

PROGRAMME DE STABILISATION DES BERGES DU LAC ST-JEAN (2017-2026)

Étude et modélisation de l'érosion des berges

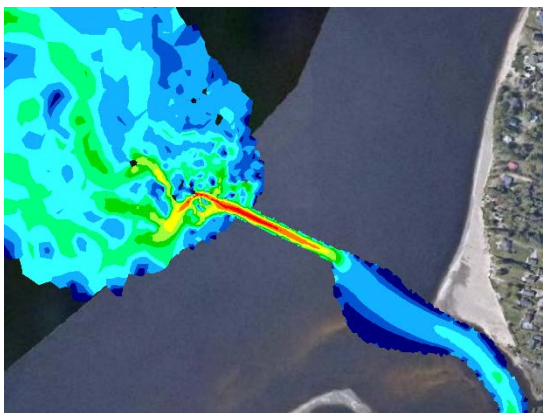
R.0024 Volume 2
Secteur Belle-Rivière



Préparé pour:

Rio Tinto Alcan

Rio Tinto Alcan



18 avril 2016

No référence lasalle | NHC 08000118

**PROGRAMME DE STABILISATION DES BERGES DU LAC SAINT-JEAN (2017-2026)
ÉTUDE ET MODÉLISATION DE L'ÉROSION DES BERGES**

**RAPPORT D'ÉTUDE R.0024
VOLUME 2 – SECTEUR BELLE-RIVIÈRE**

Préparé pour:

Rio Tinto Alcan
Québec

Préparé par:

Lasalle | NHC
Montréal, Québec

18 avril 2016

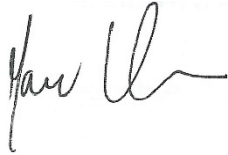
Préparé par:



Catherine Denault, ing., M.A.Sc.
Ingénieure de projets, associée



Arian Cueto Bergner, ing., M.Sc.
Ingénieure



Marc Villeneuve, ing. M.Ing.
Président

CLAUSE DE LIMITATION DE RESPONSABILITÉ

Ce document a été préparé par Lasalle|NHC de façon conforme aux bonnes pratiques d'ingénierie et est destiné à l'usage exclusif de la firme **Rio Tinto Alcan** et de leurs représentants autorisés dans le cadre spécifique du projet **Programme des stabilisation des berges du lac Saint-Jean (2017-2026) - Étude et modélisation de l'érosion des berges**. Le contenu de ce document ne peut être appliqué ou utilisé, en tout ou en partie, par ou à l'avantage d'autres parties sans l'autorisation écrite de Lasalle|NHC. Aucune autre garantie, expresse ou tacite, n'est accordée.

Lasalle|NHC et ses directeurs, associés, employés et mandataires n'assument aucune responsabilité à l'utilisation ou au recours du présent document ou de son contenu par des parties autres que **Rio Tinto Alcan**.

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Rio Tinto Alcan procède actuellement à différentes études en vue de poursuivre son Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (PSBLSJ) pour la période 2017-2026. Lasalle | NHC s’est ainsi vue confier un mandat visant à étudier et modéliser l’érosion des berges du lac. Réalisée en trois principaux volets, faisant chacun l’objet d’un volume de rapport distinct, l’étude s’est d’abord penchée sur la dynamique sédimentaire du lac dans son ensemble (volume 1), puis s’est attardée sur deux secteurs plus complexes, l’embouchure de la rivière Belle-Rivière (volume 2) et la Pointe Langevin (volume 3). Un quatrième volume du rapport réunit les rapports des consultants ayant participé à l’étude.

L’embouchure de la rivière Belle-Rivière et les berges adjacentes dans les secteurs de St-Gédéon et de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix sont soumises depuis plusieurs années à une dynamique hydrosédimentaire particulière. Au fil des ans, les rechargements successifs dans le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix ont mené à la formation d’une vaste pointe sableuse du côté sud de l’embouchure, repoussant progressivement le chenal de la rivière Belle-Rivière vers le nord. Autrefois rectiligne, le chenal de la rivière décrit maintenant un virage prononcé et longe une partie des plages de St-Gédéon. Ce changement de trajectoire de la rivière a conduit à une érosion de la zone d’avant-plage, rendant les berges plus vulnérables à l’action directe des vagues de tempête et au transport longitudinal des sédiments. Dans les sept dernières années, les plages entre les bornes inamovibles 28 et 32 ont dû être rechargées cinq fois.

Pour réduire les problèmes d’érosion et la fréquence des rechargements de plage dans ce secteur, Rio Tinto Alcan a mis au point six scénarios de réaménagement de l’embouchure de la rivière Belle-Rivière et du secteur de St-Gédéon¹. Outre le statu quo (variante 1), ces variantes proposent différents niveaux de remplissage du chenal creusé par la rivière et la mise en place d’un ou deux épis perpendiculaires au rivage :

- Variante 2 : Remplissage du chenal à l’élévation 99,0 m;
- Variante 3 : Remplissage du chenal à l’élévation 100,0 m sans épis;
- Variante 4 : Remplissage du chenal à l’élévation 100,0 m avec un épi au chaînage 2+200 (épi 2.3);
- Variante 5 : Remplissage du chenal à l’élévation 100,0 m avec un épi au chaînage 2+200 (épi 2.3) et un épi au chaînage 1+875 (épi 2.1);
- Variante 6 : Remplissage du chenal à l’élévation 100,5 m sans épis.

Les variantes d’aménagement incluent également le creusage des accumulations de sable de part et d’autre de l’embouchure, la mise en place d’un perré de protection et d’une digue de pierres en rive droite (côté est) de la rivière, l’excavation d’un nouveau canal à l’embouchure de la rivière, et le rechargement de la plage sur 500 m entre les bornes 28 et 32.

¹ Suite aux consultations publiques, Rio Tinto Alcan a retenu un concept de base nommé « variante 3B ». Les variantes analysées dans cette étude sont dérivées de ce concept.

Pour vérifier l'efficacité des variantes proposées, Lasalle|NHC a mis en œuvre un modèle hydrosédimentologique de l'embouchure de la rivière Belle-Rivière. Réalisé à l'aide de la suite logicielle MIKE 21 FM développée par la firme *DHI Water & Environment*, le modèle a permis de simuler les vagues, les courants et le transport sédimentaire dans le secteur.

Pour différents épisodes synthétiques de tempêtes permettant de maximiser les principales tendances hydrosédimentaires du secteur, les volumes d'érosion de la plage entre les bornes inamovibles 28 et 32 ont été calculés. Exprimés en fonction du volume d'érosion obtenu en conditions actuelles, ces résultats ont permis la comparaison des différentes variantes d'aménagement en terme de pourcentage de réduction des volumes d'érosion. À l'issue de cette première analyse, en tenant compte des différentes contraintes de construction, la variante 3 est ressortie comme étant la variante à privilégier.

En deuxième analyse, l'érosion escomptée dans le nouveau canal pour permettre le passage de la crue printanière de façon rectiligne dans l'embouchure de la rivière a été vérifiée en présence de la variante 3. Une gamme variée de crues printanières a été testée pour trois sections de canal différentes : (1) largeur de 5 m avec radier à 98,5 m (concept initial), (2) largeur de 10 m avec radier à 98,5 m et (3) largeur de 10 m avec radier à 98,0 m.

Dans chaque cas, le passage complet de la crue, incluant la montée des débits de la rivière et du niveau moyen du lac St-Jean, sur des fonds constitués de sables uniformes de 0,6 mm, a été simulé. Les résultats ont ensuite été interprétés en termes de risques de débordement de la digue de pierres prévue à l'amont du canal et de vitesses d'écoulement, potentiellement érosives, dans la zone d'avant-plage du tronçon étudié.

Les résultats ont montré qu'une section d'écoulement présentant une largeur initiale de 5 mètres ne parvenait pas à s'éroder suffisamment pour permettre le passage du pic de la crue sans risque significatif d'érosion de la zone d'avant-plage de St-Gédéon. Les simulations avec une largeur initiale de 10 m ont montré de meilleurs résultats.

Au final, la variante 3, avec un canal large de 10 m, constitue la variante à privilégier. Le concept d'aménagement et la modélisation des processus hydrosédimentaires s'appuyant sur différentes hypothèses, les recommandations suivantes sont émises :

- Planification, si possible, des travaux en fonction des prévisions hydrologiques;
- Mise en place d'un remblai en gravillon sur la digue en pierres, ou radier initial du nouveau canal à 98,0 m ;
- Suivi régulier du site par des mesures et observations pour vérifier les conditions érosives de même que la nécessité d'implanter des épis ou non;
- Échantillonnage granulométrique des sédiments.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE EXÉCUTIF.....	I
TABLE DES MATIÈRES.....	III
LISTE DE FIGURES.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	V
1 INTRODUCTION.....	1
2 MISE EN CONTEXTE.....	2
2.1 Site à l'étude.....	2
2.2 Conditions érosives.....	3
2.2.1 Tempêtes du secteur nord-ouest.....	3
2.2.2 Crue de la rivière.....	4
2.3 Problématique d'érosion observée.....	6
3 VARIANTES D'AMÉNAGEMENT.....	11
4 MODÉLISATION DE L'ÉROSION.....	15
4.1 Outils de modélisation.....	15
4.2 Zone modélisée.....	15
4.3 Approche de modélisation.....	16
5 RÉSULTATS DE MODÉLISATION.....	20
5.1 Efficacité des épis 2.1 et 2.3.....	20
5.2 Efficacité du remplissage du chenal.....	25
5.3 Choix préliminaire de la variante à privilégier.....	27
5.4 Érosion du nouveau canal.....	28
5.4.1 Largeur de 5 m et radier à 98,5 m.....	29
5.4.2 Largeur de 10 m et radier à 98,5 m.....	33
5.4.3 Largeur de 10 m et radier à 98,0 m.....	40
5.4.4 Dimensions recommandées.....	44
5.5 Variante finale et recommandations.....	44
6 CONCLUSIONS.....	45
7 RÉFÉRENCES.....	47

LISTE DE FIGURES

Figure 2.1: Localisation générale du secteur Belle-Rivière	2
Figure 2.2: Site 93.02.02.....	3
Figure 2.3: Rose des vents à la station de Mistook en période d'eau libre	4
Figure 2.4: Débits historiques de la rivière Belle-Rivière et niveau historiques du lac St-Jean.....	5
Figure 2.5: Ouvrages de stabilisation des berges à Métabetchouan-Lac-à-la-Croix.....	7
Figure 2.6: Ouvrages de stabilisation des berges à St-Gédéon.....	8
Figure 2.7: Caractéristiques hydrosédimentaires du secteur Belle-Rivière	9
Figure 2.8: Rose des vagues au large #de la borne 30 à St-Gédéon	10
Figure 3.1: Plan général d'aménagement	13
Figure 3.2: Variantes d'aménagement.....	14
Figure 4.1 : Limites du modèle partiel de Belle-Rivière	16
Figure 4.2: Bathymétrie numérique du modèle partiel de Belle-Rivière	17
Figure 4.3: Résolution du maillage numérique du modèle partiel de Belle-Rivière	18
Figure 5.1: Courants simulés en conditions actuelles pour des vents de 40 km/h.....	22
Figure 5.2: Courants littoraux pour les variantes 1, 3, 4 et 5	23
Figure 5.3: Profil de plage à la borne 32 selon les conditions actuelles et les variantes proposées.....	25
Figure 5.4: Hauteur de vagues en conditions actuelles et pour les variantes 2, 3 et 6.....	26
Figure 5.5: Scénarios de crue médiane et maximale (2008)	29
Figure 5.6: Résultats de modélisation pour le canal de largeur 5 m avec radier à 98,5 m - Crue médiane.....	31
Figure 5.8: Canal de largeur 5 m avec radier à 98,5 m - Niveaux et vitesses pour la crue médiane.....	34
Figure 5.9: Canal de largeur 5 m avec radier à 98,5 m - Niveaux et vitesses pour la crue maximale	35
Figure 5.9: Niveau moyen du lac et débit de la rivière Belle-Rivière en 1997 et 2010	36
Figure 5.10: Canal de largeur 10 m avec radier à 98,5 m - Niveaux et vitesses pour la crue de 1997.....	37
Figure 5.11: Canal de largeur 10 m avec radier à 98,5 m - Niveaux et vitesses pour la crue de 2008.....	38
Figure 5.12: Canal de largeur 10 m avec radier à 98,5 m - Niveaux et vitesses pour la crue de 2010.....	39
Figure 5.13: Canal de largeur 10 m avec radier à 98,0 m - Niveaux et vitesses pour la crue de 1997.....	41
Figure 5.14: Canal de largeur 10 m avec radier à 98,0 m - Niveaux et vitesses pour la crue de 2008.....	42
Figure 5.15: Canal de largeur 10 m avec radier à 98,0 m - Niveaux et vitesses pour la crue de 2010.....	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1: Cas de simulations	20
Tableau 5.2: Réduction de l'érosion pour les variantes 3, 4 et 5	24
Tableau 5.3: Réduction de l'érosion pour les variantes 2, 3 et 6	27
Tableau 5.4: Synthèse des résultats - Réduction de l'érosion pour les variantes 2, 3, 4, 5 et 6	28

1 INTRODUCTION

Rio Tinto Alcan procède actuellement à la réalisation de différentes études dans le but de poursuivre son Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (PSBLSJ), lequel fait l'objet d'un décret émis initialement par le Gouvernement du Québec en 1986, qui a été reconduit en 1996 puis en 2006. Ce décret et l'entente qui l'accompagne précisent les paramètres du PSBLSJ et fixe le mode de gestion du niveau du lac Saint-Jean.

En vue de bien préparer les démarches qui mèneront à la définition de la prochaine entente, Rio Tinto Alcan souhaite mettre à jour les moyens d'étude et de modélisation mis en œuvre pour quantifier l'érosion des berges et évaluer différents modes de gestion des niveaux du lac et leurs impacts sur l'érosion.

Lasalle|NHC a été mandaté par Rio Tinto Alcan pour réaliser une étude de modélisation de l'érosion des berges du lac Saint-Jean. Une analyse détaillée des données disponibles et la mise en œuvre de différents modèles numériques ont permis d'étudier les différents phénomènes menant aux conditions érosives observées autour du lac. Mené selon une approche unidimensionnelle, ce premier volet de modélisation a permis d'identifier deux secteurs plus complexes, nécessitant une modélisation bidimensionnelle : les secteurs Belle-Rivière et Pointe Langevin. Deuxième volume d'une série de quatre, le présent rapport rend compte de l'étude et de la modélisation de l'érosion du secteur Belle-Rivière.

Le rapport comprend cinq principaux chapitres. Le chapitre 2 offre une description du secteur à l'étude et de la dynamique sédimentaire du site. Le chapitre 3 présente les différentes variantes d'aménagement proposées par Rio Tinto Alcan pour minimiser les problèmes d'érosion, et le chapitre 4 décrit les principales caractéristiques du modèle numérique mis en œuvre pour étudier le site. Le chapitre 5 résume les résultats de modélisation obtenus pour chacune des variantes d'aménagement et propose une variante à privilégier.

2 MISE EN CONTEXTE

2.1 Site à l'étude

Le secteur de Belle-Rivière est situé dans la portion sud-est du lac St-Jean. Il est caractérisé par l'embouchure de la rivière du même nom, qui sépare les secteurs de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix au sud, et St-Gédéon au nord (figure 2.1)

Dans le programme de stabilisation des berges du lac St-Jean (PSBLSJ), le tronçon de plage faisant l'objet de la présente étude est identifié comme étant le site 93.02.02, entre les bornes inamovibles 28 et 34 (figure 2.2).



Figure 2.1: Localisation générale du secteur Belle-Rivière



Figure 2.2: Site 93.02.02

2.2 Conditions érosives

Deux principales forces sont à l'origine des problèmes d'érosion observés dans le secteur de Belle-Rivière : les vagues générées par les vents sur le lac et les vitesses en rivière lors de la crue de printemps.

2.2.1 Tempêtes du secteur nord-ouest

La position du secteur de Belle-Rivière par rapport à l'ensemble du lac St-Jean (se référer à la figure 2.1) fait en sorte qu'il est exposé aux vagues générées par les vents en provenance des directions comprises entre le sud-ouest (SO) et le nord-est (NE). En termes de fetch, ce sont les vents en provenance des directions ouest-nord-ouest (ONO) à nord-nord-ouest (NNO) qui parcourent les plus grandes distances avant d'atteindre le site.

D'après les vents enregistrés à la station de Mistook depuis 1994, les vents les plus forts et les plus fréquents soufflant sur le lac proviennent des directions ouest (O), ouest-nord-ouest (ONO) et nord-ouest (NO) (figure 2.3). Pour les vents de l'ONO et du NO, le fetch est également important, créant des conditions propices à la génération de vagues dominantes pour ces directions.

Des vents forts sont également observés en provenance de l'est-sud-est (ESE) et de l'est (E), mais ceux-ci soufflent sur des fetchs pratiquement nuls par rapport au site. Les vagues générées par ces vents sont donc très faibles et sans conséquence pour les conditions érosives de la plage.

L'analyse des données de vents réalisée par la firme CRI (réf. [1]) révèle que la plupart des tempêtes en provenance du secteur centré sur le NO ont lieu en automne, lorsque les niveaux du lac sont généralement au-dessus de 100,5 m. La combinaison de vagues de tempêtes et de niveaux hauts en automne, lorsque les berges ne sont pas encore protégées par un couvert de glace, donne lieu à des conditions érosives particulièrement fortes dans le secteur étudié.

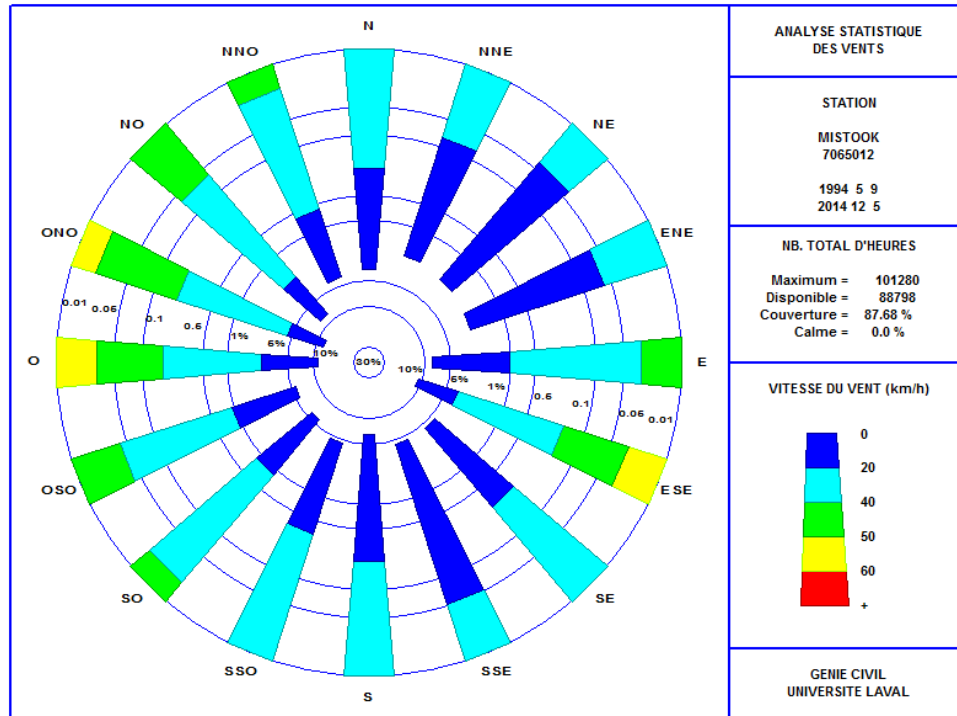


Figure 2.3: Rose des vents à la station de Mistook en période d'eau libre

2.2.2 Crue de la rivière

La figure 2.4 illustre les données quotidiennes de débits de la rivière Belle-Rivière enregistrées entre 1997 et 2014 à la station hydrométrique 61307 (MDDELCC), ainsi que les valeurs minimales, médianes et maximales de chaque jour. À l'exception de quelques événements isolés, les débits maximums sont enregistrés au printemps, entre le 15 avril et le 15 mai. La crue moyenne printanière est de l'ordre de 23 m³/s, mais peut atteindre certaines années des valeurs de 50-65 m³/s. En période automnale, le débit moyen de la rivière est d'environ 6-7 m³/s.

L'embouchure de la rivière Belle-Rivière est située dans la zone la plus au sud du lac, de sorte que la crue de la rivière survient avant la remontée générale des niveaux d'eau du lac, qui dépend aussi de la crue, plus tardive, des autres tributaires situés plus au nord. Tel qu'indiqué à la figure 2.4, il y a un décalage d'environ deux semaines entre la montée de la crue de la rivière Belle-Rivière et le rehaussement du niveau du lac.

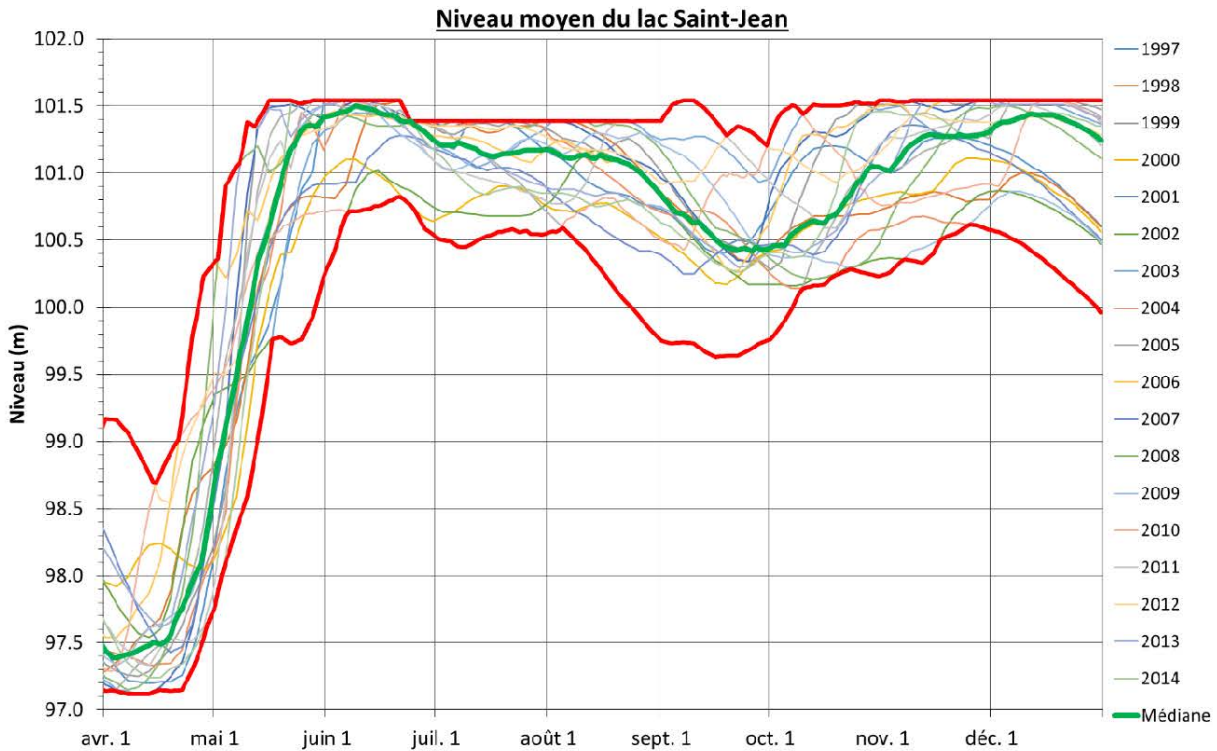
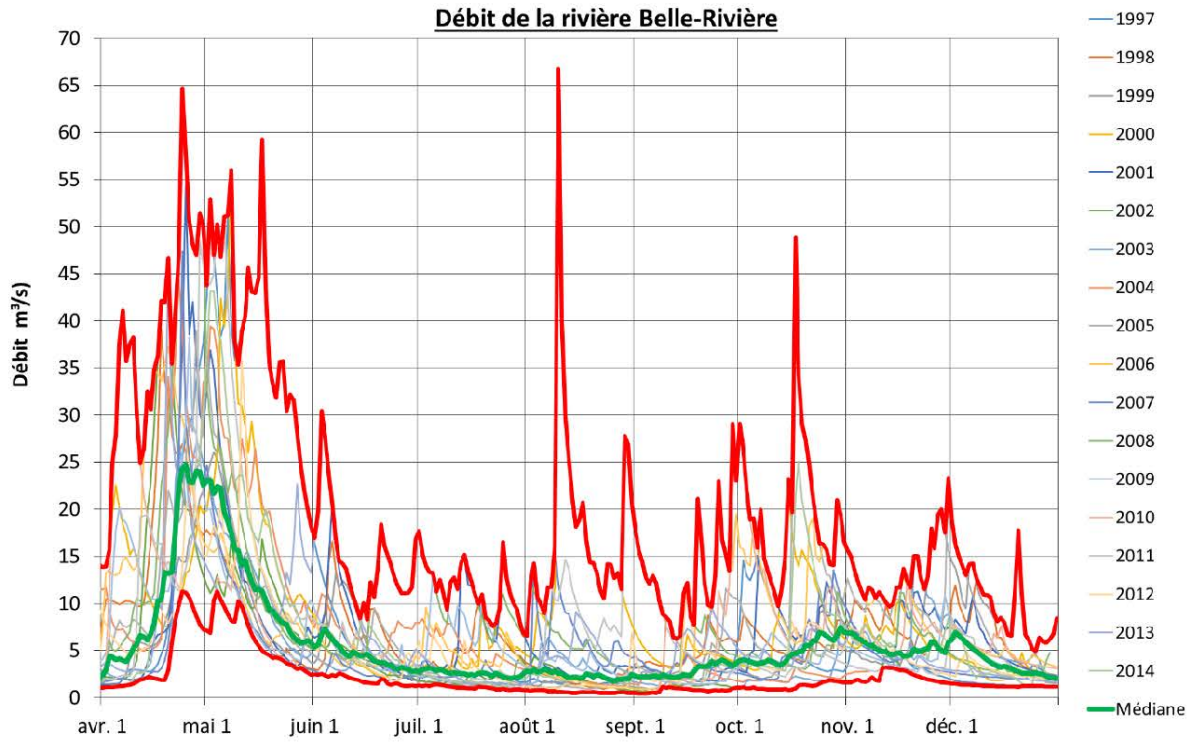


Figure 2.4: Débits historiques de la rivière Belle-Rivière et niveau moyen historique du lac Saint-Jean

2.3 Problématique d'érosion observée

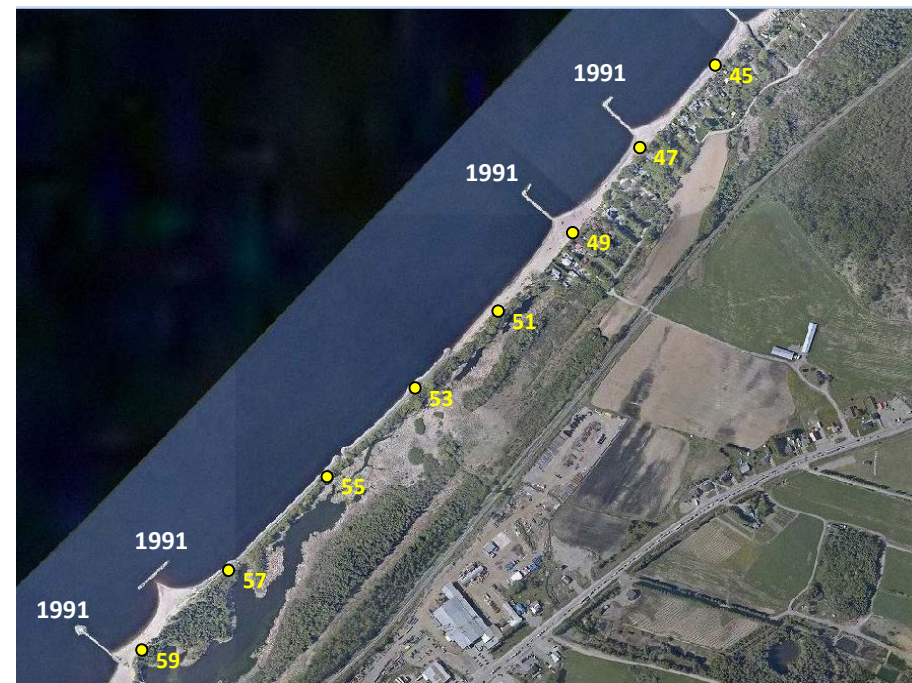
Le tronçon de plage entre les bornes 28 et 32 du secteur de St-Gédéon a été l'objet de rechargements fréquents ces dernières années. Pour mieux comprendre la problématique d'érosion affectant ce site, il convient d'examiner la dynamique sédimentaire des cellules littorales adjacentes.

Le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix est un long tronçon de plage où le transport longitudinal est important. L'orientation de la rive par rapport aux vents dominants de la région favorise un transport longitudinal du sud vers le nord. Pour freiner la dérive littorale, des épis ont été construits au fil des ans entre les bornes 63 de ce secteur et l'embouchure de la rivière Belle-Rivière. Les premiers épis, construits en 1988, 1989 et 1991, ciblent différentes zones comprises entre les bornes 59 et 7. Par la suite, en 1994, 1995, 2004, 2008 (géotubes), 2010 (géotubes) et 2012, les interventions se situent au nord de la borne 42, jusqu'à la borne 4. Les épis les plus récents datent de 2014, dans la portion la plus au nord du site (figure 2.5).

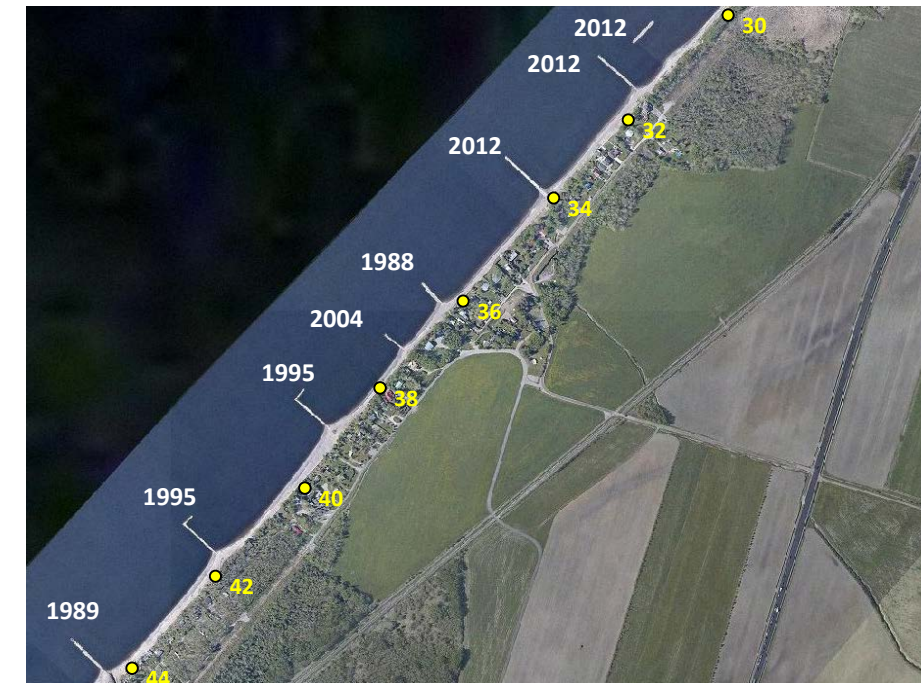
Du côté de St-Gédéon, la partie nord du secteur a été stabilisée en 1987 par la mise en place d'un champ d'épis entre les bornes 28 et 15. Depuis ces travaux, seul un épi a été construit en 1995 pour engraisser localement la plage municipale (figure 2.6). Dans le tronçon de plage à l'étude, les vagues génèrent des courants littoraux orientés vers le sud.

L'implantation d'épis s'accompagne généralement de rechargements de plage pour favoriser l'atteinte de plages à l'équilibre. Avec le temps, les sédiments s'accumulent entre les épis et la plage développe une orientation permettant d'atteindre un transport net nul. Pendant la période de transition, toutefois, l'érosion se poursuit et les sédiments rechargés peuvent être déplacés vers l'aval. L'interruption de la dérive littorale par les épis crée de surcroît un déséquilibre dans la zone située immédiatement en aval, induisant une érosion additionnelle. Pour limiter les effets négatifs accompagnant la mise en place de champs d'épis, il est généralement recommandé d'intervenir dans une cellule littorale, i.e. jusqu'à un endroit où les mécanismes de transport sédimentaire changent.

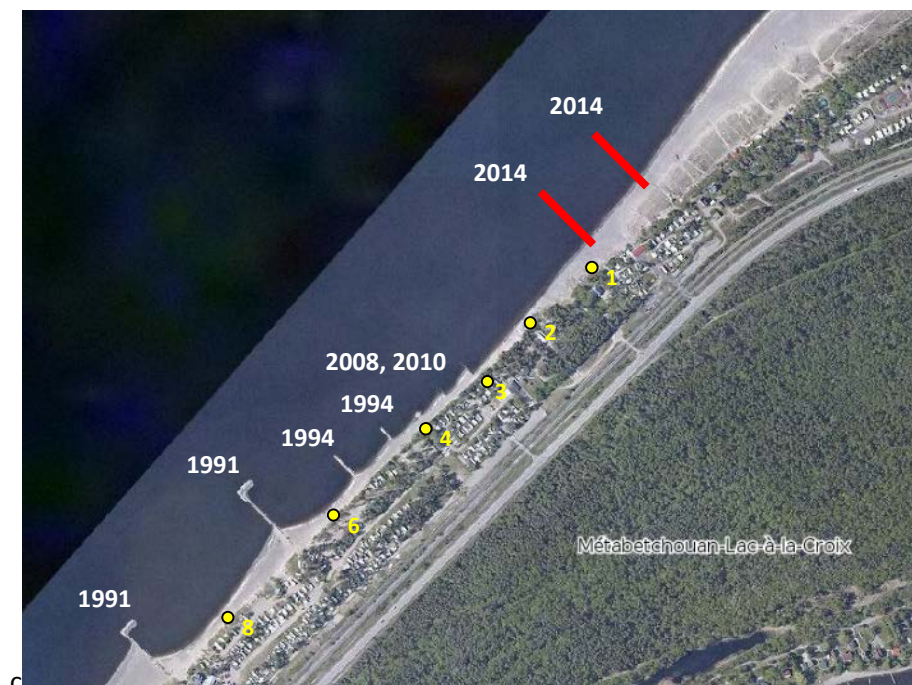
Dans le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, de nombreux rechargements ont été requis pour stabiliser certains tronçons de plage. Ces rechargements, en partie érodés par la suite, ont eu pour effet d'augmenter la dérive littorale dominante vers le nord, amplifiant la déposition de sédiments dans la zone du banc de sable, au sud de l'embouchure de la rivière Belle-Rivière. Déjà importante en 1986, cette zone d'accumulation de sédiments a pris de l'ampleur depuis. La comparaison des photos aériennes historiques du site montre que cet engraissement a eu pour conséquence de « pousser » le chenal de la rivière vers son côté nord (réf. [2]). Autrefois rectiligne, le chenal de la rivière décrit maintenant un méandre important du côté de St-Gédéon et débouche dans le lac en tournant à près de 90° vers le nord-est avant de rejoindre les zones plus profondes du lac. Au printemps, lorsque la rivière est en crue et que le niveau du lac est encore bas, les vitesses dans le chenal principal de la rivière sont importantes et créent de l'érosion en rive droite (du côté est) du méandre et dans le chenal longeant la plage de St-Gédéon. Les principales caractéristiques hydrosédimentaires de la zone de l'embouchure sont schématisées à la figure 2.7.



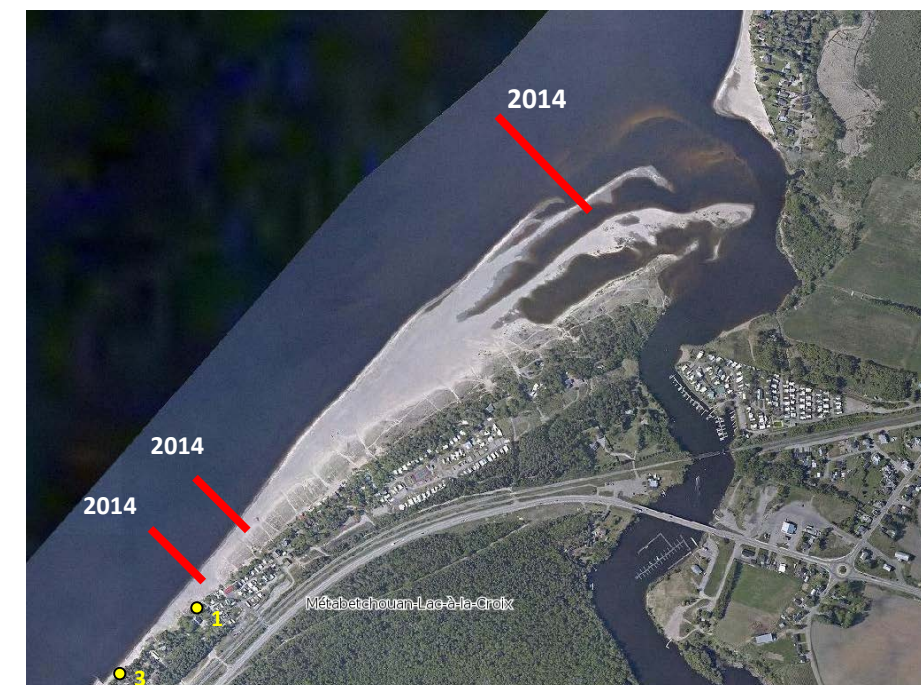
a) Bornes 59 à 45



b) Bornes 44 à 30



c) Bornes 8 à 1



d) Zone du banc de sable

Figure 2.5: Ouvrages de stabilisation des berges à Métabetchouan-Lac-à-la-Croix



Figure 2.6: Ouvrages de stabilisation des berges à St-Gédéon



Figure 2.7: Caractéristiques hydrosédimentaires du secteur Belle-Rivière

La modélisation du climat de vagues dans l'ensemble du lac à partir des données horaires de vents enregistrées à la station de Mistook entre 1992 et 2014 (se référer au volume 1 du rapport, réf. [3]) montre que les vagues dominantes au large de St-Gédéon sont centrées sur le secteur ONO (figure 2.8). À l'approche du rivage, les vagues ressentent davantage l'effet des fonds et tournent par réfraction. Ce phénomène élimine presque entièrement la variabilité directionnelle observée dans les vents (voir figure 2.3), et les vagues atteignent la plage selon une direction dominante, avec très peu d'étalement. L'angle d'incidence des vagues à St-Gédéon est pratiquement perpendiculaire à la ligne du rivage, ce qui induit généralement une composante transversale du transport plus importante que la composante longitudinale.



Figure 2.8: Rose des vagues au large de la borne 30 à St-Gédéon

La création d'un chenal plus profond devant les plages de St-Gédéon entre les bornes 28 et 32 accentue la pente de la zone d'avant-plage, retardant le déferlement des vagues. Ce déferlement plus tardif augmente la hauteur des vagues près de la berge tout en rapprochant les courants littoraux de celle-ci. La berge devient ainsi plus vulnérable de deux façons : par érosion transversale, sous l'action des vagues de tempête, et par érosion longitudinale, sous l'action des courants littoraux. Les sédiments érodés par érosion transversale, plutôt que de s'accumuler en bas de plage, peuvent être emportés par les courants littoraux. Cette dynamique sédimentaire limite la reconstruction naturelle de la plage et explique probablement la fréquence accrue des rechargements depuis le changement de trajectoire du chenal principal de la rivière. Les plages du tronçon à l'étude ont été rechargées en 1993, 1997, 2009, 2011, 2012, 2014 et 2015.

3 VARIANTES D'AMÉNAGEMENT

Avec la collaboration de la firme Norda Stelo, Rio Tinto Alcan a développé différentes variantes d'aménagement visant à réduire les problèmes d'érosion affectant le secteur de Belle-Rivière. Quatre de ces variantes ont été présentées lors des rencontres de consultation avec le milieu. Le processus d'élaboration des variantes s'est appuyé sur les principes généraux suivants :

- L'accumulation de sédiments du côté sud de l'embouchure est plus importante que celle du côté nord, résultant en un déplacement du chenal de la rivière Belle-Rivière vers St-Gédéon. Pour corriger cette situation, les sédiments doivent être interceptés avant qu'ils n'atteignent l'embouchure. Suivant cette conclusion, Rio Tinto Alcan a procédé en 2014 à la mise en place de trois épis dans le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, dont un épi long de 200 m près de l'embouchure de la rivière (voir figure 2.5).
- La mise en place d'épis accompagnés de rechargements de plage devrait permettre d'augmenter la largeur de plage entre les bornes 28 et 33 du secteur de St-Gédéon et diminuer les fréquences de rechargement jusqu'à l'atteinte de plages en équilibre. À cette fin, des épis sont envisagés aux bornes 30 (épi 2.1) et 33 (épi 2.3).
- Le chenal creusé par la rivière en crue le long du rivage de St-Gédéon favorise une attaque plus forte des vagues sur la plage, causant des problèmes d'érosion transversale récurrents lors des épisodes de fortes tempêtes. Pour favoriser le déferlement des vagues plus au large, il est recommandé de remplir le chenal.

Au total, six variantes d'aménagement ont été proposées par Rio Tinto Alcan et Norda Stelo:

- Variante 1 : Statu quo;
- Variante 2 : Remplissage du chenal à l'élévation 99,0 m;
- Variante 3 : Remplissage du chenal à l'élévation 100,0 m sans épis;
- Variante 4 : Remplissage du chenal à l'élévation 100,0 m avec un épi au chaînage 2+200 (épi 2.3, borne 33);
- Variante 5 : Remplissage du chenal à l'élévation 100,0 m avec un épi au chaînage 2+200 (épi 2.3) et un épi au chaînage 1+875 (épi 2.1, borne 30);
- Variante 6 : Remplissage du chenal à l'élévation 100,5 m sans épis.

Toutes les variantes, à l'exception des conditions actuelles (variante 1), incluent également les éléments suivants :

- Rechargement initial de plage de 50 000 tonnes sur 500 m entre les bornes 28 et 32 à St-Gédéon;
- Excavation de 62 533 tonnes de sédiments en aval de l'épi de 200 m de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix;
- Excavation de l'accumulation de sable au sud du secteur St-Gédéon à l'élévation 98,0 m;
- Creusage d'un nouveau canal large de 5 m à l'élévation 98,5 m en aval de l'épi 2.3;
- Digue de pierres à l'élévation 99,5 m à l'extrémité sud de la plage rechargée (qui sert de base éventuelle à l'épi 2.3);
- Remblai en gravillon à l'élévation 100,0 m au coin nord de la zone de remplissage;
- Protection en perrés de la rive droite du méandre.

Le plan général d'aménagement est illustré à la figure 3.1 et les variantes individuelles modélisées à la figure 3.2.

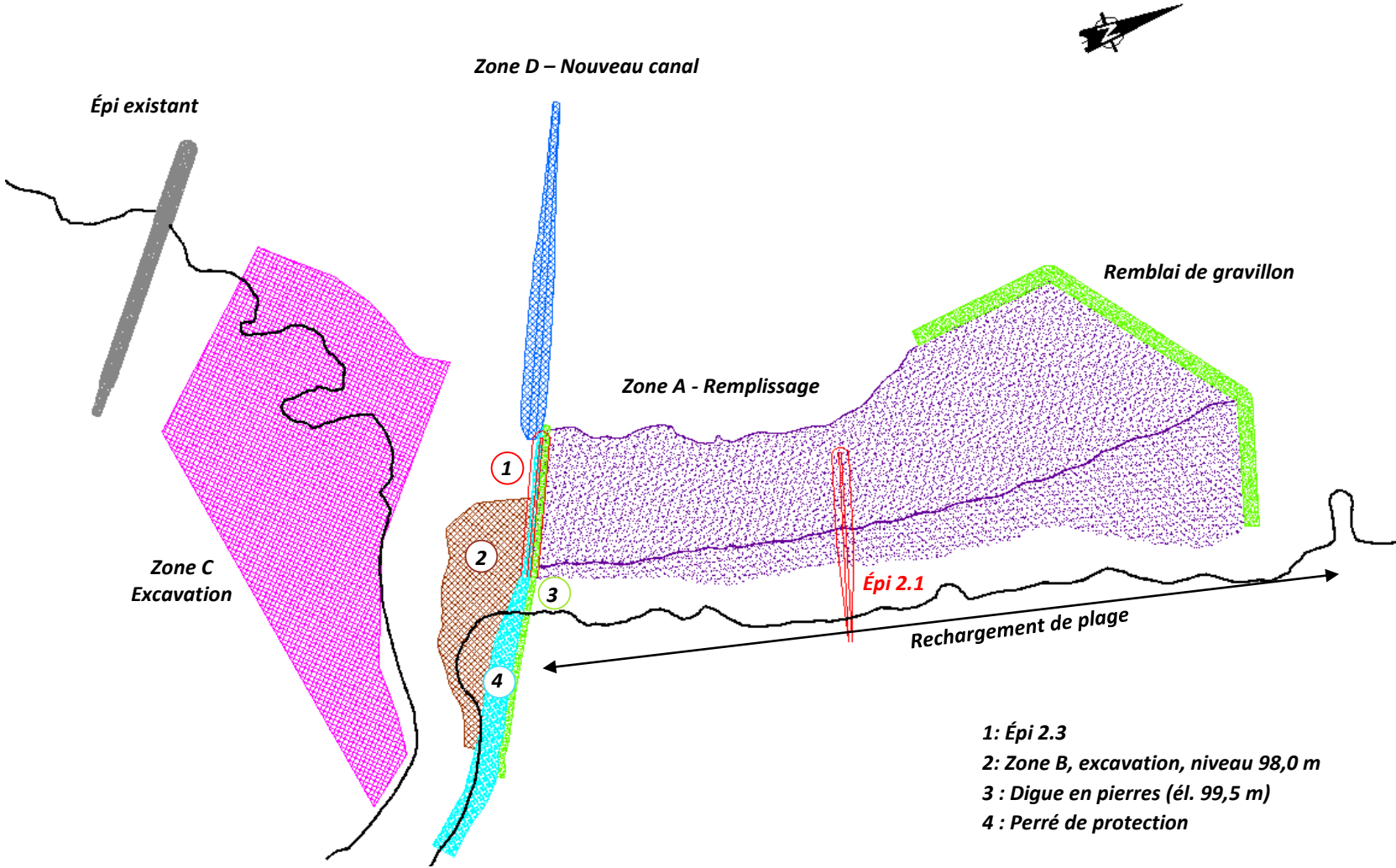


Figure 3.1: Plan général d'aménagement

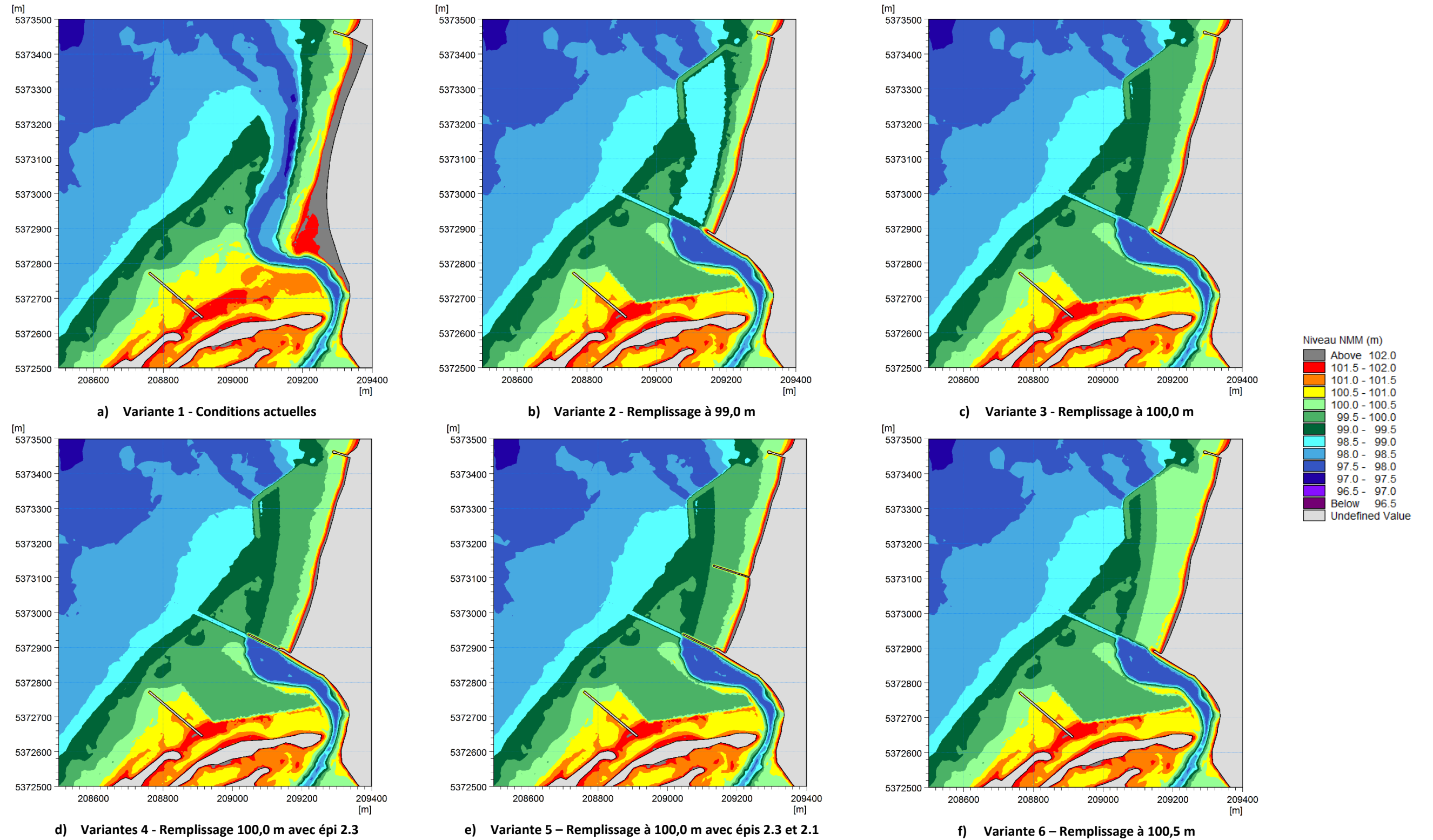


Figure 3.2: Variantes d'aménagement

4 MODÉLISATION DE L'ÉROSION

La présence d'une rivière et la complexité de la bathymétrie dans le secteur à l'étude ne permettent pas l'emploi d'un modèle unidimensionnel d'érosion littorale pour bien prédire les mécanismes de transport à l'embouchure de la rivière Belle-Rivière. L'utilisation d'un modèle bidimensionnel a donc été privilégiée pour comparer les différentes variantes d'aménagement entre elles.

4.1 Outils de modélisation

Tel que mentionné dans le volume 1 du rapport d'étude (réf. [3]), l'ensemble des travaux de modélisation, de même que le montage des modèles numériques de terrain, ont été réalisés à l'aide des modules de la suite logicielle MIKE, conçue et commercialisée par la firme danoise *DHI Water & Environment*.

Dans le cadre de la modélisation bidimensionnelle du secteur Belle-Rivière, le module *MIKE21/3 Coupled Model FM* a été utilisé. Ce module intègre de manière dynamique l'ensemble des modules requis pour une description détaillée de l'érosion côtière:

- Module hydrodynamique (*MIKE 21 FM HD*): modélisation des niveaux d'eau et des courants littoraux générés par les vagues (voir chapitre 7 du volume 1 du rapport d'étude pour une description complète du modèle);
- Module d'analyse spectrale des vagues (*MIKE 21 SW*) : génération des vagues par le vent, transformation des vagues à l'approche du littoral, génération des contraintes de radiation produisant les courants littoraux (chapitre 8, volume 1);
- Module de transport de sable (*MIKE 21 ST*) : modélisation de l'érosion, du transport et de la déposition de sable sous l'action des vagues et/ou des courants littoraux.

Le module *MIKE21/3 Coupled Model FM* prend donc en considération les interactions entre les vagues dues aux vents, les courants, le transport des sédiments et les changements morphologiques. L'érosion simulée par ce modèle tient compte de l'effet combiné de l'érosion longitudinale et de l'érosion transversale.

4.2 Zone modélisée

Afin d'obtenir une meilleure résolution dans la zone de déferlement des vagues et permettre une représentation adéquate des ouvrages, le maillage du modèle numérique développé dans le premier volet d'étude a été raffiné dans le secteur de Belle-Rivière. Compte tenu qu'un raffinement de maillage se traduit automatiquement par une augmentation importante des temps de calculs, un modèle partiel a été mis au point. Le modèle partiel du secteur Belle-Rivière est long d'environ 5 km, centré sur l'embouchure de la rivière, et s'étend environ 2 km vers le large. Ses limites par rapport au modèle d'ensemble sont illustrées à la figure 4.1.

Le modèle partiel offre une réduction significative de superficie par rapport à l'ensemble du lac, mais demeure relativement grand par rapport à la zone de l'embouchure de la rivière Belle-Rivière (figure 4.2). La longueur du modèle n'a pu être davantage réduite compte tenu des nombreux épis jalonnant le rivage et de la nécessité de maintenir suffisamment éloignées les frontières du modèle, qui introduisent inévitablement un certain degré d'imprécision.

La résolution du maillage a été optimisée pour réduire les temps de calculs (figure 4.3). Celle-ci diminue progressivement à l'approche du rivage, passant d'une résolution de 3 000 m² à 15 m². Près du tronçon de plage à l'étude, entre les bornes 27 et 33, ainsi qu'autour des épis, une zone de maillage très fin, d'une résolution de 5 m², a été définie.

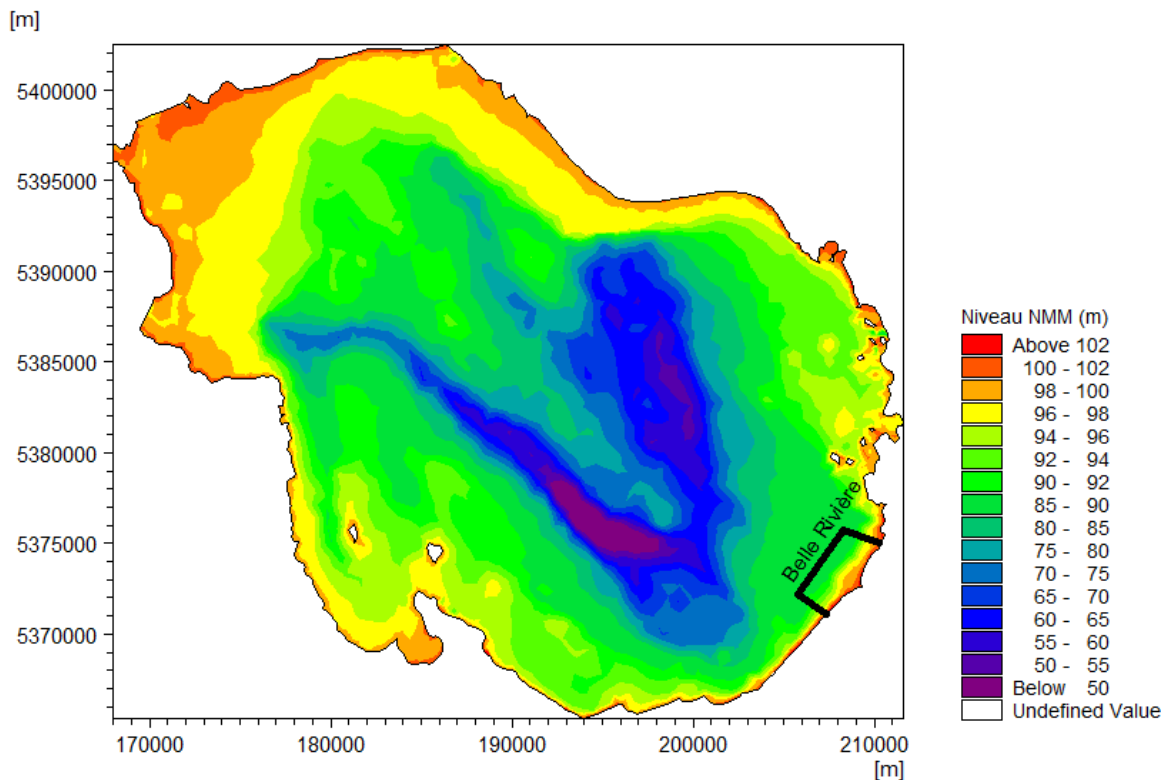


Figure 4.1 : Limites du modèle partiel de Belle-Rivière

4.3 Approche de modélisation

La modélisation de l'érosion côtière dans le secteur de Belle-Rivière a été réalisée en deux principales étapes.

Dans un premier temps, les vagues et les courants littoraux induits par celles-ci ont été générées par le vent dans le modèle d'ensemble du lac, mis au point dans le premier volet d'étude (volume 1, chapitre 8). Cette première étape ne pouvait être réalisée avec le modèle partiel, celui-ci offrant des fetchs de longueur trop limitée.

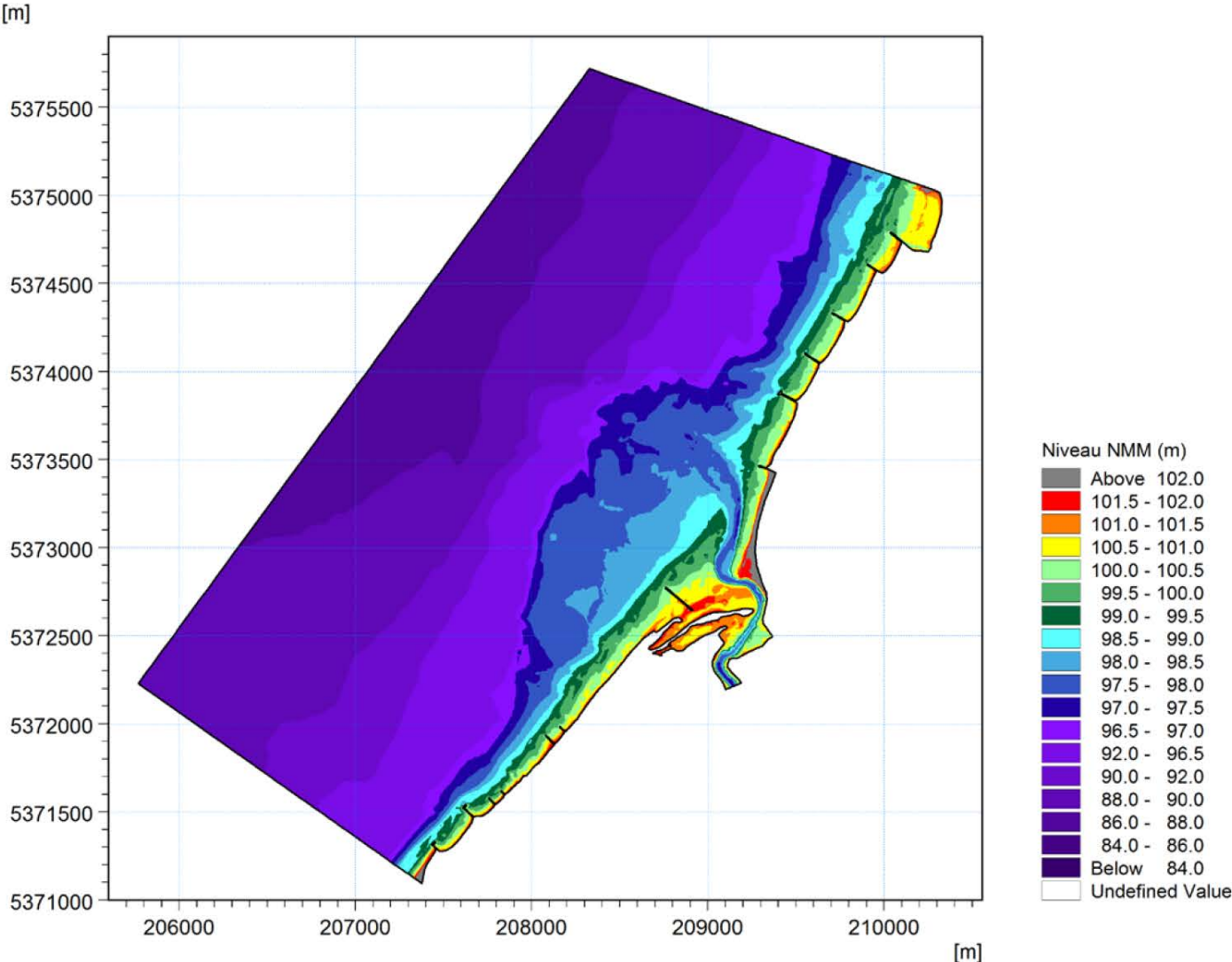


Figure 4.2: Bathymétrie numérique du modèle partiel de Belle-Rivière

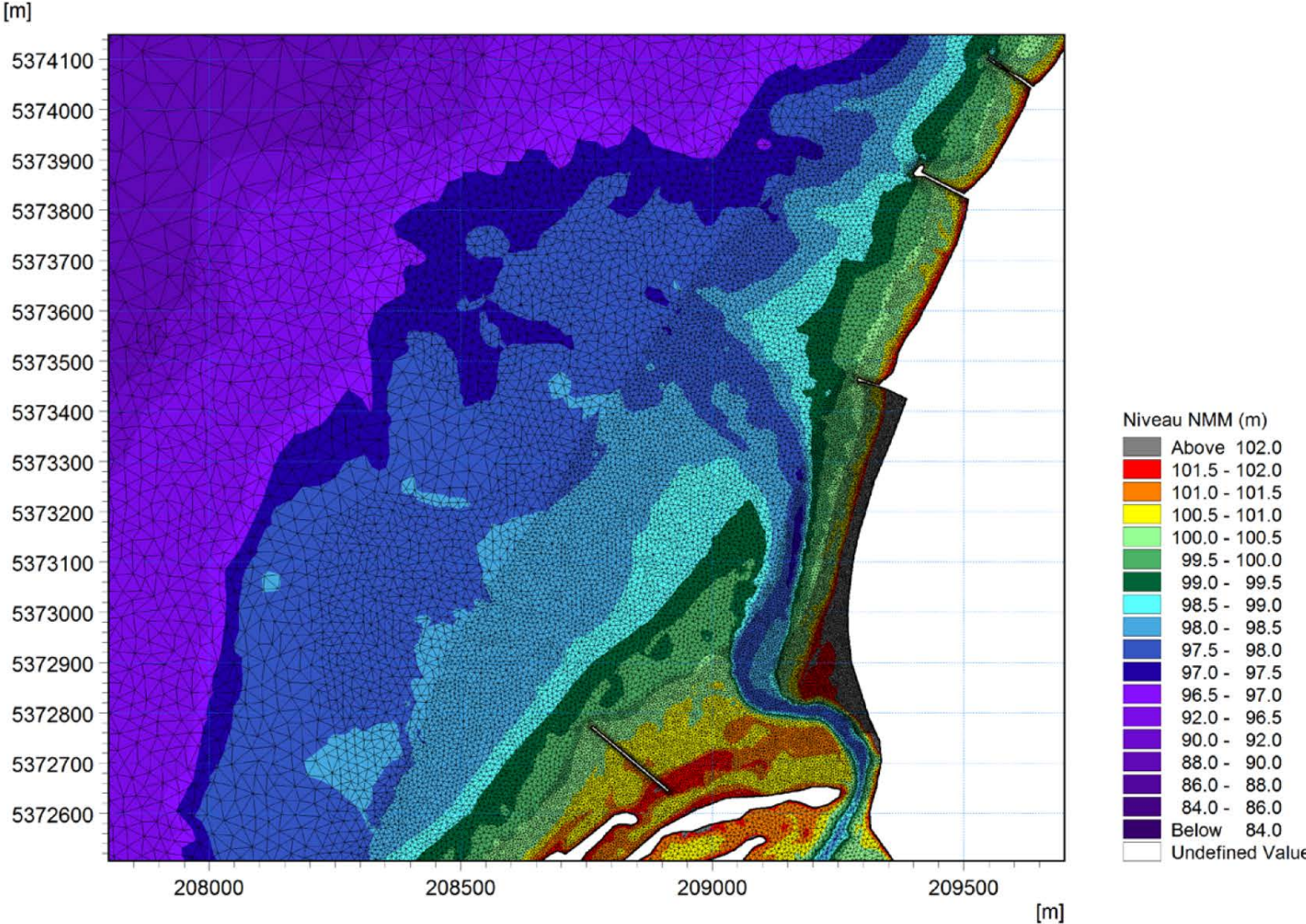


Figure 4.3: Résolution du maillage numérique du modèle partiel de Belle-Rivière

Les résultats obtenus dans le modèle d'ensemble aux limites du modèle partiel ont ensuite été extraits sous formes de séries temporelles de niveaux d'eau, vitesses de courant, hauteur, direction et période des vagues. Pour la limite correspondant à l'entrée du débit en rivière, les valeurs basées sur les mesures de la station 61307 ont été imposées (cf. section 2.2.2).

Outre les conditions hydrodynamiques et la transformation des vagues, le modèle partiel simule également le transport sédimentaire et les changements morphologiques qui en résultent. Pour demeurer cohérent avec les analyses appliquées à l'ensemble du lac à l'aide du module *LITPACK* (volume 1, chapitre 9), un diamètre uniforme de sédiments de 1,3 mm a été utilisé². Les zones constituées d'embrochements plus grossiers (gravillon, pierres, perrés, etc.) ont quant à elles été définies comme étant non-érodables.

Malgré la forte réduction de temps de calculs obtenu en développant un modèle partiel, les temps de calculs liés à la modélisation bidimensionnelle et aux nombreux phénomènes modélisés ne permettent pas de simulations à long terme. Des tempêtes synthétiques de vents et de niveau constants ont donc été mises au point. Selon la problématique examinée, des directions de vents différentes ont été utilisées. Dans tous les cas, une durée de 72 heures a été spécifiée, permettant d'obtenir un état permanent suffisamment long pour bien définir les grandes tendances hydrosédimentaires associées à chacune des variantes.

Cette approche est certes simplifiée, mais elle se prête bien au secteur de Belle-Rivière. En effet, tel que souligné à la section 2.3, la variabilité dans la direction des vents soufflant sur le lac n'est presque plus perceptible dans les vagues parvenant au site. En dépit de la direction initiale du vent, les vagues finissent par tourner sous l'effet de la réfraction et par s'enligner de manière frontale au rivage.

L'approche méthodologique développée dans le cadre de l'étude permet d'évaluer l'érosion à court terme, dans une optique de protection contre les tempêtes et de comparaison entre différentes variantes d'aménagement. Les résultats ne doivent toutefois pas être directement appliqués à une évaluation des volumes historiques de rechargement, puisque les mécanismes de reconstruction des plages, qui ont lieu sur de plus grandes périodes, ne sont pas simulés.

² Pour les simulations plus précises de la variante recommandée, visant à simuler l'érosion du nouveau canal situé dans l'embouchure de la rivière, le diamètre des sédiments a été réduit à 0,6 mm. Ce choix est abordé à la section 5.4.

5 RÉSULTATS DE MODÉLISATION

Pour limiter les cas de calculs, les différents objectifs visés par le réaménagement de l’embouchure ont d’abord été traités séparément, en identifiant pour chacun les variantes offrant des possibilités de solution et en écartant celles présentant des redondances. Le tableau 5.1 résume les cas de simulation.

Tableau 5.1: Cas de simulations

Objectifs	Variante					
	1	2	3	4	5	6
Efficacité des épis	x		x	x	x	
Efficacité du remplissage du chenal	x	x	x			x

Les items listés au tableau 5.1 sont analysés séparément aux sections 5.1 et 5.2. L’intégration de tous les résultats pour guider le choix d’une variante optimale est présentée à la section 5.3.

5.1 Efficacité des épis 2.1 et 2.3

La mise en place d’épis dans le tronçon à l’étude vise à réduire la composante longitudinale de l’érosion affectant le site, pour augmenter la largeur de plage à long terme et réduire l’ensablement de la pointe sud de la plage.

Dans un premier temps, les conditions actuelles ont été simulées avec des tempêtes synthétiques de vents soufflant à 40 km/h en provenance de secteurs différents pour identifier la direction de vents menant aux courants littoraux les plus forts dans le secteur sud de Saint-Gédéon. Conformément aux directions dominantes de vents mesurées à la station de Mistook (voir figure 2.3), des tempêtes de l’ouest (O), ouest-nord-ouest (ONO) et nord-ouest (NO) ont été simulées.

Les résultats de ces simulations sont illustrés à la figure 5.1. Dans un premier temps, il est intéressant de noter que les patrons d’écoulement sont très similaires peu importe la direction incidente des vents. Une veine d’écoulement issue du secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix est observée en direction de l’embouchure, laquelle est caractérisée par plusieurs courants de recirculation de faible intensité. Entre les bornes 28 et 32 du secteur St-Gédéon, deux veines de courant de sens inverse sont observées, l’une plus étendue et orientée vers le large, et l’autre plus étroite et longeant la plage en direction de l’embouchure.

Des trois directions de vents simulées, ce sont les vents du NO qui génèrent les courants littoraux en bordure de plage les plus forts (figure 5.1c). Cette direction de vents a donc été retenue pour les simulations suivantes.

Pour comparer l'efficacité des épis proposés dans les variantes 4 (épi 2.3) et 5 (épis 2.1 et 2.3), celles-ci ont été comparées à la variante 3 (aucun épi) et aux conditions actuelles pour une tempête très forte du NO ayant des vents de 60 km/h. L'utilisation de tels vents permet de maximiser les phénomènes en jeu et convient à une analyse comparative. Le niveau maximum de 101,54 m et un débit en rivière de 6 m³/s ont été utilisés dans tous les cas, ce débit étant fréquent en période automnale, lorsque la majorité des tempêtes du secteur ouest soufflent sur le lac.

Les résultats obtenus en termes de courants littoraux pour les quatre variantes modélisées sont présentés à la figure 5.2.

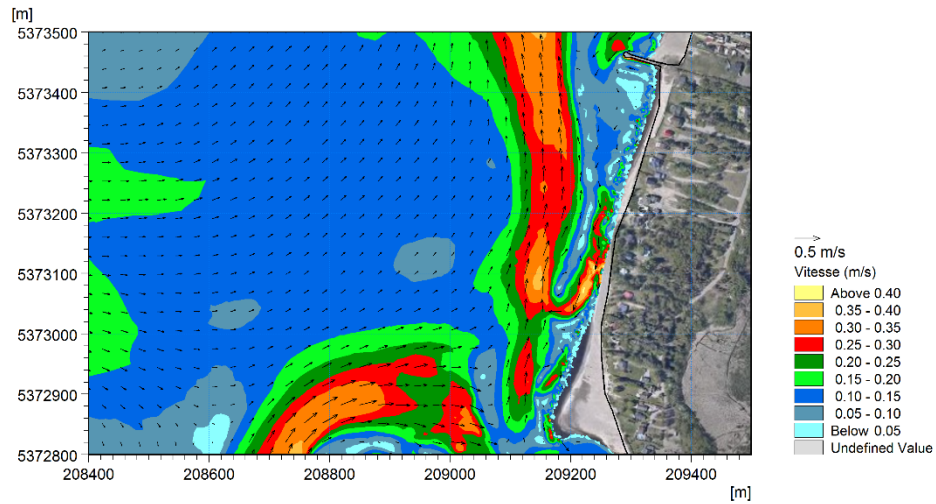
La comparaison des conditions actuelles avec la variante 3, qui n'a pas d'épis, permet d'isoler l'effet du remplissage du chenal à l'élévation 100,0 m. En conditions actuelles (figure 5.2a), la formation d'un courant littoral fort est obtenu entre les bornes 29 et 32, ainsi qu'à l'extrémité de la pointe sableuse au sud du secteur St-Gédéon. La rencontre des courants littoraux issus de ce secteur et de celui de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, de sens inverse, crée des recirculations dans l'embouchure de la rivière. Les courants dans le méandre de la rivière sont faibles et un courant de retour important est formé au large de St-Gédéon.

Avec le remplissage du chenal à une élévation de 100,0 m (figure 5.2b), les vagues déferlent plus au large qu'en conditions actuelles et génèrent beaucoup moins de courants littoraux qu'en conditions actuelles. La bande de courants est désormais restreinte au haut de plage. Les courants dans l'embouchure de la rivière sont mieux canalisés et modifient la trajectoire des veines de courants plus au large, notamment au passage de l'épi de 200 m du secteur Métabetchouan-Lac-à-la-Croix. Incurvée vers l'embouchure en conditions actuelles, la veine de courants qui contourne l'épi est déportée vers le large en présence des variantes d'aménagement (voir aussi figures 5.2c et 5.2d). Cette modification des courants est particulièrement intéressante, puisqu'elle éloigne de l'embouchure une source potentielle de sédiments, advenant que la plage en amont de l'épi de 200 m parvienne un jour à le contourner.

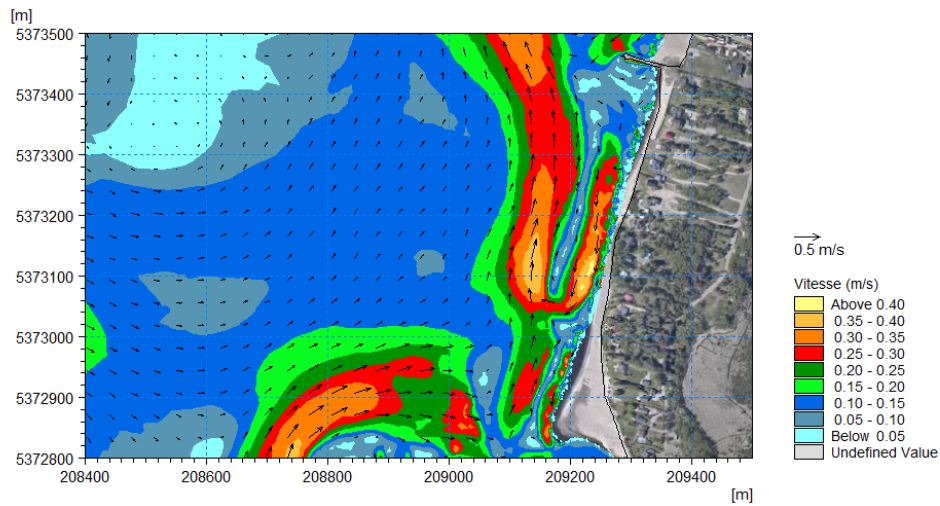
L'ajout de l'épi 2.3 dans la variante 4 accentue légèrement les patrons d'écoulement obtenus avec la variante 3 (figure 5.2c). L'épi 2.3 canalise mieux l'écoulement que la digue de pierres, ce qui a pour effet de déporter un peu plus les courants littoraux provenant de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix vers le large.

L'ajout de l'épi 2.1 à la variante 5 n'apporte pas de changement significatif (figure 5.2d). Il se forme un courant de retour entre les deux épis, un phénomène qui pourrait être favorable pour éviter les pertes vers le large et maintenir les sédiments entre les deux épis. Pour cette variante, les courants entre les deux épis sont plus faibles, passant d'environ 0,15-0,20 m/s à 0,05-0,10 m/s. Au nord de l'épi 2.1, la veine principale des courants est légèrement déviée vers le large.

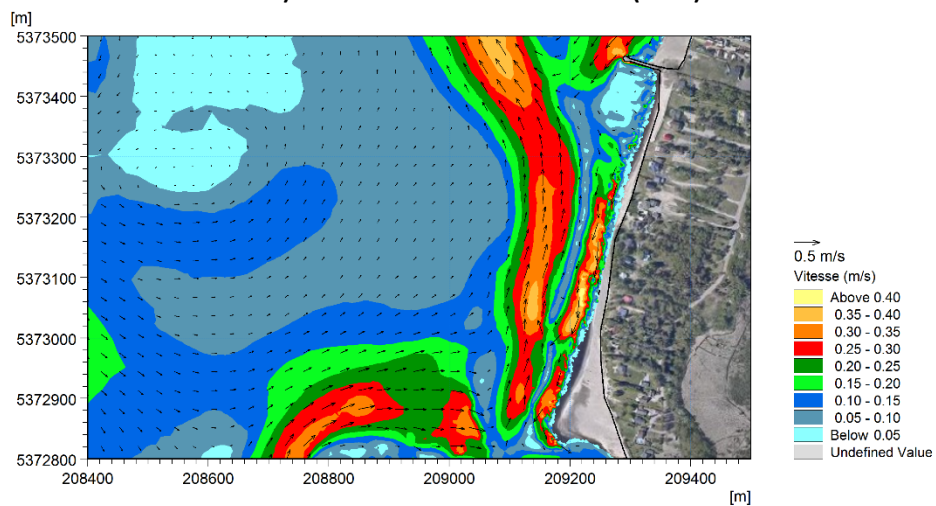
Les images présentées à la figure 5.2 permettent une bonne compréhension des patrons d'écoulement créés par chacune des variantes par rapport aux conditions actuelles et laissent entrevoir un bon potentiel de réduction de l'érosion. Pour quantifier cette réduction, les volumes d'érosion obtenus dans la zone de plage entre les bornes 28 et 32 au terme des simulations ont été calculés pour chaque variante.



a) Vents de l'ouest (O)

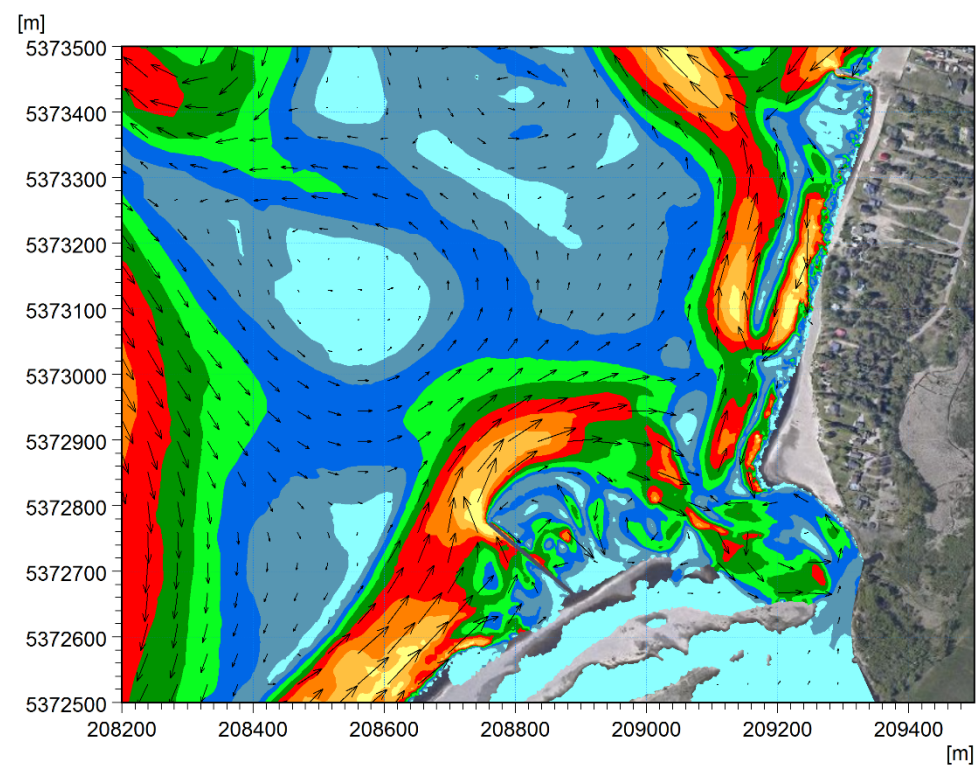


b) Vents de l'ouest-nord-ouest (ONO)

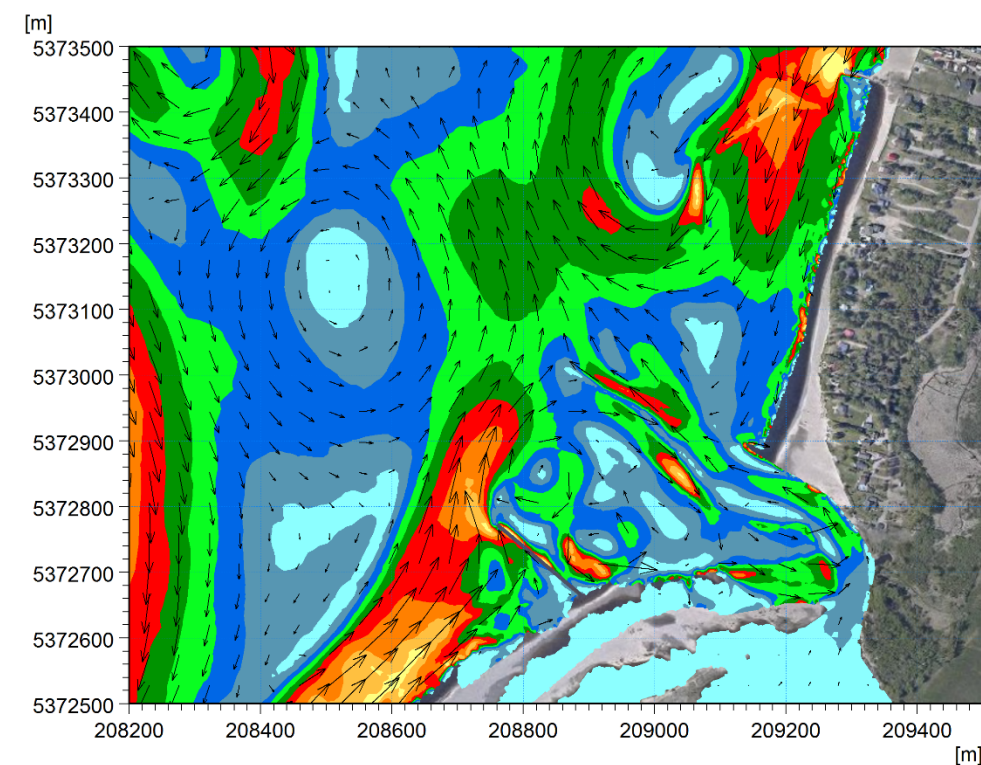


c) Vents du nord-ouest (NO)

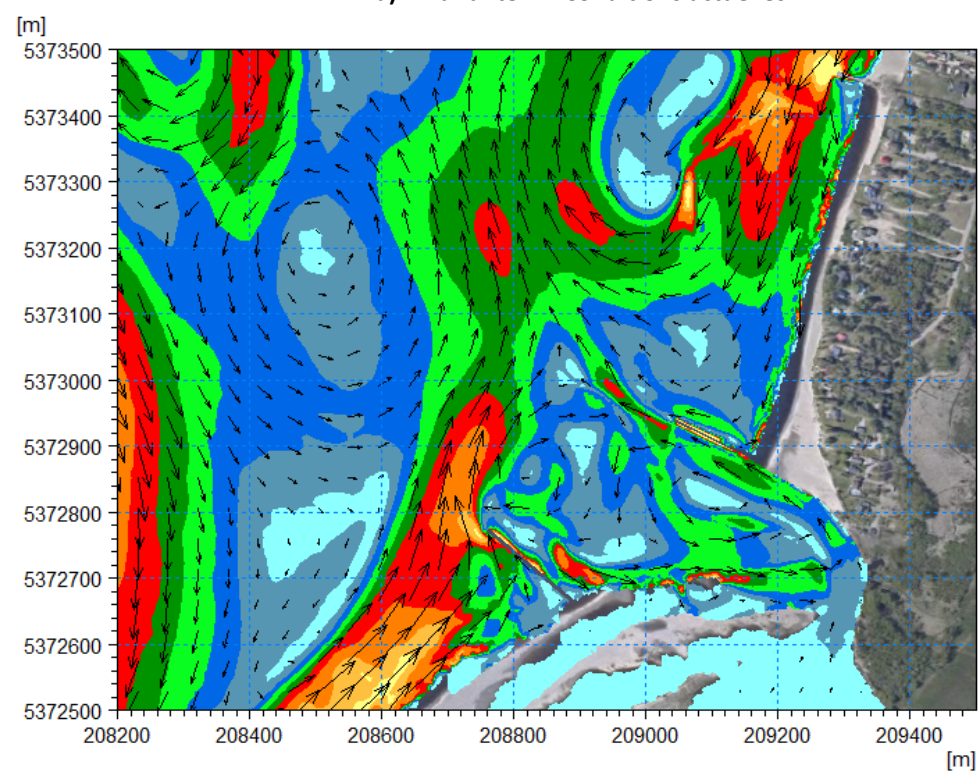
Figure 5.1: Courants simulés en conditions actuelles pour des vents de 40 km/h



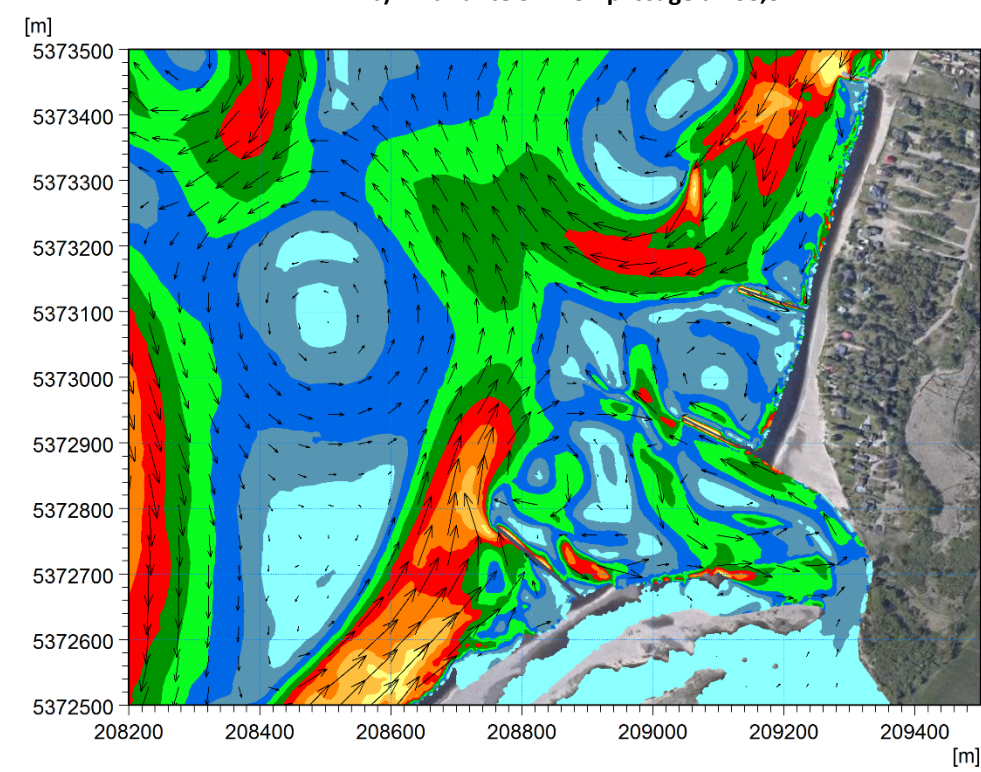
a) Variante 1 – Conditions actuelles



b) Variante 3 – Remplissage à 100,0 m



c) Variante 4 – Remplissage à 100,0 m avec épi 2.3



d) Variante 5 – Remplissage à 100,0 m avec épis 2.3 et 2.1

Figure 5.2: Courants littoraux pour les variantes 1, 3, 4 et 5

À partir de ces volumes d'érosion, un pourcentage de réduction de l'érosion a été établi pour chaque variante :

$$\% \text{ de réduction} = \frac{(E_a - E_i)}{E_a} * 100$$

où

E_i = volume de sédiments érodé après 72 heures de simulation dans la zone de plage entre les bornes 28 et 32 pour la variante i ;

E_a = volume de sédiments érodé après 72 heures de simulation dans la zone de plage entre les bornes 28 et 32 pour les conditions actuelles.

Les pourcentages de réduction de l'érosion procurés par les variantes 3, 4 et 5 par rapport aux conditions actuelles sont présentés au tableau 5.2. Tel qu'anticipé par l'examen des champs d'écoulement, les variantes 3, 4 et 5 permettent toutes de réduire de manière significative les volumes d'érosion de la plage par rapport aux conditions actuelles. Cette réduction semble avant tout liée au remplissage du chenal (variante 3), qu'à l'ajout des épis (variantes 4 et 5), les pourcentages de réduction étant très similaires d'une variante à l'autre. En réalité, pour connaître l'impact réel des épis, des simulations à plus long terme seraient requises. En effet, les épis agissent surtout sur les courants longitudinaux, qui façonnent le trait de côte à long terme.

Basé sur la connaissance du site et des phénomènes en jeu, l'ajout d'épi(s) suite au remplissage du chenal ne semble pas problématique. Selon les conditions rencontrées sur le site suite au remplissage du chenal, l'épi 2.3 pourrait être implanté dans un premier temps pour freiner la dérive littorale vers l'embouchure. Au besoin, compte tenu de la largeur critique à la borne 30, l'épi 2.1 pourrait ensuite être ajouté. Les deux épis proposés devraient permettre de maintenir davantage les sédiments rechargés en place, et diminuer ainsi la fréquence des rechargements à long terme. À court terme, toutefois, ils ne protègent pas de manière efficace la plage contre l'action frontale des vagues de tempête. Pour ce faire, le remplissage du chenal est primordial. Cet aspect est approfondi à la section suivante.

Tableau 5.2: Réduction de l'érosion pour les variantes 3, 4 et 5

Variante	Description	% réduction
1	Conditions actuelles	-
3	Remplissage à 100,0 m	-58%
4	Remplissage à 100,0 m, épi 2.3	-63%
5	Remplissage à 100,0 m épis 2.3, 2.1	-55%

5.2 Efficacité du remplissage du chenal

Les variantes 2, 3 et 6 proposent un remplissage du chenal longeant la plage de St-Gédéon entre les bornes 29 et 32 à des élévations respectives de 99,0, 100,0 et 100,5 m. La figure 5.3 compare un profil typique de chacune de ces variantes, ainsi qu'un profil actuel.

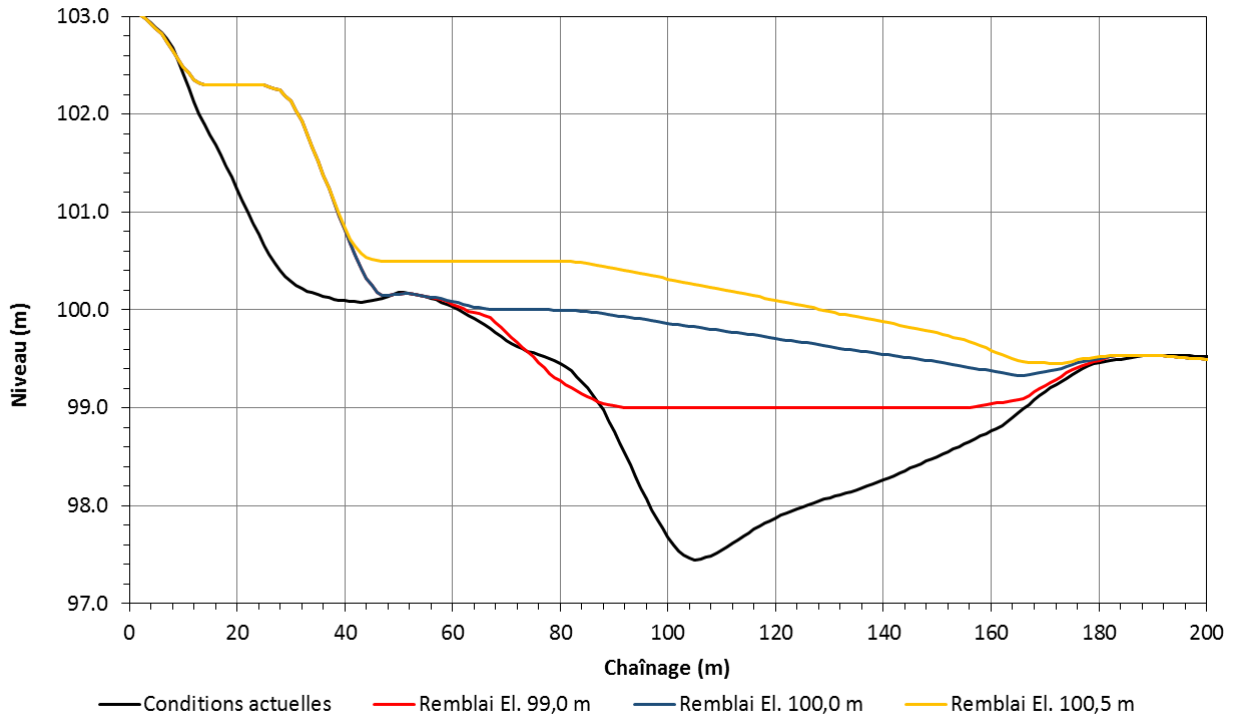
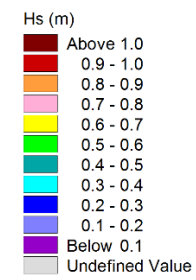
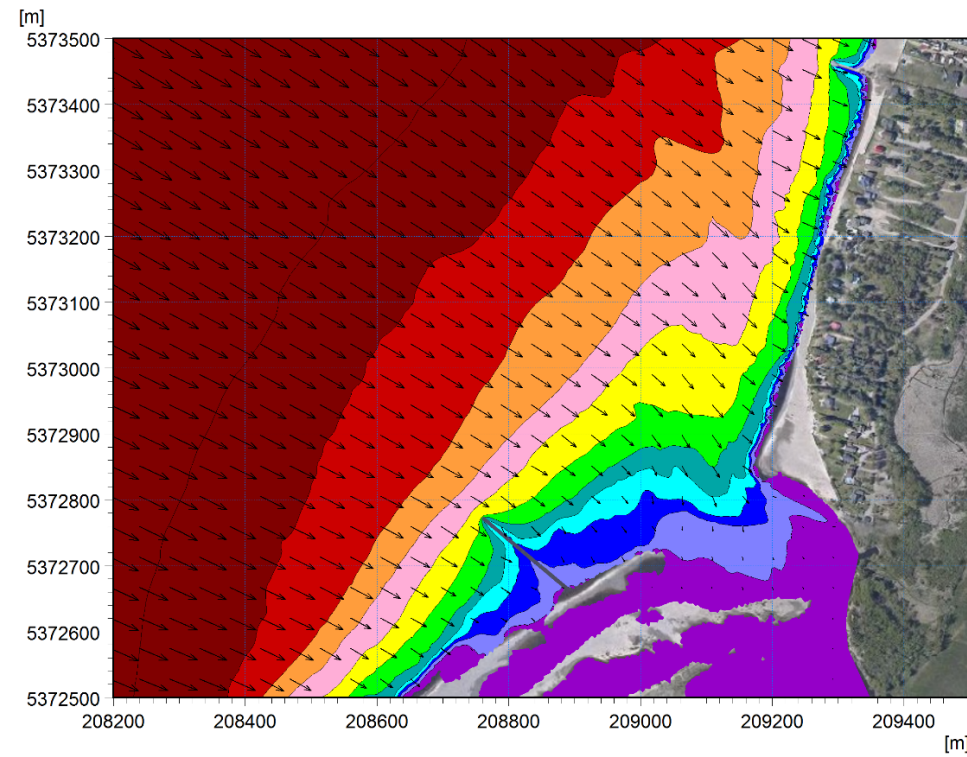


Figure 5.3: Profil de plage à la borne 32 selon les conditions actuelles et les variantes proposées

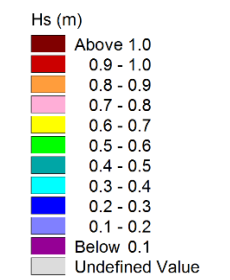
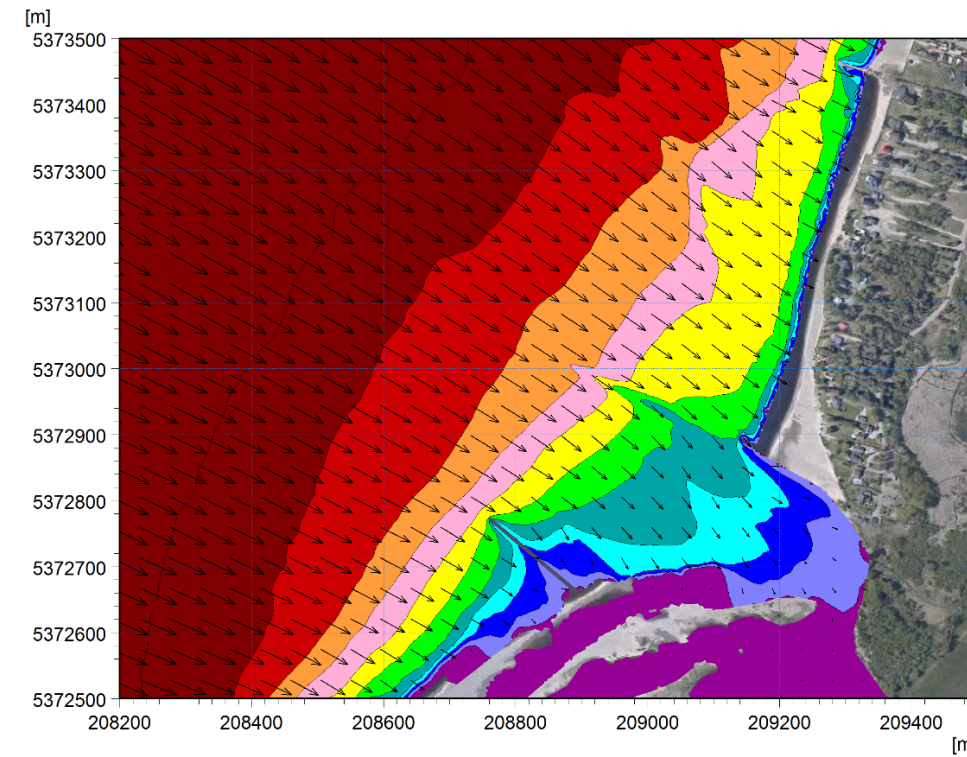
Le remplissage de la zone de marnage de la plage de St-Gédéon a pour objectif premier d'induire le déferlement des vagues plus tôt, et ainsi réduire la force d'attaque des vagues sur les berges. Dans cette optique de transport transversal, les variantes 2, 3 et 6 ont été simulées avec une tempête synthétique de 40 km/h en provenance de l'ONO, cette direction donnant des vagues au site pratiquement perpendiculaires au rivage. Les résultats de ces variantes sont comparés aux conditions actuelles en termes de hauteurs de vagues à la figure 5.4.

Tel qu'anticipé, le remplissage du chenal a pour effet de faire déferler les vagues plus au large. Plus le remplissage est important, plus l'effet sur la hauteur des vagues est significatif.

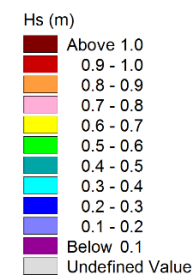
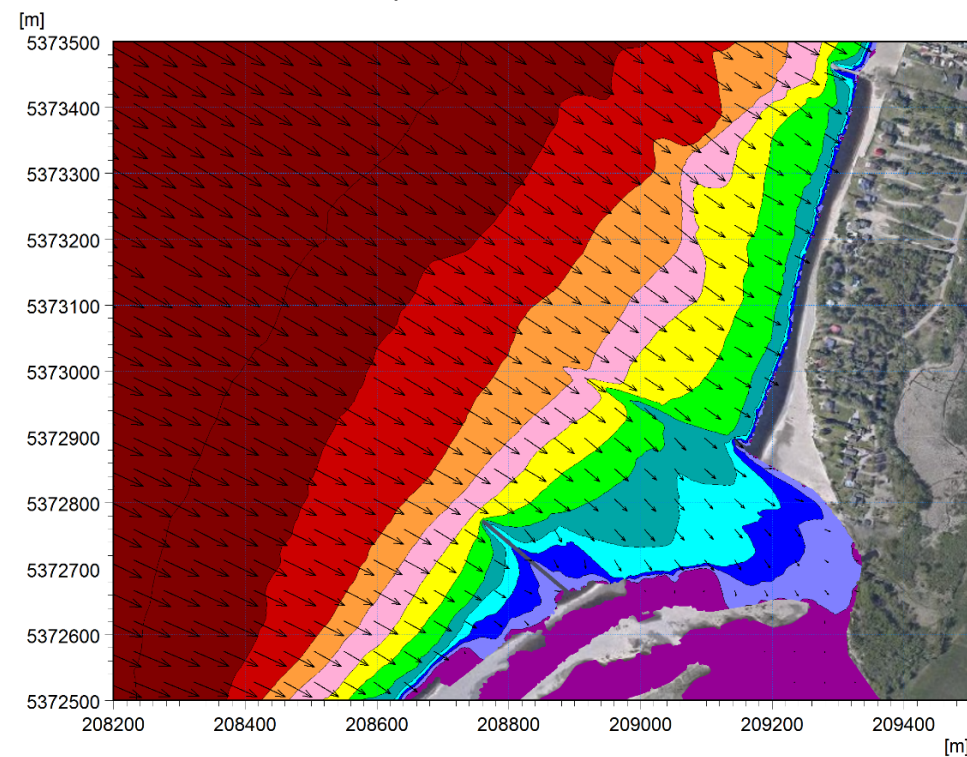
À noter que le creusement de la zone C au sud de l'embouchure dans les variantes d'aménagement a pour effet d'augmenter la hauteur des vagues dans cette zone. Les résultats de modélisation n'indiquent toutefois pas d'augmentation des risques d'érosion. Les sédiments soulevés par les vagues restent majoritairement sur place, les courants littoraux dans cette zone étant de faible intensité.



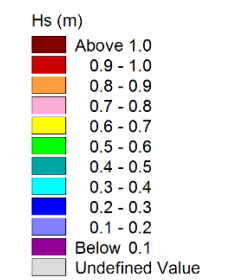
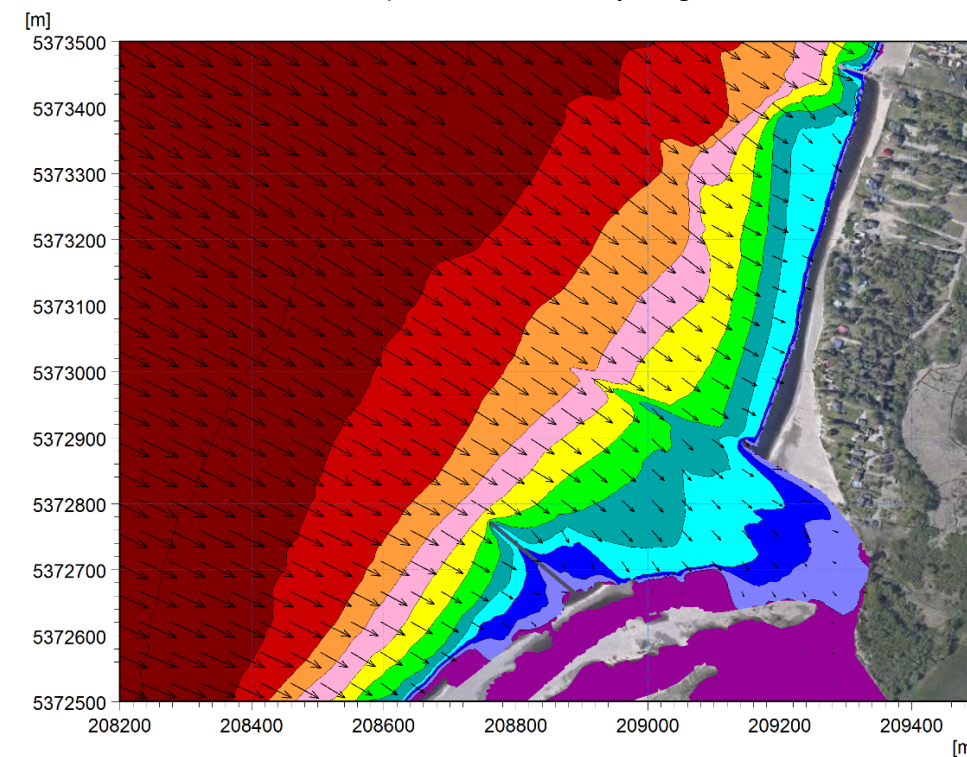
e) Variante 1 – Conditions actuelles



f) Variante 2 – Remplissage à 99,0 m



g) Variante 3 – Remplissage à 100,0 m



h) Variante 6 – Remplissage à 100,5 m

Figure 5.4: Hauteur de vagues en conditions actuelles et pour les variantes 2, 3 et 6

Le tableau 5.3 compare les pourcentages de réduction de l'érosion obtenus pour chacune des variantes examinées. Conformément aux conclusions déduites de l'analyse des champs de vagues, le rehaussement de la zone d'avant-plage s'accompagne bel et bien d'une réduction de l'érosion de la plage. Cette réduction varie de 40% pour l'élévation 99,0 m à 78% pour l'élévation 100,5 m.

Tableau 5.3: Réduction de l'érosion pour les variantes 2, 3 et 6

Variante	Description	% réduction
1	Conditions actuelles	-
2	Remplissage 99,0 m	-40%
3	Remplissage 100,0 m	-59%
6	Remplissage 100,5 m	-78%

5.3 Choix préliminaire de la variante à privilégier

L'approche de modélisation a été développée initialement pour comparer les variantes entre elles, cibler les cas de calculs pertinents, et maximiser la représentation des grandes tendances hydrosédimentaires obtenues avec chacune des variantes.

En termes de réduction du volume d'érosion, compte tenu que l'analyse est faite de manière relative par rapport au volume calculé en conditions actuelles, les six variantes d'aménagement peuvent être comparées entre elles, même si les cas de calculs ne sont pas identiques pour les six variantes. Les résultats obtenus en présence de la variante 3 témoignent bien de ce fait, avec des pourcentages de réduction pratiquement identiques pour les deux types de tempêtes modélisés (-58% pour la tempête du NO de 60 km/h et -59% pour la tempête de l'ONO de 40 km).

Le tableau 5.4 regroupe les résultats présentés aux tableaux 5.2 et 5.3.

Bien qu'un remplissage du chenal de la rivière à l'élévation 100,5 m (variante 6) procure une réduction maximale de l'érosion, le volume de sédiments requis pour réaliser cette variante est important et supérieur au volume disponible dans la zone C (cf. figure 3.1). Pour cette raison, il a plutôt été décidé de prioriser un remplissage initial à 100,0 m (variantes 3, 4 ou 5). De plus, il est anticipé que les sédiments érodés en haut de plage se retrouveront éventuellement en bas de plage et contribueront à rehausser la zone de marnage, les courants littoraux étant considérablement réduits par rapport aux conditions actuelles avec un remplissage à 100,0 m. Avec le temps, et avec les rechargements prévus dans le futur, la morphologie du secteur tendra vers celle de la variante 6.

Tel que mentionné précédemment, les épis proposés dans les variantes 4 et 5 n'assurent pas une protection immédiate contre l'érosion frontale des vagues de tempête, le phénomène d'érosion identifié comme étant le plus problématique à St-Gédéon. Au besoin, ceux-ci pourraient donc être implantés dans une phase ultérieure de travaux.

Tableau 5.4: Synthèse des résultats - Réduction de l'érosion pour les variantes 2, 3, 4, 5 et 6

Variante	Description	% réduction
1	Conditions actuelles	-
2	Remplissage 99,0 m	-40%
3	Remplissage 100,0 m	-59%
4	Remplissage 100,0 m, épi 2.3	-63%
5	Remplissage 100,0 m épis 2.3, 2.1	-55%
6	Remplissage 100,5 m	-78%

La variante 3 apparaît donc comme étant la variante à privilégier. Le succès de cette variante tient toutefois en partie au maintien d'une trajectoire rectiligne de la rivière Belle-Rivière en période de crue. En effet, une déviation du chenal principal vers le nord pourrait mener éventuellement à un retour au problème actuel. Le nouveau canal prévu dans l'embouchure de la rivière (cf. figure 3.1) a été inclus au concept d'aménagement précisément pour éviter cette possibilité.

Présent dans toutes les variantes d'aménagement proposées, le nouveau canal est large de 5 m et creusé à une élévation de 98,5 m. Le concept prévoit une certaine érosion de la section d'écoulement, permettant le passage du pic de la crue sans débordement dans la zone d'avant-plage du secteur étudié.

Pour vérifier cette hypothèse, des simulations additionnelles ont été effectuées en présence de la variante 3 en période de crue. La sensibilité des résultats a été évaluée en variant les dimensions du nouveau canal et en simulant différents scénarios de crue.

5.4 Érosion du nouveau canal

La crue de la rivière Belle-Rivière donne lieu à des conditions hydrodynamiques très différentes de celles prévalant le reste de l'année dans ce secteur. Tel qu'illustré à la figure 2.4, la montée du débit en rivière survient environ deux semaines avant la remontée du niveau du lac, si bien que l'écoulement demeure canalisé à niveau bas pendant quelques jours avant la remontée des niveaux. Pendant cette période, les vitesses d'écoulement dans le chenal principal de la rivière peuvent être élevées et induire de l'érosion.

Pour évaluer l'érosion du nouveau canal proposé, la trajectoire de l'écoulement dans l'embouchure, et les risques d'érosion de la zone de remplissage, la crue de la rivière a été simulée en présence de la variante 3 et de trois géométries différentes pour le nouveau canal :

- Largeur de 5 m avec radier à 98,5 m (concept initial);
- Largeur de 10 m avec radier à 98,5 m;
- Largeur de 10 m et radier abaissé à 98,0 m.

Dans tous les cas, les simulations ont été effectuées avec des sédiments de diamètre uniforme de 0,6 mm. D’après les informations transmises par les intervenants de Rio Tinto Alcan, ce diamètre est plus représentatif des sables retrouvés dans l’embouchure, qui présentent typiquement un diamètre compris entre 0,3 et 0,6 mm. Le choix du diamètre le plus grossier de cette gamme pour les simulations a été fait dans une optique conservatrice, le potentiel d’érosion variant inversement avec le calibre des sédiments.

5.4.1 Largeur de 5 m et radier à 98,5 m

Pour tenir compte de la variabilité des conditions hydrodynamiques en période de crue printanière, deux scénarios de crues différents ont été testés (figure 5.5) :

- Crue médiane : valeurs médianes quotidiennes des niveaux et des débits enregistrés entre 1997 et 2014;
- Crue d’hydraulicité maximale : niveaux et débits de l’année 2008 (débit maximal de 65 m³/s).

Pour les conditions médianes, le débit maximum est de l’ordre de 25 m³/s et survient le 25 avril. Le niveau du lac atteint la cote du radier du canal (98,5 m) le 30 avril. À partir de cette date, la vitesse d’écoulement dans le canal est influencée à la fois par le débit de la rivière et le niveau du lac.

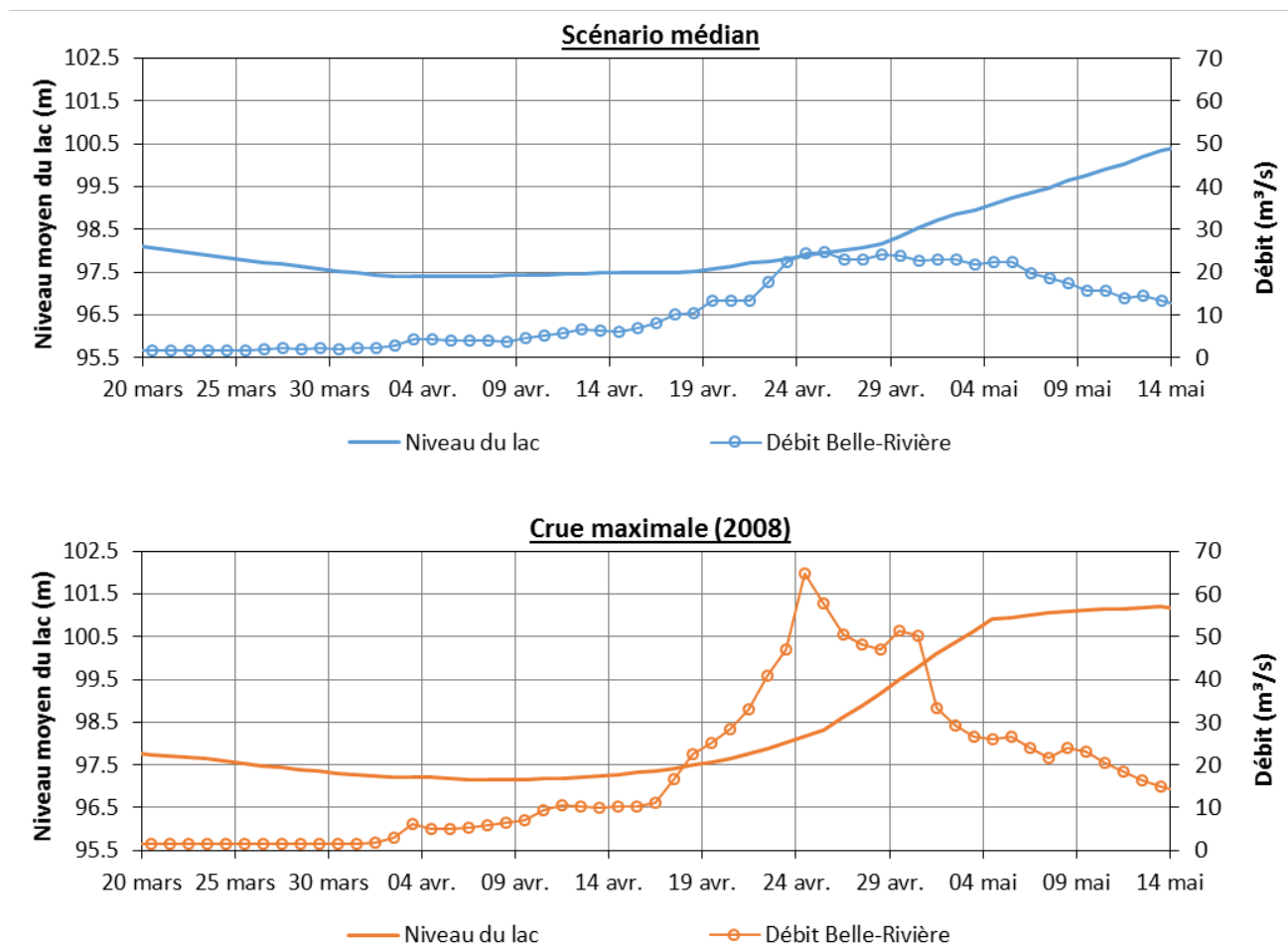


Figure 5.5: Scénarios de crue médiane et maximale (2008)

Pour le scénario de crue maximale, le pic de crue de $65 \text{ m}^3/\text{s}$ se produit sensiblement au même moment que pour les conditions médianes, mais le nouveau canal se retrouve inondé plus tôt, soit le 26 avril.

Pour bien comprendre les résultats de modélisation, il faut retenir que l'érosion du nouveau canal dépend de la vitesse en canal, laquelle varie avec les conditions hydrodynamiques du site et la section d'écoulement du canal. Comme celle-ci s'ajuste constamment à cause de l'érosion, elle influence à son tour les vitesses d'écoulement dans le canal et les conditions hydrodynamiques locales, lesquelles sont déjà soumises aux variations du débit de la rivière Belle-Rivière et du niveau du lac St-Jean. Il y a donc en période de crue un ajustement continu entre la vitesse d'écoulement dans le nouveau canal, la force d'érosion et les conditions hydrodynamiques locales.

La figure 5.6 présente à six instants différents les vitesses et niveaux d'eau simulés pour la crue médiane. Au début du mois d'avril (figure 5.6a), le niveau d'eau du lac St-Jean est encore très bas et l'écoulement dans le nouveau canal n'est pas du tout influencé par le niveau du lac. Bien que le débit en provenance de la rivière Belle-Rivière ne soit pas élevé, le canal a subi jusqu'alors peu d'érosion et sa petite section d'écoulement fait en sorte que les vitesses d'écoulement y sont relativement fortes. Il en résulte une perte de charge importante et un rehaussement des niveaux plus en amont. Le niveau au droit de la digue reste toutefois sous le niveau de la crête de la digue en pierres (99,5 m).

Lorsque le débit de la rivière Belle-Rivière commence à monter plus rapidement, les vitesses dans le nouveau canal augmentent et accélèrent le processus d'érosion du nouveau canal. L'érosion n'est toutefois pas assez rapide pour laisser passer entièrement le débit de crue, qui déborde en partie dans la zone d'avant-plage (figure 5.6b). Les vitesses simulées à cet endroit varient entre 0,2 et 0,3 m/s. Pour la durée entière pendant laquelle le débit de crue est près de son maximum, un écoulement est maintenu dans la zone d'avant-plage (figures 5.6c et 5.6d). Les vitesses atteignent alors des valeurs maximales d'environ 0,35 m/s. Lorsque le niveau d'eau rejoint finalement celui de la zone d'avant-plage (figure 5.6e), les vitesses sont diminuées puis tendent rapidement vers zéro dans les jours suivants (figures 5.6f).

Pour des profondeurs d'écoulement de l'ordre de 0,2-0,4 m, simulées dans la zone d'avant-plage en période de crue, la vitesse d'entraînement d'un sable de calibre 0,6 mm est d'approximativement 0,3 m/s (réf. [4]). D'après les résultats présentés à la figure 5.6, les vitesses simulées dans la zone d'avant-plage sont très proches de cette valeur critique et pourraient donc générer des conditions légèrement érosives. Puisqu'il s'agit de résultats obtenus pour une crue médiane, il reste tout de même 50% de chance d'avoir des conditions plus érosives au printemps, raison pour laquelle les conditions de crues maximales ont également été examinées.

Les résultats présentés à la figure 5.6 permettent de bien mettre en contexte les résultats, mais se limitent à quelques instants précis. Pour donner un portrait plus global des résultats, ceux-ci ont été extraits en quelques points stratégiques pour la durée entière de la crue (voir figure 5.6b pour les points d'extraction des vitesses).

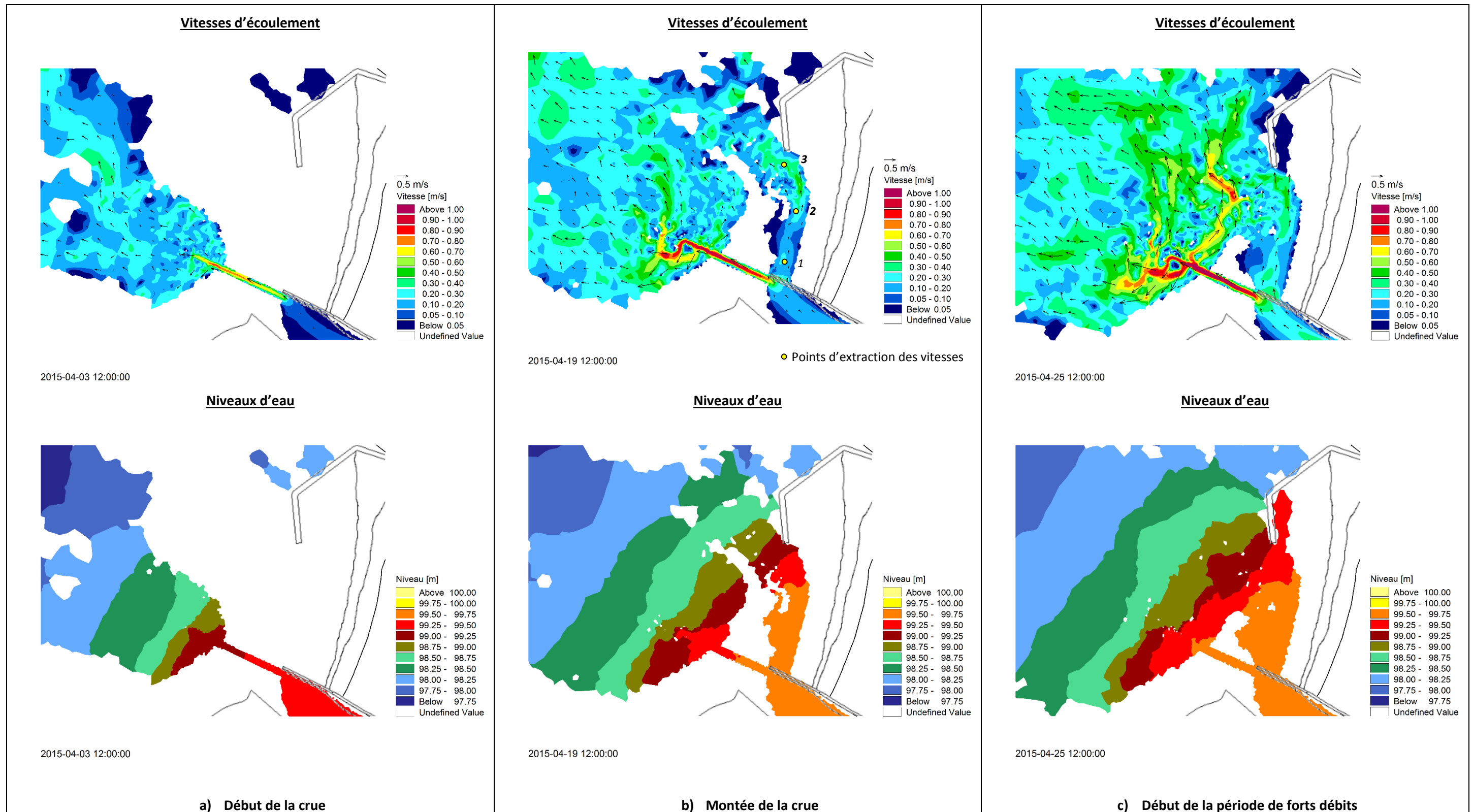


Figure 5.6: Résultats de modélisation pour le canal de largeur 5 m avec radier à 98,5 m - Crue médiane

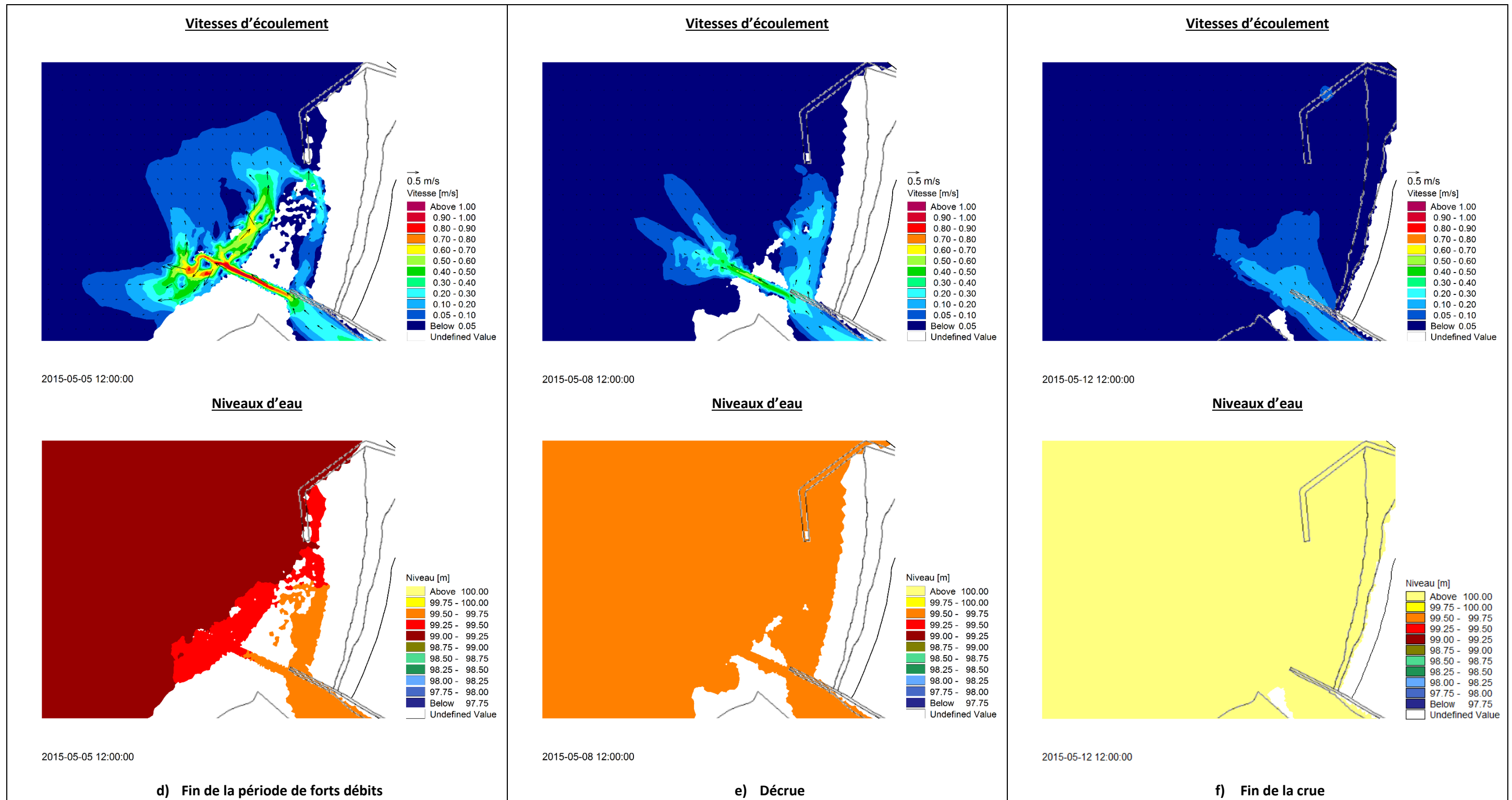


Figure 5.6 (suite) : Résultats de modélisation pour le canal de largeur 5 m avec radier à 98,5 m – Crue médiane

La figure 5.7 présente ainsi l'évolution du niveau d'eau au droit de la digue en pierres, et les vitesses dans la zone d'avant-plage, pour les conditions de crue médiane. Lorsque le niveau d'eau dépasse 99,5 m (élévation de la crête de la digue de pierres) avant que ce niveau soit atteint par le lac, une partie de l'écoulement en provenance de la rivière se dirige vers la zone d'avant-plage et des vitesses sont obtenues dans cette zone. La figure 5.8 présente les mêmes résultats, mais pour la crue maximale. Dans les deux cas, les conditions hydrodynamiques simulées sont présentées en haut de page pour faciliter l'interprétation des résultats.

Pour les conditions médianes, les graphiques de la figure 5.7 complètent l'information déjà présentée à la figure 5.6. Le niveau maximum au droit de la digue est atteint lors du pic de la crue, moment pendant lequel les vitesses sont également maximales dans la zone d'avant-plage. Celles-ci dépassent de peu la vitesse critique de 0,3 m/s pendant environ 5 jours.

Pour la crue maximale, les patrons d'écoulement décrits pour la crue médiane sont amplifiés. Lorsque le niveau en amont du nouveau canal dépasse 99,5 m, une portion de l'écoulement se dirige vers la zone d'avant-plage. Comme le débit en rivière est beaucoup plus important pour cette crue, une plus grande partie de l'écoulement est déviée et les vitesses sont plus importantes. Elles atteignent un maximum de près de 0,75 m/s et restent supérieures à 0,3 m/s pour une durée d'environ 10 jours.

Pour les conditions de crue médiane, les vitesses simulées dans la zone d'avant-plage ne remettent pas en question la pérennité de la zone de remplissage. Par contre, si une crue similaire à la crue de 2008 devait survenir l'année des travaux, une partie des matériaux mis en place dans le chenal de la rivière seraient très certainement emportés.

Pour offrir une marge de sécurité plus grande et ne pas compromettre la zone de remplissage, qui est essentielle au concept de la variante 3, il a été décidé de tester deux géométries additionnelles de canaux, présentant une section d'écoulement initiale plus grande.

5.4.2 Largeur de 10 m et radier à 98,5 m

Dans un premier temps, la largeur du canal a été agrandie de 5 à 10 m et le radier conservé à la même élévation (98,5 m). La crue médiane, jugée peu problématique, a été remplacée par deux autres crues estimées plus dangereuses en termes de risques de débordement vers la zone d'avant-plage:

- Crue 1997 : très faible hydraulité en début de crue;
- Crue 2010 : niveau du lac élevé au début de la crue.

Les paramètres hydrodynamiques de ces crues sont illustrés à la figure 5.9.

Chacune à leur façon, les crues de 1997 et 2010 ont pour effet de diminuer les vitesses en canal au début de la crue, minimisant ainsi l'érosion du canal et pouvant potentiellement mener à un débordement de la digue en pierres lors de la montée des débits.

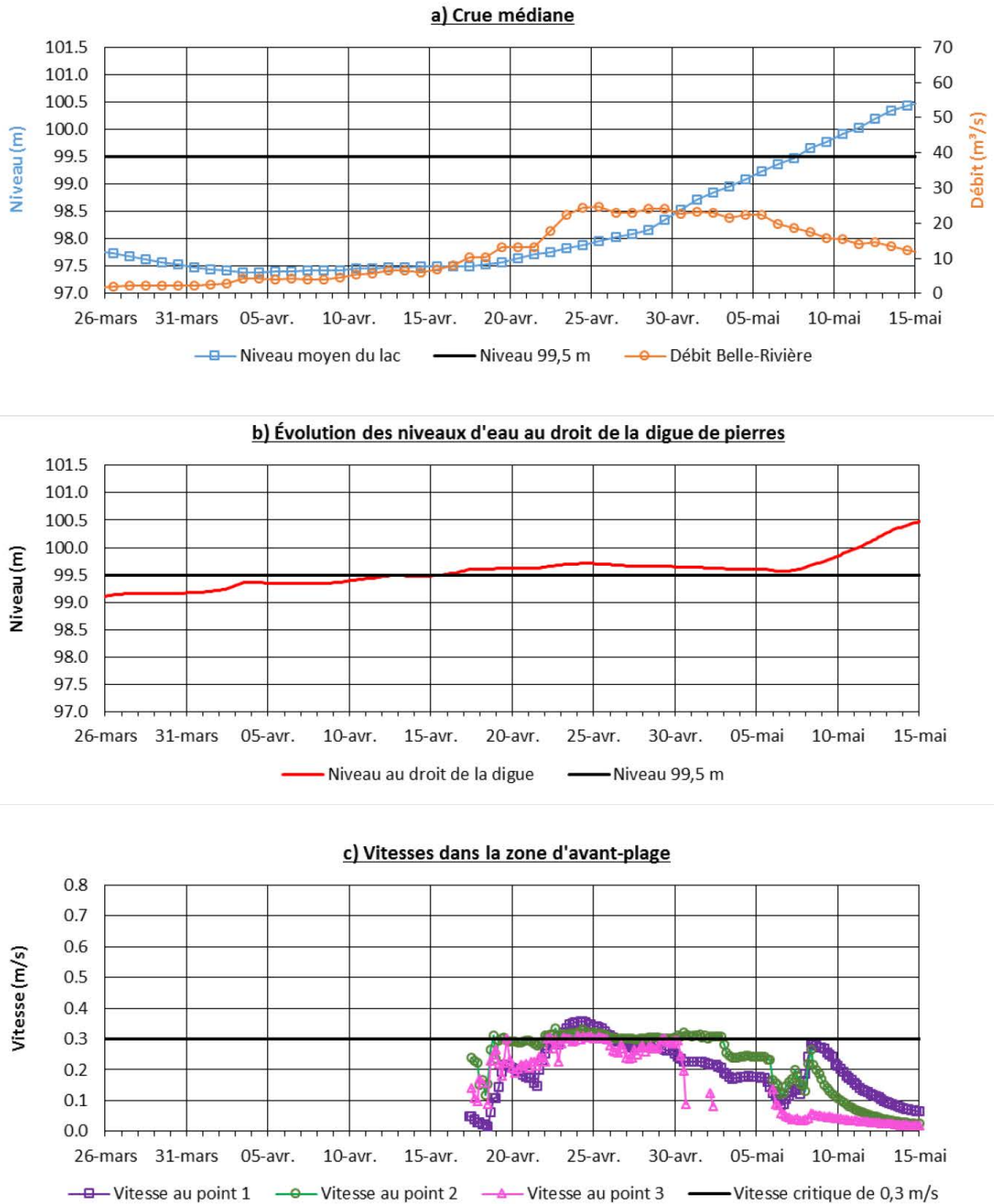


Figure 5.7: Canal de largeur 5 m avec radier à 98,5 m - Niveaux et vitesses pour la crue médiane

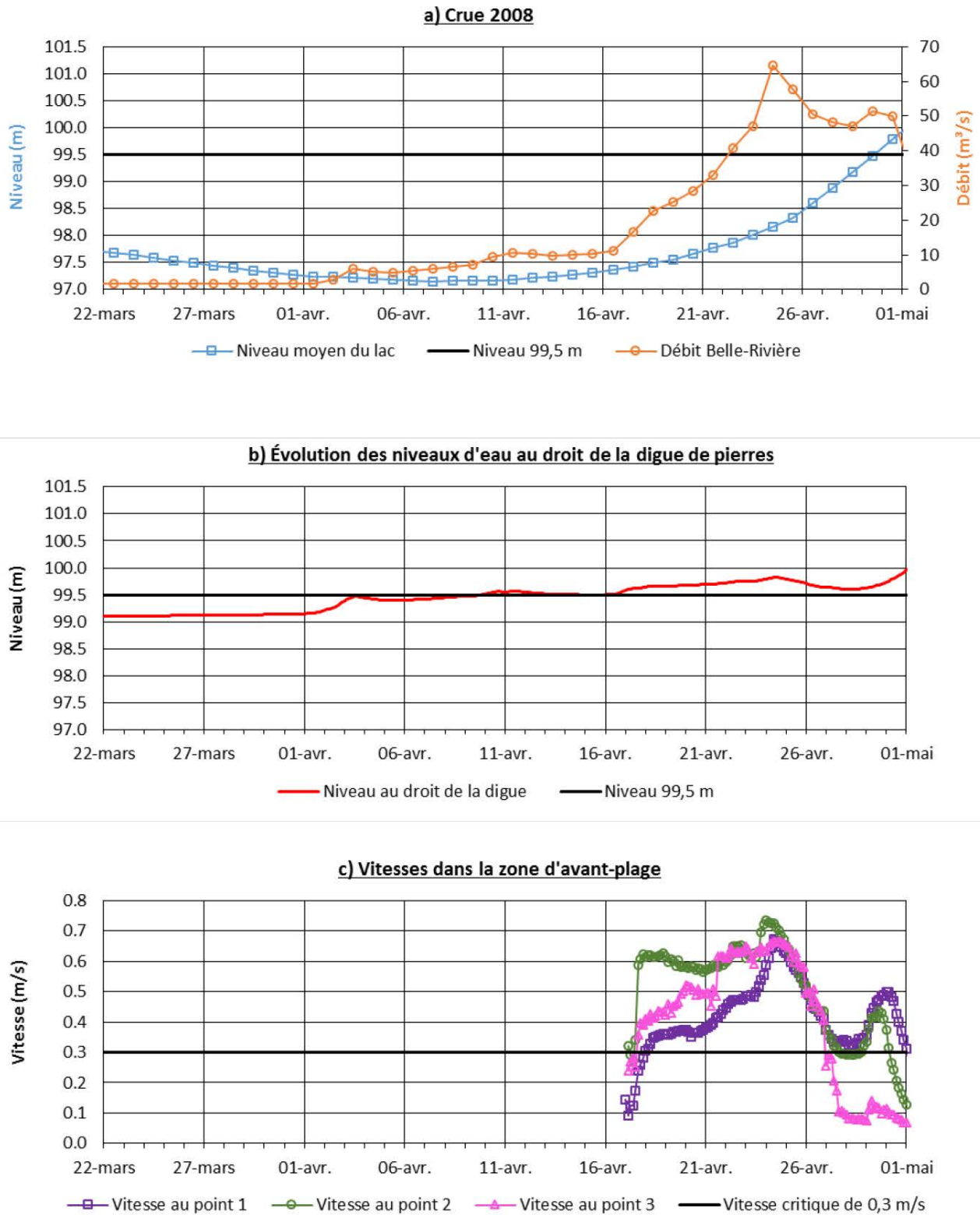


Figure 5.8: Canal de largeur 5 m avec radier à 98,5 m - Niveaux et vitesses pour la crue maximale

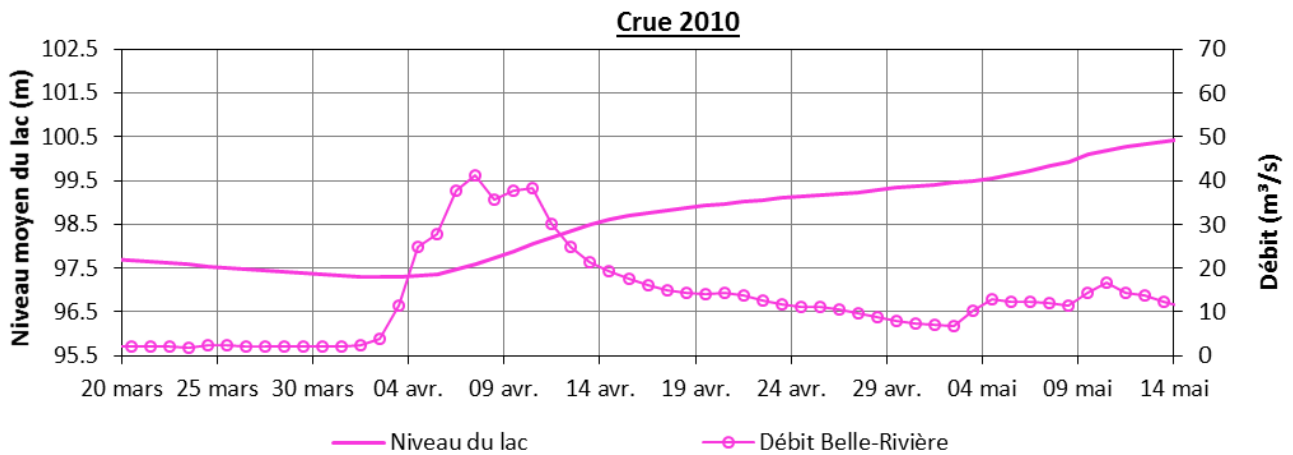
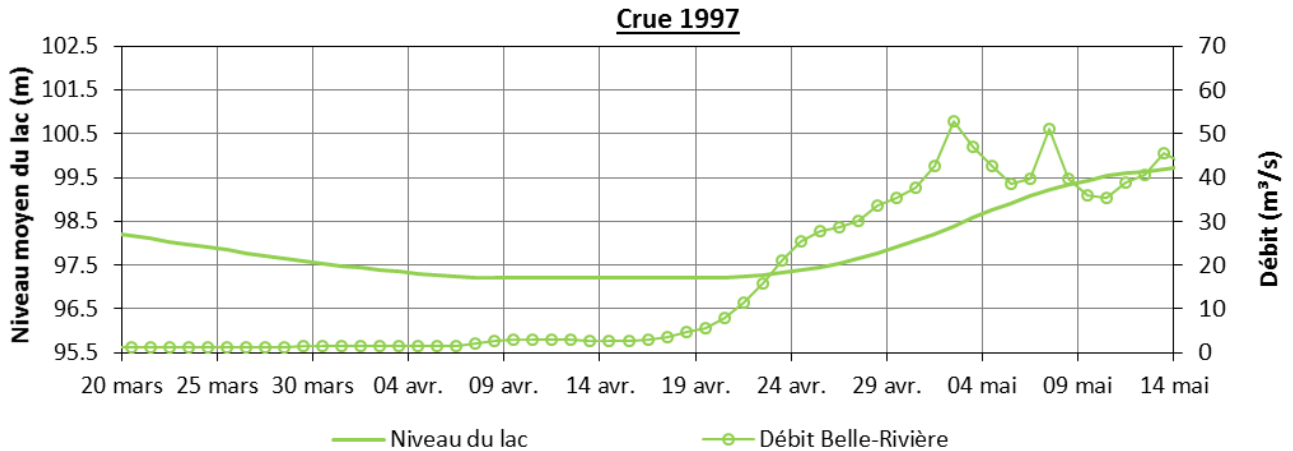


Figure 5.9: Niveau moyen du lac et débit de la rivière Belle-Rivière en 1997 et 2010

Les résultats obtenus pour ces deux crues, ainsi que pour la crue maximale de 2008, sont présentés aux figures 5.10 à 5.12 en termes de niveau d'eau au droit de la digue et de vitesses d'écoulement dans la zone d'avant-plage. Chaque figure de résultats présente une fenêtre temporelle différente, le déroulement de chaque crue n'étant pas le même d'une année à l'autre.

Pour les trois crues simulées, il est clair qu'une section d'écoulement initiale élargie à 10 m permet une diminution des risques de débordement vers la zone d'avant-plage.

Les résultats varient selon les crues simulées :

- Crue 1997 (figure 5.10) : écoulement de courte durée dans la zone d'avant-plage avec vitesses inférieures à 0,3 m/s;
- Crue 2008 (figure 5.11) : écoulement plus important dans la zone d'avant-plage pendant environ 3 jours avec des vitesses maximales de l'ordre de 0,65 m/s;

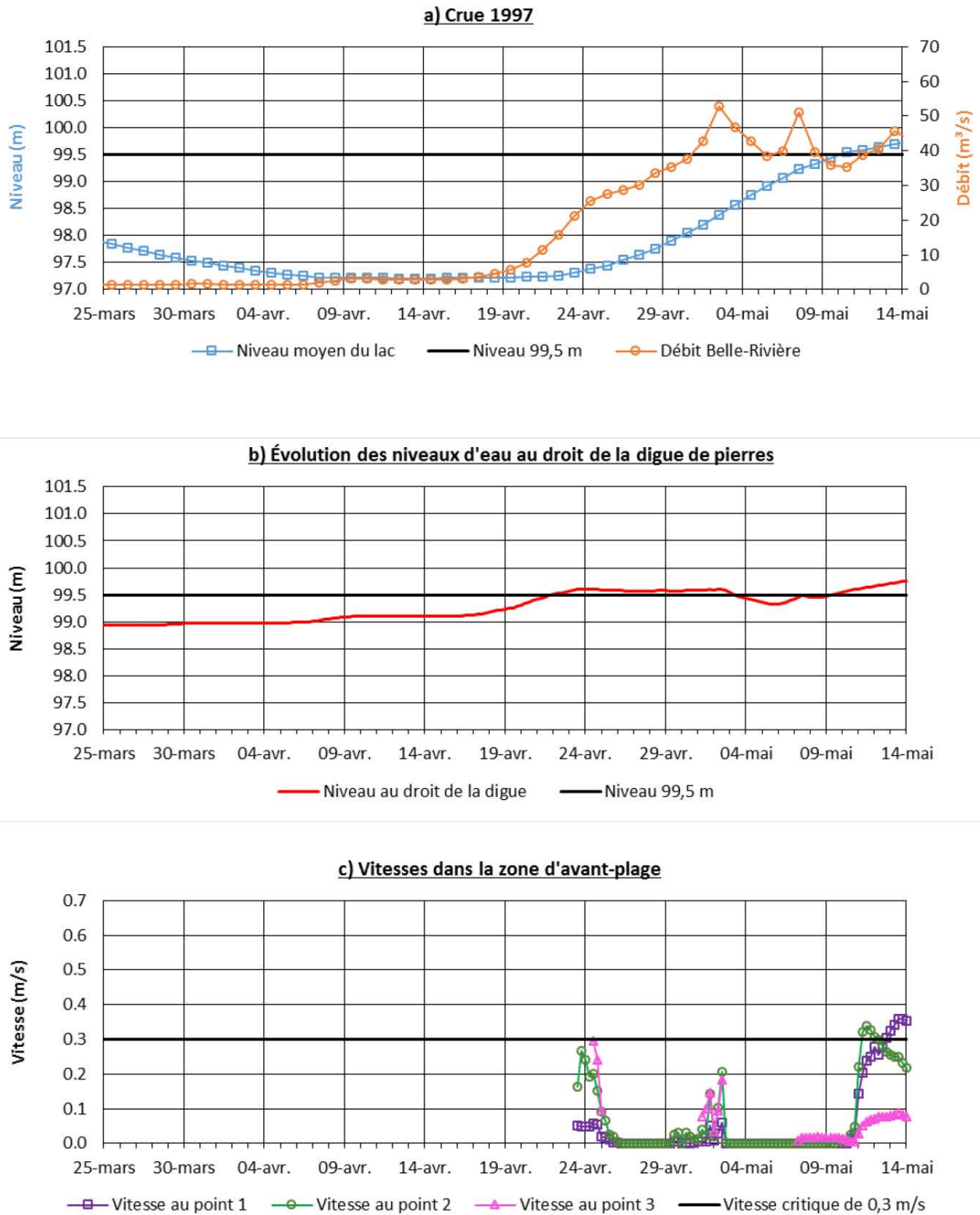


Figure 5.10: Canal de largeur 10 m avec radier à 98,5 m - Niveaux et vitesses pour la crue de 1997

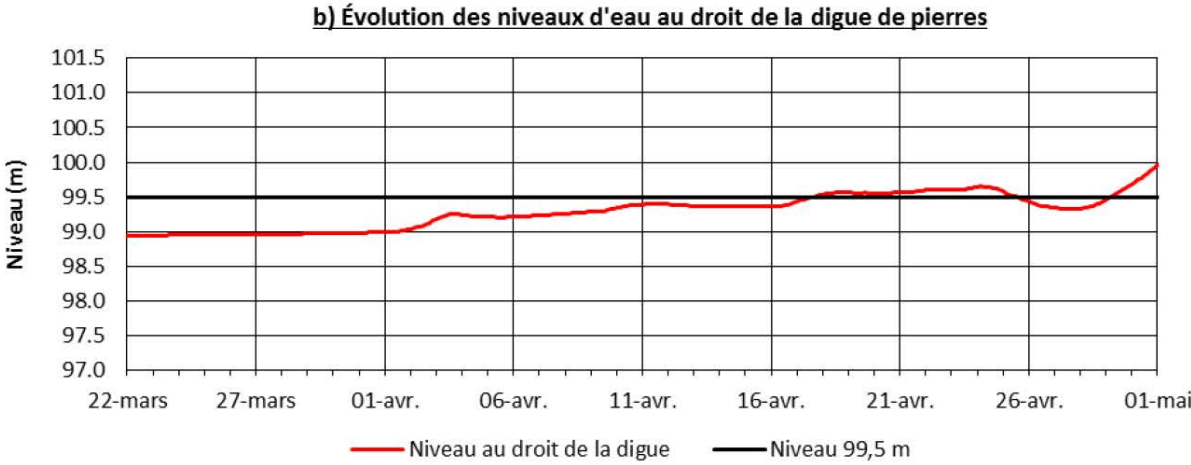
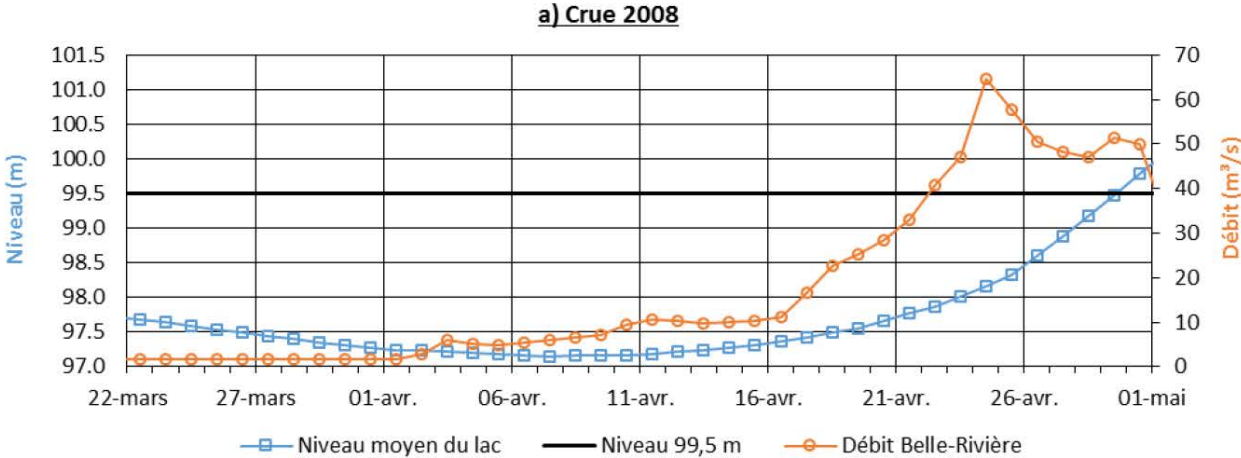


Figure 5.11: Canal de largeur 10 m avec radier à 98,5 m - Niveaux et vitesses pour la crue de 2008

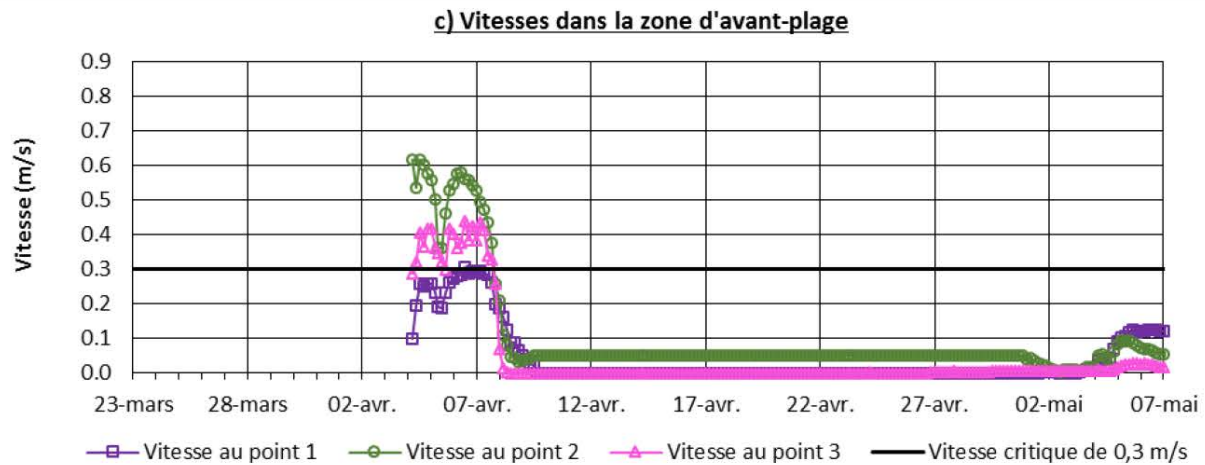
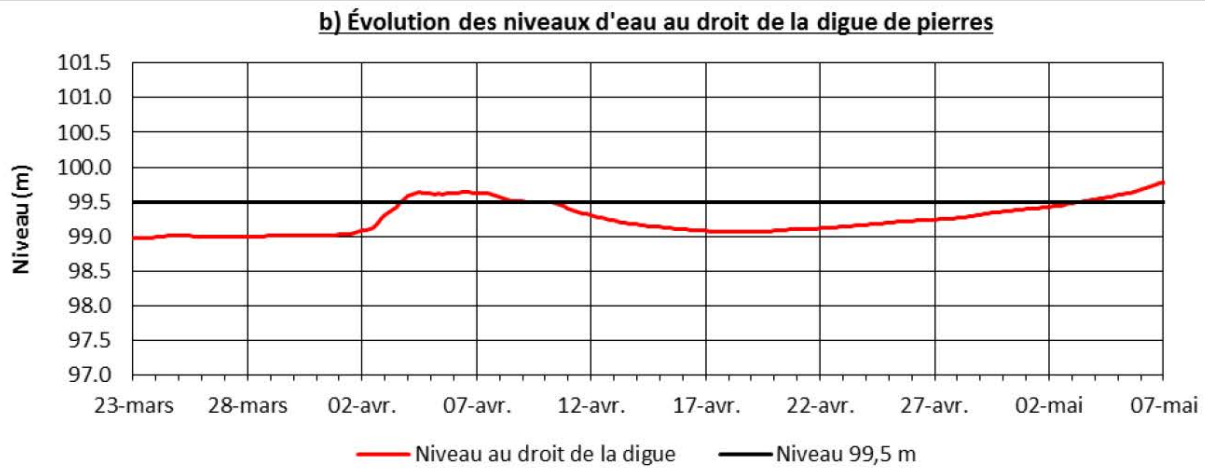
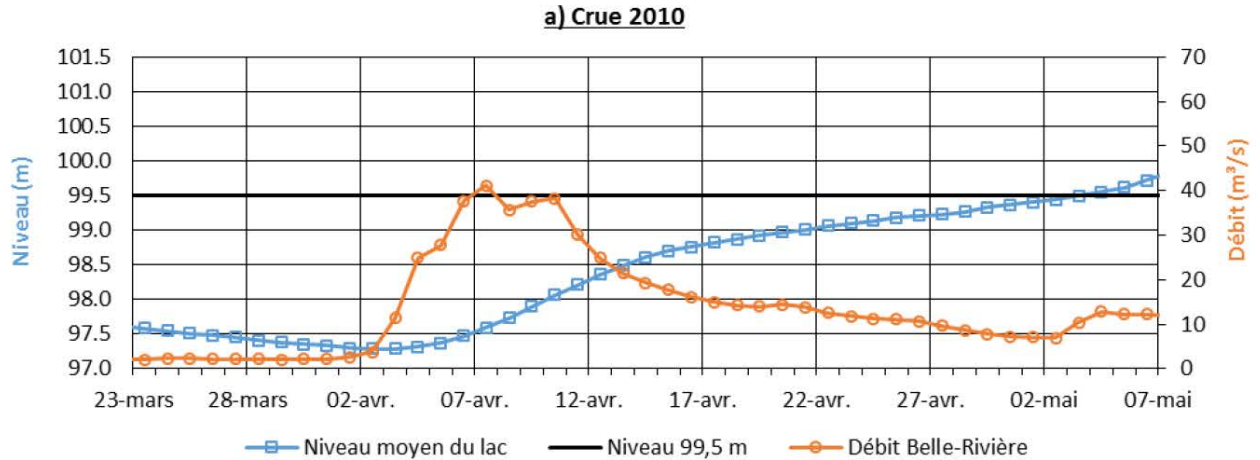


Figure 5.12: Canal de largeur 10 m avec radier à 98,5 m - Niveaux et vitesses pour la crue de 2010

- Crue 2010 (figure 5.12) : débordement en début de crue dans la zone d'avant-plage avec des vitesses supérieures à 0,3 m/s pendant environ 3 jours.

En considérant une vitesse critique d'entraînement de 0,3 m/s, une certaine érosion de la zone de remplissage est possible pour la crue maximale de 2008 et la crue hâtive de 2010.

La comparaison des résultats obtenus indiquent que les risques de débordement dépendent à la fois du moment et de l'intensité du pic de la crue. En effet, lorsque le canal n'a pas suffisamment de temps pour s'éroder avant le passage du pic de la crue, que ce soit dû à une crue hâtive (2010) ou à une crue très forte (2008), l'écoulement passe au-dessus de la digue en pierres. Une estimation du débit à venir, basée sur les réserves en neige et les prévisions météorologiques, pourrait donc, dans une certaine mesure, permettre une meilleure planification des travaux. Par exemple, l'anticipation d'une crue printanière importante pourrait mener à la décision de reporter les travaux.

Dans tous les cas, les résultats de modélisation indiquent que l'érosion dans la zone d'avant-plage de St-Gédéon, advenant un débordement de la digue en pierres, demeure très localisée et de quelques centimètres seulement.

Bien que le canal initial large de 10 m procure une nette diminution des risques d'érosion de la zone de remplissage devant la plage de St-Gédéon, il a été décidé de modéliser une dernière variante de canal, avec une section d'écoulement encore plus grande, pour éliminer tout risque d'érosion.

5.4.3 Largeur de 10 m et radier à 98,0 m

La dernière variante de canal testée conserve une largeur de 10 m, mais abaisse le radier de 0,5 m, de 98,5 m à 98,0 m. Les résultats obtenus avec cette variante pour les crues de 1997, 2008 et 2010 sont présentés aux figures 5.13 à 5.15.

La nouvelle section d'écoulement plus profonde avec une largeur de 10 m permet d'éviter tout risque de débordement de la digue en pierres. Tel qu'illustré aux figures 5.13 à 5.15, les niveaux d'eau au droit de la digue restent inférieurs à 99,5 m pour la durée entière de la crue, jusqu'au moment où le niveau du lac rejoint les niveaux en amont du canal. La zone d'avant-plage se retrouve alors inondée par la montée des niveaux du lac et les vitesses restent faibles. Le niveau maximum simulé au droit de la digue est de 99,35 m, obtenu lors du passage du pic de la crue 2008.

Pour la gamme de conditions printanières ayant eu lieu les 18 dernières années (1997-2014), un canal excavé à 98,0 m avec une largeur de 10 m permettrait d'éliminer tout risque d'érosion de la zone d'avant-plage.

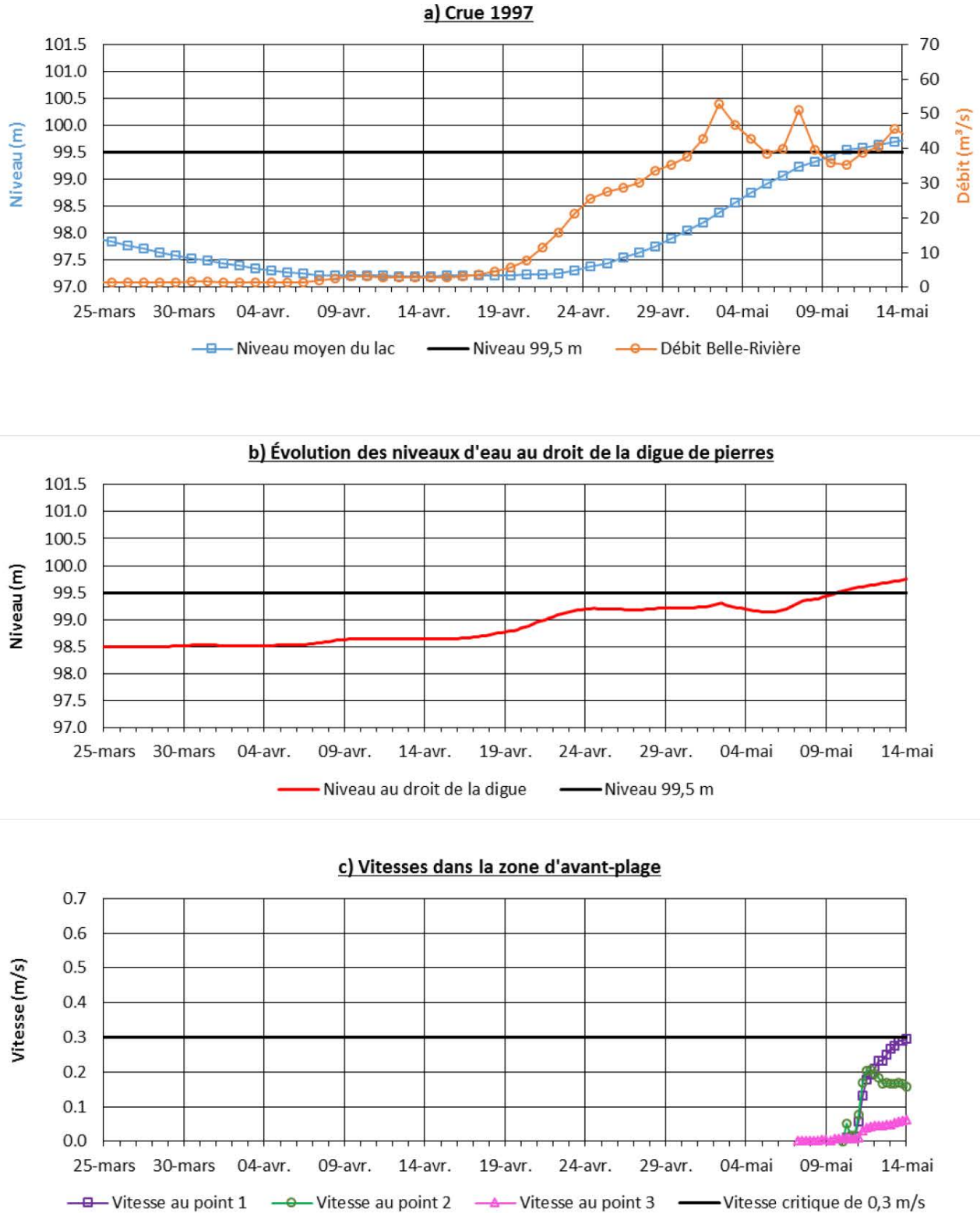


Figure 5.13: Canal de largeur 10 m avec radier à 98,0 m - Niveaux et vitesses pour la crue de 1997

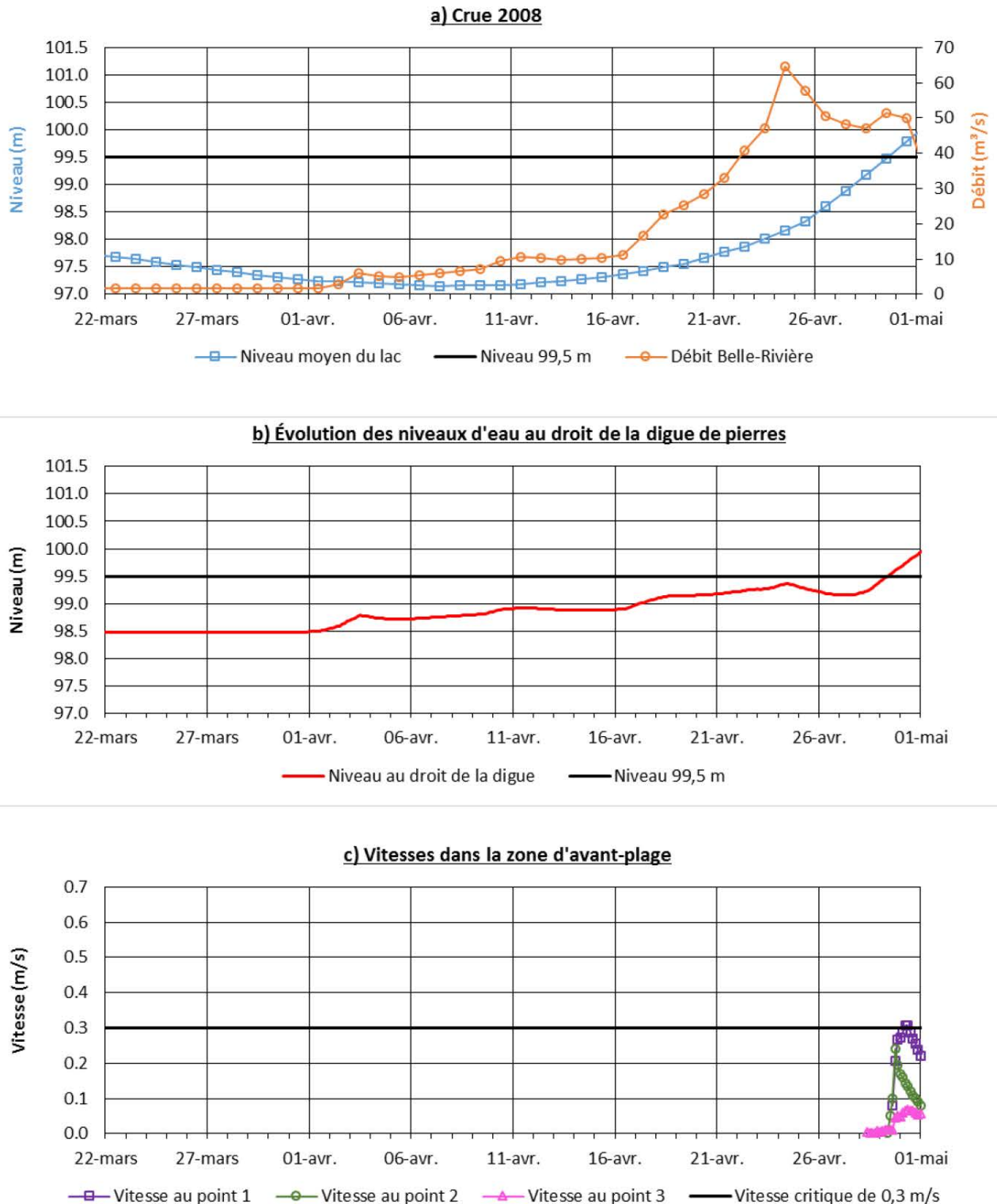


Figure 5.14: Canal de largeur 10 m avec radier à 98,0 m - Niveaux et vitesses pour la crue de 2008

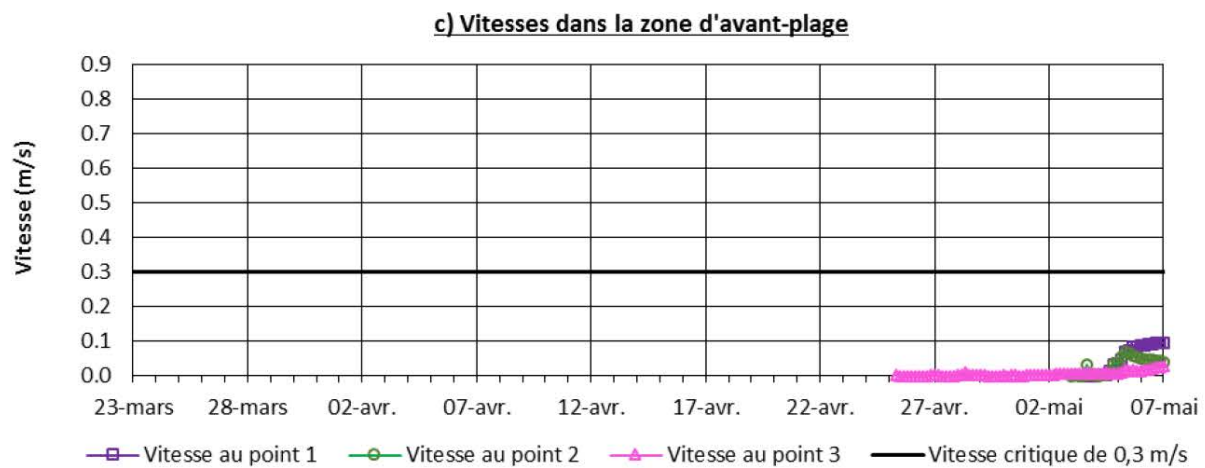
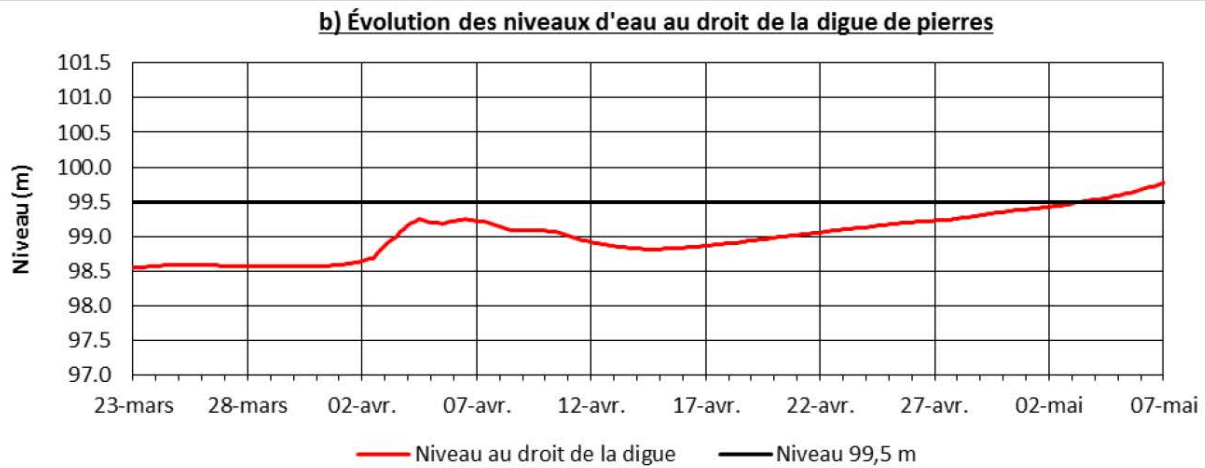
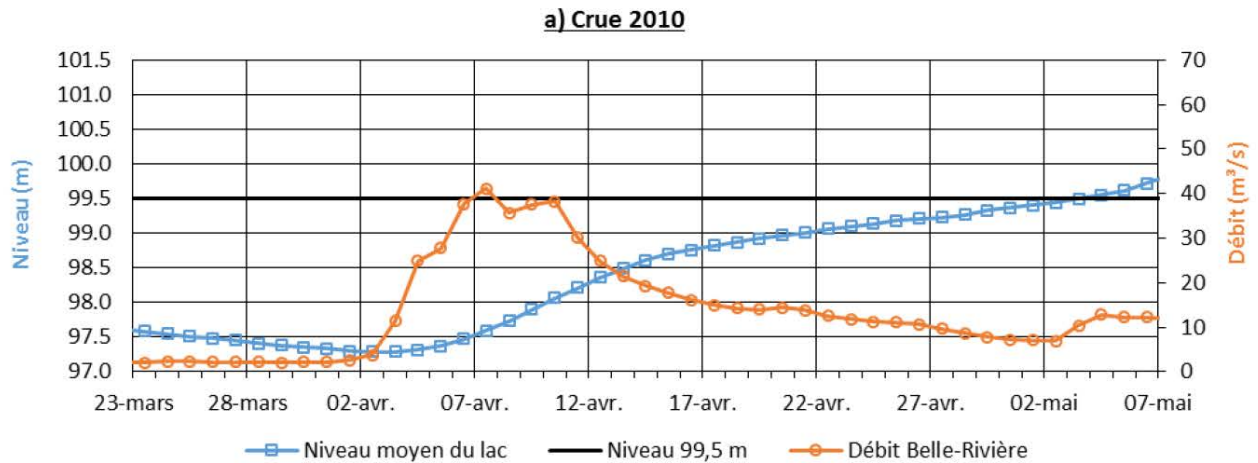


Figure 5.15: Canal de largeur 10 m avec radier à 98,0 m - Niveaux et vitesses pour la crue de 2010

5.4.4 Dimensions recommandées

Sur la base des résultats de modélisation, une largeur de canal initiale de 10 m est recommandée. Selon la faisabilité des travaux sur le site, un canal plus profond serait souhaitable, mais pas absolument requis. En effet, les résultats obtenus avec un canal de largeur 10 m avec radier à 98,5 m montrent très peu d'érosion dans la zone d'avant-plage de St-Gédéon.

La comparaison de l'efficacité des différents canaux présentée aux sections précédentes repose sur des résultats de modélisation, lesquels comporte une certaine part d'incertitude, inévitable dans tout processus de modélisation. La simulation de différentes crues défavorables à l'objectif recherché, et l'emploi d'un diamètre « grossier », forment toutefois une approche conservatrice et augmente la marge de sécurité par rapport aux risques évalués. Pour augmenter encore davantage celle-ci, différentes mesures ont été discutées :

- Prévion, dans la mesure du possible, du débit de la rivière Belle-Rivière pour planifier les travaux lors d'une année de faible hydraulicité;
- Ajout d'un remblai en gravillon sur la digue en pierres pour rehausser celle-ci à une élévation de 99,8 m.

5.5 Variante finale et recommandations

La variante finale recommandée au terme de cette étude est donc la variante 3 avec un nouveau canal à l'embouchure de la rivière large de 10 m, et radier à 98,5 m.

La mise au point du concept d'aménagement de la variante 3 repose en grande partie sur la compréhension de la dynamique sédimentaire du secteur, laquelle est très complexe et repose sur un nombre important de variables. Prévoir avec certitude les changements qui seront obtenus suite au réaménagement de l'embouchure, avec les hypothèses inhérentes au concept et à la modélisation, est impossible. L'approche développée dans cette étude permet toutefois une analyse comparative des variantes et le choix d'une variante optimale en fonction des objectifs recherchés.

Pour minimiser les imprévus et valider différentes hypothèses de conception/modélisation, les points suivants sont recommandés :

- Planification, si possible, des travaux en fonction des prévisions hydrologiques;
- Mise en place d'un remblai en gravillon sur la digue en pierres, ou radier initial du nouveau canal à 98,0 m ;
- Suivi régulier du site par des mesures et observations pour vérifier les conditions érosives de même que la nécessité d'implanter des épis ou non;
- Échantillonnage granulométrique des sédiments.

6 CONCLUSIONS

Dans le cadre du renouvellement du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (PSBLSJ), Lasalle|NHC a réalisé pour Rio Tinto Alcan une étude de modélisation des berges du lac Saint-Jean.

Depuis de nombreuses années, le secteur de l'embouchure de la rivière Belle-Rivière est aux prises avec des problèmes récurrents d'érosion, rendant nécessaire le rechargement des plages sur une base quasi annuelle. La dynamique sédimentaire de ce secteur et sa localisation rendent en effet les plages particulièrement vulnérables à l'attaque frontale des vagues de tempêtes.

Pour étudier ce site complexe, un modèle numérique bidimensionnel des conditions hydrosédimentologiques du site a été mis en œuvre à l'aide de la suite logicielle MIKE 21 FM, développée par la firme *DHI Water & Environment*. Exploité selon différents scénarios de tempêtes et de crues printanières, le modèle numérique a permis de comparer diverses variantes d'aménagement, mises au point par Rio Tinto Alcan et Norda Stelo, visant à réduire les problèmes d'érosion affectant les plages du secteur de St-Gédéon :

- Variante 1 : statu quo;
- Variante 2 : Remplissage du chenal à l'élévation 99,0 m;
- Variante 3 : Remplissage du chenal à l'élévation 100,0 m sans épis;
- Variante 4 : Remplissage du chenal à l'élévation 100,0 m avec un épi au chaînage 2+200 (épi 2.3);
- Variante 5 : Remplissage du chenal à l'élévation 100,0 m avec un épi au chaînage 2+200 (épi 2.3) et un épi au chaînage 1+875 (épi 2.1);
- Variante 6 : Remplissage du chenal à l'élévation 100,5 m sans épis.

À l'exception de la variante 1, ces variantes s'accompagnent toutes d'un remblai en gravillon au pied de la zone de remplissage, d'un rechargement de plage entre les bornes 28 et 32 du secteur St-Gédéon, du creusage des bancs de sable de part et d'autre de l'embouchure, d'une protection en perrés et d'une digue en pierres en rive droite de la rivière, et d'un nouveau canal à l'embouchure de la rivière.

Les principaux résultats de l'étude sont les suivants :

- Le remplissage de la zone d'avant-plage de St-Gédéon réduit les courants littoraux vers l'embouchure de la rivière Belle-Rivière, ce qui favorise un déplacement des courants littoraux issus du secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix vers le large.
- Le creusage du banc de sable à l'extrémité nord du secteur Métabetchouan-Lac-à-la-Croix (zone C) modifie localement le régime des vagues. Ce changement est toutefois jugé peu significatif et sans impact pour les conditions érosives du site.

- Le remplissage du chenal creusé par la rivière Belle-Rivière en crue dans la zone d'avant-plage permet un déferlement plus éloigné des vagues, menant ainsi à une réduction significative de l'érosion des plages et des courant littoraux pouvant emporter les sédiments érodés;
- La mise en place d'épis dans le tronçon étudié n'est pas requise pour protéger les plages à court terme. Il est plutôt recommandé d'effectuer un suivi régulier du secteur étudié et d'évaluer la nécessité d'implanter des épis en fonction de l'évolution du site;
- En fonction des résultats de modélisation et des contraintes de construction, la variante 3 est recommandée;
- La section d'écoulement du nouveau canal proposé dans l'embouchure de la rivière Belle-Rivière devrait avoir une largeur minimale de 10 m pour accommoder le passage de crues fortes au printemps;
- L'érosion du nouveau canal proposé et les risques d'érosion de la zone de remplissage dépendent grandement des conditions hydrologiques l'année des travaux. Il est recommandé de tenir compte de cet aspect, dans la mesure du possible, dans la planification des travaux;
- Le concept d'aménagement et les résultats de modélisation impliquent un certain degré de schématisation et nombre d'hypothèses. Un suivi régulier du secteur à l'étude et l'échantillonnage des sédiments dans l'embouchure de la rivière Belle-Rivière est recommandé.

7 RÉFÉRENCES

- [1] ROPARS, Y. (2015). *Érosion des berges du lac Saint-Jean – Étude des tempêtes – Rapport technique*. Préparé pour Lasalle | NHC, pour le compte de Rio Tinto Alcan, mai 2015.
- [2] VILLENEUVE, R. (2013). Sites 91.03.02/94.03.01/87.02.04 – *Analyse de la problématique de l’embouchure de la rivière Belle-Rivière et des berges adjacentes*. Rapport 101667.102-001 préparé par Roche Ltée. Groupe-Conseil, pour Rio Tinto Alcan, juillet 2013.
- [3] AUBEL, T., DENAULT, C., CUETO-BERGNER, A., GALLANT, N ET VILLENEUVE M. (2016). *Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (2017-2026) – Étude et modélisation de l’érosion des berges – Rapport d’étude – Volume 1*. Rapport préparé pour Rio Tinto Alcan.
- [4] VAN RIJN, L.C. (2014). Simple General Formulae for Sand Transport ne Rivers, Estuaries and Coastal Waters. <http://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Formulaesandtransport.pdf>.