



Ministère des Transports du Québec

Pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine
Ajout d'encrochement stabilisateur
Étude hydraulique

FINAL

Ministère des Transports du Québec

Pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine Ajout d'enrochement stabilisateur Étude hydraulique

FINAL

Par



Pierre Pelletier, ing., M. Sc.

et



Pierre Dupuis, ing., M. Sc.

Équipe de réalisation

Ministère des Transports du Québec

Chargé de projet : Mourad El Hila, ing., M. Sc.

GENIVAR inc.

Directeur de projet : François Charbonneau, ing.

Chargé de projet - Hydraulique : Pierre Pelletier, ing., M. Sc.

Spécialiste : Pierre Dupuis, ing., M. Sc.

Traitement de texte et édition : Nancy Paquet

Table des matières

1	<i>Introduction</i>	1
2	<i>Critères de conception et données de base</i>	2
2.1	Hauteur minimale de remblai	2
2.2	Profondeur d'eau minimum	2
2.3	Relevés bathymétriques	2
2.4	Hydrologie et débits simulés	4
2.5	Modèle numérique des écoulements	4
2.5.1	Maillage dans la zone d'étude	5
2.5.2	Géométrie du remblai ajouté pour les conditions futures	6
2.6	Zones nécessitant du remblai additionnel	7
3	<i>Résultats</i>	11
3.1	Vitesses et niveau d'eau	11
3.2	Profondeur d'eau minimum	11
3.3	Impact sur les conditions hydrosédimentaires	12
3.4	Impact sur le régime des glaces	13
3.5	Calibre des enrochements	13
4	<i>Analyse, synthèse et recommandations</i>	14
4.1	Analyse	14
4.2	Synthèse	14
4.3	Recommandations	15
5	<i>Références</i>	15

Liste des figures

Figure 1-1 Localisation du pont-tunnel Louis Hippolyte Lafontaine	1
Figure 2-1 Bathymétrie (cote géodésique) dans la zone du pont-tunnel pour les conditions actuelles	3
Figure 2-2 Limite de la zone d'étude pour l'analyse des résultats.....	5
Figure 2-3 Densité du maillage au droit du pont-tunnel Louis-Hippolyte-Lafontaine	5
Figure 2-4 Cote géodésique du fond avec 2,16 m de recouvrement minimum	7
Figure 2-5 Recouvrement additionnel requis pour obtenir une couche d'au moins 2,16 m au-dessus du tunnel.	8
Figure 3-1 Profondeur d'eau en conditions d'étiage avec un remblai de 2,16 m.	12

Liste des tableaux

Tableau 2-1 Détails et justification des simulations réalisées	4
Tableau 3-1 Impacts sur les vitesses et les niveaux d'eau avec un remblai de 2,16 m au-dessus du pont-tunnel. .	11

Liste des annexes

Annexe A	Traitement des relevés
Annexe B	Hydrologie du fleuve Saint-Laurent
Annexe C	Résultats des simulations

1 Introduction

Dans le cadre de son programme de réfection des ouvrages majeurs de transports, le ministère des Transports du Québec (MTQ) doit s'assurer qu'un enrochement stabilisateur d'une épaisseur suffisante recouvre les cellules structurales formant le pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine (figure 1-1). Selon les informations reçues du MTQ, une épaisseur minimale d'enrochement stabilisateur de 1,83 m est requise au-dessus du pont-tunnel afin de respecter les critères de stabilité structuraux. Cette épaisseur a été établie par le consortium CCDGP (Cima, CNRC-NRC, DESSAU, GENIVAR, PARSONS) en novembre 2010. Cette étude indique en effet que toute perte d'enrochement sur la couronne du tunnel conduit à une réduction des conditions ultimes de stabilité établies conformément aux critères du Code canadien sur le calcul des ponts routiers.

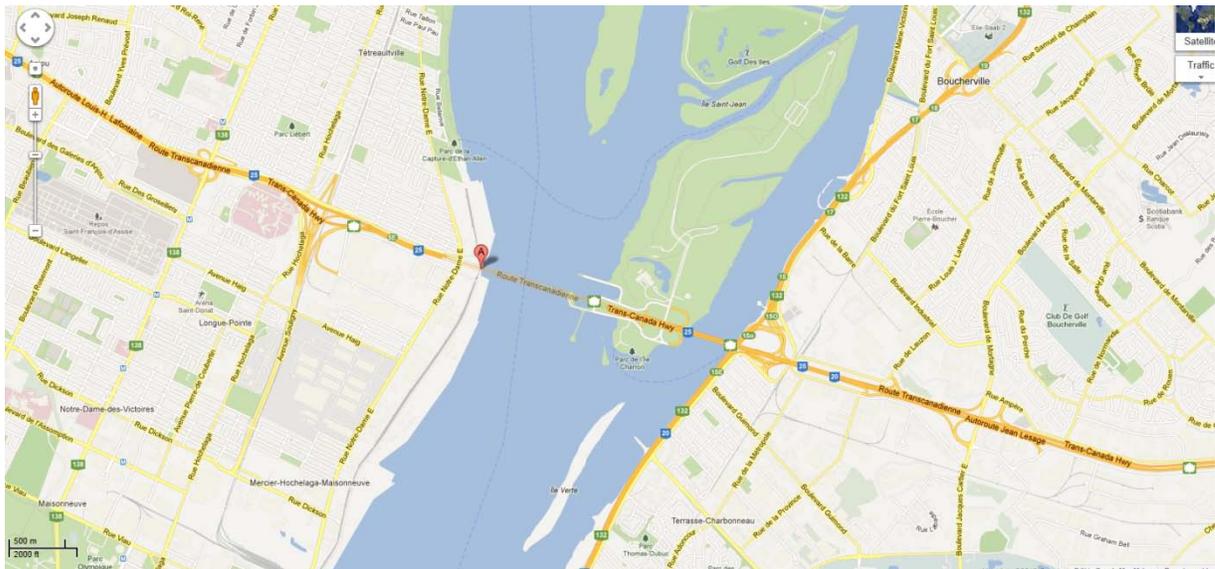


Figure 1-1 Localisation du pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine.

Des relevés bathymétriques ont été réalisés à différentes périodes et c'est à partir de ces relevés que des écarts ont été constatés.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude hydraulique consiste à évaluer les impacts provoqués par le rétablissement de l'épaisseur requise de l'enrochement de protection au-dessus du tunnel Louis-Hippolyte La Fontaine sur les conditions hydrodynamiques, sédimentaires ainsi que sur le régime des glaces.

2 Critères de conception et données de base

Ce chapitre décrit les critères de conception considérés et la méthodologie utilisée dans le cadre de cette étude hydraulique.

2.1 Hauteur minimale de remblai

Selon les informations reçues du MTQ, une épaisseur minimale d'encrochement stabilisateur de 1,83 m est requise au-dessus du pont-tunnel afin de respecter les critères de stabilité structuraux. Cette épaisseur a été établie par le consortium CCDGP (Cima, CNRC-NRC, DESSAU, GENIVAR, PARSONS) en novembre 2010.

2.2 Profondeur d'eau minimum

L'extrait suivant, tiré du rapport intitulé « Examen préalable. Quais 76-77. Prolongement et approfondissement », daté de mai 2010, présente le désir du port de Montréal de voir la profondeur d'eau minimum portée de 10,7 à 11,6 m. D'après la carte de navigation, la profondeur locale garantie serait d'au moins 11,3 m. Dans cette étude, on indique que « les profondeurs actuelles sont de plus de 11,6 m sur presque toute la superficie de l'aire de manœuvre devant les postes à quai 76-77 ». « Des travaux relativement mineurs sont requis pour garantir une profondeur uniforme de 11,6 m » (page 8 du rapport susmentionné).

Dans ce contexte, c'est donc une profondeur d'eau minimum de 11,6 m qui est considérée pour les analyses hydrauliques. Par rapport au zéro des cartes marines, une profondeur de 11,6 m correspond à la cote géodésique de -6,5 m. Le chapitre 5 de l'annexe A fournit plus de détails sur cet aspect.

2.3 Relevés bathymétriques

L'annexe A traite en détail des relevés bathymétriques existants et des analyses réalisées sur ces derniers. Les relevés les plus récents sont ceux réalisés par Géophysique GPR International inc en 2010 (GPR) et ceux faits par le Service hydrographique du Canada (SHC) entre 2007 et 2009.

Les relevés réalisés par GPR visaient à identifier la localisation de poches de sédiments fins le long de l'axe du tunnel et n'étaient pas réalisés dans l'optique de la production d'une bathymétrie de cette zone. Suite à l'analyse et d'un commun accord avec les spécialistes d'Environnement Canada, il a été convenu de retenir les points cotés mesurés par le SHC qui est, par ailleurs, l'autorité pour établir les cotes du chenal de navigation. Les minutes hydrographiques couvrant cette zone proviennent de campagnes de relevés réalisées entre 2007 et 2009.

Le chapitre 4 de l'annexe A présente six profils longitudinaux (parallèles à l'axe du tunnel) réalisés à partir des relevés du SHC.

La figure 2-1 illustre la bathymétrie (cote géodésique) utilisée pour les modélisations des conditions actuelles. Sur cette figure, la présence de zones en bleu indique qu'une tranchée a été creusée au moment de la construction du tunnel.

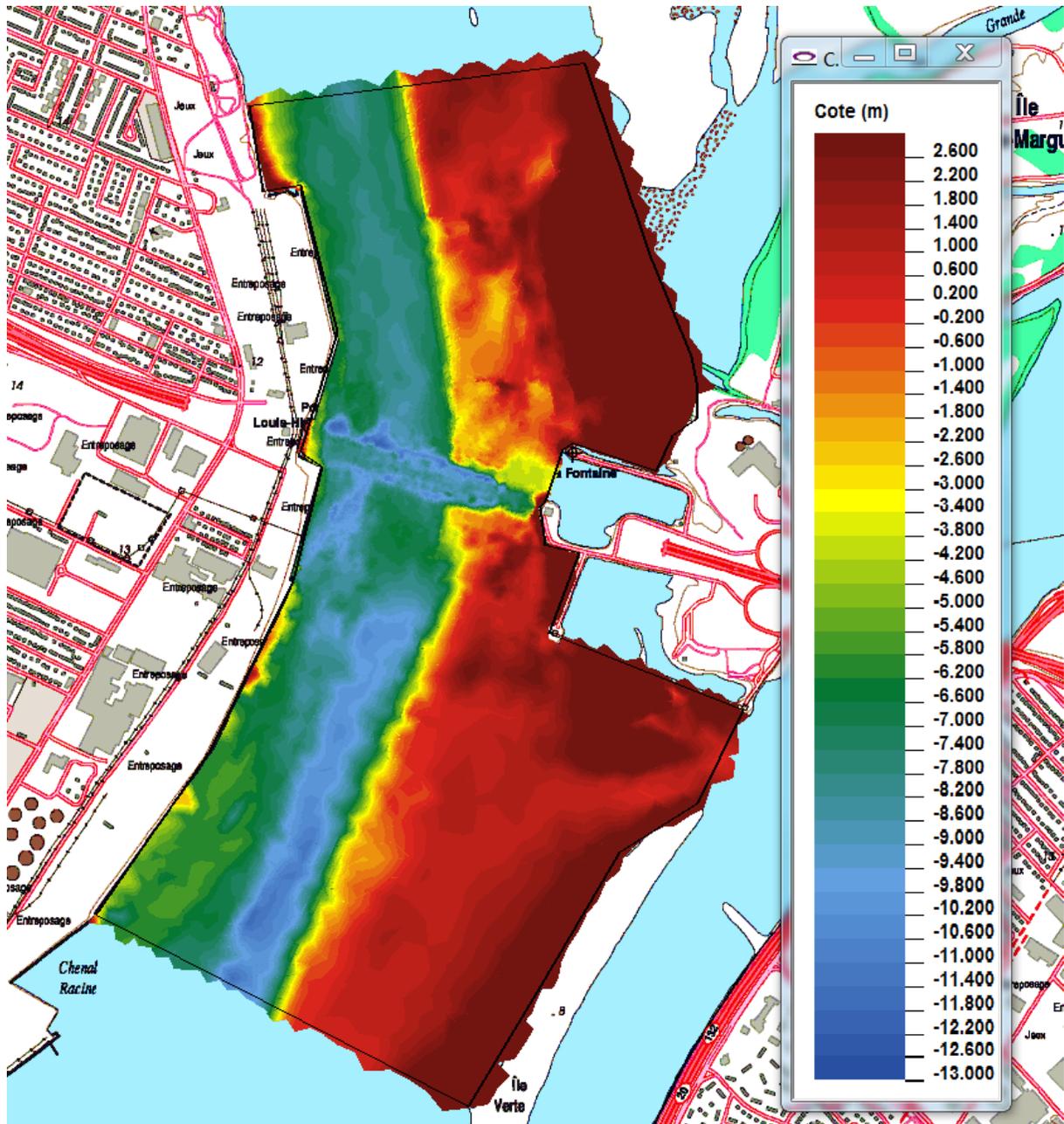


Figure 2-1 Bathymétrie (cote géodésique) dans la zone du pont-tunnel pour les conditions actuelles.

2.4 Hydrologie et débits simulés

L'annexe B est dédiée à l'hydrologie du fleuve Saint-Laurent dans le secteur du pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine. Les débits choisis pour les simulations numériques des écoulements sont obtenus à la suite de cette analyse et aussi en tenant compte des exigences de l'étude d'impact.

Le tableau 2-1 présente le détail des simulations, réalisées dans le cadre de cette étude hydraulique, qui sont au nombre de dix, soit cinq en conditions actuelles (identifiées par la lettre A) et cinq autres en conditions futures (identifiées par la lettre F).

Les simulations 1A et 1F sont représentatives des conditions fréquentes (débit médian). Les simulations 2A et 2F représentent les conditions d'étiage, soit les conditions pour lesquelles la profondeur d'eau est minimale. Les simulations 3A et 3F représentent les conditions de débit vicennal, les simulations 4A et 4F le débit de crue centennal et les simulations 5A et 5F le débit de crue de récurrence 2 ans. Les débits pour ces trois conditions sont tirés du tableau 4-1 de l'annexe B.

Tableau 2-1 Détails et justification des simulations réalisées.

Simulation	Description	Débit (m ³ /s)	Justification
1A	Débit médian - Actuel	8 725	Conditions fréquentes
1F	Débit médian - Futur	8 725	
2A	Étiage - Actuel	5 900	Profondeur d'eau minimale
2F	Étiage - Futur	5 900	
3A	Crue 20 ans - Actuel	13 470	Étude d'impact
3F	Crue 20 ans - Futur	13 470	
4A	Crue 100 ans - Actuel	14 125	Étude d'impact
4F	Crue 100 ans - Futur	14 125	
5A	Crue 2 ans - Actuel	11 560	Étude d'impact
5F	Crue 2 ans - Futur	11 560	

2.5 Modèle numérique des écoulements

À la suite d'une entente entre le MTQ et Environnement Canada, toutes les simulations ont été réalisées par Environnement Canada qui a utilisé leur modèle numérique des écoulements du fleuve Saint-Laurent qui couvre la zone située entre l'amont des îles Sainte-Hélène et Notre-Dame et Trois-Rivières (annexe A, figure 2-10).

Les résultats des simulations ont été transmis à GENIVAR qui a effectué le post-traitement et l'analyse des résultats.

2.5.1 Maillage dans la zone d'étude

Pour l'analyse des résultats et pour les besoins de l'étude d'impact, une zone d'étude plus restreinte a été établie. La figure 2-2 illustre cette zone alors que la densité du maillage au-dessus du pont-tunnel est illustrée sur la figure 2-3.

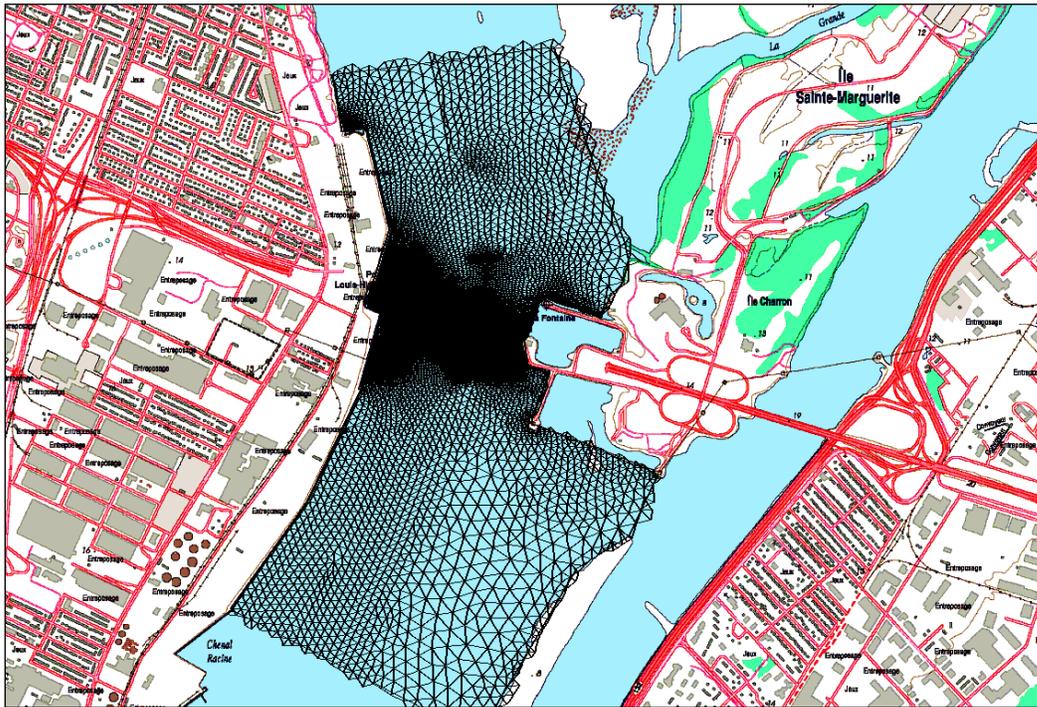


Figure 2-2 Limite de la zone d'étude pour l'analyse des résultats.

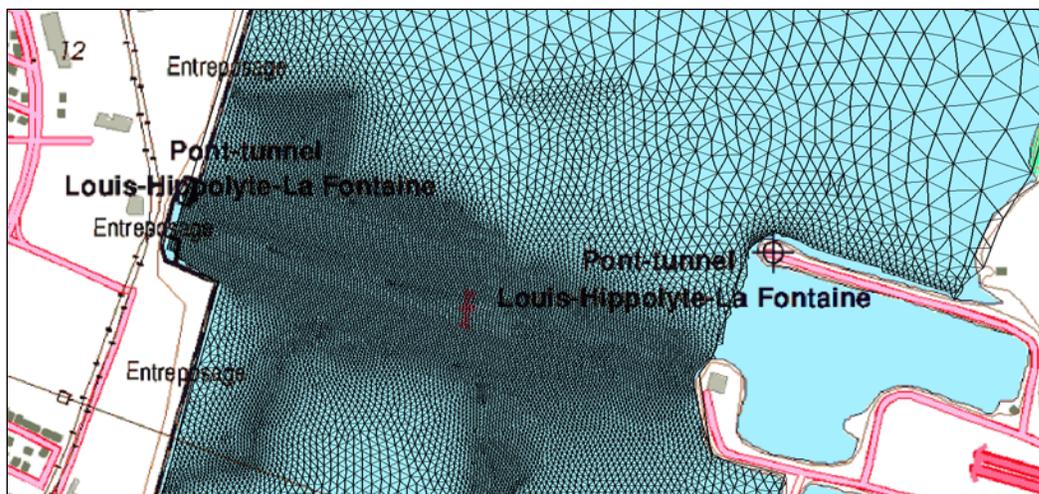


Figure 2-3 Densité du maillage au droit du pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine.

2.5.2 Géométrie du remblai ajouté pour les conditions futures

Tel que mentionné à la section 2.2, la profondeur minimale visée pour respecter les exigences éventuelles de navigation est de 11,6 m ou la cote géodésique de -6,5 m. Les analyses réalisées aux chapitres 4 et 5 de l'annexe A démontrent que les cotes bathymétriques au droit du pont-tunnel varient actuellement entre -9 et -7,5, soit d'au moins 1 m de plus profond que la cote à ne pas dépasser.

Cette marge de l'ordre d'un mètre autorise donc la mise en place d'un remblai d'une plus grande épaisseur que l'épaisseur minimum requise qui est, rappelons le, de 1,83 m. Compte tenu des grandes profondeurs locales, l'ajout de quelques décimètres de remblai ne devrait pas affecter significativement la circulation hydrodynamique. Pour évaluer la sensibilité à l'ajout d'une épaisseur excédentaire de remblai, on impose une épaisseur supplémentaire de 1/3 de mètre (33 cm) pour réaliser les simulations hydrodynamiques (cette épaisseur additionnelle prendrait en compte une certaine variabilité qui est attendue lors de la mise en place. L'épaisseur de remblai modélisée est donc de 2,16 m. Les simulations sont donc réalisées avec cette épaisseur de 2,16 m, pour les cinq conditions de débits. Une pente de 6H :1V est considérée pour prolonger le recouvrement jusqu'à ce qu'on intercepte le fond. Cette pente douce est requise pour permettre au matériau d'agir comme butée sur une distance appréciable et pour éviter la saltation de la roche de recouvrement, notamment lors du passage de navires.

Cette valeur de 2,16 m, en étant supérieure à celle de 1,83 m, permet également de démontrer, et les résultats présentés viennent supporter cette assertion, que les conditions hydrodynamiques sont très peu perturbées suite à la réhabilitation. Comme les variations sont très faibles pour ces conditions, on comprend que l'écoulement sera encore moins perturbé pour un recouvrement de 1,83 m.

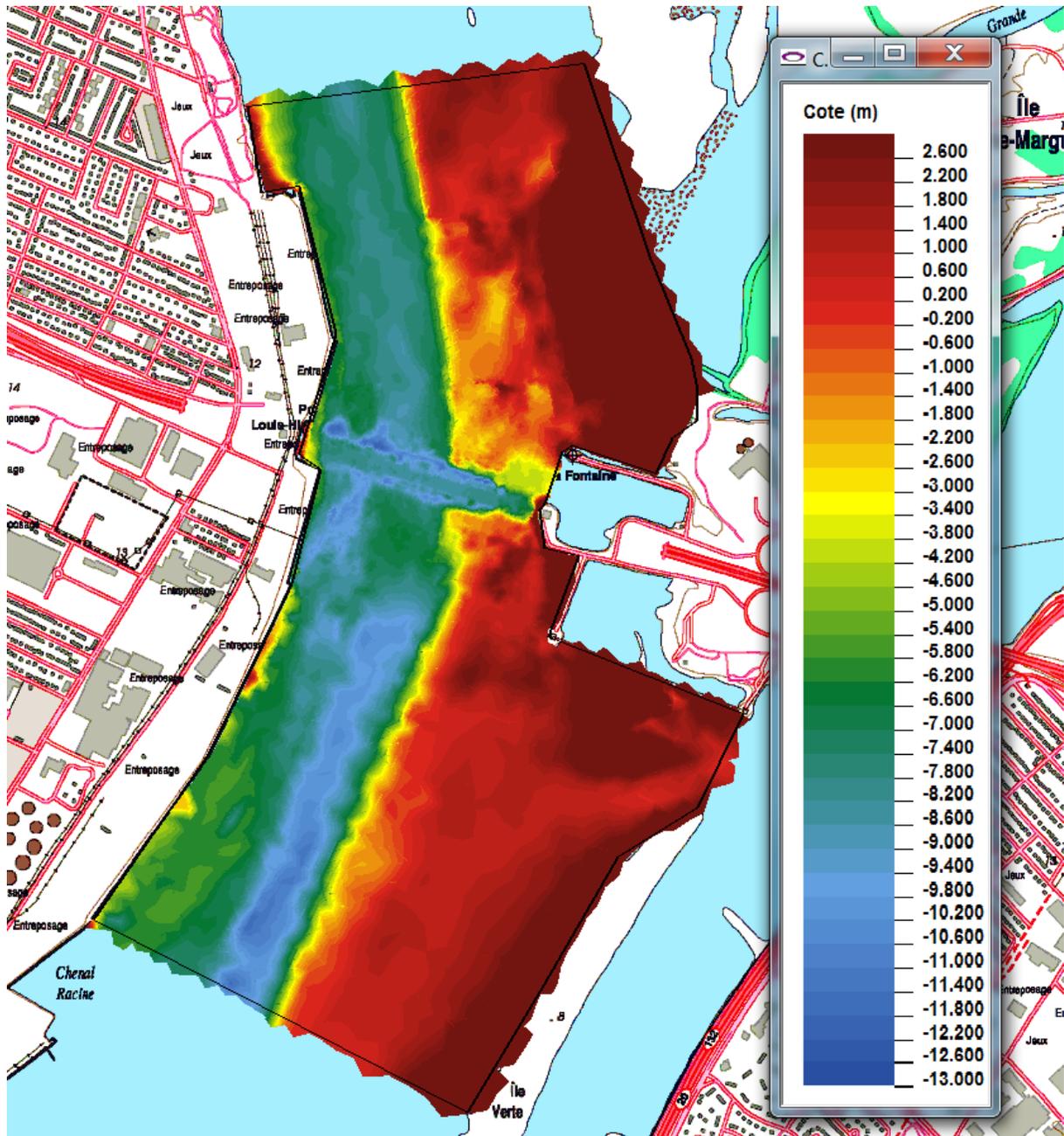


Figure 2-4 Cote géodésique du fond avec 2,16 m de recouvrement minimum.

2.6 Zones nécessitant du remblai additionnel

La localisation des zones nécessitant du remblai additionnel s'effectue en soustrayant l'élévation du toit du tunnel, provenant du plan P07501538C-2, de la cote du fond provenant du maillage du modèle d'Environnement Canada. La zone des calculs correspond à la zone pour laquelle l'élévation du toit du tunnel est connue (en se référant au plan susmentionné).

Zone du toit du tunnel

Des cellules de 0,5 m x 0,5 m ont été créées (surface de 0,25 m²) couvrant la zone occupée par le toit du tunnel. Pour chaque cellule, les cotes du fond et du toit du tunnel sont évaluées. On calcule la différence d'élévation. Si la différence est supérieure à 2,16 m, aucun volume additionnel n'est requis. Dans le cas contraire, la différence entre cette cote et la cote du toit s'avère la hauteur de remblai requise.

Zone des remblais de part et d'autre du tunnel

Perpendiculairement à l'axe du canal, on prolonge le remblai de part et d'autre du toit selon une pente de 6H pour 1V, soit la même pente que celle apparaissant aux plans produits par Lavalin en 1976. On procède comme pour la zone du toit du tunnel pour modifier la bathymétrie et évaluer les volumes requis.

La figure 2-5 présente les zones nécessitant l'ajout de remblai.

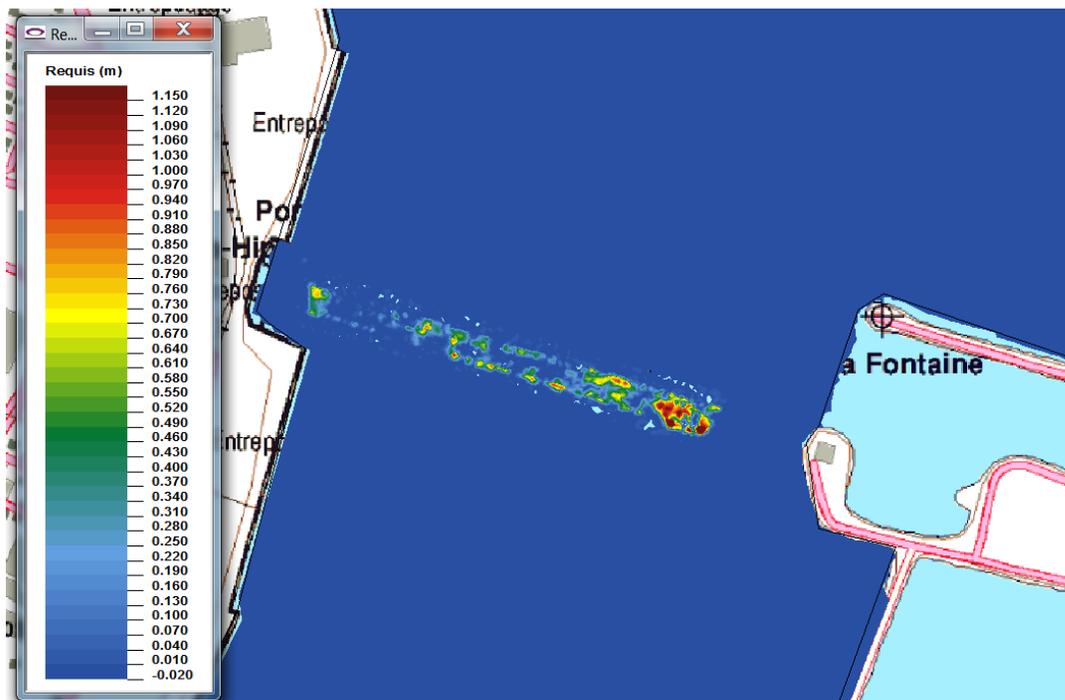


Figure 2-5 Recouvrement additionnel requis pour obtenir une couche d'au moins 2,16 m au-dessus du tunnel.

Estimation des volumes

Les figures 2-6 à 2-9 présentent, sous forme succincte, les volumes calculés à chacune des sections transversales, sections espacées de 0,5 m le long de l'axe du tunnel. Pour chaque section, un fichier Excel a été généré qui permet de localiser les zones où les volumes sont requis. Les volumes totaux évalués sont respectivement de 2 300 et 6 700 m³ pour des épaisseurs de recouvrement respectives de 1,83 et 2,16 m. Ces volumes sont donnés à titre informatifs. Des relevés de haute précision devraient être réalisés avant de procéder aux travaux.

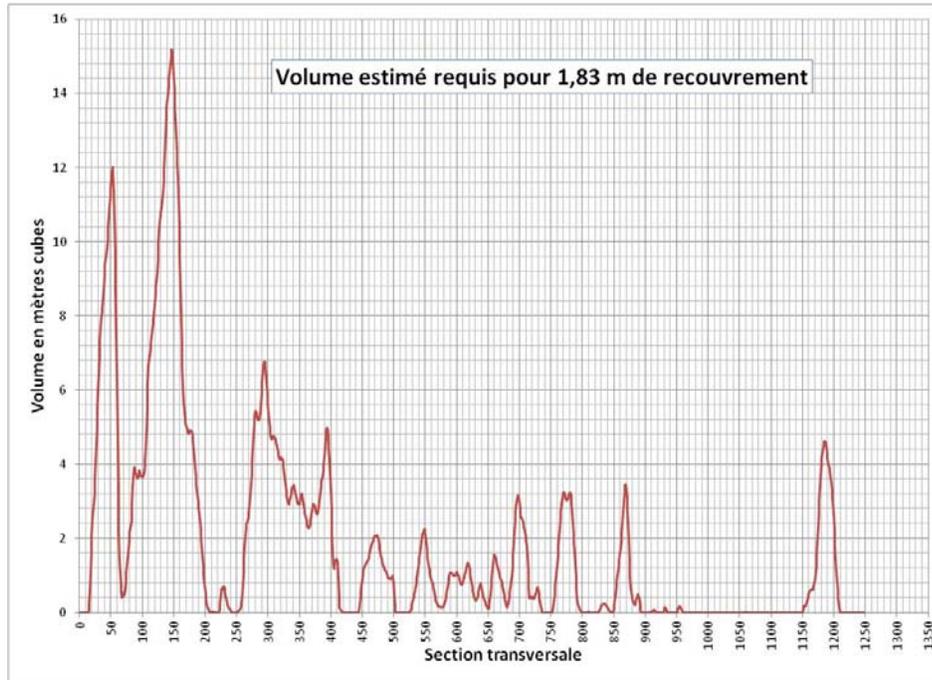


Figure 2-6 Volume estimé requis pour obtenir 1,83 m de recouvrement.

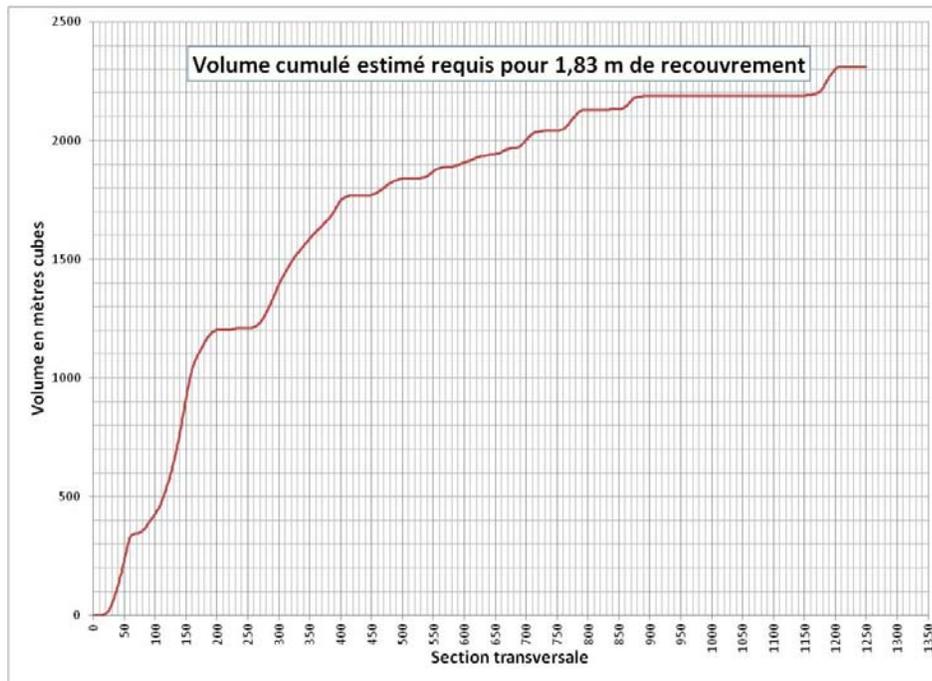


Figure 2-7 Volume cumulé estimé requis pour obtenir 1,83 m de recouvrement.

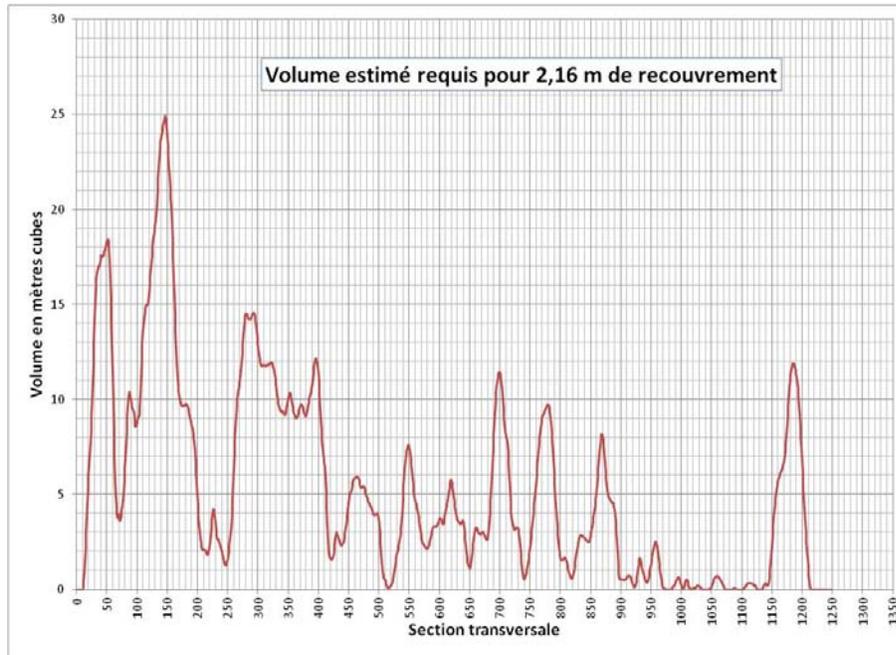


Figure 2-8 Volume estimé requis pour obtenir 2,16 m de recouvrement.

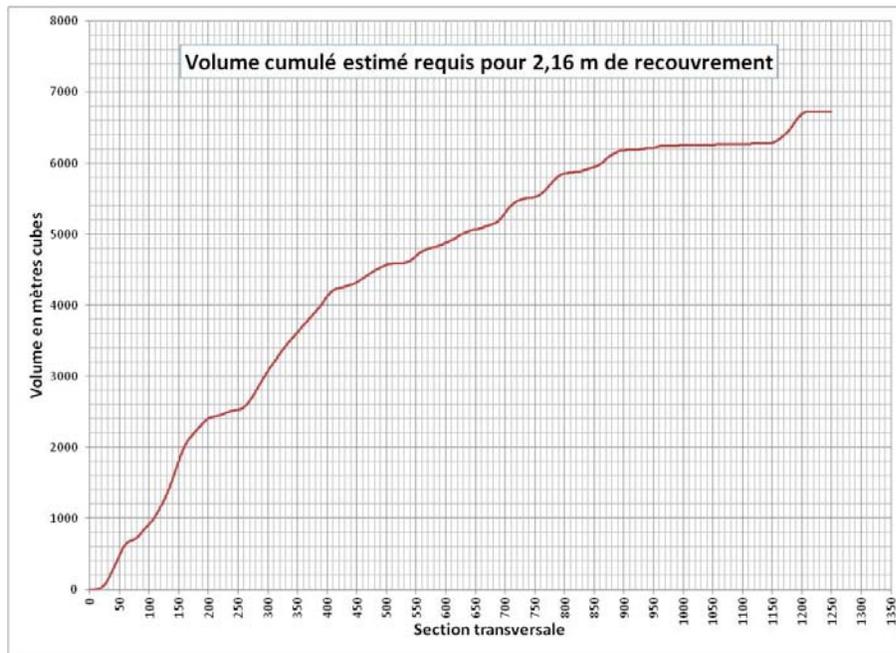


Figure 2-9 Volume cumulé estimé requis pour obtenir 2,16 m de recouvrement.

3 Résultats

Les résultats des simulations sont présentés à l'annexe C. Pour chacun des cinq débits simulés, en conditions actuelles et futures, des figures représentant les paramètres suivants sont fournies :

1. Cote de la surface (niveau d'eau);
2. Variation du niveau de la surface;
3. Profondeur d'eau;
4. Variation de la profondeur d'eau;
5. Module des vitesses;
6. Variation du module des vitesses;
7. Orientation du courant;
8. Nombre de Froude (écoulement torrentiel si supérieur à 1 ou fluvial si inférieur à 1).

3.1 Vitesses et niveau d'eau

Les vitesses dans le secteur du tunnel varient entre 0,8 à 1,4 m/s en fonction du débit simulé (tableau 3-1). La lettre A réfère aux conditions actuelles alors que la lettre F réfère aux conditions finales, soit à la suite des travaux. L'impact sur les vitesses de l'ajout d'un remblai minimum de 2,16 m est non significatif pour tous les scénarios (différence inférieure à 0,005 m/s). Ce faible impact est limité à la zone située juste au-dessus du tunnel.

L'impact sur les niveaux d'eau est également non significatif, la différence étant inférieure au millimètre.

Tableau 3-1 Impacts sur les vitesses et les niveaux d'eau avec un remblai de 2,16 m au-dessus du pont-tunnel.

Simulation	Description	Débit (m ³ /s)	Vitesse (m/s)	Variation des vitesses (m/s)	Variation du niveau d'eau (m)
1A et 1F	Débit moyen	8 725	0,80 à 1,30	< 0,005	< 0,001
2A et 2F	Étiage	5 900	0,80 à 1,20	< 0,005	< 0,001
3A et 3F	Crue 20 ans	13 470	0,85 à 1,35	< 0,005	< 0,001
4A et 4F	Crue 100 ans	14 125	0,90 à 1,40	< 0,005	< 0,001
5A et 5F	Crue 2 ans	11 560	0,85 à 1,40	< 0,005	< 0,001

3.2 Profondeur d'eau minimum

La profondeur d'eau minimum doit être vérifiée pour les conditions d'étiage (simulation 2F). Sur la figure 3-1, on peut constater que la profondeur d'eau au-dessus du pont-tunnel dans le chenal de navigation est partout d'au moins 12 m alors qu'une profondeur minimale de 11,6 m est visée.

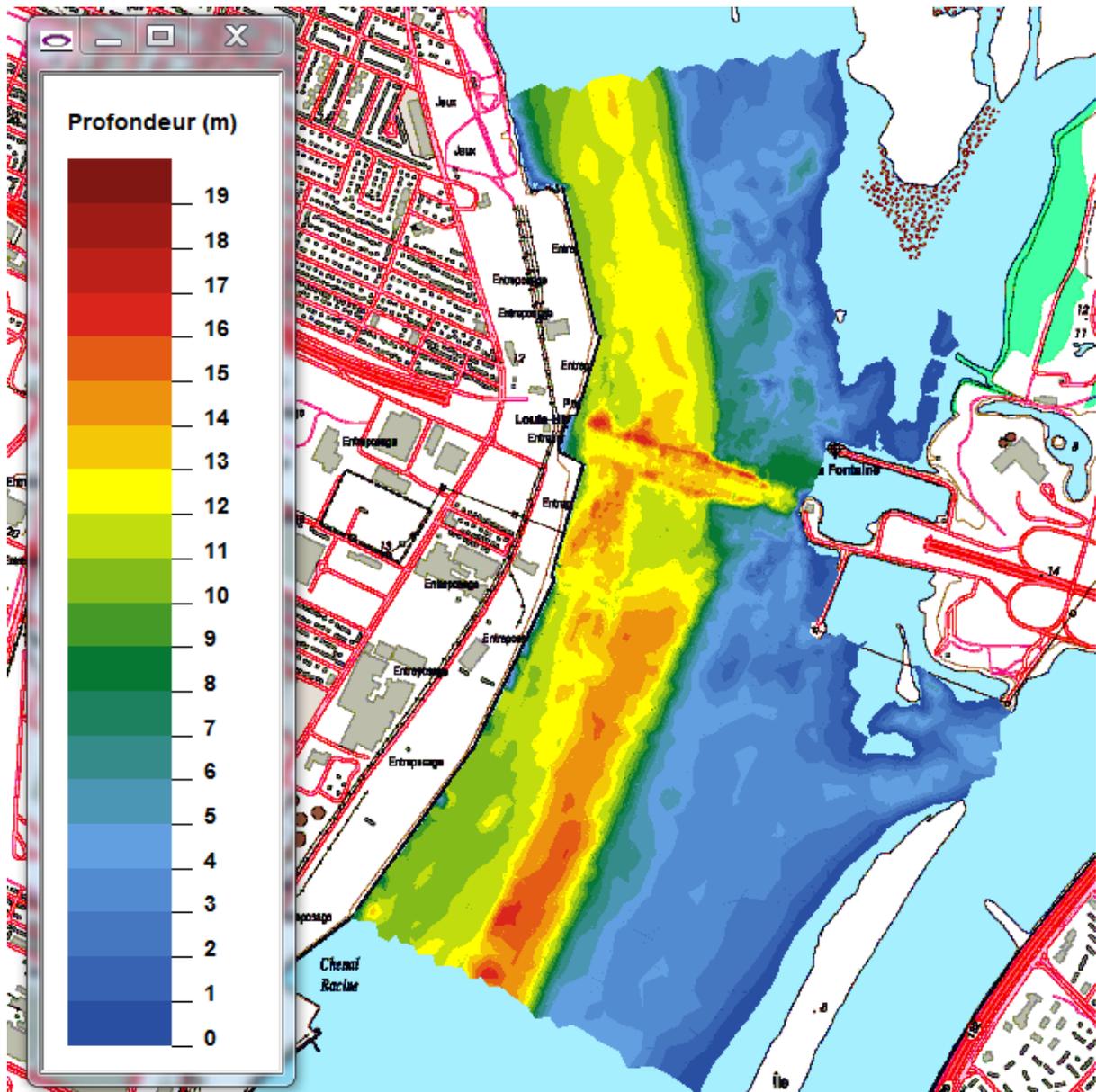


Figure 3-1 Profondeur d'eau en conditions d'étiage avec un remblai de 2,16 m.

3.3 Impact sur les conditions hydrosédimentaires

La dynamique hydrosédimentaire dans le secteur du pont-tunnel ne sera aucunement affectée par l'ajout de remblai puisqu'aucun impact significatif n'est anticipé sur les conditions hydrodynamiques (vitesses et niveaux d'eau).

3.4 Impact sur le régime des glaces

Le régime des glaces dans le secteur du pont-tunnel ne sera aucunement affecté par l'ajout de remblai puisqu'aucun impact significatif n'est anticipé sur les conditions hydrodynamiques (vitesses et niveaux d'eau).

3.5 Calibre des enrochements

Selon les normes du MTQ, de l'enrochement d'un calibre 200-300 mm est suffisant pour résister aux vitesses de l'ordre de 1,5 m/s au-dessus du pont-tunnel. Un tel calibre d'enrochement devrait résister à des vitesses d'écoulement atteignant 2,3 m/s. On doit cependant considérer l'effet des conditions ponctuelles provoquées par les hélices lors du passage des navires. Dans l'éventualité où le tirant d'eau garanti est augmenté à 11,6 m, on peut présumer que le jet des hélices pourrait s'avérer plus intense au fond. Cet aspect, qui déborde du cadre du mandat actuel, devrait éventuellement être considéré.

4 Analyse, synthèse et recommandations

4.1 Analyse

Le faible calibre requis pour résister aux vitesses d'écoulement (voir section 3.5) porte à croire qu'il pourrait y avoir d'autres raisons pour expliquer le manque d'enrochement dans certains secteurs au-dessus du pont-tunnel.

D'abord, il y a lieu de vérifier sur les plans tels que construits et sur les relevés de l'époque (1976) si la hauteur d'enrochement réellement mis en place respectait les exigences des plans et devis. Aussi, il serait pertinent de vérifier l'historique du dragage dans ce secteur du port de Montréal et du fleuve pour éliminer toute possibilité quant à des dragages dans la zone la plus érodée. Enfin, il serait pertinent de vérifier si la zone la plus érodée est située dans un chenal préférentiel de navigation et si oui, d'évaluer la force du jet développée par les hélices des bateaux.

4.2 Synthèse

Afin d'assurer la stabilité à long terme du pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine, il est requis que l'enrochement stabilisateur déposé au dessus du tunnel ait une épaisseur de 1,83 m. Les relevés bathymétriques récents démontrent que cette exigence n'est pas respectée à certains endroits au-dessus du tunnel.

Les simulations des écoulements en conditions futures ont été réalisées avec une couche d'enrochement stabilisateur de 2,16 m d'épaisseur au-dessus du pont-tunnel, soit 33 cm de plus que le minimum requis, pour évaluer la sensibilité du régime hydrodynamique à une éventuelle augmentation de l'épaisseur et permettre une éventuelle tolérance dans le placement du remblai par l'entrepreneur.

Pour tous les débits simulés, tant à l'étiage qu'en crue, les résultats démontrent des variations non significatives inférieures à 0,005 m/s pour les vitesses d'écoulement et de l'ordre du millimètre en ce qui a trait au niveau de la surface de l'eau.

Ces très faibles variations sur les conditions hydrodynamiques (vitesse et niveaux d'eau) font en sorte qu'il n'y a aucun impact sur la dynamique sédimentaire et le régime des glaces. Par ailleurs, ces résultats, obtenus avec une épaisseur de 2,16 m de remblai, permettent d'accepter une tolérance dans la pose de l'enrochement sans qu'il n'y ait de répercussion sur le régime hydrodynamique. Cette épaisseur additionnelle permet même de respecter la profondeur minimale proposée par le Port de Montréal (11,6 m) pour la navigation. On peut donc conclure qu'un ajout additionnel de 0,33 m d'enrochement ne provoque aucun changement significatif sur les conditions hydrauliques. A fortiori, la réhabilitation du remblai à une épaisseur de 1,83 m ne provoque pas de changement au régime hydraulique, sédimentaire et des glaces. Un sur-épaississement devrait par contre être vérifié au niveau structural pour s'assurer de la capacité de la structure à supporter ce poids additionnel.

4.3 Recommandations

Les résultats des simulations et la documentation consultée mènent aux recommandations suivantes :

1. Avec les données disponibles actuellement, un calibre de 200-300 mm est recommandé pour l'enrochement stabilisateur, sans considérer l'impact potentiel des jets dus aux hélices des navires;
2. Procéder aux vérifications décrites à la section 4.1
3. Lors des travaux, un contrôle précis de la hauteur d'enrochement mis en place devra être effectué. Les simulations réalisées permettent de conclure qu'en ce qui a trait à l'hydraulique, qu'une hauteur supplémentaire de 0,33 m d'enrochement n'a aucune répercussion significative sur la circulation hydrodynamique, le régime sédimentaire et celui des glaces. Un surplus est donc tolérable si les spécialistes en structure établissent que la structure peut supporter un poids additionnel résultant d'un sur-épaississement de la couche de remblai.

5 Références

- [1] Teknika-HBA – SPG Hydro International Inc. « *Sondage bathymétrique, Tunnel Louis-Hippolyte-Lafontaine, Fleuve St-Laurent* ». Par SPG Hydro International Inc. Pour le ministère des Transports du Québec, Direction territoriale de Montréal, avril 2008. Projet SPG 08-11296-I. 24 p.
- [2] Géophysique GPR International inc. « *Levé bathymétrique et de profilage sous-marin sur le fleuve St-Laurent à la hauteur du pont tunnel Louis-Hippolyte-Lafontaine* », Pour le ministère des Transports du Québec, direction de l'Île de Montréal, octobre 2010. Rapport M-10954 14 p.
Plan de localisation DWG 10-09-535-00.
- [3] CJB Environnement inc. « *Examen préalable, Quais 76-77. Prolongement et approfondissement* ». Pour le Port de Montréal, Projet 09702, Mai 2010. 100 p.

Ministère des Transports du Québec

Pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine Recouvrement du tunnel Annexe A. Traitement des relevés

Ministère des Transports du Québec

Pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine Recouvrement du tunnel Annexe A. Traitement des relevés

Par



Pierre Dupuis, ing., M. Sc.

Équipe de réalisation

Ministère des Transports du Québec

Chargé de projet : Mourad El Hila, ing., M. Sc.

GENIVAR inc.

Directeur de projet : Pierre Pelletier, ing., M. Sc.

Spécialiste : Pierre Dupuis, ing., M. Sc.

Table des matières

1	<i>Contexte</i>	1
2	<i>Données bathymétriques et géométriques</i>	2
2.1	Plans pour ajout de remblai réalisés par Lavalin (1976)	2
2.2	Relevés réalisés par la firme SPG Hydro International inc.	5
2.3	Relevés réalisés par Géophysique GPR International (2010).	7
2.4	Maillage produit par Environnement Canada.....	8
3	<i>Comparaison des relevés</i>	11
3.1	Section GPR 094	13
3.2	Section GPR 116	14
3.3	Section GPR 150	15
3.4	Section GPR 174	16
3.5	Section GPR 214	17
3.6	Section GPR 235	18
3.7	Section GPR 277	19
3.8	Section GPR 295	20
3.9	Section GPR 335	21
3.10	Section GPR 361	22
3.11	Section GPR 397	23
3.12	Section GPR 423	24
3.13	Section GPR 452	25
3.14	Section GPR 479	26
3.15	Section GPR 512	27
3.16	Section GPR 543	28
3.17	Section GPR 573	29
3.18	Section GPR 599	30
3.19	Section GPR 632	32
3.20	Section GPR 659	33
3.21	Section GPR 696-1.....	34

3.22	Section GPR 717	35
3.23	Section GPR 748	36
3.24	Section GPR 771	37
4	<i>Profils longitudinaux</i>	38
4.1	Profil longitudinal 1.....	39
4.2	Profil longitudinal 2.....	40
4.3	Profil longitudinal 3.....	41
4.4	Profil longitudinal 4.....	42
4.5	Profil longitudinal 5.....	43
4.6	Profil longitudinal 6.....	44
5	<i>Profondeur d'eau minimum requise</i>	45
6	<i>Production de la bathymétrie post travaux pour fins de simulations hydrodynamiques</i>	48
7	<i>Références</i>	52

Liste des figures

Figure 1-1 Localisation du pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine.....	1
Figure 2-1 Plan P07501538C-2 présentant les profils longitudinaux du toit du tunnel et du fond.....	2
Figure 2-2 Coupe typique de la section tunnel du pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine.....	3
Figure 2-3 Profils du toit du tunnel et du fond.....	3
Figure 2-4 Vue en plan du tunnel (système anglais des années 70).....	4
Figure 2-5 Parcours suivis lors du relevé de 2008 par la firme SPG Hydro International inc.....	5
Figure 2-6 Grille de points interpolés servant à la production des isobathes.....	6
Figure 2-7 Carte des profondeurs d'eau par rapport au 0 des cartes selon le relevé réalisé par SPG Hydro International en novembre 2008.....	6
Figure 2-8 Localisation des relevés réalisés par la firme Géophysique GPR Int. le 11 août 2010.....	7
Figure 2-9 Sections transversales relevées par la firme Géophysique GPR International inc.....	7
Figure 2-10 Maillage utilisé pour réaliser les simulations hydrodynamiques.....	8
Figure 2-11 Maillage très dense intégré au modèle hydrodynamique.....	8
Figure 2-12 Sous-maillage tiré du modèle d'Environnement Canada couvrant le fleuve Saint-Laurent.....	9
Figure 2-13 Partie du maillage produit par Environnement Canada.....	9
Figure 2-14 Bathymétrie dans la zone du tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine.....	10
Figure 3-1 Localisation des sections transversales de Géophysique GPR inc.....	11
Figure 3-2 Vue en plan des points cotés du SHC utilisés pour comparer avec les points cotés de GPR.....	11
Figure 3-3 Vue en élévation des points cotés du SHC utilisés pour comparer avec les points cotés de GPR.....	12
Figure 4-1 Localisation des profils longitudinaux.....	38
Figure 4-2 Profil longitudinal 1.....	39
Figure 4-3 Profil longitudinal 2.....	40
Figure 4-4 Profil longitudinal 3.....	41
Figure 4-5 Profil longitudinal 4.....	42
Figure 4-6 Profil longitudinal 5.....	43
Figure 4-7 Profil longitudinal 6.....	44
Figure 5-1 Profondeur d'eau minimum désirée.....	45
Figure 5-2 Extrait de la carte marine pour le secteur du tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine.....	45
Figure 5-3 Zone avec profondeur minimum de 11,5 m (en bleu) pour les conditions actuelles.....	46
Figure 5-4 Zone avec profondeur minimum de 11,5 m (en bleu) pour les conditions avec recouvrement de 2,16 m.....	46
Figure 5-5 Bathymétrie tirée du modèle entier d'Environnement Canada.....	47
Figure 6-1 Recouvrement additionnel requis pour obtenir 2,16 m de recouvrement au-dessus du tunnel.....	49
Figure 2-6 Volume estimé requis pour obtenir 1,93 m de recouvrement.....	50
Figure 2-7 Volume cumulé estimé requis pour obtenir 1,83 m de recouvrement.....	50
Figure 2-8 Volume estimé requis pour obtenir 2,16 m de recouvrement.....	51
Figure 2-9 Volume cumulé estimé requis pour obtenir 2,16 m de recouvrement.....	51

1 Contexte

Dans le cadre de son programme de réfection des ouvrages majeurs de transports, le ministère des Transports du Québec (MTQ) doit s'assurer qu'une couche de remblai d'épaisseur suffisante recouvre les cellules structurales formant le pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine (figure 1-1). Des études antérieures indiquent en effet que toute perte d'enrochement sur la couronne du tunnel conduit à une réduction des conditions ultimes de stabilité établies conformément aux critères du Code canadien sur le calcul des ponts routiers. Des relevés récents indiquent que cette épaisseur minimum n'est pas respectée dans certaines zones situées au-dessus du tunnel reliant l'île Charron à l'île de Montréal.

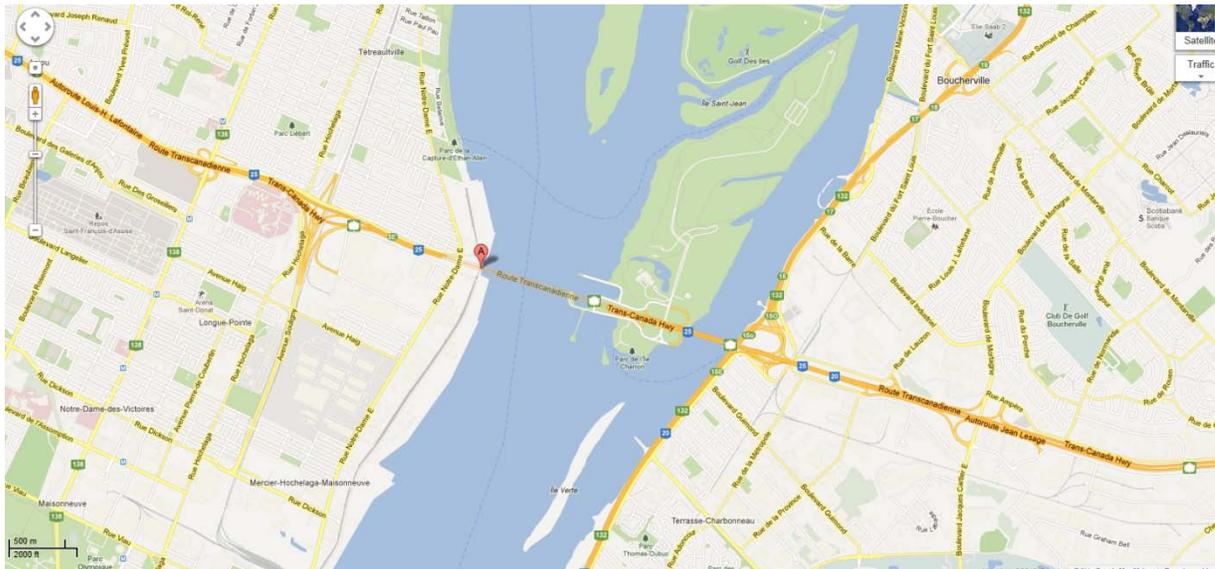


Figure 1-1 Localisation du pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine.

Selon les informations reçues du MTQ, une épaisseur minimale d'enrochement stabilisateur de 1,83 m est requise au-dessus du pont-tunnel afin de respecter les critères de stabilité structuraux. Cette épaisseur a été établie par le consortium CCDGP (Cima, CNRC-NRC, DESSAU, GENIVAR, PARSONS) en novembre 2010. Des relevés bathymétriques ont été réalisés à différentes périodes et c'est à partir de ces relevés que des écarts dans l'épaisseur de recouvrement ont été constatés.

Cette annexe présente le traitement et l'analyse comparative des jeux de données obtenus de différentes sources.

2 Données bathymétriques et géométriques

Des plans et relevés provenant de différentes sources ont été transférés à GENIVAR par le MTQ en début de mandat. Une revue a été réalisée et l'information pertinente pour cette étude est présentée aux sections qui suivent selon un ordre chronologique.

2.1 Plans pour ajout de remblai réalisés par Lavalin (1976)

Quatre plans produits par la firme Lavalin ont été transmis par le MTQ à GENIVAR. Ces plans ont pour année de référence 1975, mais ont été signés en septembre 1976. De ces quatre plans, le plan P07501538C-2 est intéressant, car il permet d'obtenir le profil du fond et du toit du tunnel le long de l'axe longitudinal du tunnel (figure 2-1).

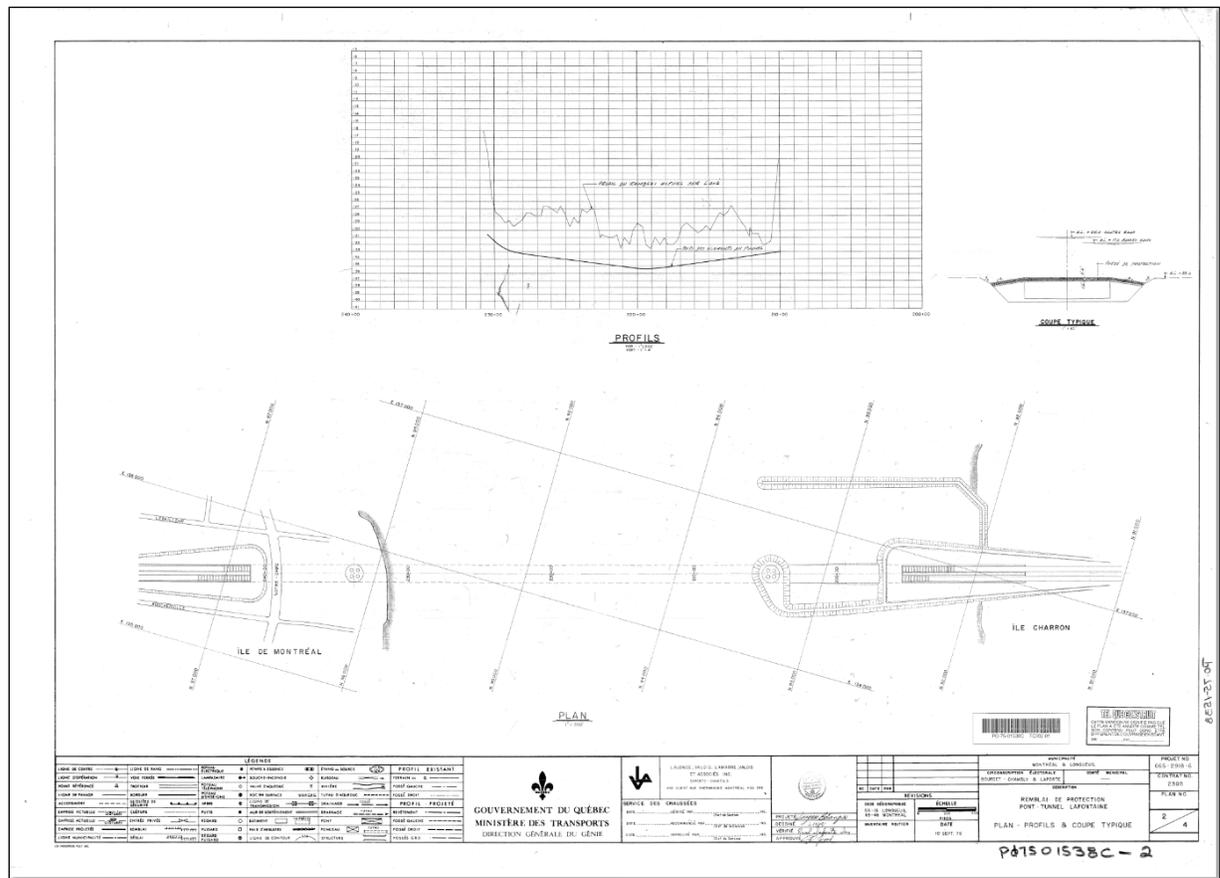


Figure 2-1 Plan P07501538C-2 présentant les profils longitudinaux du toit du tunnel et du fond.

Les figures qui suivent sont extraites de ce plan. Notons que toutes les dimensions sont en pieds. La figure 2-2 présente une coupe typique du tunnel. Le toit y est horizontal et le remblai situé de part et d'autre des parois verticales du tunnel forme une pente de 6H :1V (6 m horizontal pour 1 m vertical). On observe que l'épaisseur de remblai est de 6,0 pieds (1,83 m), comprenant 4,5 pieds de matériau de plus fort calibre.

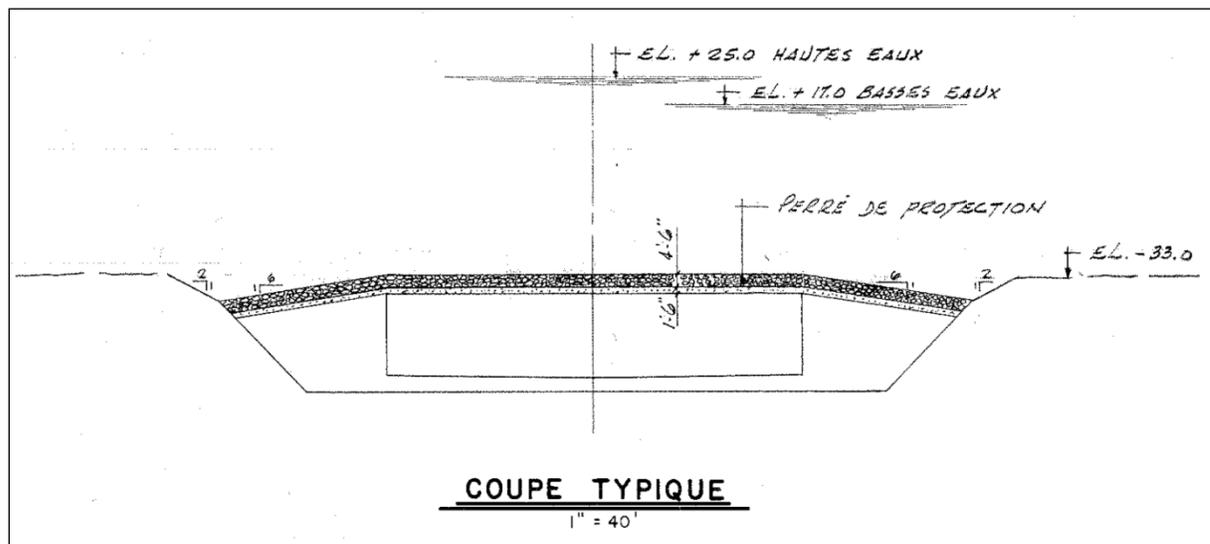


Figure 2-2 Coupe typique de la section tunnel du pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine.

La figure 2-3 permet de constater que l'épaisseur de remblai était fortement variable le long de l'axe longitudinal au moment des relevés.

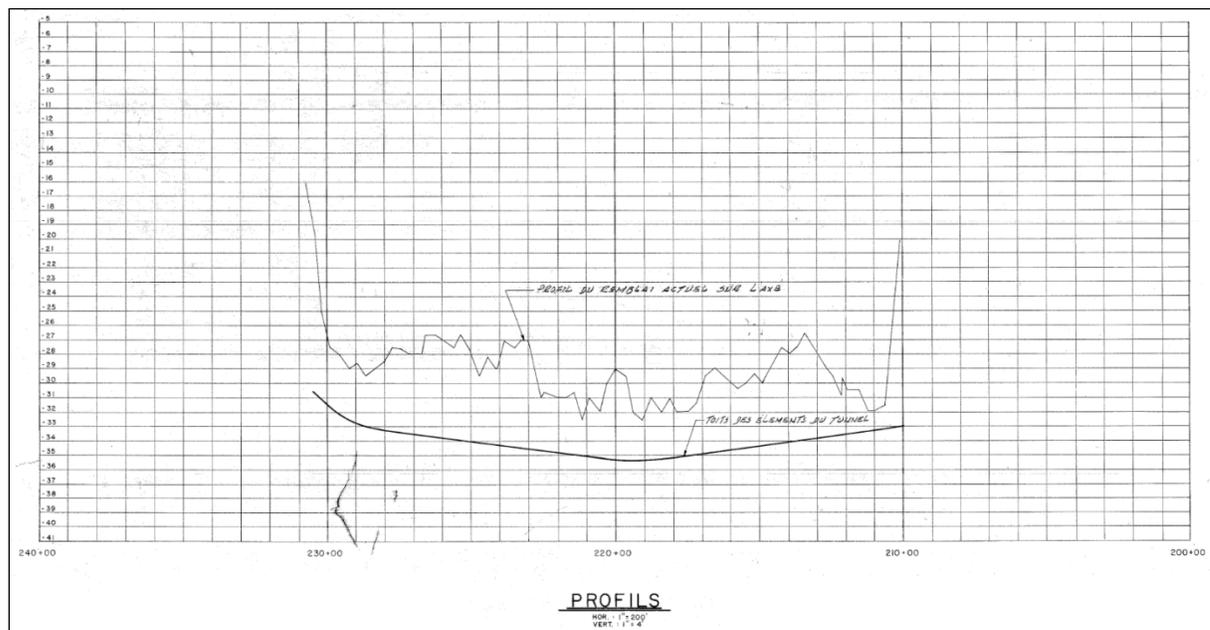


Figure 2-3 Profils du toit du tunnel et du fond.

La vue en plan (figure 2-4) permettra d'établir l'élévation du toit du tunnel en métrique et de localiser le tout selon la projection MTM (Mercator Transverse Modifiée) en utilisant les relevés réalisés par la firme GPR en 2010.

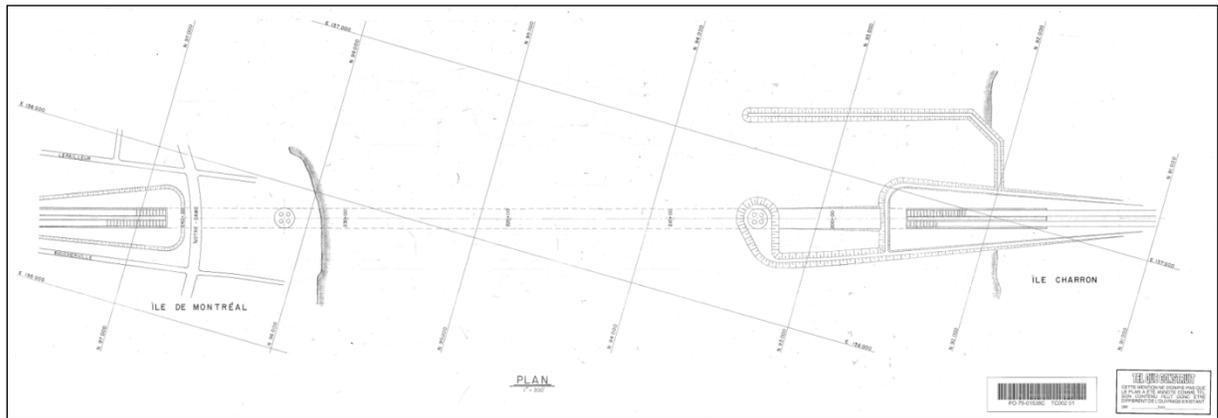


Figure 2-4 Vue en plan du tunnel (système anglais des années 70).

2.2 Relevés réalisés par la firme SPG Hydro International inc.

Des relevés ont été réalisés en 2008 par la firme SPG Hydro International inc. (SPG), en sous-traitance de la firme Teknika-HBA pour le MTQ. La figure 2-5, tirée de l'annexe B du rapport de SPG, présente les parcours suivis pour obtenir une représentation bathymétrique de la zone.

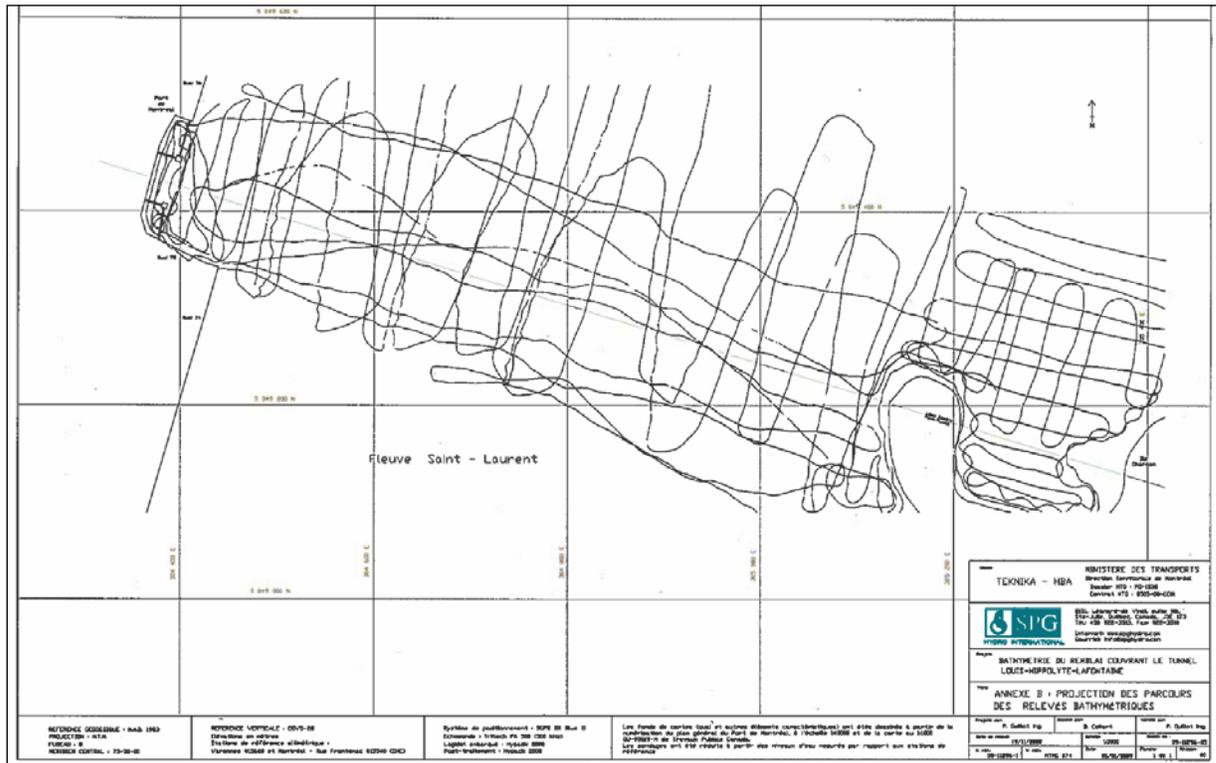


Figure 2-5 Parcours suivis lors du relevé de 2008 par la firme SPG Hydro International inc.

La figure 2-6 présente la bathymétrie réalisée par le logiciel Hypack à partir des points obtenus des parcours réalisés par la firme SPG. On doit noter que des valeurs ont été interpolées à partir d'une triangulation TIN (Triangulated Irregular Network) pour former une grille dont les cellules sont de 4 m par 4 m. Pour un lecteur non familier, le résultat peut laisser penser qu'une forte densité de points ont été relevés. En fait, ce sont essentiellement les points de la figure 2-5 qui proviennent des relevés. Sur la figure 2-5, on observe des zones importantes sans points cotés. La prudence est de mise lors de l'interprétation des résultats. Ce constat est toujours valable, quelle que soit la méthode de mesures retenue.

La figure 2-7 présente le produit final obtenu.

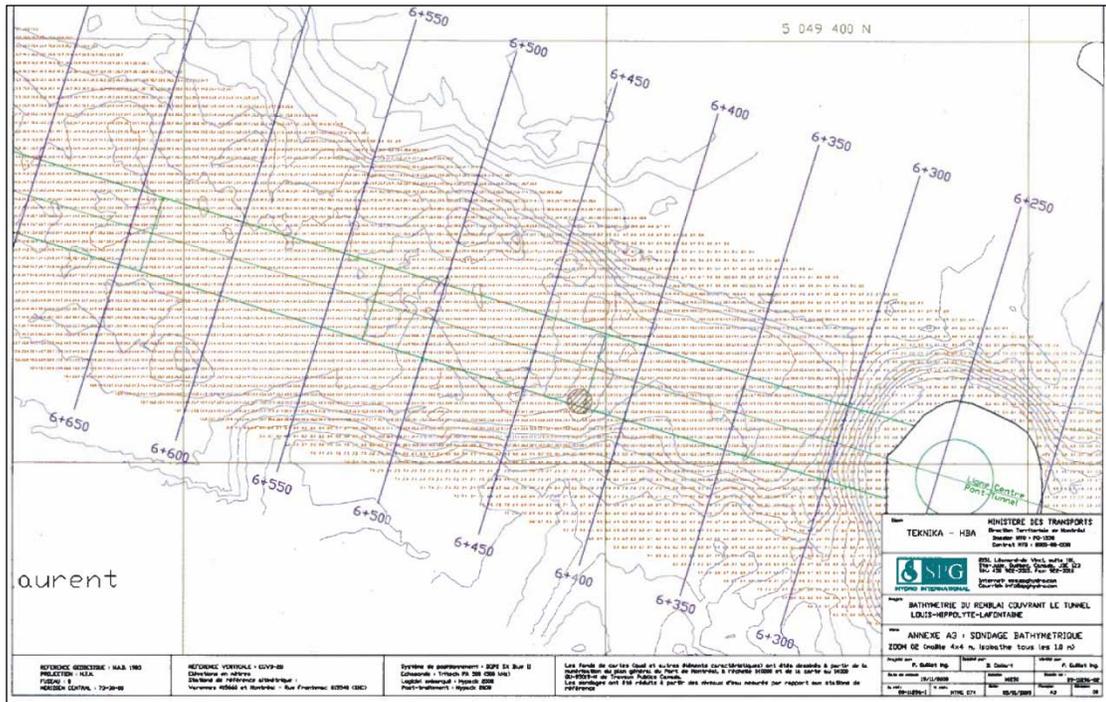


Figure 2-6 Grille de points interpolés servant à la production des isobathes.

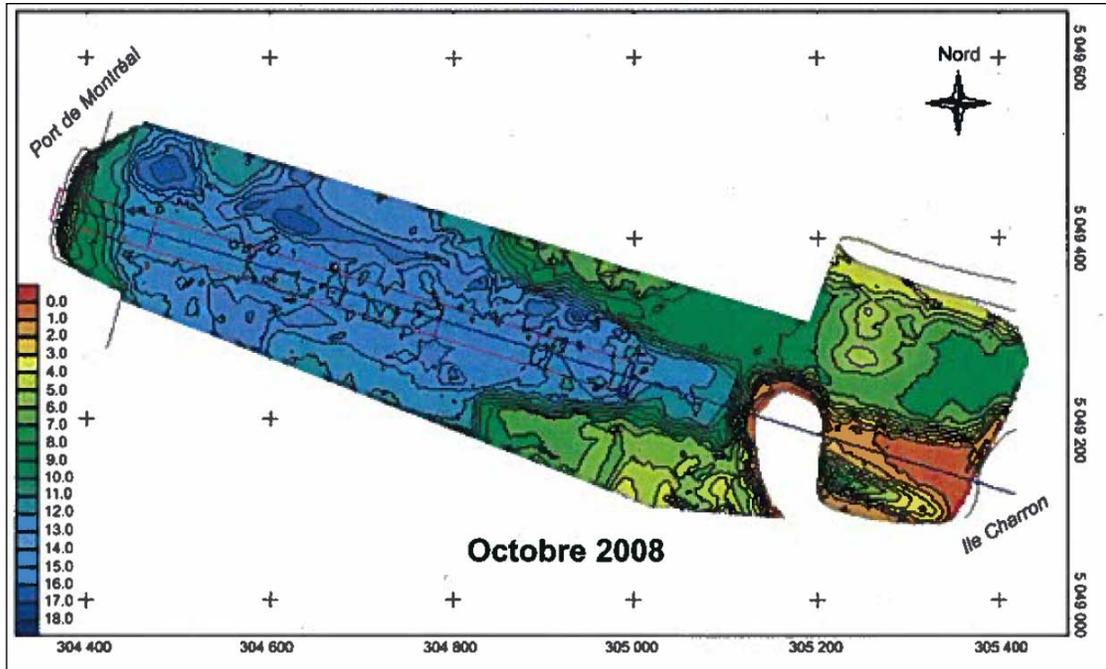


Figure 2-7 Carte des profondeurs d'eau par rapport au 0 des cartes selon le relevé réalisé par SPG Hydro International en novembre 2008.

2.3 Relevés réalisés par Géophysique GPR International (2010).

Vingt-quatre (24) sections ont été relevées par la firme Géophysique GPR International inc. (GPR) le 11 août 2010 perpendiculairement à l'axe longitudinal du tunnel (figure 2-8, Plan DWG 10-09-535-00). Le numéro de section indique le chaînage en mètres et procède de la rive droite (94) vers la rive gauche (771). On y mentionne que peu ou pas de sédiments fins semblent s'être accumulés au-dessus du perré de protection du tunnel. Seules les sections situées en rive droite (94, 116, 150) ainsi que la section la plus à l'ouest (771) présentent une couche pouvant être associée à des sédiments fins. La zone du chenal s'avère donc exempte de sédiments fins, seules les zones protégées par des hauts fonds ou l'avancée du quai pouvant présenter une sédimentation fine.

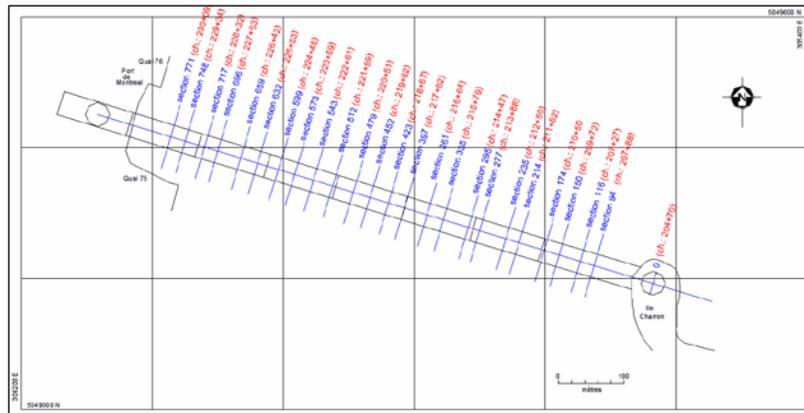


Figure 2-8 Localisation des relevés réalisés par la firme Géophysique GPR Int. le 11 août 2010.

Les coordonnées et l'élévation des points ont été extraites du fichier DWG et ont servi à créer un ensemble d'arcs permettant leur superposition sur fond de carte au 20 000^e ainsi que la bathymétrie obtenue d'Environnement Canada (aspect traité à la section suivante) (figure 2-9).

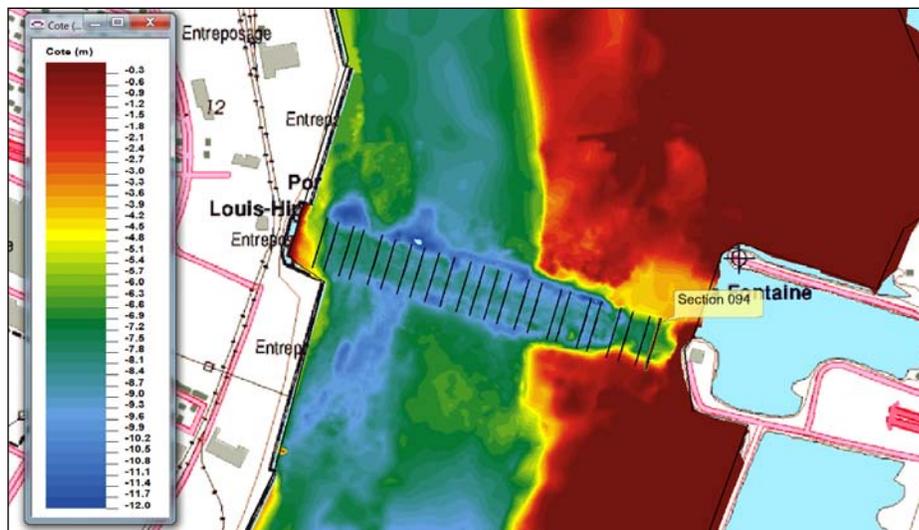


Figure 2-9 Sections transversales relevées par la firme Géophysique GPR International inc.

2.4 Maillage produit par Environnement Canada

GENIVAR a obtenu d'Environnement Canada un sous-domaine du maillage utilisé par ces derniers pour simuler les écoulements dans le fleuve Saint-Laurent. Ce maillage couvre la zone située entre l'amont des îles Sainte-Hélène et Notre-Dame et Trois-Rivières (figure 2-10). Environnement Canada a incorporé les relevés les plus récents réalisés par le Service hydrographique du Canada (SHC) dans la zone du tunnel.



Figure 2-10 Maillage utilisé pour réaliser les simulations hydrodynamiques.

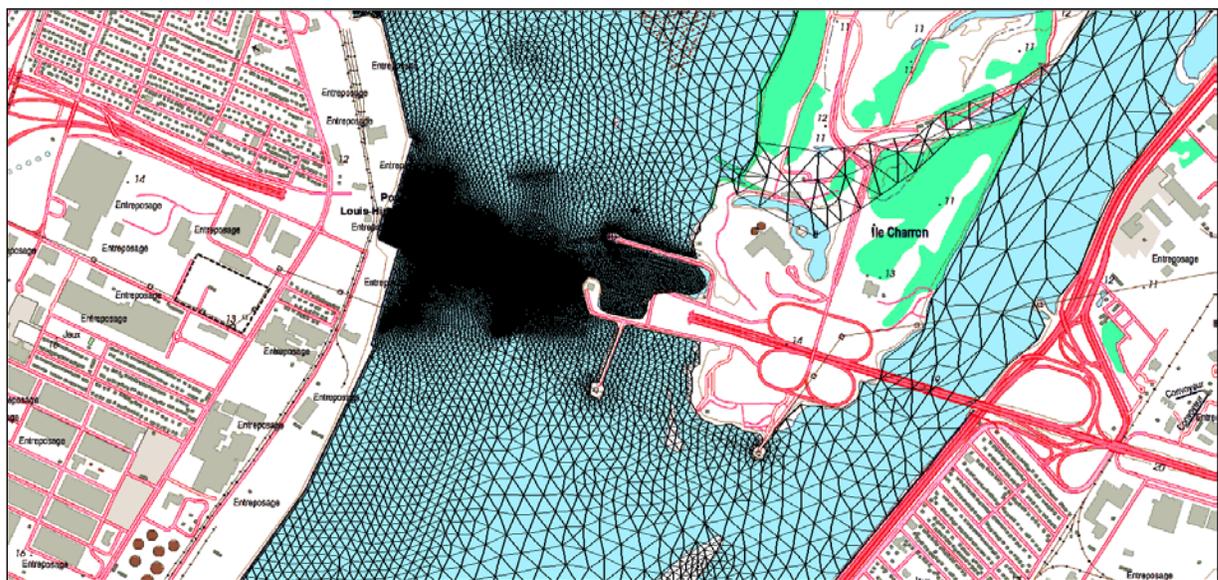


Figure 2-11 Maillage très dense intégré au modèle hydrodynamique.

Le maillage a été densifié dans cette zone par Environnement Canada pour reproduire adéquatement la bathymétrie locale et capter les changements au niveau hydrodynamique entre les conditions actuelles et les conditions post réfection. GENIVAR a extrait la bathymétrie du sous-domaine propre à la zone à l'étude et qui sert à afficher les résultats (figure 2-11).

On crée une triangulation à partir des points cotés du SHC (TIN) et on projette le maillage sur ce TIN pour extraire l'élévation à chacun des points sommets des triangles du maillage. L'élévation du fond (la bathymétrie) est présentée avec l'aide d'un code de couleur aux figures 2-12 et 2-13.

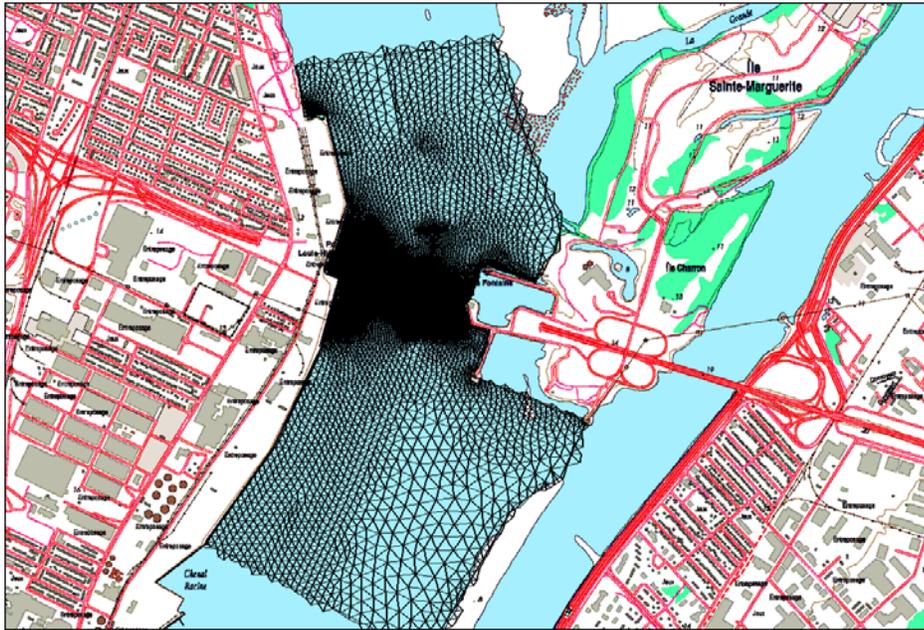


Figure 2-12 Sous-maillage tiré du modèle d'Environnement Canada couvrant le fleuve Saint-Laurent.

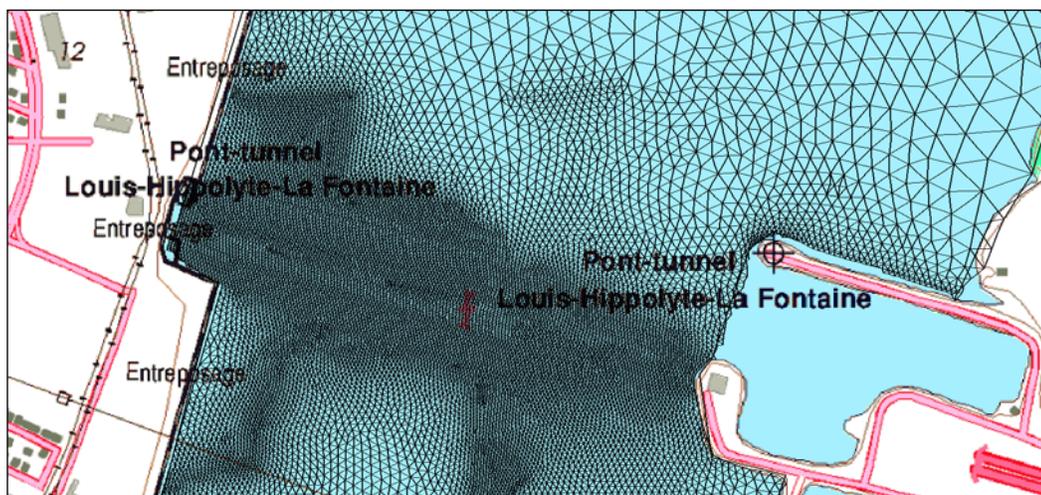


Figure 2-13 Partie du maillage produit par Environnement Canada.

La figure 2-14 présente la bathymétrie (cote géodésique) du modèle. On observe en rive droite la tranchée creusée en rive pour permettre d'y déposer les caissons formant le tunnel. Pour les fins des simulations hydrodynamiques, la région située à l'extérieur de l'aire d'entreposage est celle devant être étudiée.

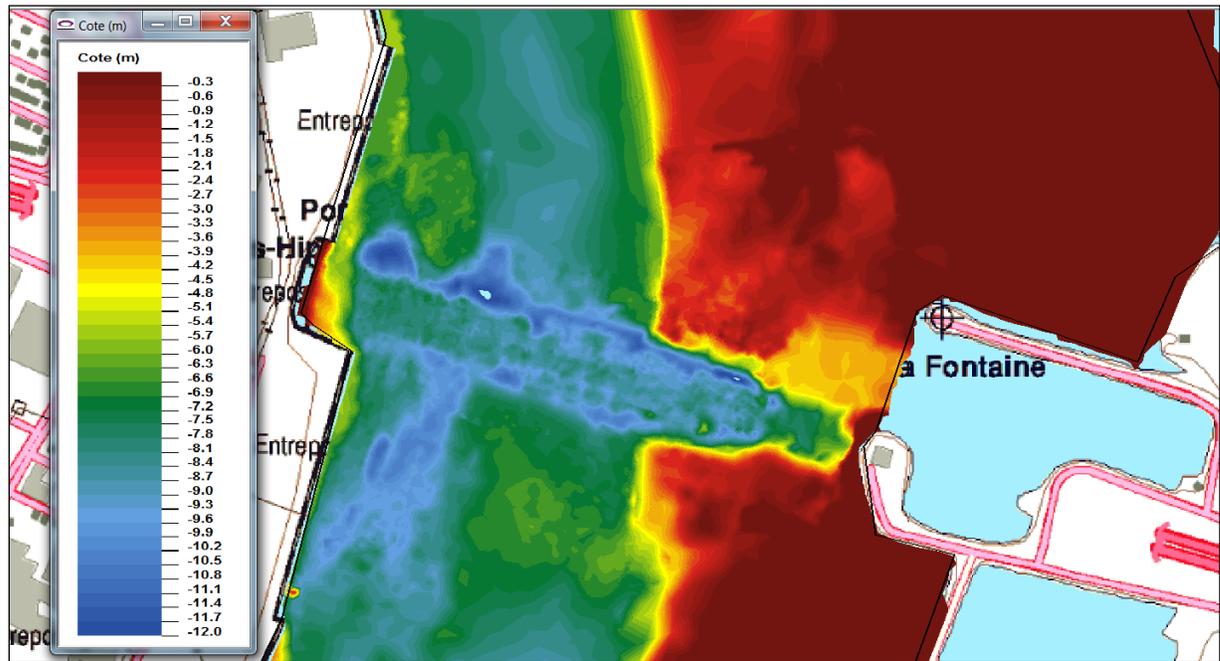


Figure 2-14 Bathymétrie dans la zone du tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine.

Au chapitre suivant, on compare les relevés réalisés par la firme GPR aux points cotés de bathymétrie produits par Environnement Canada à partir des mesures récentes du Service hydrographique du Canada.

3 Comparaison des relevés

Dans ce chapitre, les sections relevées par GPR sont comparées aux points cotés du modèle d'Environnement Canada. Les sections relevées par GPR procèdent de l'est vers l'ouest. La première est la section 094, la dernière la section 771. Cette comparaison est réalisée afin d'évaluer la conformité des deux jeux de données et en tirer le maximum d'information. Comme l'étude de GPR visait à identifier la présence de zones de sédiments fins, cette analyse a été réalisée à titre informatif.

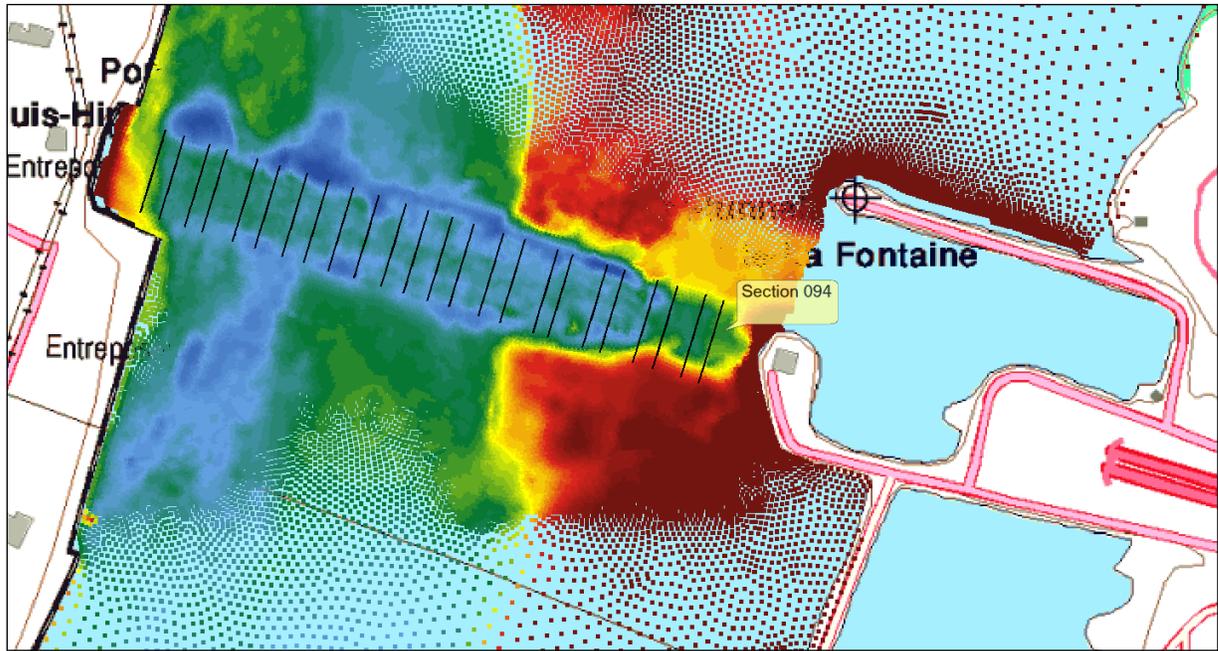


Figure 3-1 Localisation des sections transversales de Géophysique GPR inc.

Tous les points situés à proximité de la droite formant la section sont retenus. Deux figures sont générées lors de l'analyse. La première figure présente la vue en plan des points retenus pour procéder à la comparaison. Cette sélection dépend d'une largeur de bande, fixée à priori et qui, pour cette étude, est de 5 m de part et d'autre de la section (figure 3-2).

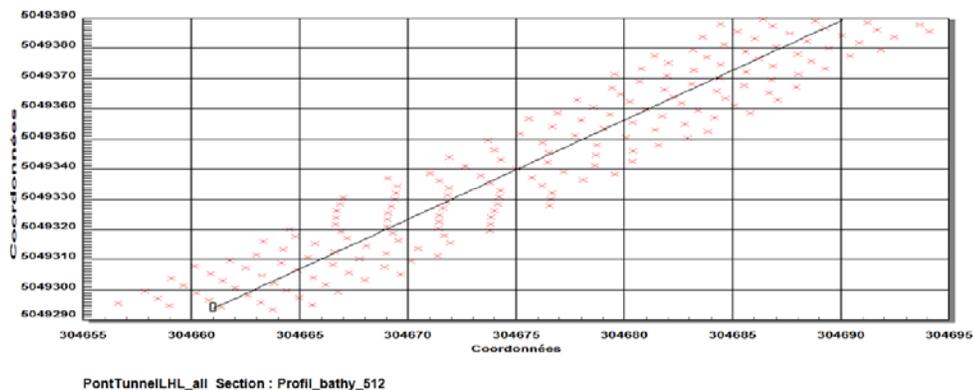


Figure 3-2 Vue en plan des points cotés du SHC utilisés pour comparer avec les points cotés de GPR.

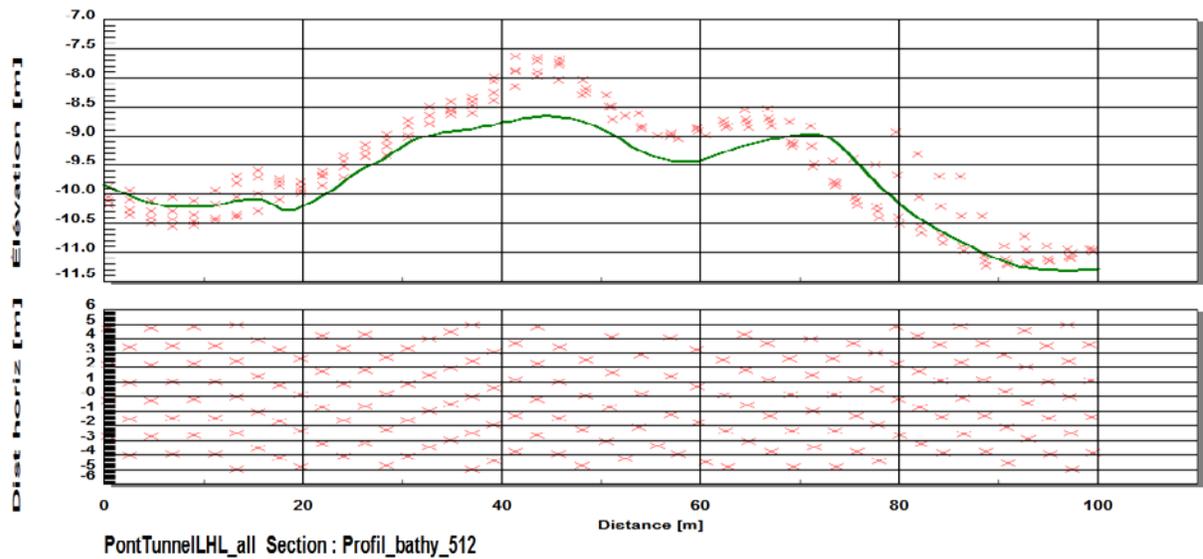


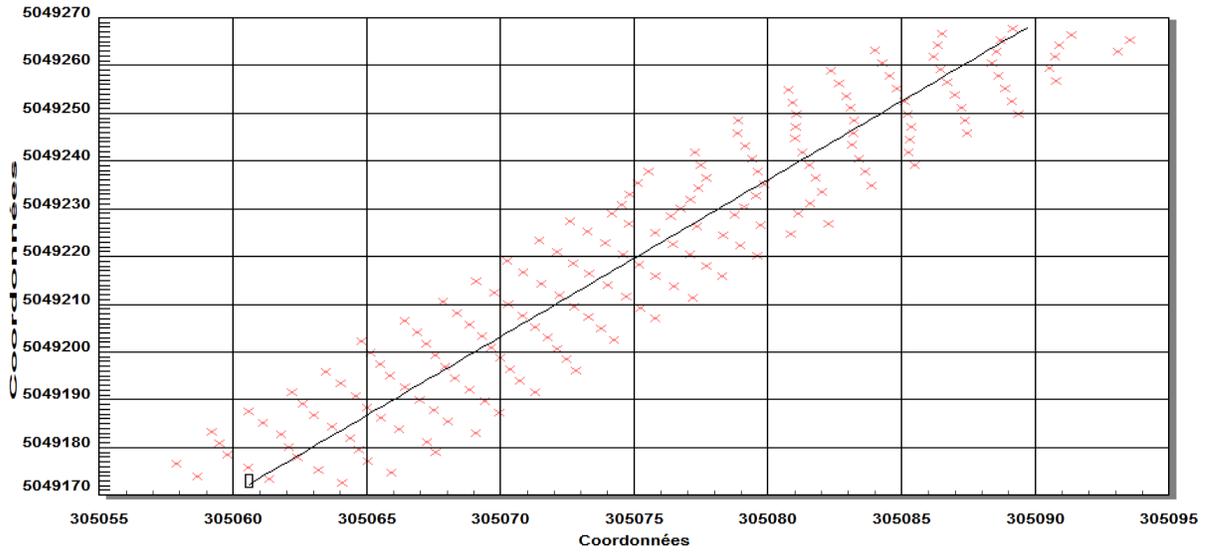
Figure 3-3 Vue en élévation des points cotés du SHC utilisés pour comparer avec les points cotés de GPR.

La deuxième figure trace l'élévation du point coté (x rouge) ainsi que l'élévation du profil provenant de GPR (trait plein) dans la partie supérieure. La distance de chaque point, de part et d'autre de la section, est indiquée dans la partie inférieure. Cette approche permet d'observer rapidement toute disparité entre les deux jeux de données. Ainsi, de la position 40 à 70 m, tous les points cotés situés de part et d'autre du profil 512 sont plus élevés que l'élévation produite par GPR. La différence peut atteindre 0,6 m (distance horizontale 45 m).

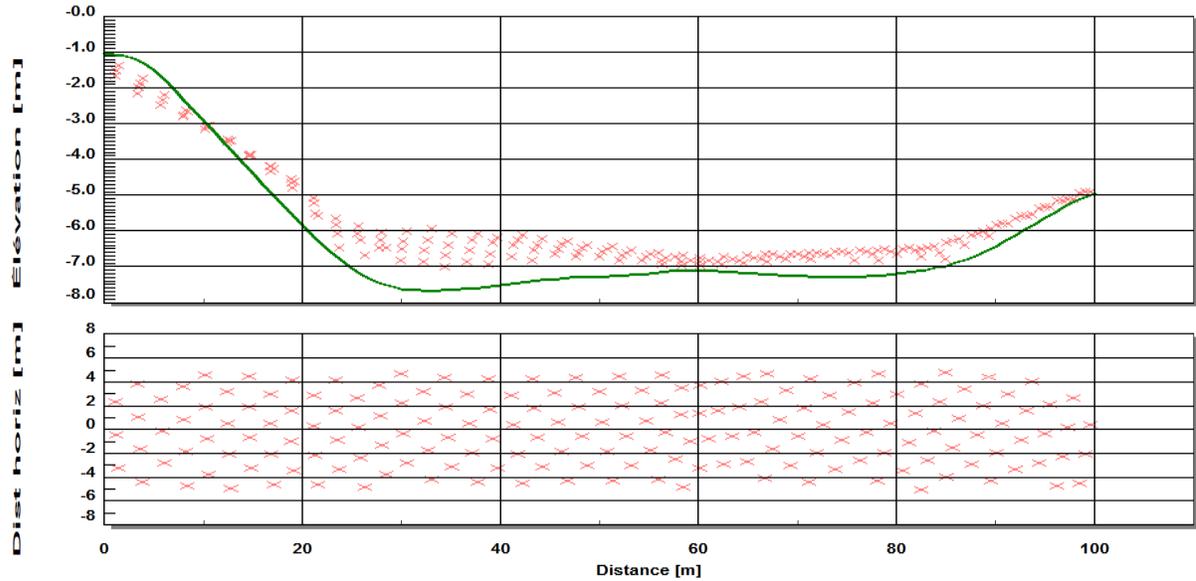
Chaque section transversale a été traitée et fait l'objet d'une des sous-sections qui suivent. Le constat général est qu'il existe des différences entre les relevés. Comme la donnée d'intérêt est la cote du fond, on retient les points cotés mesurés par le SHC qui est l'autorité pour établir les cotes du chenal de navigation.

On doit prendre en considération que les relevés réalisés par GPR étaient destinés à identifier des poches de sédiments fins et quelle s'avère utiles pour ces fins précises. Le présent exercice démontre par contre que ces relevés ne sont pas utiles pour reproduire la bathymétrie requise pour la modélisation hydrodynamique. Ce sont plutôt les points cotés publiés par le SHC qui doivent retenir pour représenter le fond actuel aux fins des simulations hydrodynamiques.

3.1 Section GPR 094

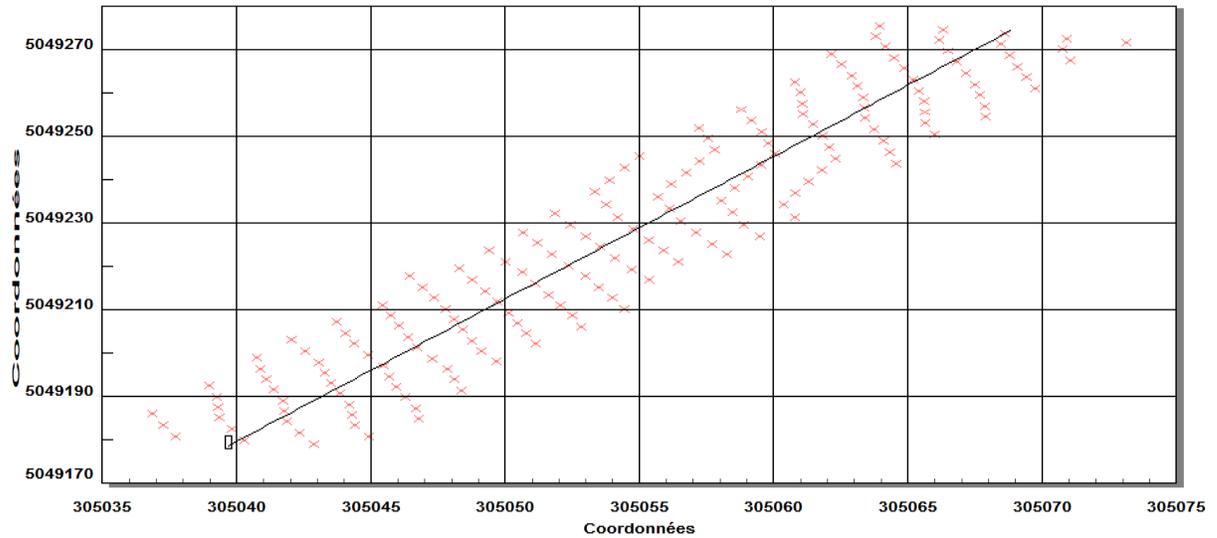


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_094

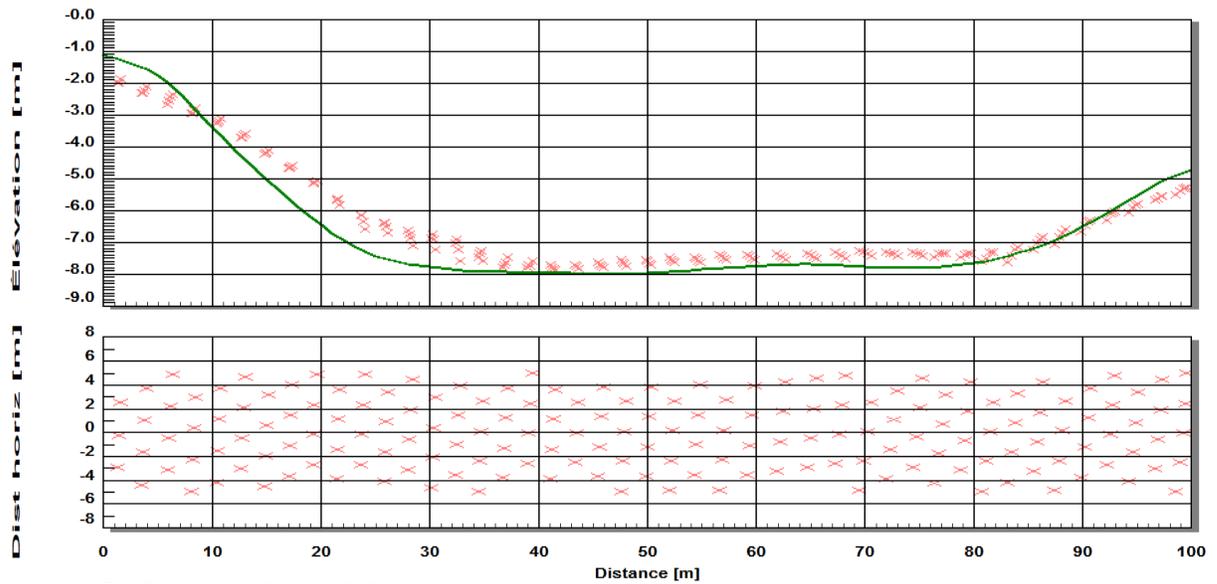


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_094

3.2 Section GPR 116

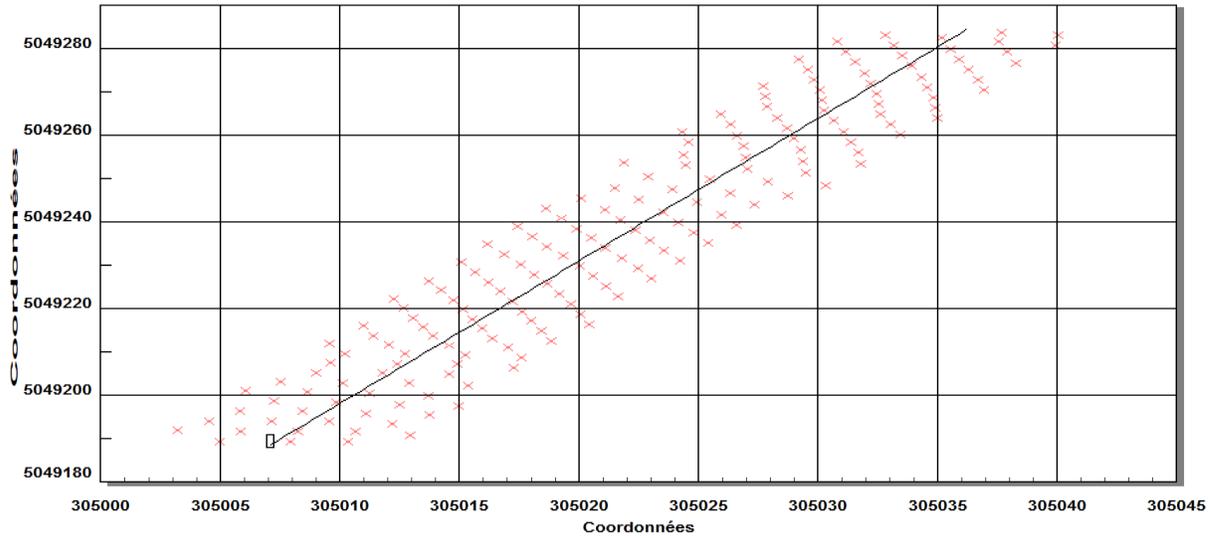


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_116

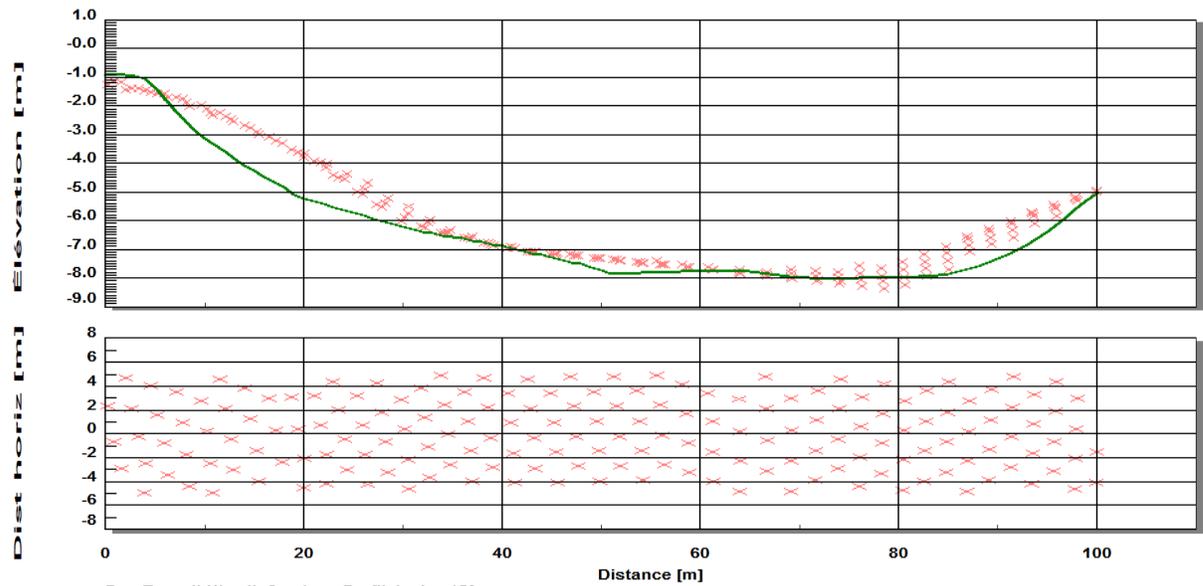


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_116

3.3 Section GPR 150

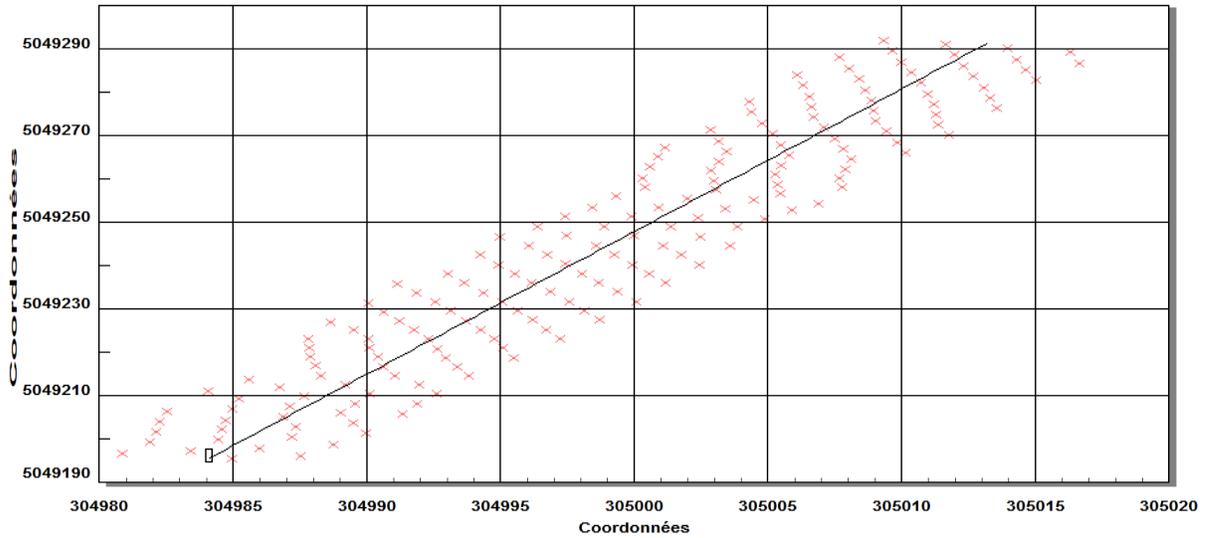


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_150

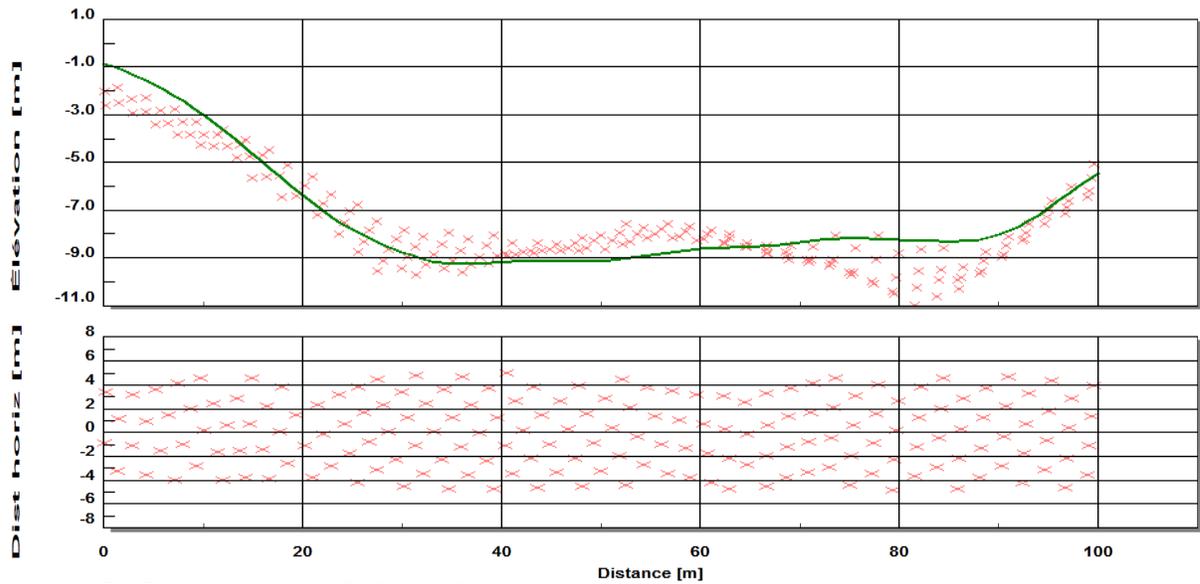


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_150

3.4 Section GPR 174

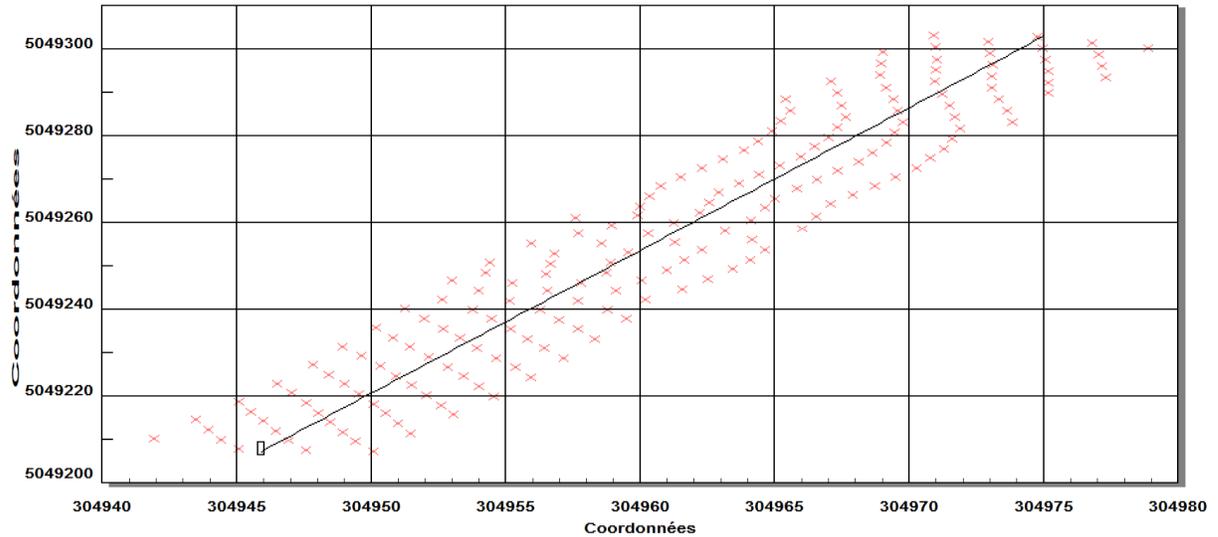


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_174

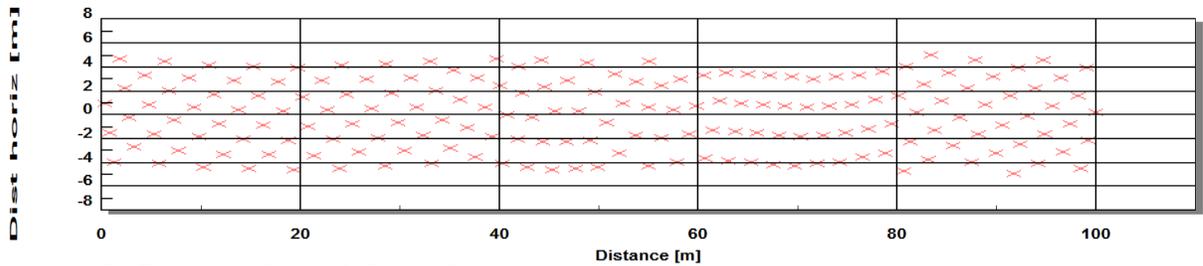
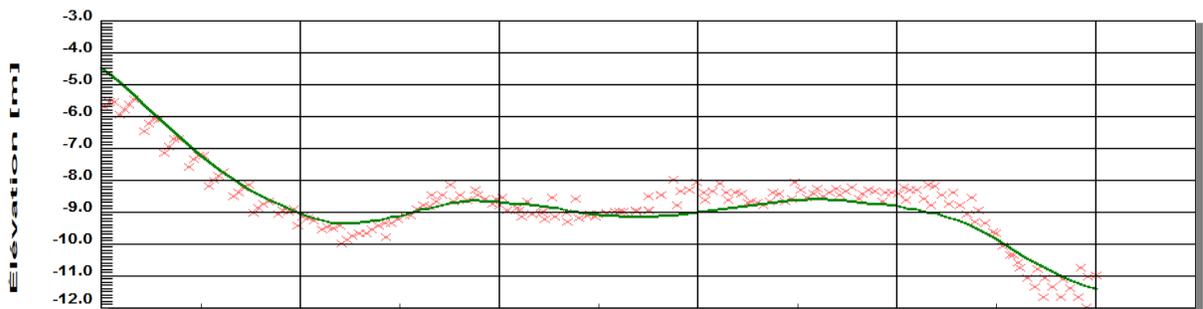


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_174

3.5 Section GPR 214

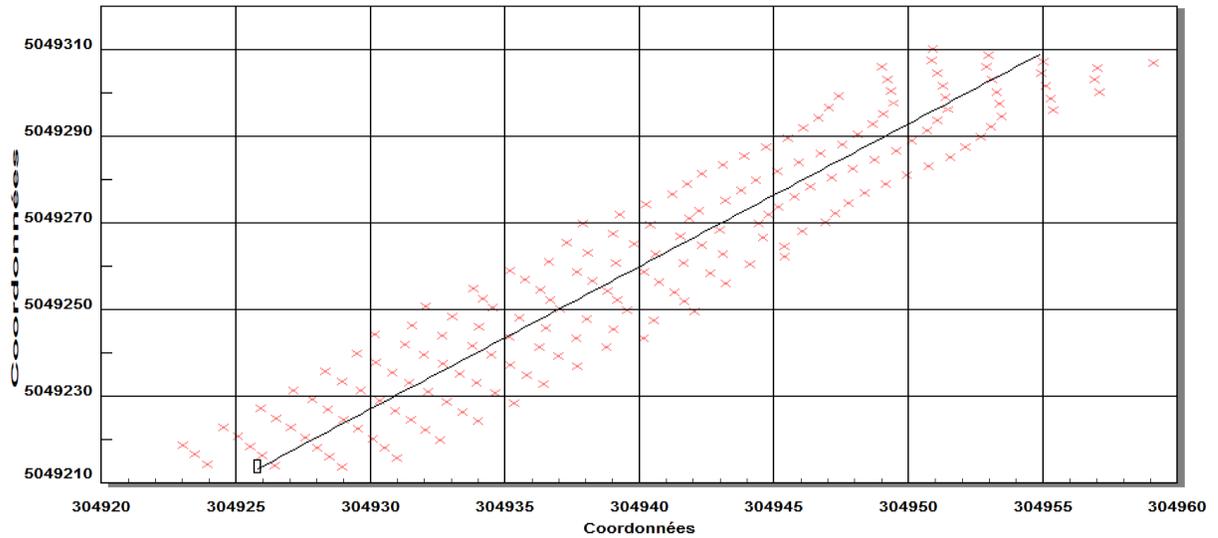


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_214

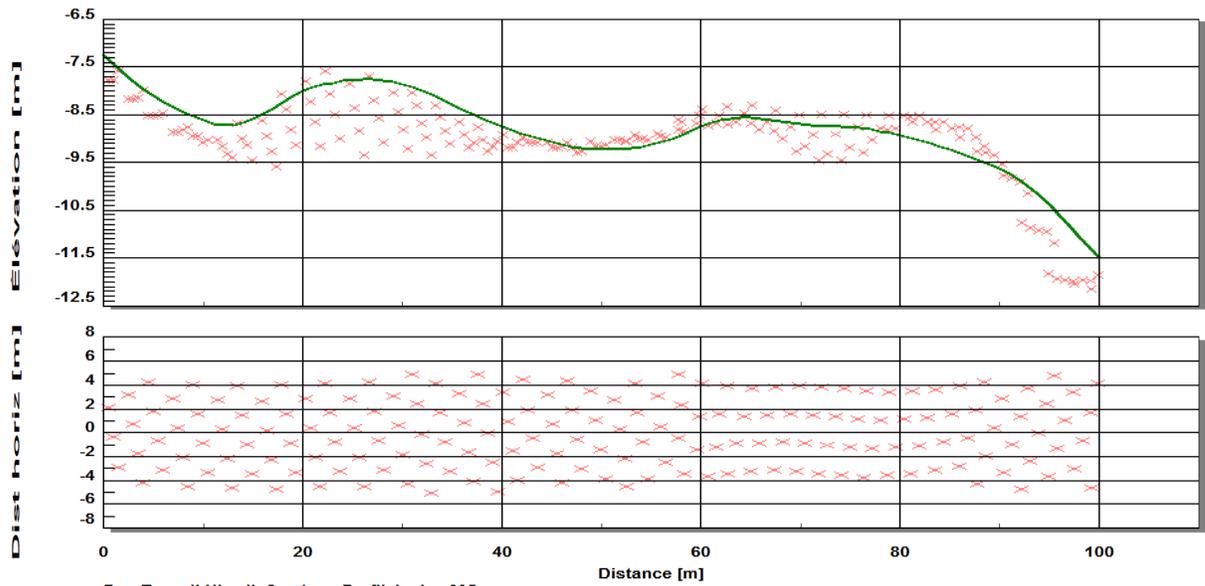


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_214

3.6 Section GPR 235

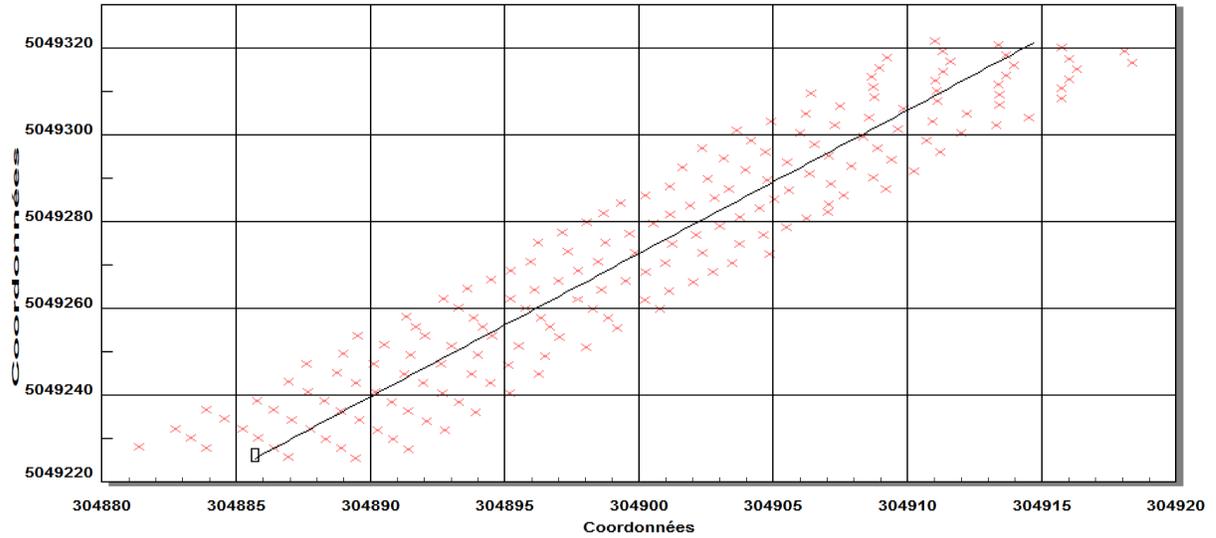


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_235

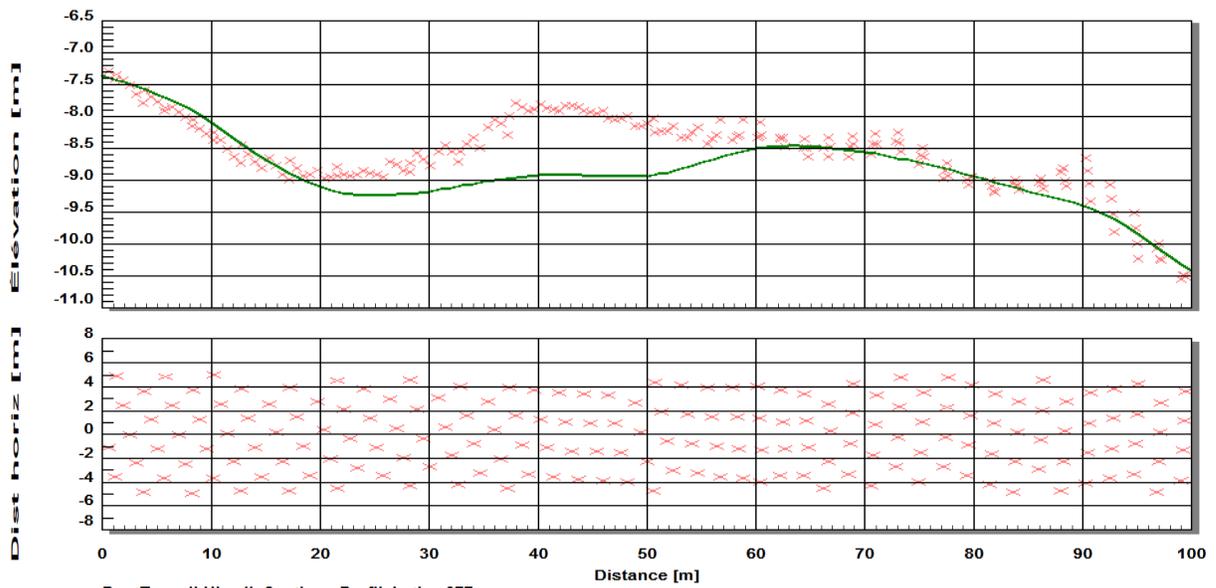


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_235

3.7 Section GPR 277

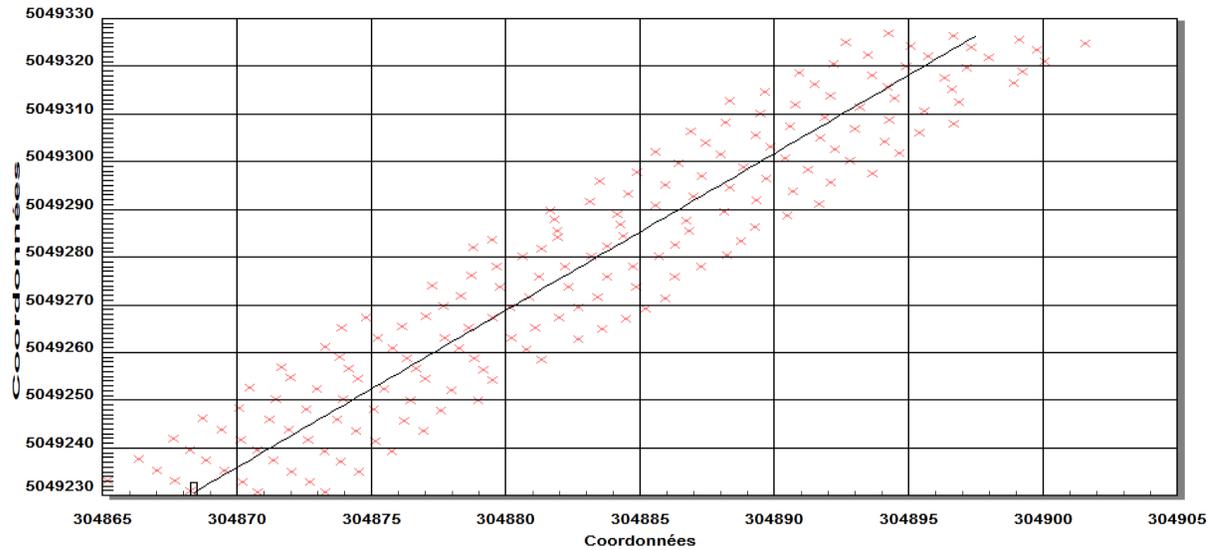


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_277

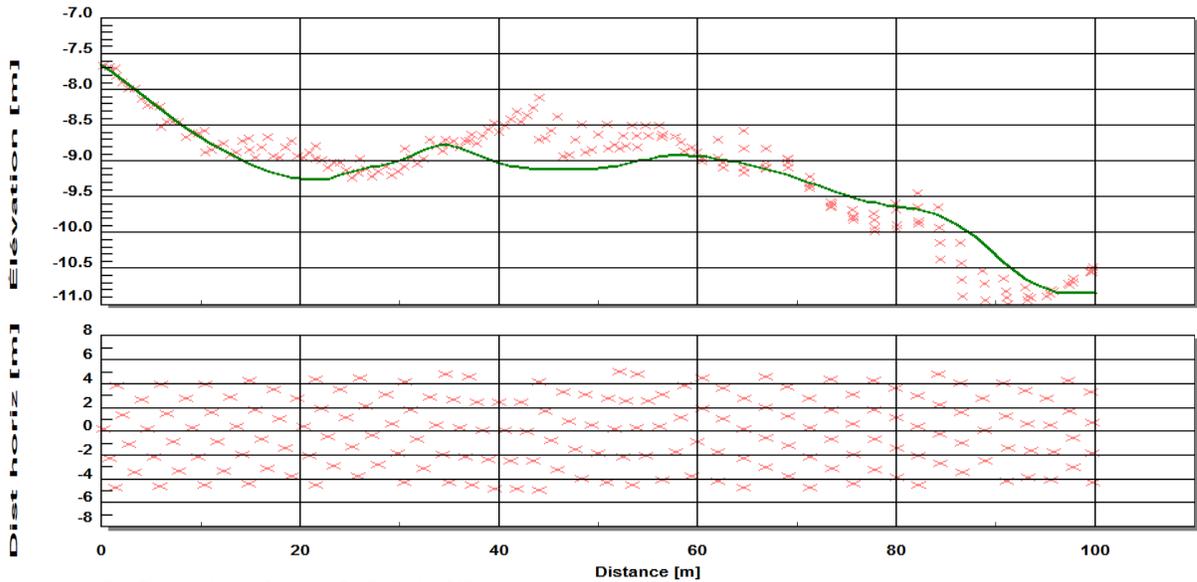


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_277

3.8 Section GPR 295

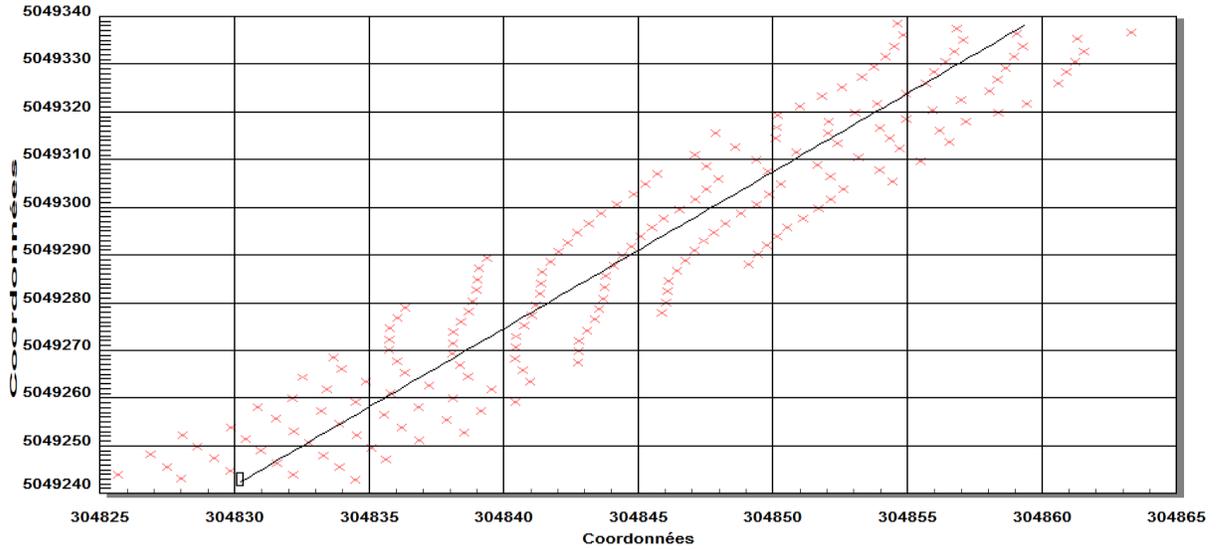


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_295

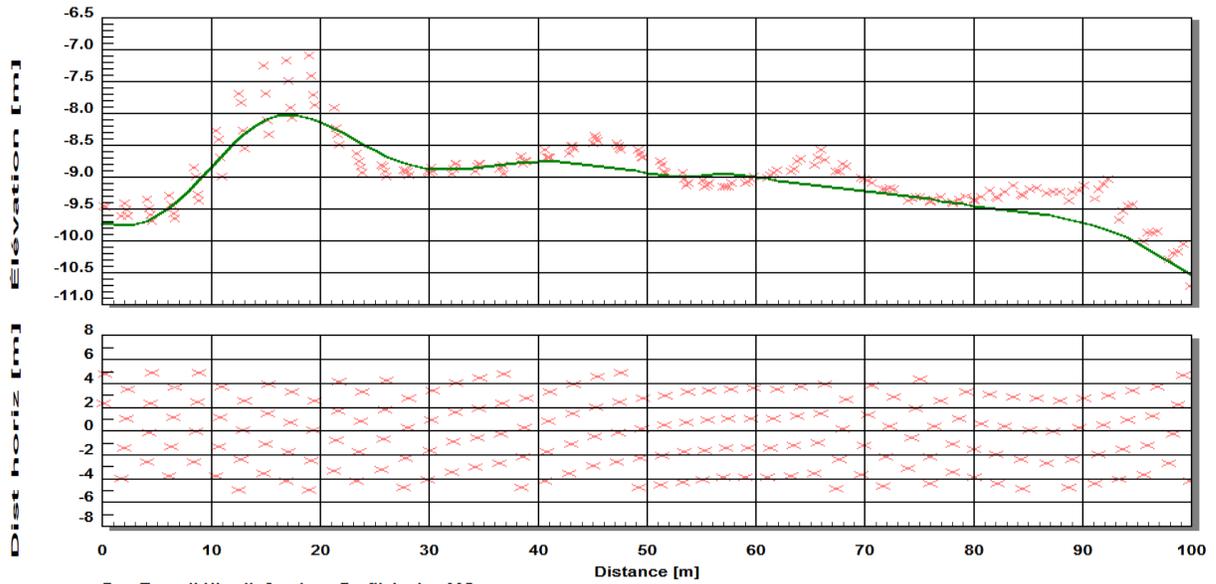


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_295

3.9 Section GPR 335

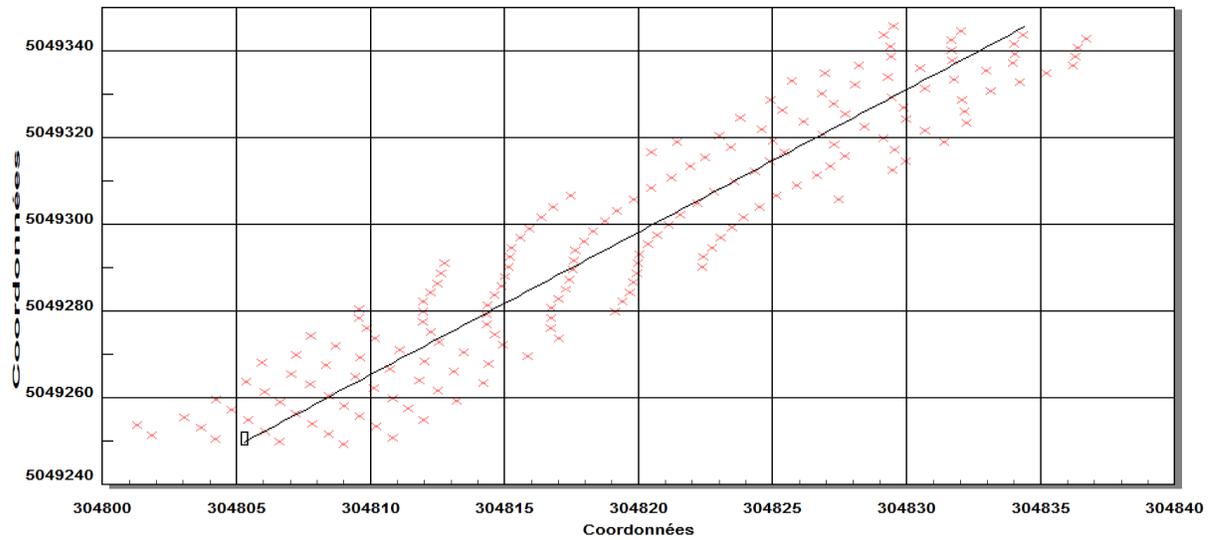


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_335

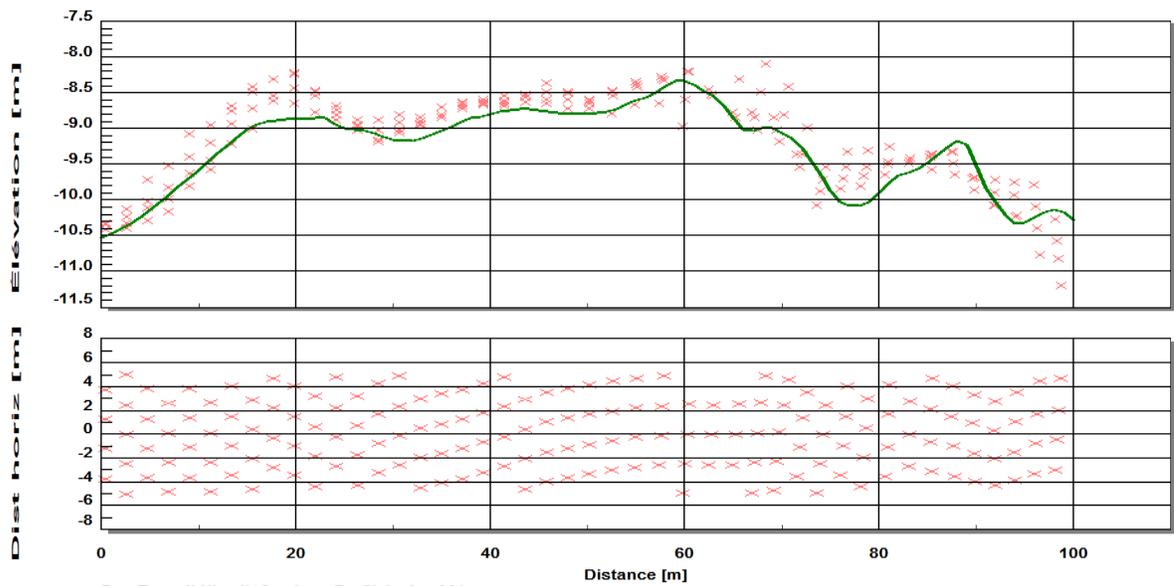


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_335

3.10 Section GPR 361

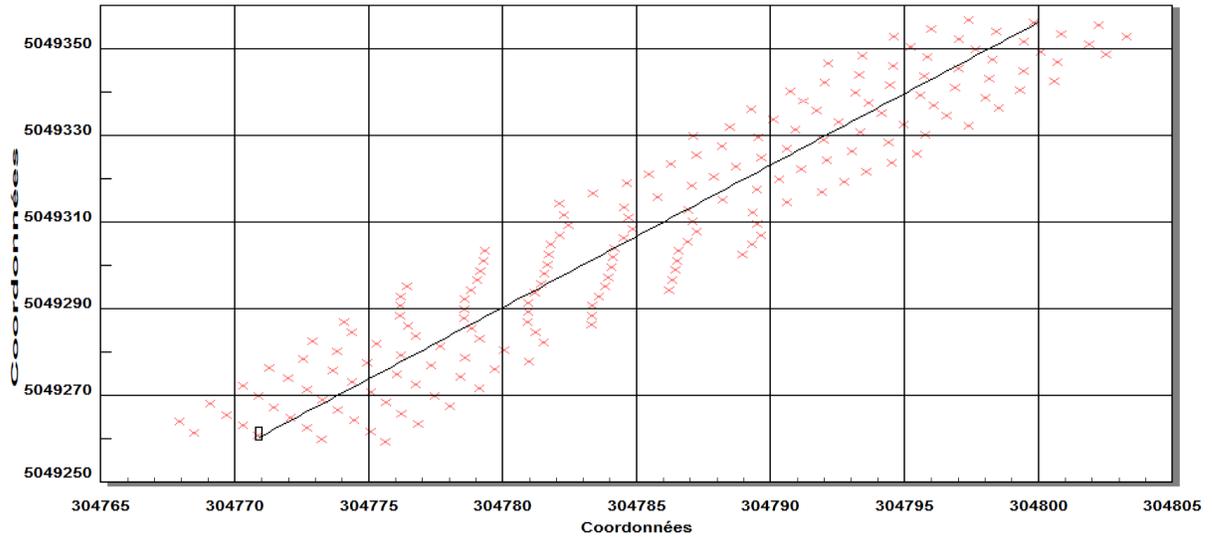


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_361

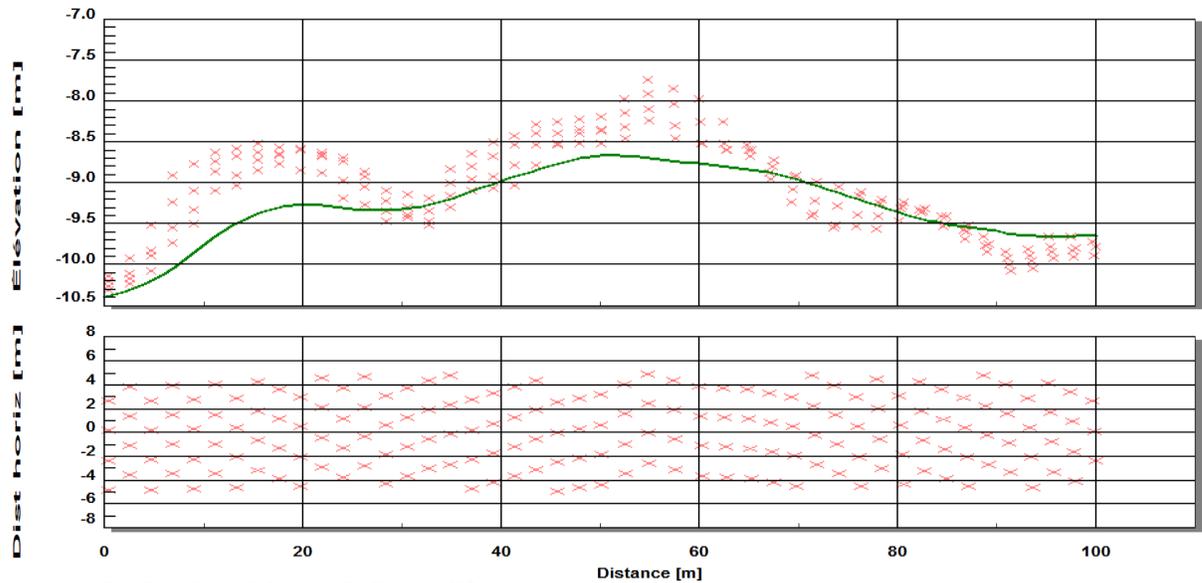


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_361

3.11 Section GPR 397

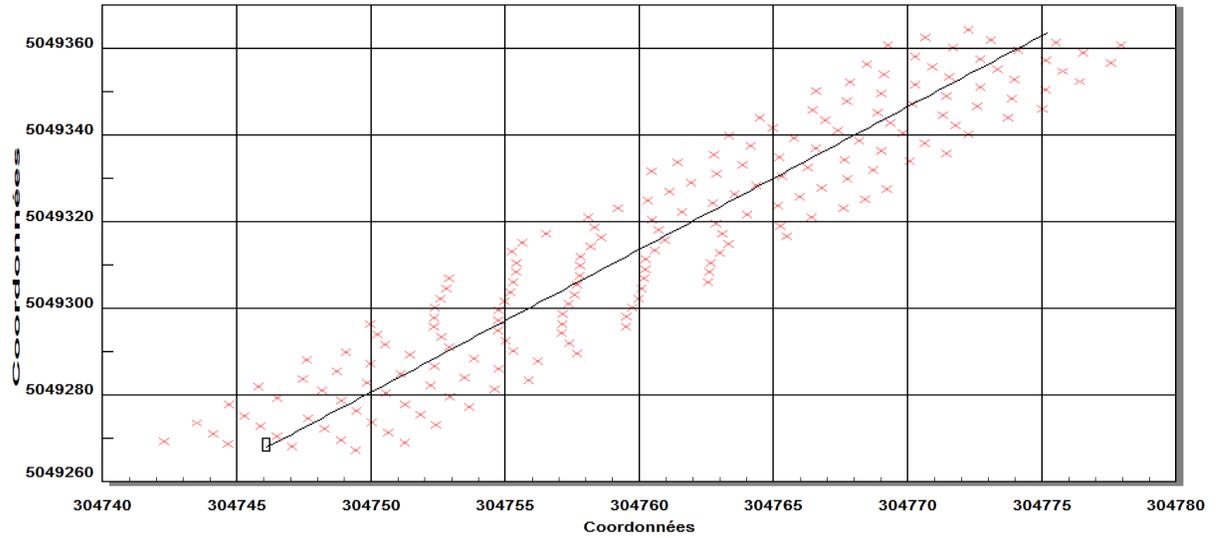


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_397

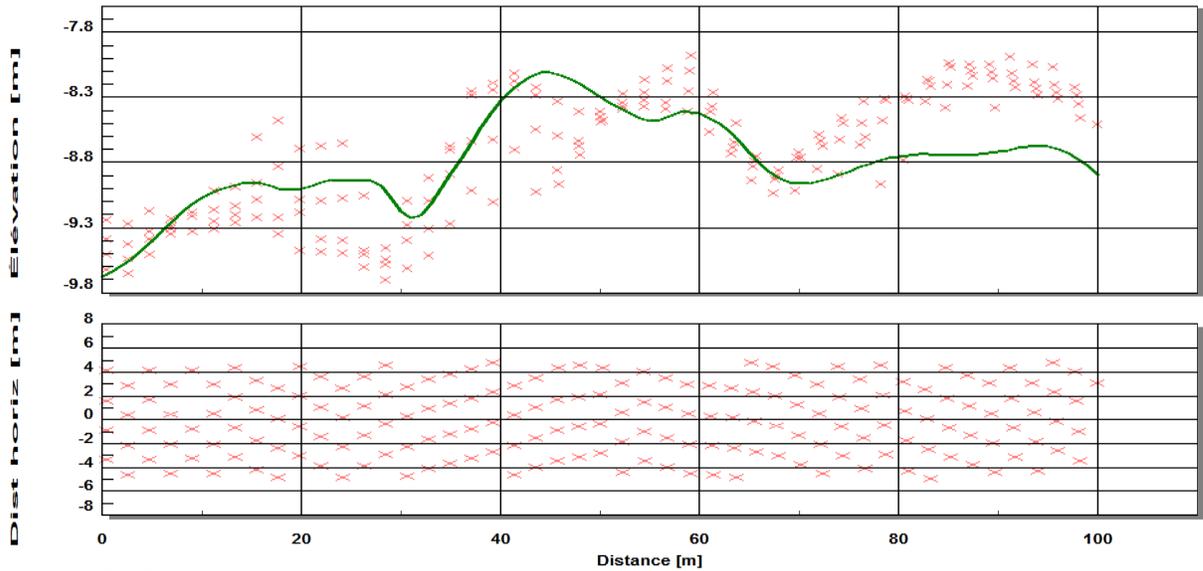


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_397

3.12 Section GPR 423

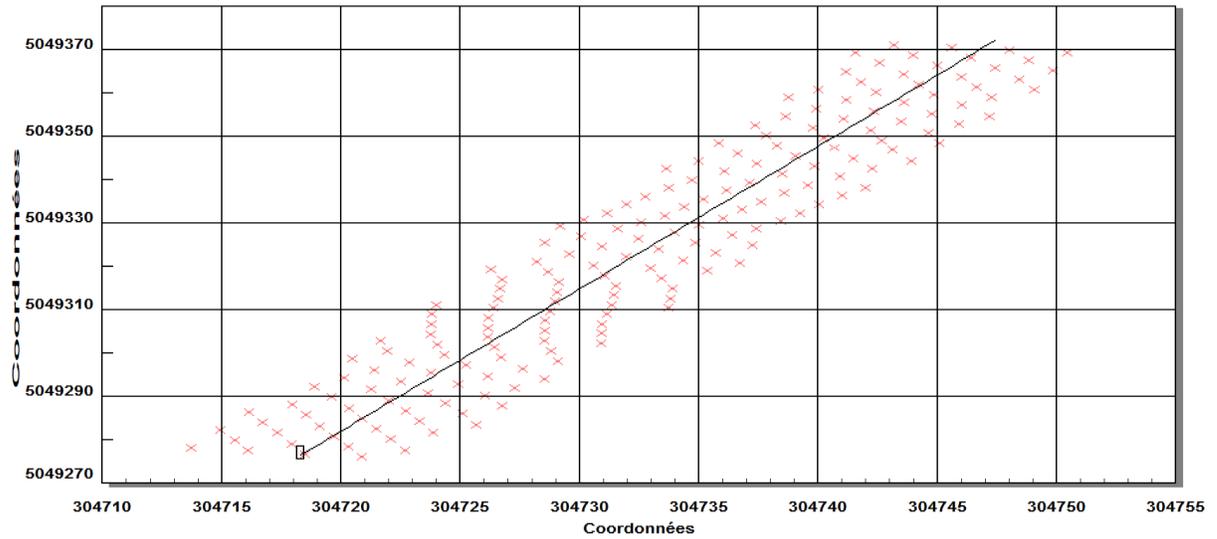


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_423

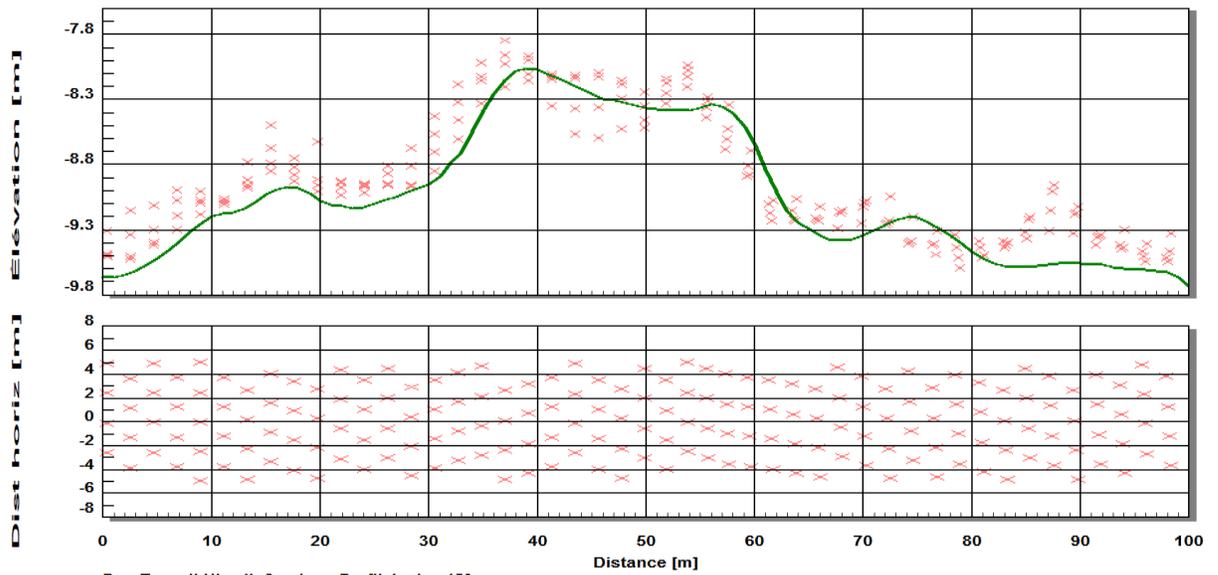


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_423

3.13 Section GPR 452

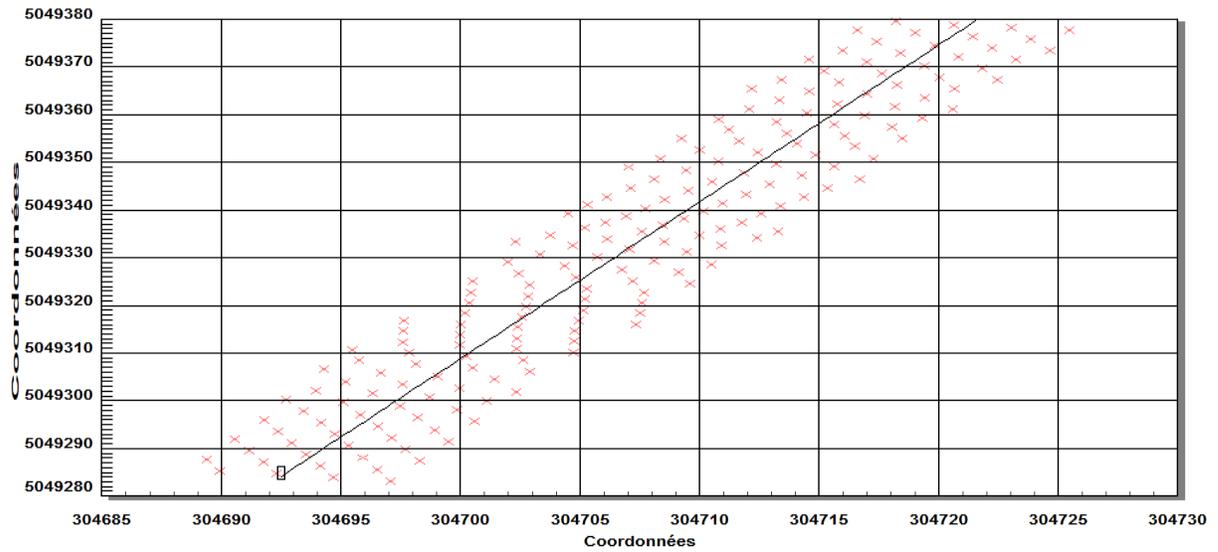


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_452

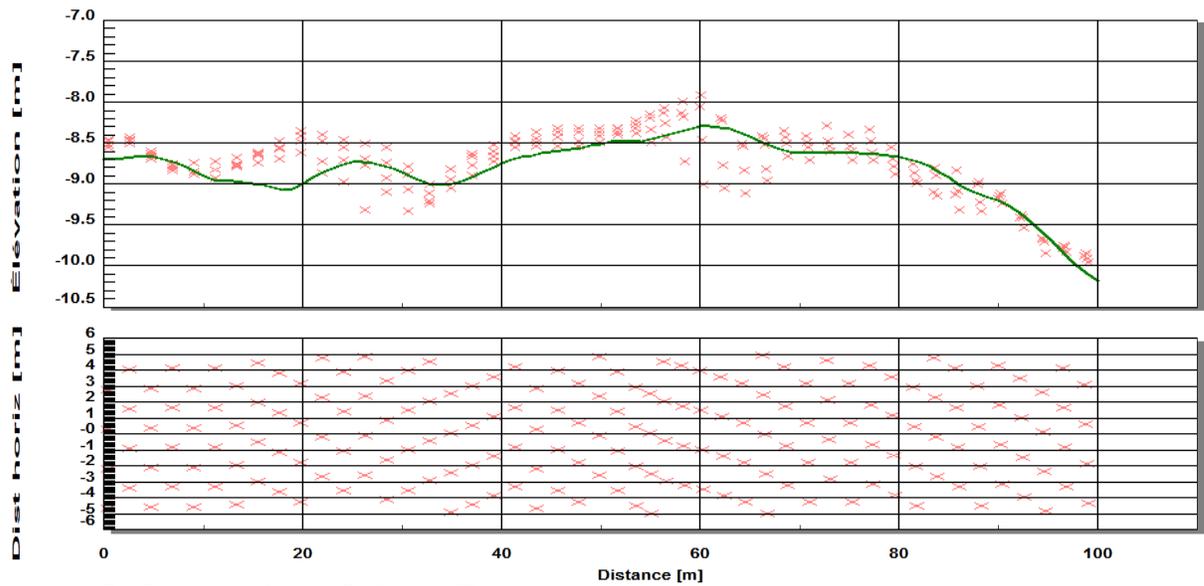


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_452

3.14 Section GPR 479

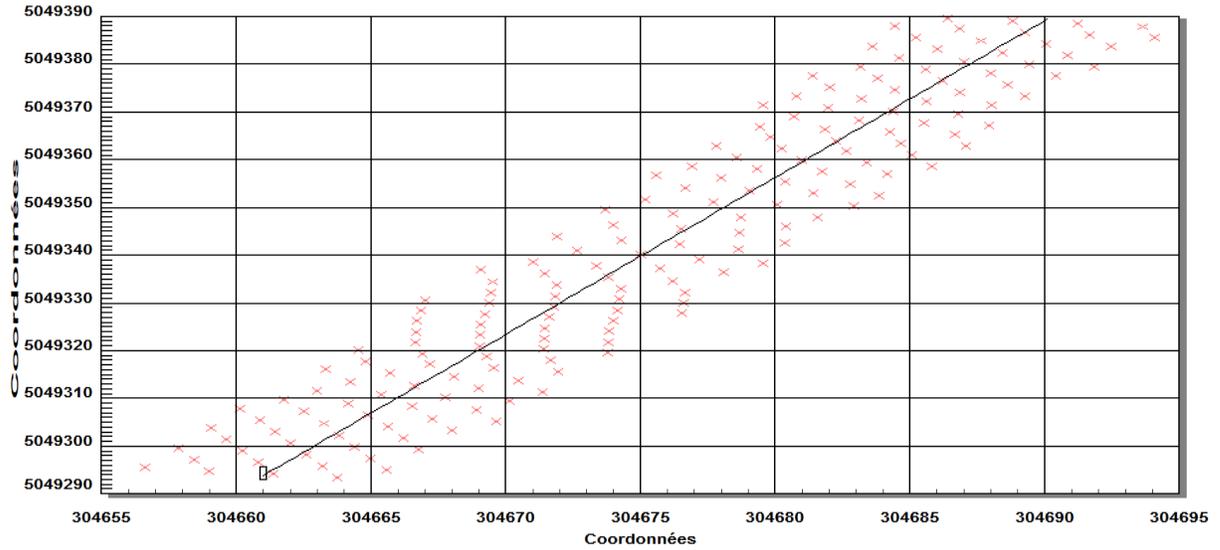


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_479

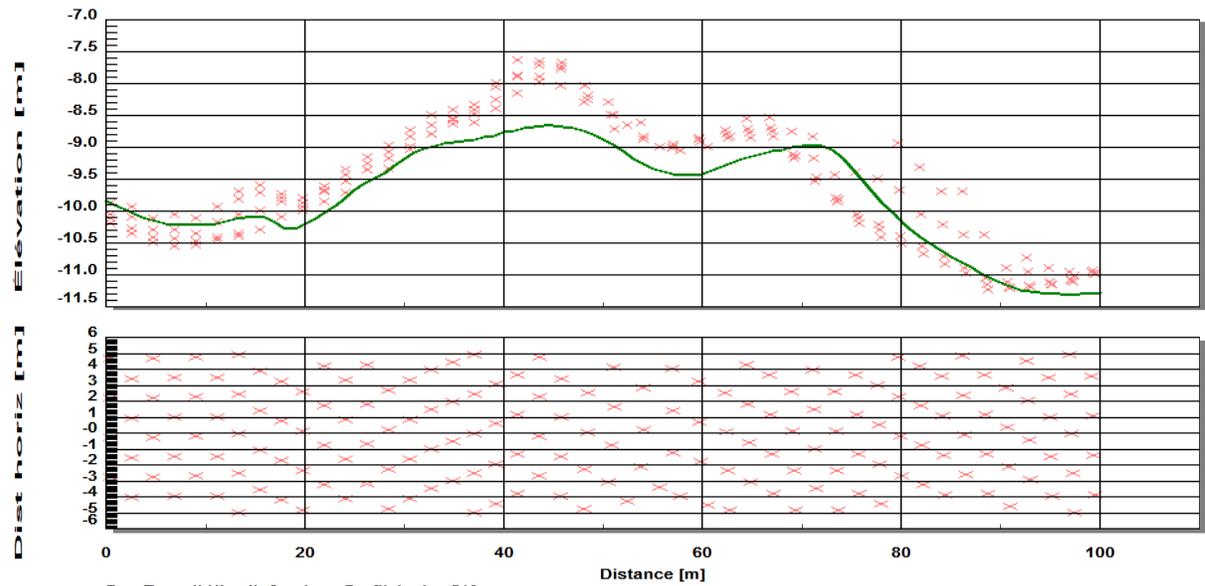


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_479

3.15 Section GPR 512

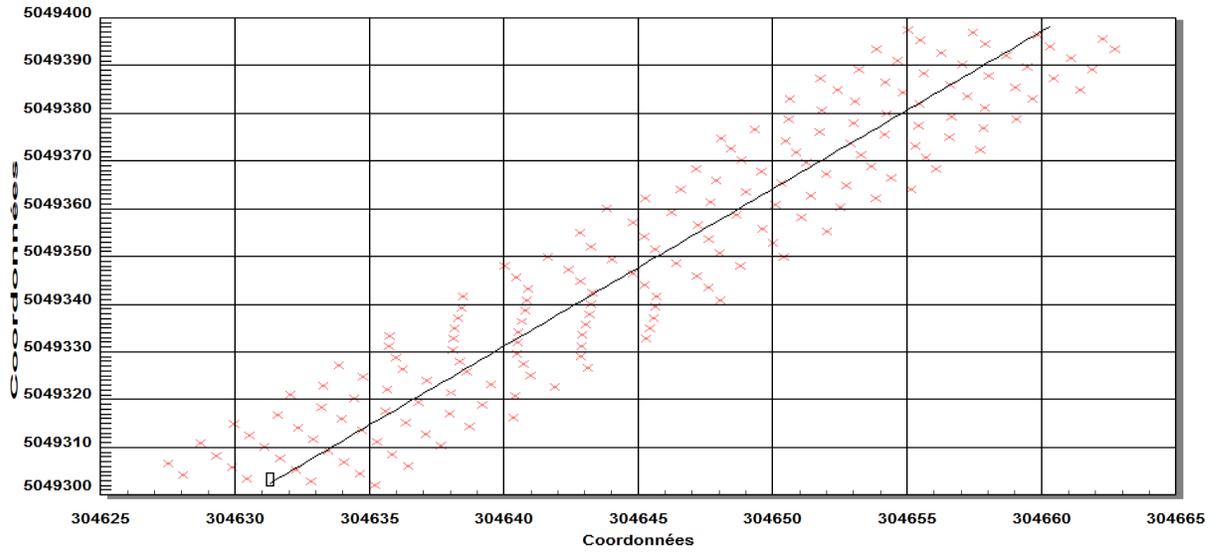


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_512

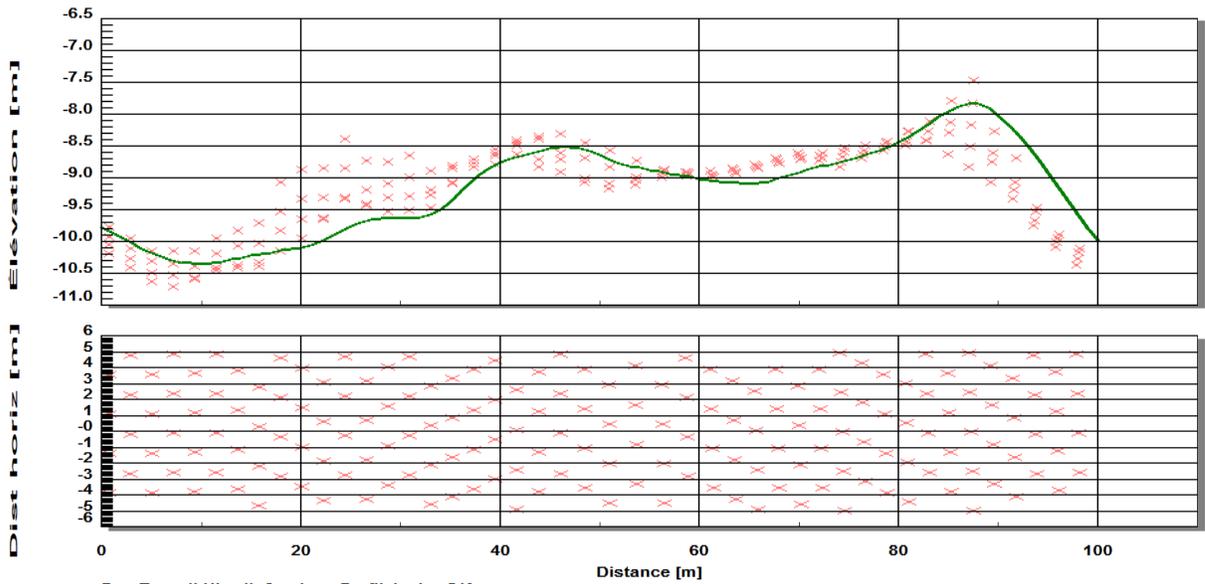


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_512

3.16 Section GPR 543

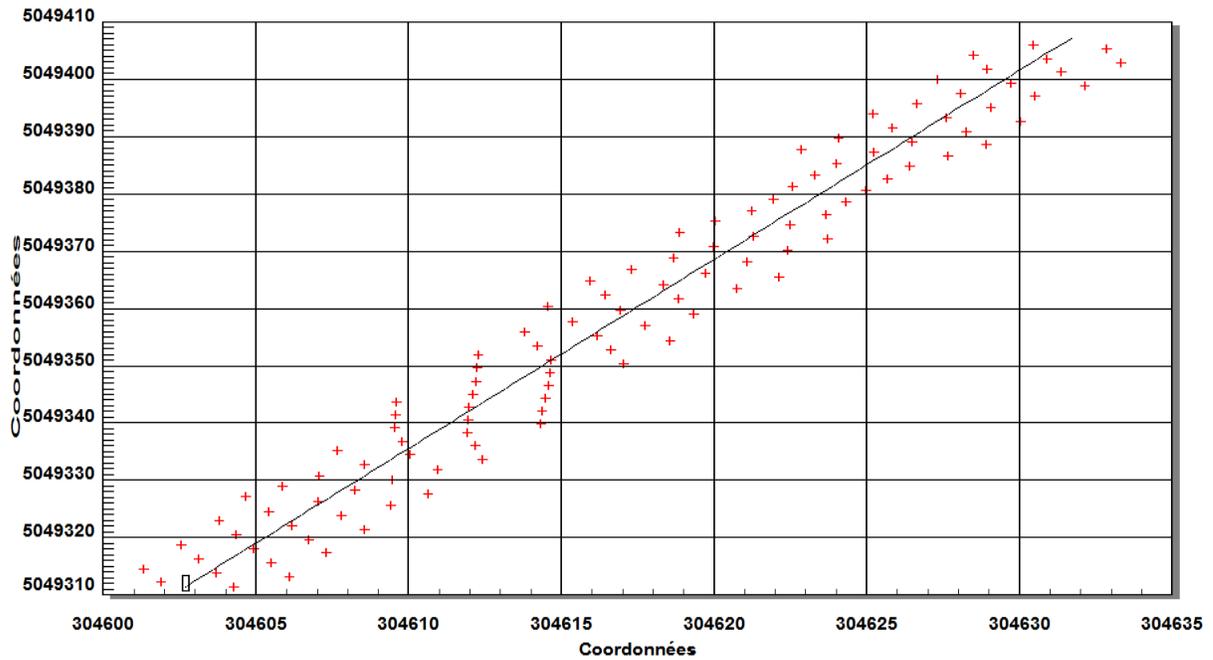


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_543

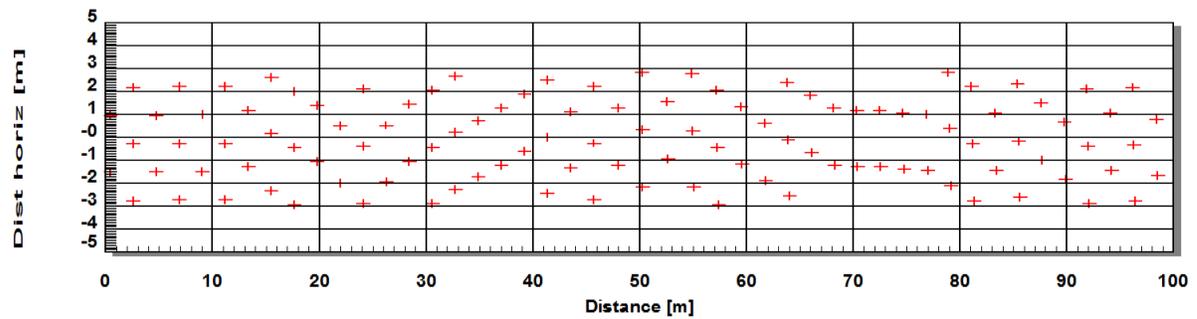
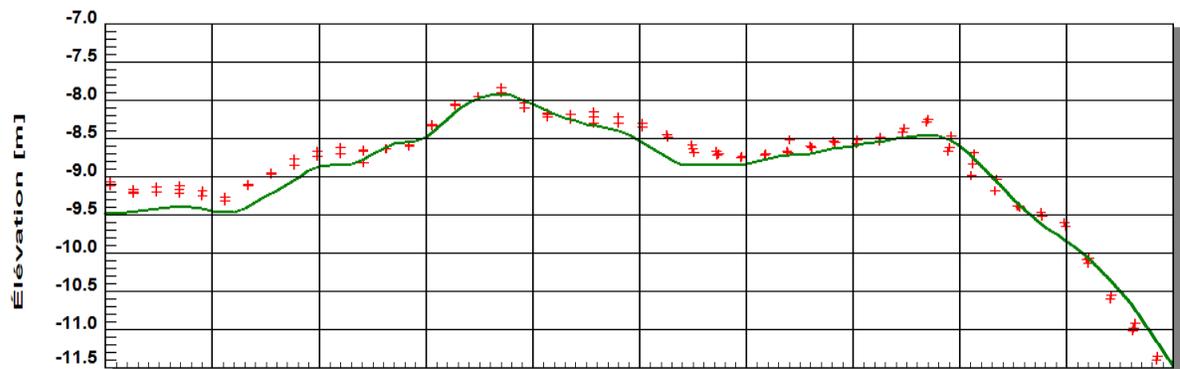


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_543

3.17 Section GPR 573

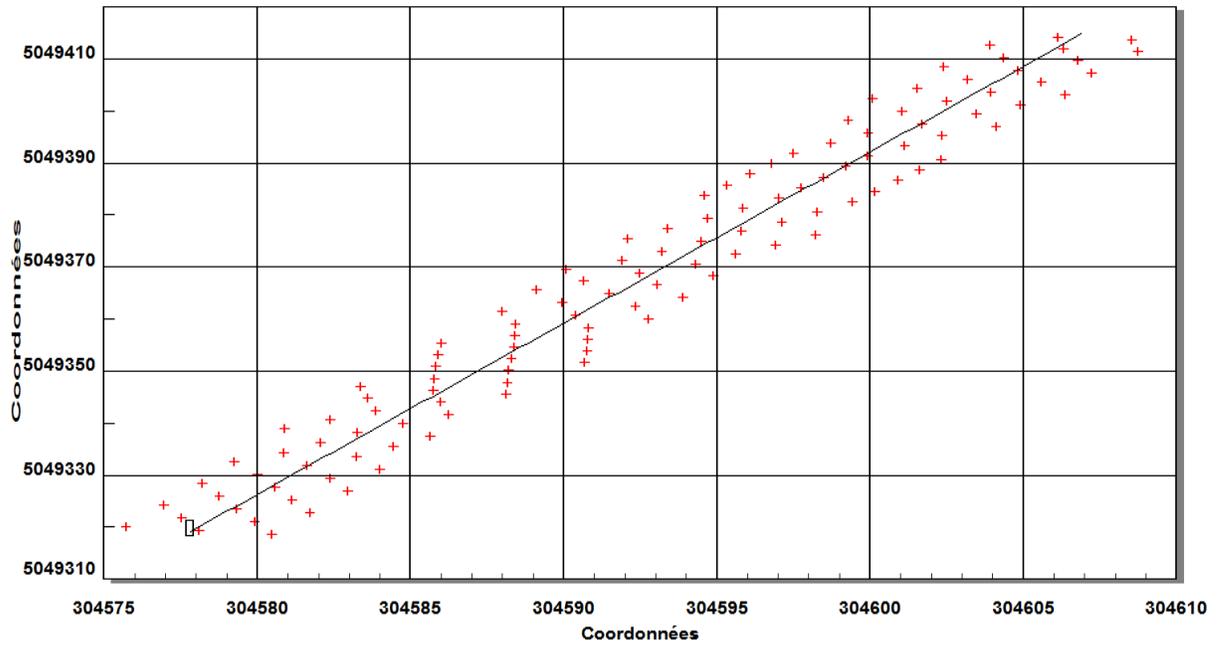


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_573

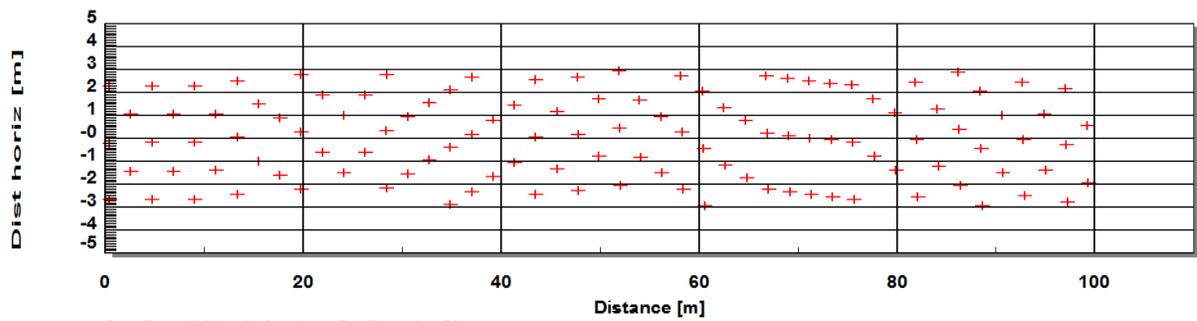
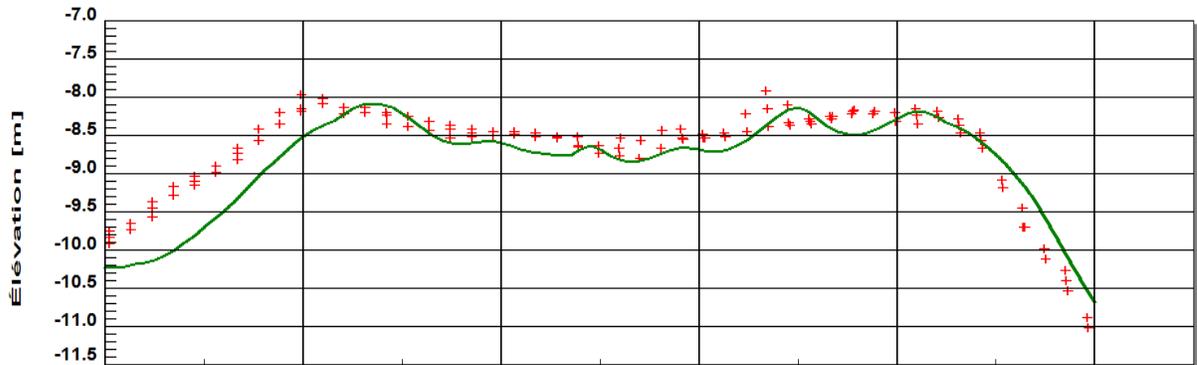


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_573

3.18 Section GPR 599

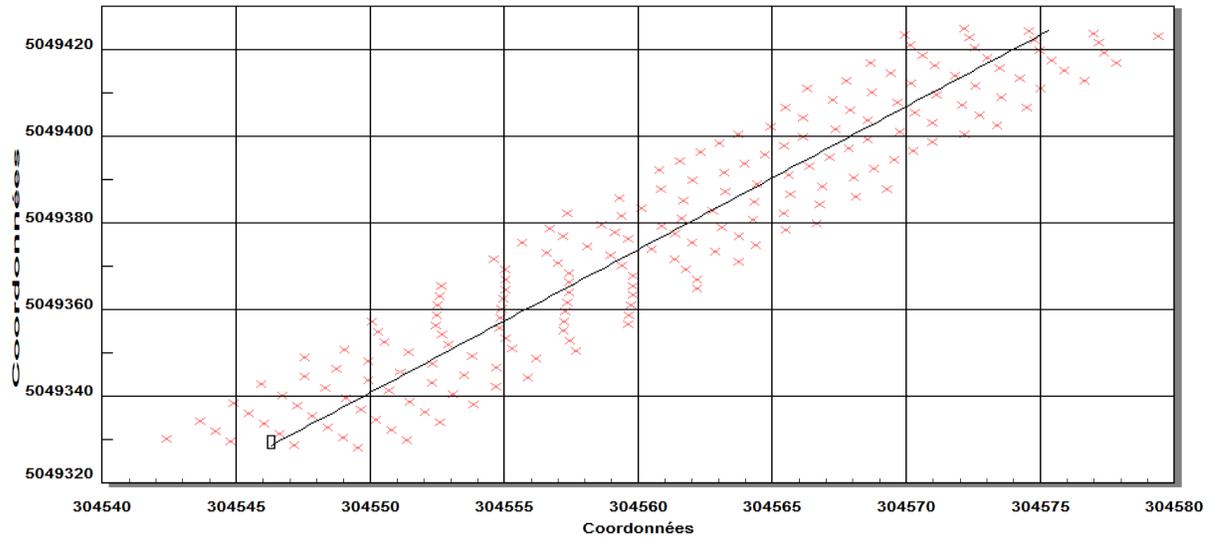


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_599

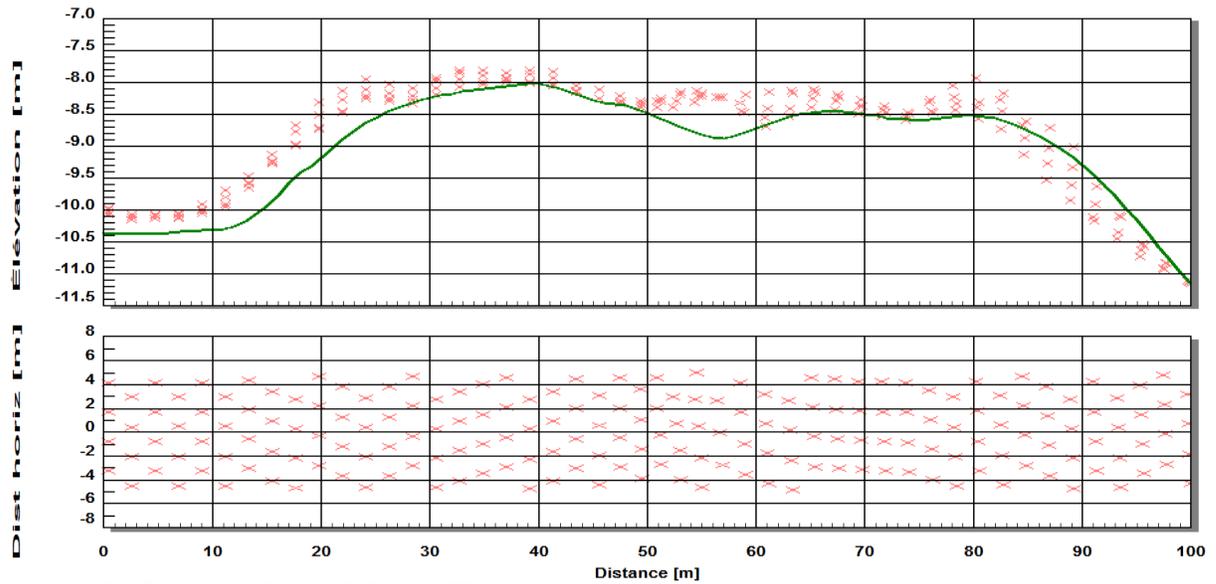


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_599

3.19 Section GPR 632

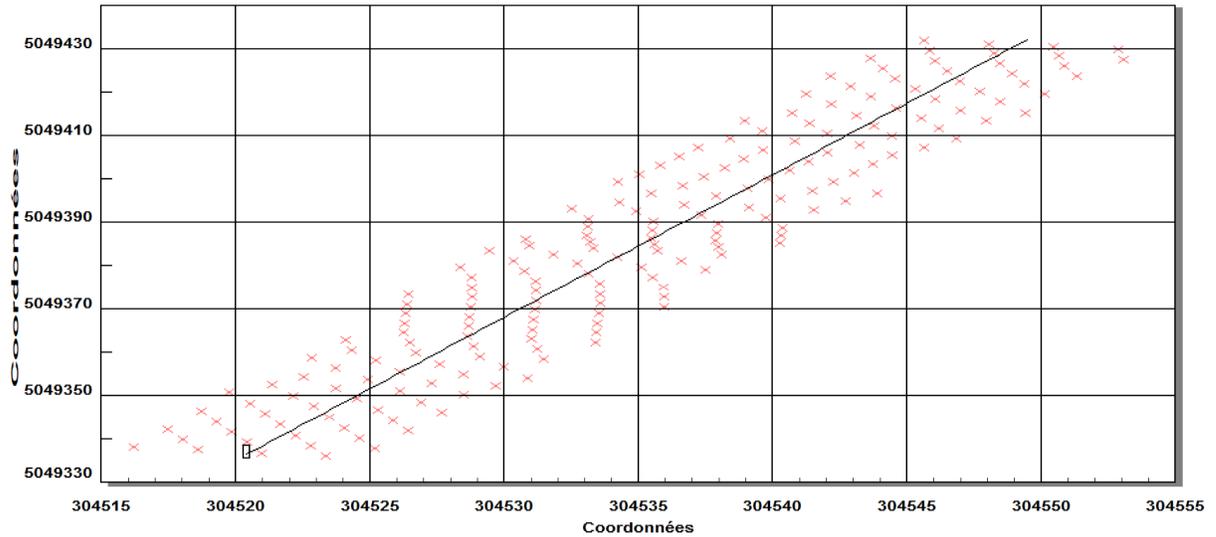


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_632

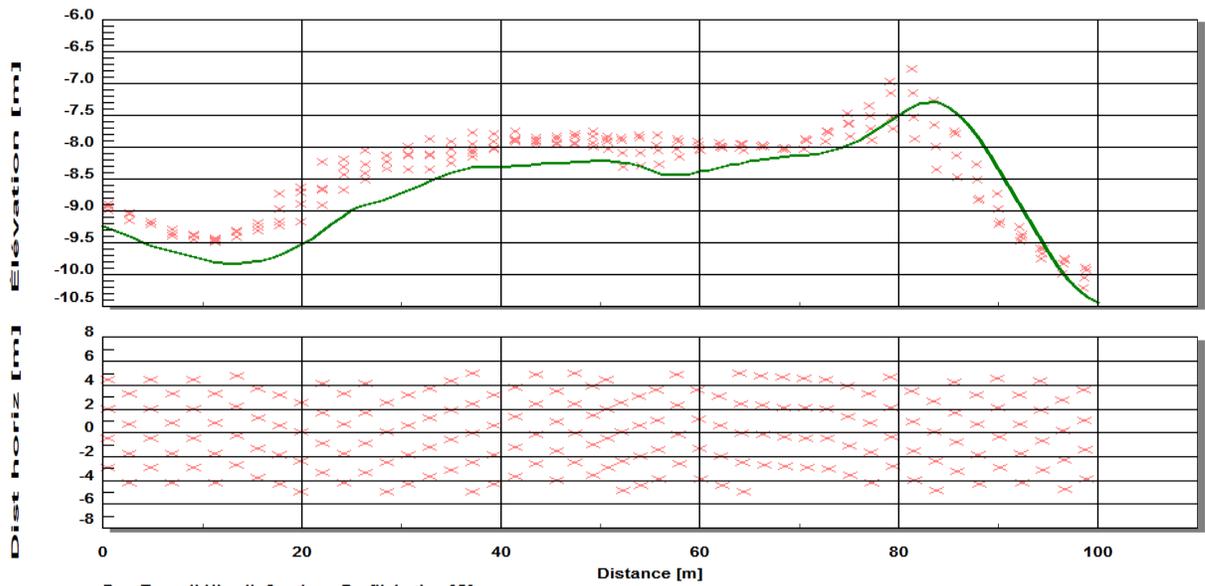


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_632

3.20 Section GPR 659

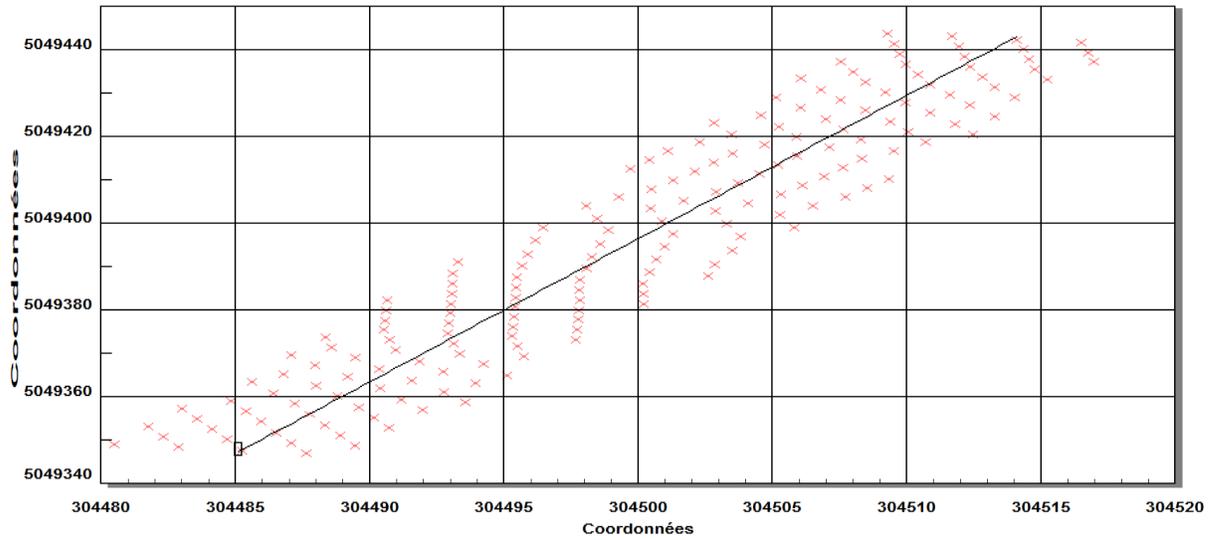


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_659

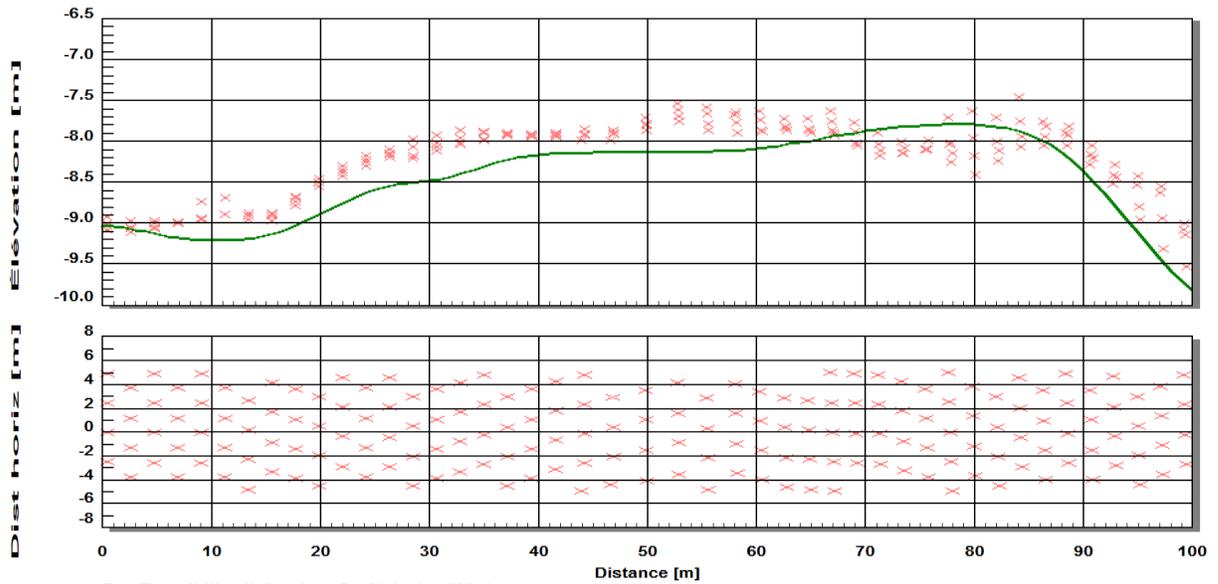


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_659

3.21 Section GPR 696-1

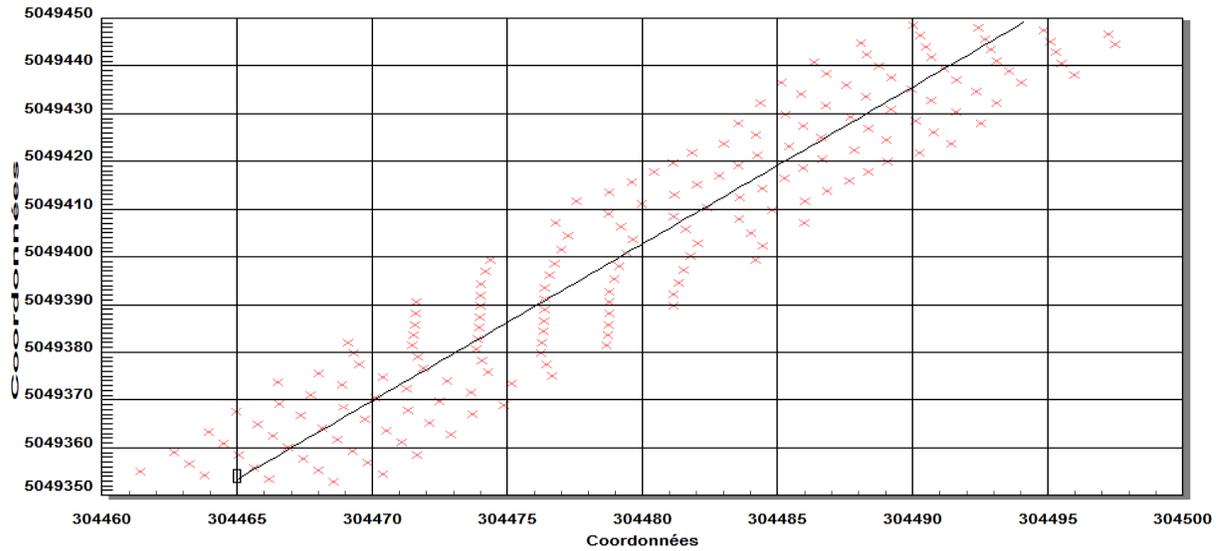


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_696_1

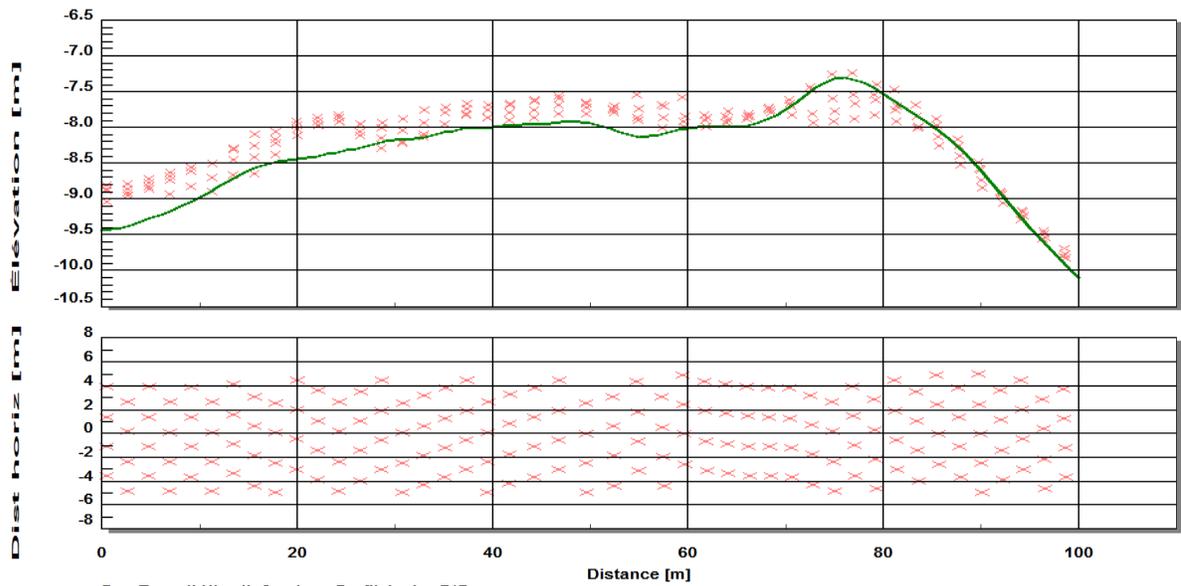


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_696_1

3.22 Section GPR 717

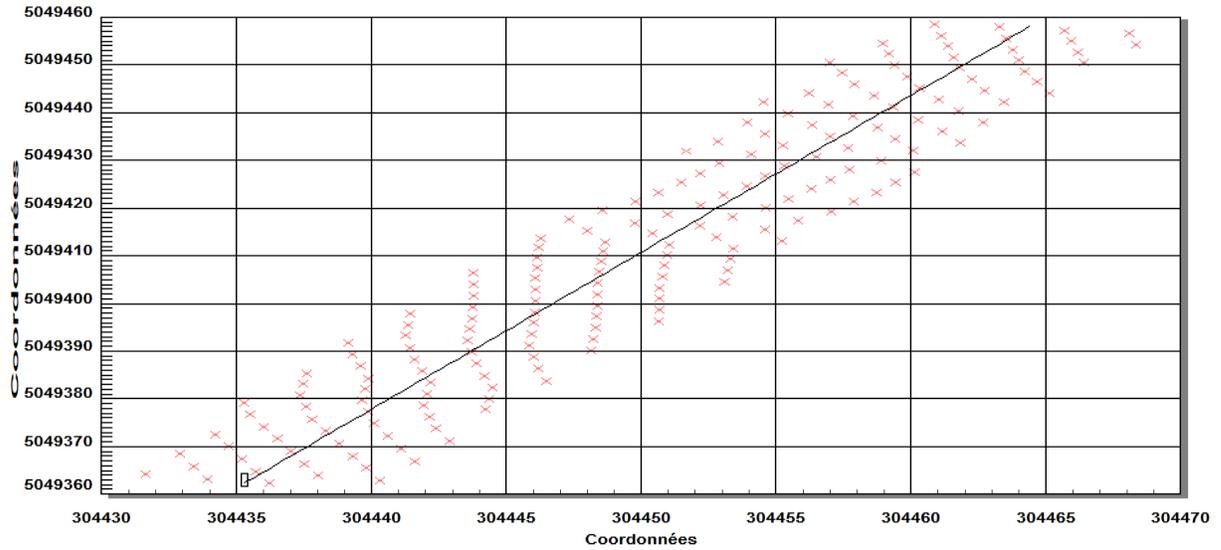


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_717

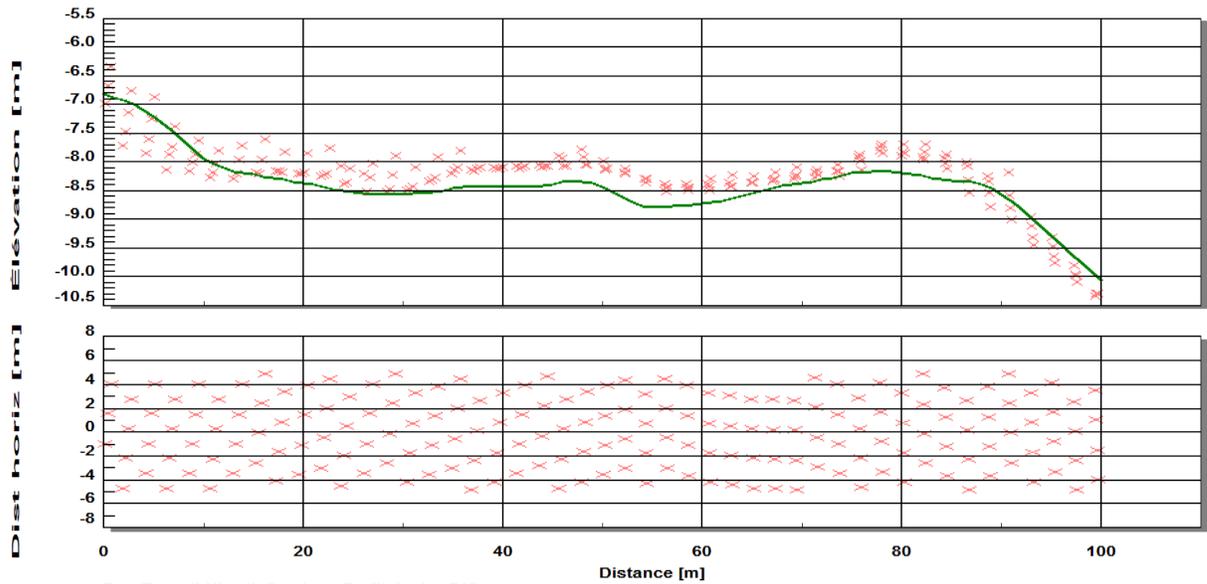


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_717

3.23 Section GPR 748

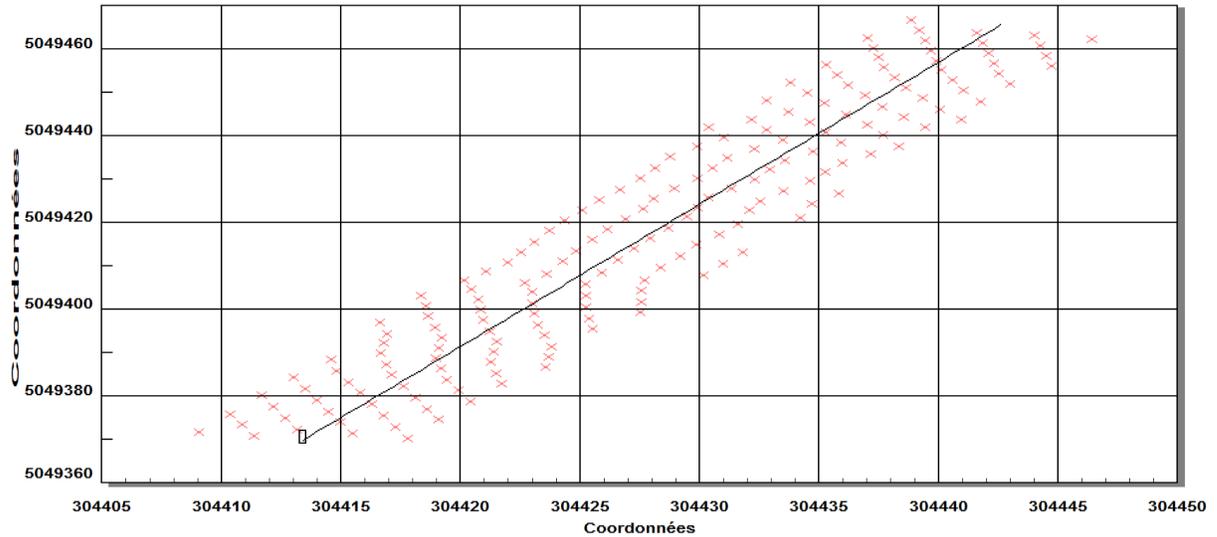


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_748

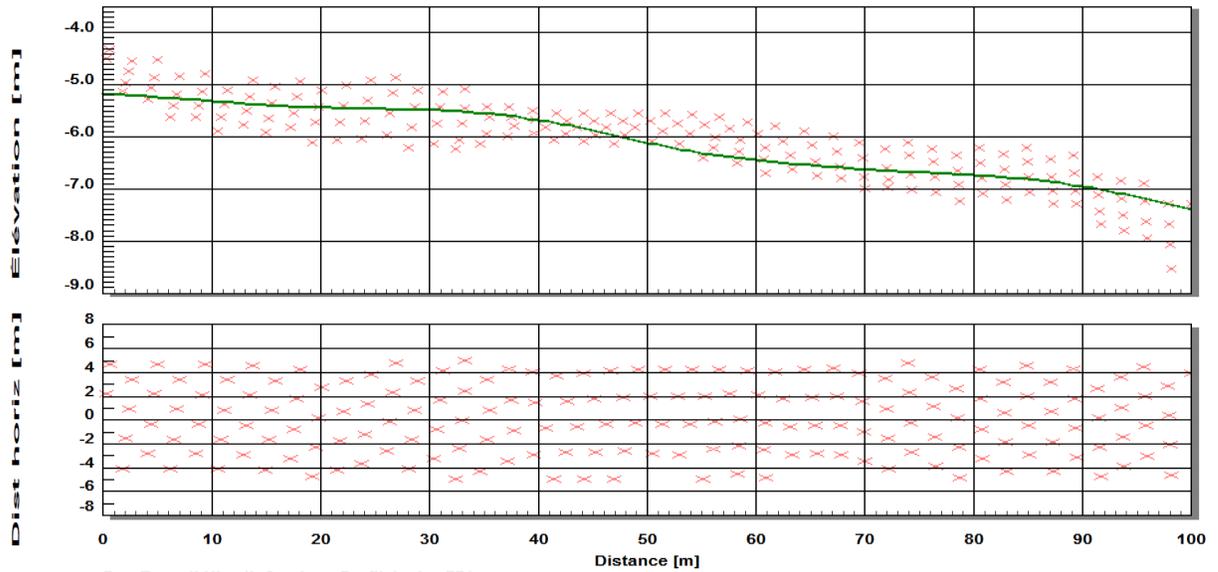


PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_748

3.24 Section GPR 771



PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_771



PontTunnelLHL_all Section : Profil_bathy_771

4 Profils longitudinaux

Six profils longitudinaux ont été tracés le long du tunnel. Le profil 1 est localisé le plus au sud. On progresse vers le nord jusqu'au profil 6. La position de chaque profil est indiquée à la figure 4-1. Tout comme pour les profils transversaux, les points cotés situés à moins de 5 m de la ligne sont retenus et projetés perpendiculaire sur le profil.

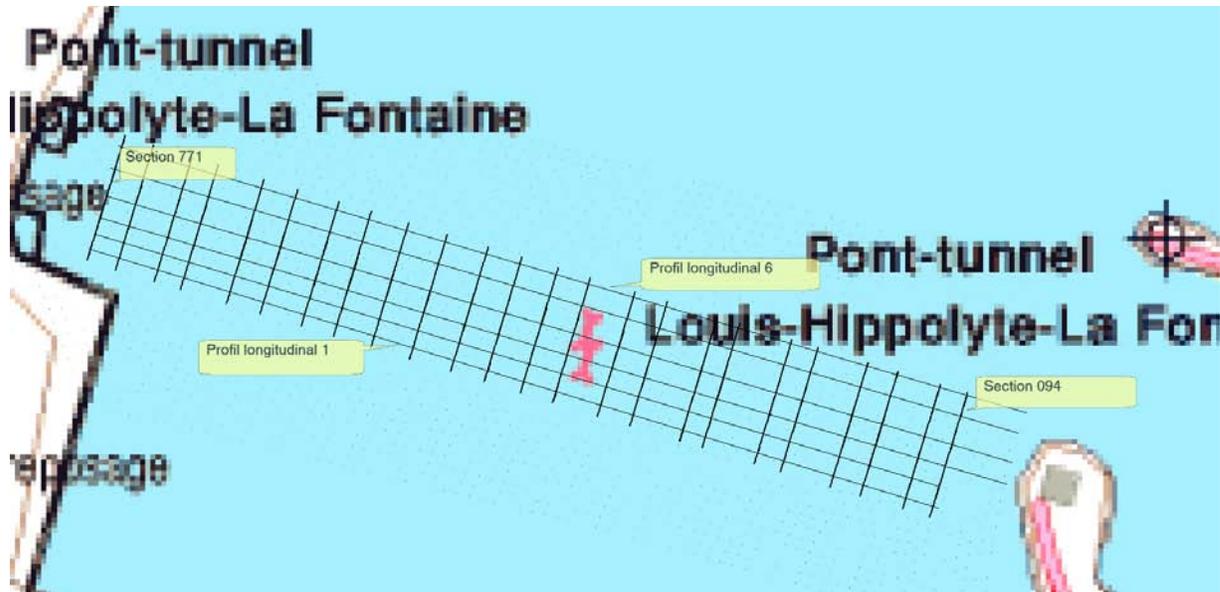


Figure 4-1 Localisation des profils longitudinaux.

L'élévation du fond est présentée pour une bande de plus ou moins 5 m de part et d'autre de l'axe et permet d'apprécier la marge disponible pour ajouter du remblai, sachant qu'on ne peut dépasser la cote -6,5 m dans l'éventualité où le tirant d'eau minimum serait porté à 11,6 m.

4.1 Profil longitudinal 1

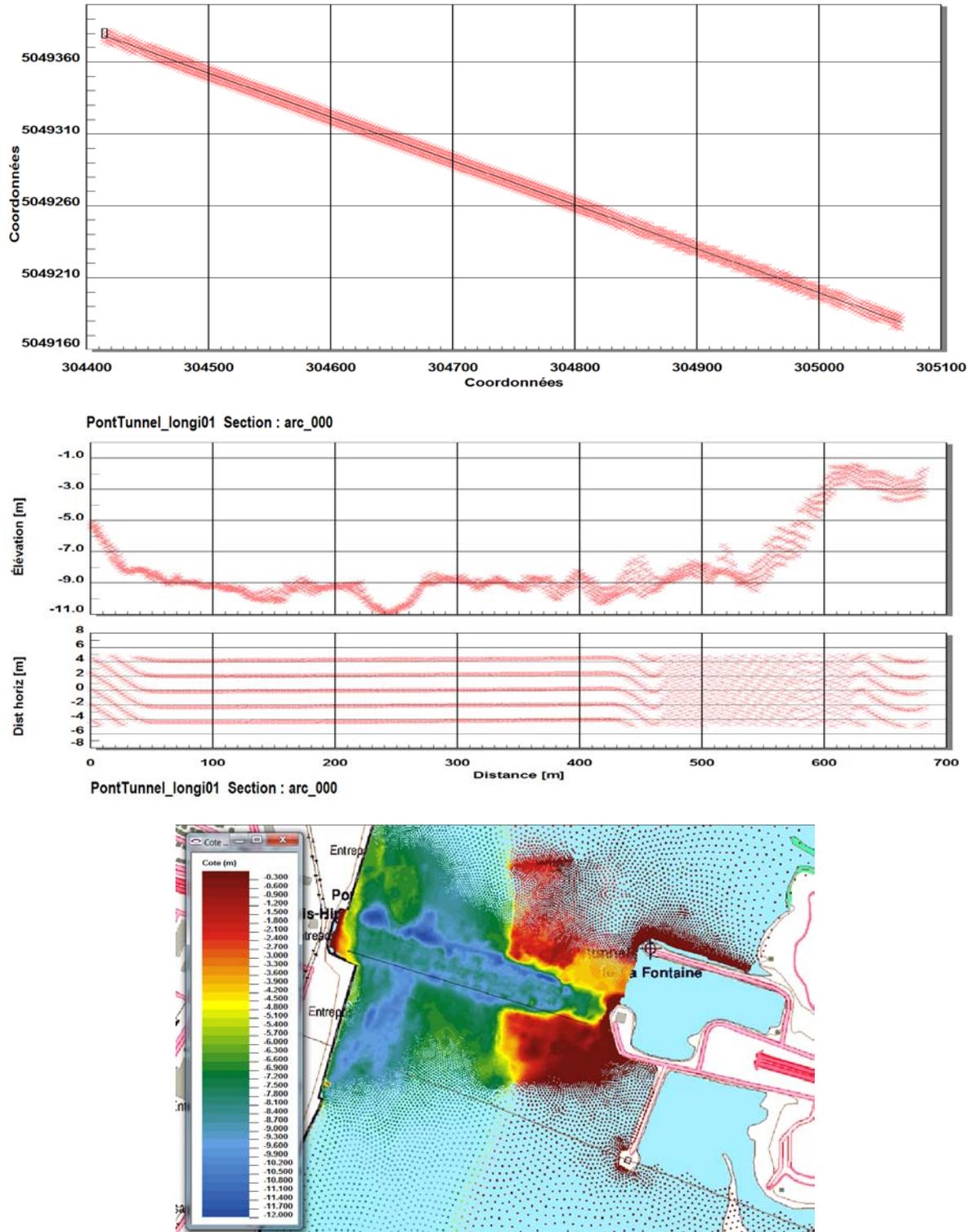
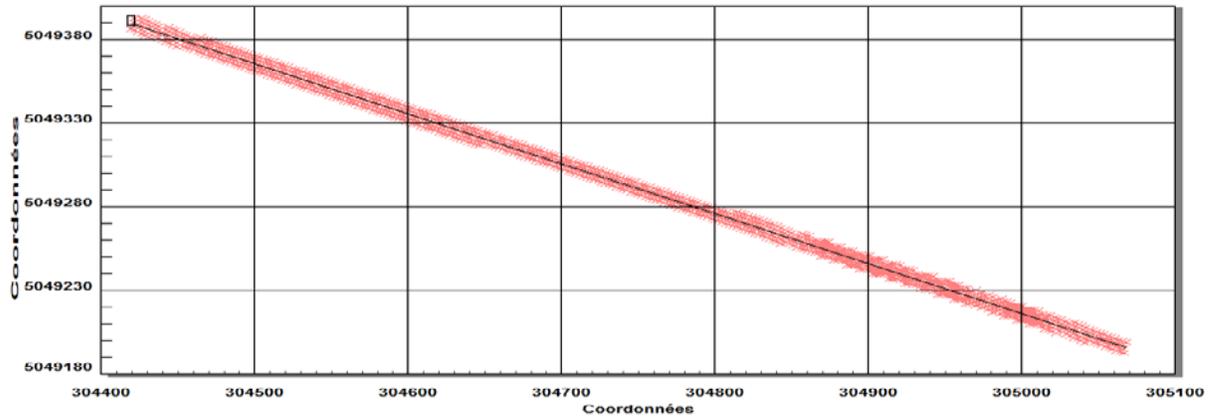
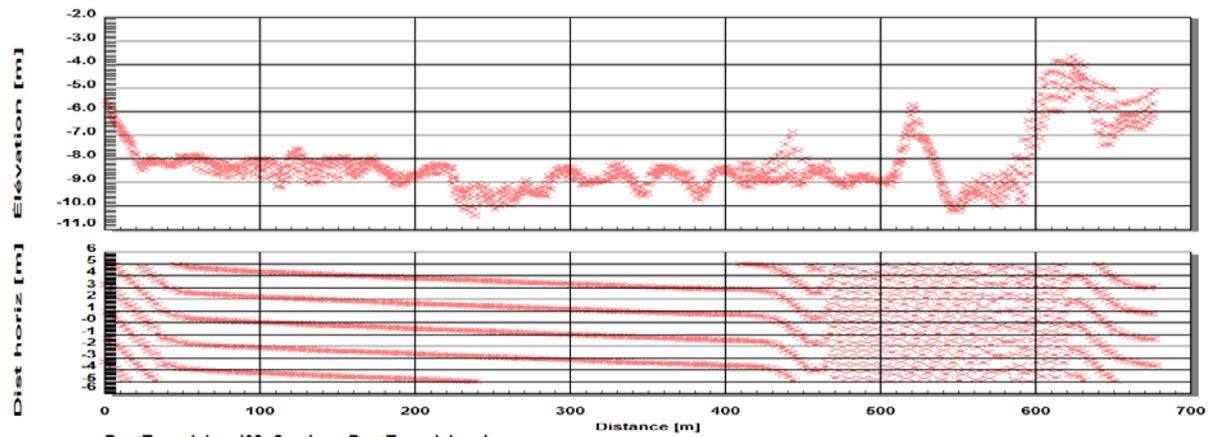


Figure 4-2 Profil longitudinal 1.

4.2 Profil longitudinal 2



PontTunnel_longi02 Section : PontTunnel_longi



PontTunnel_longi02 Section : PontTunnel_longi

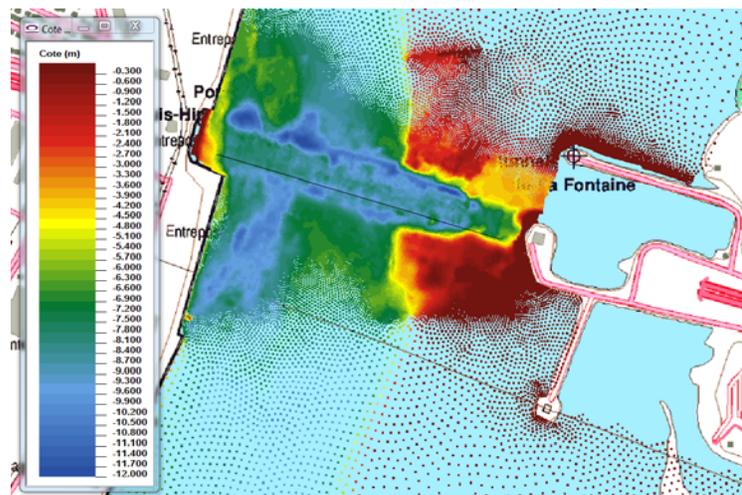


Figure 4-3 Profil longitudinal 2.

4.3 Profil longitudinal 3

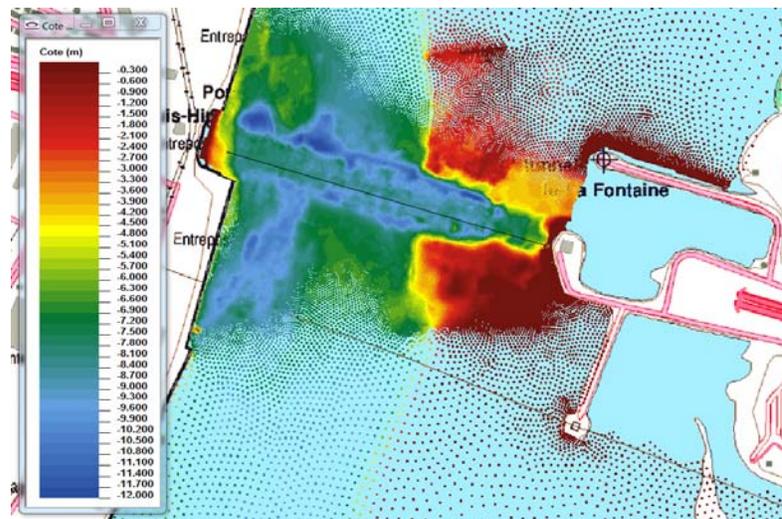
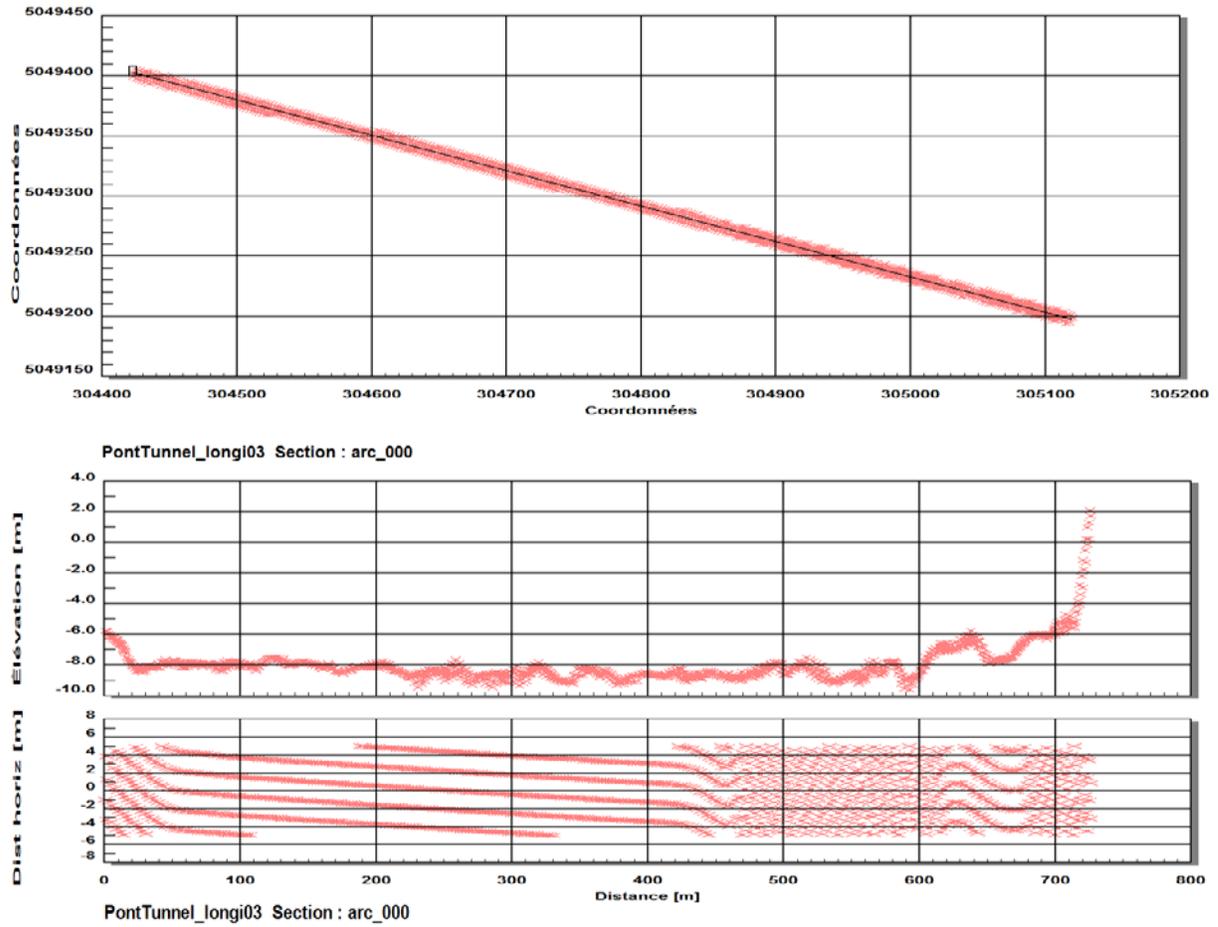


Figure 4-4 Profil longitudinal 3.

4.4 Profil longitudinal 4

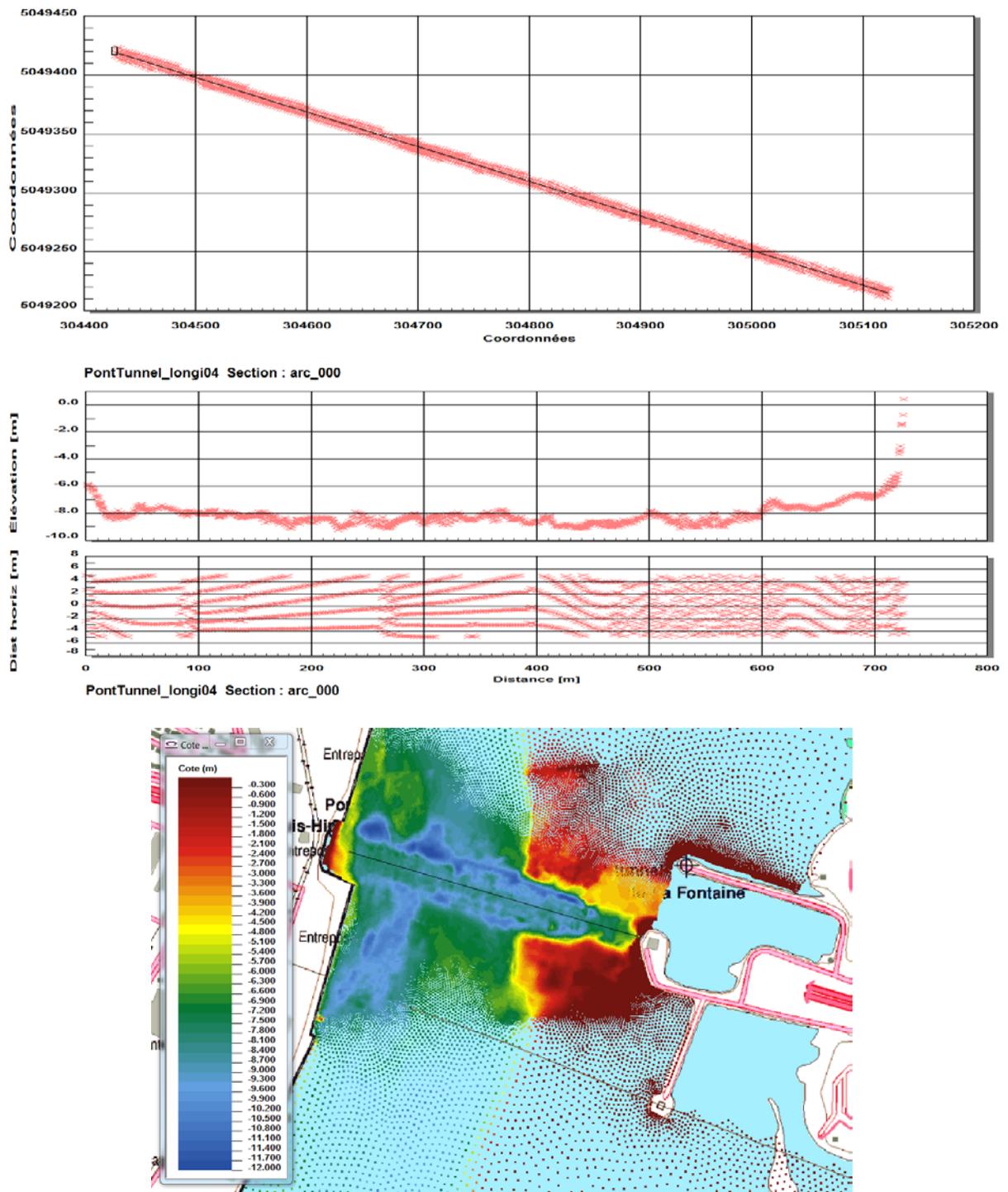


Figure 4-5 Profil longitudinal 4.

4.5 Profil longitudinal 5

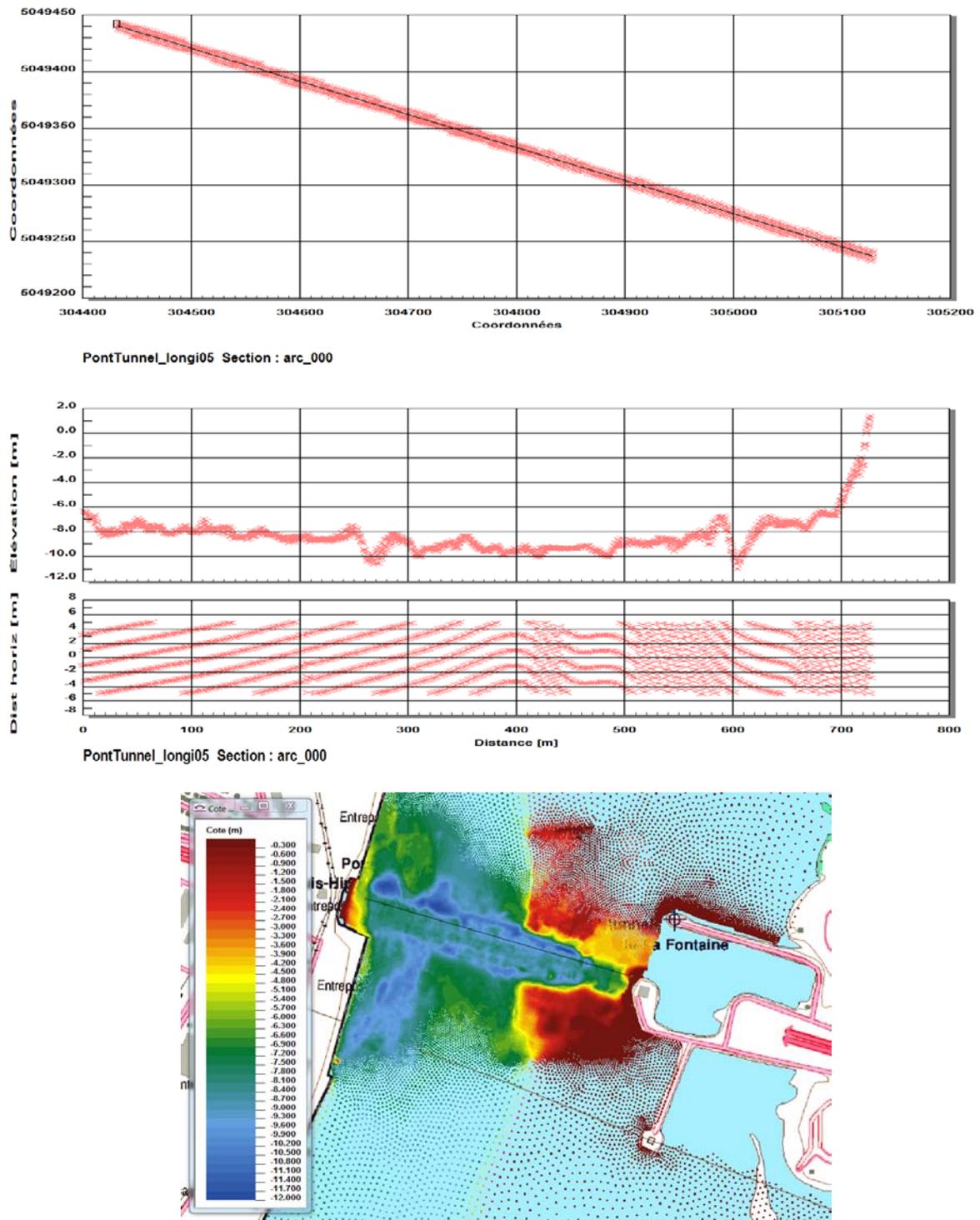
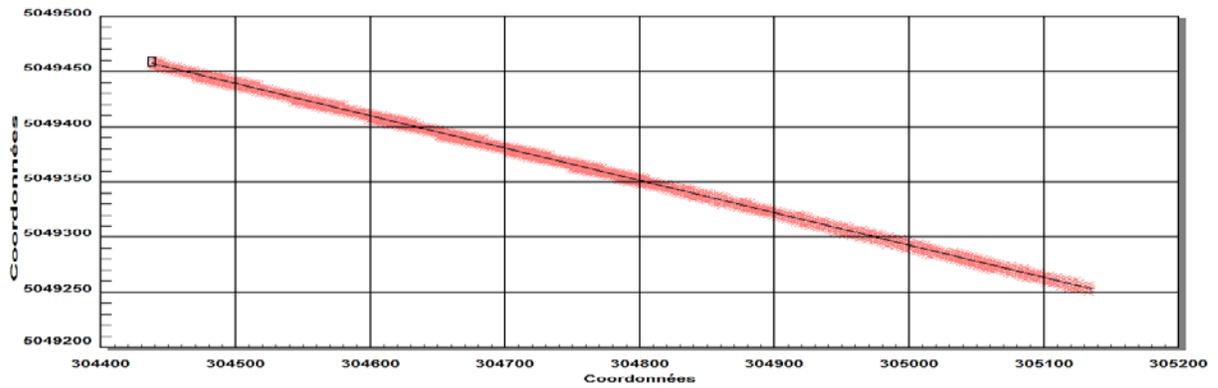
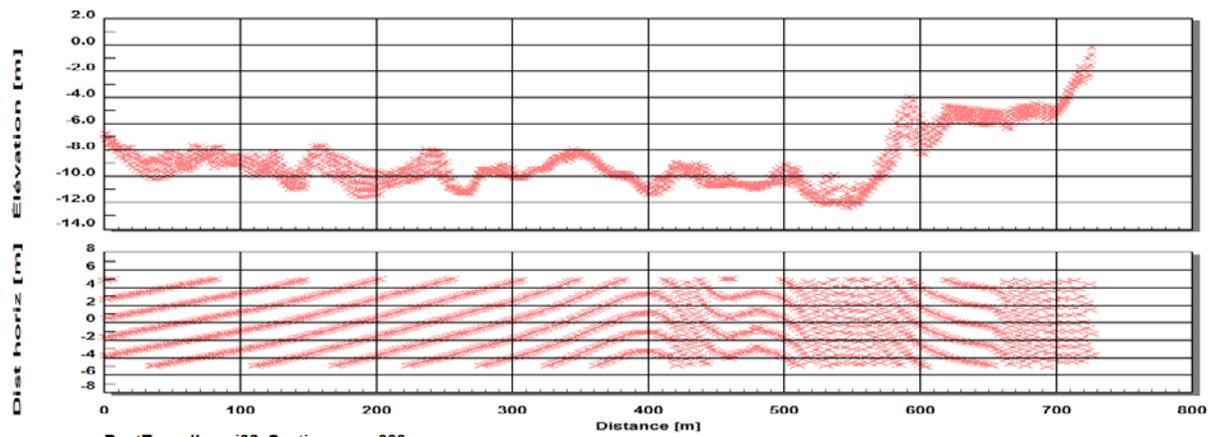


Figure 4-6 Profil longitudinal 5.

4.6 Profil longitudinal 6



PontTunnelLongi06 Section : arc_000



PontTunnelLongi06 Section : arc_000

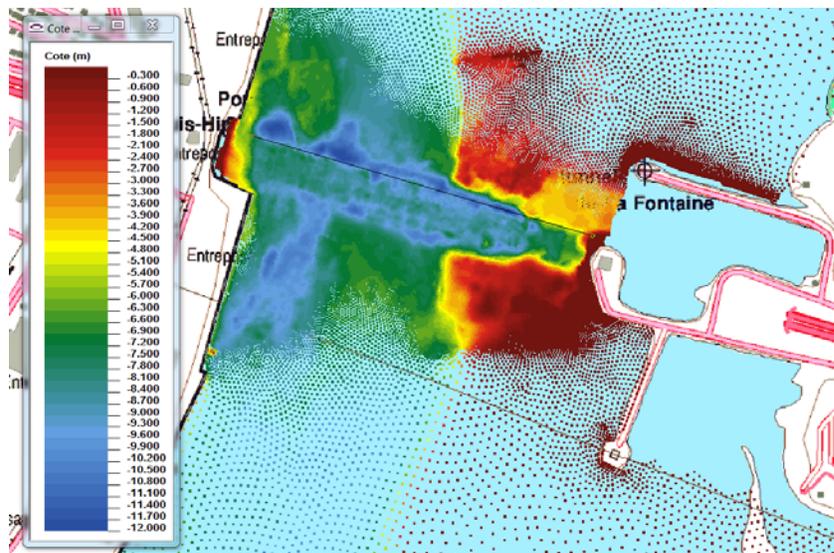


Figure 4-7 Profil longitudinal 6.

5 Profondeur d'eau minimum requise

L'extrait suivant, tiré du rapport intitulé « Examen préalable. Quais 76-77. Prolongement et approfondissement », daté de mai 2010, présente le désir du port de Montréal de voir la profondeur d'eau minimum portée à 11,6 m.

1.0 INTRODUCTION

Le projet de prolongement des quais 76-77 et d'approfondissement au terminal Cast consiste à prolonger les structures d'une longueur de 40 mètres vers l'ouest à proximité du pont-tunnel Louis-Hippolyte Lafontaine et à assurer une profondeur d'eau à 11,6 mètres par rapport au zéro des cartes marines au pied des postes à quai 76-77. De même, une structure de protection anti-affouillement sera réalisée au pied du quai existant.

Source : Port de Montréal. Examen préalable. Quais 76-77. Prolongement et approfondissement.

Figure 5-1 Profondeur d'eau minimum désirée.

Un extrait de la carte marine indique une profondeur d'eau minimum garantie de 11,2 m un peu en amont de l'axe du tunnel.

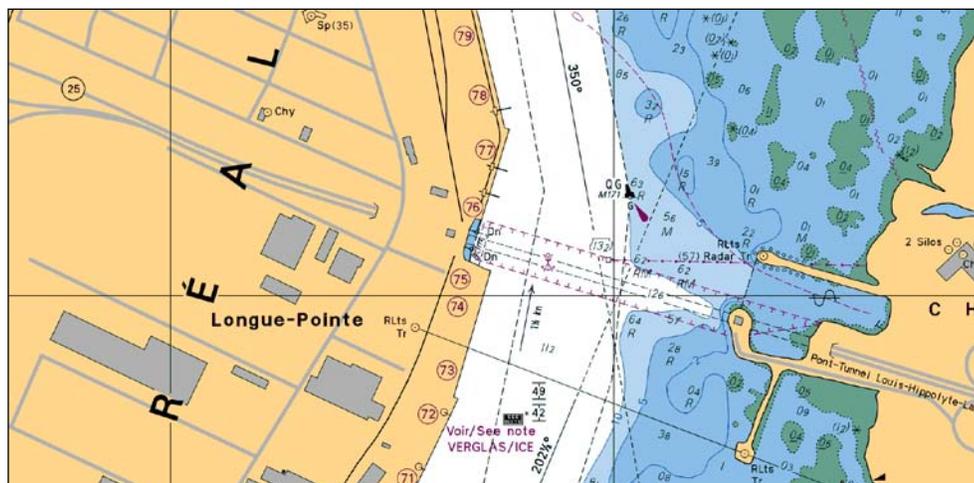


Figure 5-2 Extrait de la carte marine pour le secteur du tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine.

Le zéro des cartes correspond à la cote géodésique 5,1 m à la rue Frontenac. La cote géodésique du fond correspondant à une profondeur d'eau minimum de 11,3 m est donc donnée par :

$$5,1 \text{ m} - 11,3 \text{ m} = -6,2 \text{ m}$$

Pour la nouvelle profondeur minimum de 11,6 m proposée par le port de Montréal, la cote est abaissée à -6,5 m. Tout recouvrement du tunnel ne devrait donc pas dépasser cette cote géodésique de -6,5 m. Les deux figures qui suivent permettent de localiser cette frontière qui, à l'exception de quelques parcelles, longe le chenal délimité sur la carte marine. La figure 5-3 illustre la délimitation pour les conditions actuelles alors que la figure 5-4 illustre la délimitation lorsqu'un recouvrement minimum de 2,16 m a été introduit au droit du tunnel (avec pentes amont et aval de 6H :1V).

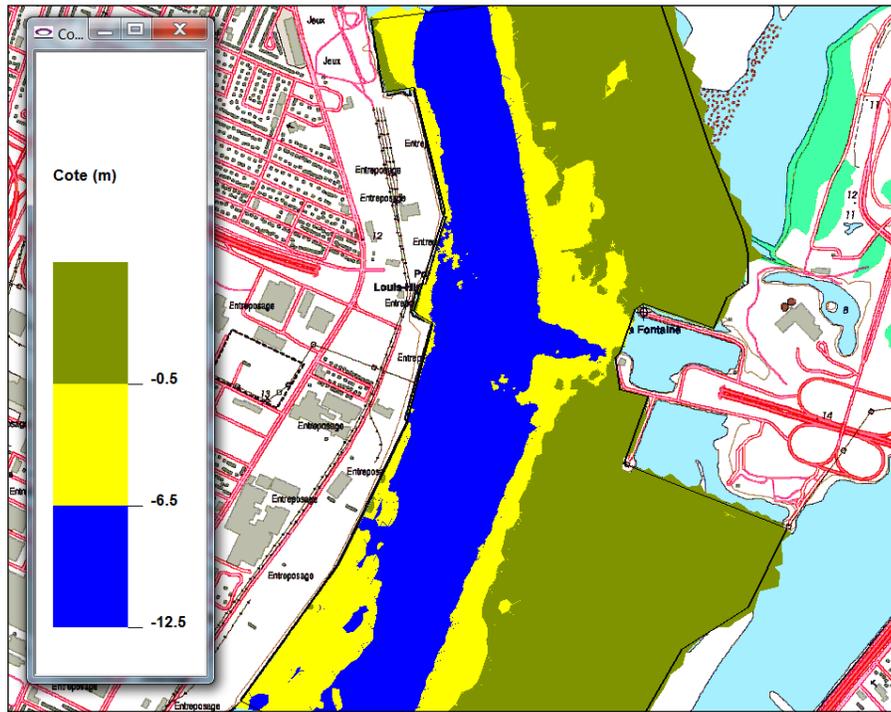


Figure 5-3 Zone avec profondeur minimum de 11,5 m (en bleu) pour les conditions actuelles.

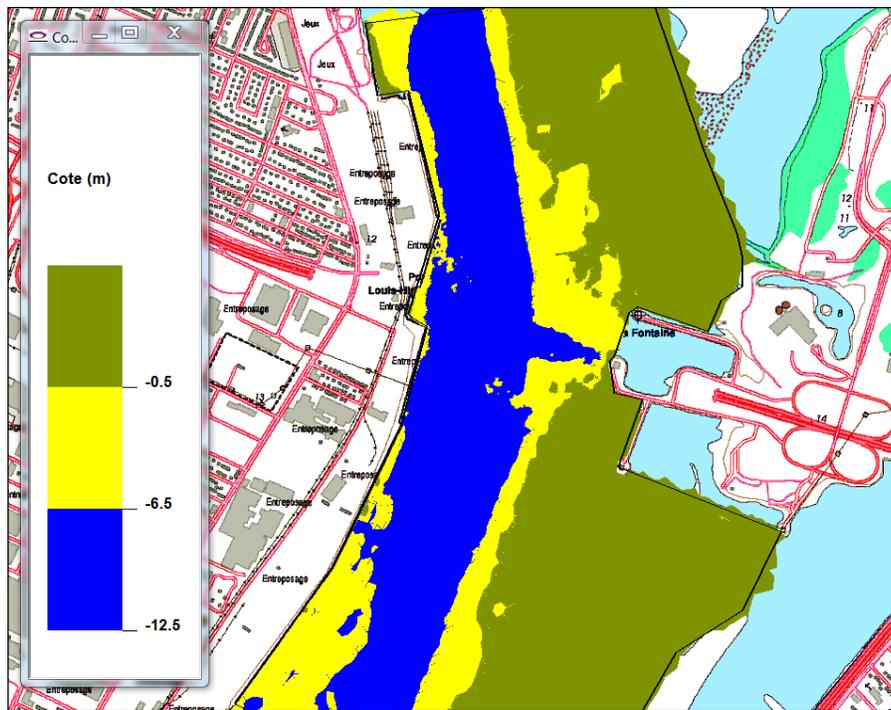


Figure 5-4 Zone avec profondeur minimum de 11,5 m (en bleu) pour les conditions avec recouvrement de 2,16 m.

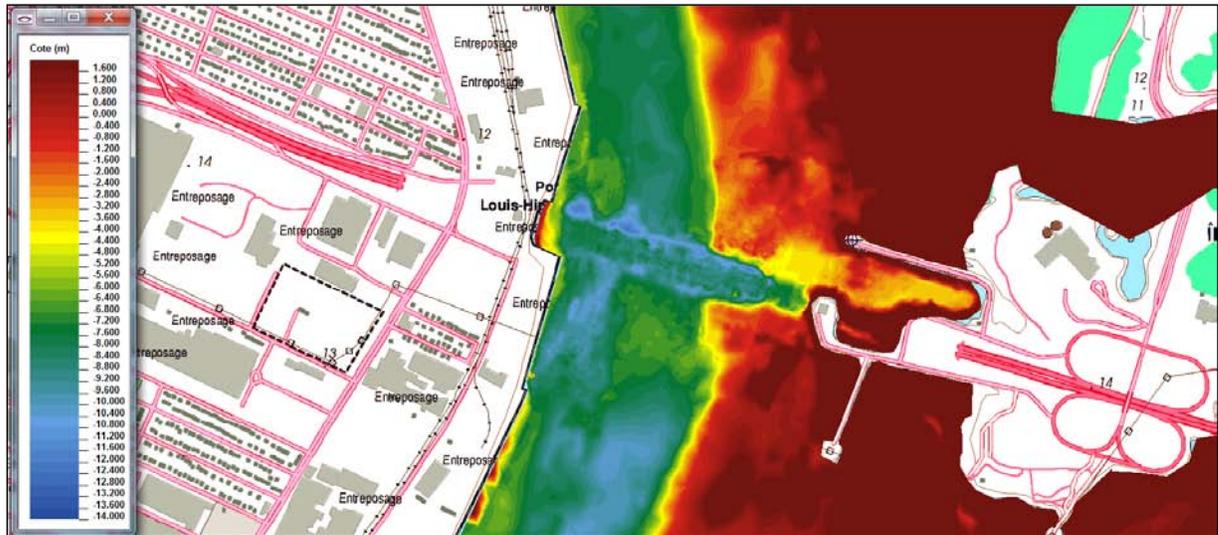


Figure 5-5 Bathymétrie tirée du modèle entier d'Environnement Canada.

Nous avons vu au chapitre 4, à l'examen des profils longitudinaux, que le fond, au-dessus du tunnel, varie entre les cotes -9 et -7,5 m dans le chenal de navigation. Le rétablissement de l'enrochement initial de protection au-dessus du tunnel ne modifiera pas cette gamme de valeurs. Pour les simulations numériques du régime hydrodynamique local, compte tenu des fortes profondeurs dans le chenal, du faible volume de remblai supplémentaire anticipé et de l'imprécision quant aux relevés, on impose un recouvrement minimum de 2,16 m, soit 0,33 m de plus que le minimum requis afin d'évaluer l'impact d'un dépassement dans l'épaisseur de l'enrochement et une éventuelle tolérance envers l'ajout d'une épaisseur additionnelle. Cet aspect est traité plus en détail au chapitre suivant.

6 Production de la bathymétrie post travaux pour fins de simulations hydrodynamiques

Pour tenir compte des aléas de la mise en place et permettre un éventuelle tolérance à un sur-épaississement on retient une épaisseur de 2,16 m pour réaliser les simulations hydrodynamiques, soit 33 cm de plus (1/3 de mètre) que l'épaisseur requise pour obtenir le rétablissement de l'enrochement initial.

Comme les profondeurs sont grandes dans le chenal et que ce dernier est large, on présume que les modifications au régime hydrodynamique seront faibles sinon nulles. Un ajout de 33 cm au recouvrement minimum requis permet de vérifier le bien-fondé de cette évaluation préliminaire qui s'est vérifiée à postériori.

Les simulations sont réalisées pour cinq conditions de débits et le lecteur peut consulter l'annexe B qui traite de la détermination des conditions hydrologiques retenues pour simulations.

La localisation des zones nécessitant du remblai additionnel s'effectue en soustrayant l'élévation du toit du tunnel provenant du plan P07501538C-2 de la cote du fond provenant du maillage du modèle d'Environnement Canada. La zone des calculs correspond à la zone pour laquelle l'élévation du toit du tunnel est connue (en se référant au plan susmentionné).

Zone du toit du tunnel

Des cellules de 0,5 m x 0,5 m ont été créées (surface de 0,25 m²) couvrant la zone occupée par le toit du canal. Pour chaque cellule, les cotes du fond et du toit du tunnel sont évaluées. On calcule la différence d'élévation. Si la différence est supérieure à 2,16 m, aucun volume additionnel n'est requis. Dans le cas contraire, la différence entre cette cote et la cote du toit s'avère la hauteur de remblai requise. Cette hauteur est multipliée par 0,25 m² pour obtenir le volume.

Zone des remblais de part et d'autre du tunnel

Perpendiculairement à l'axe du canal, on prolonge le remblai de part et d'autre du toit selon une pente de 6H pour 1V, soit la même pente que celle apparaissant aux plans produits par Lavalin en 1976. Si la cote du prolongement est supérieure à la cote du fond, on détermine le volume requis en m³ pour cette cellule en calculant la différence entre la cote de la pente et la cote du fond, le tout multiplié par 0,25 m², la surface occupée par la cellule. Les résultats ont été compilés dans des tableaux Excel afin d'obtenir la variation des volumes requis en fonction du chaînage.

Les calculs des volumes ont été réalisés pour des épaisseurs de 2,16 m (simulations) et de 1,83 m (épaisseur de recouvrement à garantir), afin de comparer les volumes d'enrochement requis pour ces deux options.

La figure 6-1 présente les zones nécessitant l'ajout de remblai.

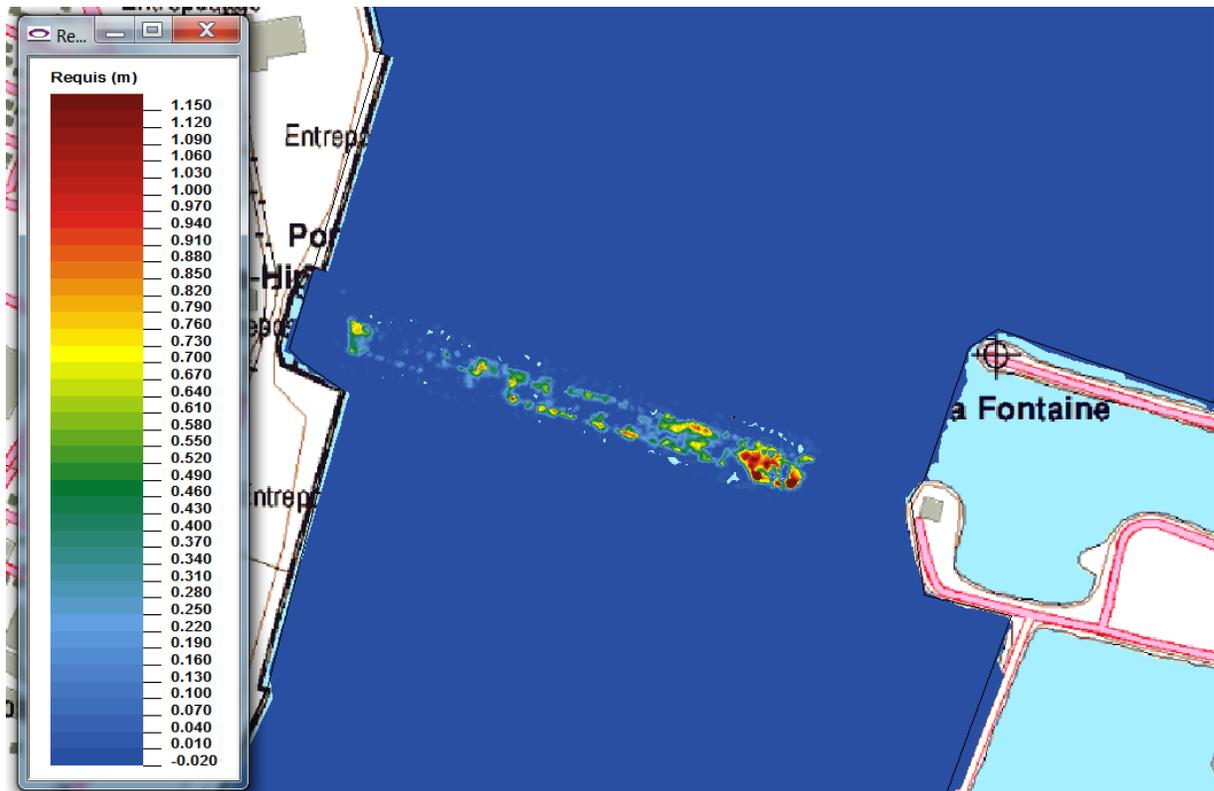


Figure 6-1 Recouvrement additionnel requis pour obtenir 2,16 m de recouvrement au-dessus du tunnel.

Estimation des volumes

Les figures 2-6 à 2-9 présentent sous forme succincte les volumes requis à chacune des sections transversales qui sont espacées de 0,5 m le long de l'axe du tunnel. Pour chaque section, un fichier Excel a été généré qui permet de localiser les zones où les volumes sont requis. Compte tenu du nombre important de sections transversales, ces fichiers sont fournis sous forme numérique (fichiers zip). Les volumes estimés requis sont respectivement de l'ordre de 2 300 et 6 700 m³ pour des épaisseurs de recouvrements de 1,83 et 2,16 m. Ces volumes sont donnés à titre informatif. Des relevés de précision seraient souhaitable pour bien évaluer les volumes requis avant de procéder aux travaux.

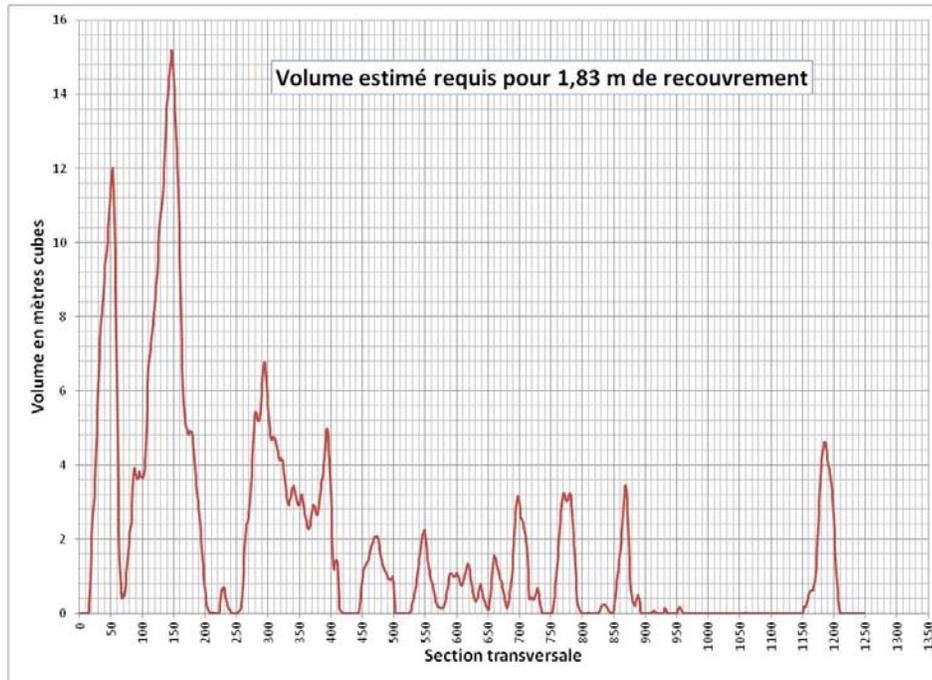


Figure 6-2 Volume estimé requis pour obtenir 1,93 m de recouvrement.

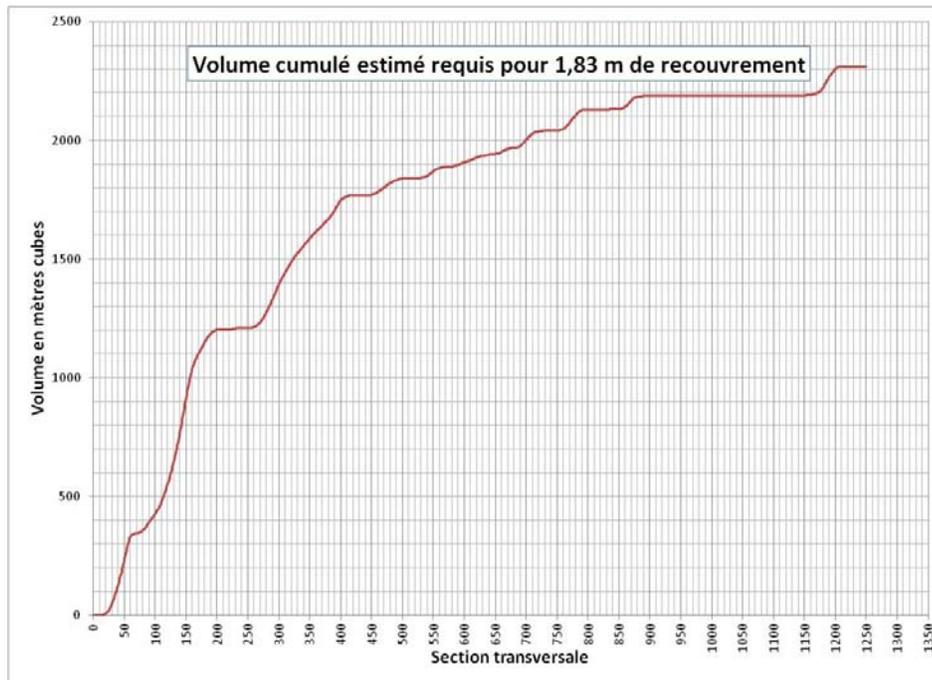


Figure 6-3 Volume cumulé estimé requis pour obtenir 1,83 m de recouvrement.

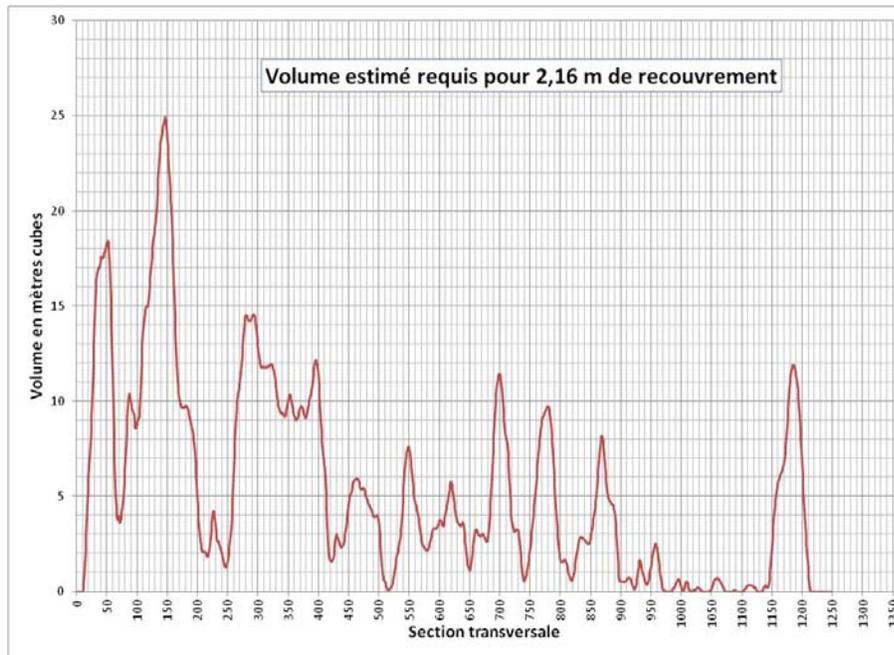


Figure 6-4 Volume estimé requis pour obtenir 2,16 m de recouvrement.

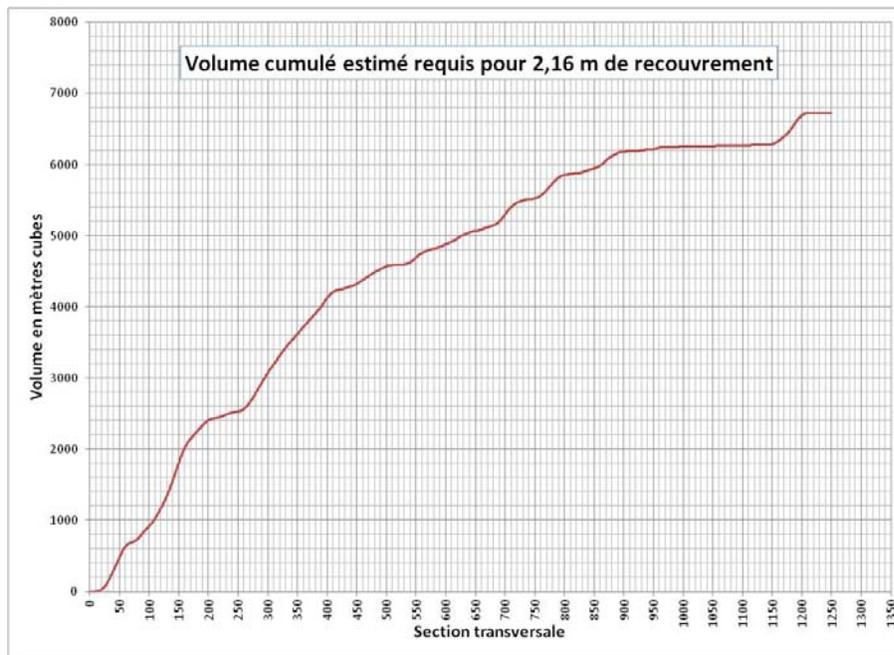


Figure 6-5 Volume cumulé estimé requis pour obtenir 2,16 m de recouvrement.

7 Références

- [1] Teknika-HBA – SPG
Hydro International Inc. « *Sondage bathymétrique, Tunnel Louis-Hippolyte-Lafontaine, Fleuve St-Laurent* ». Par SPG Hydro International Inc. Pour le ministère des Transports du Québec, Direction territoriale de Montréal, avril 2008. Projet SPG 08-11296-I. 24 p.
- [2] Géophysique GPR
International inc. « *Levé bathymétrique et de profilage sous-marin sur le fleuve St-Laurent à la hauteur du pont tunnel Louis-Hippolyte-Lafontaine* », Pour le ministère des Transports du Québec, Direction de l'Île de Montréal, octobre 2010. Rapport M-10954 14 p.

Plan de localisation DWG 10-09-535-00.
- [3] CJB Environnement inc. « *Examen préalable, Quais 76-77. Prolongement et approfondissement* ». Pour le Port de Montréal, Projet 09702, mai 2010. 100 p.

Ministère des Transports du Québec

Pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine Annexe B. Hydrologie du fleuve Saint-Laurent

Ministère des Transports du Québec

Pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine Annexe B. Hydrologie du fleuve Saint-Laurent

Par



Pierre Dupuis, ing., M. Sc.

Équipe de réalisation

Ministère des Transports du Québec

Chargé de projet : Mourad El Hila, ing., M. Sc.

GENIVAR inc.

Directeur de projet : Pierre Pelletier, ing., M. Sc.

Spécialiste : Pierre Dupuis, ing., M. Sc.

Table des matières

1	<i>Contexte</i>	1
2	<i>L'hydrologie de l'archipel de Montréal</i>	2
2.1	Référentiels altimétriques.....	4
2.2	Courbe de remous à l'exutoire du lac Saint-Louis.....	4
2.3	Historique des travaux modifiant le régime hydrologique	5
2.4	Niveaux d'eau du lac Saint-Louis	6
2.5	Débit du fleuve Saint-Laurent à LaSalle	8
2.6	Relation entre le niveau du lac Saint-Louis et le débit du fleuve Saint-Laurent au droit de la station de LaSalle	8
2.6.1	Relation niveau-débit avec les données provenant de la base de données HYDAT	8
2.6.2	Modélisation hydrodynamique 2D d'Environnement Canada	10
3	<i>Quantiles de niveaux de crues pour le lac Saint-Louis</i>	12
4	<i>Quantiles de crues du fleuve Saint-Laurent à LaSalle</i>	15
5	<i>Débit à l'étiage</i>	16
6	<i>Valeur médiane du débit du fleuve</i>	16
7	<i>Sélection des cas pour simulations</i>	17
7.1	Conditions générales pour les simulations	17
7.2	Simulations et débits à imposer	17
7.3	Conditions aux limites pour la simulation 1	18
7.4	Conditions aux limites pour la simulation 2	18
7.5	Conditions aux limites pour la simulation 3	19
7.6	Conditions aux limites pour la simulation 4	19
7.7	Conditions aux limites pour la simulation 5	20
8	<i>Références</i>	20

Liste des figures

Figure 1-1 Localisation du pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine.....	1
Figure 2-1 Schéma du système hydrique l'archipel de Montréal.....	2
Figure 2-2 Partage des eaux provenant de l'Outaouais et du Saint-Laurent au printemps.	3
Figure 2-3 Dénivelé entre le niveau du lac Saint-Louis et l'entrée du canal Lachine.	5
Figure 2-4 Variation du niveau d'eau moyen journalier du lac Saint-Louis à Pointe-des-Cascades.	6
Figure 2-5 Variation du niveau d'eau moyen journalier du lac Saint-Louis à LaSalle.....	7
Figure 2-6 Variation du niveau d'eau moyen journalier à la jetée 1 du port de Montréal.	7
Figure 2-7 Niveau d'eau à la jetée 1 du port de Montréal pour la période d'eau libre, de mai à novembre.	7
Figure 2-8 Débit du fleuve Saint-Laurent à LaSalle pour la période 1955 à 2010.....	8
Figure 2-9 Couples de points cotés tirés de la base de données HYDAT. Tous les mois de l'année.....	9
Figure 2-10 Ajustement de type seuil pour la période 1972-2010 libre de glace.	9
Figure 2-11 Relations niveau à Pointe-Claire et débit du fleuve Saint-Laurent à LaSalle.	11
Figure 2-12 Relation entre le niveau d'eau à Pointe-Claire et le débit du fleuve à LaSalle.	11
Figure 3-1 Variation du niveau d'eau moyen journalier au lac Saint-Louis à Pointe-Claire de 1972 à 2010.....	12
Figure 3-2 Ajustement de la loi GEV aux niveaux maxima annuels pour la période d'eau libre 1972-2010.	12
Figure 3-3 Ajustement de la loi Log-Normale aux niveaux maxima annuels pour la période d'eau libre 1972-2010.....	13
Figure 3-4 Ajustement de la loi Log-Pearson III aux niveaux maxima annuels pour la période d'eau libre 1972-2010.....	13
Figure 3-5 Ajustement de la loi Weibull aux niveaux maxima annuels pour la période d'eau libre 1972-2010.....	14
Figure 6-1 Pourcentage de non-dépassement du niveau d'eau du lac Saint-Louis.	16

Liste des tableaux

Tableau 2-1 Équivalence entre les différents référentiels dans la région de Montréal.....	4
Tableau 2-2 Dates importantes et travaux et actions modifiant le régime du fleuve Saint-Laurent.	5
Tableau 2-3 Couples formés par les valeurs de débit à LaSalle et de niveau d'eau à Pointe-Claire.	10
Tableau 3-1 Quantiles du maximum annuel du niveau d'eau moyen journalier du lac Saint-Louis pour la période 1972-2010.....	14
Tableau 4-1 Quantiles annuels du débit moyen journalier du fleuve à LaSalle pour la période 1972-2010 obtenus de la relation niveau-débit produite avec les résultats de simulations H2D2 d'Environnement Canada et la relation niveau-débit de Hydat.....	15
Tableau 5-1 Quantiles annuels du débit moyen journalier du fleuve à LaSalle pour la période 1972-2010 obtenus de la relation niveau-débit produite avec les résultats de simulations H2D2 d'Environnement Canada et la relation niveau-débit de Hydat.....	16
Tableau 7-1 Détails des simulations à réaliser par Environnement Canada.	17

1 Contexte

Dans le cadre de son programme de réfection des ouvrages majeurs de transports, le ministère des Transports du Québec (MTQ) doit s'assurer qu'une couche de remblai d'épaisseur suffisante recouvre les cellules structurales formant le pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine. Des études antérieures indiquent en effet que toute perte d'enrochement sur la couronne du tunnel conduit à une réduction des conditions ultimes de stabilité établies conformément aux critères du Code canadien sur le calcul des ponts routiers. Des relevés récents indiquent que cette épaisseur minimum n'est pas respectée dans certaines zones situées au-dessus du tunnel reliant l'île Charron à l'île de Montréal (figure 1-1).

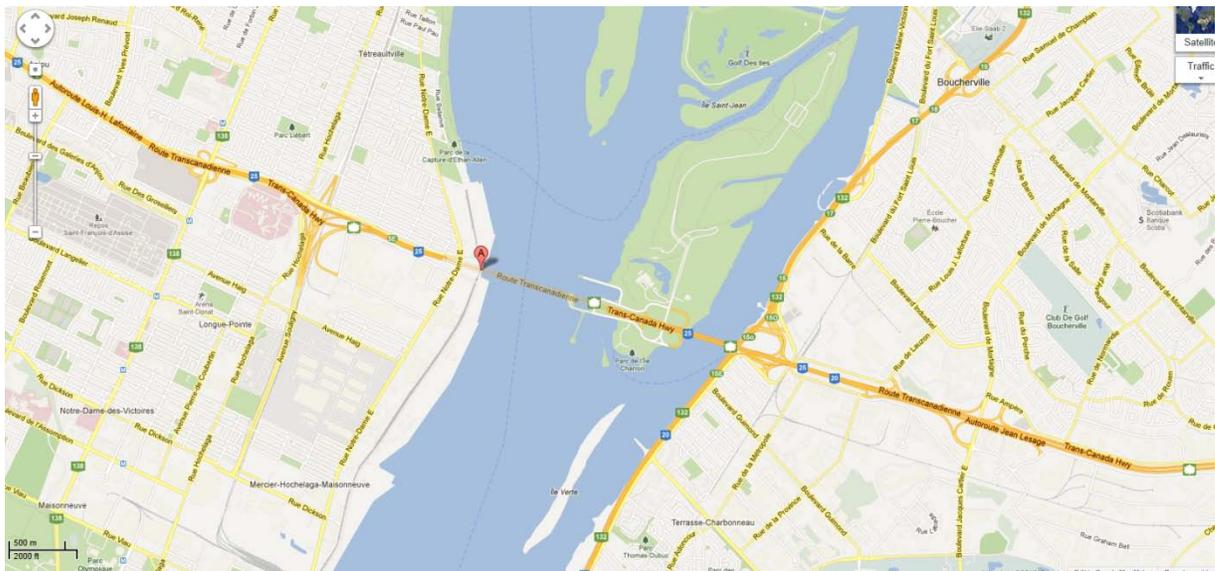


Figure 1-1 Localisation du pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine.

Selon les informations reçues du MTQ, une épaisseur minimale d'enrochement stabilisateur de 1,83 m est requise au-dessus du pont-tunnel afin de respecter les critères de stabilité structuraux. Cette épaisseur a été établie par le consortium CCDGP (Cima, CNRC-NRC, DESSAU, GENIVAR, PARSONS) en novembre 2010. Des relevés bathymétriques ont été réalisés à différentes périodes et c'est à partir de ces relevés que des écarts dans l'épaisseur de recouvrement ont été constatés.

Une étude hydraulique est requise par le MTQ afin d'évaluer les répercussions que l'ajout de remblai aurait sur le régime hydrodynamique du fleuve dans cette région. De l'information touchant la bathymétrie locale a été transmise à GENIVAR comme intrant pour la réalisation de cette étude. L'analyse de cette information est présentée à l'annexe A, qui porte sur le traitement des données bathymétriques.

La détermination des conditions hydrologiques permettant de produire des résultats hydrodynamiques couvrant le régime hydrodynamique fait l'objet de la présente annexe. Cinq débits sont déterminés, qui serviront d'intrant au modèle hydrodynamique opéré actuellement par Environnement Canada.

2 L'hydrologie de l'archipel de Montréal

La figure 2-1 présente le schéma du système hydrique de la région de Montréal. Le pont-tunnel est localisé entre le port de Montréal et la confluence de la rivière des Prairies avec le fleuve Saint-Laurent. Le débit du fleuve Saint-Laurent passant à la hauteur du pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine dépend du niveau du lac Saint-Louis et du débit sortant de la rivière des Prairies plus en aval. En effet, de forts débits dans ces deux rivières ont pour effet de rehausser le niveau d'eau en amont de la confluence avec le fleuve Saint-Laurent et, de par l'effet de courbe de remous, influence le niveau d'eau au droit de pont-tunnel.

Il existe une relation univoque entre le débit du fleuve au droit du tunnel et le niveau d'eau mesuré au lac Saint-Louis. Voici pourquoi le débit est établi en amont des rapides de Lachine, à partir du niveau mesuré au lac Saint-Louis. Une fois ce débit connu, Environnement Canada impose les conditions aux limites aux autres limites ouvertes du modèle hydrodynamique qui, rappelons-le, couvre le fleuve du port de Montréal jusqu'à Trois-Rivières.

Système hydrique de l'Archipel

Les débits à l'exutoire du lac Saint-Louis résultent des apports du fleuve Saint-Laurent, de la rivière des Outaouais et de la rivière Châteauguay. Les débits du Saint-Laurent accèdent au lac Saint-Louis par le lit naturel du fleuve (Les Cèdres) et par le canal de Beauharnois. Quant à la rivière des Outaouais, elle se déverse dans le lac des Deux Montagnes qui évacue ses eaux par cinq exutoires : la rivière des Mille Îles, les chenaux nord et sud de l'île Bizard menant à la rivière des Prairies et les chenaux Vaudreuil et Sainte-Anne menant au lac Saint-Louis (figure 2-1).

En crue, près de 50 % des débits de l'Outaouais sont évacués vers le lac Saint-Louis par les chenaux Vaudreuil et Sainte-Anne. En étiage, ce pourcentage chute autour de 25 %. Les apports de la rivière Châteauguay sont assez faibles comparativement aux autres. La figure 2-2 illustre bien le transfert d'une partie des eaux provenant de la rivière des Outaouais (eaux vertes) dans le lac Saint-Louis. Le traitement numérique de la photographie satellite fait en sorte que les eaux de la rivière des Outaouais apparaissent en vert et les eaux du Saint-Laurent en noir. On notera que le panache des eaux provenant de la rivière des Outaouais longe la rive nord du lac Saint-Louis.

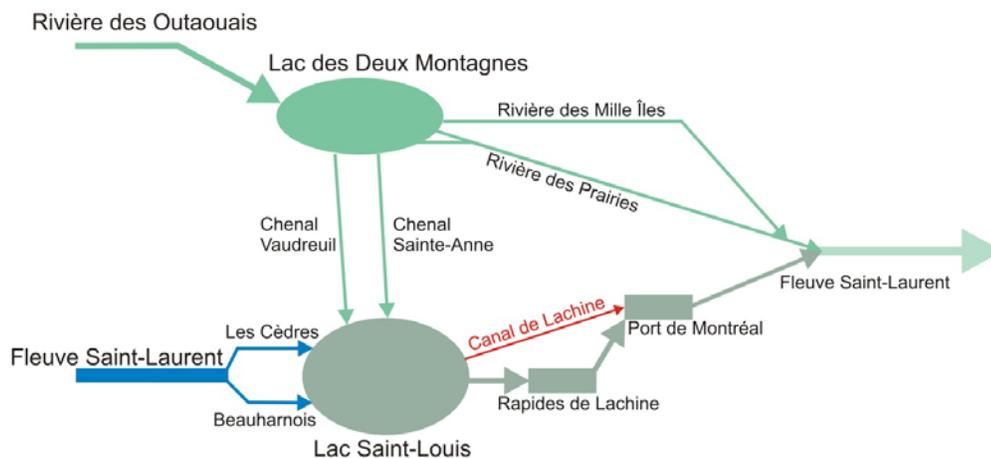
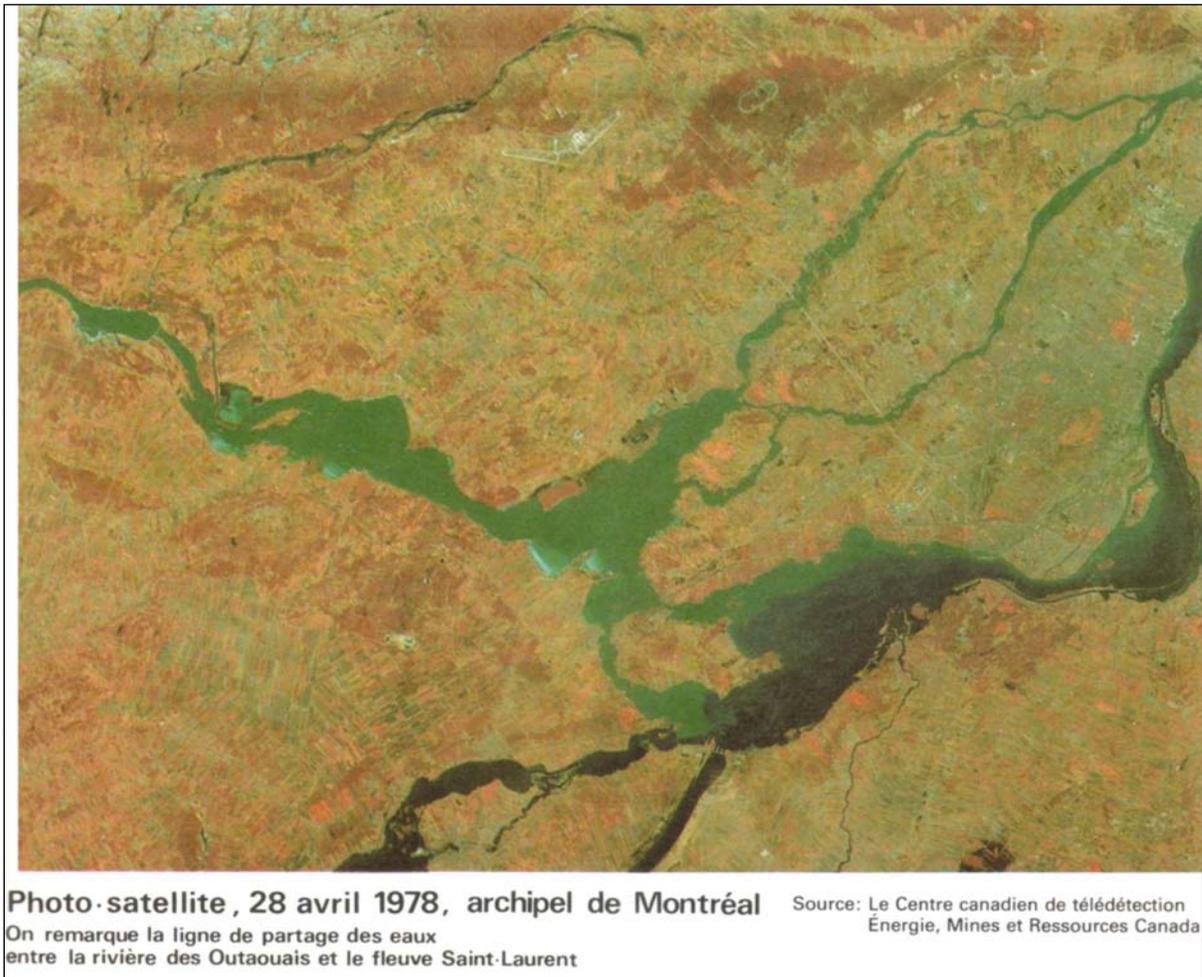


Figure 2-1 Schéma du système hydrique l'archipel de Montréal.



Source : Hydro-Québec. Avant-Projet Archipel. Synthèse des études environnementales. 1985.

Figure 2-2 Partage des eaux provenant de l'Outaouais et du Saint-Laurent au printemps.

Il est important de mentionner que jusqu'en 2008, on ne parvenait pas à fermer adéquatement le bilan des entrées-sorties des masses d'eau dans l'Archipel de Montréal. Ce problème, identifié par Aquapraxis en 2006 (réf. 1), mais déjà connu des différents organismes impliqués dans la gestion du système, n'a été résolu qu'à la suite d'une campagne de mesures d'envergure, initiée en 2008 par la Ville de Laval et Aquapraxis inc. avec l'implication du Centre d'expertise hydrique du Québec, d'Environnement Canada, d'Hydro-Québec et de la firme Environnement Illimité inc. Cette campagne a permis d'obtenir l'information nécessaire permettant de valider ou corriger les relations niveau-débit à tous les exutoires du système hydrique de l'Archipel, permettant ainsi de fermer le bilan au pic de crue de la rivière des Outaouais (réf. 2).

À la suite de cette campagne de mesures, Environnement Canada a révisé la relation niveau-débit du chenal Sainte-Anne (2010, Cantin communication personnelle et réf. 3). Une modélisation numérique bidimensionnelle du lac Saint-Louis, réalisée par Environnement Canada, permet également d'obtenir la relation entre le niveau du lac Saint-Louis et le débit du fleuve à la sortie du lac Saint-Louis.

Toute cette information est utilisée pour établir les débits au droit du pont-tunnel pour différentes périodes de retour, à partir des statistiques réalisées sur la série des niveaux d'eau moyens journaliers du lac Saint-Louis. Pour le traitement des données, il est important de s'assurer que les niveaux sont tous donnés par rapport au même référentiel altimétrique. Cet aspect est traité à la section suivante.

2.1 Référentiels altimétriques

Les niveaux d'eau sont consignés dans des bases de données et les valeurs sont toujours données par rapport à un référentiel altimétrique. Ce référentiel (ou datum) peut varier dans le temps et il est important de s'assurer que les valeurs soient corrigées pour que toutes les séries de niveaux d'eau soient comparées entre elles dans un même référentiel. L'équivalence entre les référentiels IGLD (International Great Lakes Datum) et MSL (« Mean Sea Level ») à Montréal a été obtenue de la Ville de Montréal. L'équivalence entre le niveau arbitraire de la station limnimétrique de LaSalle et le référentiel IGLD55 a été obtenue de monsieur Guy Morin (Environnement Canada). Le tableau 2-1 présente les équivalences entre ces différents référentiels. Les données récentes publiées dans la base de données HYDAT (Environnement Canada) accessible par internet sont données dans un référentiel arbitraire ou dans le référentiel IGLD85. Notons que le référentiel IGLD85 est le même que le référentiel NAVD88.

Tableau 2-1 Équivalence entre les différents référentiels dans la région de Montréal.

	à	Arbitraire LaSalle	MSL (m)	IGLD55 (m)	IGLD85 (m)
De					
Arbitraire LaSalle		0,0	17,778	17,678	17,758
MSL		-17,778	0,0	-0,10	-0,02
IGLD55		-17,678	0,10	0,0	0,08
IGLD85		-17,758	0,02	-0,08	0,0

2.2 Courbe de remous à l'exutoire du lac Saint-Louis

Les courbes de remous, calculées par la firme Rousseau, Sauvé, Warren (RSW) durant les années 1980 dans le cadre du projet Archipel, sont illustrées à la figure 2-3. Cette figure permet d'apprécier la forte dénivellée de la surface dans la région de LaSalle, ce qui démontre la pertinence d'utiliser le niveau d'eau du lac Saint-Louis pour déterminer le débit du fleuve.

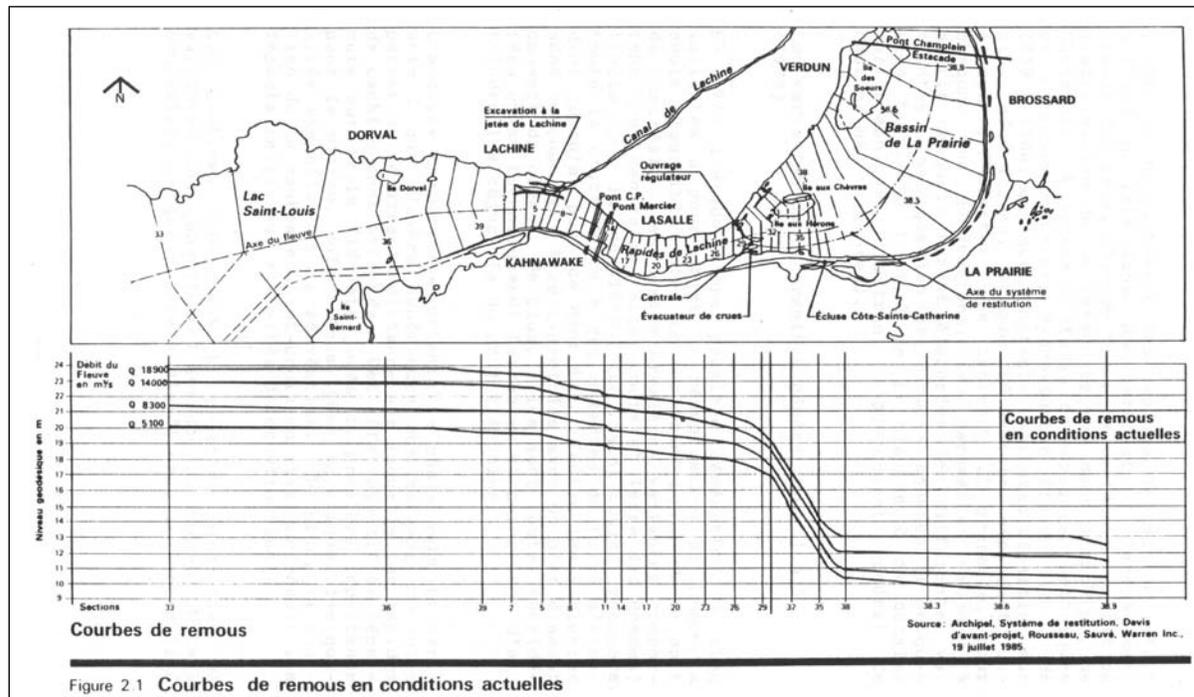


Figure 2.1 Courbes de remous en conditions actuelles

Source : Hydro-Québec. Avant-Projet Archipel. Synthèse des études environnementales. 1985.

Figure 2-3 Dénivelé entre le niveau du lac Saint-Louis et le bassin de Laprairie.

2.3 Historique des travaux modifiant le régime hydrologique

Des travaux majeurs, réalisés dans le bassin des Grands Lacs, ont des répercussions sur la gestion du système hydrique. Les principaux travaux sont résumés au tableau 2-2. Mentionnons la correspondance avec Rob Caldwell, P. Eng. du bureau de régularisation des Grands Lacs et du Saint-Laurent, qui recommande de n'utiliser que les séries de données post-1960, année à partir de laquelle a débuté la régularisation des débits sortant du lac Ontario.

Tableau 2-2 Dates importantes et travaux et actions modifiant le régime du fleuve Saint-Laurent.

Date	Travaux ou action
1958	Début de la production hydroélectrique au barrage Moses-Sanders (Cornwall)
1959	Ouverture de la voie maritime du Saint-Laurent
1960	Mise en vigueur du plan de gestion 1958-A, Lac Ontario – Fleuve Saint-Laurent
1962	Mise en vigueur du plan de gestion 1958-C
1963	Mise en vigueur du plan de gestion 1958-D

2.4 Niveaux d'eau du lac Saint-Louis

Les niveaux d'eau sont mesurés le long du fleuve Saint-Laurent depuis le début du 20^e siècle. La comparaison des signaux de Pointe-des-Cascades, située en amont du lac Saint-Louis, de Pointe-Claire au centre du lac Saint-Louis et de LaSalle à la sortie du lac Saint-Louis (figures 2-4 à 2-6), permet de juger de la qualité des données. Comme ces stations sont situées sur le même plan d'eau, on est en droit de s'attendre à ce qu'ils soient sensiblement identiques. Une analyse visuelle de ces signaux indique la présence de cycles secs (décennie 1930, début des années 1960) et humides (décennies 1940 et 1970). Au début des années 2000, les niveaux sont bas, mais ils ont remonté depuis 2004. Par contre, la station située au port de Montréal (figure 2-6) présente un signal différent. La variation des niveaux minima entre les figures 2-4 et 2-5 indique qu'en période d'étiage les niveaux d'eau présentent une signature semblable. Il en va tout autrement pour la variation des niveaux hauts pour la période antérieure aux années 1970. Cette différence appréciable s'expliquerait par le début d'une gestion efficace du couvert de glace en aval de l'archipel de Montréal au début des années 1970. En effet, la figure 2-7, qui présente la variation des niveaux pour la période libre de glace, n'indique pas de changements significatifs. Ceci tend à confirmer que depuis ce temps les niveaux n'excèdent pas la cote 9,5 m. Notons que les niveaux auraient atteint la cote 13,5 m durant les années 20 et ont dépassé la cote 13 m quatre fois avant la décennie 1960. Depuis le début des années 1970, la gestion des glaces fait en sorte que les niveaux n'ont jamais atteint la cote 10 m, soit une différence appréciable de 3 m avec les extrêmes vécus antérieurement. Comme les données postérieures à 1970 ne sont pas homogènes par rapport aux données antérieures, on retient la série des niveaux d'eau débutant en 1970 pour réaliser les traitements statistiques.

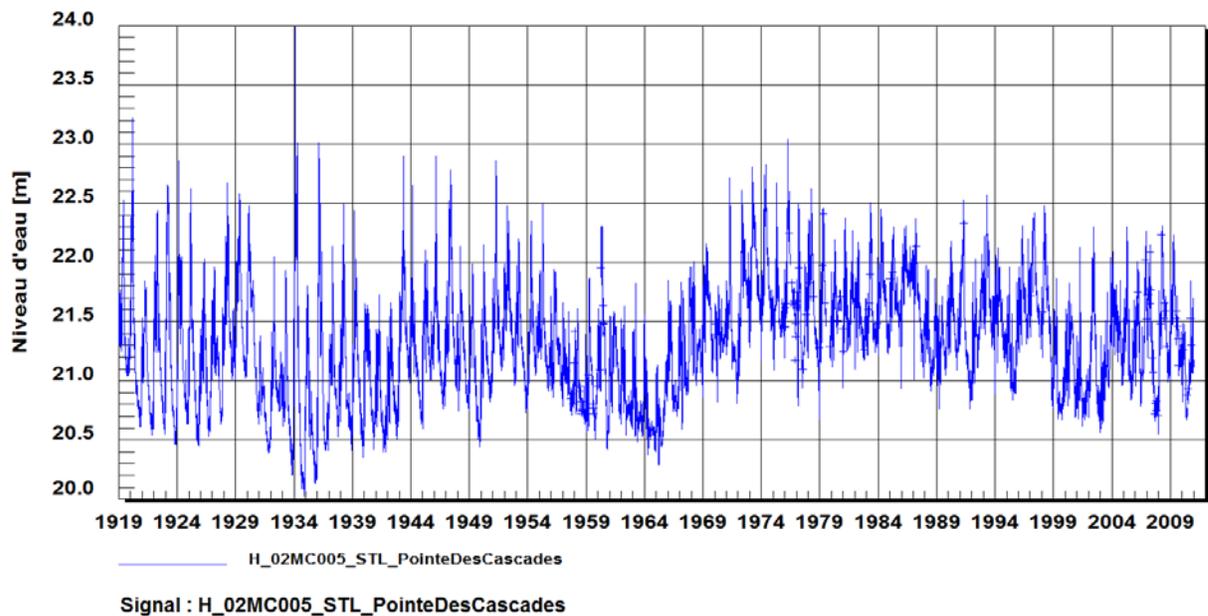


Figure 2-4 Variation du niveau d'eau moyen journalier du lac Saint-Louis à Pointe-des-Cascades.

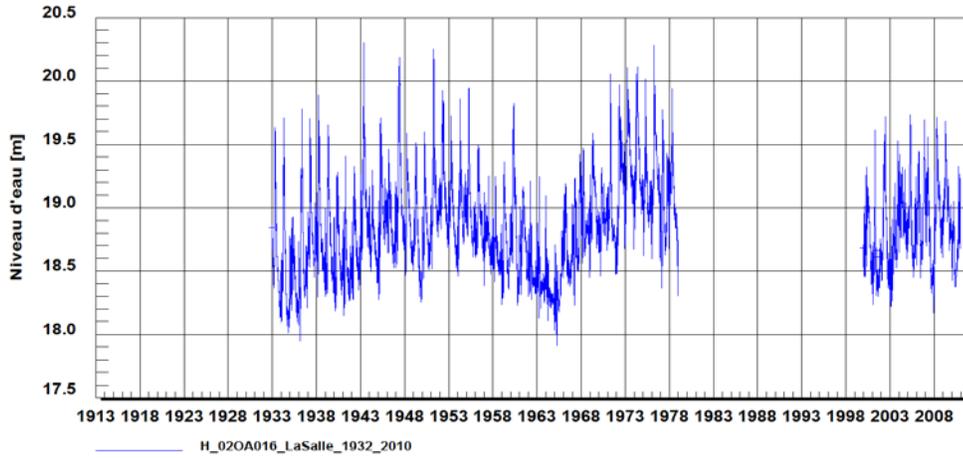


Figure 2-5 Variation du niveau d'eau moyen journalier du lac Saint-Louis à LaSalle.

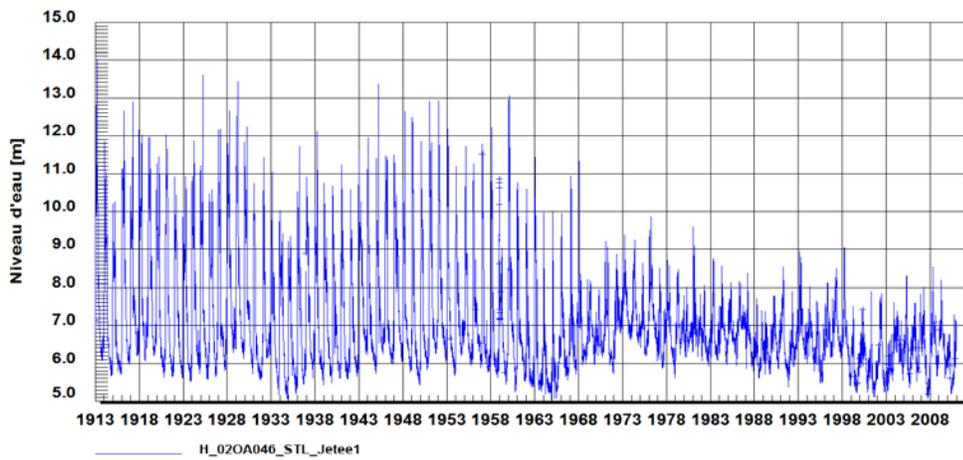


Figure 2-6 Variation du niveau d'eau moyen journalier à la jetée 1 du port de Montréal.

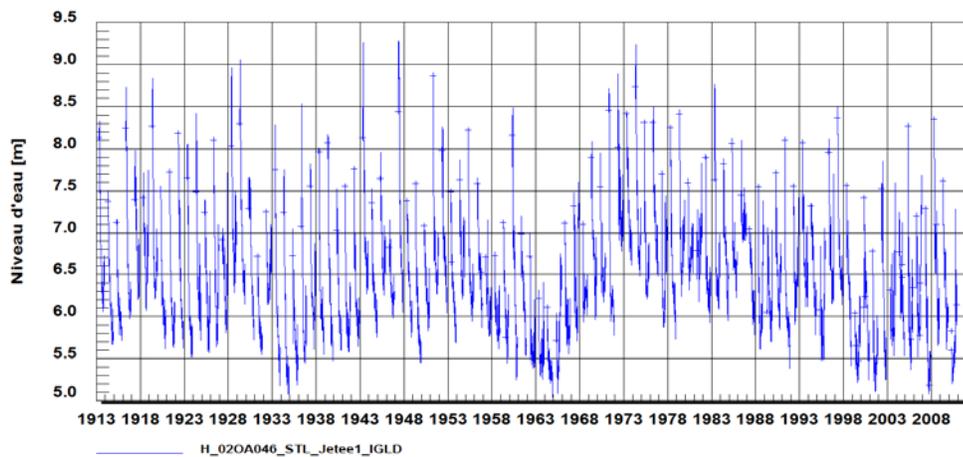


Figure 2-7 Niveau d'eau à la jetée 1 du port de Montréal pour la période d'eau libre, de mai à novembre.

Pour les périodes de retour de 100 ans et moins, l'ajustement aux niveaux d'eau du lac Saint-Louis apparaît approprié, car le niveau du lac intègre les influences combinées des débits provenant de la rivière des Outaouais et du fleuve Saint-Laurent.

2.5 Débit du fleuve Saint-Laurent à LaSalle

La figure 2-8 illustre la variation du débit moyen journalier mesurée à la station de LaSalle, à l'exutoire du lac Saint-Louis. Au débit du fleuve passant par Beauharnois et Les Cèdres s'ajoute une fraction du débit de la rivière des Outaouais qui passe par les chenaux Vaudreuil et Sainte-Anne (figure 2-1). On observe des périodes de faible hydraulité au début des années 1960, suivie d'une période de forte hydraulité dans les années 70. L'hydraulité apparaît moyenne durant les années 1990 et faible au début de la décennie 2000.

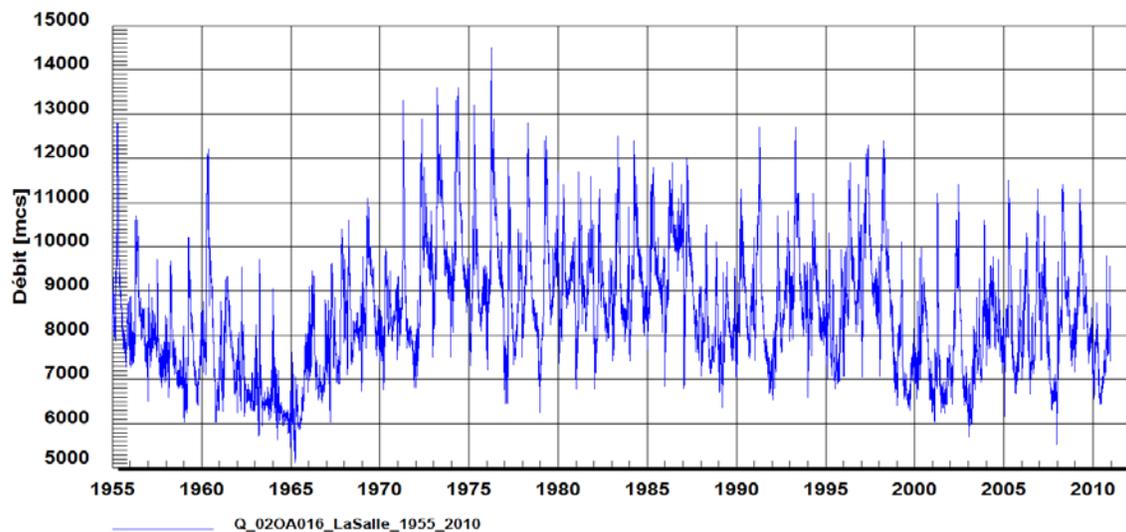


Figure 2-8 Débit du fleuve Saint-Laurent à LaSalle pour la période 1955 à 2010.

2.6 Relation entre le niveau du lac Saint-Louis et le débit du fleuve Saint-Laurent au droit de la station de LaSalle

Deux approches sont retenues pour évaluer quels sont les débits maxima du fleuve Saint-Laurent à la sortie du lac Saint-Louis.

2.6.1 Relation niveau-débit avec les données provenant de la base de données HYDAT

On cherche à déterminer la meilleure fonction d'ajustement permettant d'évaluer les débits pour différentes périodes de retour. Les couples formés par le niveau d'eau moyen journalier mesuré à la station de Pointe-Claire et le débit calculé pour la station de LaSalle sont portés en graphique (figure 2-9).

Ce type de graphique permet d'identifier aisément les extrêmes mesurés. La période retenue débute le 1^{er} janvier 1972 et se termine le 31 décembre 2010. Notons que le niveau d'eau le plus bas rencontré durant cette période est de 20,41 m le 2 février 2003. À ce niveau du lac Saint-Louis, correspondrait un débit de 5 956 m³/s selon la donnée publiée pour la station 02OA016 (LaSalle). La grande variabilité des niveaux d'eau pour un même débit, pour les débits inférieurs à 10 000 m³/s, s'explique par des effets de glace. En effet, tel qu'illustré à la figure 2-10, l'affichage des couples générés pour la période libre de glace, ici de mai à novembre, produit un nuage beaucoup plus compact. Plusieurs fonctions d'ajustement ont été évaluées (linéaire, quadratique, cubique, de puissance et de type seuil). L'ajustement de type seuil est retenu et il est tracé en bleu à la figure 2-10.

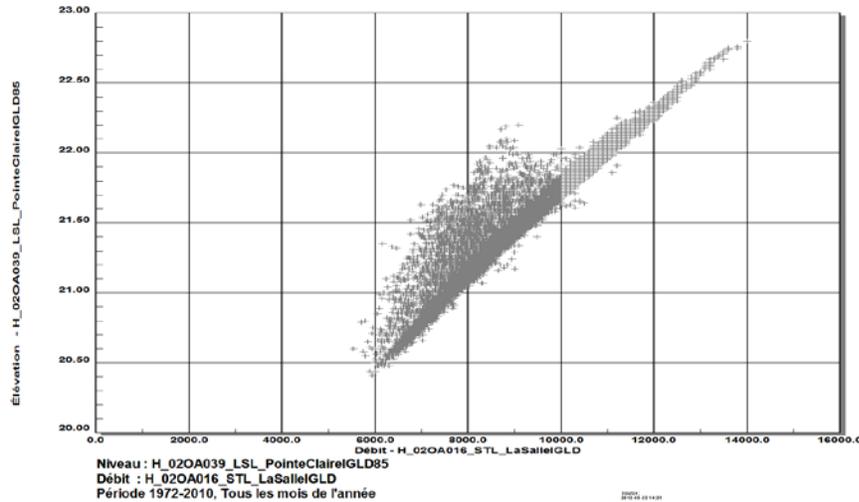


Figure 2-9 Couples de points cotés tirés de la base de données HYDAT. Tous les mois de l'année.

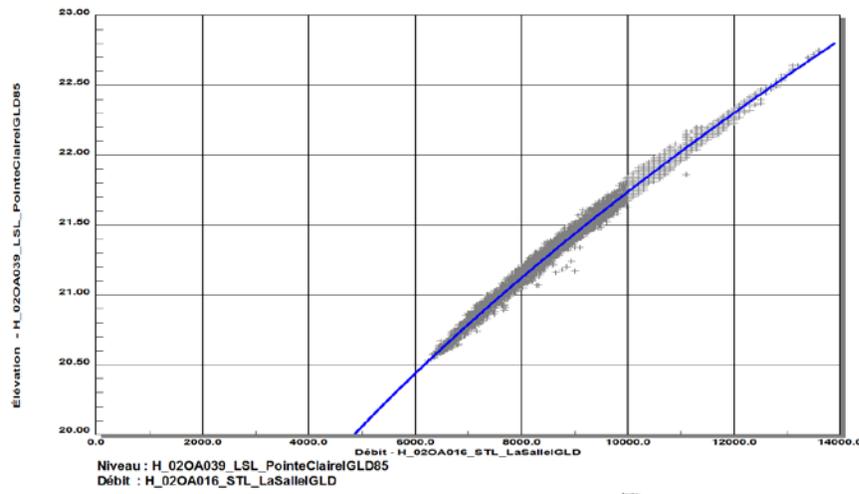


Figure 2-10 Ajustement de type seuil pour la période 1972-2010 libre de glace.

$$Q = 1,7 (488.867 + 2 * 7,565 * h) h^{1.5}$$

$$h = H - H_0 \quad H_0 = 16.947 \quad H \geq 16,947$$

H : cote du lac Saint-Louis mesurée à Pointe-Claire

2.6.2 Couples provenant de la modélisation hydrodynamique 2D d'Environnement Canada

La relation entre le niveau du fleuve mesuré à Pointe-Claire et le débit passant devant la station de LaSalle est obtenue par ajustement de fonctions de type linéaire, quadratique, de puissance ou de seuil à des couples de points obtenus à la suite d'une modélisation hydrodynamique 2D du domaine réalisée par Environnement Canada. Le tableau 2-3 présente les couples de points utilisés pour réaliser l'ajustement des types de fonction et la figure 2-11 permet de visualiser la tendance des différents ajustements à forts débits. L'ajustement est pratiquement le même pour la gamme des débits inférieurs à 17 500 m³/s. Au-delà de cette valeur, les fonctions de puissance et quadratique donnent un ajustement semblable. Les fonctions de seuil et linéaire apparaissent inadéquates. L'expérience a démontré qu'il est très hasardeux d'extrapoler ces courbes d'ajustement au-delà des couples de mesures. On doit donc appliquer ces fonctions d'ajustement avec prudence et circonspection lorsqu'on traite de conditions se situant dans l'espace solution extrapolé.

Tableau 2-3 Couples formés par les valeurs de débit à LaSalle et de niveau d'eau à Pointe-Claire.

Simulation	Débit à LaSalle (m ³ /s)	Niveau à Pointe-Claire (m)
1	4 572	19,58
2	5 740	19,99
3	6 997	20,45
4	8 304	20,88
5	10 102	21,45
6	11 396	21,88
7	13 174	22,50
8	14 531	22,93

La fonction de puissance pour calculer le débit à LaSalle (figure 2-12) :

$$Q_{LaSalle} = 2078.24 \cdot (H_{Pointe-Claire} - 17.83)^{1.1624} + \varepsilon$$

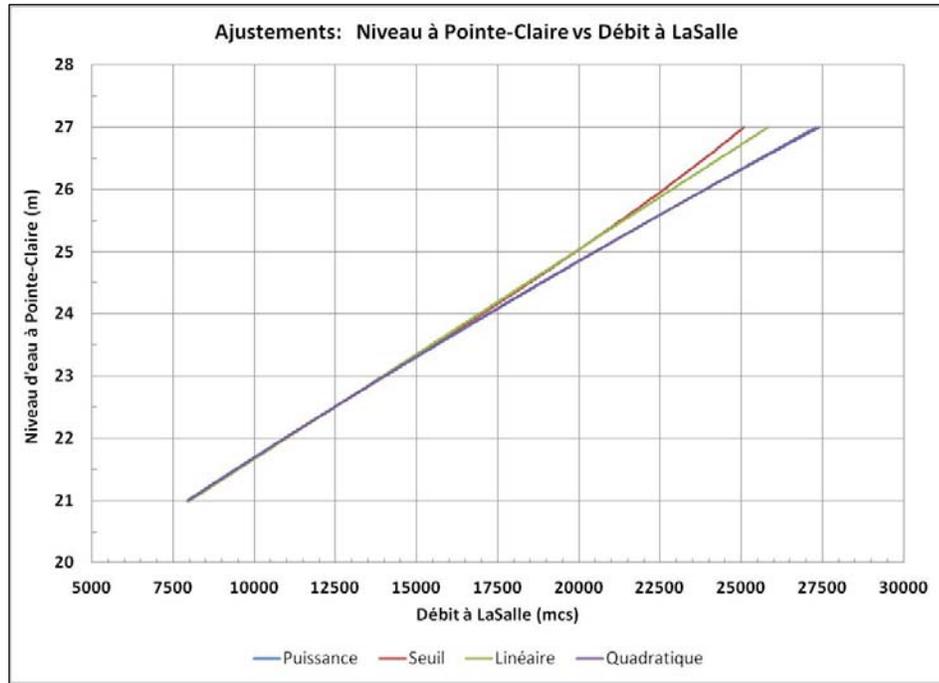


Figure 2-11 Relations niveau à Pointe-Claire et débit du fleuve Saint-Laurent à LaSalle.

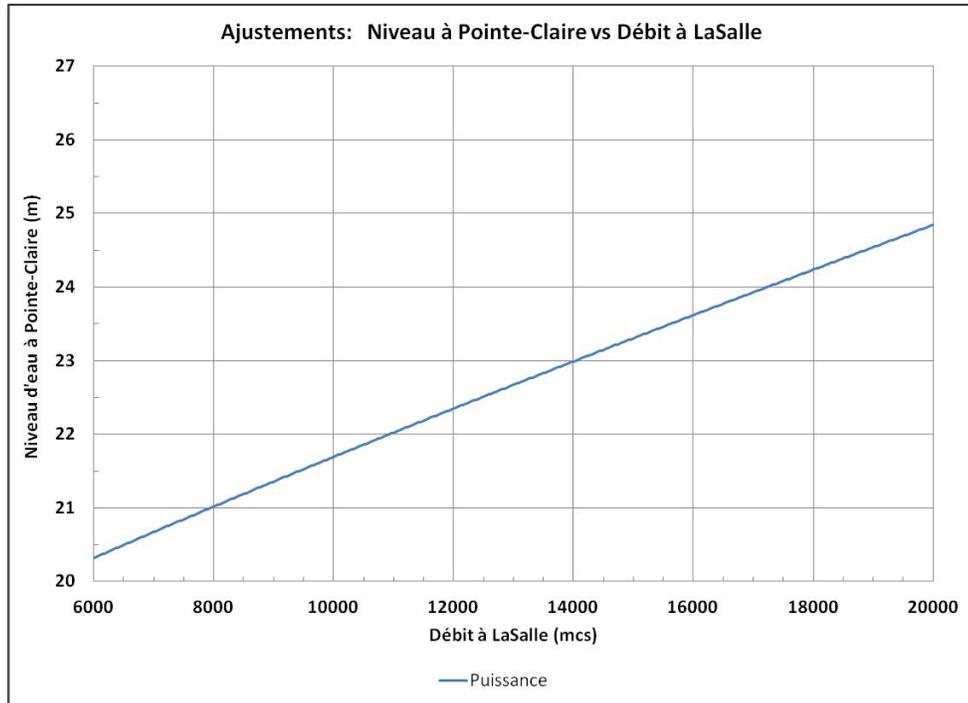


Figure 2-12 Relation entre le niveau d'eau à Pointe-Claire et le débit du fleuve à LaSalle.

3 Quantiles de niveaux de crues pour le lac Saint-Louis

La figure 3-1 présente la variation du niveau d'eau moyen journalier du lac Saint-Louis à Pointe-Claire pour la période retenue au fins d'établir les quantiles de crues. La valeur maximale du niveau d'eau moyen journalier à chaque année est extraite et l'analyse statistique des extrêmes est réalisée sur cette série de 39 valeurs. Quatre lois sont retenues pour évaluer les quantiles, permettant ainsi de juger de la variabilité des quantiles obtenus. Les figures 3-2 à 3-5 permettent de visualiser la qualité de l'ajustement. Les résultats pour les différents quantiles apparaissent au tableau 3-1, de même que les niveaux retenus pour les différents quantiles.

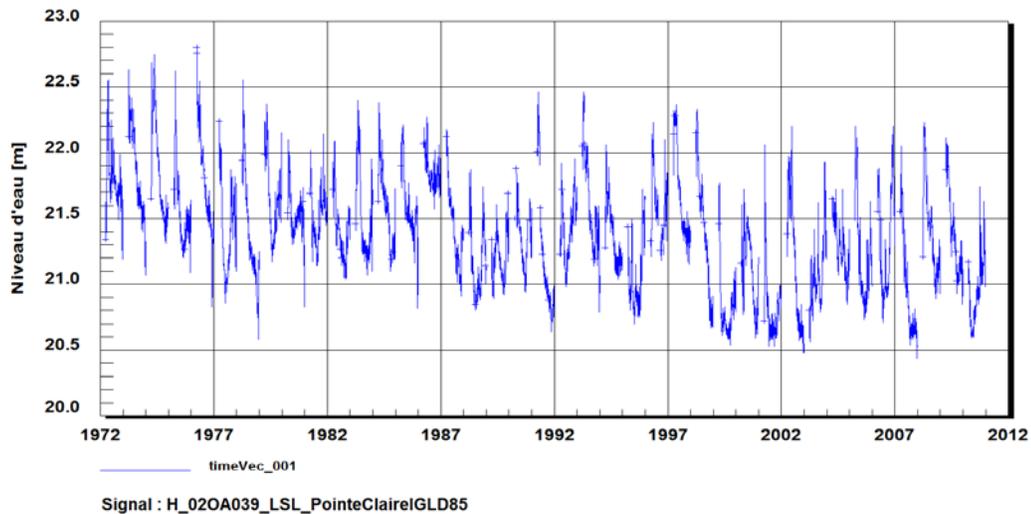


Figure 3-1 Variation du niveau d'eau moyen journalier au lac Saint-Louis à Pointe-Claire de 1972 à 2010.

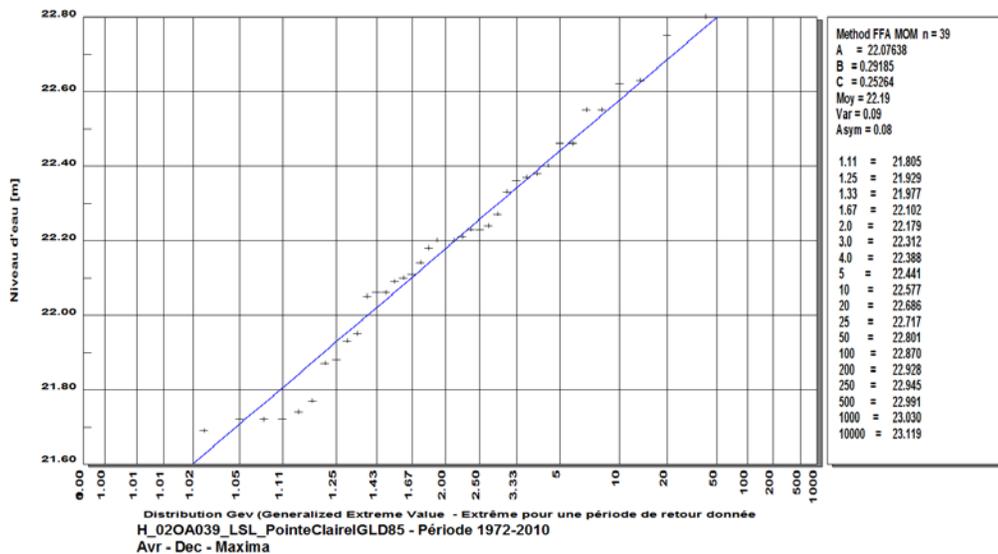


Figure 3-2 Ajustement de la loi GEV aux niveaux maxima annuels pour la période d'eau libre 1972-2010.

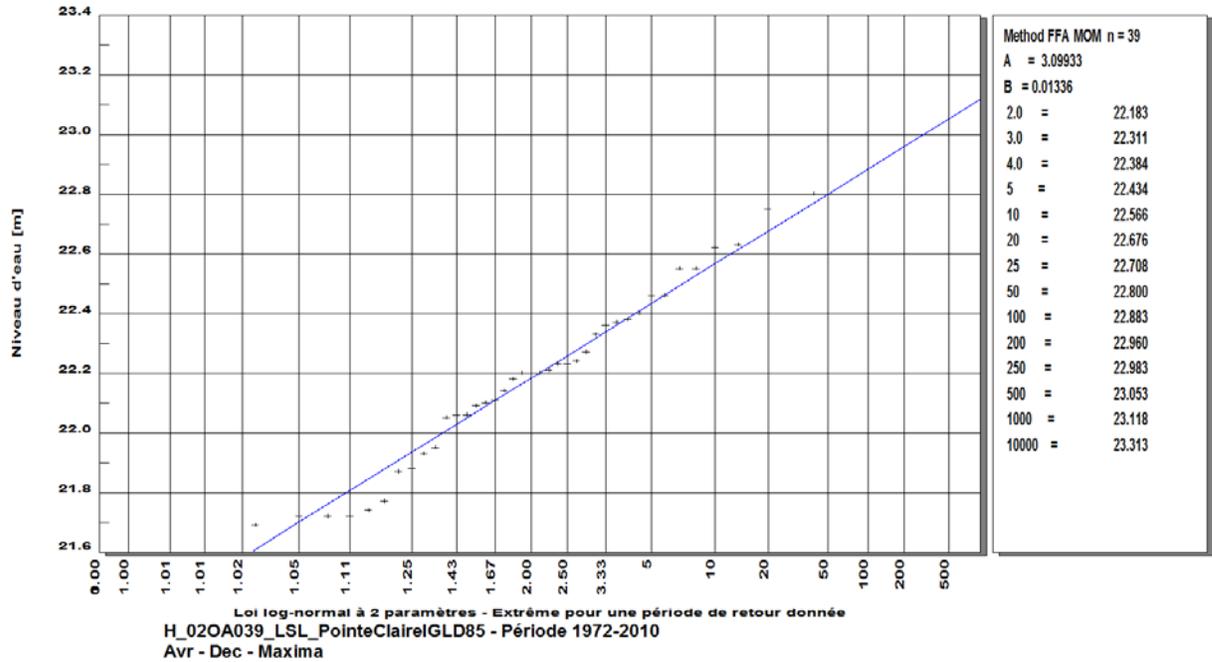


Figure 3-3 Ajustement de la loi Log-Normale aux niveaux maxima annuels pour la période d'eau libre 1972-2010.

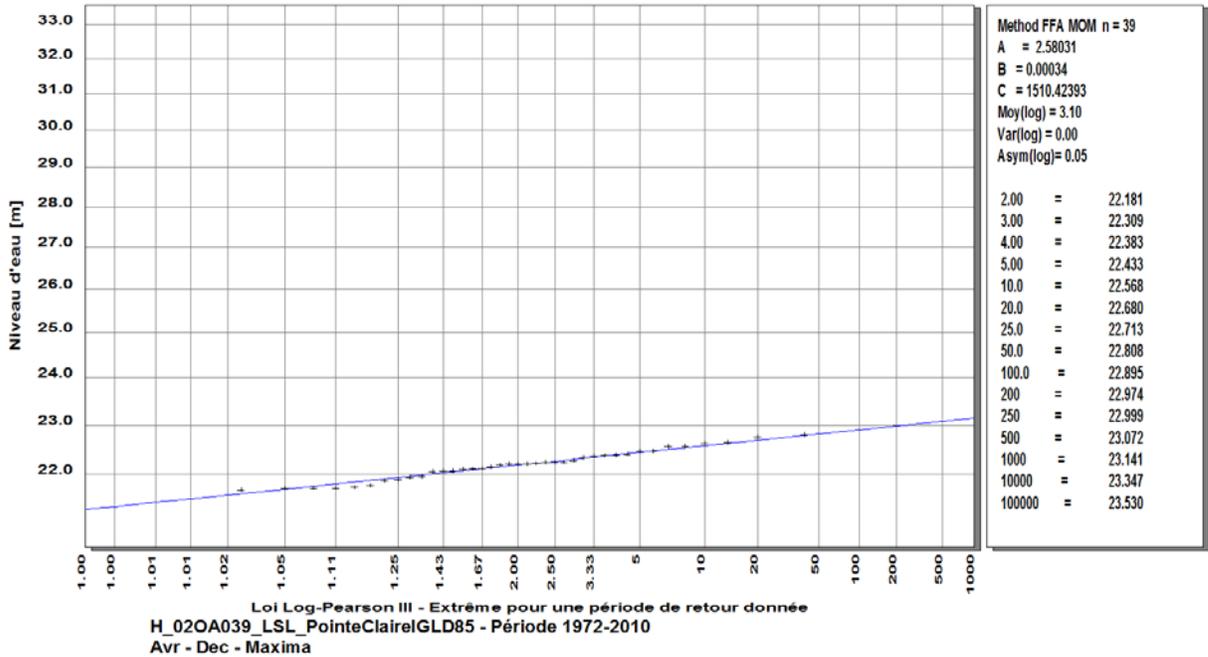


Figure 3-4 Ajustement de la loi Log-Pearson III aux niveaux maxima annuels pour la période d'eau libre 1972-2010.

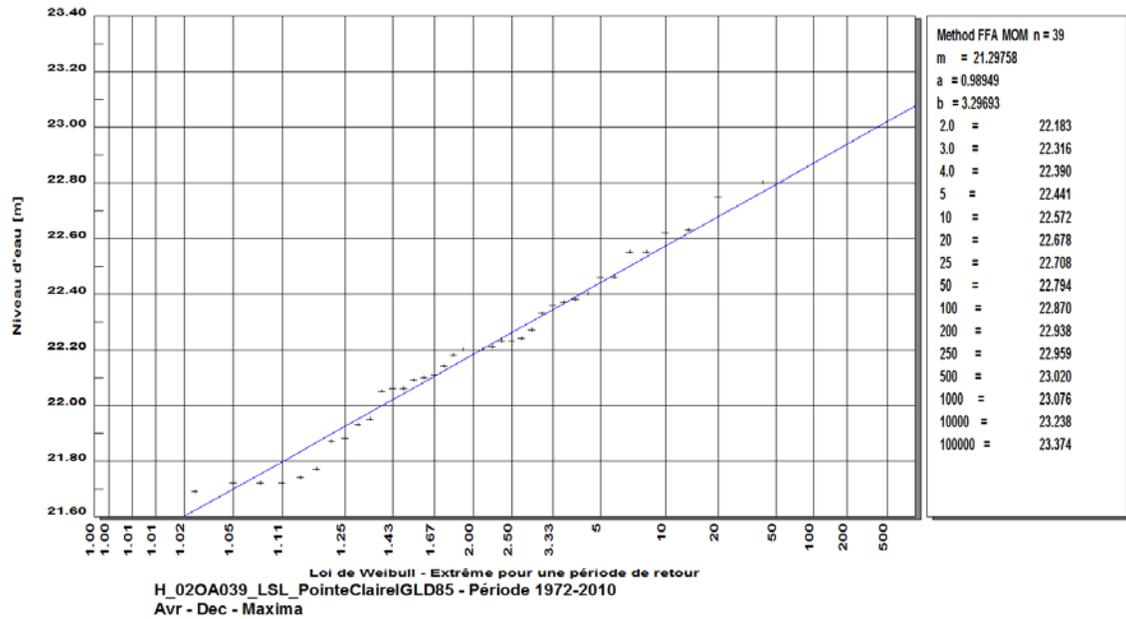


Figure 3-5 Ajustement de la loi Weibull aux niveaux maxima annuels pour la période d'eau libre 1972-2010.

Tableau 3-1 Quantiles du maximum annuel du niveau d'eau moyen journalier du lac Saint-Louis pour la période 1972-2010.

Période de retour (années)	GEV (m)	Log-Normale 2 params (m)	Log-Pearson III (m)	Weibull (m)	Retenu (m)
2	22,18	22,18	22,18	22,18	22,18
3	22,31	22,31	22,31	22,32	22,32
4	22,39	22,38	22,38	22,39	22,39
5	22,44	22,43	22,43	22,44	22,44
10	22,58	22,57	22,57	22,57	22,57
20	22,69	22,68	22,68	22,68	22,69
25	22,72	22,71	22,71	22,71	22,72
50	22,80	22,80	22,81	22,79	22,80
100	22,87	22,88	22,90	22,87	22,88
200	22,93	22,96	22,97	22,94	22,96
250	22,95	22,98	23,00	22,96	22,98
500	22,99	23,05	23,07	23,02	23,05

4 Quantiles de crues du fleuve Saint-Laurent à LaSalle

Les niveaux d'eau des quantiles de crues établis au chapitre précédent permettent de calculer le débit du fleuve à l'exutoire du lac Saint-Louis avec les relations niveau-débit établies au chapitre 3. Les résultats apparaissent au tableau 4-1.

Tableau 4-1 Quantiles annuels du débit moyen journalier du fleuve à LaSalle pour la période 1972-2010 obtenus de la relation niveau-débit produite avec les résultats de simulations H2D2 d'Environnement Canada et la relation niveau-débit de Hydat.

Période de retour (années)	Niveau d'eau à Pointe-Claire (m)	Débit à LaSalle E.C. (m ³ /s)	Débit à LaSalle Hydat (m ³ /s)
2	22,18	11 478	11 559
3	22,32	11 908	12 072
4	22,39	12 125	12 331
5	22,44	12 279	12 518
10	22,57	12 683	13 010
20	22,69	13 057	13 470
25	22,72	13 151	13 587
50	22,80	13 401	13 900
100	22,88	13 652	14 125
200	22,96	13 904	14 534
250	22,98	13 967	14 614
500	23,05	14 188	14 897

La relation niveau-débit établie avec les données de HYDAT donne un débit sensiblement identique près de la cote 22 m, mais supérieur de 700 m³/s à la cote 23 m. Pour demeurer conservateur, on retient les valeurs obtenues de la relation niveau-débit HYDAT.

5 Débit à l'étiage

Le débit à l'étiage s'avère celui correspondant au plus bas niveau d'eau observé depuis le début des années 1970. Comme mentionné au chapitre 2, le niveau bas extrême de 20,41 m a été atteint le 2 février 2003. À ce niveau, correspond un débit de 5 929 m³/s selon la relation niveau-débit obtenue avec les données HYDAT et 6 254 m³/s avec la relation niveau-débit obtenue à partir des couples de points provenant du modèle d'Environnement-Canada.

Pour demeurer conservateur, la valeur de 5 900 m³/s est retenue.

Tableau 5-1 Quantiles annuels du débit moyen journalier du fleuve à LaSalle pour la période 1972-2010 obtenus de la relation niveau-débit produite avec les résultats de simulations H2D2 d'Environnement Canada et la relation niveau-débit de Hydat.

Étiage	Niveau d'eau à Pointe-Claire (m)	Débit à LaSalle E.C. (m ³ /s)	Débit à LaSalle Hydat (m ³ /s)
2003-02-02	20,41	6 254	5 929

6 Valeur médiane du débit du fleuve

Les conditions fréquentes de débit sont représentées par la valeur médiane du débit pour la période 1972-2010. La figure suivante présente le pourcentage de non-dépassement du niveau d'eau du lac Saint-Louis durant cette période. La valeur médiane est de 21,35 m.

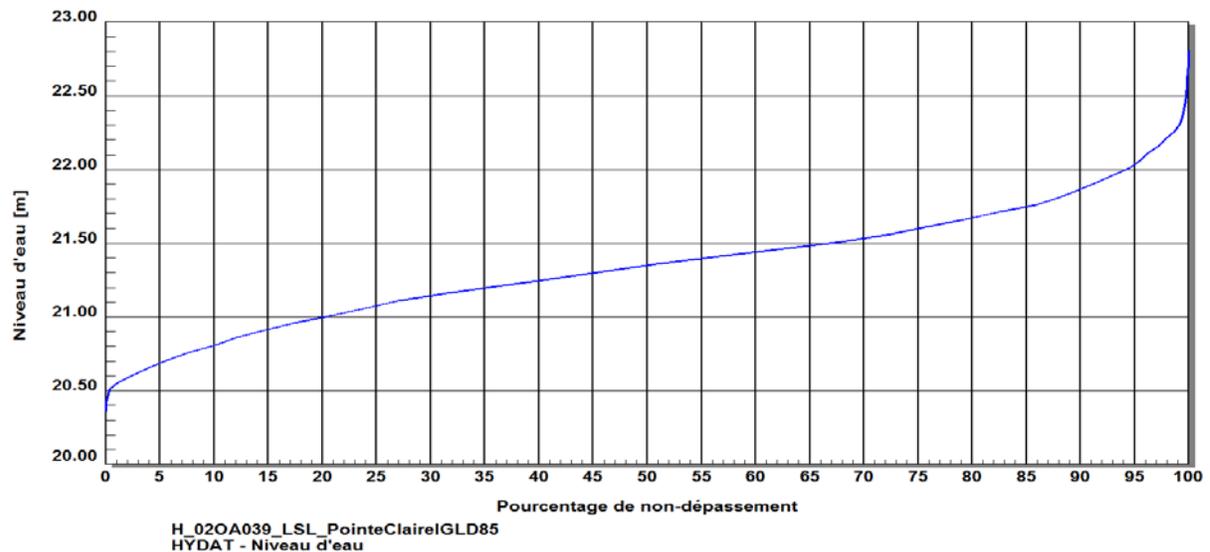


Figure 6-1 Pourcentage de non-dépassement du niveau d'eau du lac Saint-Louis.

À ce niveau, correspond un débit du fleuve de 8 725 m³/s.

7 Sélection des cas pour simulations

7.1 Conditions générales pour les simulations

Lors de la rencontre de démarrage, on a souligné que l'épaisseur minimale de la couche de protection en enrochement devait être de 1,83 m (consulter également l'annexe A). Pour évaluer la sensibilité à du régime hydrodynamique à un dépassement de cette épaisseur minimum (tolérance lors de la mise en place), on ajoute 1/3 de mètre (33 cm) de plus que le minimum requis. Les simulations en conditions futures sont donc réalisées avec cette épaisseur additionnelle de recouvrement. Cette épaisseur additionnelle respecte la profondeur d'eau minimum envisagée par le Port de Montréal pour le chenal maritime qui atteindrait 11,6 m de profondeur minimum garantie. L'analyse complète est décrite à l'annexe A.

7.2 Simulations et débits à imposer

Le tableau 7-1 présente le détail des simulations que devait réaliser Environnement Canada. Elles sont au nombre de cinq.

La simulation 1 représente les conditions fréquentes (débit médian) telles qu'établies au chapitre 6. La simulation 2 représente les conditions d'étiage. Le résultat présenté au chapitre 5 est arrondi à 5 900 m³/s. La simulation 3 représente les conditions de débit vicennal, soit 13 470 m³/s, la simulation 4 le débit de crue centennal et la simulation 5 le débit de crue de récurrence 2 ans. Les débits pour ces trois conditions sont tirés du tableau 4-1.

Tableau 7-1 Détails des simulations à réaliser par Environnement Canada.

Simulation	Description	Débit (m ³ /s)	Justification
1A	Débit médian - Actuel	8 725	Conditions fréquentes
1F	Débit médian - Futur	8 725	
2A	Étiage - Actuel	5 900	Profondeur d'eau minimale
2F	Étiage - Futur	5 900	
3A	Crue 20 ans - Actuel	13 470	Étude d'impact
3F	Crue 20 ans - Futur	13 470	
4A	Crue 100 ans - Actuel	14 125	Étude d'impact
4F	Crue 100 ans - Futur	14 125	
5A	Crue 2 ans - Actuel	11 560	Étude d'impact
5F	Crue 2 ans - Futur	11 560	

Les conditions imposées aux autres limites ouvertes par Environnement Canada sont présentées aux sections suivantes.

7.3 Conditions aux limites pour la simulation 1

Q_LaSalle : 8 725 m³/s (Débit GENIVAR/MTQ)

Autres débits (EC)

Q_Mille-Îles/Prairies : 1 142 m³/s

Q_Assomption : 54 m³/s

Q_Richelieu : 326 m³/s

Q_Yamaska : 52 m³/s

Q_Saint_Francois : 15 m³/s

Q_Nicolet : 30 m³/s

Q_Maskinonge : 16 m³/s

Q_DuLoup : 16 m³/s

H_Trois_Rivières : 4,06 m

7.4 Conditions aux limites pour la simulation 2

Q_LaSalle : 5 900 m³/s (Débit GENIVAR/MTQ)

Autres débits (EC)

Q_Mille-Îles/Prairies : 728 m³/s

Q_Assomption : 32 m³/s

Q_Richelieu : 240 m³/s

Q_Yamaska : 29 m³/s

Q_Saint_Francois : 128 m³/s

Q_Nicolet : 19 m³/s

Q_Maskinonge : 8 m³/s

Q_DuLoup : 11 m³/s

H_Trois_Rivières : 2,75 m

7.5 Conditions aux limites pour la simulation 3

Q_LaSalle : 13 470 m³/s (Débit GENIVAR/MTQ)

Autres débits (EC)

Q_Mille-Îles/Prairies : 3 824 m³/s

Q_Assomption : 502 m³/s

Q_Richelieu : 1044 m³/s

Q_Yamaska : 345 m³/s

Q_Saint_Francois : 850 m³/s

Q_Nicolet : 119 m³/s

Q_Maskinonge : 97 m³/s

Q_DuLoup : 97 m³/s

H_Trois_Rivières : 6,16 m

7.6 Conditions aux limites pour la simulation 4

Q_LaSalle : 14 125 m³/s (Débit GENIVAR/MTQ)

Autres débits (EC)

Q_Mille-Îles/Prairies : 5 374 m³/s

Q_Assomption : 550 m³/s

Q_Richelieu : 1 110 m³/s

Q_Yamaska : 410 m³/s

Q_Saint_Francois : 980 m³/s

Q_Nicolet : 380 m³/s

Q_Maskinonge : 122 m³/s

Q_DuLoup : 107 m³/s

H_Trois_Rivières : 7,24 m

7.7 Conditions aux limites pour la simulation 5

Q_LaSalle : 11 560 m³/s (Débit GENIVAR/MTQ)

Autres débits (EC)

Q_Mille-Îles/Prairies : 2 772 m³/s

Q_Assomption : 332 m³/s

Q_Richelieu : 898 m³/s

Q_Yamaska : 220 m³/s

Q_Saint_Francois : 572 m³/s

Q_Nicolet : 130 m³/s

Q_Maskinonge : 105 m³/s

Q_DuLoup : 92 m³/s

H_Trois_Rivières : 5,53 m

8 Références

- [1] Aquaprxis inc. « *Hydrologie de la rivière des Mille Îles. Étude des crues* ». Rapport technique 10107-100. 2007. 102 p.
- [2] GENIVAR, Aquaprxis « *Bilan hydrologique du lac des Deux Montagnes* ». Pour la Ville de Laval. En cours. xx p.
- [3] Cantin J.F., 2000. « Reassessment of stage-discharge relationship between Lac des Deux Montagnes and Lac Saint-Louis ». Environnement Canada. Meteorological Service of Canada. Hydrology Section. Report RT-102b. ISBN 0-662-29445-9. Minister of Goods and Services Canada. 2000. 13 p.
- [4] Favre *et al* « *Analyse statistique et expertise hydrologique liées aux écoulements autour de l'Archipel de Montréal* ». Rapport final. Département de mathématiques et statistiques, Université Laval, mai 2010. 89 p.
- [5] Fortin V. « *Révision de la relation niveau-débit pour la rivière des Mille Îles et quelques précisions sur l'analyse fréquentielle bivariée* ». Pour la Ville de Laval, 16 août 2011. 10 p.

Ministère des Transports du Québec

Pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine Recouvrement du tunnel Annexe C. Résultats des simulations

Ministère des Transports du Québec

Pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine Annexe C. Résultats des simulations

Par



Pierre Dupuis, ing., M. Sc.

Équipe de réalisation

Ministère des Transports du Québec

Chargé de projet : Mourad El Hila, ing., M. Sc.

GENIVAR inc.

Directeur de projet : Pierre Pelletier, ing., M. Sc.

Spécialiste hydraulicien : Pierre Dupuis, ing., M. Sc.

Environnement Canada

Service météorologique du Canada, Section Hydrologie et Écohydraulique

Modélisateur : Olivier Champoux

Table des matières

1	<i>Introduction</i>	1
2	<i>Bathymétrie</i>	2
3	<i>Simulations réalisées</i>	5
4	<i>Simulation 1 – 8 725 m³/s à LaSalle (débit médian)</i>	6
4.1	Cote de la surface – Simulation 1F (débit médian)	7
4.2	Profondeur d'eau (m) – Simulation 1F (débit médian)	9
4.4	Module de vitesse (m/s) – Simulation 1F (débit médian)	11
4.5	Orientation du courant – Simulation 1F (débit médian)	13
4.6	Nombre de Froude – Simulation 1F (débit médian).....	14
5	<i>Simulation 2 – 5 900 m³/s à LaSalle (Étiage sévère)</i>	15
5.1	Cote de la surface – Simulation 2F (étiage).....	16
5.2	Profondeur d'eau (m) – Simulation 2F (étiage).....	18
5.3	Module de vitesse (m/s) – Simulation 2F (étiage)	19
5.4	Orientation du courant (Azimut) – Simulation 2F (étiage).....	21
5.5	Nombre de Froude – Simulation 2F (étiage).....	22
6	<i>Simulation 3 – 13 470 m³/s à LaSalle (Crue 20 ans)</i>	23
6.1	Cote de la surface – Simulation 3F (crue 20 ans)	24
6.2	Profondeur d'eau (m) – Simulation 3F (crue 20 ans)	26
6.3	Module de vitesse (m/s) – Simulation 3F (crue 20 ans)	27
6.4	Orientation du courant (Azimut) – Simulation 3F (crue 20 ans).....	29
6.5	Nombre de Froude – Simulation 3F (crue 20 ans).....	30
7	<i>Simulation 4 – 14 125 m³/s à LaSalle (crue 100 ans)</i>	31
7.1	Cote de la surface – Simulation 4F (crue 100 ans).....	32
7.2	Profondeur d'eau (m) – Simulation 4F (crue 100 ans).....	34
7.3	Module de vitesse (m/s) – Simulation 4F (crue 100 ans)	35
7.4	Orientation du courant (Azimut) – Simulation 4F (crue 100 ans)	37
7.5	Nombre de Froude – Simulation 4F (crue 100 ans).....	38
8	<i>Simulation 5 – 11 560 m³/s à LaSalle (crue 2 ans)</i>	39

8.1	Cote de la surface – Simulation 5F (crue 2 ans)	40
8.2	Profondeur d'eau (m) – Simulation 5F (crue 2 ans)	42
8.3	Module de vitesse (m/s) – Simulation 5F (crue 2 ans)	43
8.4	Orientation du courant (Azimut) – Simulation 5F (crue 2 ans).....	45
8.5	Nombre de Froude – Simulation 5F (crue 2 ans).....	46

Liste des figures

Figure 2-1	Cote géodésique du fond actuel au pont-tunnel.	2
Figure 2-2	Cote géodésique du fond avec 2,16 m de recouvrement minimum.	3
Figure 2-3	Recouvrement additionnel requis pour obtenir une couche d'au moins 2,16 m au-dessus du tunnel.	4
Figure 4-1	Cote de la surface pour la simulation 1F (débit médian).	7
Figure 4-2	Variation du niveau de la surface (m) pour la simulation 1F (débit médian).	8
Figure 4-3	Variation de la profondeur d'eau (m) pour la simulation 1F (débit médian).	10
Figure 4-4	Module de vitesse pour la simulation 1F (débit médian).	11
Figure 4-5	Variation du module de vitesse (m/s) pour la simulation 1F (débit médian).	12
Figure 4-6	Orientation du courant pour la simulation 1F (débit médian).	13
Figure 4-7	Nombre de Froude pour la simulation 1F (débit médian).	14
Figure 5-1	Cote de la surface pour la simulation 2F (étiage).	16
Figure 5-2	Variation du niveau de la surface (m) pour la simulation 2F (étiage).	17
Figure 5-3	Profondeur d'eau pour la simulation 2F (étiage).	18
Figure 5-4	Module de vitesse pour la simulation 2F (étiage).	19
Figure 5-5	Variation du module de vitesse (m/s) pour la simulation 2F (étiage).	20
Figure 5-6	Orientation du courant (azimut) pour la simulation 2F (étiage).	21
Figure 5-7	Nombre de Froude pour la simulation 2F (étiage).	22
Figure 6-1	Cote de la surface pour la simulation 3F (crue 20 ans).	24
Figure 6-2	Variation du niveau de la surface (m) pour la simulation 3F (crue 20 ans).	25
Figure 6-3	Profondeur d'eau pour la simulation 3F (crue 20 ans).	26
Figure 6-4	Module de vitesse (m/s) pour la simulation 3F (crue 20 ans).	27
Figure 6-5	Variation du module de vitesse (m/s) pour la simulation 3F (crue 20 ans).	28
Figure 6-6	Orientation du courant (azimut) pour la simulation 3F (crue 20 ans).	29
Figure 6-7	Nombre de Froude pour la simulation 3F (crue 20 ans).	30
Figure 7-1	Cote de la surface pour la simulation 4F (crue 100 ans).	32
Figure 7-2	Variation du niveau de la surface (m) pour la simulation 4F (crue 100 ans).	33
Figure 7-3	Profondeur d'eau pour la simulation 4F (crue 100 ans).	34
Figure 7-4	Module de vitesse (m/s) pour la simulation 4F (crue 100 ans).	35
Figure 7-5	Variation du module de vitesse (m/s) pour la simulation 4F (crue 100 ans).	36
Figure 7-6	Orientation du courant (azimut) pour la simulation 4F (crue 100 ans).	37
Figure 7-7	Nombre de Froude pour la simulation 4F (crue 100 ans).	38
Figure 8-1	Cote de la surface pour la simulation 5F (crue 2 ans).	40
Figure 8-2	Variation du niveau de la surface (m) pour la simulation 5F (crue 2 ans).	41
Figure 8-3	Profondeur d'eau pour la simulation 5F (crue 2 ans).	42
Figure 8-4	Module de vitesse (m/s) pour la simulation 5F (crue 2 ans).	43
Figure 8-5	Variation du module de vitesse (m/s) pour la simulation 5F (crue 2 ans).	44
Figure 8-6	Orientation du courant (azimut) pour la simulation 5F (crue 2 ans).	45
Figure 8-7	Nombre de Froude pour la simulation 5F (crue 2 ans).	46

1 Introduction

Cinq conditions de débit ont été simulées pour obtenir d'abord les conditions actuelles d'écoulement puis cinq autres pour obtenir les conditions qui prévaudront à la suite des travaux de réhabilitation. Ceci donne un total de dix simulations. Les simulations ont été réalisées par Environnement Canada avec leur modèle hydrodynamique 2D couvrant le fleuve Saint-Laurent, du port de Montréal jusqu'à Trois-Rivières. La bathymétrie pour les conditions actuelles a été produite par Environnement Canada à partir des relevés les plus récents obtenus du Service hydrographique du Canada (SHC). GENIVAR a obtenu un sous-domaine densifié du maillage original d'Environnement Canada dans la région du tunnel ainsi que des plans tels que construits obtenus du ministère des Transports du Québec (MTQ) pour produire la bathymétrie finale suite aux travaux de réhabilitation.

Pour les fins de cette étude, GENIVAR a opté pour un recouvrement d'une épaisseur de 2,16 m pour évaluer la sensibilité du régime hydrodynamique à un recouvrement additionnel de l'ordre d'un tiers de mètre et permettre une certaine tolérance lors de la pose de l'enrochement. GENIVAR a également retenu la pente de 6 Horizontal pour 1 Vertical pour prolonger le recouvrement jusqu'à ce que le remblai intercepte le fond actuel. Cette pente douce est requise pour permettre au matériau d'agir comme butée sur une distance appréciable pour éviter la saltation de la roche de recouvrement, notamment lors du passage de navires.

Nonobstant les effets sur la capacité structurale du tunnel, cette valeur de 2,16 m est supérieure de 0,33 m à celle établie par le consortium CCDGP (Cima, CNRC-NRC, DESSAU, GENIVAR, PARSONS) en novembre 2010. Elle permet toutefois de démontrer, et les résultats présentés viennent supporter cette assertion, que les conditions hydrodynamiques sont très peu perturbées à la suite d'une réhabilitation avec cette épaisseur additionnelle de 0,33 m. On verra que dans l'éventualité où le concepteur désire ajouter une épaisseur additionnelle pour se prémunir contre l'influence des jets provenant des hélices des navires lorsque les niveaux du fleuve sont bas et que le dégagement est à son minimum, les résultats de l'étude hydraulique démontrent que cet ajout supplémentaire ne modifie pas les conditions hydrodynamiques locales de façon appréciable. On comprend donc que le régime hydrodynamique sera encore moins perturbées pour le recouvrement minimal requis de 1,83 m. Les résultats obtenus pour les conditions présentes et les conditions post travaux sont à toute fin pratique semblables et on ne peut discerner les différences par comparaison visuelle des résultats.

Voici pourquoi nous présentons essentiellement les résultats obtenus pour les conditions post-travaux dans cette annexe. Pour les principales variables (niveau de la surface de l'eau, module de vitesse), nous présentons également les différences entre les conditions pré et post-travaux. Cette approche permet de mieux cerner les zones pour lesquelles les changements sont les plus importants. À la section 2, nous présentons la bathymétrie actuelle, la bathymétrie future et la différence entre les deux. Aux autres sections, nous présentons les résultats obtenus en conditions futures ainsi que la différence entre les conditions futures et les conditions actuelles.

Le lecteur notera que les différences observées se situent au niveau de la précision attendue des résultats du modèle hydrodynamique. Ceci s'explique par la grande profondeur du fleuve dans cette région.

2 Bathymétrie

Les figures qui suivent présentent la bathymétrie actuelle (figure 2-1), la bathymétrie avec un recouvrement de 2,16 m au-dessus du pont-tunnel (figure 2-2) et finalement la différence entre le cas avec recouvrement minimum de 2,16 m et le cas actuel (figure 2-3). Cette dernière figure permet d'apprécier qu'elles sont les zones pour lesquelles un ajout d'empierrement est requis.

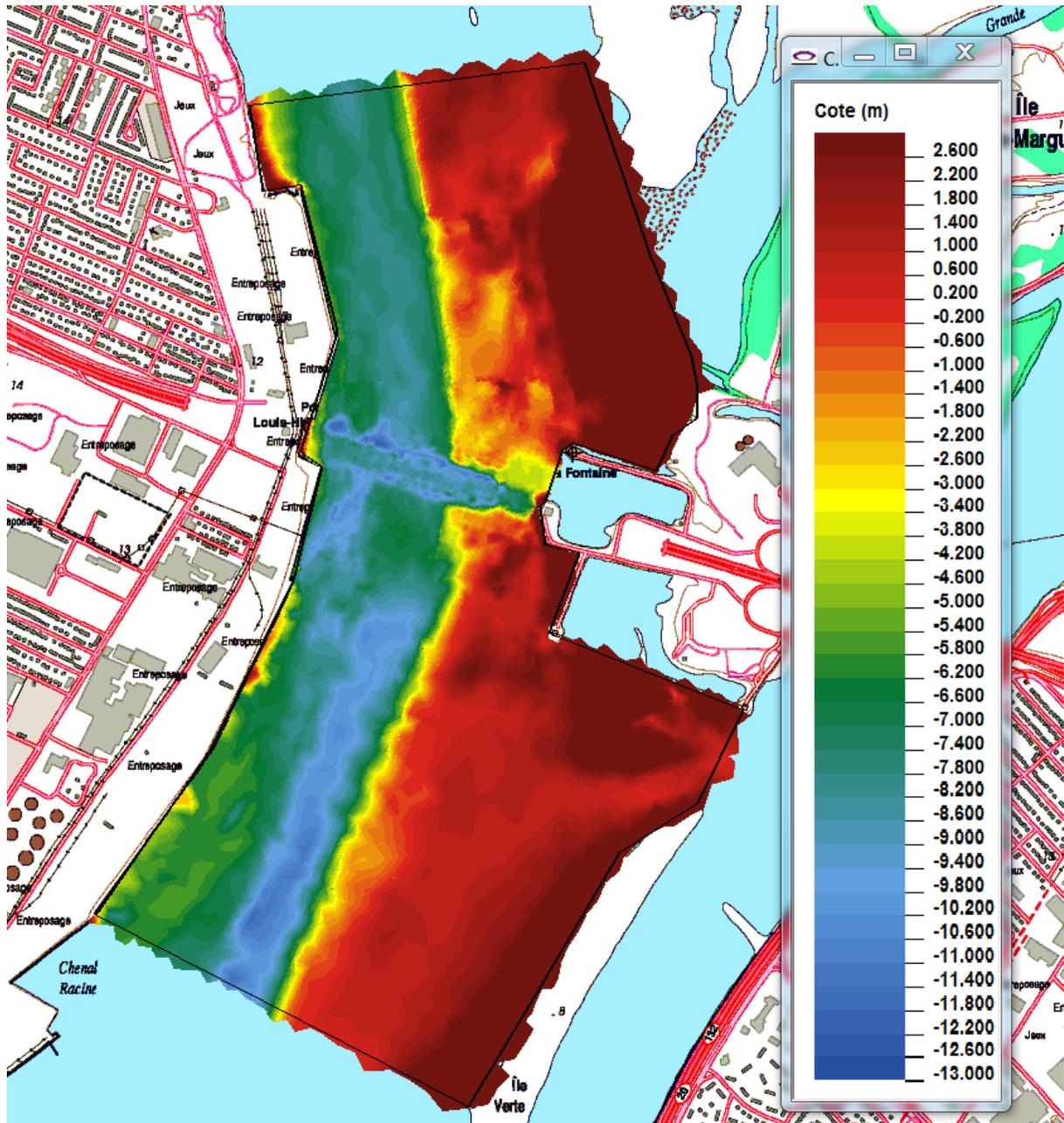


Figure 2-1 Cote géodésique du fond actuel au pont-tunnel.

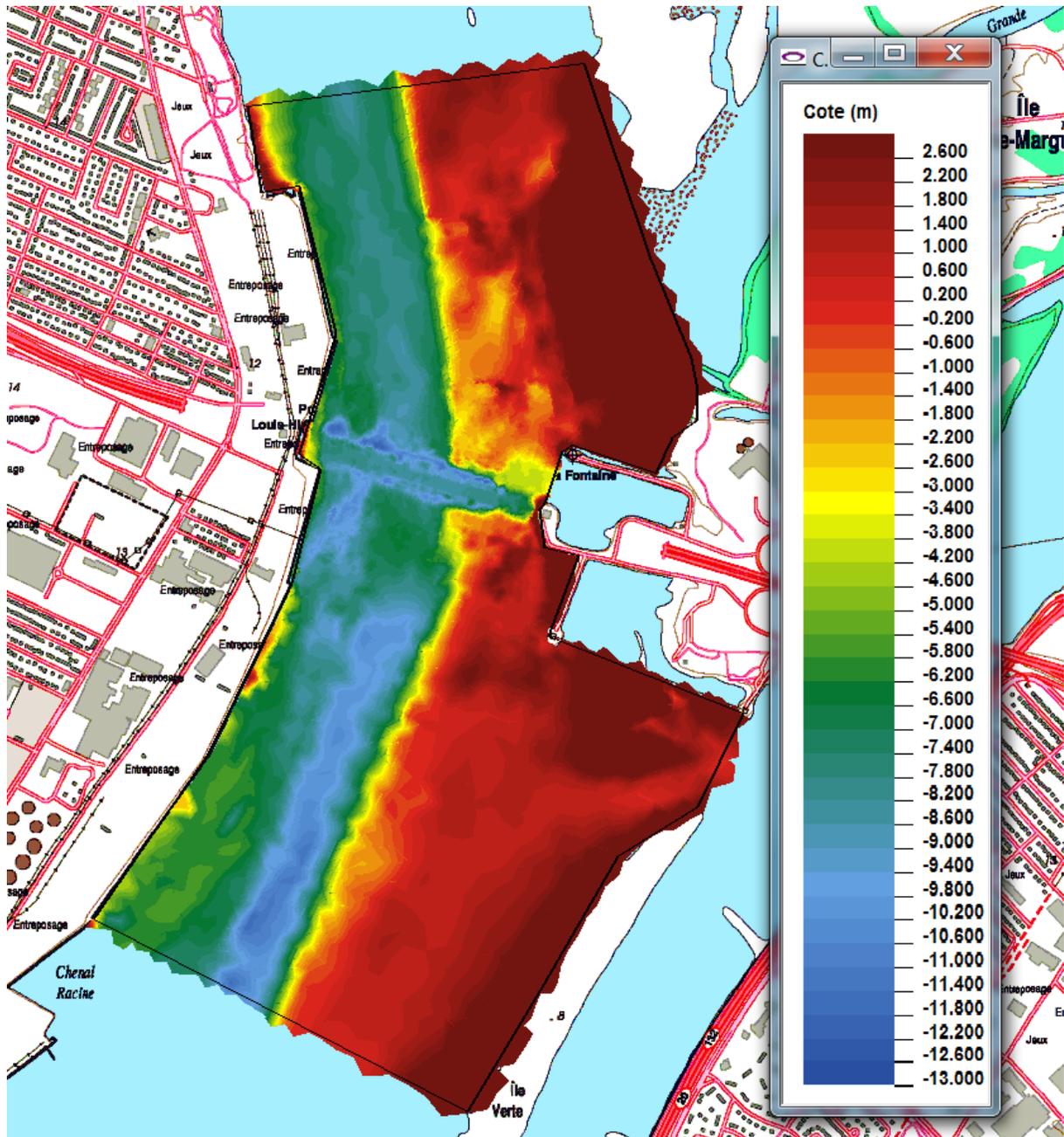


Figure 2-2 Cote géodésique du fond avec 2,16 m de recouvrement minimum.



Figure 2-3 Recouvrement additionnel requis pour obtenir une couche d'au moins 2,16 m au-dessus du tunnel.

3 Simulations réalisées

Le tableau 3-1 présente le détail des simulations réalisées par Environnement Canada, qui sont au nombre de dix, soit cinq en conditions de débit pour les conditions actuelles et cinq pour les conditions postérieures aux travaux. La démarche ayant mené à la sélection de ces débits est explicitée à l'annexe B traitant de l'hydrologie du fleuve Saint-Laurent pour l'Archipel de Montréal. Rappelons que pour chaque simulation, la lettre A indique la condition actuelle et la lettre F la condition future.

La simulation 1 représente les conditions fréquentes (débit médian) telles qu'établies au chapitre 6. La simulation 2 représente les conditions d'étiage. La simulation 3 représente les conditions de débit vicennal, la simulation 4 le débit de crue centennal et la simulation 5 le débit de crue de récurrence 2 ans.

Tableau 3-1 Détails des simulations à réaliser par Environnement Canada.

Simulation	Description	Débit (m ³ /s)	Justification
1A	Débit médian - Actuel	8 725	Conditions fréquentes
1F	Débit médian - Futur	8 725	
2A	Étiage - Actuel	5 900	Profondeur d'eau minimale
2F	Étiage - Futur	5 900	
3A	Crue 20 ans - Actuel	13 470	Étude d'impact
3F	Crue 20 ans - Futur	13 470	
4A	Crue 100 ans - Actuel	14 125	Étude d'impact
4F	Crue 100 ans - Futur	14 125	
5A	Crue 2 ans - Actuel	11 560	Étude d'impact
5F	Crue 2 ans - Futur	11 560	

Les résultats pour les conditions futures sont présentés. On ne peut détecter visuellement les différences entre les sorties graphiques pour les conditions pré et post-travaux. Pour faciliter l'interprétation, on présente plutôt les différences entre les deux simulations réalisées pour un même débit, ce qui facilite la localisation et la magnitude des zones de variations. On en conclut qu'à toute fin pratique les travaux ne modifient pas les conditions hydrodynamiques

Les figures sont commentées au chapitre 4, qui traite des résultats pour le débit médian. Pour les autres cas seules les figures sont présentées, les commentaires du chapitre 4 étant toujours pertinents.

4 Simulation 1 – 8 725 m³/s à LaSalle (débit médian)

Q_LaSalle : 8 725 m³/s (Débit GENIVAR/MTQ)

Autres débits (EC)

Q_Mille Îles/Prairies : 1 142 m³/s

Q_L'Assomption : 54 m³/s

Q_Richelieu : 326 m³/s

Q_Yamaska : 52 m³/s

Q_Saint_Francois : 15 m³/s

Q_Nicolet : 30 m³/s

Q_Maskinongé : 16 m³/s

Q_DuLoup : 16 m³/s

H_Trois_Rivières : 4.06 m

4.1 Cote de la surface – Simulation 1F (débit médian)

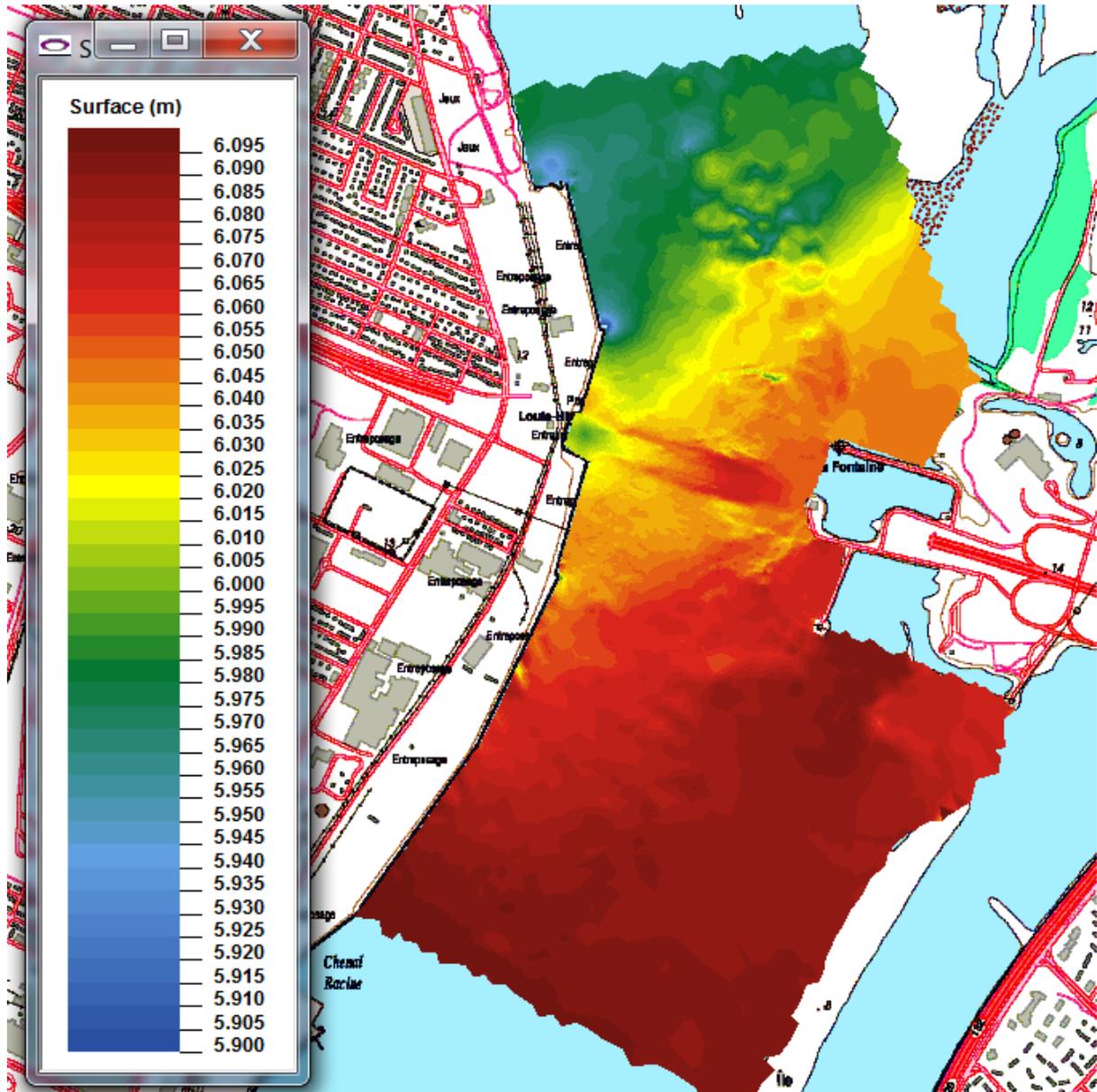


Figure 4-1 Cote de la surface pour la simulation 1F (débit médian).

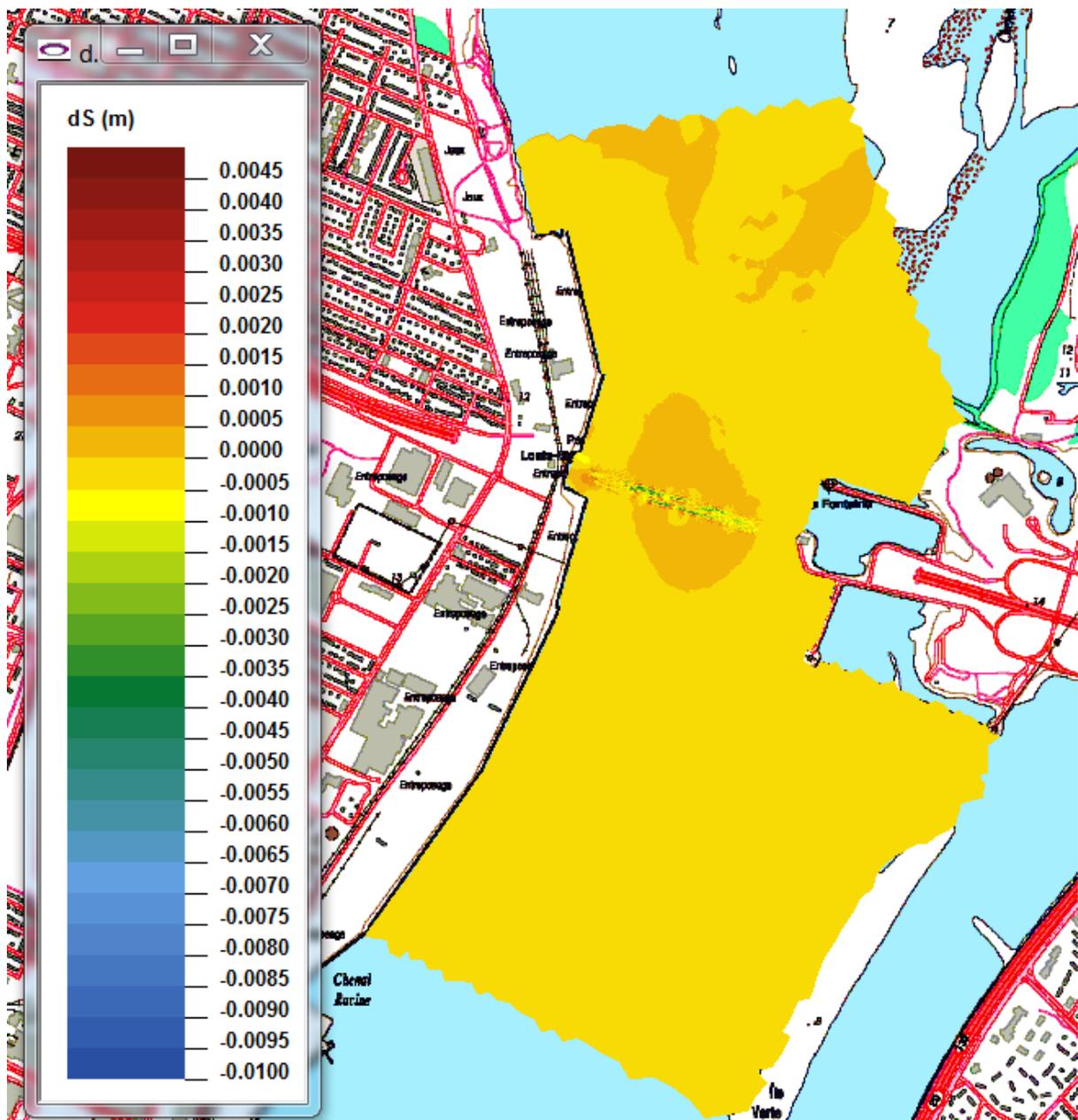
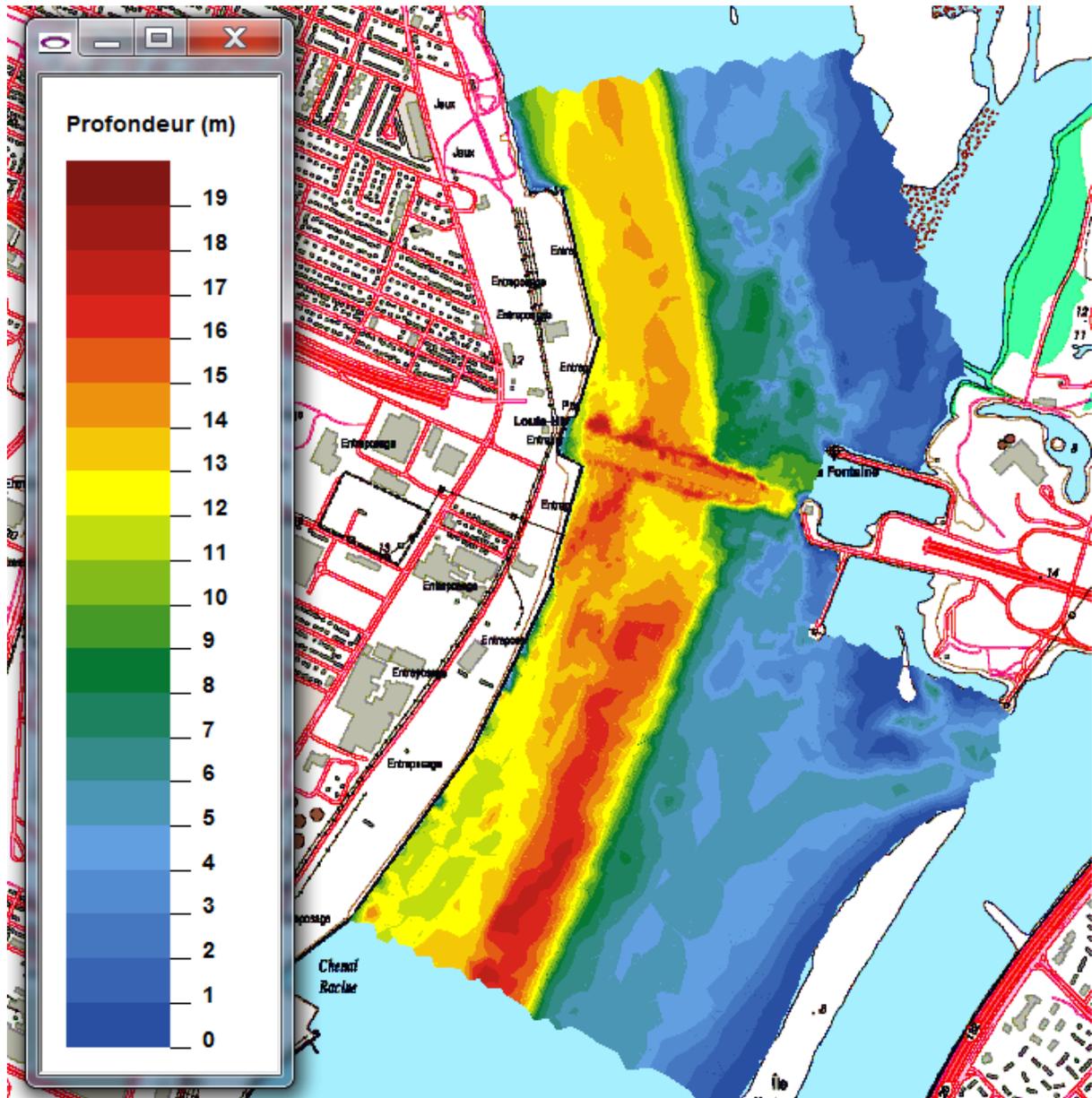


Figure 4-2 Variation du niveau de la surface (m) pour la simulation 1F (débit médian).

Les différences seraient de l'ordre du millimètre et sont localisées à proximité du tunnel. Les zones situées plus au nord nous incitent à penser que nous sommes à la limite de précision du modèle.

4.2 Profondeur d'eau (m) – Simulation 1F (débit médian)



La différence dans les profondeurs d'eau est essentiellement due à l'ajout du remblai supplémentaire. Comme la surface varie très peu, la variation de profondeur représente essentiellement la valeur négative de la hauteur de remblai supplémentaire requis pour assurer un recouvrement de 2,16 m.

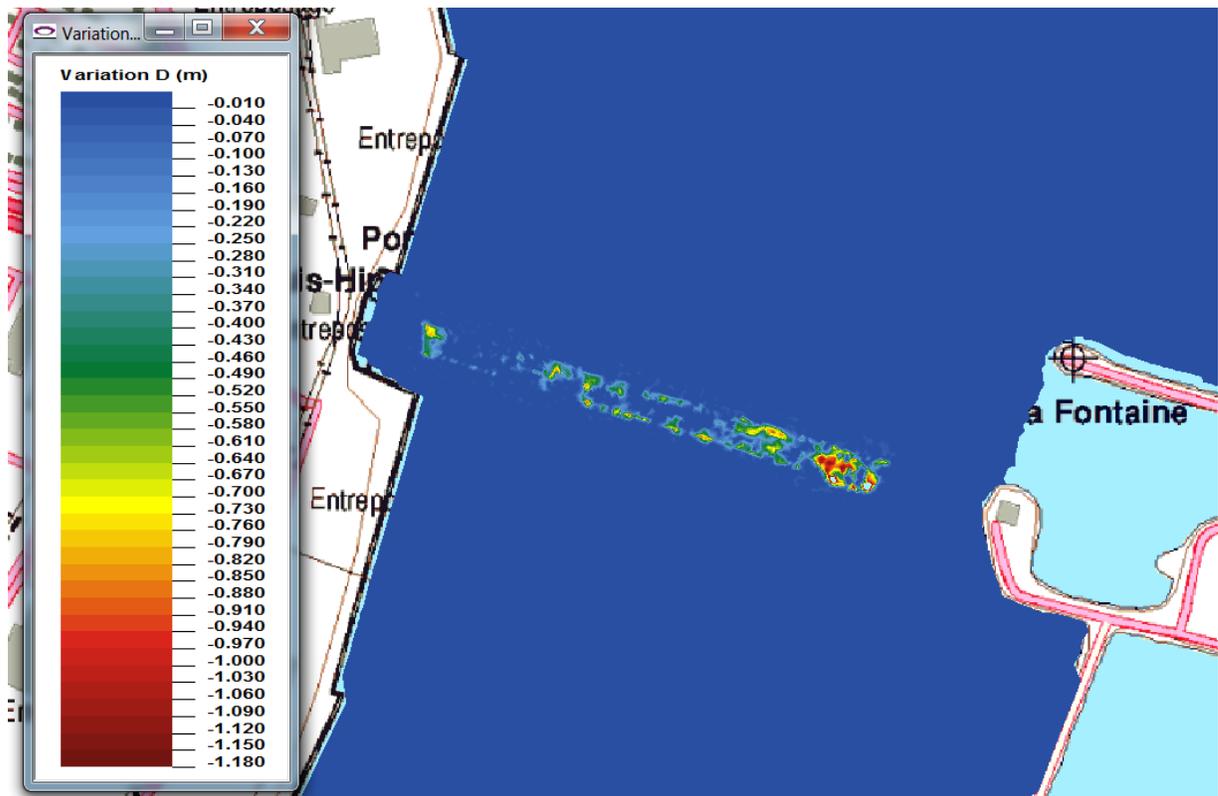


Figure 4-3 Variation de la profondeur d'eau (m) pour la simulation 1F (débit médian).

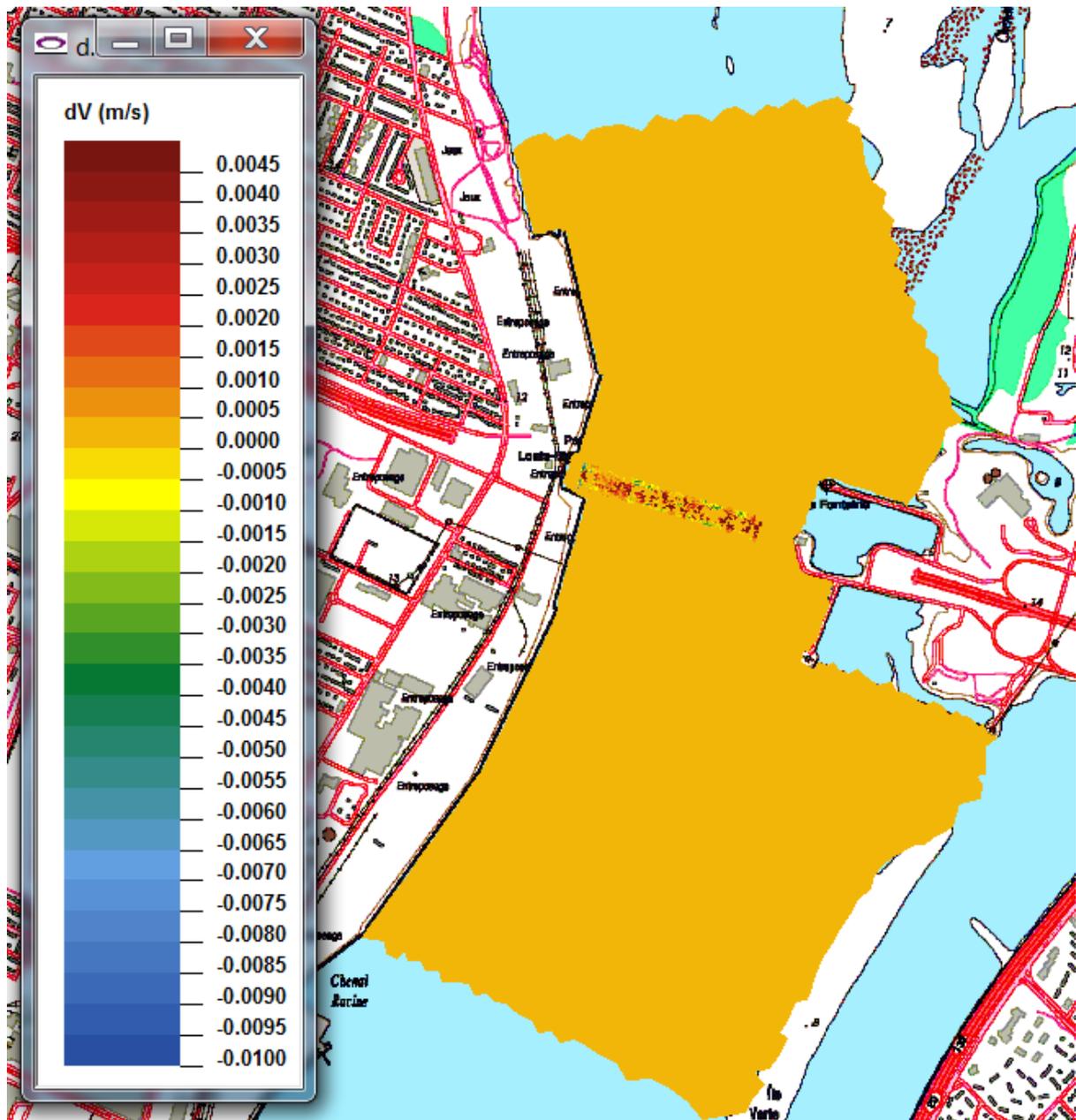


Figure 4-5 Variation du module de vitesse (m/s) pour la simulation 1F (débit médian).

4.5 Orientation du courant – Simulation 1F (débit médian)

L'orientation est donnée selon l'azimut. Un azimut de 0 degré indique un courant en direction nord, 90 degrés un courant vers l'est, 180 un courant vers le sud et ainsi de suite. La figure ci-dessous indique des courants se dirigeant vers le NNE en amont du tunnel et des courants se dirigeant vers le NNO en aval du tunnel. La frontière mince de couleurs arc-en-ciel s'avère un artefact du calcul qui calcule la moyenne entre un azimut près de 360 degrés (nord) et un azimut près de 0 degré (nord également). Les zones arc-en-ciel couvrant une superficie plus importante sont indicatives d'une zone de recirculation.

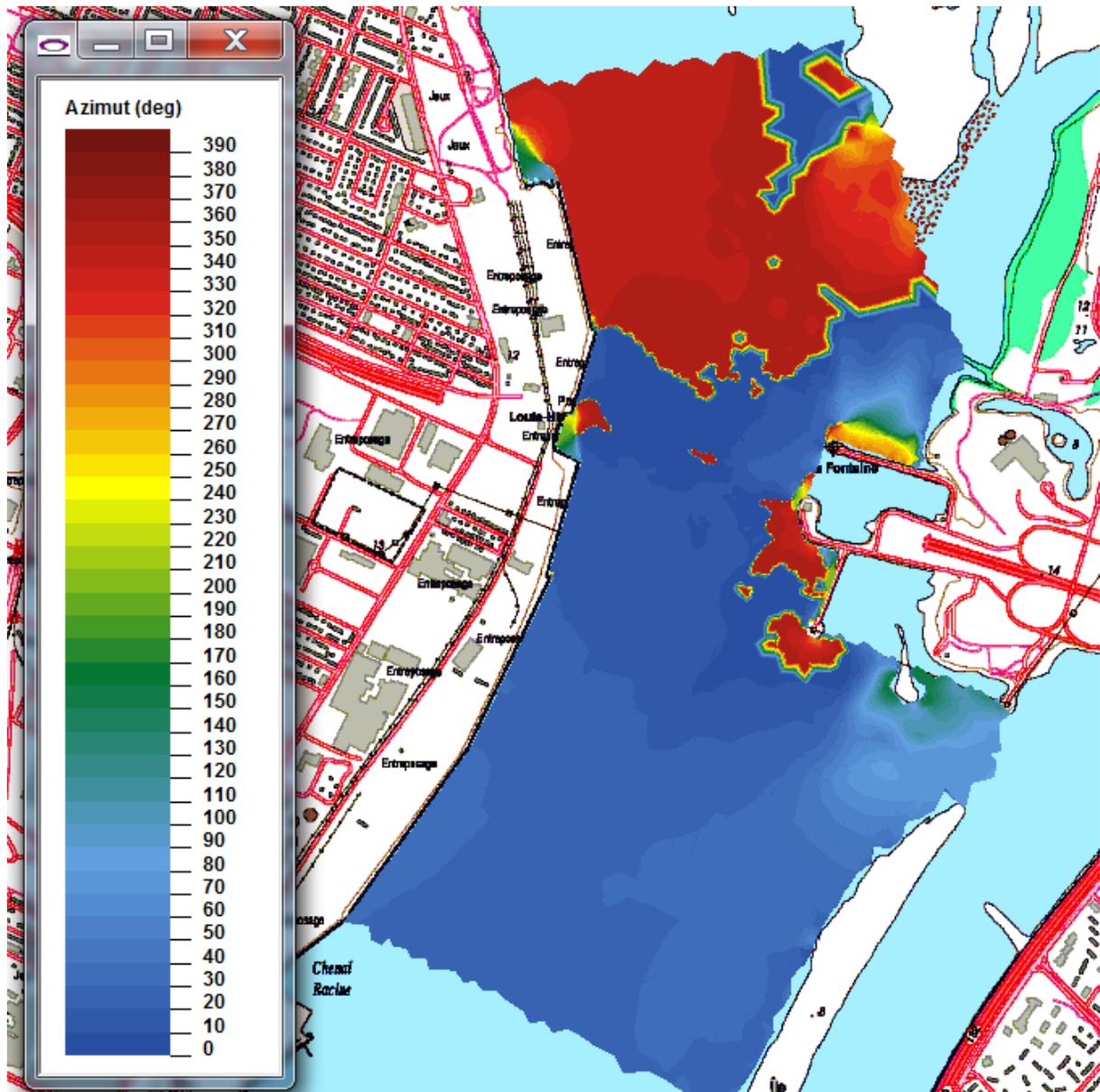


Figure 4-6 Orientation du courant pour la simulation 1F (débit médian).

4.6 Nombre de Froude – Simulation 1F (débit médian)

Le nombre de Froude indique si l'écoulement est torrentiel (supérieur à l'unité) ou fluvial (inférieur à l'unité). Comme les valeurs se situent principalement sous la valeur de 0,2 dans les zones de faible profondeur et de 0,1 dans la zone profonde, l'écoulement est fluvial sur le domaine entier.

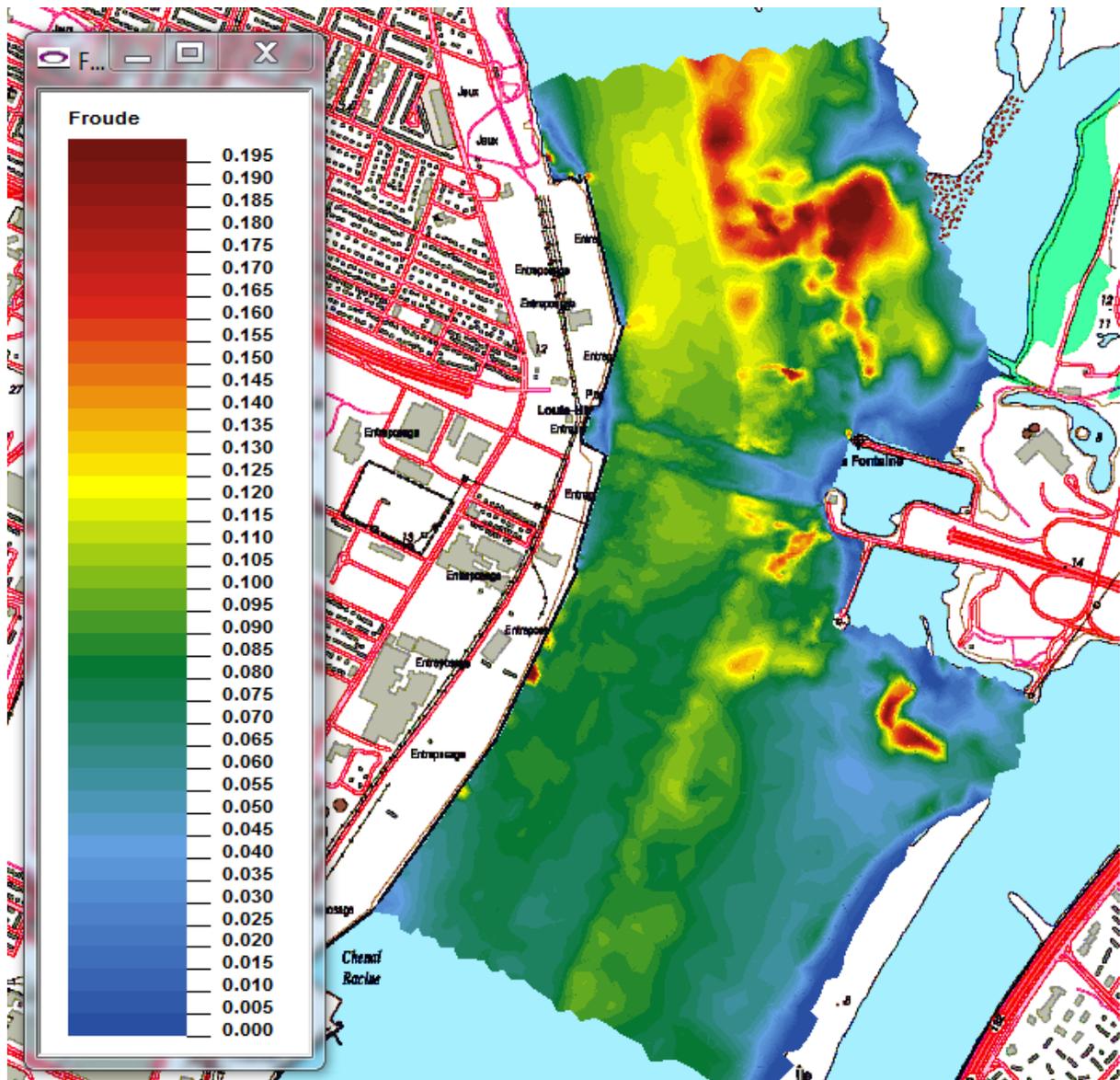


Figure 4-7 Nombre de Froude pour la simulation 1F (débit médian).

5 Simulation 2 – 5 900 m³/s à LaSalle (Étiage sévère)

Q_LaSalle : 5 900 m³/s (Débit GENIVAR/MTQ)

Autres débits (EC)

Q_Mille Îles/Prairies : 728 m³/s
Q_L'Assomption : 32 m³/s
Q_Richelieu : 240 m³/s
Q_Yamaska : 29 m³/s
Q_Saint_Francois : 128 m³/s
Q_Nicolet : 19 m³/s
Q_Maskinongé : 8 m³/s
Q_DuLoup : 11 m³/s
H_Trois_Rivières : 2.75 m

5.1 Cote de la surface – Simulation 2F (étiage)

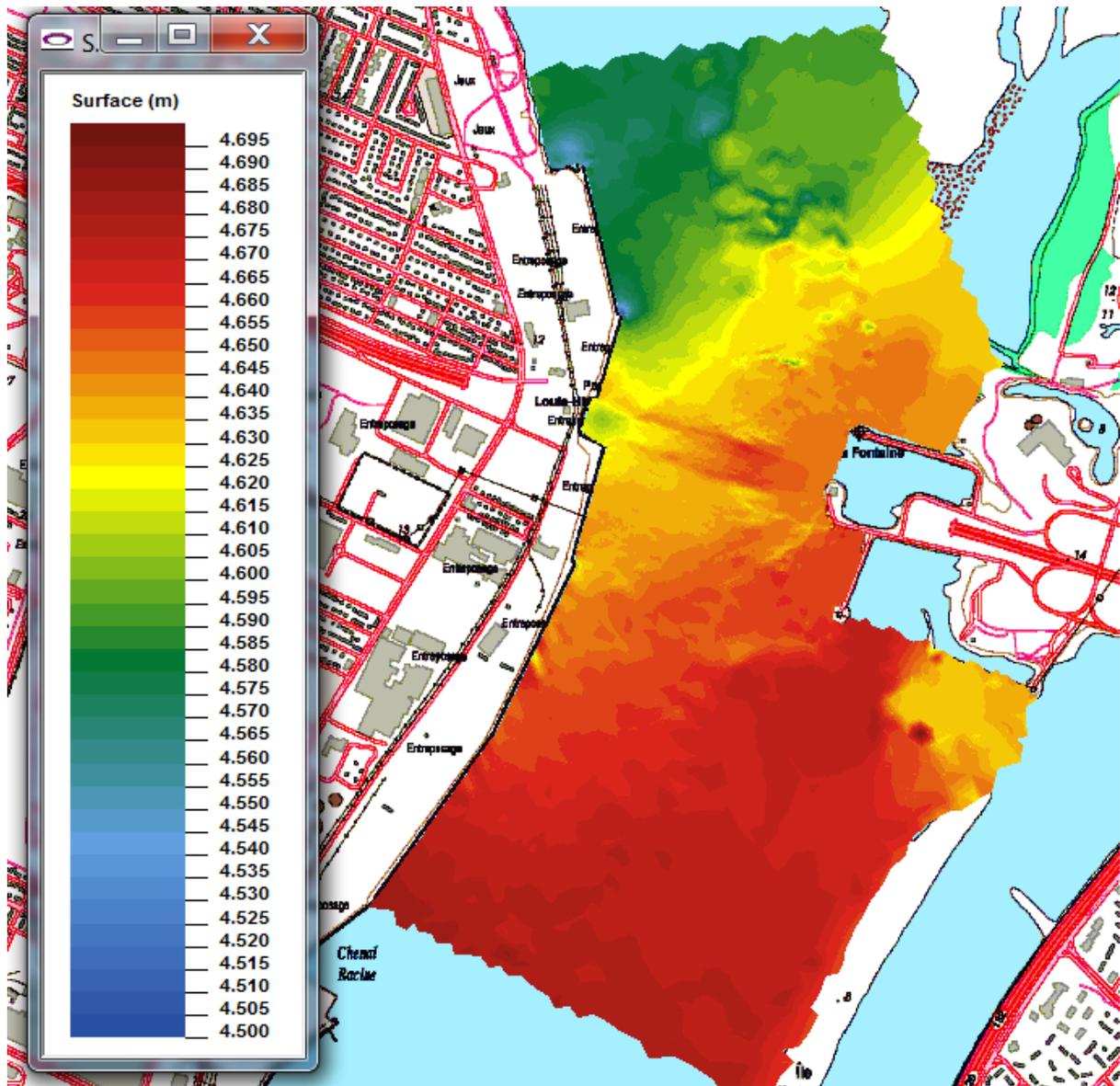


Figure 5-1 Cote de la surface pour la simulation 2F (étiage).

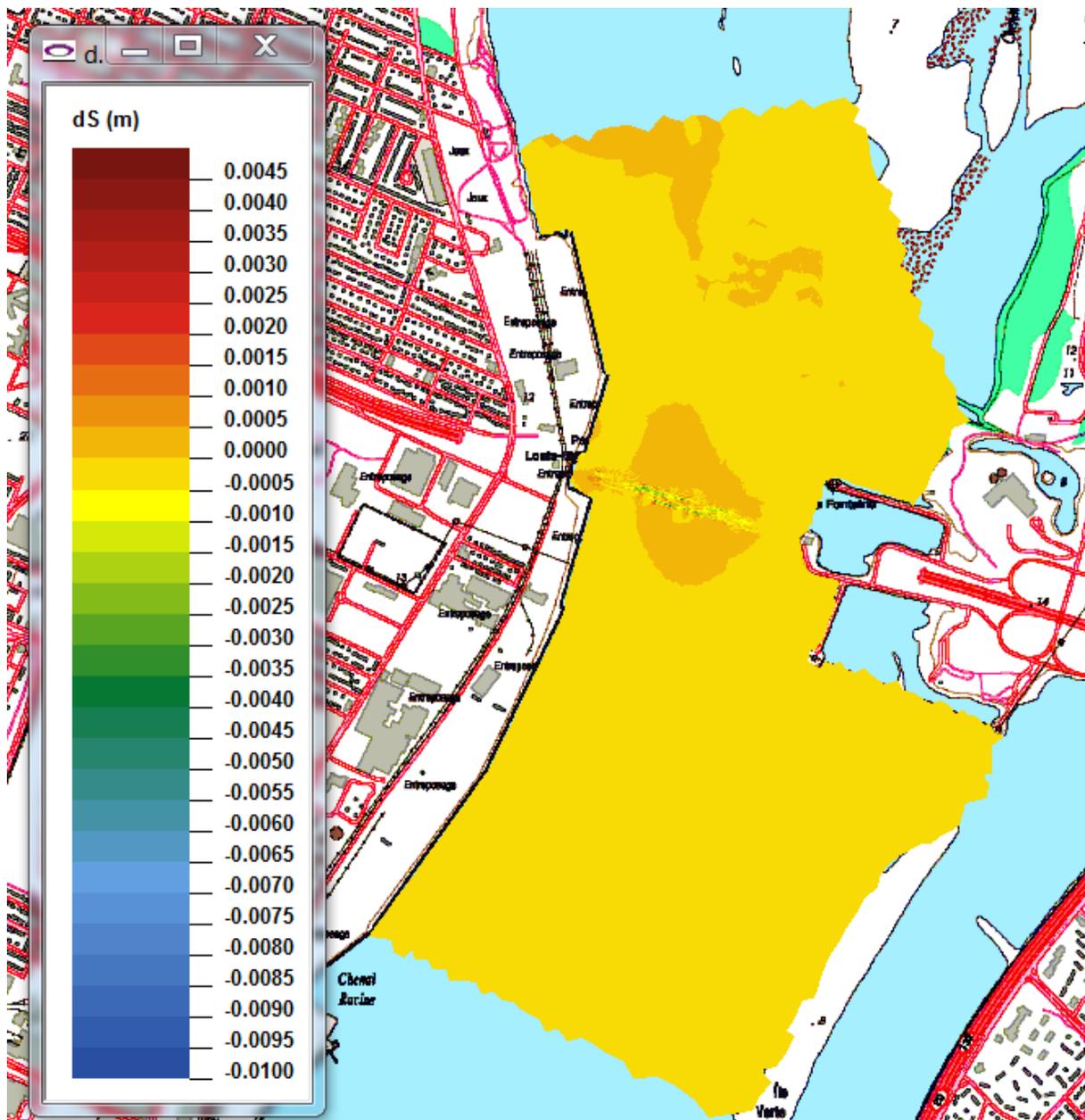


Figure 5-2 Variation du niveau de la surface (m) pour la simulation 2F (étiage).

5.2 Profondeur d'eau (m) – Simulation 2F (étiage)

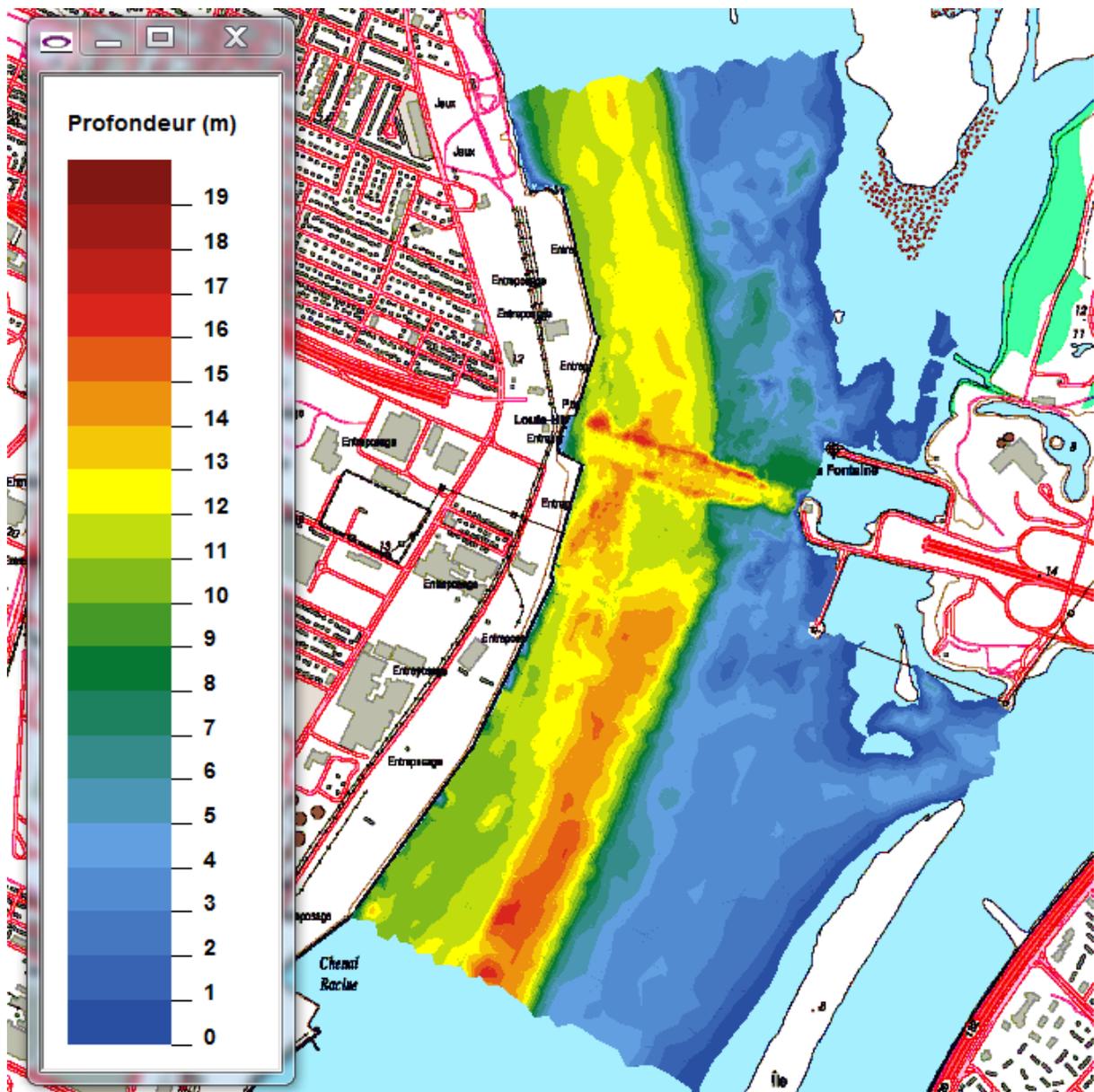


Figure 5-3 Profondeur d'eau pour la simulation 2F (étiage).

5.3 Module de vitesse (m/s) – Simulation 2F (étiage)

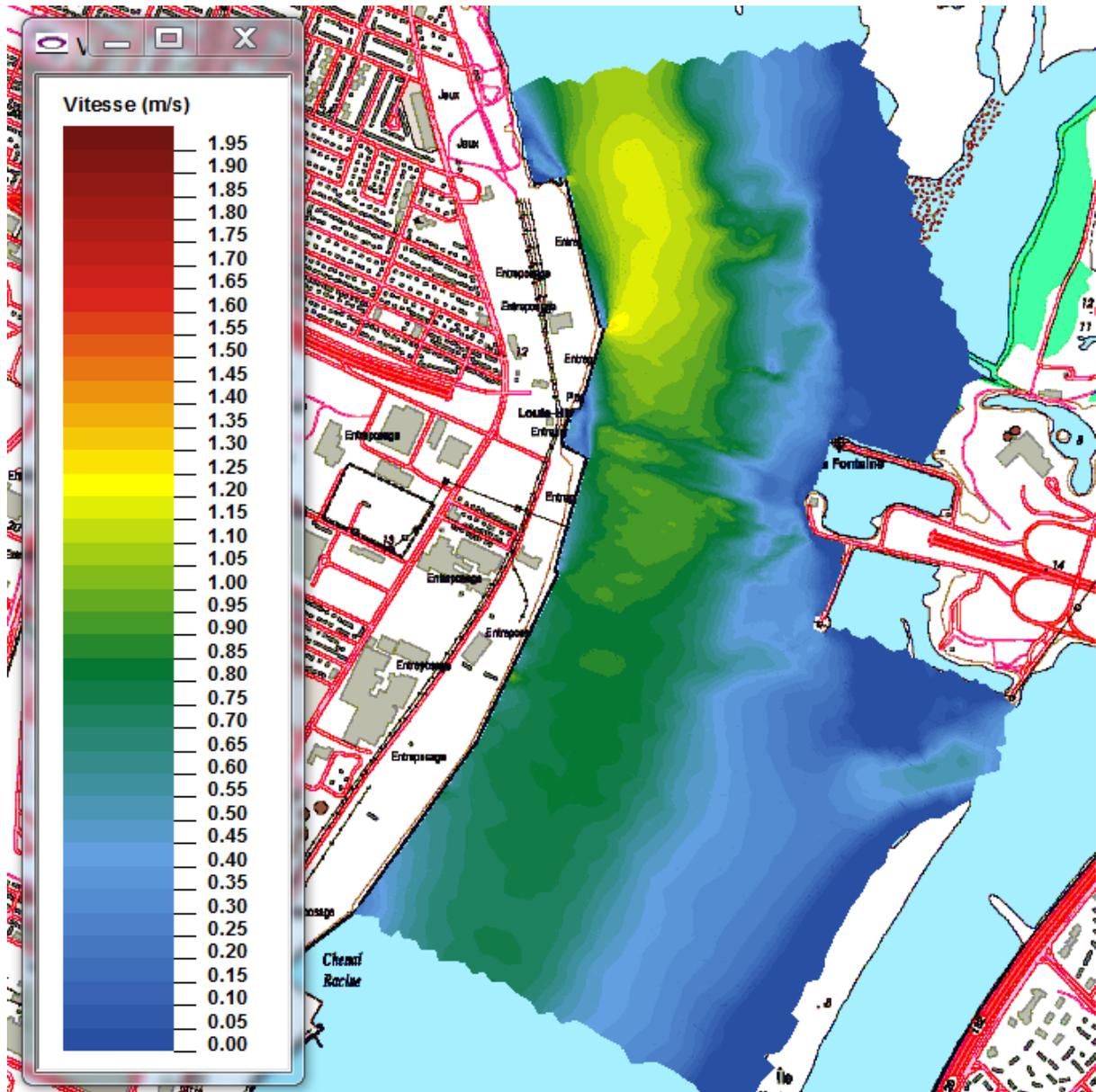


Figure 5-4 Module de vitesse pour la simulation 2F (étiage).

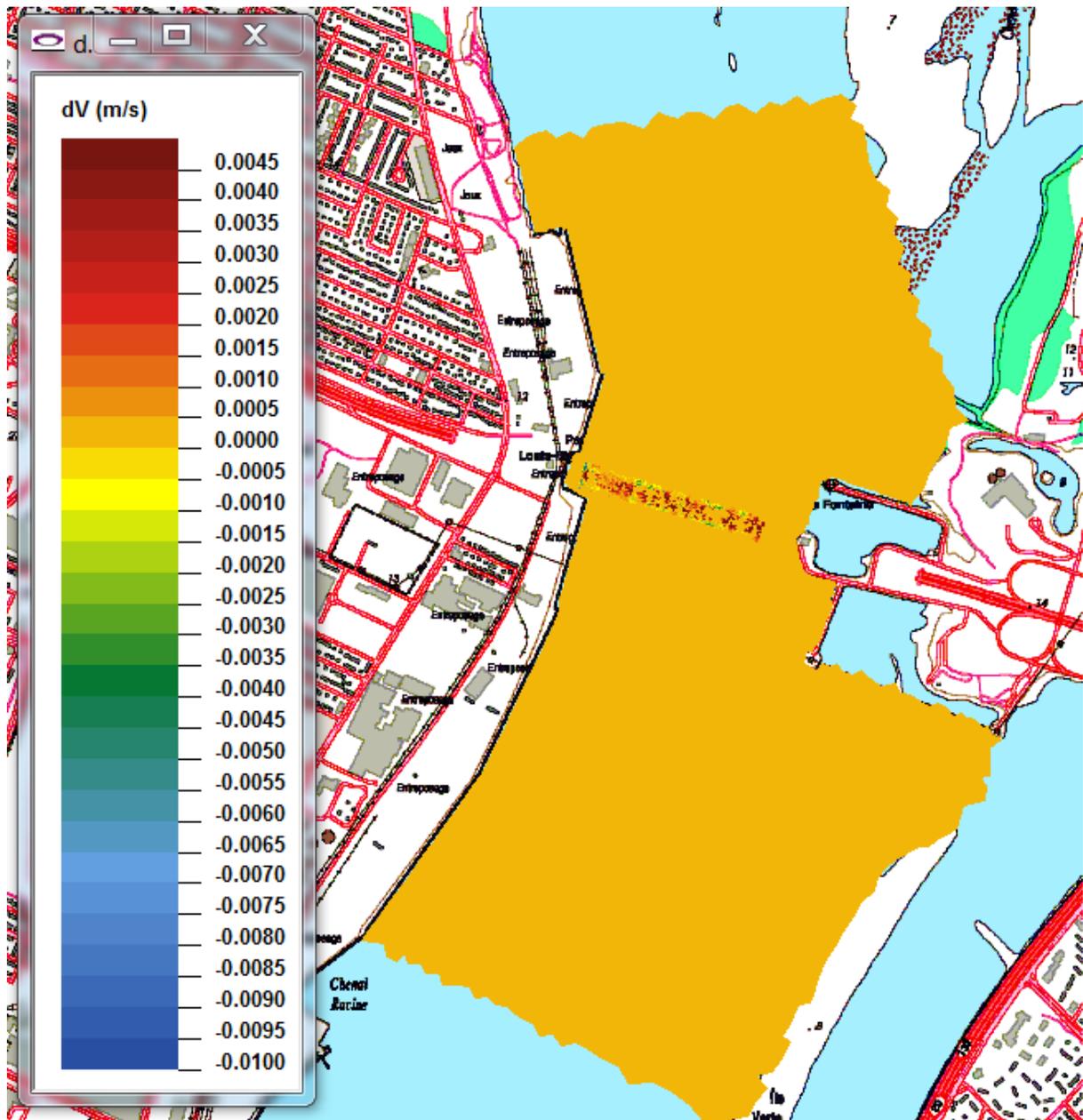


Figure 5-5 Variation du module de vitesse (m/s) pour la simulation 2F (étiage).

5.4 Orientation du courant (Azimut) – Simulation 2F (étiage)

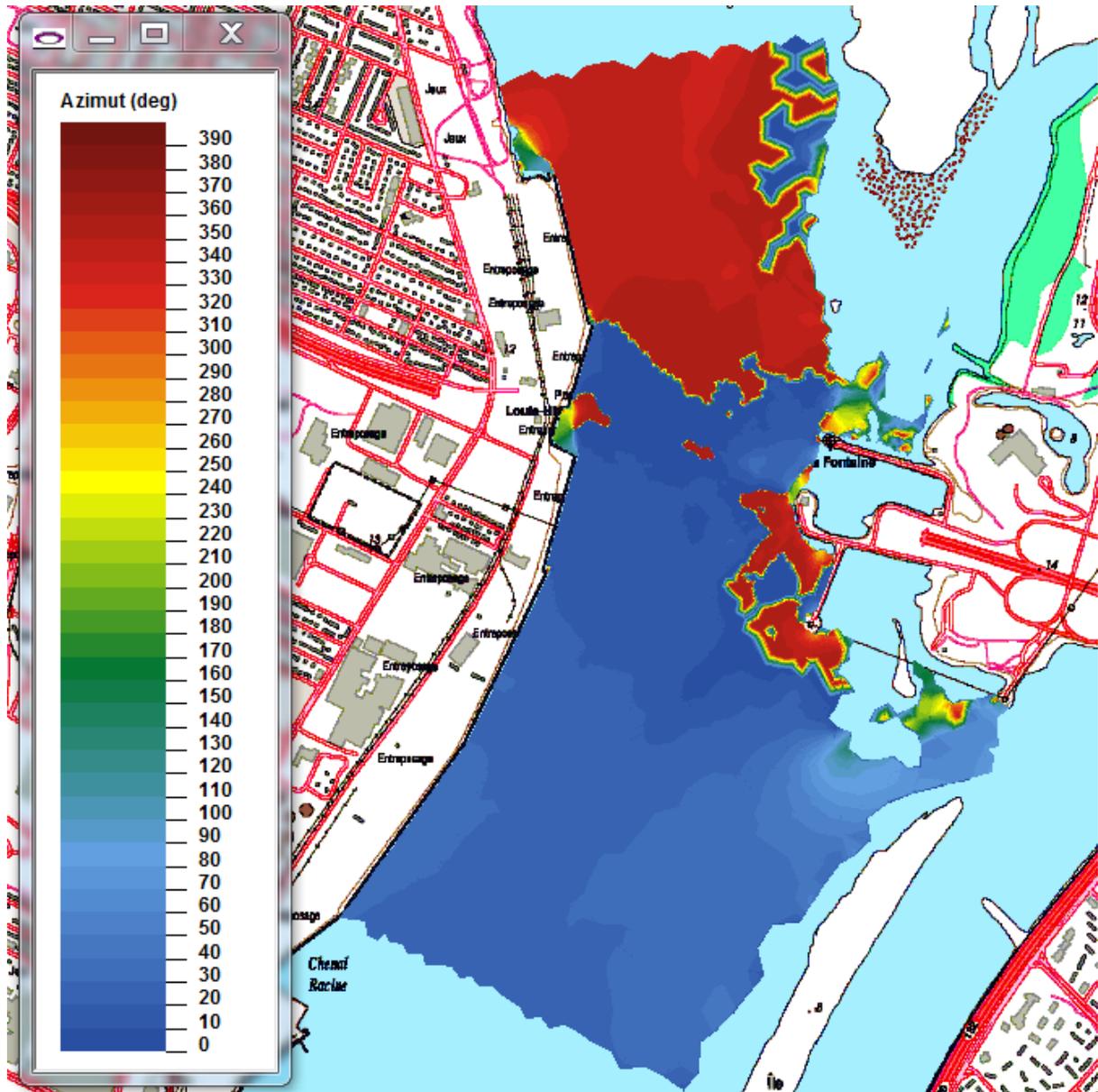


Figure 5-6 Orientation du courant (azimut) pour la simulation 2F (étiage).

5.5 Nombre de Froude – Simulation 2F (étiage)

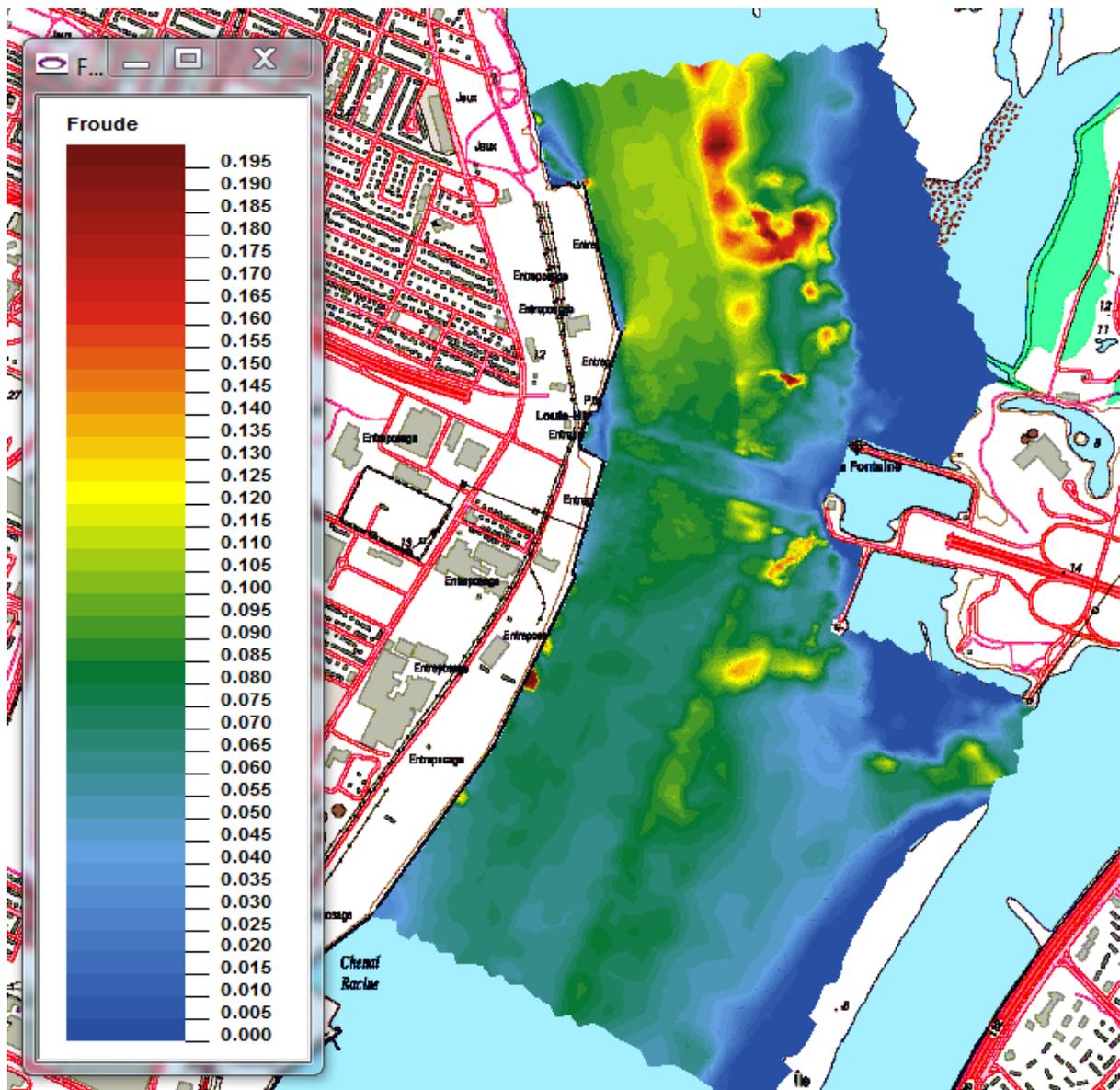


Figure 5-7 Nombre de Froude pour la simulation 2F (étiage).

6 Simulation 3 – 13 470 m³/s à LaSalle (Crue 20 ans)

Q_LaSalle : 13 470 m³/s (Débit GENIVAR/MTQ)

Autres débits (EC)

Q_Mille Îles/Prairies : 3 824 m³/s

Q_L'Assomption : 502 m³/s

Q_Richelieu : 1 044 m³/s

Q_Yamaska : 345 m³/s

Q_Saint_Francois : 850 m³/s

Q_Nicolet : 119 m³/s

Q_Maskinongé : 97 m³/s

Q_DuLoup : 97 m³/s

H_Trois_Rivières : 6.16 m

6.1 Cote de la surface – Simulation 3F (crue 20 ans)

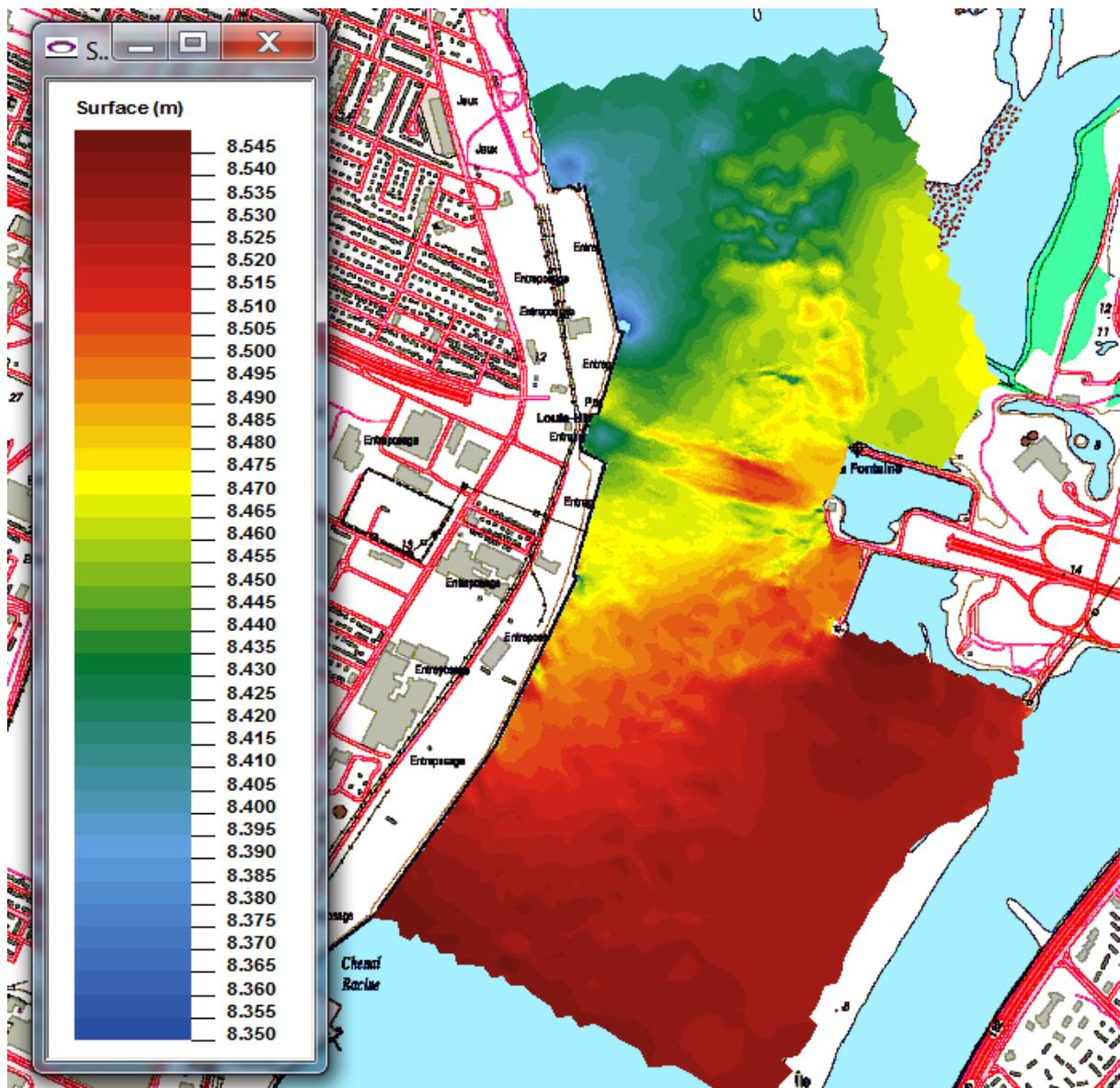


Figure 6-1 Cote de la surface pour la simulation 3F (crue 20 ans).

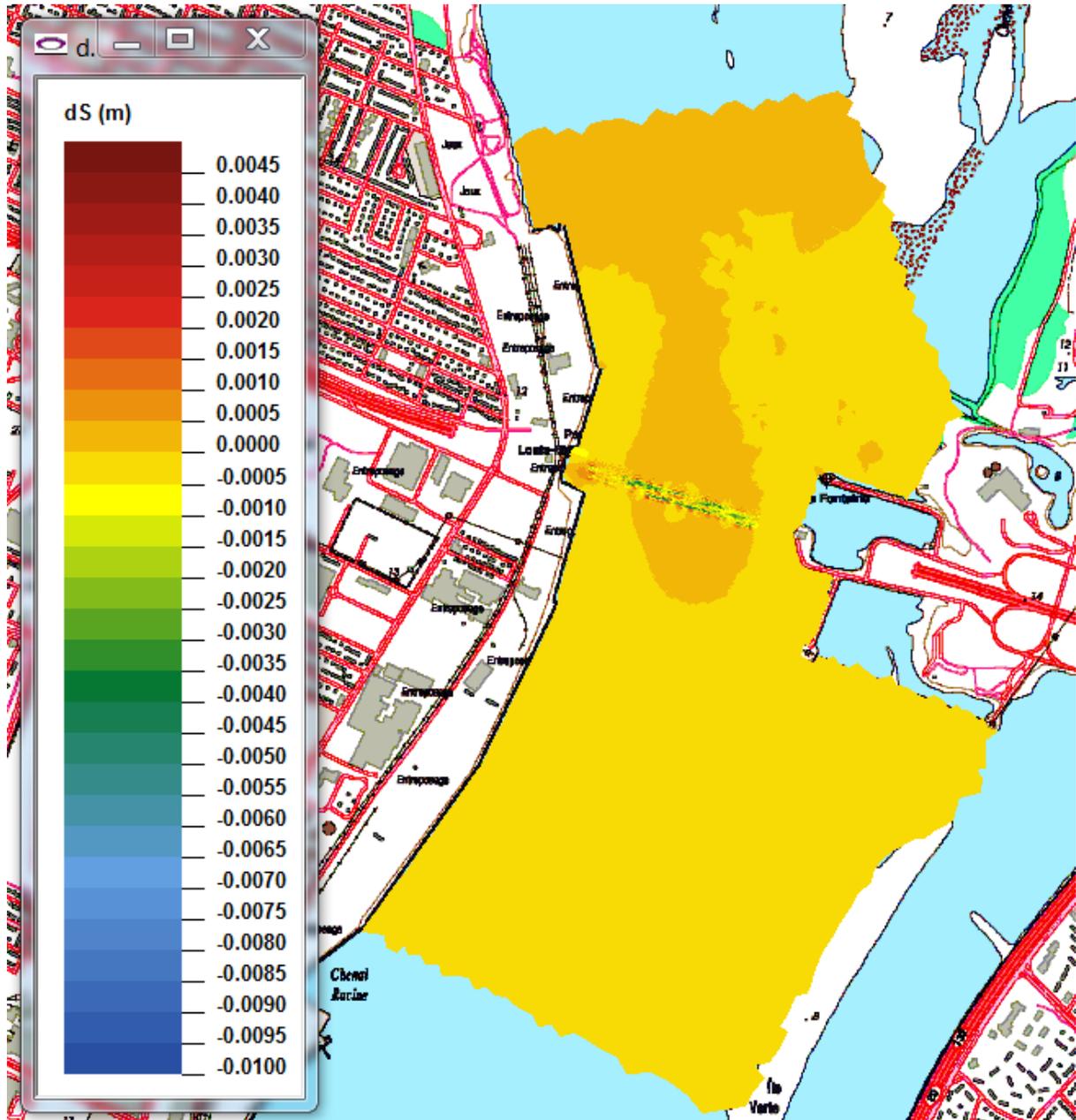


Figure 6-2 Variation du niveau de la surface (m) pour la simulation 3F (crue 20 ans).

6.3 Module de vitesse (m/s) – Simulation 3F (crue 20 ans)

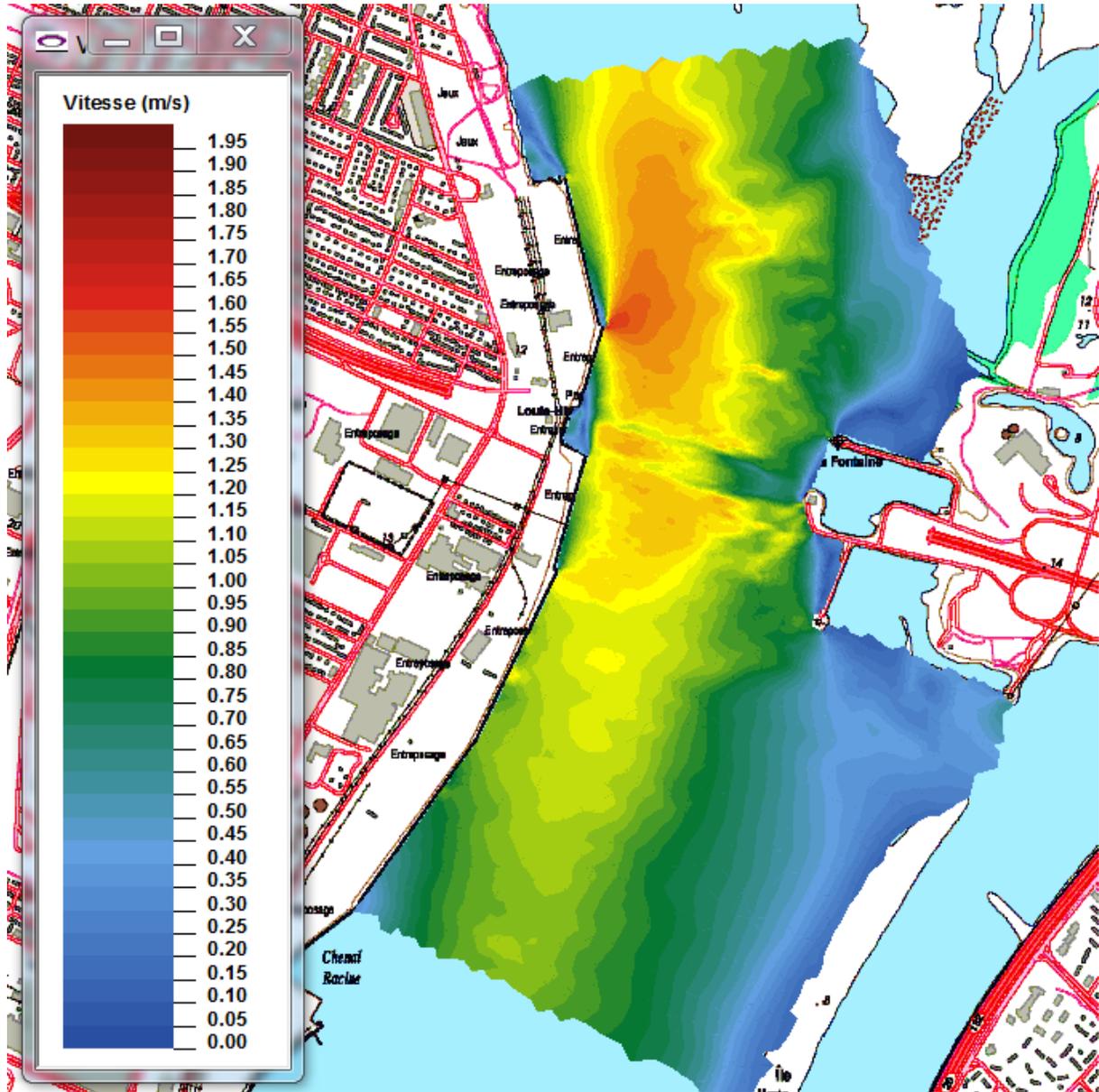


Figure 6-4 Module de vitesse (m/s) pour la simulation 3F (crue 20 ans).

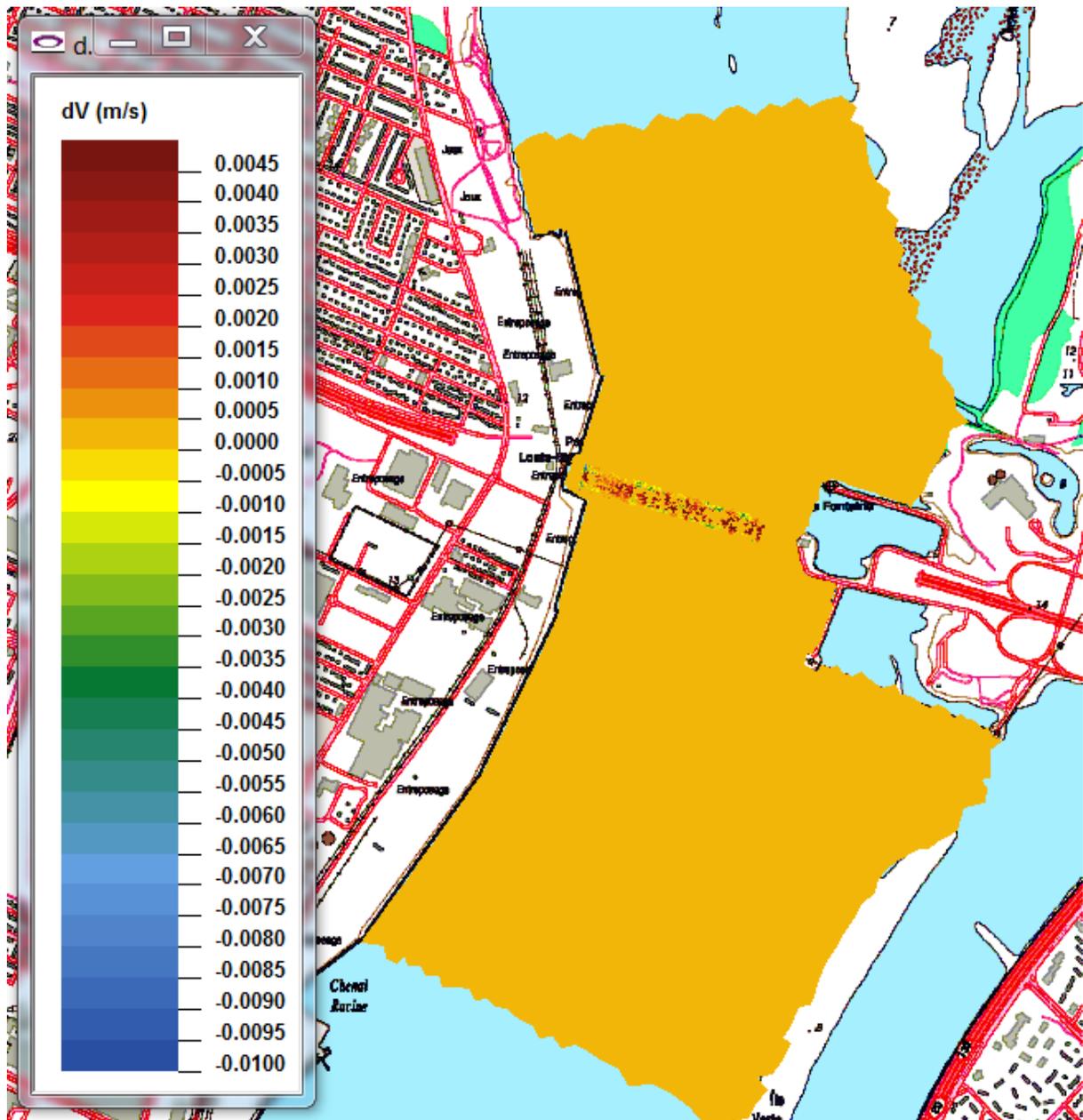


Figure 6-5 Variation du module de vitesse (m/s) pour la simulation 3F (crue 20 ans).

6.4 Orientation du courant (Azimut) – Simulation 3F (crue 20 ans)

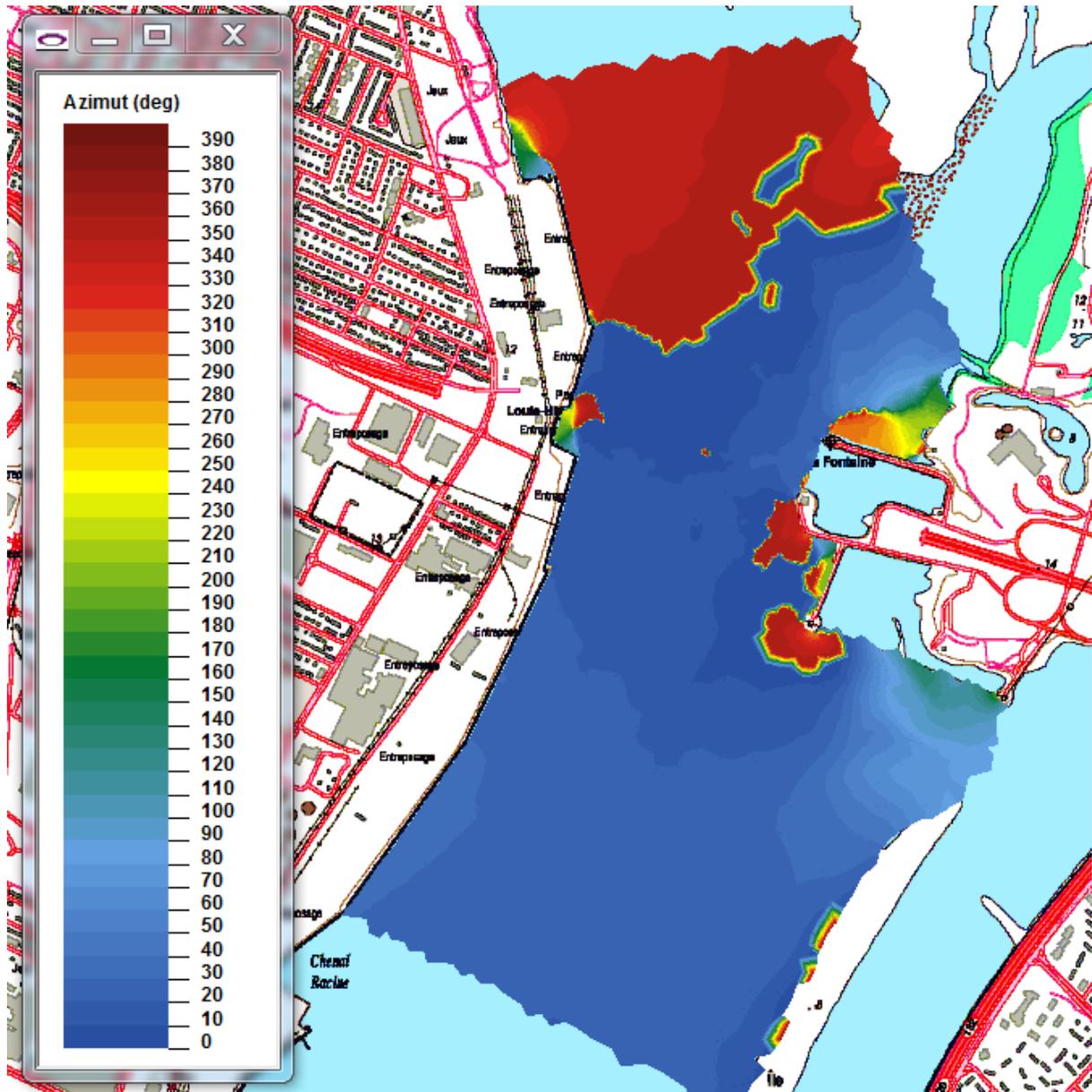


Figure 6-6 Orientation du courant (azimut) pour la simulation 3F (crue 20 ans).

6.5 Nombre de Froude – Simulation 3F (crue 20 ans)

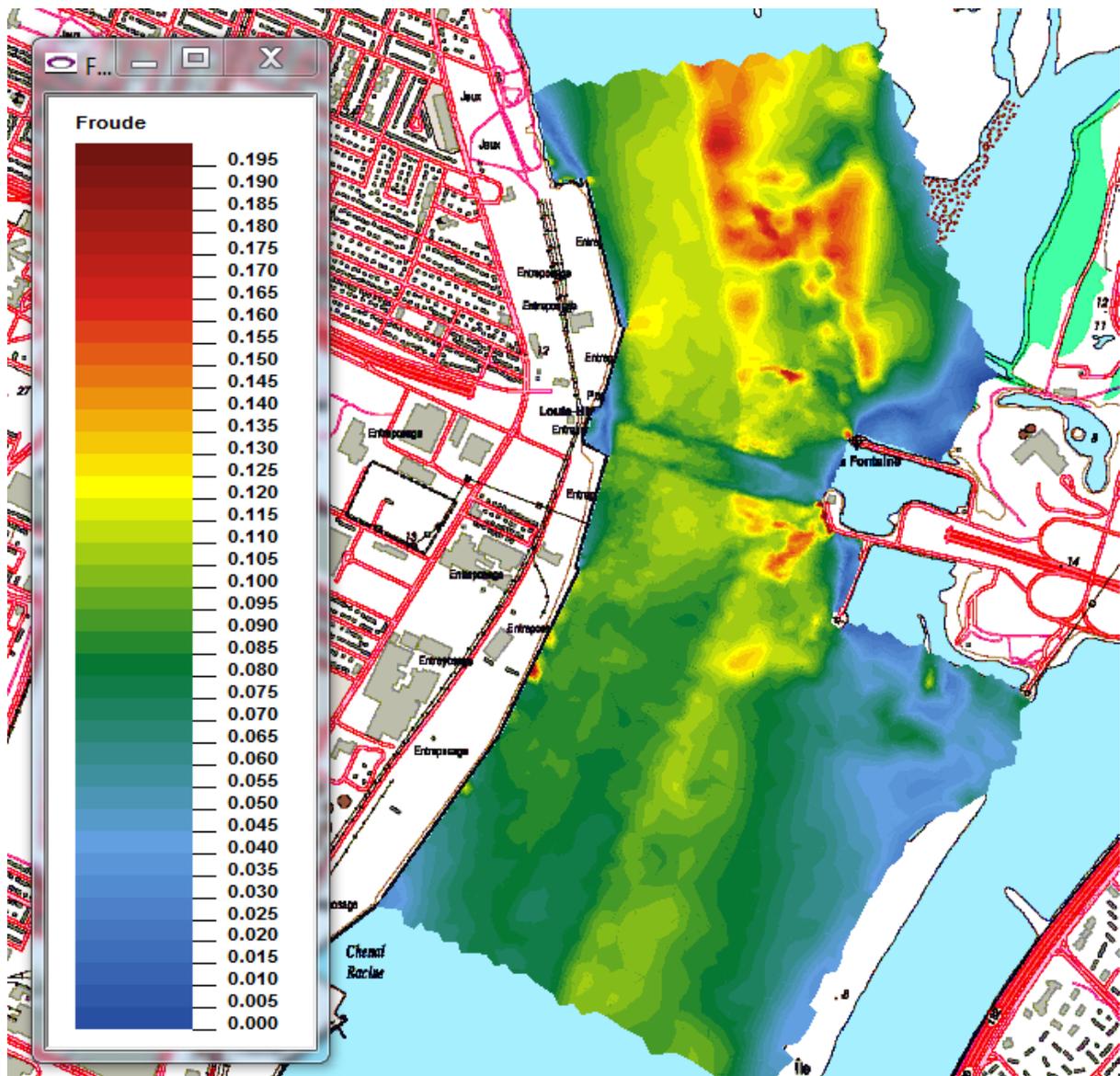


Figure 6-7 Nombre de Froude pour la simulation 3F (crue 20 ans).

7 Simulation 4 – 14 125 m³/s à LaSalle (crue 100 ans)

Q_LaSalle : 14 125 m³/s (Débit GENIVAR/MTQ)

Autres débits (EC)

Q_Mille Îles/Prairies : 5 374 m³/s

Q_Assomption : 550 m³/s

Q_Richelieu : 1 110 m³/s

Q_Yamaska : 410 m³/s

Q_Saint_Francois : 980 m³/s

Q_Nicolet : 380 m³/s

Q_Maskinongé : 122 m³/s

Q_DuLoup : 107 m³/s

H_Trois_Rivières : 7.24 m

7.1 Cote de la surface – Simulation 4F (crue 100 ans)

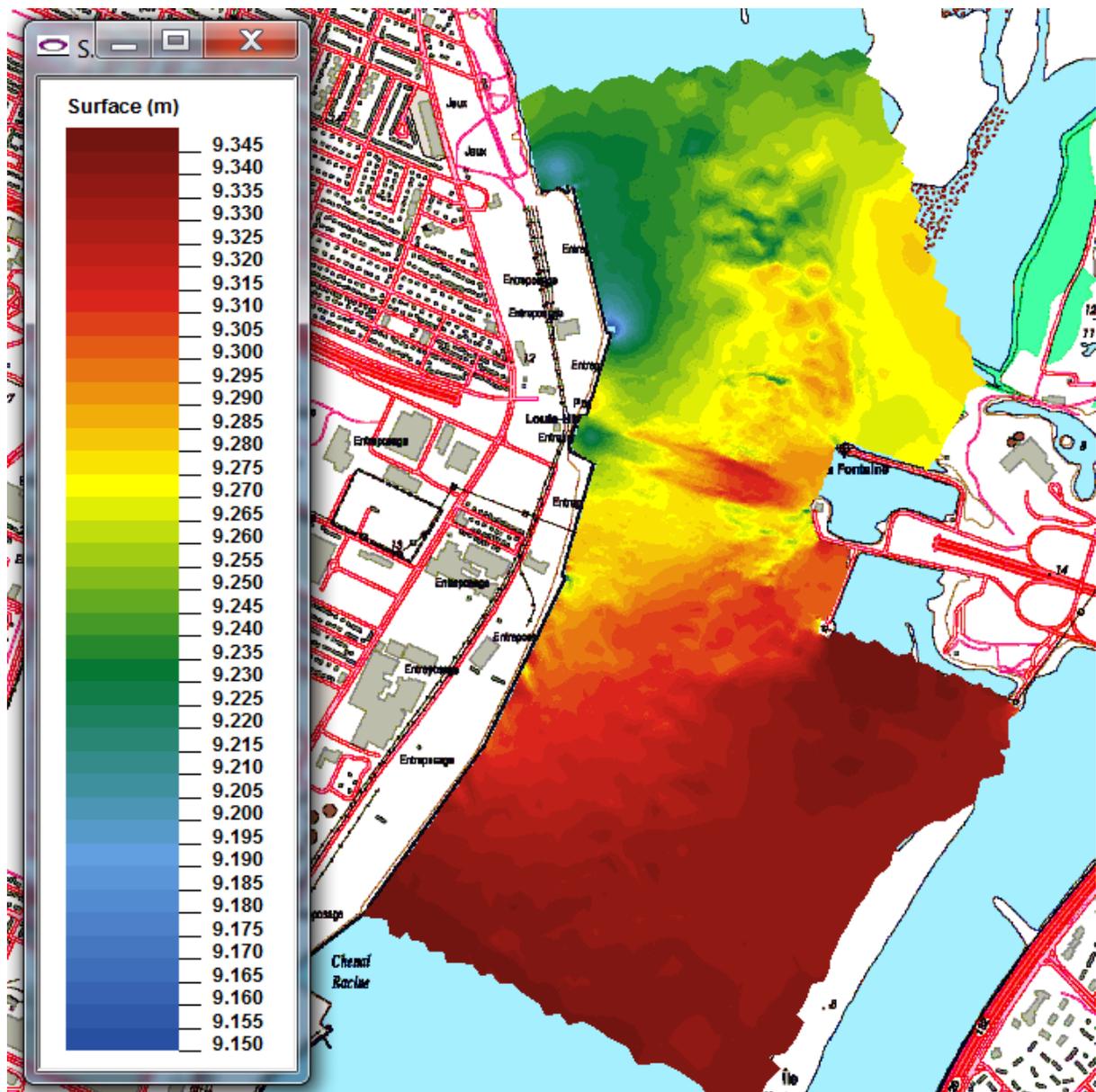


Figure 7-1 Cote de la surface pour la simulation 4F (crue 100 ans).

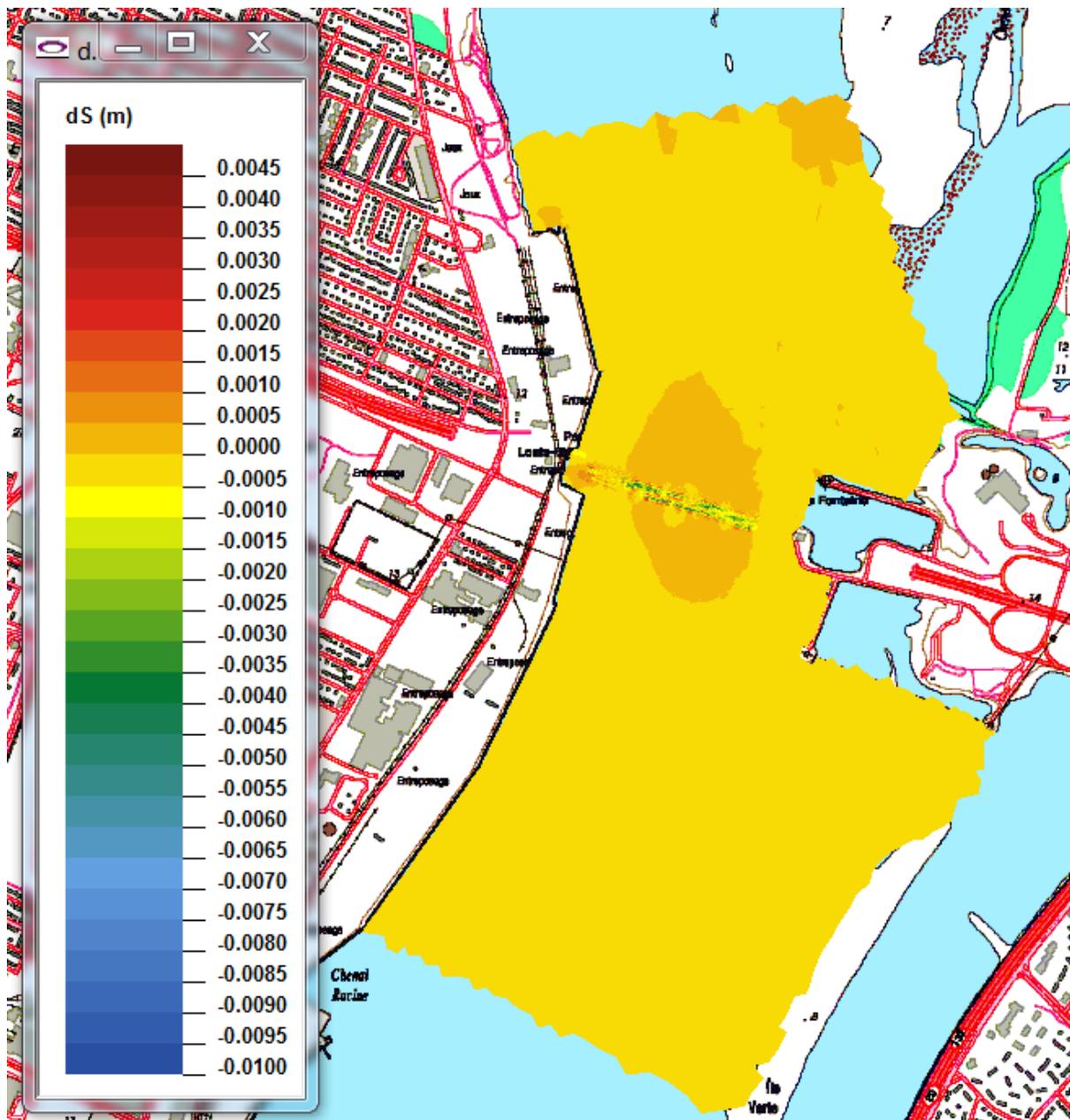


Figure 7-2 Variation du niveau de la surface (m) pour la simulation 4F (crue 100 ans).

7.2 Profondeur d'eau (m) – Simulation 4F (crue 100 ans)

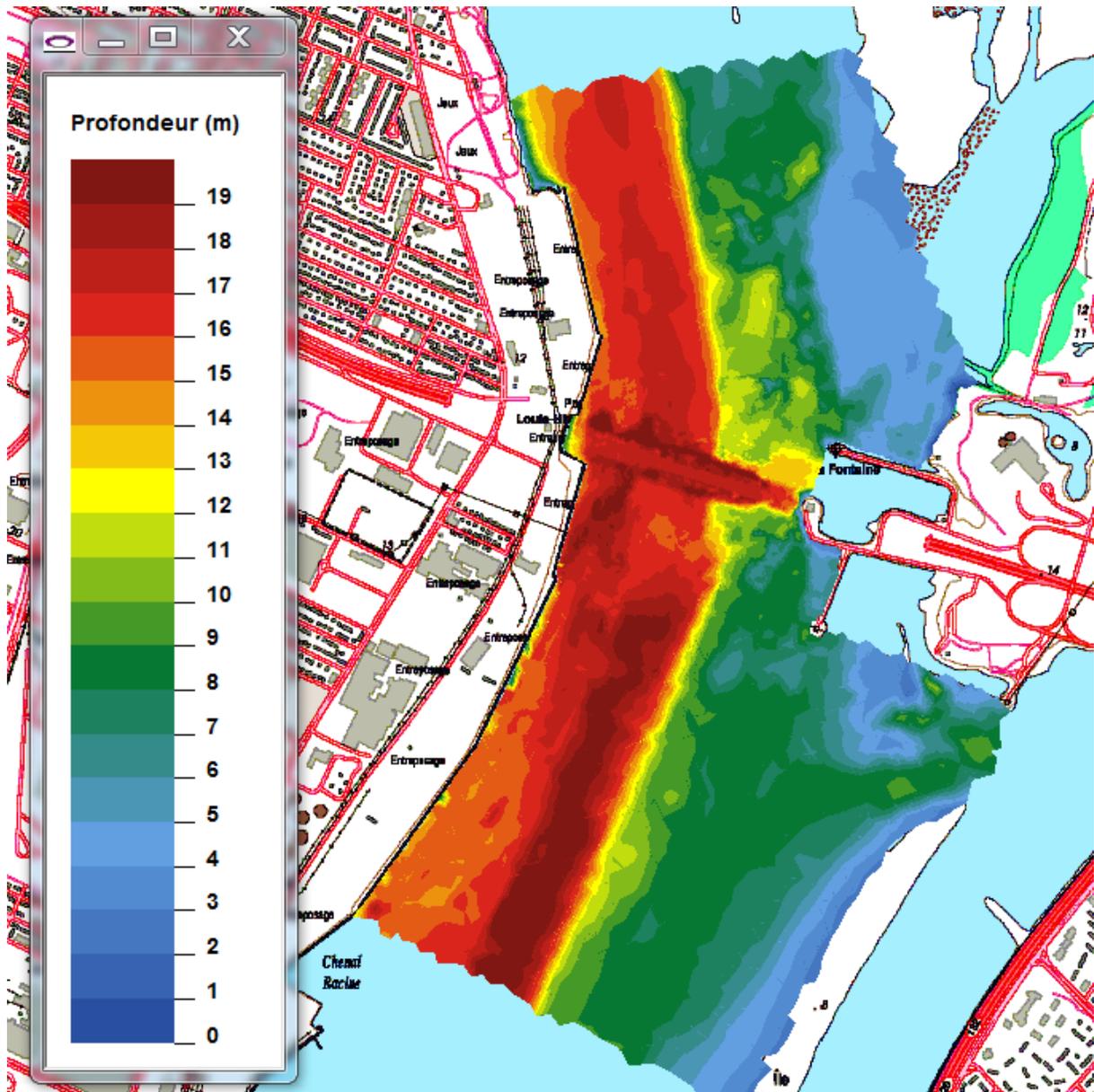


Figure 7-3 Profondeur d'eau pour la simulation 4F (crue 100 ans).

7.3 Module de vitesse (m/s) – Simulation 4F (crue 100 ans)

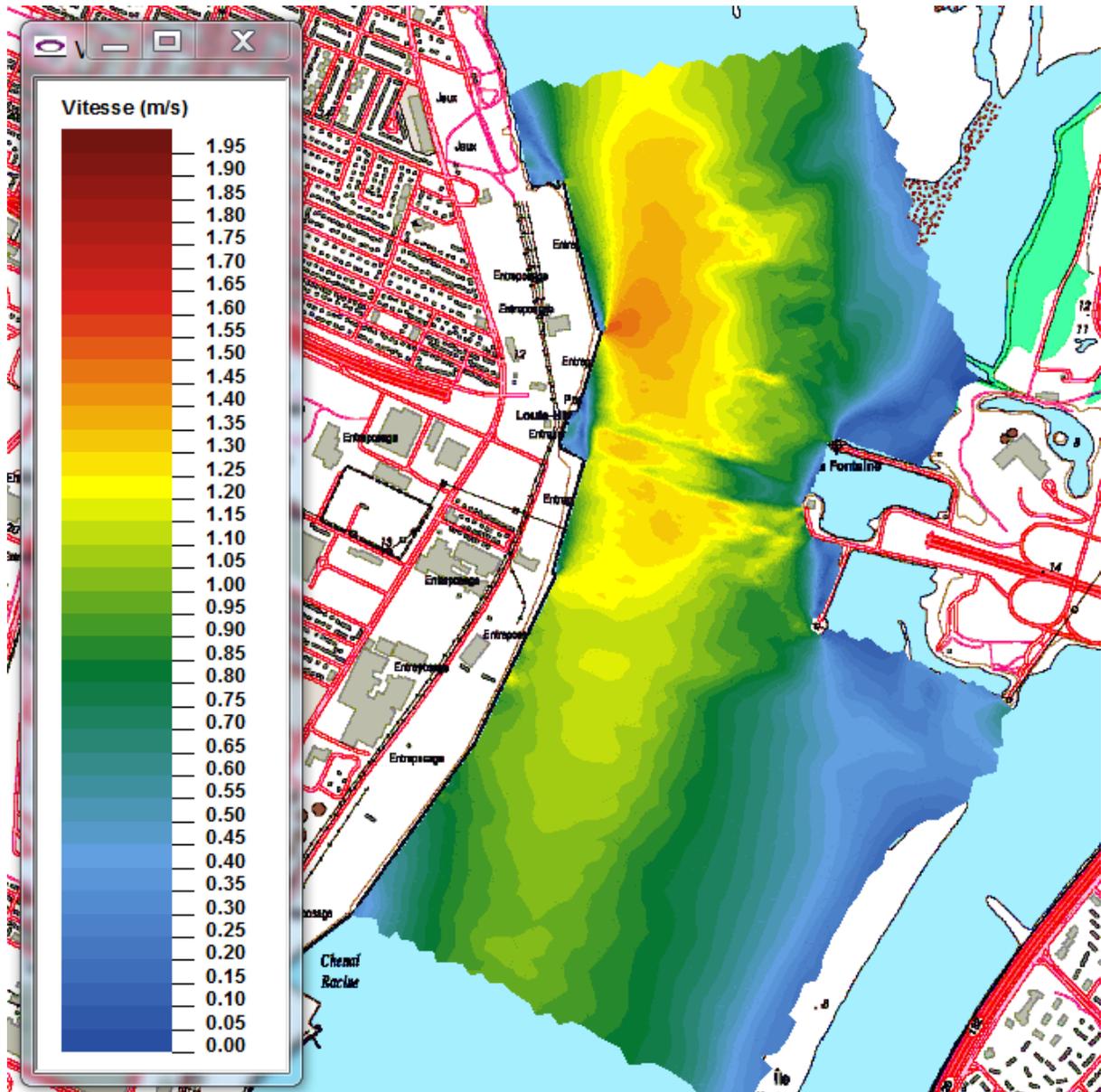


Figure 7-4 Module de vitesse (m/s) pour la simulation 4F (crue 100 ans).

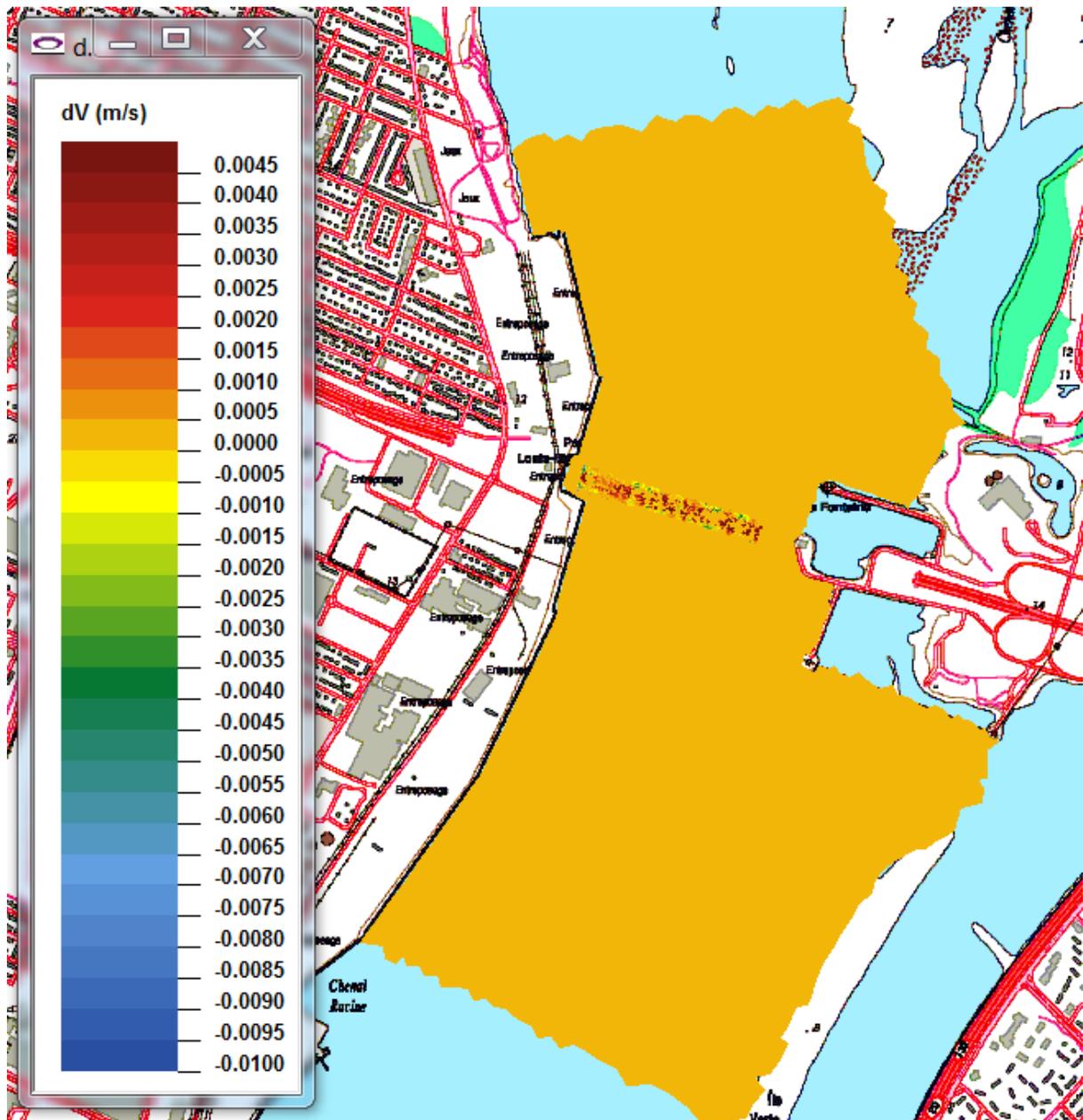


Figure 7-5 Variation du module de vitesse (m/s) pour la simulation 4F (crue 100 ans).

7.4 Orientation du courant (Azimut) – Simulation 4F (crue 100 ans)

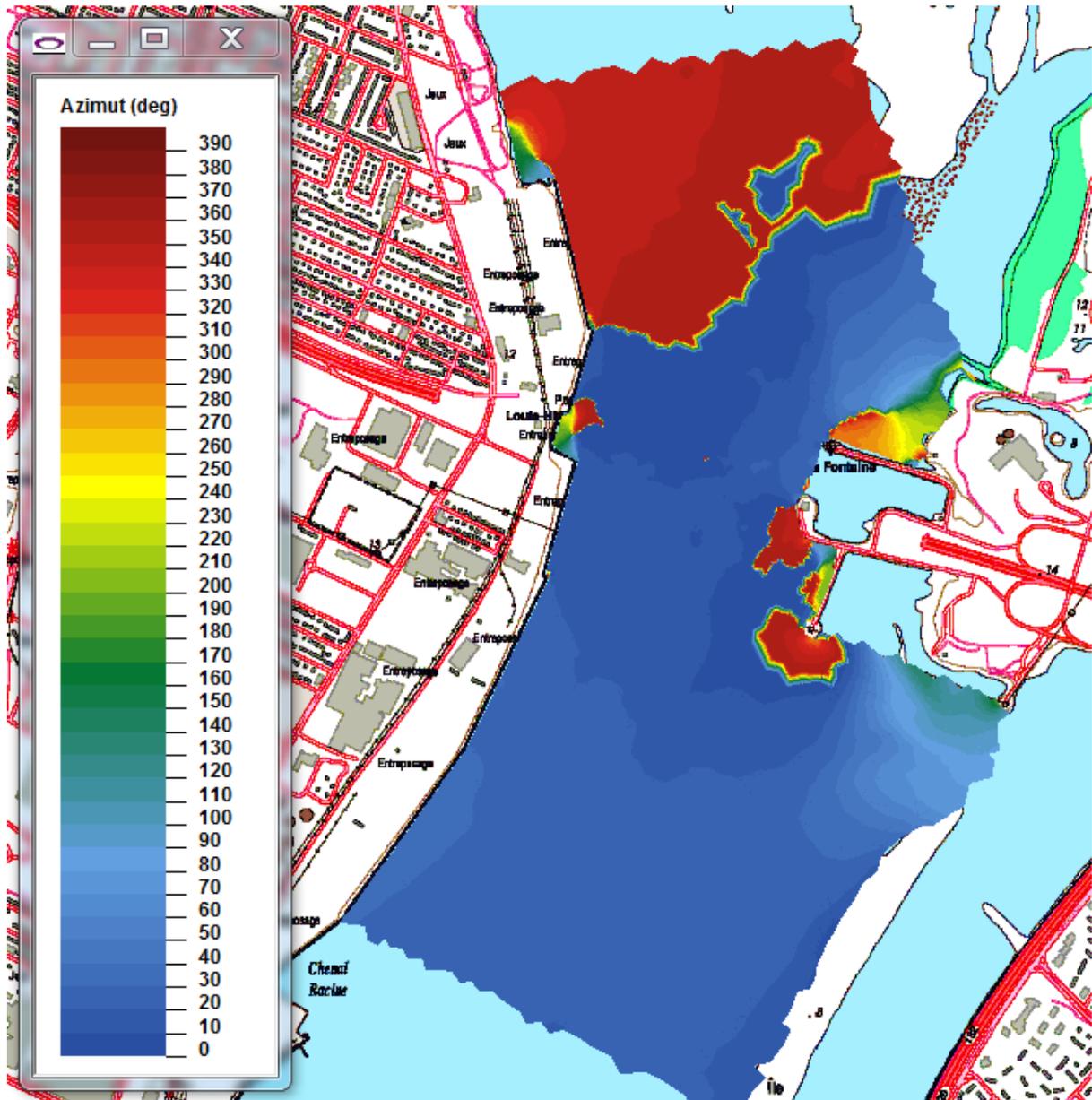


Figure 7-6 Orientation du courant (azimut) pour la simulation 4F (crue 100 ans).

7.5 Nombre de Froude – Simulation 4F (crue 100 ans)

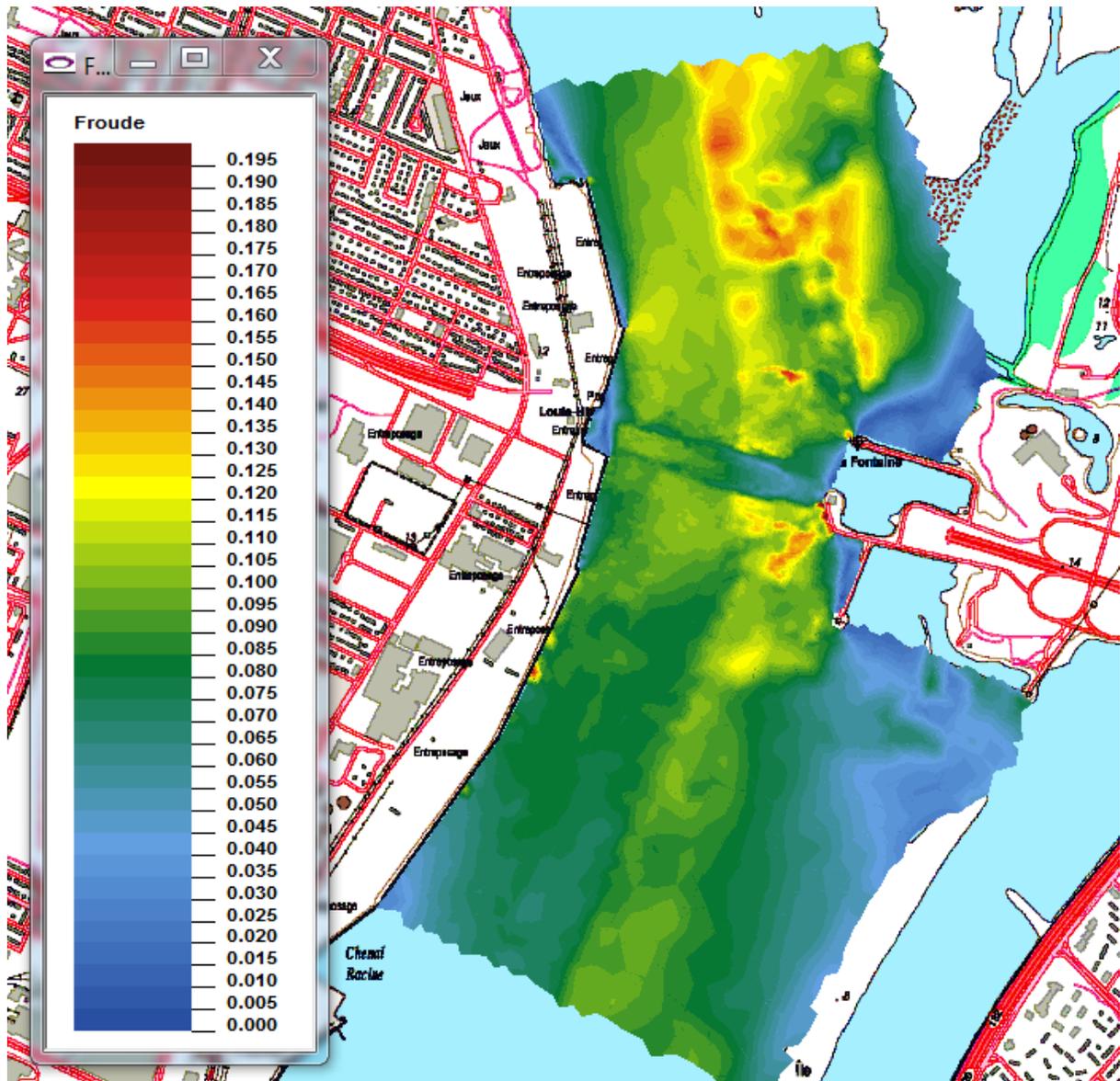


Figure 7-7 Nombre de Froude pour la simulation 4F (crue 100 ans).

8 Simulation 5 – 11 560 m³/s à LaSalle (crue 2 ans)

Q_LaSalle : 11 560 m³/s (Débit GENIVAR/MTQ)

Autres débits (EC)

Q_Mille Îles/Prairies :	2 772 m ³ /s
Q_L'Assomption :	332 m ³ /s
Q_Richelieu :	898 m ³ /s
Q_Yamaska :	220 m ³ /s
Q_Saint_Francois :	572 m ³ /s
Q_Nicolet :	130 m ³ /s
Q_Maskinongé :	105 m ³ /s
Q_DuLoup :	92 m ³ /s
H_Trois_Rivières :	5.53 m

8.1 Cote de la surface – Simulation 5F (crue 2 ans)

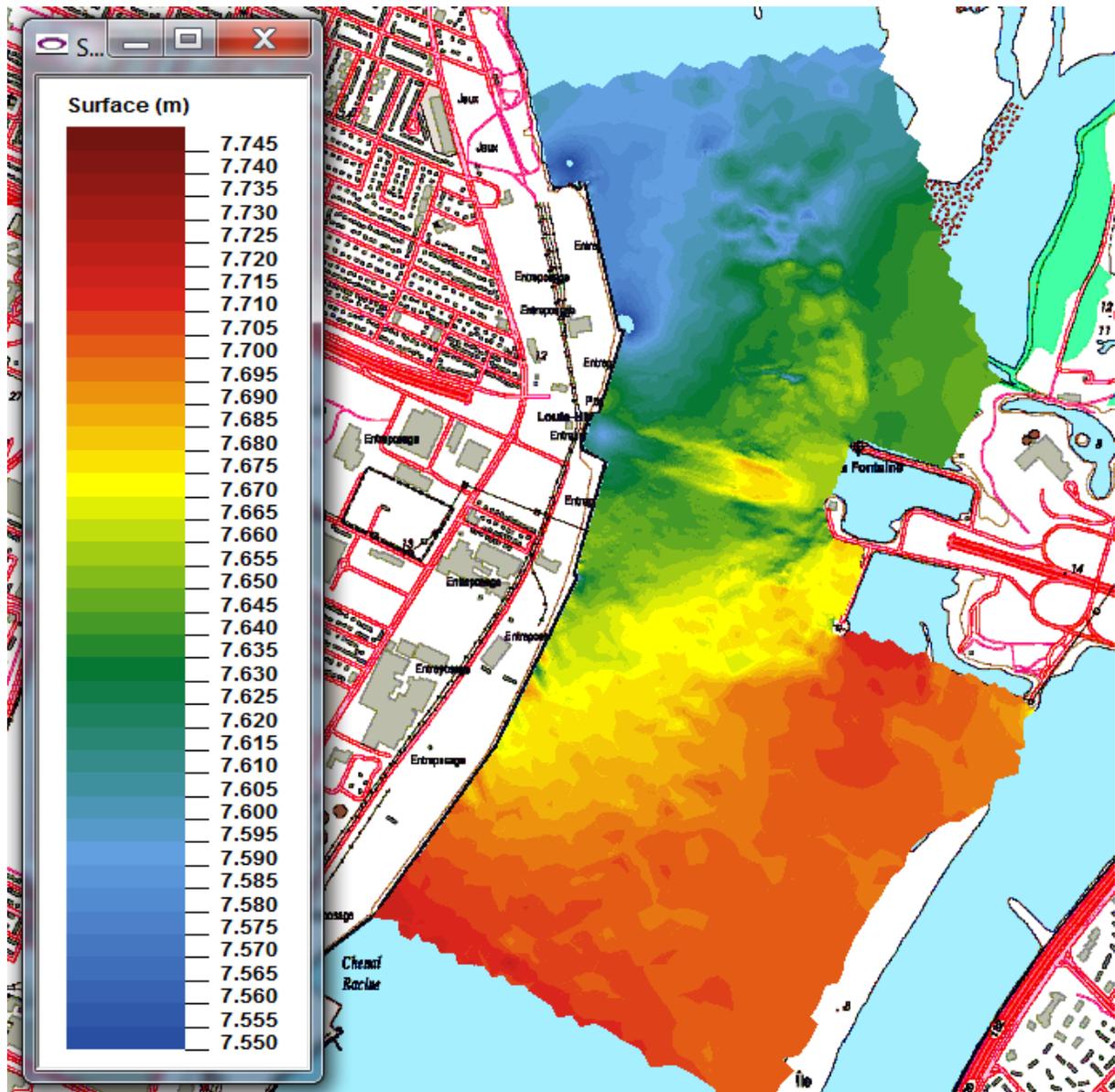


Figure 8-1 Cote de la surface pour la simulation 5F (crue 2 ans).

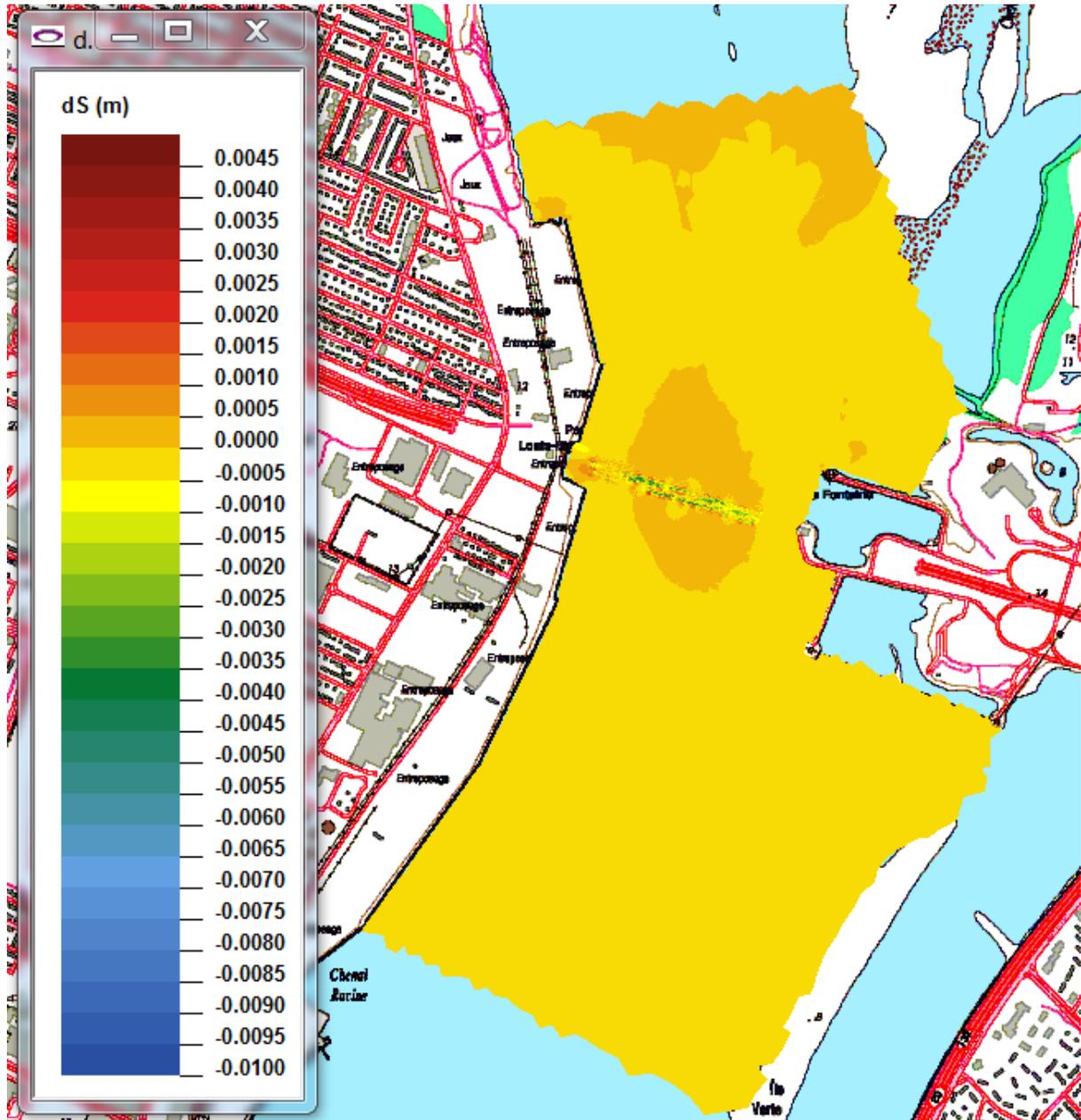


Figure 8-2 Variation du niveau de la surface (m) pour la simulation 5F (crue 2 ans).

8.2 Profondeur d'eau (m) – Simulation 5F (crue 2 ans)

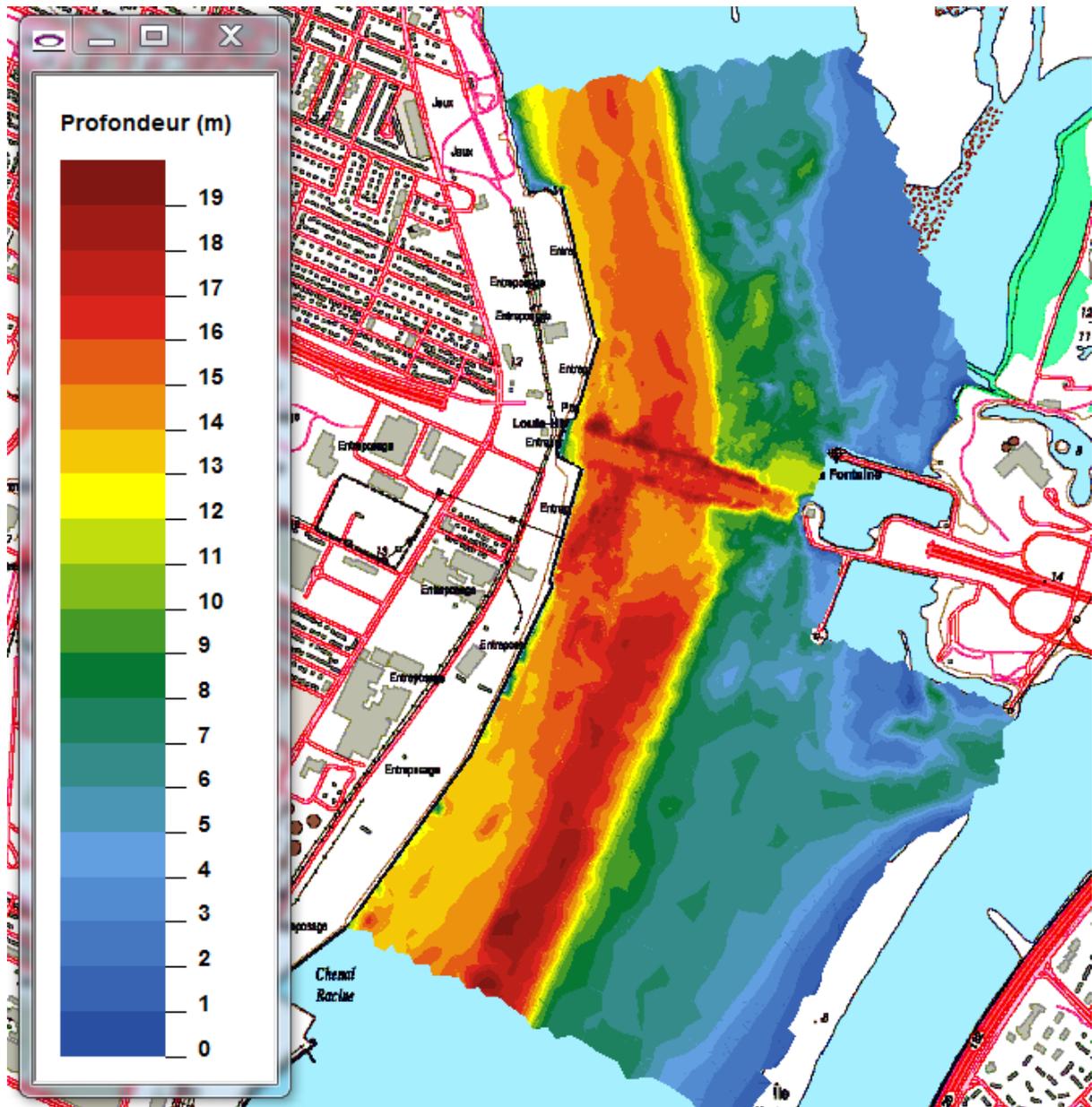


Figure 8-3 Profondeur d'eau pour la simulation 5F (crue 2 ans).

8.3 Module de vitesse (m/s) – Simulation 5F (crue 2 ans)

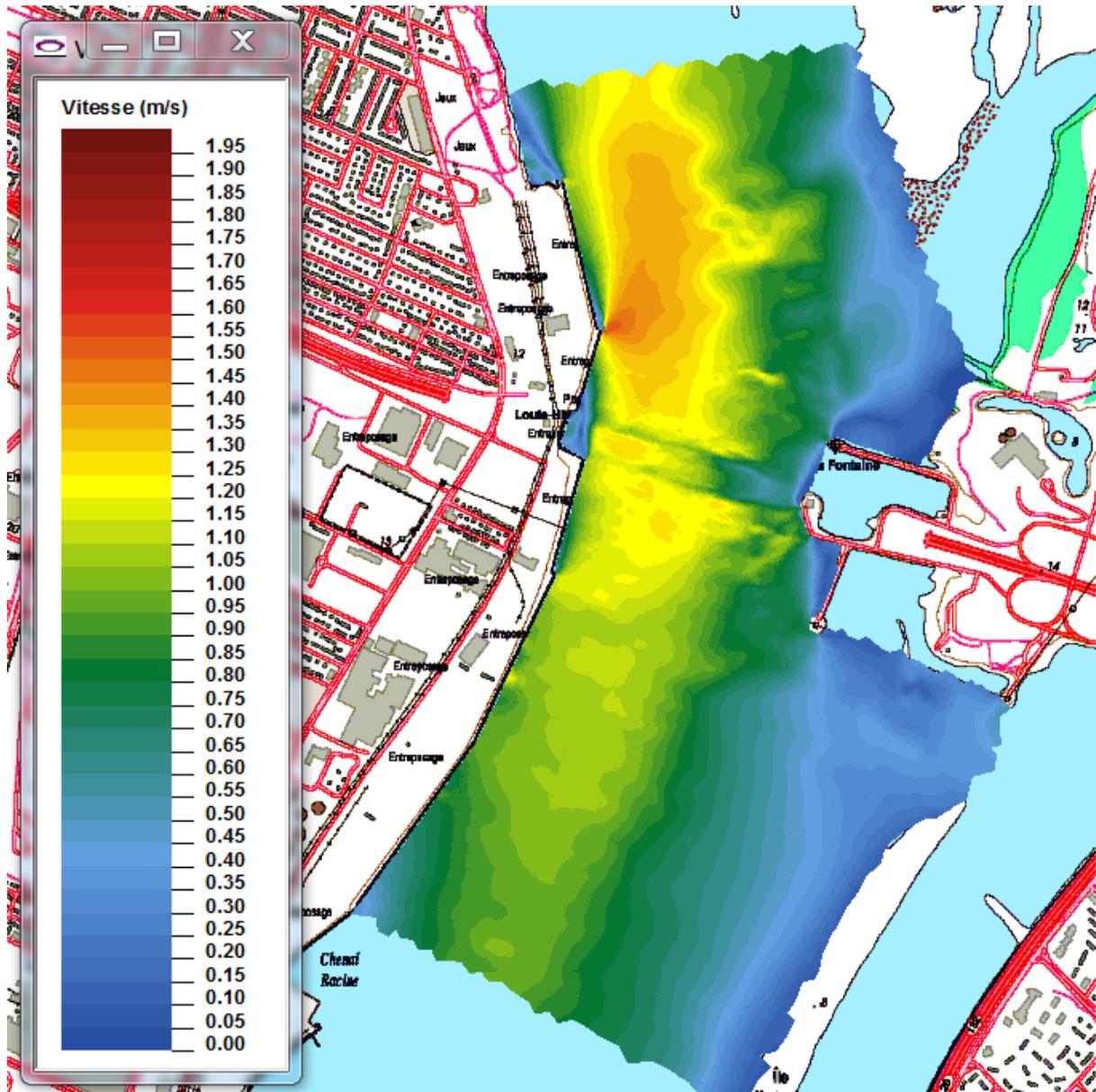


Figure 8-4 Module de vitesse (m/s) pour la simulation 5F (crue 2 ans).

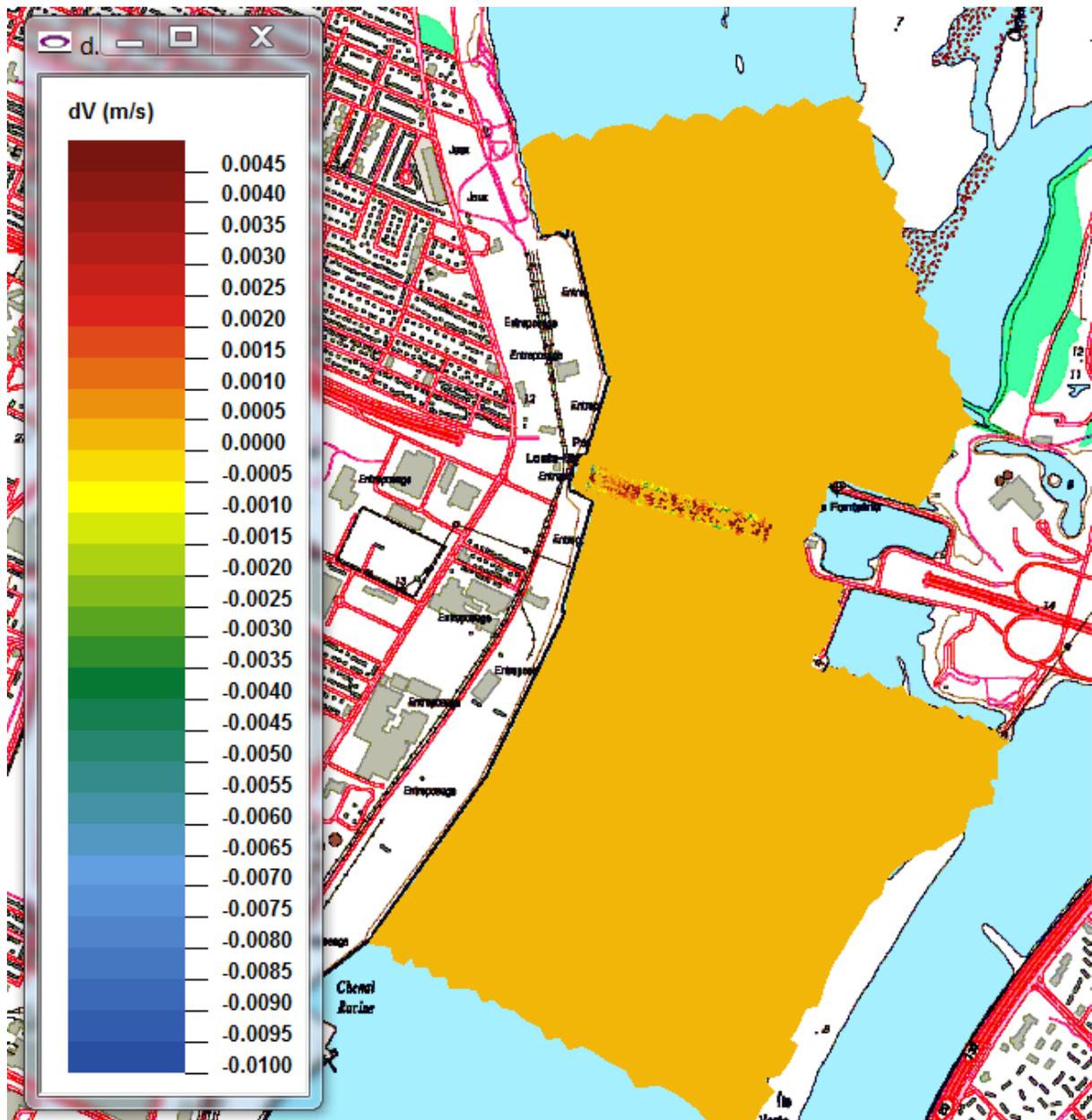


Figure 8-5 Variation du module de vitesse (m/s) pour la simulation 5F (crue 2 ans).

8.4 Orientation du courant (Azimut) – Simulation 5F (crue 2 ans)

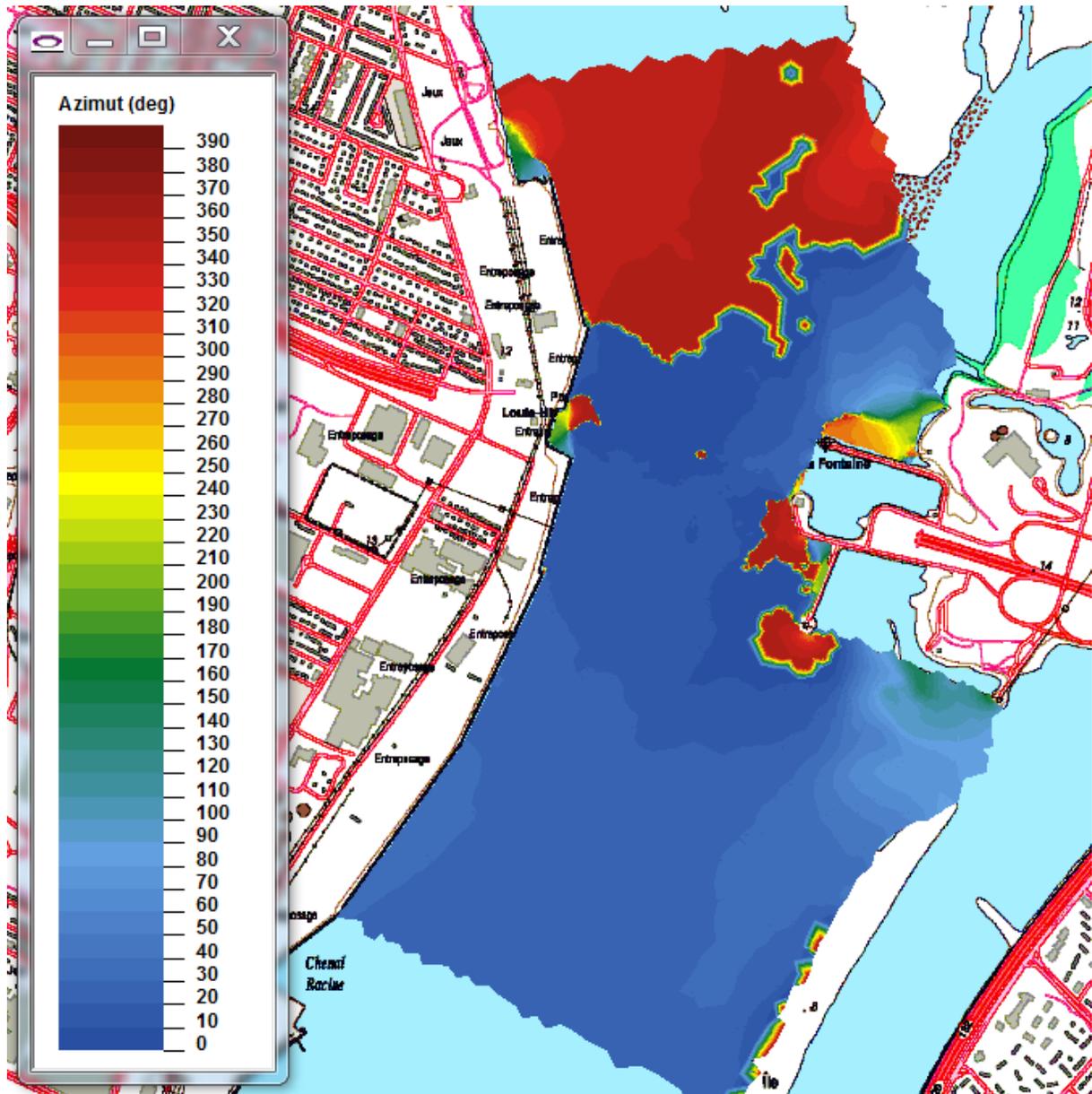


Figure 8-6 Orientation du courant (azimut) pour la simulation 5F (crue 2 ans).

8.5 Nombre de Froude – Simulation 5F (crue 2 ans)

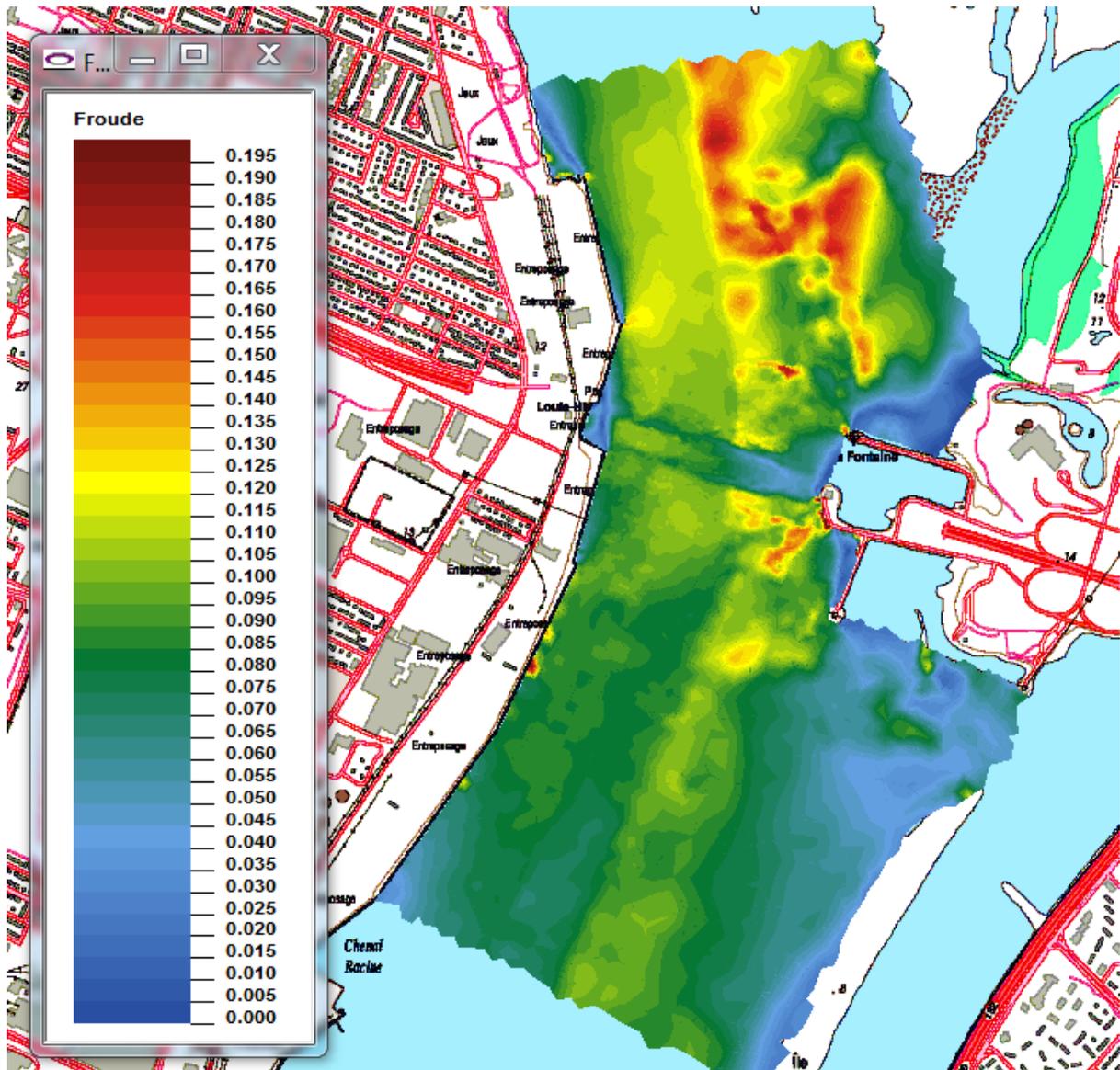


Figure 8-7 Nombre de Froude pour la simulation 5F (crue 2 ans).