océanographiques à un épisode de « downwelling », i.e. l'eau de surface, plus chaude et moins salée, se déplace vers le bas. La figure 6b permet de mieux visualiser ce phénomène en présentant pour des valeurs données de la profondeur d'eau, l'évolution de la température en fonction du temps.

Pour l'épisode de vent du SE, la tendance s'inverse : on assiste dans la couche de surface à un refroidissement des températures avec le temps, accompagné d'une hausse simultanée de la salinité (figures 5c et 6c). De telles conditions sont assimilables en termes océanographiques à un épisode de « upwelling », i.e. l'eau plus froide et salée du fond se déplace vers le haut.

Ces résultats sont a priori surprenants car ils contredisent la tendance habituelle voulant que les vents de terre (vent NO dans le cas de la baie de Gaspé), qui poussent l'eau de surface vers le large, conduisent à du upwelling alors que les vents du large (vent SE dans le cas de la baie de Gaspé), qui « empilent » l'eau de surface contre la rive, conduisent plutôt à du downwelling.

L'étude réalisée en 2002 par J.P. Savard et sa participation à la présente étude permettent de mieux comprendre ces résultats. La circulation des eaux à l'entrée de la baie de Gaspé est étroitement liée à l'hydrodynamique de l'estuaire du Saint-Laurent et plus particulièrement à la présence du courant de Gaspé, qui longe l'ensemble de la péninsule gaspésienne avant de redescendre vers le détroit de Northumberland.

Les vents dominants du secteur Ouest tendent à pousser le courant de Gaspé contre la péninsule gaspésienne, et ce non seulement à cause de l'orientation de cette dernière par rapport au vent, mais également à cause de l'effet de Coriolis, qui induit un mouvement net des masses d'eau de surface orienté vers la droite par rapport à la direction du vent (dans l'hémisphère nord).

QUAI DE GASPÉ – SANDY BEACH

Modélisation numérique de la dispersion des sédiments dragués

Rapport no 1768

Lorsque des vents soutenus issus du secteur O ou NO balaient l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, l'eau saumâtre du courant de Gaspé tend ainsi à épaissir le long de la côte gaspésienne, créant ainsi du downwelling à l'entrée de la baie de Gaspé. Les mesures effectuées par Pettigrew et al. (1991) montrent que cette tendance s'observe également dans le havre de Gaspé, où les signes de downwelling sont évidents malgré la présence de vents sortant de la baie.

Lorsque des vents importants issus des secteurs E ou SE sont observés dans le golfe et l'estuaire, le processus s'inverse : le courant de Gaspé s'amincit et s'éloigne de la péninsule, donnant lieu à du upwelling à l'entrée de la baie. Encore une fois, les mesures de Pettigrew confirment cette tendance dans le havre de Gaspé, où le principal épisode de upwelling observé à l'été 1990 était clairement associé à des vents modérés à forts des secteurs E et SE.

Ces résultats sont importants car ils indiquent qu'un portrait détaillé de la circulation dans la baie et le havre de Gaspé peut difficilement être obtenu sans prendre en compte les conditions d'écoulement plus globales du golfe, particulièrement en ce qui touche le comportement du courant de Gaspé. La mise en œuvre d'un tel modèle, intégrant non seulement la zone à l'étude mais également une portion étendue de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, dépassait évidemment le cadre de la présente étude.

Même si l'utilisation des données du modèle global de l'OGSL traduisait une volonté d'optimiser la représentativité des conditions de salinité et de température imposées à la limite au large de notre modèle, ce dernier ne permet pas de totalement prendre en compte l'influence du courant de Gaspé et l'inversion des conditions de upwelling et de downwelling qui semble en résulter.

En présence d'un modèle limité à la baie et au havre de Gaspé, les épisodes de upwelling correspondront en effet, selon la tendance usuelle, à des vents soutenus du NO (sortant de la baie) alors que le downwelling se produira plutôt pour des vents du SE (entrant dans la baie). Il est à noter que le modèle de Koutitonsky et al. (2001) donnait des résultats conformes à cette tendance.

Il importe ainsi de retenir que le modèle mis en œuvre pour la présente étude pouvait effectivement prédire des effets de upwelling et downwelling et permettait a priori de couvrir la gamme complète des conditions d'écoulement pouvant influencer la dispersion des sédiments dragués.

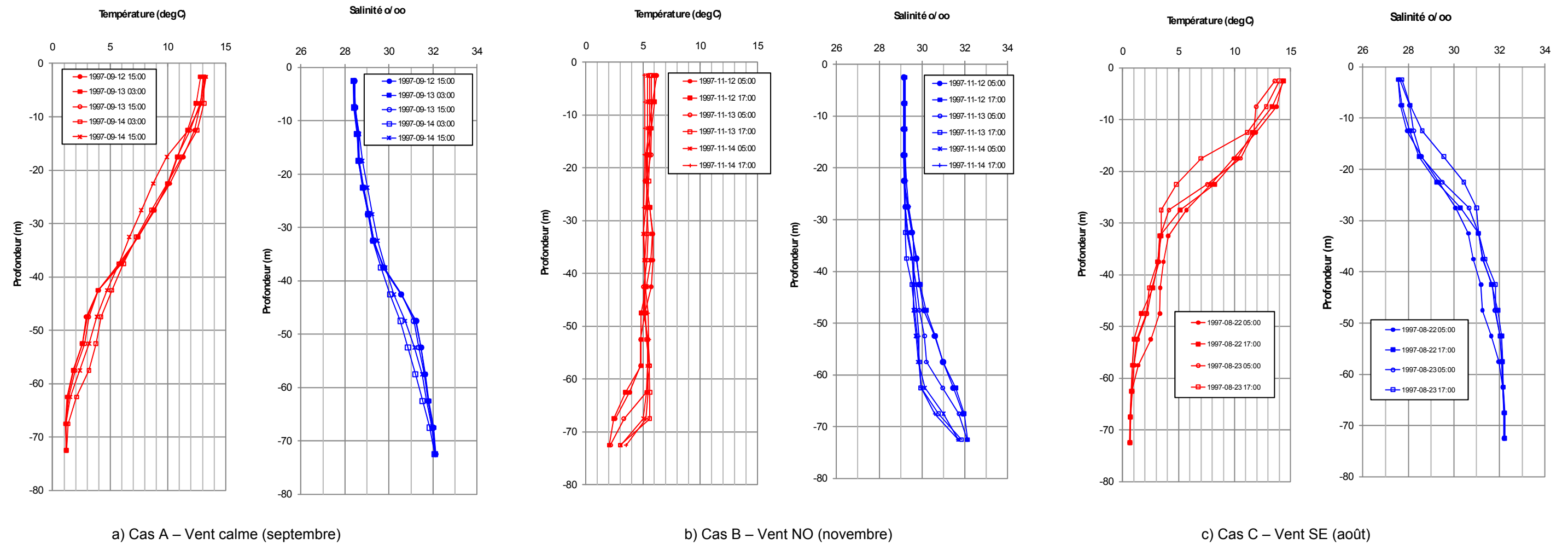
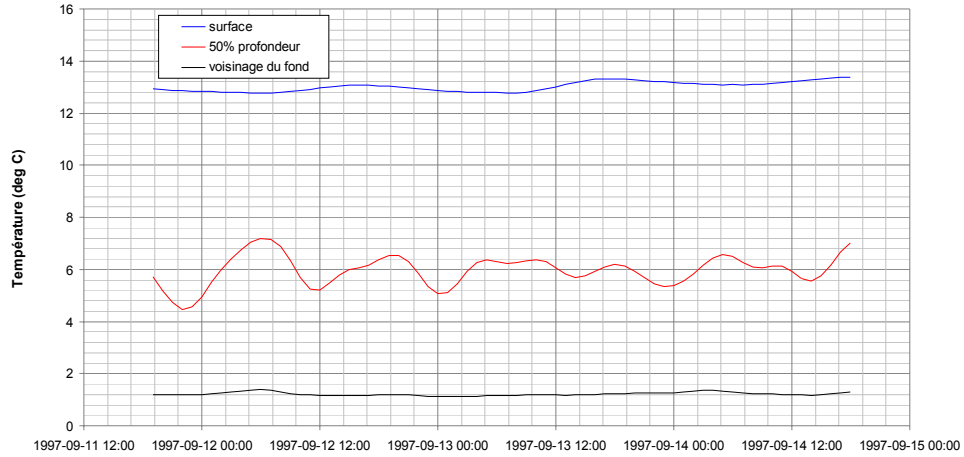
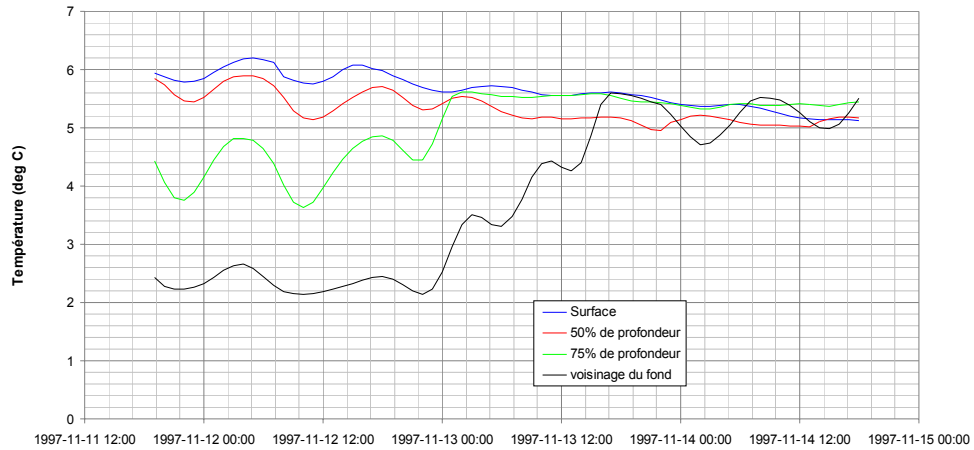


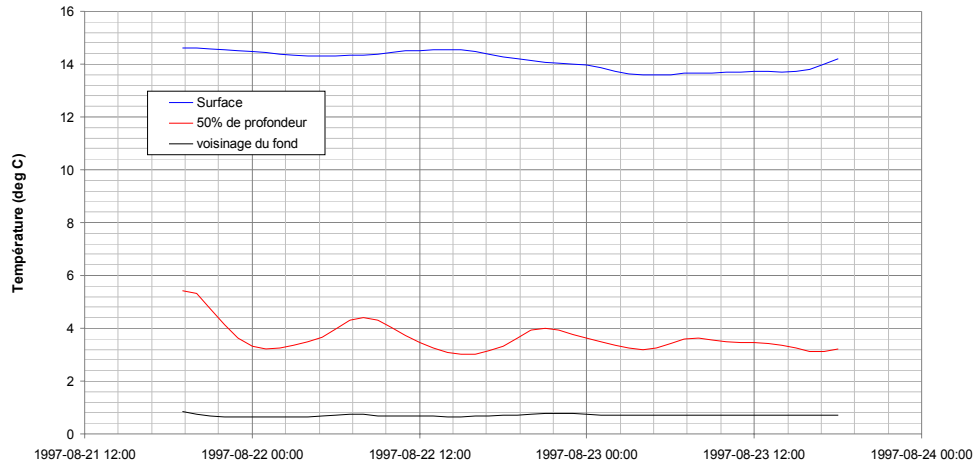
Figure 5 : Profils verticaux de la température et de la salinité à l'entrée de la baie de Gaspé (source : Modèle global de l'OGSL)



a) Vent calme – Septembre



b) Vent du NO – Novembre



c) Vent du SE – Août

Figure 6 : Évolution de la température à l'entrée de la baie de Gaspé

3.4 Courants

Trois études antérieures contiennent des informations concernant le régime des courants dans la baie et le havre de Gaspé :

- Les relevés de Pettigrew et al. (1991), déjà cités à la section précédente;
- La campagne de mesures de Koutitonsky et al. (2001), avant tout concentrée sur la baie de Gaspé;
- Les relevés plus récents effectués à l'aide de flotteurs dérivants par Gagnon (2010).

3.4.1 Pettigrew et al. (1991)

Les relevés courantométriques de Pettigrew et al. (1991) ont été réalisés du 29 mai au 4 juillet 1990, à cinq stations de mesures (C1 à C5) réparties dans le havre de Gaspé (figure 7). Les stations C2 et C3 comportaient des enregistrements effectués à deux profondeurs distinctes.

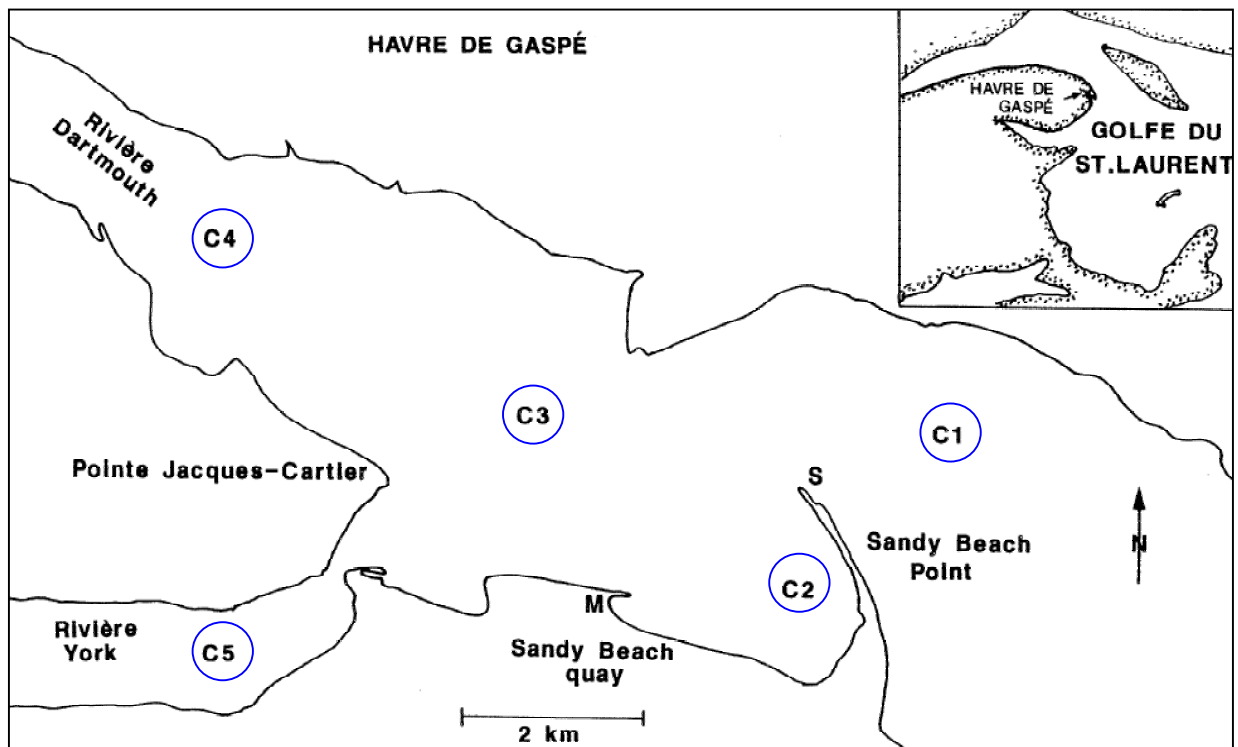


Figure 7 : Campagne de mesures de Pettigrew (1991) – Emplacement des courantomètres

Le tableau 1 résume la gamme typique des courants maximums de flot et de jusant obtenus à chacune des cinq stations. Les vitesses sont exprimées selon leur composante correspondant à l'azimut 300°, qui coïncide approximativement avec l'axe longitudinal de la baie et du havre de Gaspé. Les valeurs entre parenthèses expriment les extrêmes obtenus seulement de manière sporadique au cours des 37 jours de relevés.

Tableau 1 : Courants maximums de flot et de jusant dans le havre de Gaspé

(Pettigrew, 1991)

Courantomètre	Courants maximums (m/s)	
	Flot	Jusant
C1	0,30	0,40 (0,60)
C2 surface	0,15 (0,25)	0,10
C2 fond	0,10	0,10
C3 surface	0,25 (0,45)	0,15 (0,30)
C3 fond	0,20 (0,35)	0,15 (0,30)
C4	0,15 (0,25)	0,20 (0,30)
C5	0,10 (0,25)	0,15 (0,35)

Les vitesses les plus importantes sont obtenues à la station C1 où, comme on pouvait s'y attendre, la présence de la pointe de Sandy Beach resserre la section d'écoulement et augmente les courants. Pendant les relevés de 1990, les courants maximums de flot étaient typiquement de 0,30 m/s. Des valeurs plus importantes, atteignant 0,40 m/s, ont été enregistrées au jusant, avec des valeurs plus élevées atteignant sporadiquement 0,60 m/s (tableau 1).

À la station C2, qui est la plus proche du site des travaux de dragage, les courants maximums de flot et de jusant mesurés à l'été 1990 étaient très faibles, avec des valeurs ne dépassant généralement pas 0,10 m/s. Des valeurs plus élevées étaient uniquement obtenues au flot, près de la surface, avec des maxima typiques de 0,15 m/s et quelques valeurs horaires atteignant 0,25 m/s.

Une tendance similaire, montrant des vitesses plus fortes vers l'amont (flot) que vers l'aval (jusant), est obtenue au point C3, qui est situé au centre du havre, près de la limite aval des sites maricoles. Les courants maximums étaient généralement de 0,20 à 0,25 m/s au flot contre 0,15 m/s au jusant. De manière très ponctuelle, les relevés ont indiqué des vitesses vers l'amont plus considérables, pouvant atteindre 0,45 m/s en surface (tableau 1)

À la station C4, qui est située près de la limite amont des sites maricoles (dans l'embouchure de la rivière Dartmouth), les vitesses maximales atteignaient généralement 0,15 m/s vers l'amont et 0,20 m/s vers l'aval. Encore une fois, des valeurs plus importantes, pouvant atteindre 0,35 m/s au jusant, ont été obtenues de manière sporadique lors des relevés de 1990.

Le portrait global offert par les relevés de Pettigrew (1991) montre donc des courants très faibles dans l'ensemble du havre, avec des maxima se situant généralement entre 0,10 et 0,25 m/s. Des courants plus importants sont toutefois obtenus au droit de la pointe de Sandy Beach, avec des valeurs maximales variant généralement de 0,3 à 0,4 m/s.

Il importe de souligner que pour pratiquement toutes les stations de mesures, des courants plus élevés sont observés de manière sporadique. L'occurrence de ces maxima n'est pas liée au cycle de la marée mais semble plutôt résulter des autres facteurs dictant le régime des courants du havre de Gaspé, tels que les vents locaux et les circulations à plus grande échelle formées dans le golfe et ressenties jusqu'à l'entrée de la baie de Gaspé.

3.4.2 Koutitonsky et al. (2001)

La campagne de mesures détaillée effectuée par Koutitonsky et al. (2001) dans la baie de Gaspé montre également des faibles valeurs de courants avec des maxima ne dépassant pas 0,4 m/s au droit de la pointe de Sandy Beach. Le havre proprement dit, incluant la zone des travaux de dragage, n'avait toutefois pas été couvert par cette campagne (mis à part des relevés effectués directement à la sortie des rivières Dartmouth et York).

L'étude de Koutitonsky et al. (2001) fait état de vitesses maximales de 0,6 à 0,7 m/s relevés près de l'entrée de la baie de Gaspé et les auteurs associent ces vitesses élevées à la pénétration dans la baie du courant de Gaspé. La modélisation numérique subséquente ne reproduit toutefois pas un tel effet et ne semble d'ailleurs pas faire l'objet d'un travail de validation utilisant les données de terrain.

3.4.3 Gagnon (2010)

La figure 8 illustre un résultat typique des résultats de mesures obtenus par Gagnon (2010) dans le cadre de l'étude de courantométrie effectuée pour le compte d'Environnement Canada.

La figure présente la trajectoire d'un flotteur dérivant (flotteur à drogue) dont la trajectoire a été cartographiée à partir de son point de départ à proximité du quai. Le relevé effectué en marée de vive-eau le 25 juin 2009 montre, qu'en 11 heures de suivi, le flotteur ne dérive que sur une distance cumulée de 4,1 km. La vitesse moyenne observée pendant le parcours n'est donc que de 0,1 m/s, avec une valeur maximale de 0,2 m/s, et ce en dépit de la présence d'un vent modéré de 20 km/h.

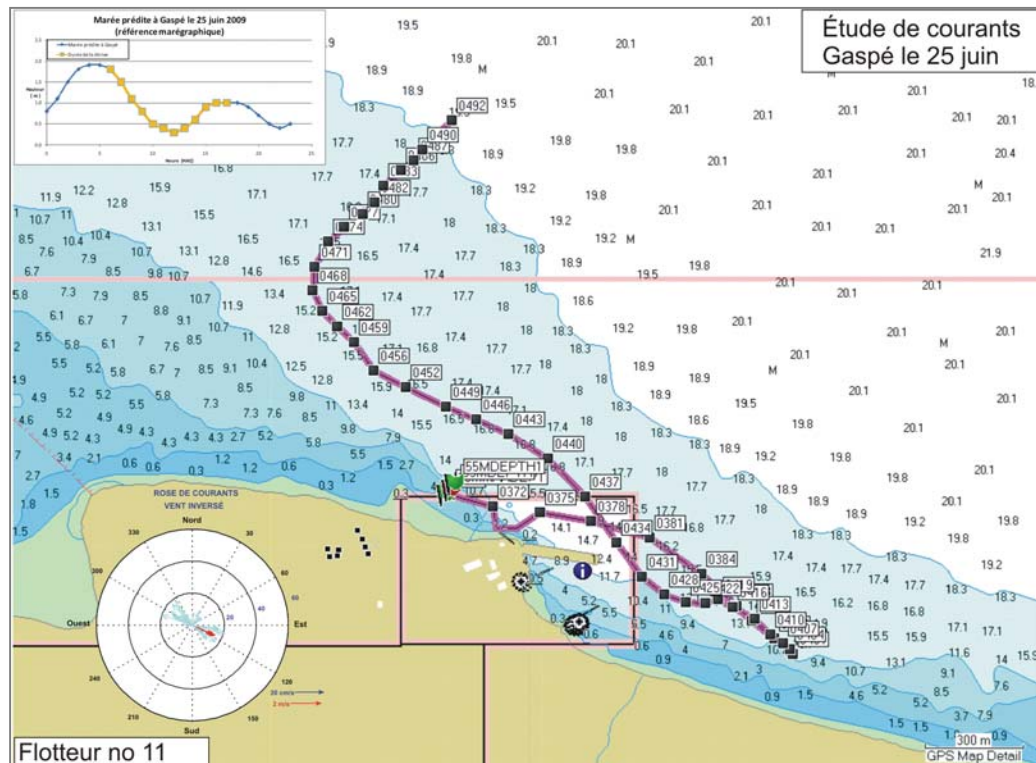


Figure 8 : Suivi d'un flotteur dérivant – 25 juin 2009
(Source : Gagnon, 2010)

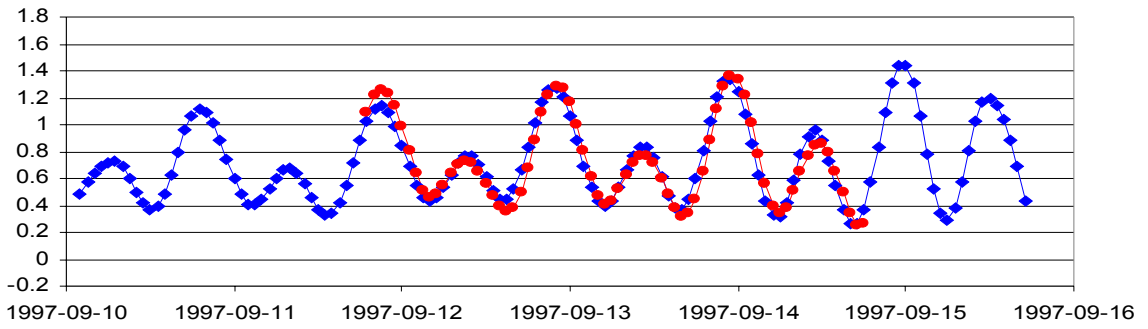
3.5 Marée

Le Service hydrographique du Canada (SHC) émet des prédictions des niveaux de marée pour le site de Pointe Saint-Pierre, qui est situé à l'extrémité sud-est de la baie de Gaspé (figure 1). Les tables de marée du SHC fournissent également des corrections permettant de calculer les niveaux de marée au site de Gaspé (port secondaire), d'après les prédictions de Pointe Saint-Pierre (port de référence). Les écarts entre les niveaux de pleine et basse mer obtenus aux deux sites ne diffèrent pas par plus de 10 cm et un déphasage de 10 minutes de l'onde de marée est prédit entre Pointe Saint-Pierre et Gaspé.

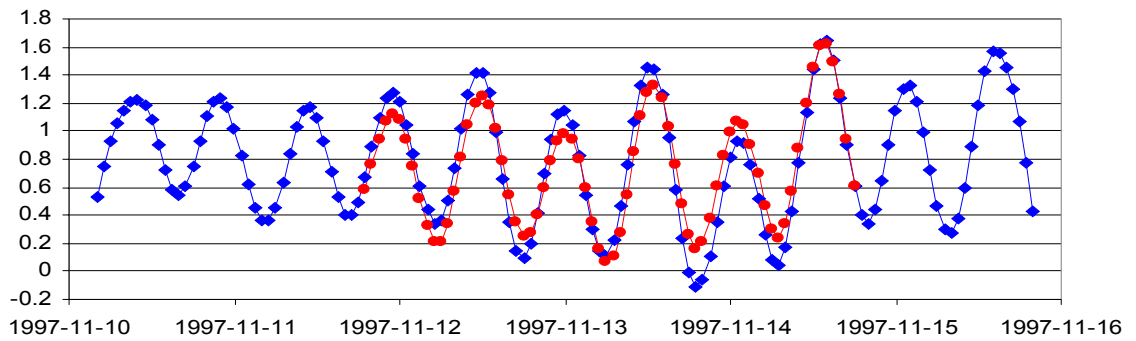
Le niveau de la marée à la station Pointe-Saint-Pierre peut comporter des inégalités diurnes prononcées. Le marnage atteint 1,7 m pour les grandes marées et 1,1 m pour la marée moyenne.

La figure 9 compare les niveaux de marée à Pointe Saint-Pierre prédits par le SHC avec ceux calculés par le modèle global de l'OGSL, pour les trois épisodes identifiés précédemment, soit :

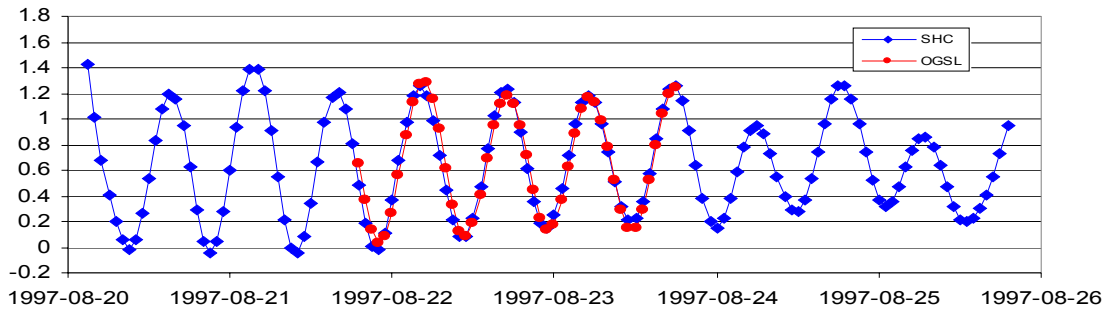
- Cas A = Vent calme - 12 au 15 septembre 1997;
- Cas B = Vent NO sortant de la baie - 12 au 14 novembre 1997;
- Cas C = Vent SE entrant dans la baie - 22 au 23 août 1997.



a) Septembre 1997 (Vent calme)



b) Novembre 1997 (Vent du NO)



c) Août 1997 (Vent du SE)

Figure 9 : Niveaux de marée
 Comparaisons entre les prédictions du SHC et les résultats du modèle de l'OGSL
 (Niveaux en mètres exprimé par rapport au zéro des cartes)

3.6 Vent

La principale source de données de vent dans la zone de la baie de Gaspé est l'aéroport de Gaspé, situé à 5 km au sud des installations portuaires. La figure 10 illustre la position de la station de référence.



Figure 10 : Localisation de l'aéroport de Gaspé (station de référence pour le vent)

Les données de direction et de vitesse du vent sont enregistrées sur une base horaire. La rose des vents, présentée à la figure 11, montre clairement deux directions prédominantes :

- La direction Ouest-Nord-Ouest est la direction la plus fréquente. Cette direction est pratiquement alignée avec l'axe de la baie de Gaspé. Le relief qui sépare la baie de l'aéroport (figure 10) contribue à légèrement dévier le vent par rapport à l'axe de la baie (Nord-Ouest). Conformément à l'étude de Koutitonsky et al. (2001), on considérera que le vent de ce secteur correspond au Nord-Ouest dans la baie et le havre de Gaspé.
- La direction Est est la direction prédominante secondaire. Comme précédemment, on s'attendrait à ce qu'elle soit aussi alignée avec l'axe de la baie, soit Sud-Est, mais le relief situé au Nord de l'aéroport de Gaspé (figure 10) semble réorienter le vent incident du Sud-Est selon l'axe Est-Ouest. Cette différence de direction entre le vent mesuré à l'aéroport et celui ressenti dans la baie est confirmée par les mesures effectuées par Koutitonsky et al. (2001) sur le banc de sable de Sandy-Beach. Ainsi, la direction secondaire Sud-Est sera considérée pour la présente étude.

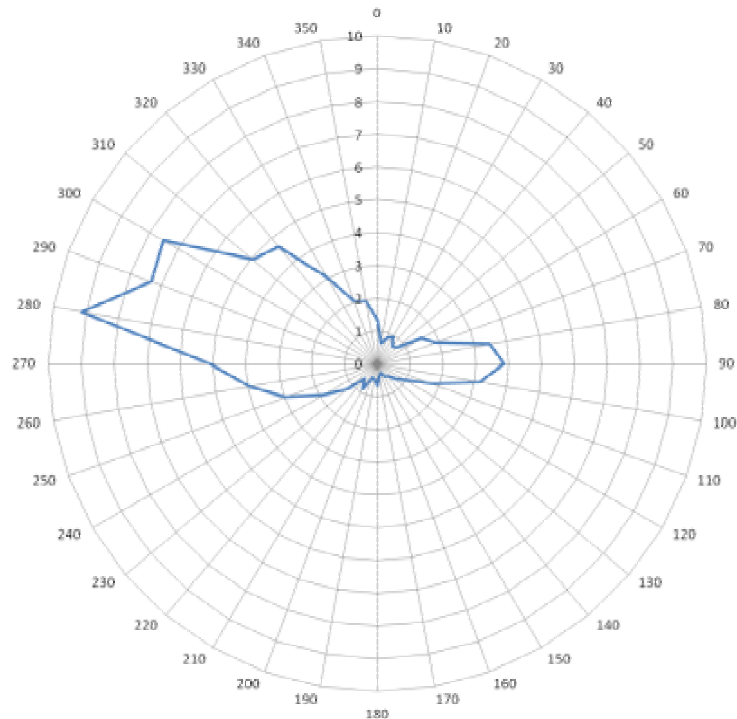


Figure 11 : Rose des vents à l'aéroport de Gaspé
(source : Environnement Canada)

Tel que mentionné précédemment, trois périodes ont été sélectionnées pour l'année 1997 en vue de bénéficier des résultats du modèle global de l'OGSL :

- Conditions calmes;
- Vent soutenu du secteur NO (ONO à l'aéroport de Gaspé) d'intensité modérée à forte;
- Vent soutenu du secteur SE (E à l'aéroport de Gaspé) d'intensité modérée à forte.

Conditions calmes

La figure 12 présente les vitesses du vent entre le 9 et le 15 septembre 1997. On constate que durant cette période, la vitesse du vent est inférieure à 15 km/h et plus particulièrement, inférieure à 7 km/h entre le 12 septembre 1997 à 15h00 et le 14 septembre 1997 à 10h00. La moyenne est autour de 3 km/h. Au cours de cette période, il n'y a pas de direction franche établie et le vent est relativement tournant.

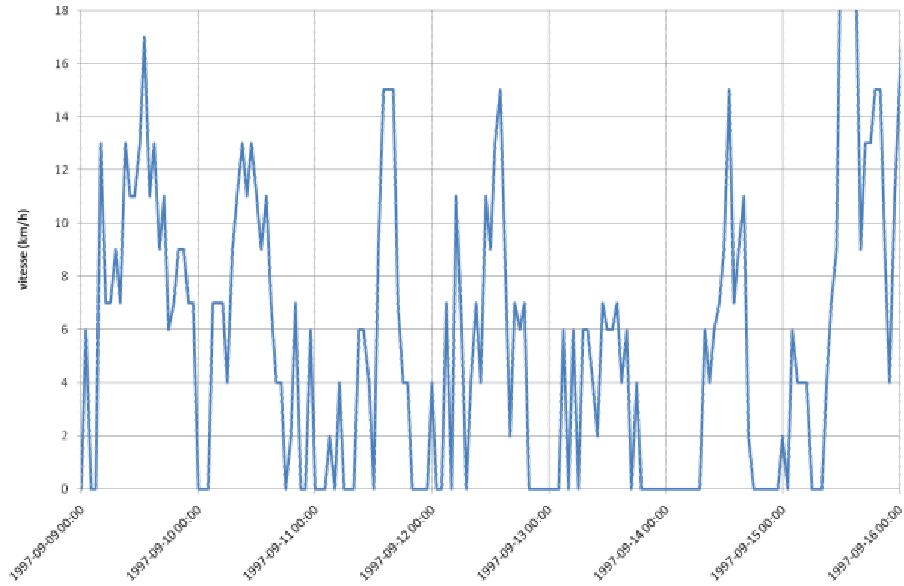


Figure 12 : Épisode de vent calme – Septembre 1997

Conditions de vent soutenu de secteur Nord-Ouest

Pour la direction dominante du vent, soit le NO (ou ONO à l'aéroport de Gaspé) nous retenons la période du 12 au 14 novembre 1997. La figure 13 présente les enregistrements de vitesses de vent de secteur ONO pour le mois de novembre 1997. Des vitesses de 20 km/h sont atteintes et dépassées (maximum de 32 km/h) pendant près de 48 heures consécutives.

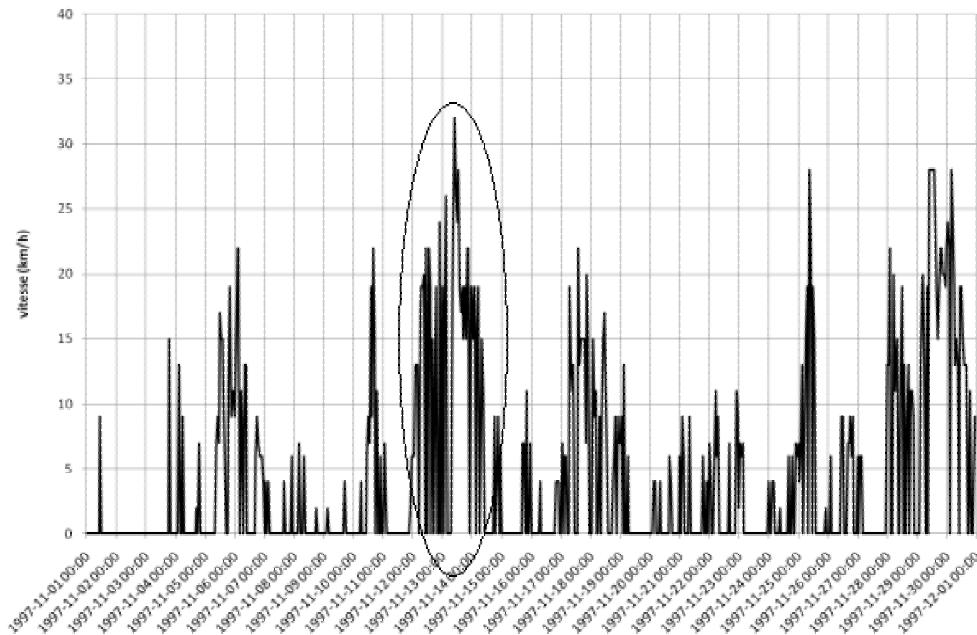


Figure 13 : Vent soutenu sortant de la baie – Novembre 1997

Conditions de vent soutenu de secteur Sud-Est

Pour la direction dominante secondaire, SE (ou E à l'aéroport de Gaspé), la période du 22 au 23 août 1997 est retenue. Comme le montre la figure 14, des vitesses de 20 à 27 km/h sont enregistrées pour cette période sur près de 15 heures consécutives.

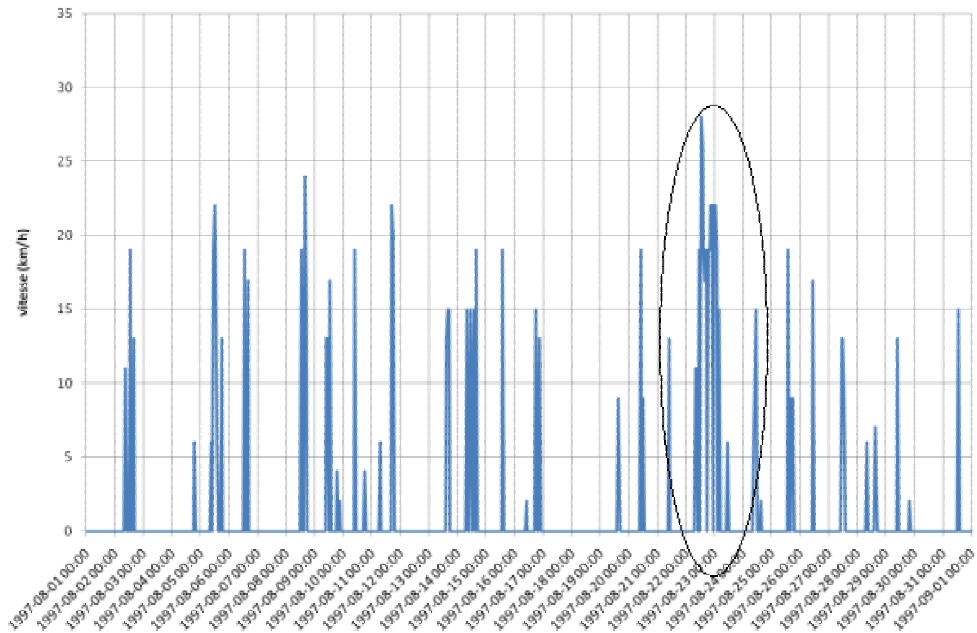


Figure 14 : Vent soutenu entrant dans la baie – Août 1997

3.7 Vagues

Le havre de Gaspé est relativement bien protégé de l'action des vagues du large par la présence des pointes de Sandy Beach et de Penouille.

La modélisation de la réfraction des vagues du large effectuée par Koutitonsky (2001, 2002) n'offre pas beaucoup d'information sur le régime des vagues dans le havre, mais prédit clairement des hauteurs maximales de vagues inférieures à 1 m. Dans ces conditions, la prise en compte des vagues n'apparaissait pas nécessaire a priori pour l'étude de la dispersion des matériaux dragués. Comme on le verra plus loin, des essais de sensibilité ont tout de même été effectués en présence de vagues.

3.8 Débit des rivières

Le havre de Gaspé est alimenté par deux rivières, la Dartmouth et la York (figure 1), et la baie de Gaspé reçoit les apports de la rivière Saint-Jean.

Ces trois rivières sont équipées de station de mesure du débit exploitée par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) :

- Rivière Dartmouth, station 020602 (données disponibles de 1970 à 2010);
- Rivière York, station 020404 (données disponibles de 1980 à 2010);
- Rivière Saint-Jean, station 020301 (données disponibles de 1979 à 1989).

Le tableau 2 résume les principales caractéristiques de ces rivières en termes de débit et le tableau 3 donne les débits moyens correspondant aux trois périodes de l'année 1997 pour lesquelles les données du modèle de l'OGSL ont été obtenues.

Tableau 2 : Hydrologie des affluents du havre et de la baie de Gaspé

Rivière	Période	Débit moyen (m ³ /s)	Débit moyen de crue (m ³ /s)	Débit maximum sur la période (m ³ /s)
Dartmouth	1970-2010	15	145	639
York	1980-2010	13	130	280
Saint-Jean	1979-1989	20	140	560

Tableau 3 : Débits correspondant aux périodes de simulation du modèle de l'OGSL

Rivière	Débit (m ³ /s)		
	Vent calme (12 -15 sept. 1997)	Vent NO (12 - 14 nov. 1997)	Vent SE (22 - 23 août 1997)
Dartmouth	1,3	14,0	1,4
York	3,3	9,6	2,4
Saint-Jean	4,0	12,0	4,0

4.0 MODÉLISATION DE L'HYDRODYNAMIQUE ET DES GRADIENTS DE DENSITÉ

4.1 Outils de modélisation

Tous les travaux de modélisation de la présente étude ont été effectués à l'aide des logiciels de la famille MIKE, conçus et commercialisés par la firme danoise DHI Water & Environment. Les conditions d'écoulement prévalant dans la zone à l'étude ont conduit à la mise en œuvre de la version tridimensionnelle du modèle, appelée MIKE 3, qui permet de simuler les écoulements à surface libre dans des milieux soumis à une stratification verticale des courants et/ou de la densité.

La modélisation de l'hydrodynamique (niveaux d'eau et courants) a été réalisée à l'aide du module HD de MIKE 3 et le module de transport, également intégré dans MIKE 3, a permis de simuler les effets de densité liés à la température et à la salinité des masses d'eau.

4.2 Limites du modèle et bathymétrie numérique

La modélisation numérique doit couvrir l'ensemble du havre et de la baie de Gaspé. Il apparaît en effet difficile, voire impossible, de limiter le modèle au havre proprement dit car l'écoulement au passage des pointes de Penouille et de Sandy Beach est trop complexe pour qu'on puisse le prédéfinir et l'imposer à la limite du modèle. Un modèle limité au havre comporterait des incertitudes pouvant affecter la précision des résultats dans la zone d'intérêt.

L'emprise du modèle adoptée pour la présente étude, qui est illustrée à la figure 15, est très similaire à celle utilisée dans l'étude de Koutintonsky et al. (2001). Le modèle possède essentiellement une limite aval correspondant à l'entrée de la baie et trois limites amont correspondant à l'embouchure des rivières Dartmouth, York et Saint-Jean.

La bathymétrie numérique a été montée grâce au pré-processeur MIKE Zero et à des utilitaires de traitement et de conversion développés au GCL. Les données bathymétriques ayant servi de base à la modélisation ont déjà été identifiées à la section 3.2.

La modélisation numérique était basée sur l'utilisation d'un maillage flexible aux volumes finis (MIKE 3 FM) permettant d'ajuster facilement la résolution spatiale dans les différentes portions du modèle et offrant une flexibilité accrue dans le choix des modules de calcul.

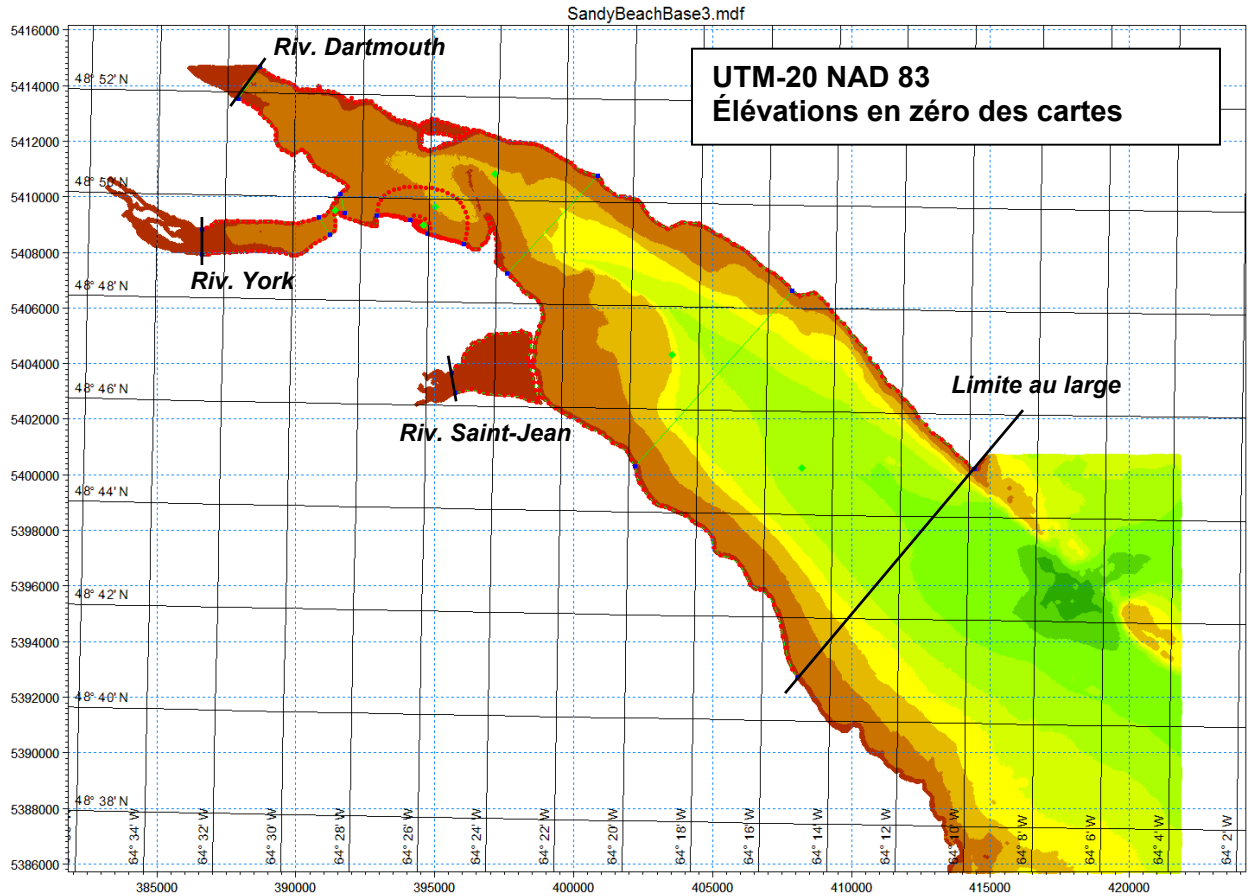
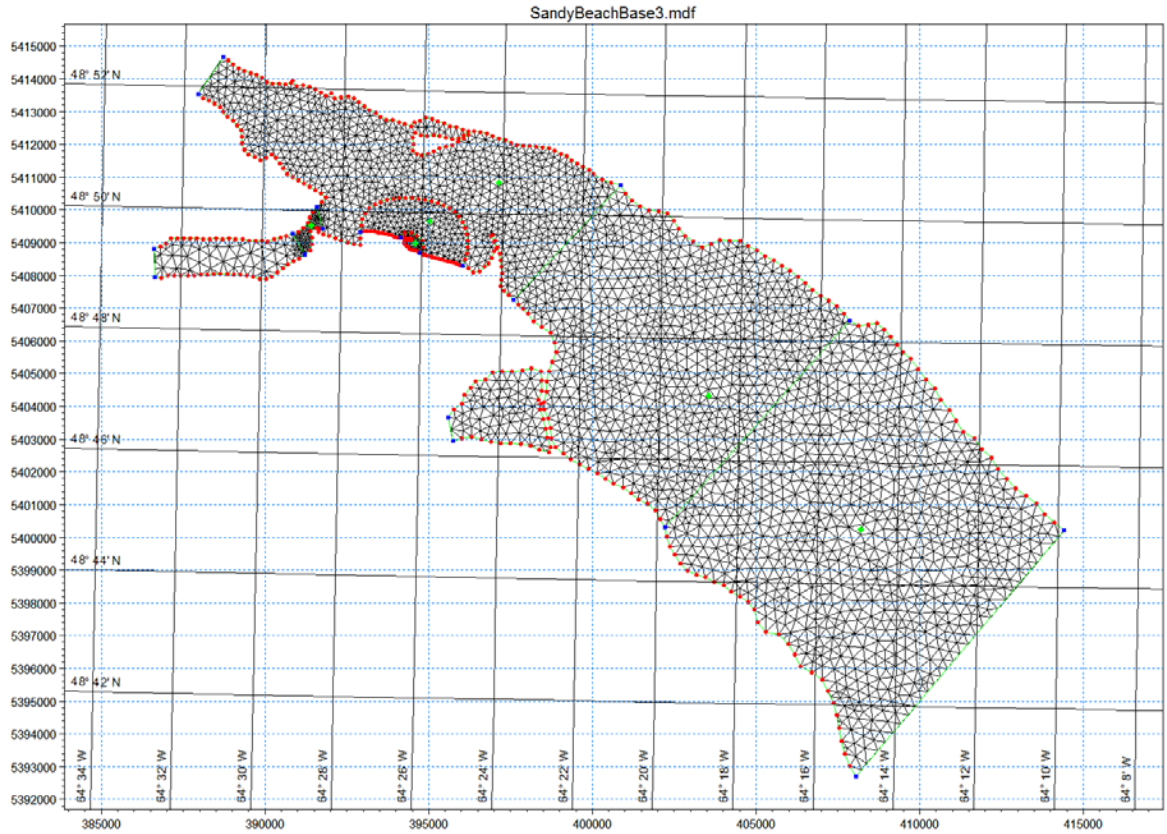


Figure 15 : Limites du modèle et montage de la bathymétrie numérique

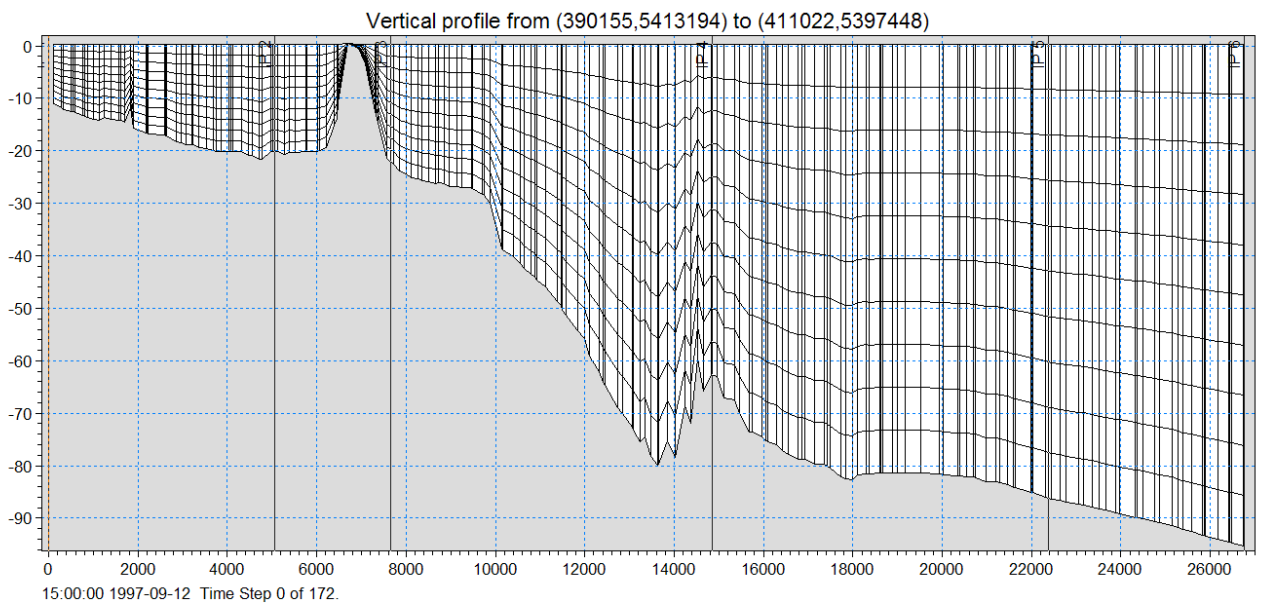
La bathymétrie numérique était constituée d'éléments triangulaires montrant une résolution croissante entre l'entrée de la baie de Gaspé et la zone des travaux. La discrétisation verticale comportait dix couches dans l'ensemble de la zone modélisée. L'épaisseur de ces couches était donc de l'ordre de 10 m à l'entrée de la baie de Gaspé et de 1 m dans le havre (figure 16).

Le modèle est géoréférencé selon la projection UTM NAD 83 (fuseau 20). L'ensemble des élévations (bathymétrie et niveau d'eau) est rattaché au zéro des cartes de Pointe Saint-Pierre.

Les figures 17 et 18 présentent respectivement une vue tridimensionnelle de la bathymétrie obtenue pour l'ensemble de la zone modélisée puis un gros plan de la bathymétrie du havre.



a) Vue en plan



b) Coupe longitudinale

Figure 16 : Discretisation spatiale

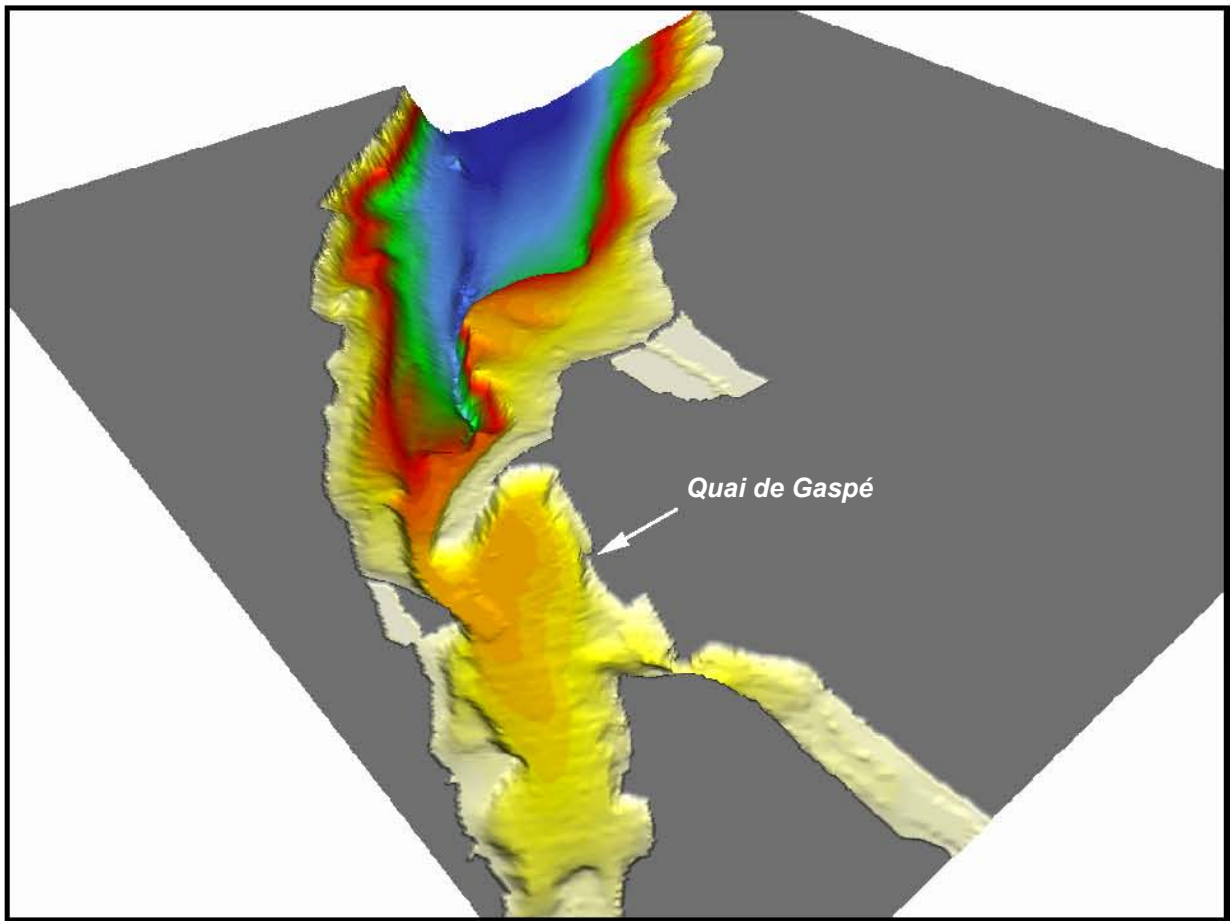


Figure 17 : Vue tridimensionnelle de la bathymétrie d'ensemble

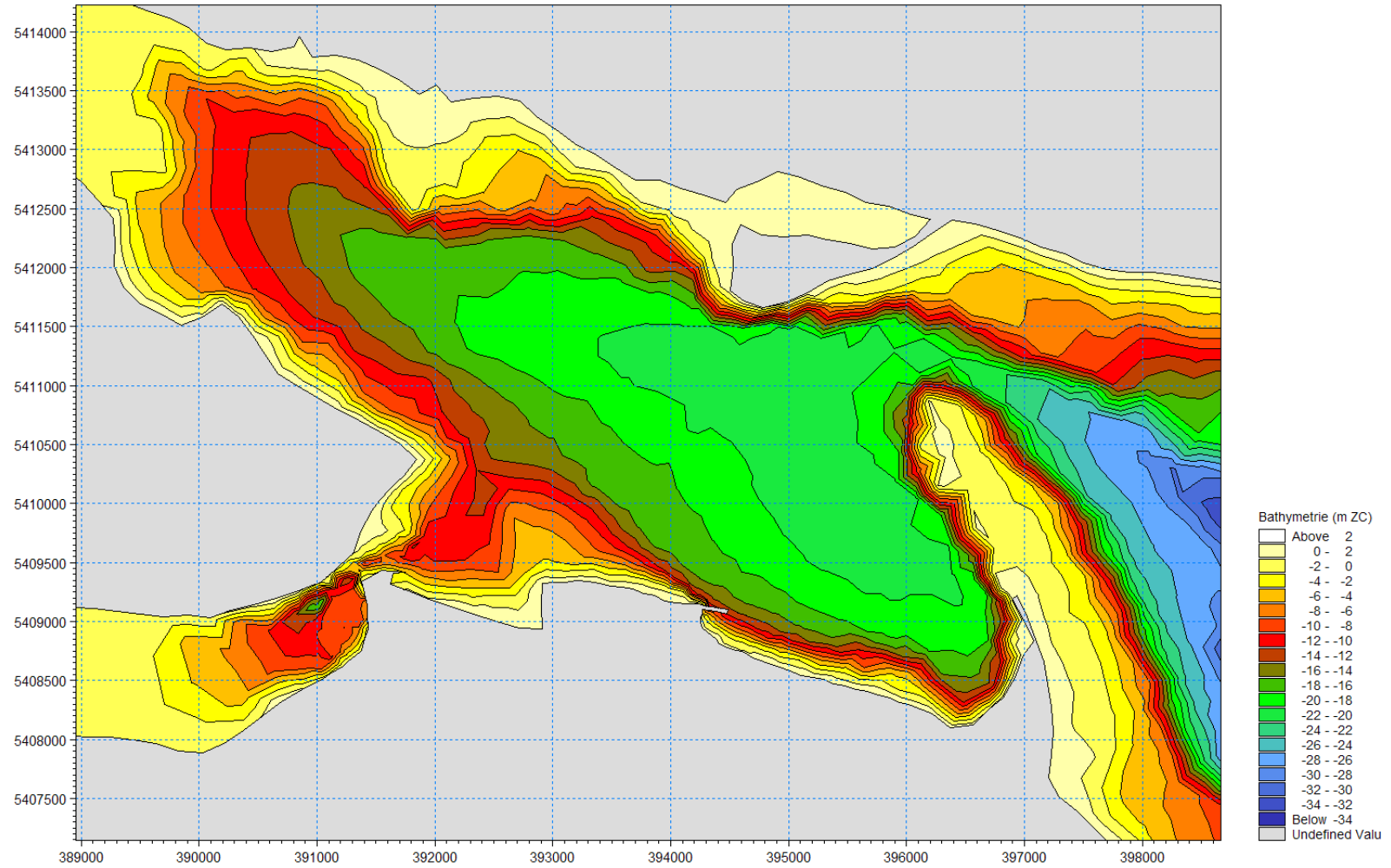


Figure 18 : Bathymétrie numérique – Havre de Gaspé

4.3 Conditions aux limites

4.3.1 Température – Salinité

Tel que mentionné précédemment, l'évolution de la répartition verticale de la salinité et de la température à la limite aval du modèle (baie de Gaspé) était imposée sur la base des résultats fournis par le modèle d'ensemble de l'OGSL.

La température et la salinité de surface des rivières étaient établies d'après les valeurs typiques citées dans la revue de Savard (2002) et l'étude de Koutitonsky et al. (2001).

4.3.2 Niveaux de marée

L'effet de la marée est imposé à la limite aval du modèle d'après les niveaux prédits par le modèle de l'OGSL, dont la concordance avec les prédictions du SHC pour Pointe Saint-Pierre avait été vérifiée au préalable (figure 9).

4.3.3 Débits des rivières

Un débit constant était imposé à chacune des trois limites amont du modèle, qui correspondaient respectivement aux rivières Dartmouth, York et Saint-Jean. Les valeurs du débit étaient établies d'après les données du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) déjà présentées à la section 3.8.

Les premiers résultats de simulation ont toutefois rapidement montré que les apports de la Saint-Jean n'avaient aucune influence sur les conditions d'écoulement dans la zone d'intérêt. Le débit de la rivière Saint-Jean a donc été négligé pour la suite des simulations.

4.3.4 Vent

Le modèle numérique permettait de simuler les courants de surface générés par l'effet de cisaillement associé au vent.

La vitesse du vent applicable à chacune des simulations a été établie d'après les données recueillies par Environnement Canada à la station météorologique de l'aéroport de Gaspé.

4.4 Conditions initiales

Les simulations hydrodynamiques débutaient en présence d'un niveau d'eau constant et de vitesses nulles dans l'ensemble de la zone modélisée. Les conditions de salinité et de température étaient établies d'après les résultats du modèle d'ensemble de l'OGSL.

4.5 Paramètres de modélisation

4.5.1 Durée des simulations et pas de temps

La discrétisation spatiale était basée sur un pas de temps de $\Delta t = 0,5$ s. Les simulations correspondaient à une durée d'au moins trois cycles de marée (environ 36 heures), en vue d'éviter d'une part les imprécisions liées à la mise en œuvre initiale de l'écoulement et, d'autre part, d'obtenir des panaches de dispersion ayant atteint leur emprise maximale.

4.5.2 Rugosité des fonds

Les forces de frottement entre l'écoulement et les fonds marins étaient caractérisées au modèle numérique par le coefficient de rugosité de Manning n . Une valeur usuelle de $n = 1/32$ a été utilisée dans pour l'ensemble de la zone modélisée.

4.5.3 Viscosité turbulente

La turbulence de l'écoulement, qui s'effectue à une échelle inférieure à celle du maillage de la bathymétrie numérique, doit tout de même être prise en compte par le modèle afin d'obtenir une simulation réaliste des champs de courants. Les formulations disponibles dans MIKE 3 pour représenter les effets de la turbulence utilisent un paramètre de viscosité turbulente.

Aux fins de la présente étude, cette viscosité turbulente était calculée d'après la formulation de Smagorinsky sur le plan horizontal et à l'aide du modèle $k-\varepsilon$ sur la verticale.

4.6 Scénarios simulés

Comme on l'a souligné précédemment, l'hydrodynamique du havre de Gaspé est conditionnée par un nombre considérable de paramètres soumis entre eux à des interactions complexes : niveaux d'eau, courants de marée, vents, courants de densité, etc. Une seule simulation ne peut

donc représenter la gamme complète des conditions hydrodynamiques pouvant survenir dans la zone à l'étude. Par ailleurs, le nombre de paramètres à prendre en compte et la complexité des modèles qui sont mis en œuvre ne permettent pas d'envisager des simulations couvrant des périodes de plus de quelques jours.

Dans ce contexte, la pratique usuelle consiste à réaliser des simulations distinctes faisant varier des paramètres clés dans la gamme complète des valeurs pouvant survenir sur le site. Tout en maintenant des valeurs réalistes pour les données de base, on cherche à définir les conditions les plus déterminantes vis-à-vis de la dispersion des panaches de sédiments en suspension.

Une simulation de base a d'abord été effectuée en présence de l'un des trois épisodes considérés pour l'extraction des résultats du modèle de l'OGSL. On a sélectionné le cas du 22 au 23 août 1997 car il conduisait à la marée de marnage maximal. Les conditions imposées à la limite au large de notre modèle correspondaient au niveau d'eau et aux profils de salinité et température fournis par le modèle de l'OGSL. Pour la simulation de base, le vent du SE qui soufflait pendant cet épisode a été négligé.

Dans le but d'obtenir des panaches de sédiments dragués de taille maximale, cette première simulation a été prolongée sur une durée totale de 72 heures, en répétant simplement le cycle de 24 heures fourni par le modèle de l'OGSL.

Comme on le verra à la section 5, cette simulation de base a par la suite été modifiée en vue d'incorporer l'effet des principaux paramètres pouvant influencer la dispersion des panaches de sédiments dragués.

4.7 Résultats

4.7.1 Données de validation

Conformément au devis d'étude préparé par TPSGC, la présente étude ne prévoyait aucune mesure de terrain. La validation des résultats de modélisation hydrodynamique devait donc s'effectuer sur la base des données et études disponibles (cf. section 3).

Le principal défi posé par le processus de validation réside dans la multiplicité des forces motrices pouvant influencer l'hydrodynamique de la baie et, surtout, par les très faibles courants qui sont généralement observés dans l'ensemble du secteur modélisé.

4.7.2 Résultats – Simulation de base

Tel que mentionné précédemment, la simulation de base correspondait aux conditions suivantes :

- Marée de vive-eau du 22 – 23 août 1997;
- Stratification de la température et de la salinité fournie par le modèle de l'OGSL;
- Aucun vent ou vague;
- Débit en rivière de 1,4 m³/s et 2,4 m³/s dans les rivières Dartmouth et York respectivement (voir tableau 3).

Les figures 19 et 20 présentent respectivement les courants maximums obtenus au flot et au jusant dans le havre de Gaspé, 2 heures avant la pleine mer supérieure et 1 heure avant la basse mer inférieure.

Il est clair que les vitesses maximales sont obtenues dans le passage étroit délimité par la pointe de Sandy Beach et la presqu'île de Penouille. Au flot (figure 19), les vitesses maximales varient de 0,2 à 0,3 m/s et l'intensité des courants augmente avec la profondeur. Au jusant (figure 20), la tendance s'inverse et les vitesses maximales, qui atteignent 0,4 à 0,5 m/s, sont observées près de la surface. On observe alors près du fond des courants inversés, qui pénètrent dans le havre, alors que les vitesses de surface et de mi-profondeur sont orientées vers l'aval.

Les vitesses maximales observées à proximité du quai de Gaspé ne dépassent pas 0,1 m/s. Dans la zone immédiate des travaux de dragage, les vitesses sont de moins de 5 cm/s.

Il est à souligner que les vitesses maximales obtenues près de la pointe de Sandy Beach concordent très bien avec les mesures effectuées dans ce secteur par Pettigrew et al. (1991) et par Koutintonsky et al. (2001).

Les très faibles courants prédits à l'abri de la pointe de Sandy Beach, qui sont de l'ordre de 0,10 m/s, sont également cohérents avec les relevés de Pettigrew et al. (courantomètre C2, figure 7) et les résultats obtenus par Gagnon (2010) à l'aide de flotteurs dérivants. En présence de courants aussi lents, il apparaît a priori que la dispersion des panaches de sédiments dragués sera relativement limitée.

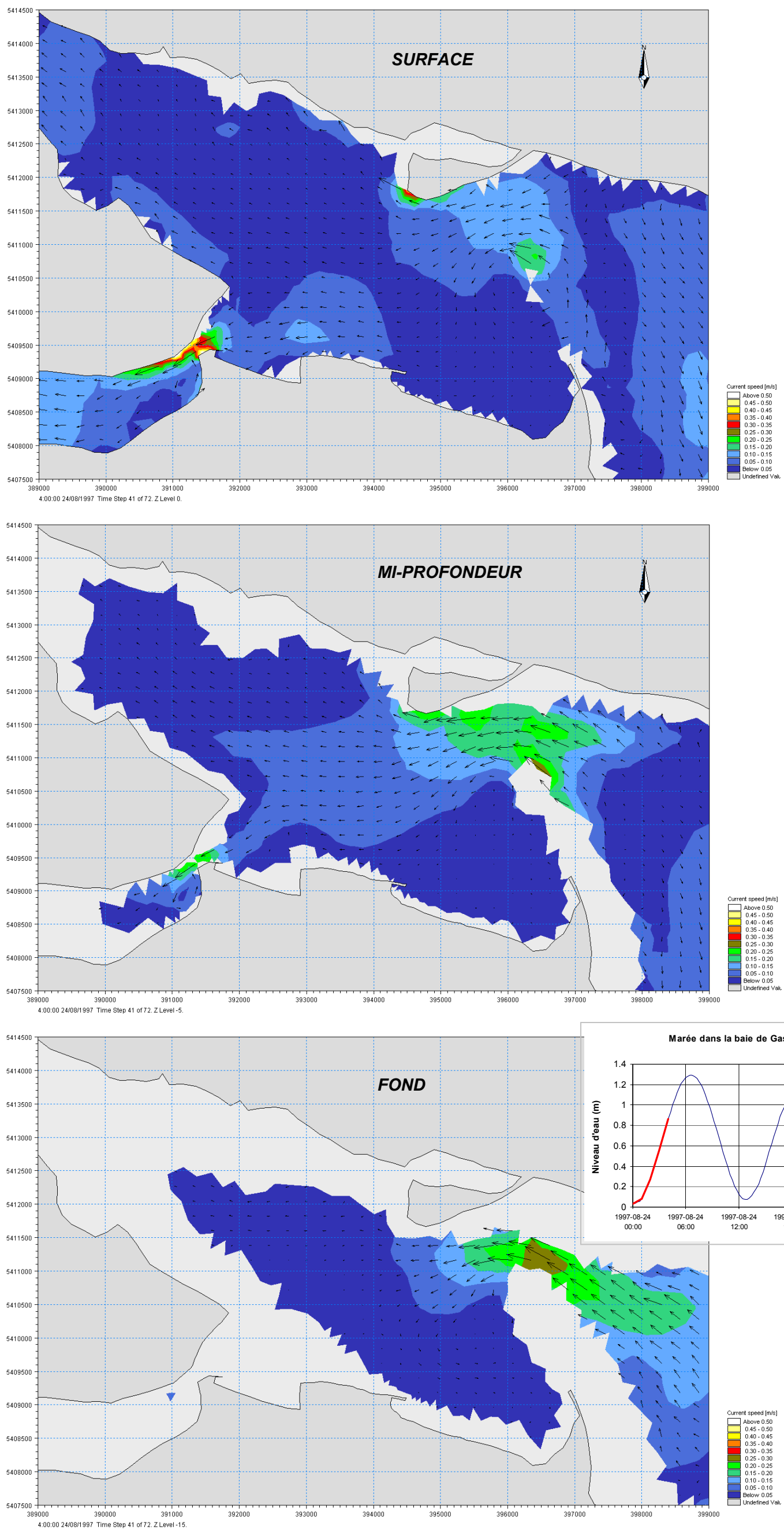


Figure 19 : Simulation de base – Courants maximums au flot

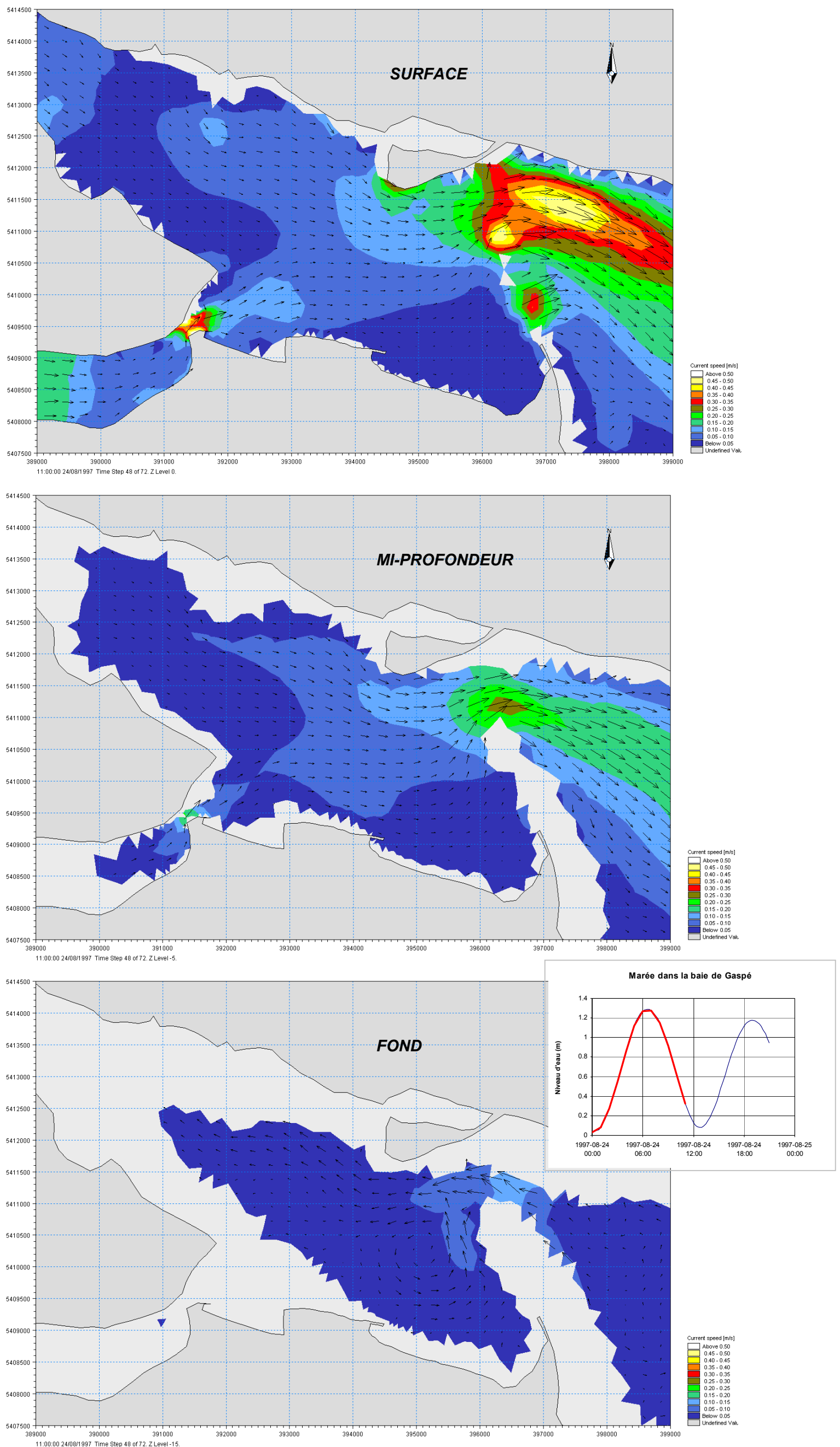


Figure 20 : Simulation de base – Courants maximums au jusant

5.0 MODÉLISATION DE LA DISPERSION DES SÉDIMENTS DRAGUÉS

5.1 Outil de modélisation

La simulation de la dispersion des matériaux remis en suspension au site du dragage a été effectuée à l'aide du module MT (*Mud Transport*) de MIKE 3. Ce modèle permet de simuler l'ensemble des processus de transport, érosion et déposition des sédiments cohésifs.

La remise en suspension des matériaux causés par les travaux de dragage est simulée en une cellule du maillage en imposant une source ponctuelle de sédiments correspondant à la position de la drague et, par conséquent, à l'endroit où la concentration des sédiments remis en suspension est maximale. Une seule source, définie sur le fond est utilisée dans le cas d'un dragage hydraulique. Dans le cas d'un dragage mécanique, donnant lieu à des pertes des sédiments étalées sur toute la colonne d'eau, plusieurs sources de sédiments sont réparties sur la verticale, à l'emplacement de la drague.

Chaque source est caractérisée par un débit (d'eau et de sédiments) et une concentration volumique de sédiments, dont le produit correspond au débit solide (kg/s) de sédiments « perdus » au site des travaux. Le modèle tient compte de la granulométrie des sédiments dragués en définissant des classes de sédiments caractérisées par leur masse volumique et leur vitesse de chute. Le modèle prend également en compte les phénomènes affectant la vitesse de chute, comme la floculation et l'effet d'entrave lié à la concentration.

À partir de chacune des sources, l'advection-dispersion des sédiments est calculée et le modèle prédit la sédimentation et, par conséquent, la diminution de la concentration des sédiments transportés dans la colonne d'eau. Au besoin, les changements morphologiques résultants de cette sédimentation peuvent être simulés. Le modèle permet également de simuler les risques d'érosion des fonds (consolidés ou non) et de remise en suspension des sédiments.

5.2 Hypothèses de base

5.2.1 Volume dragué et cadence des travaux

Le projet de restauration prévoit le dragage d'un volume de 37 700 m³, qui occupe une superficie de 60 000 m² (cf. figure 2, page 3).

Le rapport d'évaluation environnementale préalable (Gaudette et al., 2009) envisage deux options pour le dragage : un dragage hydraulique ou un dragage mécanique avec benne preneuse. Le taux de sédiments dragués varie beaucoup avec ces options et s'établit à 300 m³/jour pour le dragage mécanique contre 2 000 m³/jour pour le dragage hydraulique. En supposant 10 heures de travaux par jour, on obtient une durée totale de 126 jours pour le dragage mécanique et de 19 jours pour le dragage hydraulique (tableau 4).

Tableau 4 : Pertes de sédiments au site des travaux de dragage

Paramètres	Type de dragage	
	<i>Mécanique</i>	<i>Hydraulique</i>
Volume total à draguer (m ³)	37 700	37 700
Durée journée travail (h)	10	10
Taux (m ³ /jour)	300	2 000
Durée totale (jours)	126	19
Pertes relatives	6%	1%
Pertes volumiques (m ³ /jour)	18	20
Masse volumique des sédiments ¹ (kg/m ³)	2 700	2 700
Fraction solide	59,5%	59,5%
Concentration des sédiments ² (kg/m ³)	1 607	1 607

¹ Masse d'un volume de 1 m³ de sédiments secs ayant une porosité nulle.

² Masse de sédiments contenue dans 1 m³ du mélange eau/sédiments au site de la drague

5.2.2 Caractéristiques des sédiments dragués

Selon les informations fournies par TPSGC, la masse volumique des sédiments varie de 2 700 à 2 850 kg/m³. Il est normal d'obtenir des masses volumiques supérieures à celles des sédiments naturels (environ 2 600 kg/m³), puisqu'une certaine portion des sédiments dragués est en fait constituée de concentré de cuivre. Ainsi, les particules posant une menace pour les exploitations maricoles ont probablement une densité bien supérieure à cette gamme.

Pour assurer une prédiction conservatrice des panaches de dispersion, on a tout de même fixé à 2 700 kg/m³ la masse volumique des sédiments remis en suspension, et ce pour l'ensemble des simulations.

Sur la base des analyses granulométriques présentées dans l'étude de Dessau (Gaudette et al., 2009), le tableau 5 présente la répartition adoptée pour l'ensemble des simulations. Les sédiments dragués comportent ainsi 4% de gravier, 54% de sable, 35% de silt et 7% d'argile (basé sur la classification de Wentworth). Ces valeurs sont le résultat de moyennes pondérées par la superficie respectives des zones A, B et C.

En pondérant les valeurs de siccité obtenues dans les diverses portions de la zone draguée, on a fixé à 59,5% la fraction solide des matériaux dragués (tableau 5).

Tableau 5 : Caractéristiques des sédiments dragués

(source : Gaudette et al., 2009)

<i>Paramètre</i>	<i>Zone</i>			<i>Total/Moyenne</i>
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	
Superficie (m ²)	52050	2450	5250	59750
Profondeur dragage (m)	0,60	0,95	0,80	---
Granulométrie (%)				
gravier	2,7	1,7	16,6	3,9
sable	54,0	59,9	55,2	54,3
silt	36,4	33,9	25,1	35,3
argile	6,9	4,5	3,2	6,5
Fraction solide (%)	60,2	51,8	56,5	59,5

5.2.3 Pertes et remise en suspension des sédiments au site de dragage

La donnée essentielle requise pour la simulation des panaches de dispersion des matériaux dragués consiste à estimer la quantité de sédiments relâchés ou remis en suspension par les opérations de dragage.

On exprime généralement ces pertes de matériau en termes relatifs, par rapport au volume de sédiments dragué ou au taux de dragage. La valeur précise de ces pertes est très difficile à déterminer car elle dépend de nombreux paramètres : type de drague, particularité des équipements, expérience de l'opérateur, caractéristiques des fonds dragués (granulométrie, dureté, présence de blocs ou débris), etc.

Étant donné les nombreux paramètres pouvant influencer les pertes de sédiments, et du fait qu'ils sont variables d'un site à l'autre, il est pratiquement impossible d'établir un consensus dans l'estimation des volumes de matériaux remis en suspension par les travaux de dragage.

Dans un rapport récent portant sur le dragage des sédiments contaminés, le US Army Corps of Engineers (USACE) (Palermo et al., 2008) fournit des estimés relatifs aux volumes de sédiments remis en suspension au site des travaux. On y souligne d'entrée de jeu que la plupart des données disponibles à ce sujet correspondent à des dragages d'entretien de ports ou chenaux de navigation. Dans le cas du dragage de sédiments contaminés, les pertes devraient être moins importantes à cause des précautions accrues qui devraient en principe accompagner ce type de dragage.

En révisant les estimations effectuées par plusieurs auteurs, le USACE définit des valeurs «conservatrices » pour les taux de remise en suspension des sédiments, qui correspondent à 0,5% pour le dragage hydraulique et 1% pour le dragage mécanique avec benne étanche ou prévenant la surverse.

Dans le cadre d'une étude comparative pour les modes de dragage mécanique et hydraulique dans le port de Bécancour, le Groupe-Conseil LaSalle a réalisé, en collaboration avec la firme CJB Environnement, une revue de littérature des pertes de sédiments aux sites de travaux de dragage spécifiquement axée sur l'expérience du Saint-Laurent et des Grands Lacs.

Cette étude (Villeneuve, 2003) avait conduit à des estimations conservatrices des pertes relatives, que nous conserverons pour les simulations de la présente étude. Les pertes de sédiments adoptés sont de 1% dans le cas du dragage hydraulique et de 6% dans le cas du dragage mécanique à benne preneuse (tableau 4).

En multipliant ces taux de pertes (1% et 6% selon la méthode de dragage) aux volumes journaliers dragués, on obtient des pertes de matériaux (eau et sédiments) de 18 et 20 m³/jour pour les dragages mécanique et hydraulique respectivement (voir tableau 4). Ce résultat indique que les deux modes de dragage correspondent pratiquement au même taux de remise en suspension.

Il importe toutefois de souligner que la durée des travaux estimée dans l'étude de Dessau (Gaudette et al., 2009) est de 126 jours pour le dragage mécanique contre seulement 19 jours pour le dragage hydraulique. Le dragage mécanique est donc 6,6 fois plus long que le dragage hydraulique. Selon ces hypothèses, le dragage mécanique aura donc remis en suspension à la fin des travaux de dragage un volume de matériaux six à sept fois plus important que dans le cas du dragage hydraulique.

5.2.4 Vitesses de chute

Pour chacune des trois classes de sédiments prises en compte dans la simulation (sables, silts et argiles), le tableau 6 donne la valeur représentative de la vitesse de chute imposée dans les simulations. La vitesse de chute a été calculée en utilisant la formulation de Rubey pour le coefficient de traîné des particules descendantes.

Les effets de floculation et de vitesse de chute entravée ont été négligés dans les simulations.

5.2.5 Concentration des contaminants

En combinant les résultats d'analyse chimique présentés dans le rapport de Dessau (Gaudette et al., 2009) aux données plus récentes fournies par les essais DRET³ réalisés par le laboratoire Exova (Perron & Côté, 2010), les teneurs en contaminants des sédiments dragués ont été fixées aux valeurs suivantes :

³ Le *Dredging Elutriate Test* (DRET) est un essai de laboratoire proposé par l'USACE (2008) en vue de simuler le remaniement des fonds causé par les travaux de dragage et de mesurer la concentration des contaminants libérés sous formes particulaire et dissoute.

- 2 000 mg/kg pour le cuivre;
- 30 mg/kg pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) totaux.

Sur la base de ces valeurs et des hypothèses déjà formulées aux tableaux 4 et 5 pour la concentration totale et la granulométrie des sédiments, il devient possible de calculer, pour chaque classe granulométrique, les concentrations de sédiments et de contaminants (Cu et HAP Totaux) imposées au modèle numérique pour les matériaux relâchés au site immédiat des travaux de dragage (i.e. à chacun des points-source spécifiés au modèle). Ces valeurs de concentration sont présentées au tableau 6.

Tableau 6 : Vitesses de chute des sédiments et concentrations imposées au site des travaux de dragage

<i>Paramètres</i>	<i>Total</i>	<i>Sable</i>	<i>Silt</i>	<i>Argile</i>	<i>Gravier</i>
Vitesse de chute (mm/s)	---	37	0.15	0.002	---
Concentration des sédiments (kg/m ³)	1607	874	567	104	62
Teneur en Cu des sédiments (mg/kg)	2 000	2 000	2 000	2 000	---
Concentration Cu (kg/m ³)	3.21	1.75	1.13	0.21	---
Teneur en HAP Totaux dans les sédiments (mg/kg)	30	30	30	30	---
Concentration HAP Totaux (kg/m ³)	4.82E-02	2.62E-02	1.70E-02	3.12E-03	---

Il est à noter que l'approche préconisée consiste à supposer que le mélange eau-sédiments relâché dans la colonne d'eau au site du dragage garde la même teneur en solides (59,5 %) que le matériau dragué. On suppose également que la totalité des solides « perdus » au site des travaux sont dispersés comme des particules élémentaires (i.e. absence de mottes cohésives se déposant rapidement sur le fond). Ces hypothèses très conservatrices expliquent les très fortes concentrations de sédiments, cuivre et HAP imposées dans le modèle numérique (tableau 6) au(x) point(s)-source correspondant à la position de la drague.

Tel que mentionné à la section 2.0, il importe de souligner que les essais DRET n'ont pas révélé de concentration de contaminants dissous nécessitant la mise en œuvre de simulations supplémentaires. Nos travaux de modélisation ont ainsi été limités à la dispersion des sédiments remis en suspension par le dragage.

5.3 Conditions initiales et aux limites

Les simulations de la dispersion des matériaux dragués débutaient en imposant une concentration nulle de MES et de contaminants dans l'ensemble de la zone modélisée. Tout au long du calcul, des concentrations nulles étaient maintenues aux limites du modèle (i.e. entrée de la baie et embouchure des rivières)

5.4 Paramètres de modélisation

Un paramètre important affectant la modélisation du transport des sédiments dragués est lié au choix des coefficients de dispersion horizontale et verticale. Pour l'ensemble des simulations, les coefficients de dispersion étaient calculés d'après l'intensité de la viscosité turbulente. Cette option, proposée par défaut dans le module MT de MIKE 3, fait varier la dispersion en fonction du niveau de turbulence des écoulements.

Comme on le verra plus loin, les panaches de dispersion prévus dans la présente étude ont une emprise très limitée. La définition des coefficients de dispersion n'exercerait donc pas un impact déterminant sur les résultats obtenus.

5.5 Résultats - Simulation de base

La simulation de base répète sur une période de 72 heures la marée de vive-eau observée les 24 et 25 août 1997. L'influence du vent et des vagues est négligée et les débits des rivières Dartmouth et York sont respectivement de 1,4 et 2,4 m³/s. Le champ des courants prédits pour ces conditions a été présenté aux figures 19 et 20.

On suppose que les travaux de dragage s'effectuent à l'aide d'une drague hydraulique (i.e. remise en suspension des sédiments concentrée près du fond) localisée au point indiqué à la figure 21. Cet emplacement se situe aux limites de la zone A délimitée dans le rapport de Dessau (Gaudette et al., 2009).

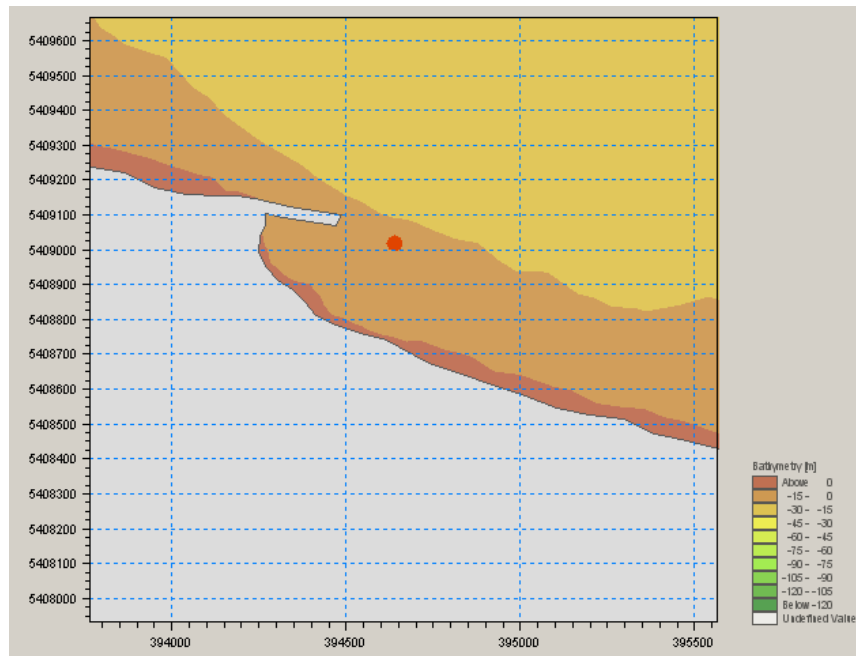


Figure 21 : Localisation des travaux de dragage – Simulation de base

La figure 22 présente la forme en plan du panache de sédiments obtenus à différentes profondeurs, après 72 heures de dragage hydraulique en continu. Encore une fois, il faut insister sur le fait que cette approche est conservatrice, car en réalité le dragage ne sera pas effectué sur une base continue. Entre les séquences de travail de 10 heures par jour, le panache aura davantage de temps pour se diluer que dans le cas d'une opération en continu.

La figure 23 présente une coupe verticale du panache, prise le long de sa plus grande dimension.

Pour les deux figures, l'échelle des couleurs permet d'établir l'emprise du panache mais également les concentrations obtenues pour les MES, le cuivre et les HAP totaux. Tel que mentionné à la section 5.2.5, les concentrations de cuivre et de HAP sont obtenues en supposant un niveau de contamination de 2 000 mg de cuivre et de 30 mg de HAP totaux par kilogramme de sédiments (secs) dragués.

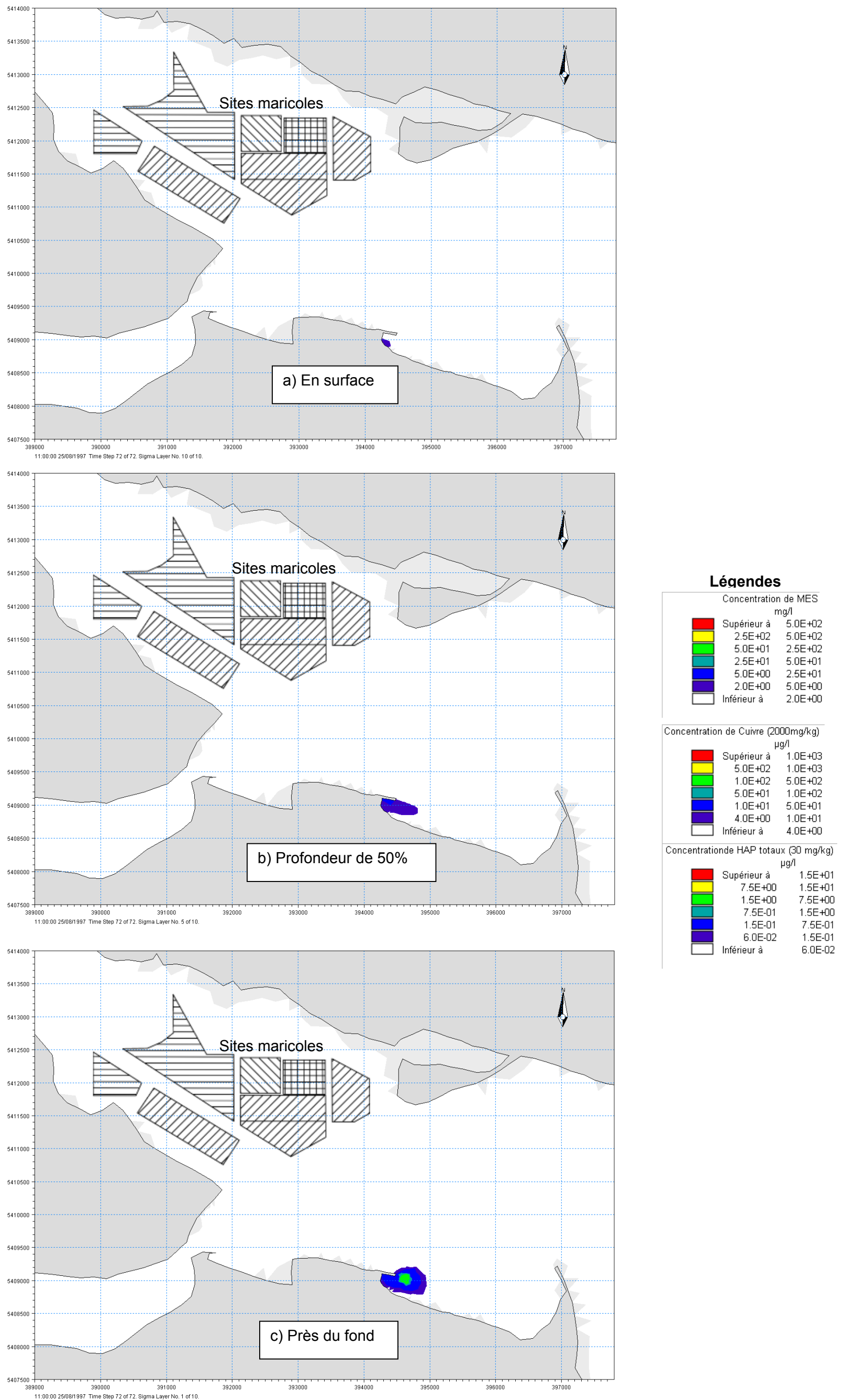


Figure 22 : Vue en plan du panache de dispersion – Simulation de base avec dragage hydraulique

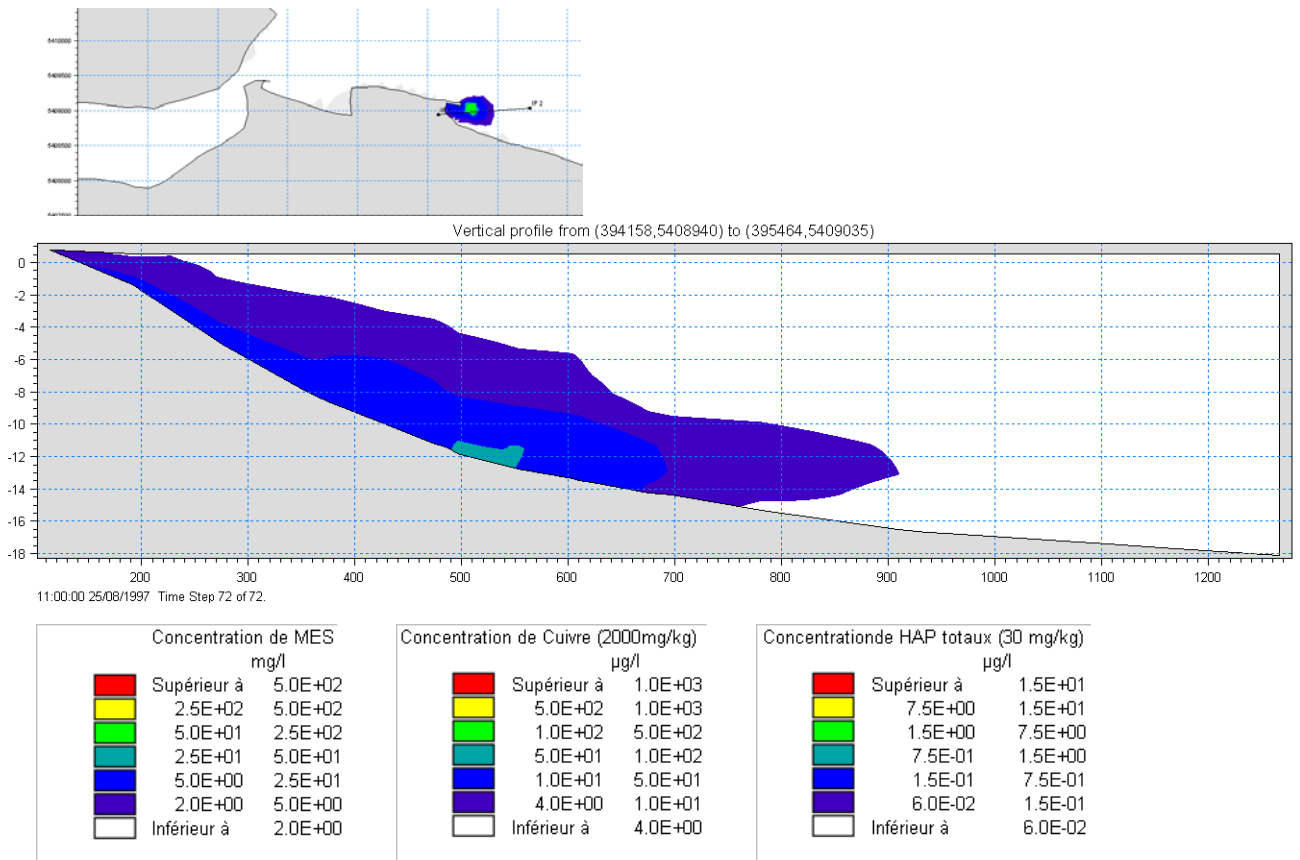


Figure 23 : Coupe verticale du panache – Simulation de base avec dragage hydraulique

La limite du panache identifiée sur ces figures correspond aux valeurs-seuils suivantes :

- 2 mg/L pour les MES;
- 4 µg/L pour le cuivre;
- 0,06 µg/L pour les HAP totaux.

Mentionnons finalement que les figures illustrent également l'emplacement des sites maricoles répertoriés dans le rapport de Dessau (Gaudette et al., 2009).

On observe d'abord aux figures 22 et 23, que la taille maximale du panache de dispersion demeure limitée aux abords immédiats des travaux. Le panache illustré correspond à 72 heures de dragage en continu mais les simulations confirment que l'emprise maximale est atteinte après environ 20 à 24 heures de dragage.

L'emprise maximale du panache est observée près du fond (figures 22c et 23), où sa dimension en plan est de l'ordre de 440 m par 900 m. Ces résultats initiaux indiquent clairement que le panache des sédiments dragués demeure très clairement en retrait des zones d'activités maricoles.

À cause de la faible intensité des courants au site des travaux, l'ensemble des sables, qui représentent 54% des matériaux dragués), de même qu'une portion importante des silts (35% des matériaux dragués) se déposent aux abords immédiats de la drague. Seules la portion fine des silts et la totalité des argiles demeurent en suspension, mais leur volume relativement faible fait en sorte que la dilution réduit rapidement les concentrations en deçà des limites acceptables.

5.6 Sensibilité des résultats

Plusieurs paramètres de modélisation ont été modifiés en vue d'établir la sensibilité des résultats initiaux et de couvrir la gamme complète des conditions pouvant influencer la taille des panaches de dispersion.

5.6.1 Type de drague

Les premiers essais ont porté sur l'influence du mode de dragage. La simulation initiale a été reprise en modélisant une drague mécanique à benne preneuse (remise en suspension sur toute la colonne d'eau) plutôt qu'une drague hydraulique (remise en suspension concentrée près du fond).

Les résultats obtenus sont présentés à la figure 24 qui offre une vue en plan du panache à différentes profondeurs et à la figure 25 qui fournit une coupe verticale du panache le long de son axe longitudinal.

Comme il fallait s'y attendre, la modélisation prédit un panache se mélangeant sur l'ensemble de la colonne d'eau alors que le panache formé par la drague hydraulique demeure plus concentré dans la couche inférieure de l'écoulement.

On observe également un étirement de la longueur du panache, qui atteint une valeur maximale de 1 200 m (figure 25).

Malgré ces changements, la panache prédit par la modélisation ne semble aucunement menaçant pour les sites de maréculture.

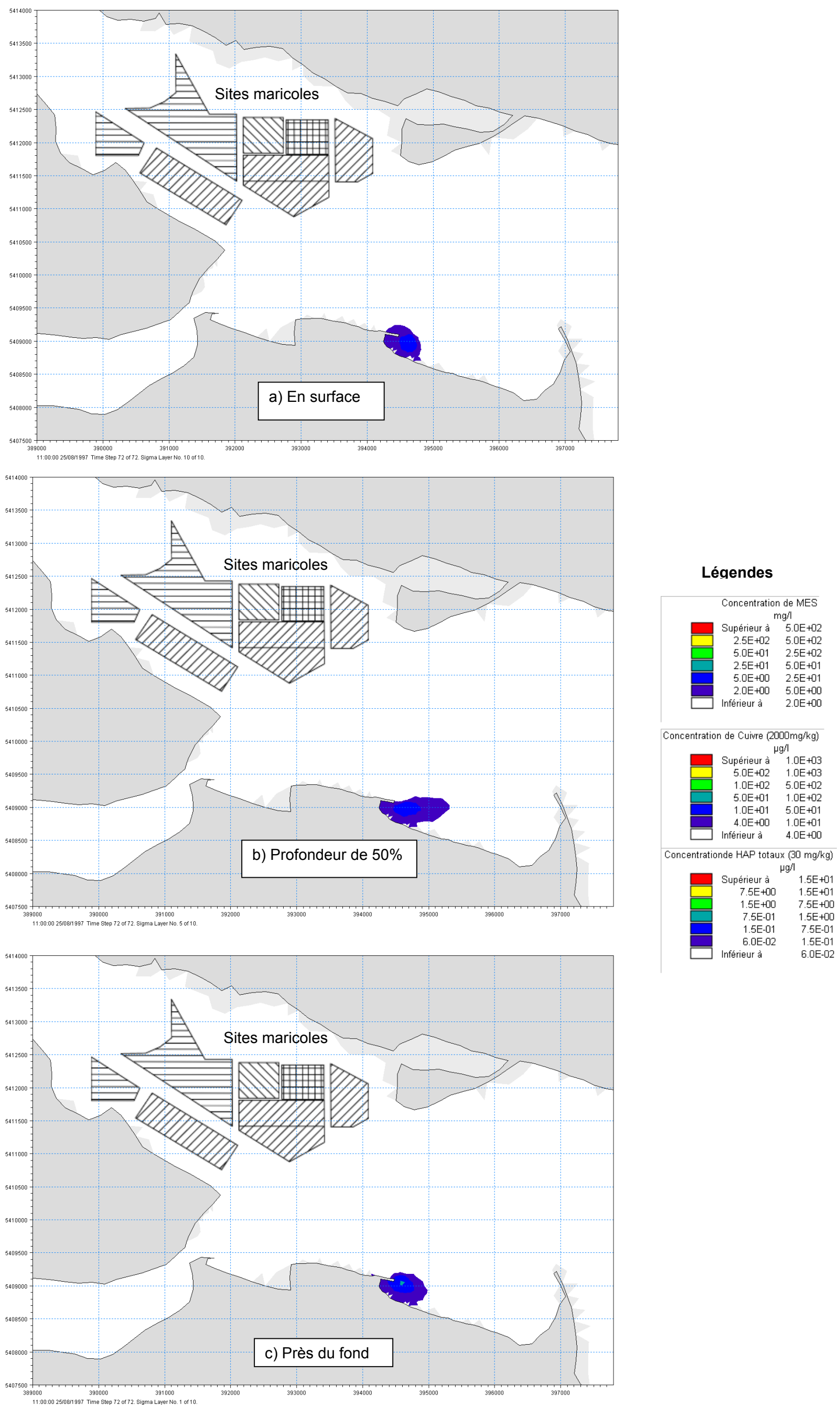


Figure 24 : Vue en plan du panache de dispersion – Dragage mécanique

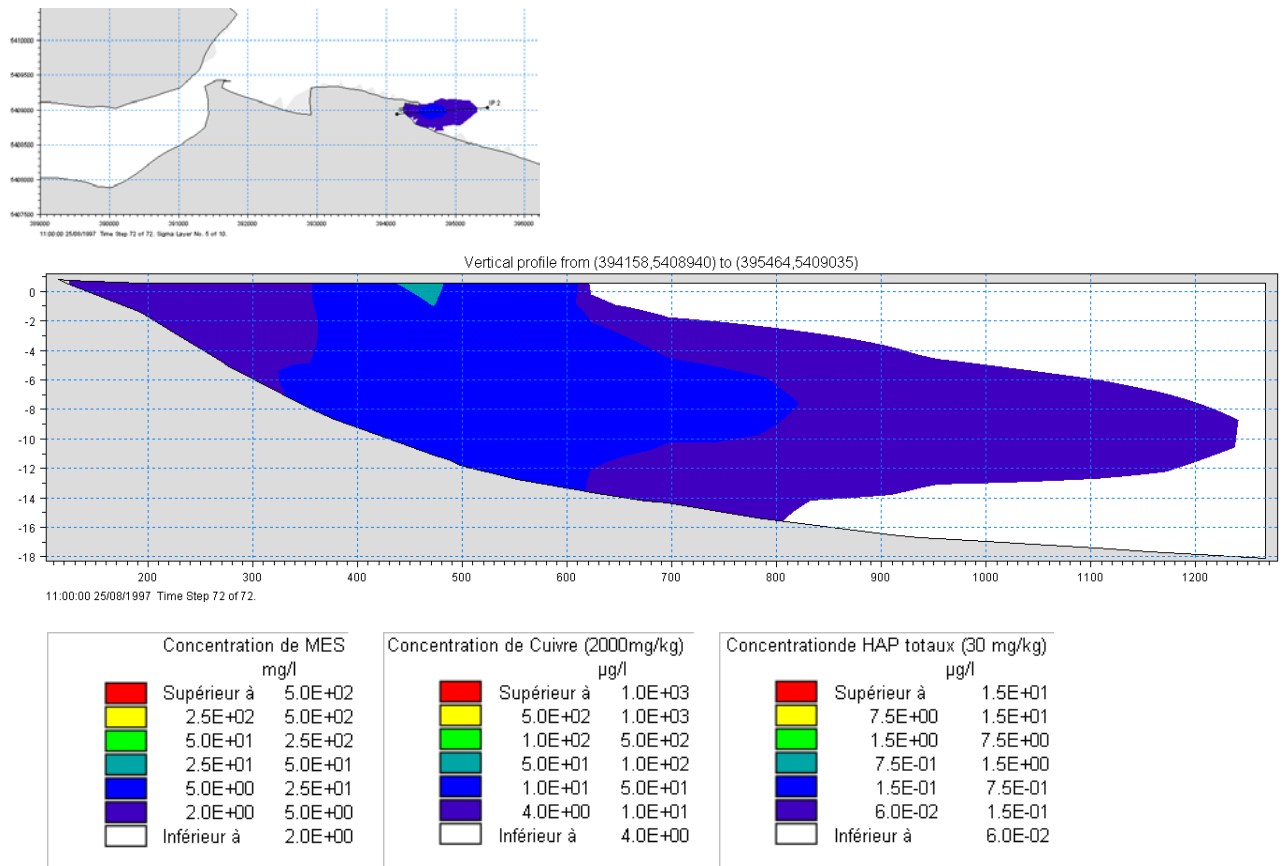


Figure 25 : Coupe verticale du panache – Dragage mécanique

5.6.2 Localisation des travaux

Les résultats présentés aux deux sections précédentes supposaient que la drague était localisée à un point situé dans le prolongement du quai, à la limite externe de la zone A identifiée dans le rapport de la firme Dessau (Gaudette et al., 2009).

De nouvelles simulations ont été effectuées en déplaçant la drague vers l'intérieur du havre, aux abords immédiats du quai (figure 26). Cet emplacement correspond à la zone de contamination maximale des sédiments (zone C).

La figure 26 illustre la taille maximale du panache obtenu pour un dragage mécanique effectué à ce nouvel emplacement et compare les résultats à ceux prédits à l'emplacement initial.

Il apparaît clairement que les courants inférieurs obtenus à l'abri du quai contribuent à limiter la dispersion du panache.

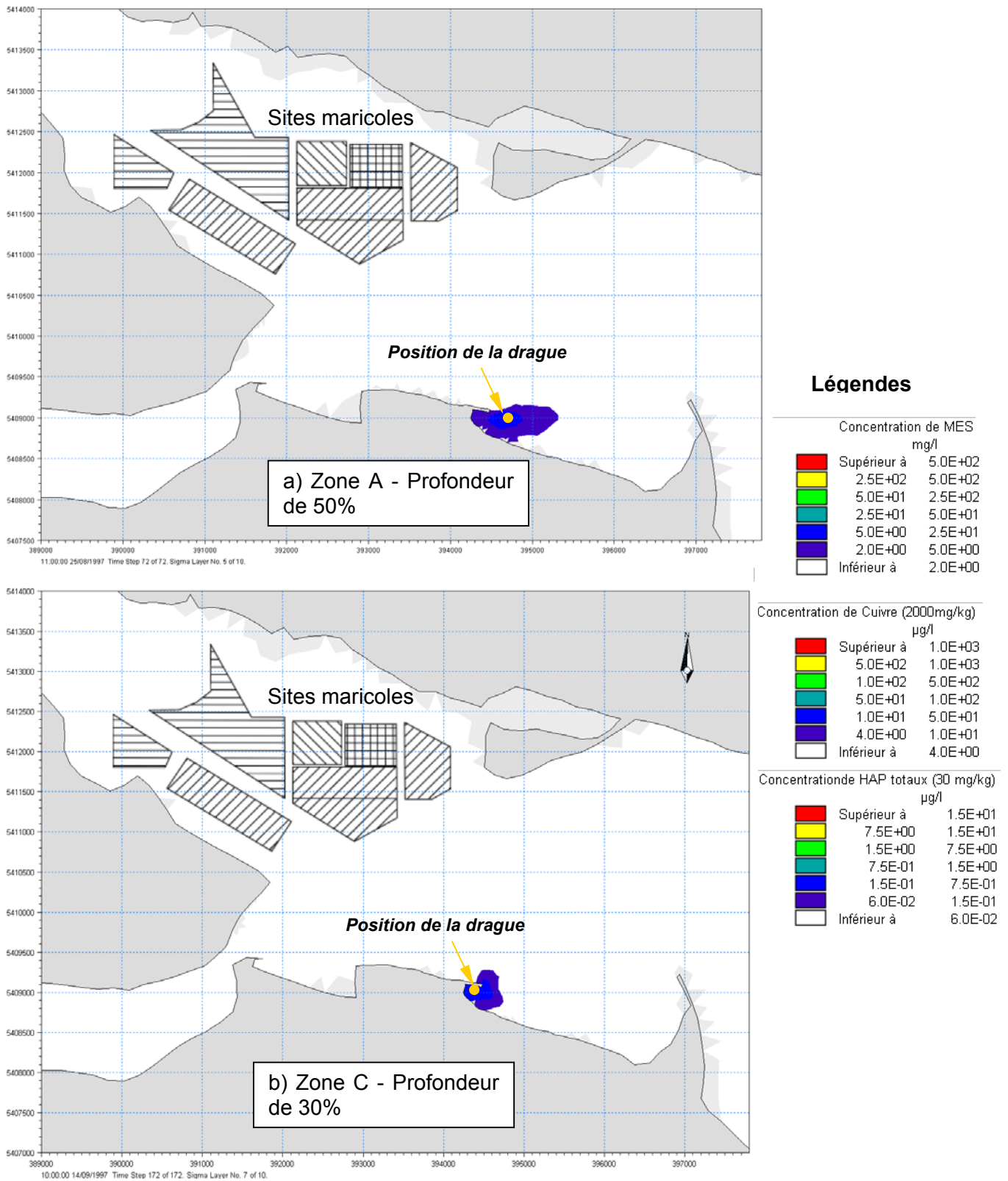


Figure 26 : Taille maximale du panache (dragage mécanique) – Influence de la position de la drague

5.6.3 Circulation et gradients de densité dans la baie de Gaspé

L'utilisation des résultats du modèle global du Saint-Laurent exploité par l'OGSL visait avant tout à induire dans notre modèle du havre et de la baie de Gaspé des effets densimétriques pouvant avoir impact sur la dispersion des panaches de sédiments contaminés.

Les résultats du modèle global avaient été extraits pour trois cas correspondant respectivement à un vent calme, un vent soutenu du NO (sortant de la baie) et du SE (entrant dans la baie). Les profils de salinité et de température présentés à la section 3.3 avaient indiqué que, pour ces épisodes de vent soutenus, le modèle global prédisait des effets de upwelling et de downwelling à l'entrée de la baie de Gaspé, mais selon une tendance inversée par rapport à ce que l'on attendait initialement.

Les variations de température et de salinité les plus importantes étaient obtenues dans la couche de surface lors de l'épisode de vent du NO (12 au 14 novembre 1997). En vue d'évaluer, l'influence de ces effets densimétriques sur la dispersion du panache de matériaux dragués, une simulation a été reprise avec les vents correspondant à cet épisode et la distribution verticale de la salinité et de la température prévue à l'entrée de la baie par le modèle global.

En supposant un dragage hydraulique localisé aux abords immédiats du quai (zone C), la figure 27 compare les résultats du cas de base à ceux d'une nouvelle simulation intégrant les conditions de novembre 1997. Le seul changement perceptible réside dans un étirement du panache vers le sud-est, qui essentiellement causé par l'effet de cisaillement du vent du nord-est à la surface de l'eau.

Comme on l'a souligné à la section 3.3, notre modèle de la baie de Gaspé ne permet pas de reproduire l'influence complexe que peuvent exercer les conditions d'écoulement dans l'ensemble du l'estuaire et du Golfe sur les patrons de circulation dans la baie et le havre de Gaspé.

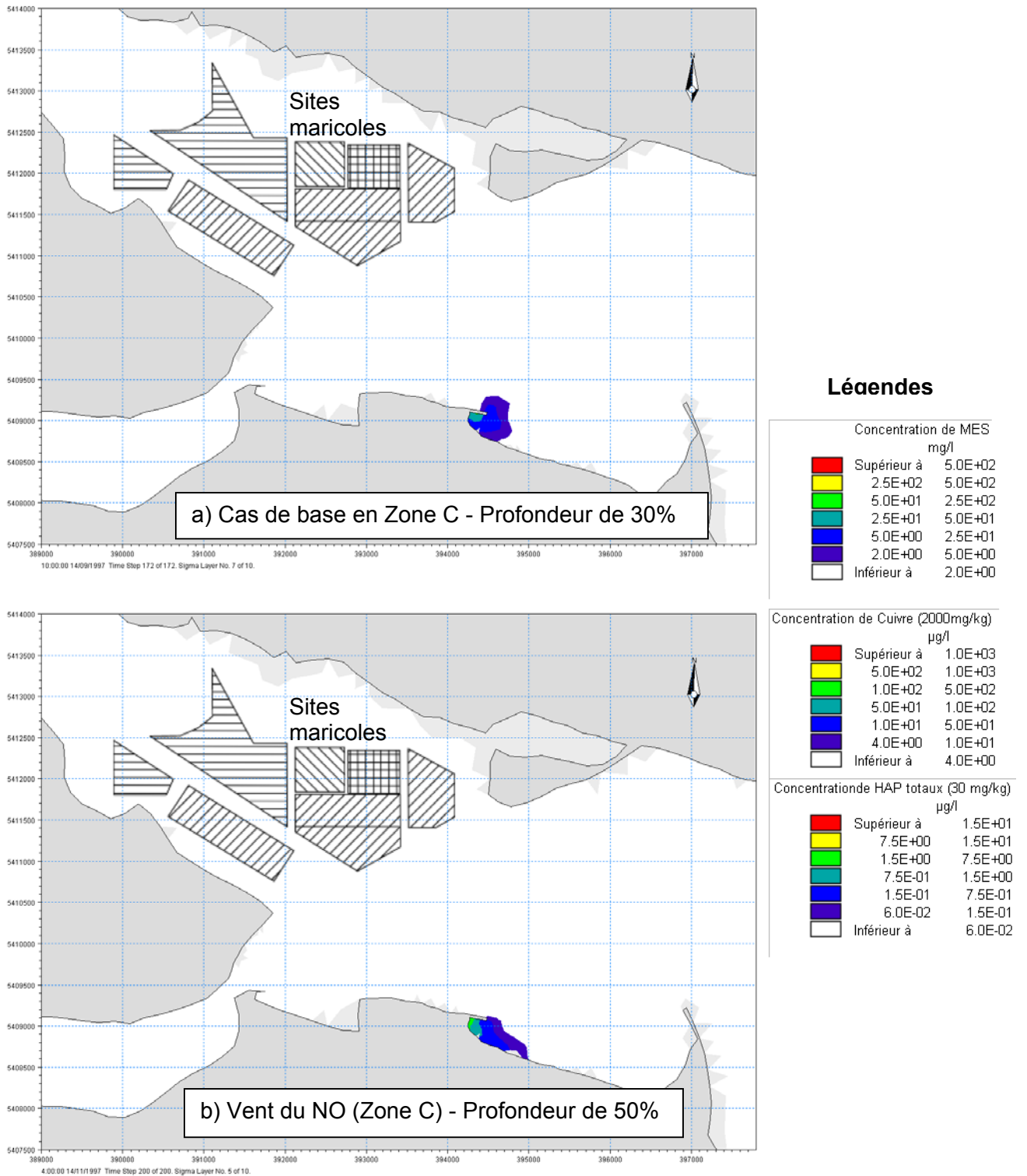


Figure 27 : Dragage hydraulique – Cas de base et épisode de vent soutenu du NO

Le modèle permet de simuler les effets locaux de upwelling et de downwelling respectivement induits par les vents locaux du SE et du NO balayant l'axe longitudinal de la baie. Toutefois, l'inversion de ces conditions, probablement attribuable au comportement à plus grande échelle du courant de Gaspé, ne peut être simulée avec précision, malgré l'utilisation des conditions de salinité et de température fournies par le modèle de l'OGSL.

Tel que mentionné lors de l'analyse des relevés de Pettigrew et al. (1991) (section 3.4.1), ces processus à plus grande échelle semblent en partie responsables des pointes de vitesse dépassant sporadiquement les courants maximums de flot et de jusant observés au gré des marées. Au centre du havre de Gaspé (courantomètre C3), les relevés de l'été 1990 montraient ainsi des courants vers l'amont (i.e. vers les sites maricoles) ayant généralement une valeur maximale de 0,20 à 0,25. Toutefois, des vitesses plus importantes, de l'ordre de 0,45 m/s (tableau 1), ont été obtenues pendant quelques heures, probablement sous l'influence d'un déplacement du courant de Gaspé sous l'effet des vents du NO. Le modèle numérique mis en œuvre pour la présente étude simulait bien les courants maximums de flot de 0,20 à 0,25 m/s, mais non les pointes enregistrées à 0,45 m/s pendant quelques heures.

De telles vitesses pourraient en principe faciliter le transport des sédiments dragués vers les sites maricoles, mais il faut toutefois insister sur le fait que ces vitesses n'ont été observées que durant quelques heures au cours de l'été 1990. De plus, ces courants ne sont pas représentatifs de la zone immédiate des travaux de dragage, où les relevés de Pettigrew et al. (1991) montraient des courants vers l'amont plutôt faibles, ayant généralement une valeur maximale de 0,10 à 0,15 m/s, avec des pointes sporadiques ne dépassant pas 0,25 m/s (courantomètre C2, tableau 1).

Ces conditions, jumelées à la dilution marquée du panache de sédiments à mesure qu'il s'éloigne du site des travaux de dragage, permettent de conclure que les risques de contamination des sites maricoles demeurent pratiquement négligeables, même en présence de courants vers l'amont augmentés par la dynamique d'ensemble du courant de Gaspé.

Les travaux de modélisation effectués dans le cadre de la présente étude ne permettent toutefois pas de confirmer cette conclusion. Le suivi en temps réel de l'impact des travaux de dragage sera donc important, notamment suite à des épisodes de vents soutenus de l'Ouest ou du NO ayant balayé l'estuaire et le Golfe du Saint-Laurent dans les jours précédant les travaux.

5.6.4 Débits des rivières

L'ensemble des simulations effectuées à ce jour impliquait des débits pratiquement négligeables dans les rivières Dartmouth et York.

Afin d'évaluer l'impact d'un débit plus important sur la dispersion des panaches, la modélisation du cas de base a été reprise en imposant à l'embouchure de ces rivières la valeur maximale figurant dans les archives du CEHQ (40 ans de données dans le cas de la Dartmouth et 30 ans pour la York). Tel qu'indiqué au tableau 3, les valeurs maximales sont de 639 m³/s et 280 m³/s pour la Dartmouth et la York respectivement.

La figure 28 illustre les champs de courants maximums obtenus dans le havre de Gaspé pendant le jusant. Cette figure peut être comparée à la figure 20 qui donne les résultats correspondants avec un débit réduit dans les rivières.

Malgré l'augmentation notable des vitesses maximales dans la portion centrale du havre, la simulation de la dispersion des sédiments dragués montrent un panache ayant des dimensions similaires à celui du cas de base (figure 29).

Encore une fois, le panache demeure clairement en retrait de la zone d'exploitation maricole.

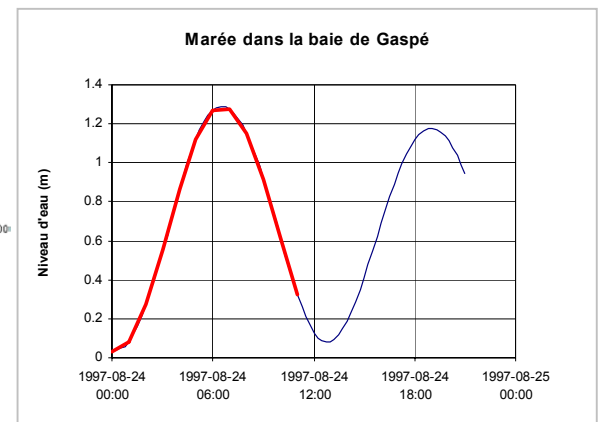
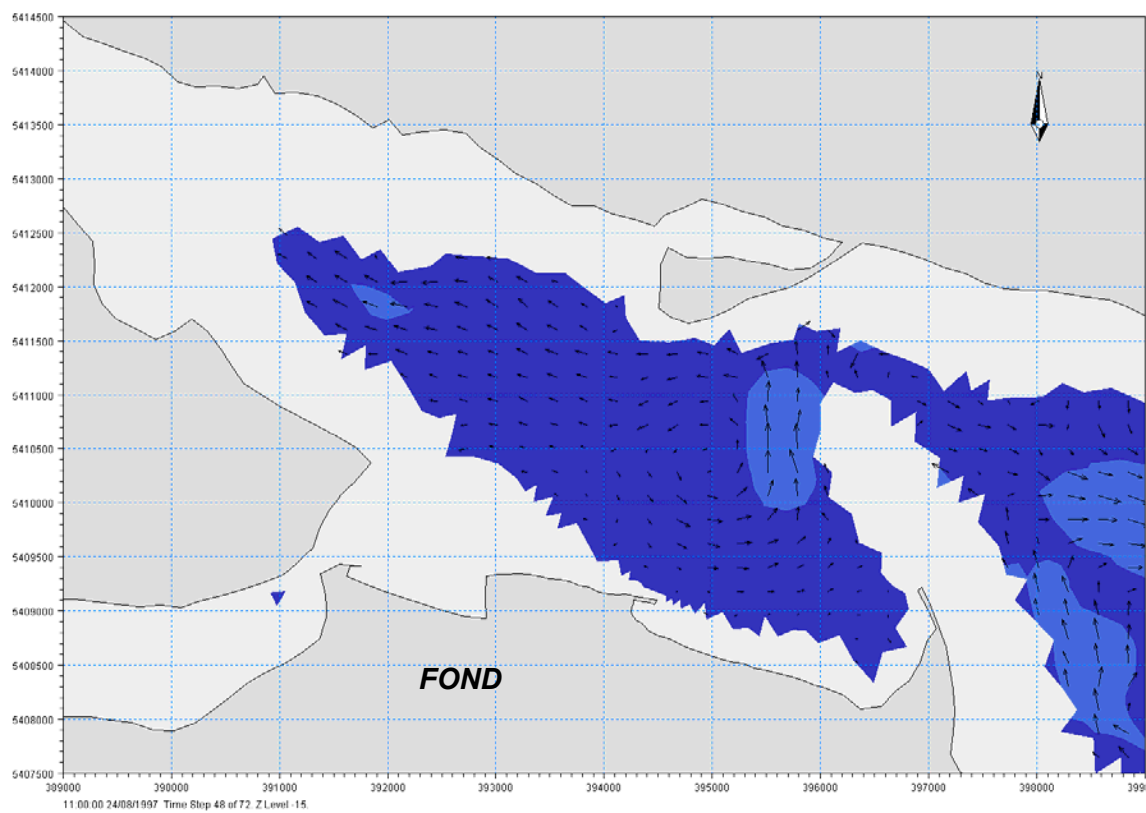
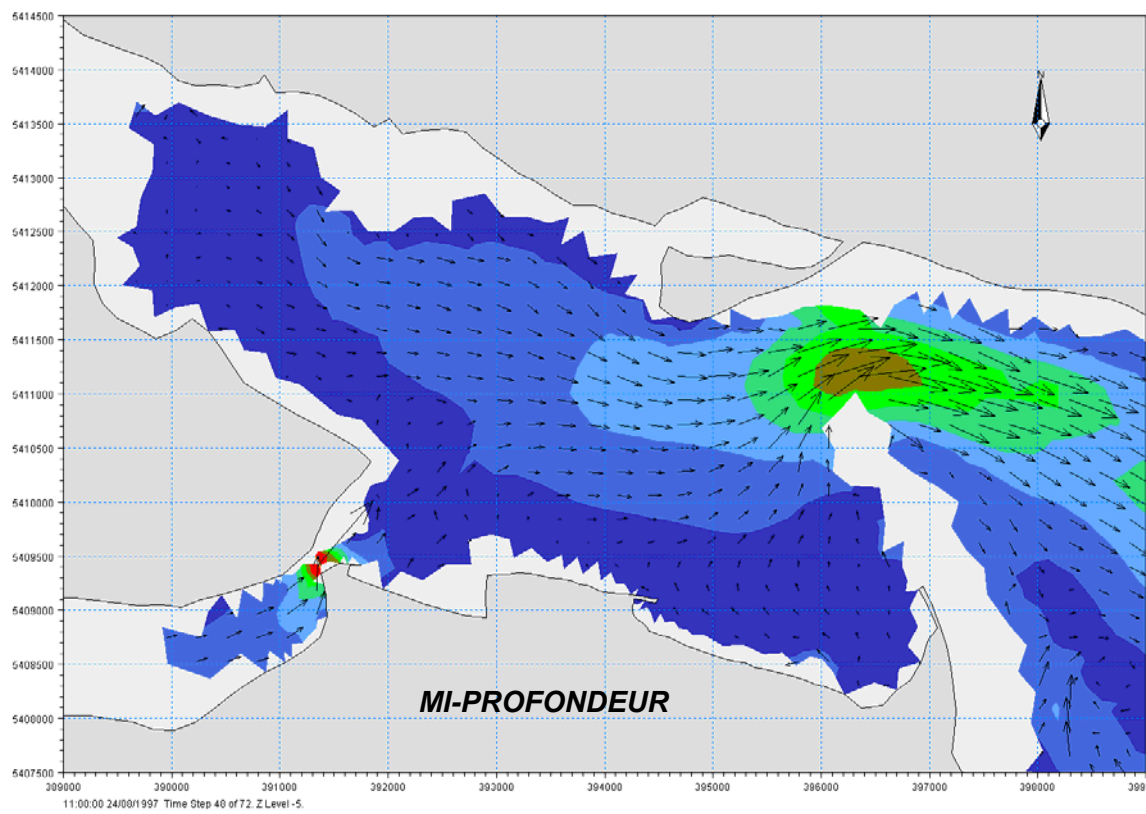
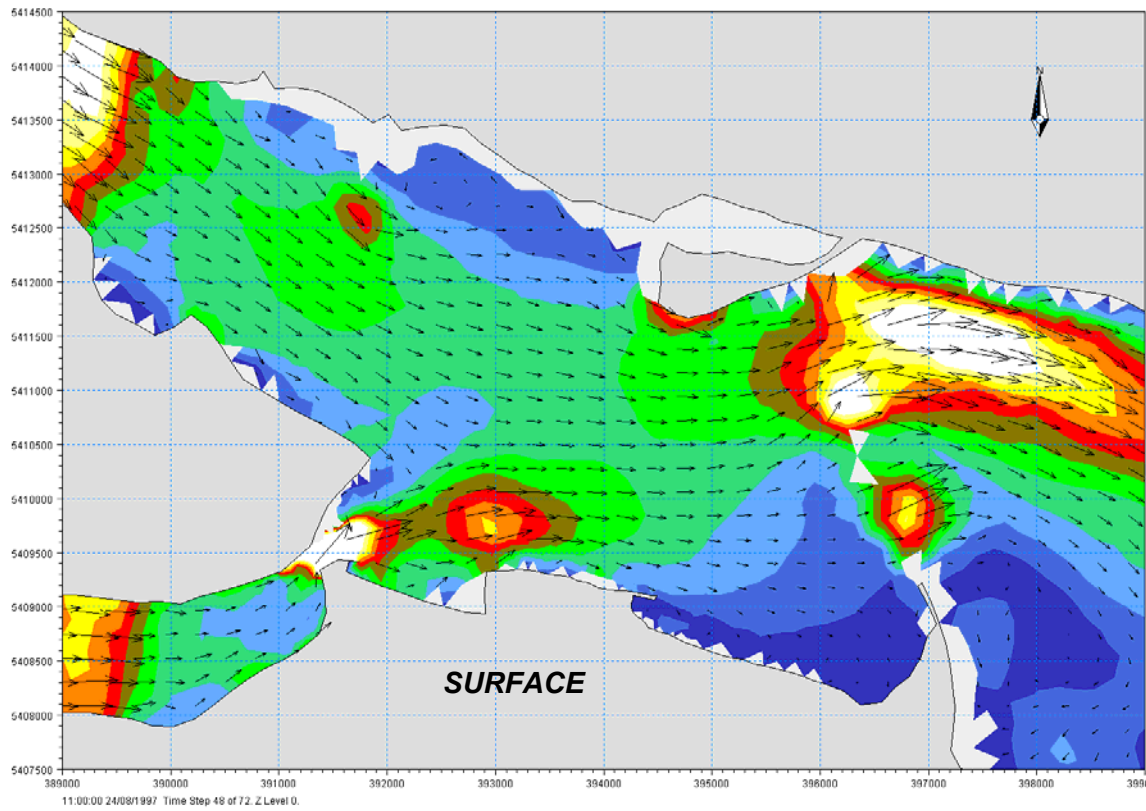


Figure 28 : Conditions d'écoulement en période de crue des rivières Dartmouth et York

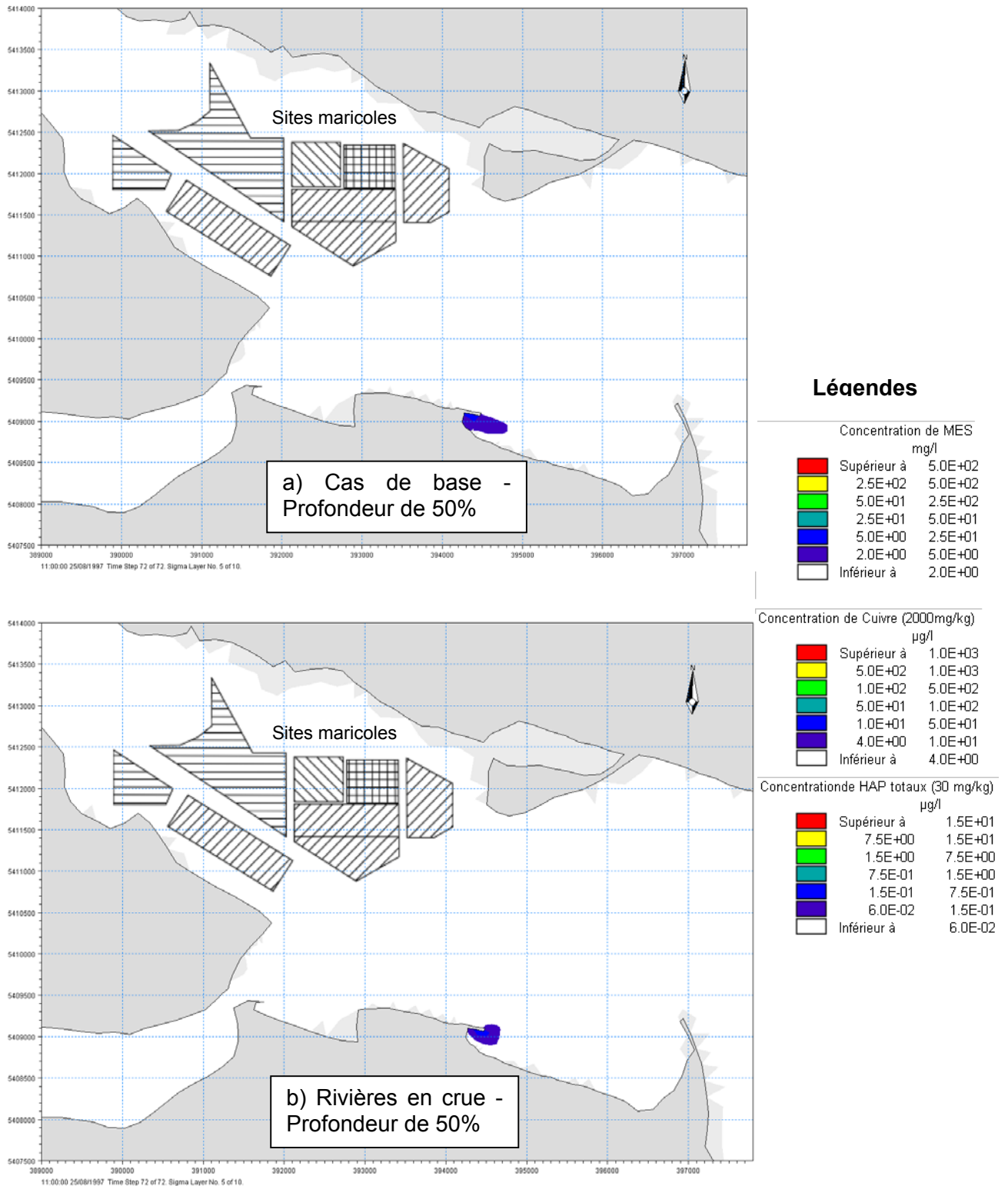


Figure 29 : Dragage hydraulique – Cas de base et épisode de crue.

5.6.5 Vagues et vents locaux

Les vents dominants dans la baie et le havre de Gaspé proviennent principalement du NO et, dans une moindre mesure du SE.

Des simulations supplémentaires ont été effectuées avec un vent soutenu de 30 km/h issu du SSE. Bien que rare, ce vent aurait tendance à repousser les sédiments dragués vers les sites maricoles.

La figure 30 compare les résultats de cette nouvelle simulation avec ceux du cas de base, en présence d'un dragage mécanique dans la zone A. Le vent du SSE tend effectivement à déplacer le panache de dispersion, mais ce dernier demeure toute de même confiné aux abords immédiats du quai.

5.6.6 Caractéristiques granulo-chimiques

De concert avec les représentants d'Environnement Canada, diverses hypothèses ont été formulées quant aux caractéristiques granulo-chimiques des sédiments dragués. On a notamment supposé que la totalité du cuivre était liée à la fraction la plus fine des sédiments (silts et argiles), et ce même si les résultats d'analyse montraient une répartition relativement uniforme dans l'ensemble des classes granulométriques.

Comme auparavant, l'emprise maximale des panaches est demeurée limitée aux abords immédiats du site des travaux.

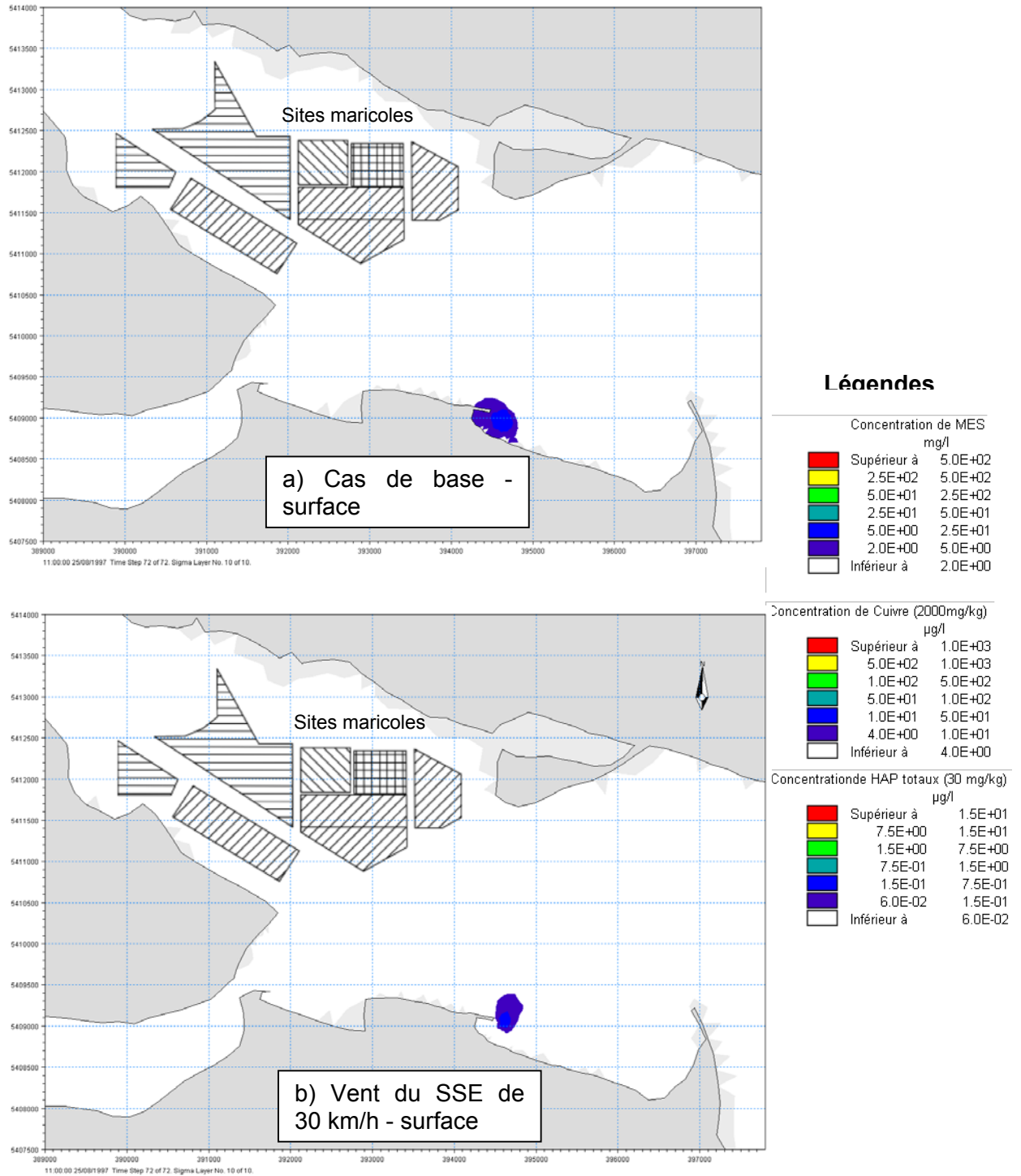


Figure 30 : Cas de base avec un vent du SSE de 30 km/h

5.6.7 Critère de limitation de l'étendue des panaches

L'étendue des panaches de dispersion présentés dans les sections précédentes était délimitée par le critère de toxicité du cuivre de 4 µg/L. Suite au dépôt de la version préliminaire du présent rapport, certains intervenants ont toutefois soulevé des questions sur l'étendue qu'auraient les panaches en utilisant une limite correspondant à la concentration ambiante des contaminants plutôt qu'à leur seuil de toxicité.

Pour le cuivre, aucune donnée ne semble disponible dans la baie de Gaspé. Cependant, Uthe et al. (1986) ont mesuré une concentration ambiante de cuivre de 0,61 µg/L dans la baie des Chaleurs.

La figure 31 permet de comparer l'étendue des panaches délimités par le seuil de toxicité du cuivre de 4 µg/L (panaches en couleur) avec celle correspondant à une valeur de 0,6 µg/L (isocourbe la plus au large). Les conditions simulées sont celles du scénario de base (cf. section 5.5). En abaissent ainsi la concentration délimitant les panaches, on étend évidemment leur emprise. Toutefois, comme l'indique la figure 31, l'étendue maximale des panaches demeure clairement en retrait des zones maricoles. Il faut aussi mentionner que la valeur de 0,61 µg/L citée par Uthe et al. (1986) correspond au cuivre dissous, donc une partie seulement du cuivre total. L'étendue des panaches délimités par la concentration ambiante du cuivre total serait ainsi inférieure à celle illustrée à la figure 31.

En ce qui concerne les HAP totaux, une valeur de 1 µg/L est relevée dans la littérature pour l'estuaire maritime du Saint-Laurent (Tronczynski et al., 1987). Toutefois, cette concentration est plus élevée que la limite de 0,06 µg/L utilisée dans nos figures de résultats. L'utilisation de cette limite conduit donc à une estimation très conservatrice de l'emprise des panaches de HAP.

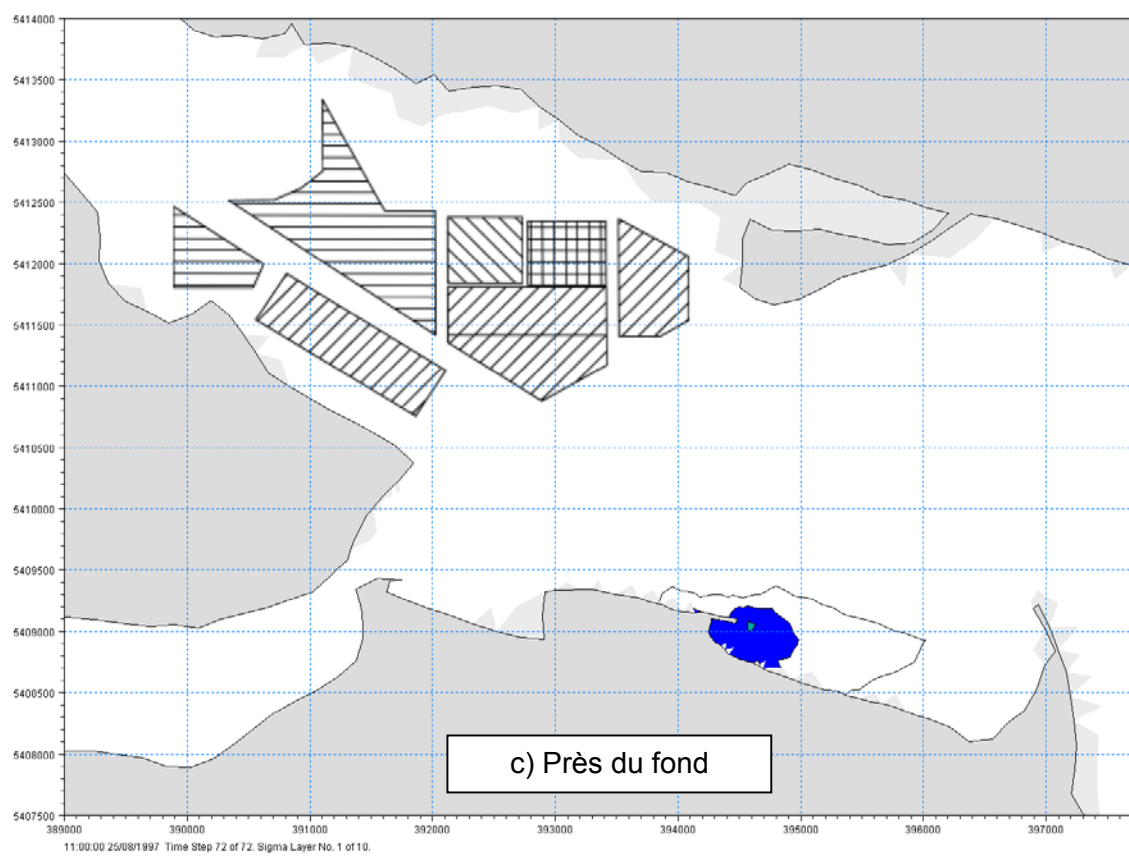
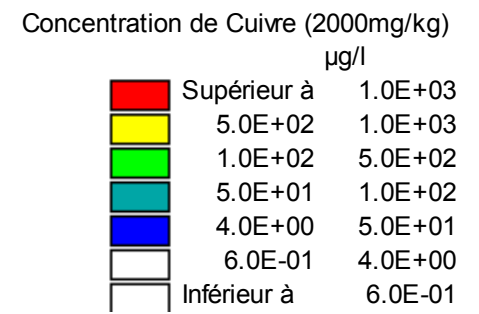
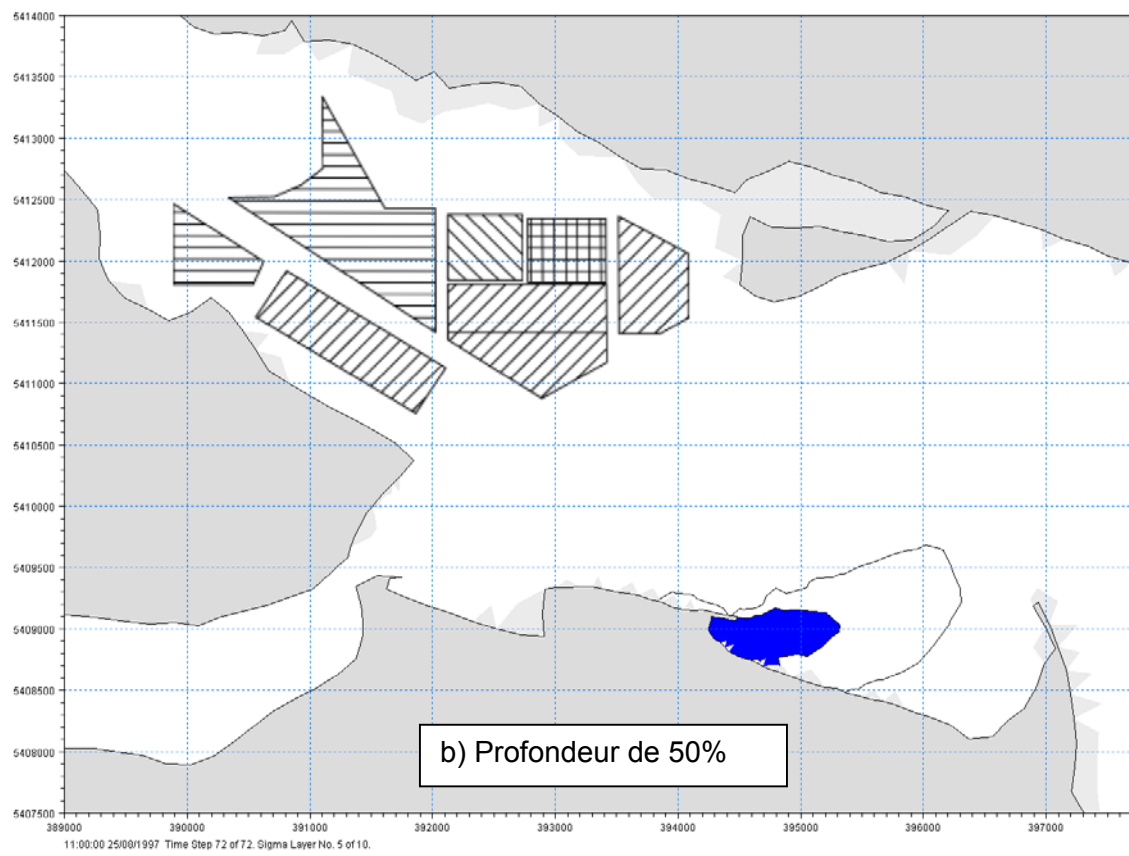
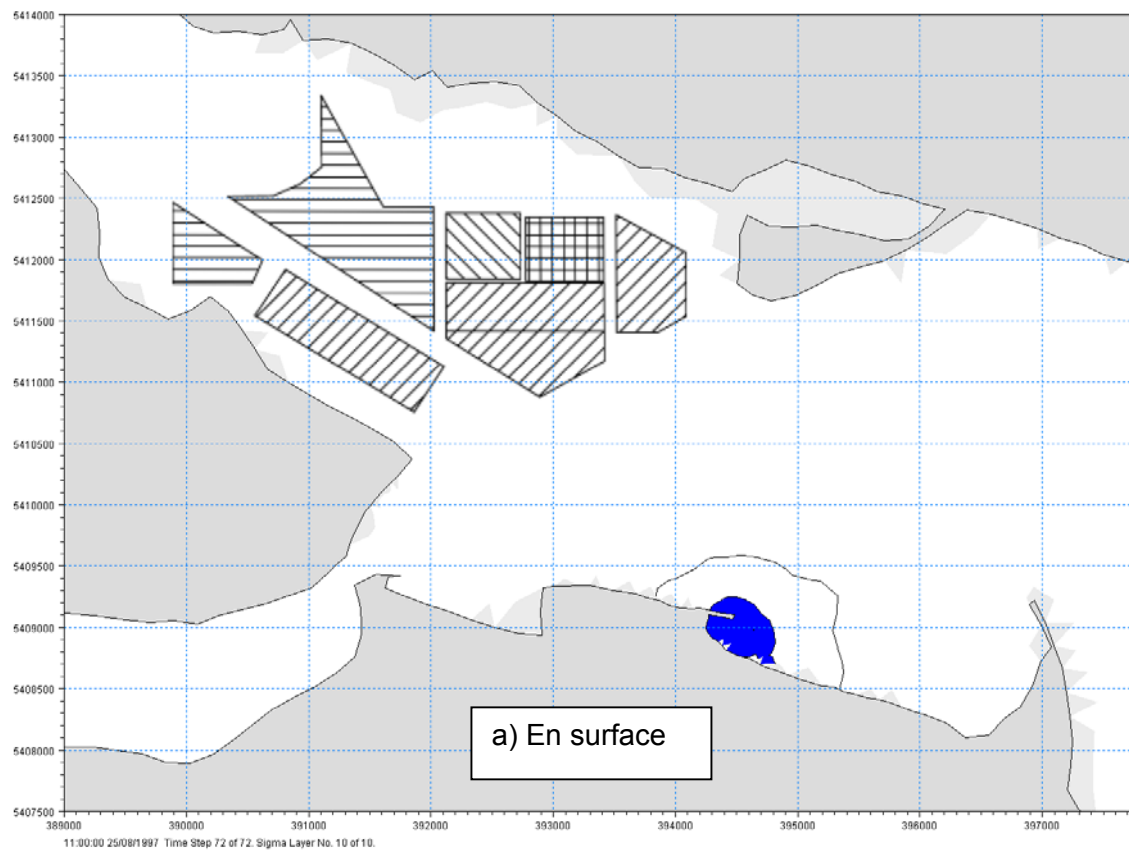


Figure 31 : Cas de base avec critère de concentration ambiante de 0,60 µg/L de cuivre

5.7 Scénario d'accident - Renversement de la barge

La dernière série de simulation s'est penchée sur l'influence potentielle des travaux de dragage au niveau de la barge ou du chaland de chargement des matériaux.

Dans l'hypothèse d'un dragage mécanique, qui semble actuellement l'option la plus probable selon les divers intervenants au projet, la surverse de la barge est négligeable. Le scénario le plus pessimiste du point de vue des impacts potentiels implique alors une situation exceptionnelle faisant intervenir le renversement de la barge chargée de sédiments.

Bien que peu probable, ce scénario permet d'évaluer l'ampleur et l'évolution d'un panache de dispersion généré par le déversement d'une grande quantité de sédiments dans le milieu par la surface, en un laps de temps très court.

Les hypothèses retenues s'appuient sur le compte rendu des travaux de dragage effectués à Rivière-du-Loup en 2005. Les barges utilisées avaient alors un volume de 120 m³, ce qui semble être usuel dans le Saint-Laurent pour des volumes de dragage de l'ordre de 40 000 m³.

On a donc considéré le renversement d'un volume total de 120 m³ de matériaux dragués (eau et sédiments) se produisant en 15 minutes, dans la zone A (figure 21). Les conditions hydrodynamiques étaient conformes au cas de base.

La figure 32 illustre l'évolution des concentrations à mi-profondeur, pour les 72 heures suivant l'accident.

L'emprise maximale du panache est observée 24 heures après le déversement et atteint une longueur de 1,5 km vers le sud-est, dans le prolongement du quai.

La dispersion et la dilution font en sorte que ce panache diminue par la suite pour n'être que résiduel dans l'enclave située à la jonction du quai et la berge après 72 heures. Le panache reste en tout temps localisé au voisinage immédiat de la zone des travaux à plus de 2 km des sites maricoles.

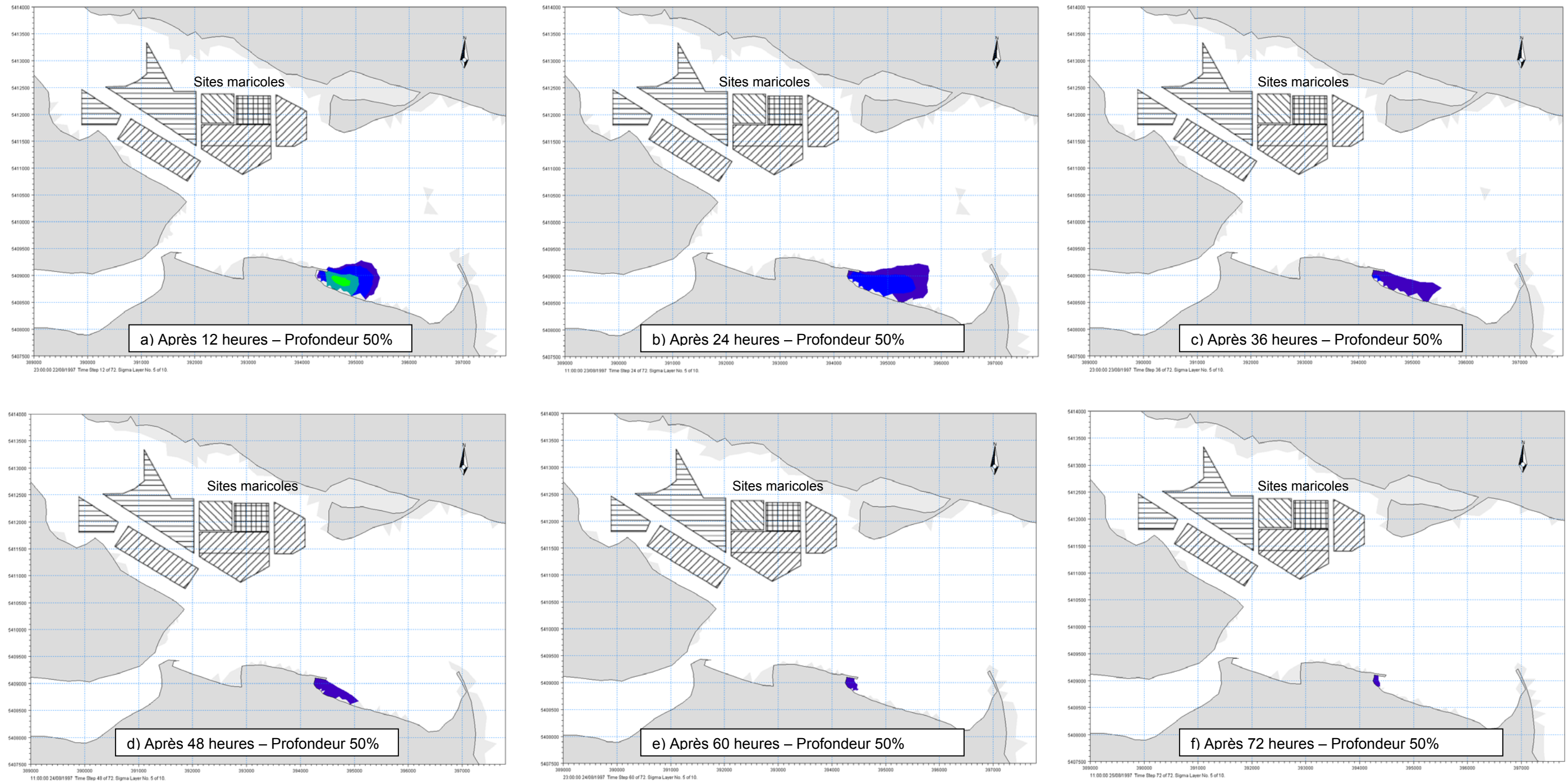


Figure 32 : Panache de dispersion formé par le renversement d'une barge de 120 m³ dans la zone A

6.0 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le Groupe-Conseil LaSalle (GCL) a été mandaté par Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (TPSGC) en vue de prédire la dispersion des panaches de matières en suspension qui seront formés lors des travaux de dragage prévus dans le cadre du projet de restauration des sédiments contaminés du quai de Gaspé – Sandy Beach. L'objectif principal de l'étude consistait à établir l'impact potentiel de ces travaux sur les sites maricoles situés à quelques kilomètres au nord-ouest du quai.

Conformément au devis préparé par TPSGC, un modèle numérique tridimensionnel incorporant les formulations les plus récentes pour la simulation de l'hydrodynamique et du transport des sédiments a été mis en œuvre afin de prédire ces impacts. Le modèle numérique pouvait prendre en compte l'ensemble des paramètres ayant une influence sur la circulation des eaux dans la baie et le havre de Gaspé : niveau de marée, débits des rivières, stratification de la colonne d'eau, vents, vagues, etc. Les données requises pour spécifier la répartition verticale de la température et de la salinité à l'entrée de la baie de Gaspé ont été obtenues grâce à la collaboration de l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER), qui nous a fourni des résultats de son modèle d'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent.

La perte relative de matériaux causée par les travaux de dragage, qui représente l'hypothèse fondamentale pour la simulation de la dispersion des sédiments, a été estimée de manière conservatrice et a été fixée à 6% pour le dragage mécanique à benne preneuse et à 1% pour le dragage hydraulique.

La modélisation hydrodynamique a montré dans le havre de Gaspé des champs de courant concordant bien avec la tendance générale indiquée par les relevés de terrain. Les vitesses d'écoulement dans le secteur à l'étude sont faibles, avec des valeurs ne dépassant pas 0,1 m/s aux abords immédiats du quai de Gaspé. Une augmentation notable des vitesses est uniquement observée dans le passage étroit délimité par la pointe de Sandy Beach et la presqu'île de Penouille.

L'étendue des panaches prédite par le modèle numérique était délimitée par une concentration de 2 mg/L de MES correspondant, selon le degré de contamination retenu pour les sédiments, à une concentration de 4 µg/L de cuivre et de 0,06 µg/L de HAP totaux.

Les premières simulations de la dispersion ont montré que l'emprise maximale du panache était limitée aux abords immédiats de la zone des travaux, avec une longueur maximale de l'ordre de 1 km en direction sud-est. Les sables et silts grossiers qui constituent plus de la moitié des sédiments dragués se re-déposent rapidement au site des travaux. Les sédiments plus fins (sils fins et argiles) demeurent en suspension dans la colonne d'eau mais leur dilution réduit les concentrations à des valeurs acceptables dans un rayon rapproché du site des travaux.

De nombreux essais de sensibilité ont été effectués afin d'évaluer l'effet de divers paramètres sur la dispersion des matériaux dragués. Malgré des différences mineures, les panaches obtenus demeuraient dans tous les cas limités aux abords immédiats des travaux et demeuraient clairement en retrait des sites d'exploitation maricole.

Même si ces résultats de modélisation, obtenus en formulant des hypothèses de base généralement conservatrices, sont très encourageants, il faut tout de même rappeler que l'hydrodynamique de la baie et du havre de Gaspé est très complexe et que la modélisation des phénomènes en jeu comporte une part inévitable d'incertitude.

Il est donc impératif que les précautions usuelles prises lors de ce type de dragage, dont l'utilisation de dispositifs de confinement et, surtout, un contrôle en continu des MES, soient mises en œuvre lors des travaux.

RÉFÉRENCES

- ENVIRONNEMENT ILLIMITÉ (2005). « Étude pour la décontamination du port de Gaspé – Sandy Beach, Aspects sédimentologiques et caractérisation des habitats aquatiques et du milieu physique, Étude complémentaire », Rapport préparé pour le compte de Dessau-Soprin, Mai 2005.
- GAGNON, M. (2010). « Monitoring de la qualité des eaux marines - Étude de courantométrie et de dispersion des eaux usées - Baie de Gaspé – Rapport final». Rapport de la firme Océanide Inc. préparé pour le compte d'Environnement Canada, Janvier 2010.
- GAUDETTE, C. ET AL (2009). « Projet de restauration de sédiments contaminés au port de Gaspé – Sandy Beach – Rapport d'évaluation environnementale préalable – Version préliminaire ». Rapport 045-P001130-0162-EI-0100-0B préparé par Dessau pour Transports Canada, Décembre 2009.
- KOUTITONSKY ET AL. (2001). « Études hydrodynamique, sédimentologique et benthique pour le choix de sites de mariculture d'omble de fontaine dans la baie de Gaspé ». Rapport de recherche LHE-01-1 préparé par l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER) pour le compte de la Société de développement de l'industrie maricole (SODIM), Mai 2001.
- KOUTITONSKY, V. G. (2001). « Étude de la réfraction et des vitesses orbitales pour le choix de sites de mariculture d'omble de fontaine dans la baie de Gaspé ». Rapport de recherche LHE-01-2 préparé par l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER) pour le compte du Comité de direction du programme ÉCO (CSP, MAPAQ, SODIM), Octobre 2001.
- KOUTITONSKY, V. G. (2002). « Programme expérimental ÉCO – Simulation des vitesses orbitales des houles en face de l'anse à Brillant, baie de Gaspé». Rapport de recherche LHE-02-1 préparé par l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER) pour le compte du Comité de direction du programme ÉCO (CSP, MAPAQ, SODIM), Juillet 2002.
- OSTIGUY, B.B. (2001). « Surveillance des travaux de nettoyage au quai de Gaspé (Sandy Beach) – Rapport de surveillance », Rapport de la firme Rober Hamelin et associés inc. préparé pour le compte de Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, Décembre 2001
- PALERMO ET AL. (2008). « Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments », Rapport du US Army Corps of Engineers », ERDC-EL TR-08-29, September 2008
- PERRON, A. & CÔTÉ, J. (2010). « Rapport d'analyses – Essai en laboratoire selon la procédure *Dredging Elutriate Test* (DRET) – Quai de Sandy Beach », Rapport de la firme Exova préparé pour le compte de TPSGC, Référence no 327068, Avril 2010.

RÉFÉRENCES (suite)

- PETTIGREW, B., D.A. BOOTH & R. PIGEON (1991). « Oceanographic observations in Havre de Gaspé during the Summer 1990 », Canadian Data Report of Hydrography and Ocean Sciences 100, Ministère des Pêches et des Océans, 1991.
- SAVARD, J. P. (2002). « Baie de Gaspé – Secteur du Port de Sandy Beach – Étude de Courantométrie », Rapport de la firme InteRives préparé pour le compte de Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, Avril 2002.
- UTHE, J.F., CHOU, C.L., LORING, D.H., RANTALA, T.T., BEWERS, J.M., DALZIEL, J., YEATS, P.A. ET LEVAQUE-CHARRON, R. (1986). « Effect of water treatment at a lead smelter on cadmium levels in american lobster (*Homarus americanus*), sediments and seawater in the adjacent coastal zone». *Marine Pollution Bulletin*, vol. 17(3): 118-123
- VILLENEUVE, M. (2003), « Port de Bécancour – Modélisation numérique de la dispersion des matériaux remis en suspension par le dragage », Rapport no 1514 préparé par le Groupe-Conseil LaSalle pour le compte de la Société du parc industriel et portuaire de Bécancour, Juillet 2003.