

SECTEURS DE LA PLAGE DE SAINT-GÉDÉON-SUR-LE-LAC ET DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE (SITE 93.02.02)

ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE HYDROSÉDIMENTAIRE PENDANT LA
PÉRIODE ESTIVALE 2021 ET ANALYSE DE SOLUTIONS

RIO TINTO
PROGRAMME DE STABILISATION DES BERGES DU LAC SAINT-JEAN

JANVIER 2022



Source : WSP (2021)



SECTEURS DE LA PLAGE DE SAINT-GÉDÉON-SUR-LE-LAC ET DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE (SITE 93.02.02)

ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE
HYDROSÉDIMENTAIRE PENDANT LA PÉRIODE
ESTIVALE 2021 ET ANALYSE DE SOLUTIONS

RIO TINTO
PROGRAMME DE STABILISATION DES BERGES
DU LAC SAINT-JEAN

VERSION FINALE

PROJET N° : 211-07574-00
DATE : JANVIER 2022

WSP CANADA INC.
1135, BOULEVARD LEBOURGNEUF
QUÉBEC (QUÉBEC) G2K 0M5

TÉLÉPHONE : +1 418-623-2254
TÉLÉCOPIEUR : +1 418-624-1857
WSP.COM

SIGNATURES

PRÉPARÉ PAR



Justin McKibbon, ing., M.Sc.
Nº OIQ : 5000352

Le présent rapport a été préparé par WSP Canada Inc. (WSP) pour le compte de Rio Tinto conformément à l'entente de services professionnels. La divulgation de tout renseignement faisant partie du présent rapport incombe uniquement au destinataire prévu. Son contenu reflète le meilleur jugement de WSP à la lumière des informations disponibles au moment de la préparation du rapport. Toute utilisation que pourrait en faire une tierce partie ou toute référence ou toutes décisions en découlant sont l'entièvre responsabilité de ladite tierce partie. WSP n'accepte aucune responsabilité quant aux dommages, s'il en était, que pourrait subir une tierce partie à la suite d'une décision ou d'un geste basé sur le présent rapport. Cet énoncé de limitation fait partie du présent rapport.

L'original du document technologique que nous vous transmettons a été authentifié et sera conservé par WSP pour une période minimale de dix ans. Étant donné que le fichier transmis n'est plus sous le contrôle de WSP et que son intégrité n'est pas assurée, aucune garantie n'est donnée sur les modifications ultérieures qui peuvent y être apportées.

ÉMISSION/RÉVISION	PRÉPARÉ POUR	DATE
Préalable	Rio Tinto – Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean	2021-12-17
Finale	Rio Tinto – Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean	2022-01-19

ÉQUIPE DE RÉALISATION

RIO TINTO – PROGRAMME DE STABILISATION DES BERGES DU LAC SAINT-JEAN

Chargée de projet Caroline Jolette, ing.

WSP CANADA INC. (WSP)

Chargé de projet Justin McKibbon, ing., M.Sc.A.

Ingénieries de projet Sanaz Mehrzad, ing., PhD.
Noémie Blouin, ing., M.Sc.

Traitement de texte et édition Luce Lachance, adj.

Référence à citer :

WSP. 2022. *Ensablement de l'embouchure de la Belle Rivière (site 93.02.02) – Diagnostic et étude de faisabilité*. Rapport final de WSP Canada Inc. à Rio Tinto – Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean. 63 p. et annexes.

SOMMAIRE

La mission du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (PSBLSJ), depuis 1986, est de contrer l'érosion des berges du lac Saint-Jean en tenant compte des aspects techniques, environnementaux, sociaux et économiques propres à chaque site d'intervention. Le secteur de Saint-Gédéon-sur-le-Lac, à Saint-Gédéon, est connu pour être vulnérable aux vagues qui déferlent sur le lac Saint-Jean. Une problématique d'érosion importante et atypique a amené le Programme à y intervenir en réalisant des rechargements de plage fréquents à compter de 2009. La migration du chenal d'écoulement de la rivière Belle Rivière à proximité du rivage a été mise en cause pour ce changement soudain de la dynamique.

En vue de réduire l'érosion à long terme, des travaux importants ont été réalisés en 2019 à l'embouchure de la rivière et visaient le redressement du chenal de sortie du cours d'eau, ainsi que le remblayage de l'ancien chenal d'écoulement longeant le pied de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac. Une digue submergée a par ailleurs été aménagée afin d'assurer la pérennité du redressement du chenal de sortie et éviter qu'il ne retourne vers son ancien lit.

Le remblayage de l'ancien chenal d'écoulement devait permettre de rehausser le pied et adoucir la pente de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac, afin de provoquer le déferlement des vagues plus au large et atténuer l'énergie atteignant le haut de la plage, favorisant ainsi une meilleure stabilité des matériaux. Les suivis réalisés jusqu'à présent indiquent que l'intervention progresse telle qu'anticipée et notent même une poursuite des accumulations de sable au pied de la plage. Les travaux semblent donc en bonne voie d'atteindre leurs objectifs.

À l'été 2021, par contre, deux situations ont été observées dans le secteur, soit une érosion du haut de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac, ainsi que l'obstruction du chenal de la rivière Belle Rivière une brève période. Des travaux standard de rechargement avec rehaussement de la digue étaient prévus à la programmation des travaux 2021-2022 à titre préventif, mais à la demande des autorités environnementales (MELCC, MFFP), ils ont été reportés afin de faire des analyses plus poussées de la situation.

Rio Tinto a donc mandaté WSP pour réaliser une étude technique visant à comprendre les causes possibles de l'érosion et de l'ensablement, en plus d'identifier les facteurs aggravants. L'étude devait par ailleurs élaborer des concepts d'aménagement préliminaires permettant de bonifier l'efficacité des structures en place à Saint-Gédéon-sur-le-Lac, en plus de minimiser le risque d'obstruction du chenal d'écoulement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière. Entre juin et novembre 2021, huit relevés bathymétriques ont été réalisés dans le secteur à l'étude et servent d'intrants aux présentes analyses.

Les analyses effectuées démontrent que l'année 2021 a été caractérisée par une combinaison de plusieurs facteurs rares. Spécifiquement, la crue printanière dans la rivière Belle Rivière a été environ 60% plus faible que la normale et les apports de sédiments en provenance de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac ont été près de deux fois plus importants que la moyenne historique. Ces conditions se seraient donc traduites par un « nettoyage » insuffisant de l'embouchure de la Belle Rivière au printemps, suivi d'une accumulation de sédiments plus importante qu'à l'habitude pendant la période estivale. Le contexte était donc propice à l'engraissement de la flèche de sable à l'embouchure de la Belle Rivière, qui est présente depuis plusieurs années, et à l'ensablement du chenal d'écoulement.

Dans l'éventualité où la crue printanière aurait été plus « standard », un emmagasinement accru de matériaux provenant de la plage aurait pu se produire, diminuant ainsi le risque d'obstruction du chenal d'écoulement, mais il demeure possible que l'obstruction aurait simplement été décalée dans le temps, sans être évitée pour autant.

Par ailleurs, compte tenu de la quantité importante de sédiments toujours présents sur la flèche de sable, le risque d'obstruction du chenal persiste en 2022, et ce, même advenant un retour d'une dynamique plus « standard » lors du prochain nettoyage printanier et de l'ensablement estival. Une crue supérieure à la moyenne pourrait être requise pour assurer un nettoyage adéquat du chenal d'écoulement. Un retour à la normale pourrait même s'échelonner sur plus d'une année. D'autre part, dans un contexte de changements climatiques, caractérisés notamment par moins de neige en hiver et des périodes de redoux plus fréquentes, il est possible que des crues printanières faibles, comme celle observée en 2021, deviennent plus fréquentes.

Pour permettre la poursuite des rechargements et minimiser le risque d'obstruction du chenal d'écoulement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière, la mise en place de structures de rétention des sédiments (épis, brise-lames) est recommandée. À cet effet, plusieurs variantes d'aménagement ont été développées dans le cadre de cette étude et ont été examinées à l'aide d'une analyse multicritère s'appuyant sur des variables discriminantes de natures technique, environnementale et sociale. Les variantes incluaient le rehaussement partiel de la digue submergée, combinée ou non à l'ajout d'un épi intermédiaire ou de brise-lames détachés le long de la plage. Par ailleurs, des solutions considérant le maintien du statu quo (poursuite des rechargements seuls de la plage), ainsi que la non-intervention (arrêt des rechargements et recul des propriétés riveraines) ont également été examinées, mais ne sont pas considérées par Rio Tinto.

La comparaison multicritère conclut que les solutions permettant de limiter la dérive de sédiments vers l'embouchure de la Belle Rivière à l'aide de structures de rétention répondent de façon plus favorable à l'ensemble des critères discriminants considérés pour la zone d'étude. Plus spécifiquement, le rehaussement partiel de la digue submergée, combiné à l'aménagement d'un épi intermédiaire (variante 3) se distingue par rapport au rehaussement seul de la digue submergée (variante 2) et l'aménagement de brise-lames détachés (variante 4). Cette variante permettrait une stabilisation plus rapide de la plage devant le perré de support (secteur le plus vulnérable à l'érosion), tout en limitant l'élargissement de la plage attenante à la digue submergée. L'empietètement et l'impact visuel des éléments d'empierrement seraient quant à eux plus faibles que ceux des brise-lames et la mise en place des volumes de rechargements requis pourrait continuer à être réalisée de manière progressive. Par ailleurs, avec la variante 3, le retrait du perré de support pourrait être envisagé et analysé au cours des prochaines phases.

Pour l'ensemble des solutions structurales, les interventions proposées font déjà partie du décret existant du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean et les délais requis pour obtenir les autorisations environnementales ne devraient pas mettre en jeu la réalisation des travaux à l'hiver 2023. Une révision et une optimisation des dimensions et de l'emplacement des ouvrages demeurent toutefois requises en phase d'ingénierie détaillée. Par ailleurs, des études géotechniques complémentaires sont recommandées pour caractériser le comportement des structures reposant sur le remblai de l'ancien chenal de la rivière Belle Rivière.

Le maintien du statu quo (variante 1) ne permet pas, pour sa part, de minimiser le risque d'ensablement à l'embouchure de la Belle Rivière. L'évolution du milieu serait alors conditionnée par les aléas naturels et continuerait à dépendre de l'interrelation entre l'érosion fluviatile au printemps et l'ensablement à l'été et à l'automne. Le maintien de suivis visuels et bathymétriques fréquents serait alors requis pour surveiller la progression des zones d'accumulation et planifier les mesures adaptatives requises selon l'état du chenal de navigation.

Finalement, en ce qui concerne la variante 5 (non-intervention), il est important de rappeler que ce scénario n'est pas considéré par Rio Tinto et ne cadre pas avec les engagements du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean. La variante est présentée à titre indicatif seulement pour illustrer l'envergure de la problématique d'érosion et le patrimoine potentiellement à risque selon cette approche. L'analyse démontre que la quasi-totalité des propriétés riveraines devraient être reculées afin d'assurer leur sécurité et leur pérennité. Entretemps, les matériaux érodés sur la berge continueraient à dériver vers l'embouchure de la Belle Rivière, perpétuant ainsi le risque d'obstruction du chenal de navigation advenant la conjoncture de conditions hydrodynamiques comparables à celles observées en 2021.

TABLE DES MATIÈRES

1	CONTEXTE ET OBJECTIFS	1
2	ÉVOLUTION DE LA BATHYMETRIE À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE.....	3
2.1	DYNAMIQUE INTERANNUELLE	3
2.2	DYNAMIQUE PENDANT LA PÉRIODE ESTIVALE 2021	7
2.3	IMPACT DES TRAVAUX DE L'HIVER 2019.....	12
3	CARACTÉRISATION DE L'ENVIRONNEMENT FLUVIAL ET CÔTIER....	13
3.1	NIVEAUX D'EAU	13
3.2	HYDROLOGIE DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE	14
3.3	CLIMAT DES VENTS	17
3.4	CLIMAT DE VAGUES AU LARGE DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE	19
3.5	ESTIMATION DU TRANSPORT INDUIT PAR LES VAGUES	22
3.6	ANALYSES HYDROSÉDIMENTAIRES EFFECTUÉES PAR LASALLE-NHC	23
3.7	MODÉLISATION DE LA DYNAMIQUE HYDROSÉDIMENTAIRE À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE.....	25
3.7.1	APPROCHE	25
3.7.2	LOGICIEL UTILISÉ	26
3.7.3	ÉLABORATION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE	26
3.7.4	PARAMÉTRISATION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE.....	28
3.7.5	SCÉNARIOS DE MODÉLISATION	28
3.7.6	RÉSULTATS DE MODÉLISATION	30
3.8	SYNTHÈSE	38

4	VARIANTES D'INTERVENTION PROPOSÉES.....	39
4.1	VARIANTE 1 : STATU QUO (POURSUITE DES RECHARGEMENTS)	39
4.2	VARIANTE 2 : REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE ET POURSUITE DES RECHARGEMENTS.....	40
4.3	VARIANTE 3 : REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE, AJOUT D'UN ÉPI INTERMÉDIAIRE ET POURSUITE DES RECHARGEMENTS	44
4.4	VARIANTE 4: REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE, AJOUT DE BRISE-LAMES DÉTACHÉS ET POURSUITE DES RECHARGEMENTS.....	45
4.5	VARIANTE 5: NON-INTERVENTION (ARRÊT DES RECHARGEMENTS ET RECUL DES PROPRIÉTÉS À PROXIMITÉ DE LA BERGE).....	48
4.6	COMPARAISON MULTICRITÈRE.....	50
4.7	DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS	59
5	CONCLUSION	61
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	63

TABLEAUX

TABLEAU 3-1	CARACTÉRISTIQUES DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES RETENUES POUR L'ÉTUDE.....	17
TABLEAU 3-2	VOLUME D'ÉROSION AU NIVEAU DE LA FLÈCHE DE SABLE.	31
TABLEAU 4-1	CARACTÉRISTIQUES PRÉLIMINAIRES DES STRUCTURES PROPOSÉES À LA VARIANTE 3.	44
TABLEAU 4-2	CARACTÉRISTIQUES DES STRUCTURES PROPOSÉES À LA VARIANTE 4.	46
TABLEAU 4-3	ANALYSE MULTICRITÈRE POUR LES 5 VARIANTES D'AMÉNAGEMENT PROPOSÉES.	51

FIGURES

FIGURE 2-1	RELEVÉS BATHYMÉTRIQUES ET DÉLIMITATION DE LA FLÈCHE DE SABLE À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE ENTRE NOVEMBRE 2017 ET JUIN 2021.	4
FIGURE 2-2	MIGRATION DE LA FLÈCHE DE SABLE ENTRE NOVEMBRE 2017 ET JUIN 2021.....	5
FIGURE 2-3	ÉVOLUTION DE LA FLÈCHE DE SABLE ENTRE LES PÉRIODES AUTOMNALES ET PRINTANIÈRES DE 2016 À 2021 (EXTRAIT DE LASALLE-NHC, 2021).	6
FIGURE 2-4	PROGRESSION DE LA FLÈCHE DE SABLE OBSERVÉE ENTRE LE 24 JUIN ET LE 2 SEPTEMBRE 2021.	7
FIGURE 2-5	ÉVOLUTION DE LA FLÈCHE DE SABLE ENTRE NOVEMBRE 2020 ET LE 24 JUIN 2021.....	8

FIGURE 2-6	ÉVOLUTION DE LA FLÈCHE DE SABLE ENTRE LE 24 JUIN ET LE 2 SEPTEMBRE 2021.....	8
FIGURE 2-7	(A) OBSTRUCTION DU CHENAL OBSERVÉE LE 31 JUILLET 2021; (B) OUVERTURE DU CHENAL OBSERVÉE LE 1 ^{ER} AOÛT 2021 (SOURCE PHOTOS : PROGRAMME STABILISATION DES BERGES DU LAC SAINT-JEAN).	9
FIGURE 2-8	MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN SYNTHÉTIQUE (APPROXIMATIF) DU BOUCHON OBSERVÉ LE 31 JUILLET 2021.....	9
FIGURE 2-9	MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN RELEVÉ LE 4 AOÛT 2021.....	10
FIGURE 2-10	COMPARAISON DES MODÈLES NUMÉRIQUES DE TERRAIN ENTRE NOVEMBRE 2020 ET JUIN 2021.	11
FIGURE 3-1	NIVEAU D'EAU HISTORIQUE DU LAC SAINT-JEAN ENTRE 1997 À 2021 POUR LA PÉRIODE DE CRUE (1 ^{ER} MARS AU 30 MAI).	13
FIGURE 3-2	DATE À LAQUELLE LE NIVEAU DU LAC SAINT-JEAN A ATTEINT L'ÉLÉVATION 100,0 M.	14
FIGURE 3-3	DÉBIT MOYEN JOURNALIER HISTORIQUE TRANSFÉRÉ À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE DE 2000 À 2021 POUR LA PÉRIODE DE CRUE PRINTANIÈRE (1 ^{ER} MARS AU 30 MAI).	15
FIGURE 3-4	DÉBIT MAXIMAL ANNUEL DE CRUE À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE POUR LA PÉRIODE DE MARS À MAI, INCLUSIVEMENT.	15
FIGURE 3-5	DÉBIT MAXIMAL ANNUEL DE CRUE SUR LA RIVIÈRE MÉTABETCHOUANE POUR LA	

	PÉRIODE DE MARS À MAI, INCLUSIVEMENT	16
FIGURE 3-6	VOLUME DE CRUE À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE POUR LA PÉRIODE DE MARS À MAI, INCLUSIVEMENT.	17
FIGURE 3-7	LOCALISATION DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES D'ENVIRONNEMENT CANADA SITUÉES À ROBERVAL (N° 7066686) ET MISTOOK (N° 7065012).....	18
FIGURE 3-8	SÉRIE TEMPORELLE DE LA VITESSE DU VENT ENREGISTRÉE À LA STATION DE MISTOOK	18
FIGURE 3-9	ROSE DES VENTS À LA STATION DE MISTOOK (PÉRIODE 1995 À 2021).	19
FIGURE 3-10	LOCALISATION DU POINT FOCAL, DES RADIALES (BLEUES) ET DES FETCHS EFFECTIFS (ROUGES) POUR LA GÉNÉRATION AU LARGE DU SITE À L'ÉTUDE.....	20
FIGURE 3-11	SÉRIE TEMPORELLE DE HAUTEURS DE VAGUES SIGNIFICATIVES GÉNÉRÉES AU LARGE DU SITE À L'ÉTUDE POUR LES MOIS D'AVRIL À AOÛT DE 1995 À 2021.....	21
FIGURE 3-12	ROSE DES VAGUES RÉSULTANTES GÉNÉRÉES AU LARGE DU SITE À L'ÉTUDE POUR LES MOIS D'AVRIL À AOÛT DE 1995 À 2021.....	21
FIGURE 3-13	DÉFINITION DE LA DIRECTION DU TRANSPORT INDUIT EN FONCTION DE L'ORIENTATION DES VAGUES.....	22
FIGURE 3-14	NOMBRE D'HEURES POUR LEQUEL LA HAUTEUR SIGNIFICATIVE AU LARGE DU SITE À L'ÉTUDE ÉTAIT SUPÉRIEURE À 0,5 M, INDUISANT UN TRANSPORT DE SÉDIMENTS.	23
FIGURE 3-15	TRANSPORT LITTORAL BRUT OBSERVÉ EN 2021 PAR RAPPORT AUX CONDITIONS HISTORIQUES,	

	POUR LA PÉRIODE SE TERMINANT LE 31 JUILLET (EXTRAIT DE LASALLE-NHC, 2021)	24
FIGURE 3-16	TRANSPORT LITTORAL NET OBSERVÉ EN 2021 PAR RAPPORT AUX CONDITIONS HISTORIQUES, POUR LA PÉRIODE SE TERMINANT LE 31 JUILLET (EXTRAIT DE LASALLE-NHC, 2021)	24
FIGURE 3-17	DYNAMIQUE HYDROSÉDIMENTAIRE AU NIVEAU DE LA FLÈCHE DE SABLE À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE (EXTRAIT DE LASALLE-NHC, 2021).....	25
FIGURE 3-18	MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN ÉLABORÉ À PARTIR DES RELEVÉS BATHYMETRIQUES DE NOVEMBRE 2020.....	27
FIGURE 3-19	MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN ÉLABORÉ À PARTIR DES RELEVÉS BATHYMETRIQUES DE JUIN 2021.	27
FIGURE 3-20	RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE : DÉBIT MAXIMAL ANNUEL DE CRUE (PÉRIODE DE MARS À MAI INCLUSIVEMENT).....	29
FIGURE 3-21	RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE : VOLUME DE CRUE ANNUEL (PÉRIODE DE MARS À MAI INCLUSIVEMENT)	29
FIGURE 3-22	FRONTIÈRE AMONT : SÉRIES TEMPORELLES DE DÉBIT UTILISÉES POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE MODÉLISATION.	30
FIGURE 3-23	FRONTIÈRE AVAL : SÉRIES TEMPORELLES DE NIVEAUX D'EAU UTILISÉES POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE MODÉLISATION.	30
FIGURE 3-24	MODÉLISATION DE L'ÉROSION POTENTIELLE LORS DE LA CRUE PRINTANIÈRE 2021 (SCÉNARIO DE CRUE FAIBLE).	32

FIGURE 3-25	MODÉLISATION DE L'ÉROSION POTENTIELLE LORS DE LA CRUE PRINTANIÈRE 2021 (SCÉNARIO DE CRUE MOYENNE).....	33
FIGURE 3-26	MODÉLISATION DE L'ÉROSION POTENTIELLE LORS DE LA CRUE PRINTANIÈRE 2021 (SCÉNARIO DE CRUE EXTRÊME).	34
FIGURE 3-27	MODÉLISATION DE L'ÉROSION POTENTIELLE LORS DE LA CRUE PRINTANIÈRE 2022 (SCÉNARIO DE CRUE FAIBLE).	35
FIGURE 3-28	MODÉLISATION DE L'ÉROSION POTENTIELLE LORS DE LA CRUE PRINTANIÈRE 2022 (SCÉNARIO DE CRUE MOYENNE).....	36
FIGURE 3-29	MODÉLISATION DE L'ÉROSION POTENTIELLE LORS DE LA CRUE PRINTANIÈRE 2022 (SCÉNARIO DE CRUE EXTRÊME).	37
FIGURE 4-1	VARIANTE 1 : STATUT QUO (POURSUITE DES RECHARGEMENTS).	40
FIGURE 4-2	COMPARAISON DE L'ORIENTATION DU TRAIT DE CÔTE DANS LE SECTEUR DE SAINT-GÉDÉON.	41
FIGURE 4-3	ÉVALUATION DE LA POSITION ANTICIPÉE DU PIED DE LA PLAGE, SELON LA PENTE D'ÉQUILIBRE TRANSVERSALE DE LA PLAGE DANS LE SECTEUR ADJACENT AU NORD-EST	42
FIGURE 4-4	VARIANTE 2 : REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE ET POURSUITE DES RECHARGEMENTS.	43
FIGURE 4-5	VARIANTE 2 : SECTION TRANSVERSALE PROPOSÉE POUR LE REHAUSSEMENT DE LA DIGUE (TRAITS MAGENTA) SUPERPOSÉE SUR LA SECTION EXISTANTE DE LA	

	DIGUE SUBMERGÉE (TRAITS NOIRS)	43
FIGURE 4-6	VARIANTE 3 : REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE, AJOUT D'UN ÉPI INTERMÉDIAIRE ET POURSUITE DES RECHARGEMENTS.	45
FIGURE 4-7	SITE TÉMOIN CONSIDÉRÉ POUR LA CONCEPTION DES BRISE-LAMES DÉTACHÉS (ÉTANG-DES-ÎLES).....	46
FIGURE 4-8	VARIANTE 4 : REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE, AJOUT DE BRISE-LAMES DÉTACHÉS ET POURSUITE DES RECHARGEMENTS.	47
FIGURE 4-9	VARIANTE 5 : ZONE POUVANT ÊTRE AFFECTÉE PAR LA TRANSFORMATION DU LITTORAL, ADVENANT L'ARRÊT DES INTERVENTIONS DE STABILISATION DE LA PLAGE DE SAINT-GÉDÉON-SUR-LE-LAC ET LE RETRAIT DU PERRÉ DE SUPPORT.....	49
FIGURE 4-10	ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE ANTICIPÉE SUR 23 ANS, EN L'ABSENCE DE RECHARGEMENTS (EXTRAIT DE LASALLE-NHC, 2016).....	49

ANNEXES

A RAPPORT D'ÉTUDE LASALLE-NHC

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le secteur de Saint-Gédéon-sur-le-Lac, à Saint-Gédéon, est connu pour être vulnérable aux vagues qui déferlent sur le lac Saint-Jean. Une problématique d'érosion importante et atypique a amené le Programme à y intervenir en réalisant des rechargements de plage fréquents à compter de 2009. La migration du chenal d'écoulement de la rivière Belle Rivière à proximité du rivage a été mise en cause pour ce changement soudain de la dynamique.

À l'été 2021, une accumulation particulièrement importante de sédiments a été observée à l'embouchure de la rivière Belle Rivière. Une obstruction du canal a même été observée pendant une courte période à la fin du mois de juillet. Les riverains et les utilisateurs des infrastructures récréatives situés en amont ont donc été grandement préoccupés par cette situation, qui, selon les témoignages recueillis, n'aurait jamais été observée auparavant.

La problématique d'ensablement a également permis de mettre en lumière d'autres enjeux potentiels liés à une obstruction partielle ou complète du chenal d'écoulement, qui pourraient se manifester advenant un changement de la sévérité de l'obstruction ou des conditions hydrodynamiques observées pendant cette période. Un rehaussement des niveaux d'eau en amont de la restriction pourrait notamment se produire, en raison de l'accumulation des apports dans la rivière. En cas de débits forts ou de niveaux d'eau élevés, ce phénomène pourrait constituer un risque d'infiltration d'eau pour les infrastructures riveraines et les installations nautiques de faibles élévations situées en amont. D'autre part, il persiste un risque que la réouverture du chenal d'écoulement s'effectue ailleurs qu'à l'endroit de l'obstruction initiale. La formation d'une brèche dans les autres flèches de sable observées à l'embouchure de la rivière Belle Rivière pourrait alors menacer le milieu écologique ayant colonisé ces formations et provoquer une migration subite du chenal de navigation.

L'ensablement survient seulement quelques années après la mise en œuvre d'importants travaux dans ce secteur, réalisés en 2019 par le Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean et visant à redresser le chenal d'écoulement de la rivière Belle Rivière. Ces travaux incluaient la construction d'une digue submergée en enrochement, le remblayage de l'ancien chenal d'écoulement de la rivière Belle Rivière et l'excavation d'un nouveau canal de sortie vis-à-vis l'embouchure du cours d'eau. Les travaux devaient permettre d'adoucir la pente transversale de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac, afin de provoquer le déferlement des vagues plus au large et atténuer l'énergie atteignant le haut de la plage. À long terme, une diminution des taux d'érosion et, conséquemment, de la fréquence des rechargements requis était anticipée.

Bien que les suivis et les analyses réalisés depuis la fin des travaux démontrent que ces interventions répondent aux attentes et sont en voie d'atteindre leurs objectifs, la formation d'une flèche sableuse au sud-ouest de la digue submergée et progressant vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière suggère que la dérive des matériaux sur la plage est responsable de l'obstruction observée. Des travaux standard de rechargements de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac avec rehaussement de la digue étaient prévus à la programmation des travaux 2021-2022 à titre préventif, mais à la demande des autorités environnementales (MELCC, MFFP), ils ont été reportés afin de faire des analyses plus poussées de la situation.

Dans ce contexte, Rio Tinto a mandaté WSP pour réaliser une étude technique visant à comprendre les causes possibles de l'érosion et de l'ensablement, en plus d'identifier les

facteurs aggravants. L'étude devait par ailleurs élaborer des concepts d'aménagement préliminaires permettant de bonifier l'efficacité des structures en place à Saint-Gédéon-sur-le-Lac, en plus de minimiser le risque d'obstruction du chenal d'écoulement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière. Entre juin et novembre 2021, huit relevés bathymétriques ont été réalisés dans le secteur à l'étude et servent d'intrants aux présentes analyses.

Le volet *diagnostic* de cette étude a pour objectif de cadrer les conditions hydrodynamiques observées pendant les périodes printanière et estivale 2021 par rapport aux normales historiques. Les paramètres étudiés incluent l'hydrologie de la rivière Belle Rivière, l'évolution des niveaux d'eau dans le lac Saint-Jean et les conditions de vents et de vagues au large de Saint-Gédéon-sur-le-Lac. Un modèle hydrosédimentaire permet quant à lui de comparer l'évolution morphologique projetée des lieux sous différents scénarios de crues printanières. Finalement, des analyses complémentaires réalisées par Lasalle-NHC (2021) viennent compléter la caractérisation des conditions hydrodynamiques à l'aide de modélisations numériques des courants et de la propagation des vagues, ainsi qu'une analyse multitudes de photos satellitaires. La note technique de ce consultant est consignée à l'annexe A.

L'élaboration des variantes d'aménagement vise quant à elle à développer des scénarios adaptés aux particularités de la zone d'étude et évaluer leurs impacts potentiels sur la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac, ainsi que l'embouchure de la rivière Belle Rivière. Une analyse multicritère permet de comparer les scénarios entre eux et de cibler l'intervention optimale à préconiser pour les phases subséquentes d'ingénierie détaillée selon les enjeux techniques, environnementaux, sociaux et économiques identifiés.

2 ÉVOLUTION DE LA BATHYMETRIE À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE

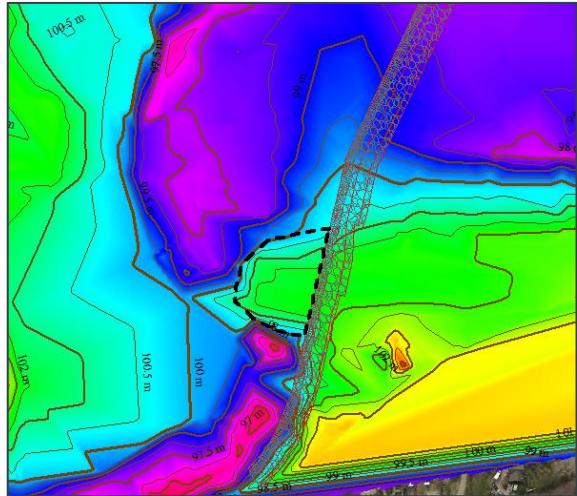
2.1 DYNAMIQUE INTERANNUELLE

L'embouchure de la rivière Belle Rivière est une zone hautement dynamique, où s'affrontent des processus d'érosion et d'accumulation provoquant un remodelage continual du chenal d'écoulement. La migration des méandres et l'alternance entre les périodes d'érosion et d'accumulation constituent des processus normaux pour ce genre de milieu.

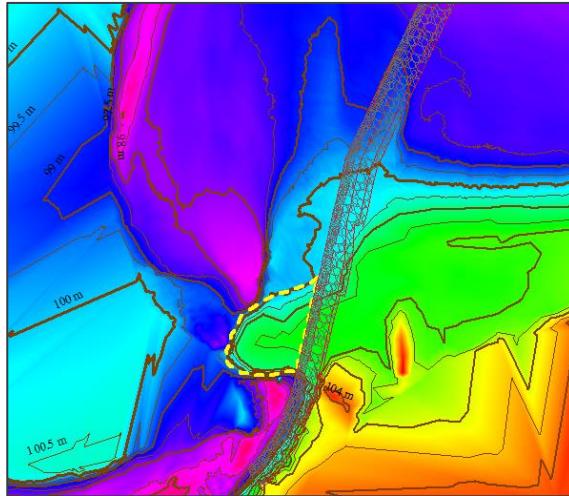
Dans un premier temps, un régime fluvial domine le comportement hydrosédimentaire de l'embouchure à l'hiver et au printemps, alors que le niveau du lac Saint-Jean est bas et que les vitesses d'écoulement sont principalement influencées par le débit de la rivière. Une érosion des parois du chenal et un « nettoyage » de l'embouchure sont alors typiquement observés pendant cette période. Par la suite, lorsque le niveau du lac Saint-Jean remonte à l'été et à l'automne, les vitesses d'écoulement diminuent et un régime littoral s'installe. Ce régime est avant tout influencé par les processus côtiers, tels que la propagation et le déferlement des vagues sur la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac. Des courants littoraux se développent alors parallèlement à la berge et varient selon l'orientation et l'intensité des vagues. Les matériaux de la plage entraînés par ces courants provoquent alors la formation d'une flèche de sable à l'embouchure de la rivière Belle Rivière, où ils se sédimentent dans les parties les plus profondes du chenal. Ce dernier se rétrécit alors au fur et à mesure que la flèche de sable progresse. Enfin, le cycle recommence à nouveau à la fin de la période d'eau libre, avec un « nettoyage » de l'embouchure lors de la prochaine crue printanière de la rivière Belle Rivière, assurant ainsi le maintien d'un chenal d'écoulement à l'exutoire du cours d'eau.

Les relevés bathymétriques réalisés dans la zone d'étude depuis 2017 confirment cette tendance. La Figure 2-1 illustre la position de la flèche pour les périodes disponibles. Bien que la plupart des relevés documentent l'état des lieux à la fin de l'automne, il demeure possible d'y constater une transformation progressive de la flèche. Le relevé de juin 2019 indique par ailleurs un effacement significatif de la zone d'accumulation. La Figure 2-2 illustre bien la migration en superposant les limites de la flèche sur une même image.

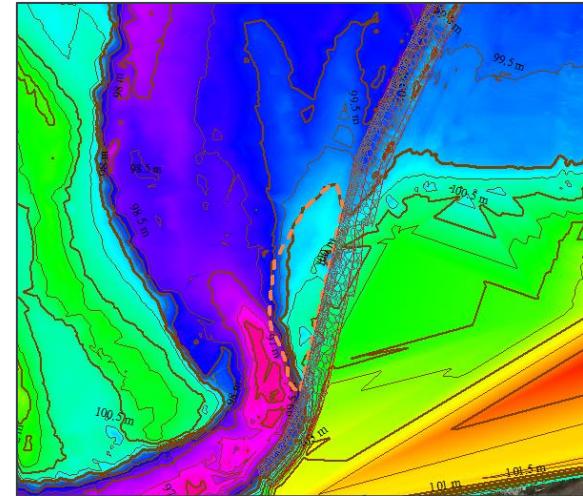
Cette dynamique est corroborée par l'analyse des photos satellites effectuée par Lasalle-NHC (2021). L'inventaire des photos disponibles permet de comparer l'état des lieux entre l'automne de certaines années et le printemps des années suivantes (Figure 2-3). La formation et l'effacement de la flèche y sont clairement distinguables. Les panneaux de la figure indiquent par ailleurs l'intensité approximative de la crue printanière observée dans la rivière Belle Rivière pour les années considérées. L'analyse conclut que la flèche était présente dès 2016 et qu'une crue moyenne (référence approximative de 2 ans) est requise pour permettre un nettoyage naturel de l'embouchure. L'efficacité du nettoyage peut toutefois varier selon la quantité de matériaux s'étant accumulés dans l'embouchure (Lasalle-NHC, 2021). L'analyse conclut par ailleurs que la flèche était encore présente à la fin de mai 2021, soit après la crue printanière.



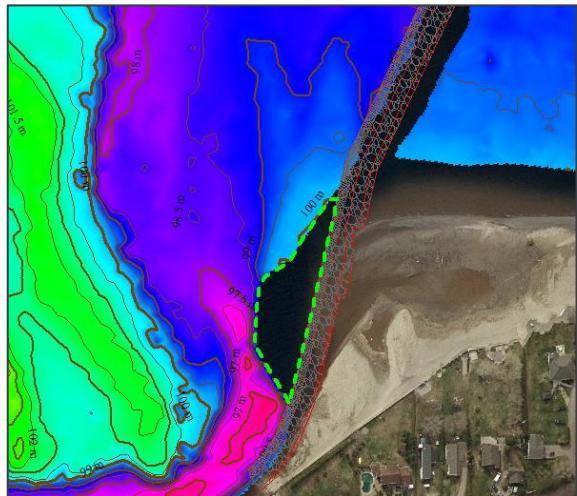
(a) Novembre 2017



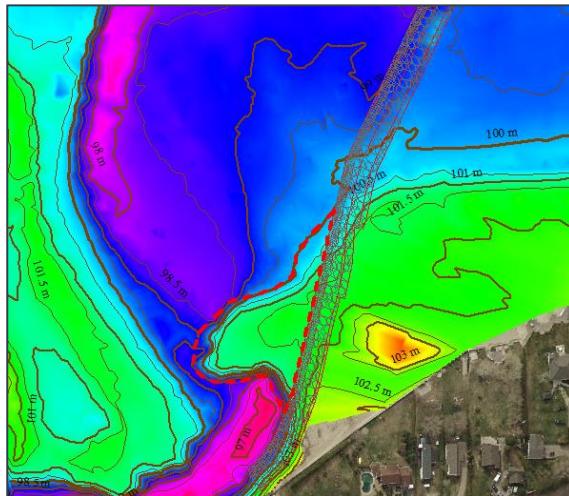
(b) Novembre 2018



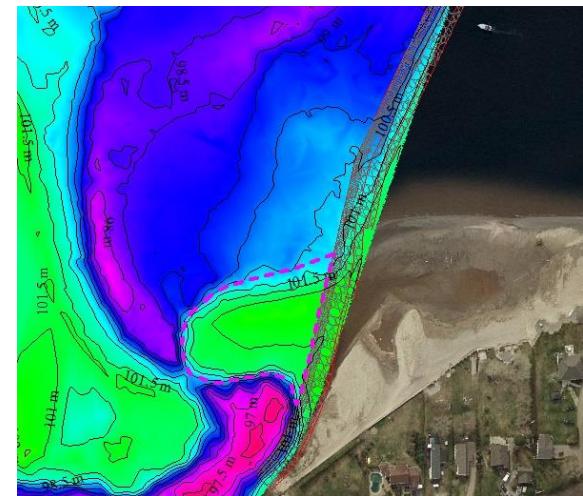
(c) Juin 2019



(d) Novembre 2019



(e) Novembre 2020



(f) Juin 2021

Figure 2-1 Relevés bathymétriques et délimitation de la flèche de sable à l'embouchure de la rivière Belle Rivière entre novembre 2017 et juin 2021.

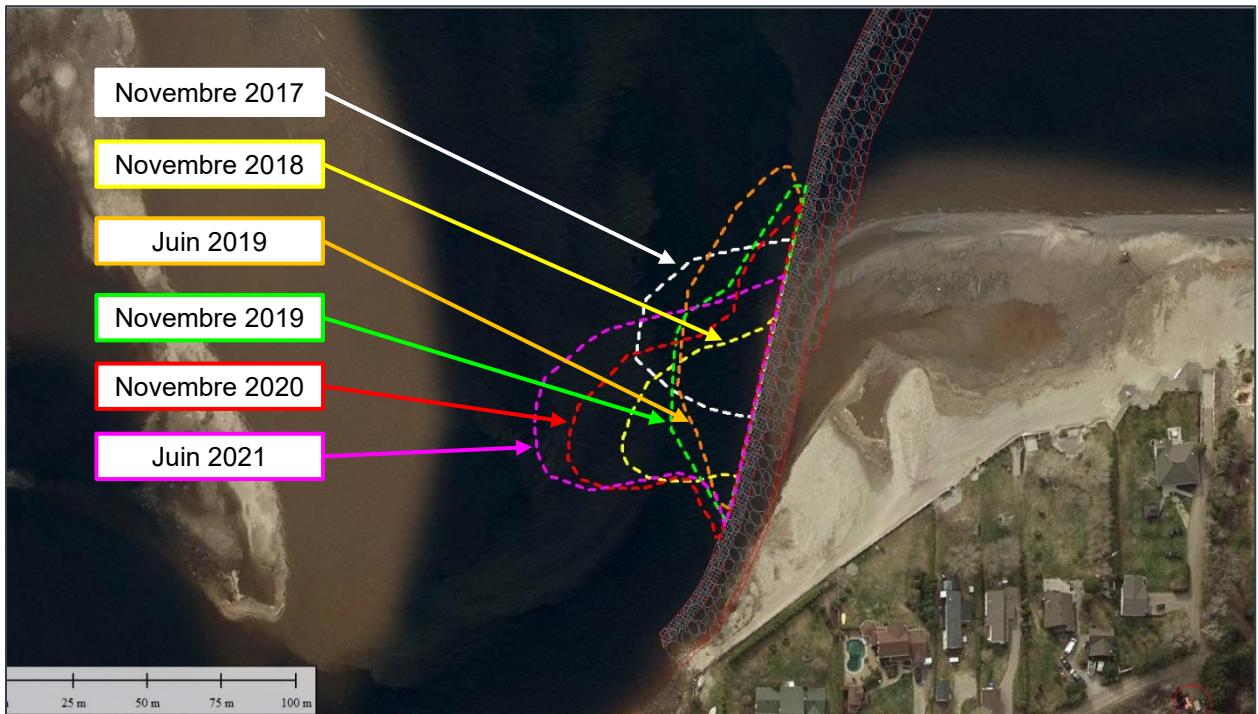
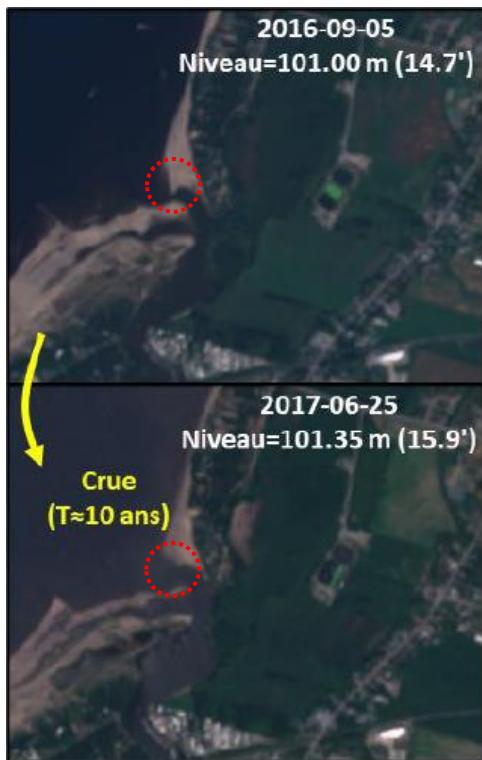
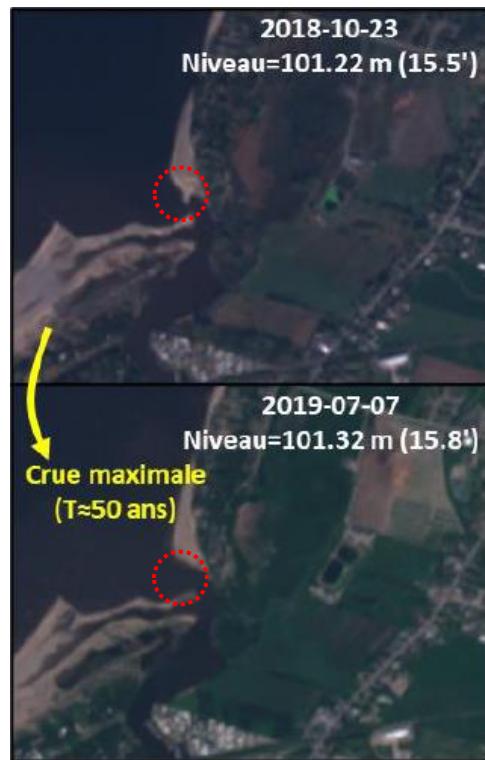


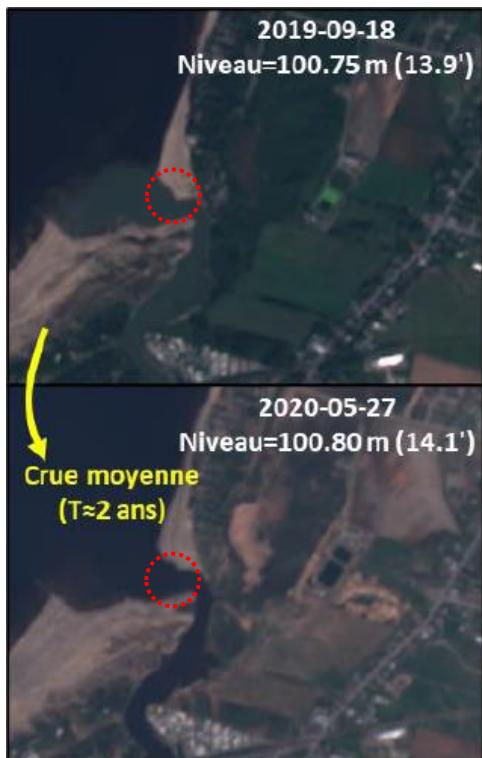
Figure 2-2 Migration de la flèche de sable entre novembre 2017 et juin 2021.



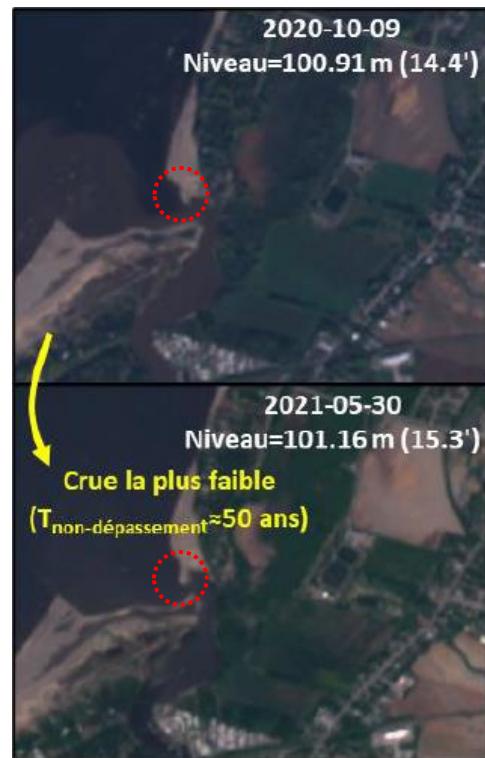
(a) Automne 2016 à Printemps 2017



(b) Automne 2018 à Printemps 2019



(c) Automne 2019 à Printemps 2020



(d) Automne 2020 à Printemps 2021

Figure 2-3 Évolution de la flèche de sable entre les périodes automnales et printanières de 2016 à 2021 (extrait de Lasalle-NHC, 2021).

2.2 DYNAMIQUE PENDANT LA PÉRIODE ESTIVALE 2021

En réponse à la problématique d'ensablement de l'embouchure de la rivière Belle Rivière, plusieurs relevés bathymétriques ont été effectués au cours de la période estivale 2021, afin de documenter l'évolution de la flèche de sable. La Figure 2-4 présente la progression observée. Les suivis ont permis de constater une poursuite de la progression de la flèche de sable et un remplissage graduel du chenal d'écoulement. Le goulet d'étranglement (section de faibles profondeurs) s'est par ailleurs allongé vers l'aval.

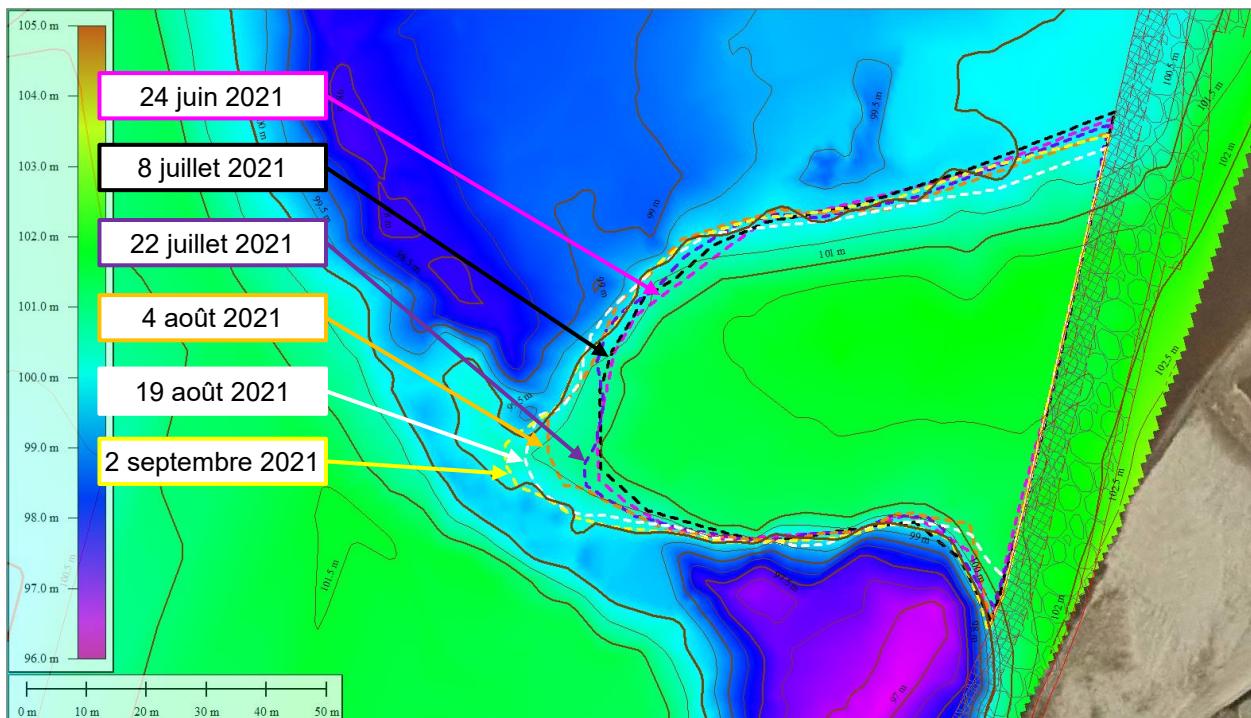


Figure 2-4 Progression de la flèche de sable observée entre le 24 juin et le 2 septembre 2021.

Le bilan séquentiel évalué à partir des modèles numériques de terrain chiffre le volume d'accumulation net sur la flèche de sable à environ 4 000 m³ entre novembre 2020 et septembre 2021 (Figure 2-5 et Figure 2-6). Il demeure toutefois probable que cette quantité soit sous-évaluée, car elle ne tient pas compte des volumes de sédiments que les courants dans le chenal auront malgré tout réussi à éroder. Un exemple éloquent de ce phénomène a d'ailleurs été observé en juillet, lorsque le chenal s'est complètement obstrué à la fin du mois, puis s'est rouvert naturellement le lendemain (Figure 2-7). Selon les données disponibles, l'accumulation aurait pu s'élever à environ 400 m³ (Figure 2-8 et Figure 2-9). Or, puisque cet événement s'est produit sur une courte période, entre deux relevés successifs, le volume ne transparaît pas dans l'évaluation du bilan séquentiel.

D'autre part, le calcul du volume d'accumulation n'inclut pas la quantité de sédiments érodés pendant la crue printanière de la rivière Belle Rivière. À cet effet, les modélisations hydrosédimentaires réalisées dans le cadre de cette étude (section 3.7) évaluent ce volume à environ 2 000 m³. La quantité totale de matériaux s'étant accumulés à l'embouchure de la rivière Belle Rivière pendant la période estivale 2021 pourrait donc être aussi élevée que 6 000 m³, voire possiblement plus. Les analyses effectuées par Lasalle-NHC (annexe A) suggèrent que cette quantité pourrait correspondre au double de la valeur moyenne historique.

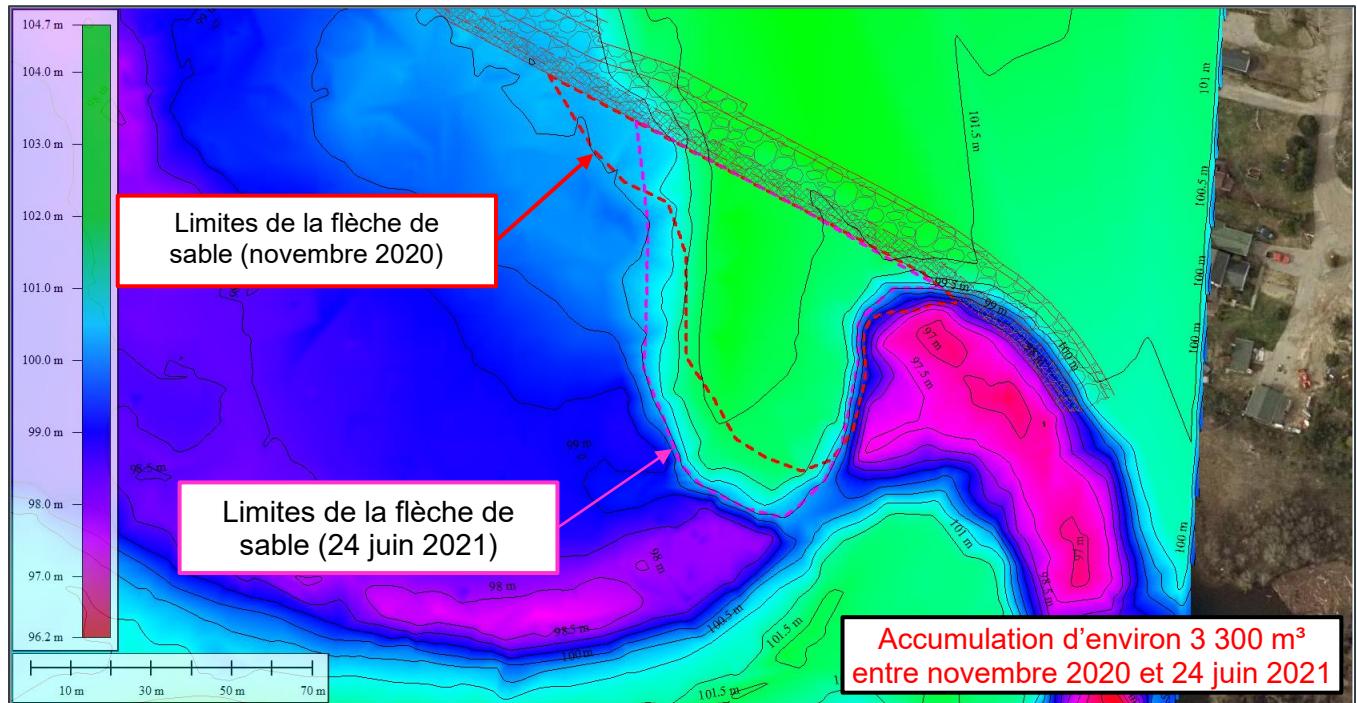


Figure 2-5 Évolution de la flèche de sable entre novembre 2020 et le 24 juin 2021.

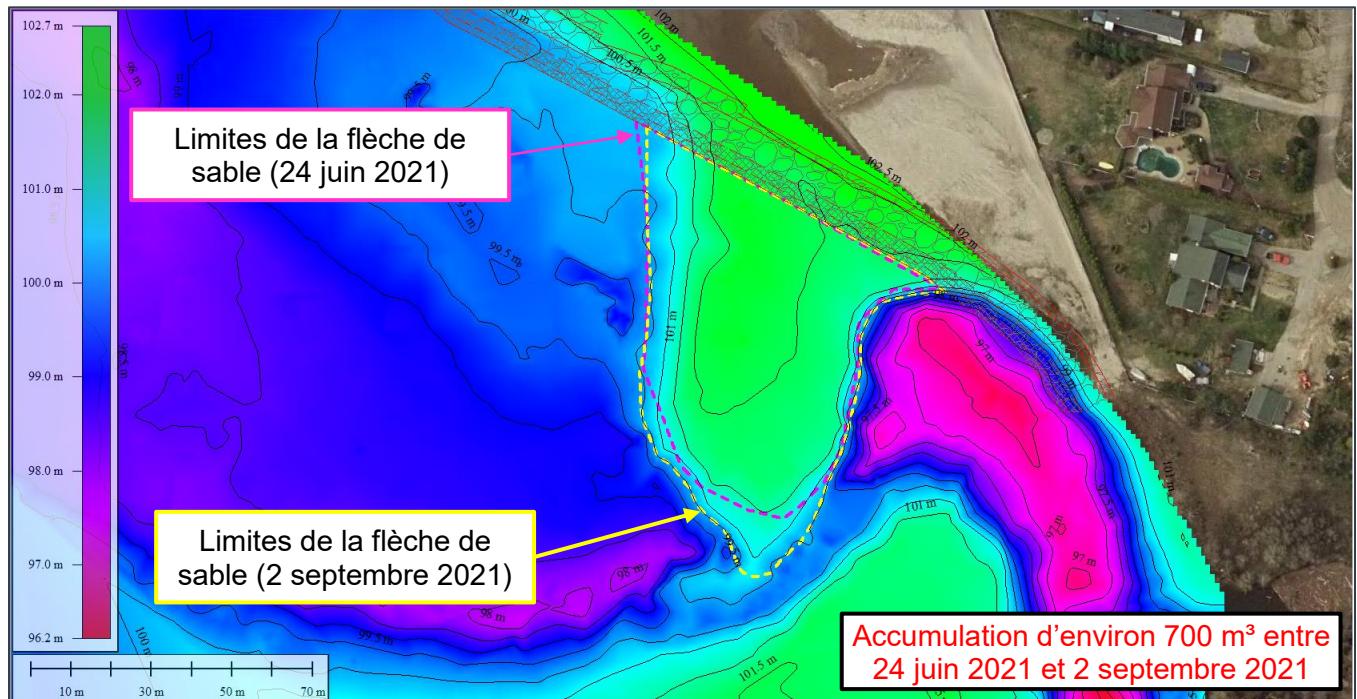


Figure 2-6 Évolution de la flèche de sable entre le 24 juin et le 2 septembre 2021.



Figure 2-7 (a) Obstruction du chenal observée le 31 juillet 2021; (b) Ouverture du chenal observée le 1^{er} août 2021 (source photos : Programme stabilisation des berges du lac Saint-Jean).

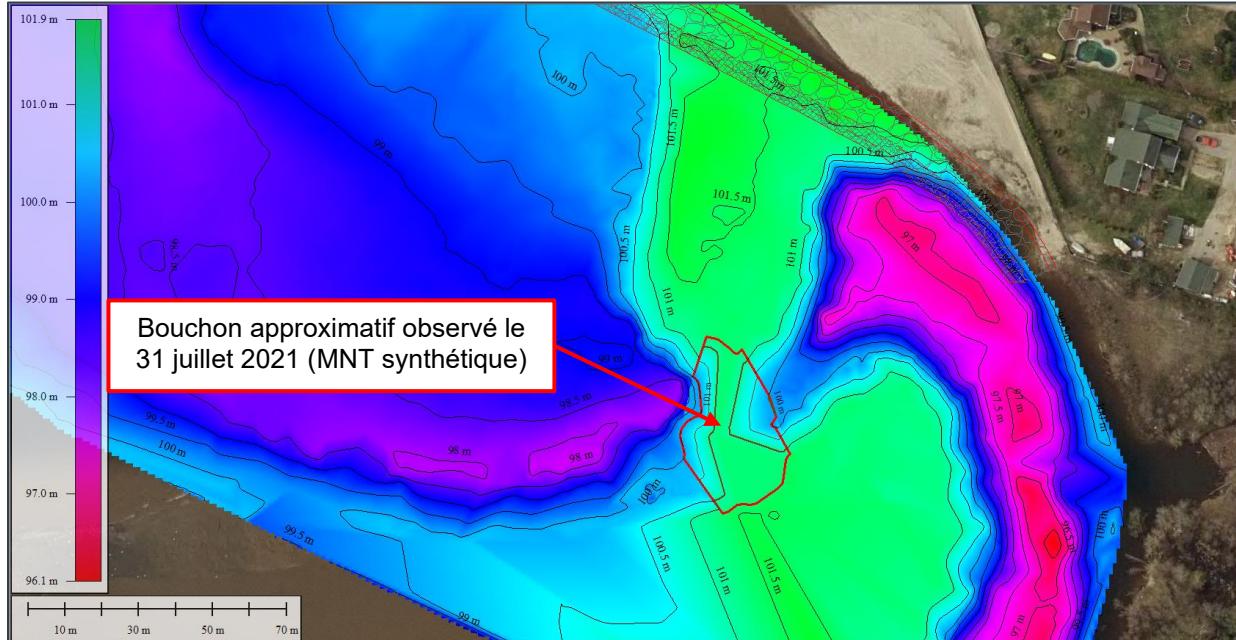


Figure 2-8 Modèle numérique de terrain synthétique (approximatif) du bouchon observé le 31 juillet 2021.

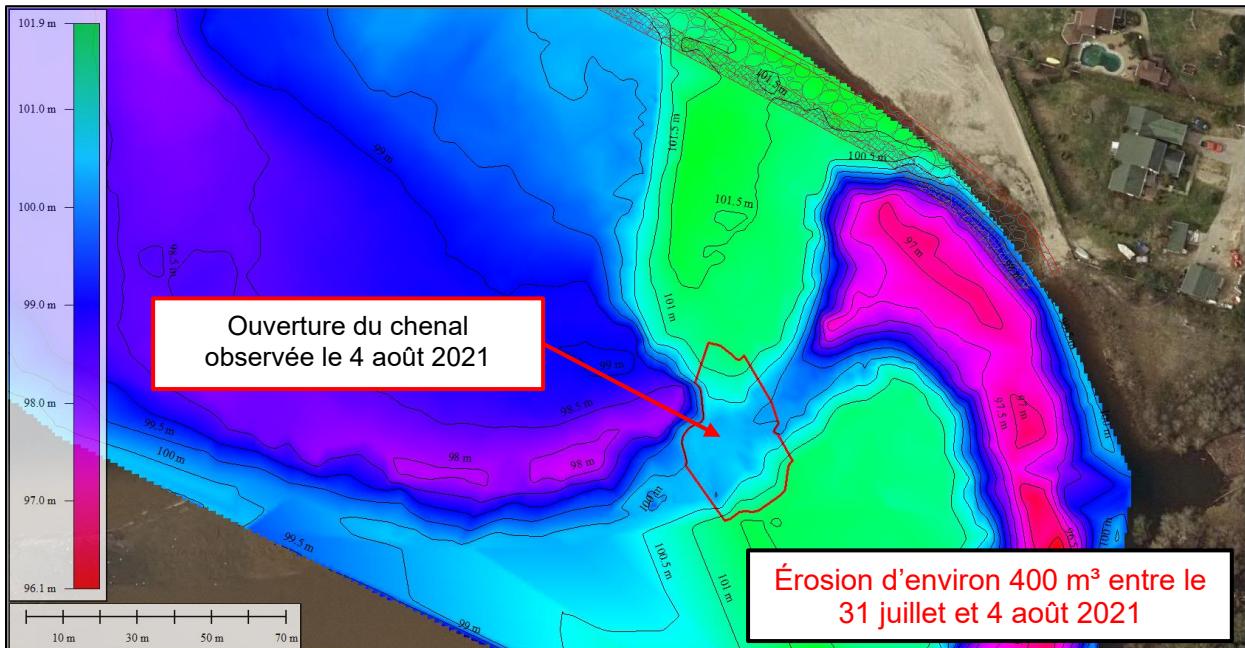


Figure 2-9 Modèle numérique de terrain relevé le 4 août 2021.

En plus de documenter l'état du fond marin à l'embouchure de la rivière Belle Rivière, les relevés bathymétriques effectués en juin 2021 ont été prolongés à la zone devant la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac. Les données recueillies permettent alors d'analyser l'évolution du milieu élargi, par rapport à novembre 2020. La Figure 2-10 présente l'écart vertical observé entre les modèles numériques de terrains générés avec chaque relevé. Sur cette figure, les zones ayant subi des accumulations sont illustrées dans des teintes de bleu et de vert, alors que les zones ayant subi de l'érosion sont représentées par des teintes de rouge, orange et jaune. Les écarts verticaux compris entre -0.1 et +0.1 m sont quant à eux considérés être à l'intérieur de la marge d'incertitudes des relevés et de l'interpolation des modèles de terrain. Les variations sont donc jugées non significatives et illustrées en blanc.

Les observations constatent une érosion marquée du haut de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac, totalisant une perte de sédiments de près de 4 600 m³. Ce volume est du même ordre de grandeur que l'accumulation observée sur la flèche de sable à l'embouchure de la rivière Belle Rivière (3 300 m³). Au large de la plage, des accumulations totalisant environ 9 600 m³ ont été observées.

Les relevés permettent par ailleurs de constater une érosion significative (5 300 m³) en rive gauche du chenal d'écoulement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière. La migration progressive du chenal vers le sud-ouest risque de provoquer l'effacement éventuel de la flèche de sable à cet endroit.

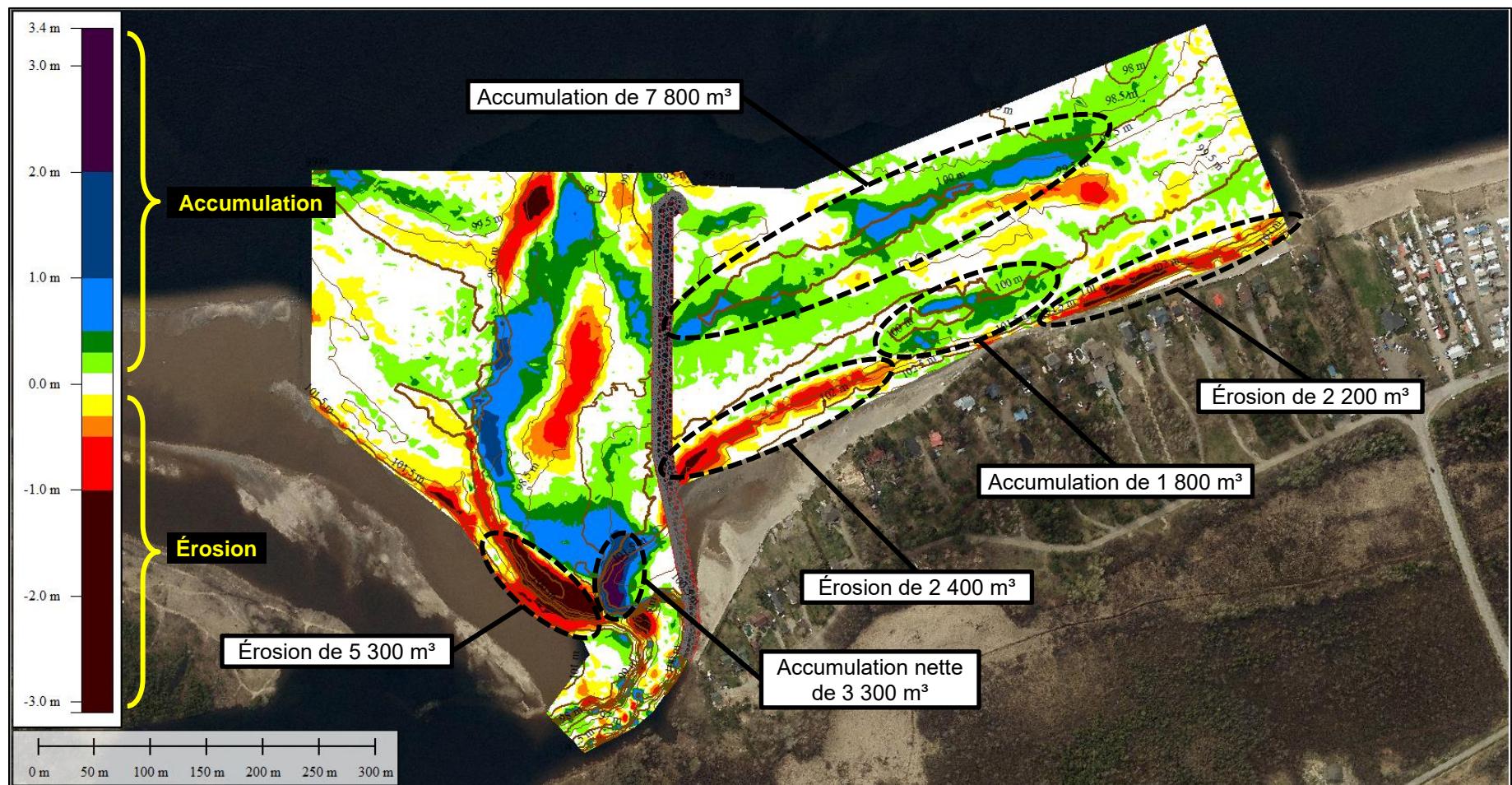


Figure 2-10 Comparaison des modèles numériques de terrain entre novembre 2020 et juin 2021.

2.3 IMPACT DES TRAVAUX DE L'HIVER 2019

En vue de réduire l'érosion à long terme de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac, des travaux importants ont été réalisés en 2019 à l'embouchure de la rivière Belle Rivière et devant la plage. Les travaux incluaient la construction d'une digue submergée en pierres pour obstruer le chenal d'écoulement longeant le pied de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac, le remblayage du canal obstrué derrière la digue et l'excavation d'un nouveau canal de sortie, plus rectiligne, vis-à-vis l'embouchure de la rivière Belle Rivière. L'intervention avait pour objectif de redresser le chenal de sortie de la rivière afin de l'éloigner du littoral et permettre un rehaussement et un adoucissement de la pente de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac. Ce reprofilage devait permettre d'atténuer l'énergie des vagues plus au large, réduisant ainsi leur capacité d'érosion sur le haut de la plage et diminuant la fréquence des rechargements de plage à long terme.

Les suivis réalisés jusqu'à présent indiquent que l'intervention progresse telle qu'anticipée et notent même une poursuite des accumulations de sable au pied de la plage. Les travaux semblent donc en bonne voie d'atteindre leurs objectifs.

Puisque ces travaux risquaient de modifier la dynamique hydrosédimentaire du secteur, des analyses complémentaires ont été réalisées par Lasalle-NHC (2021) afin d'évaluer dans quelle mesure les taux de sédimentation sur la flèche de sable à l'embouchure de la rivière Belle Rivière pouvaient avoir été affectés (voir section 3.6). Les analyses se sont concentrées sur des conditions de vagues fortes observées à l'été 2021 et susceptibles de générer un transport littoral en direction de l'embouchure de la rivière. Deux modèles numériques ont été analysés, soit un premier correspondant à l'état des lieux en 2018 (avant les travaux) et un second correspondant à l'état des lieux en novembre 2020 (après les travaux). Les volumes d'accumulation observés sur la flèche de sable avec chaque modèle ont ensuite été comparés.

Les modélisations indiquent que les taux de sédimentation demeurent comparables dans les deux cas (voir note technique en annexe). Les travaux de réaménagement de l'embouchure réalisés en 2019 n'auraient donc pas eu d'impact significatif sur le taux de sédimentation observée au niveau de la flèche de sable. Ils n'auraient ni amplifié ni réduit l'ensablement de l'embouchure.

3 CARACTÉRISATION DE L'ENVIRONNEMENT FLUVIAL ET CÔTIER

3.1 NIVEAUX D'EAU

La Figure 3-1 illustre les niveaux d'eau historiques du réservoir du lac Saint-Jean de 1997 à 2021 pour la période de crue établie du 1^{er} mars au 30 mai. Pour l'année 2021, le niveau d'eau a atteint l'élévation 100,0 m le 20 avril (Figure 3-2), soit le plus tôt de la série temporelle disponible et environ 2,5 semaines avant la date moyenne (7 mai). Cette élévation revêt une importance particulière, car c'est à partir de ce niveau que les vagues commencent à atteindre la zone de plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac, activant ainsi le transport sédimentaire littoral pouvant contribuer à l'évolution de la flèche de sable à l'embouchure de la rivière Belle Rivière. Deux autres années (en 2006 et 2008) avaient vu le niveau d'eau atteindre l'élévation 100,0 m au mois d'avril, alors que pour toutes les autres années, le niveau d'eau a atteint l'élévation 100,0 m au mois de mai. Le niveau d'eau en 2021 correspond donc au niveau maximum pour une partie importante de la période de crue, témoignant du caractère exceptionnel de la crue printanière dans le lac Saint-Jean.

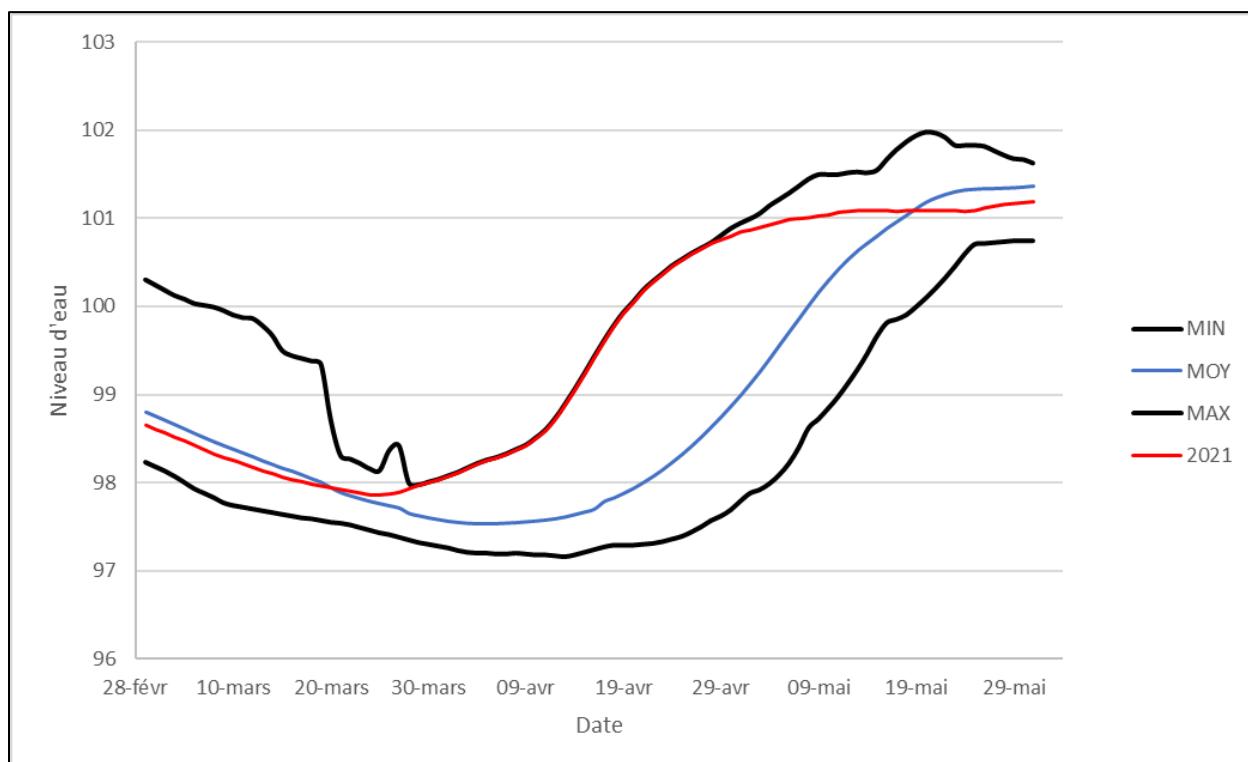


Figure 3-1 Niveau d'eau historique du lac Saint-Jean entre 1997 à 2021 pour la période de crue (1er mars au 30 mai).

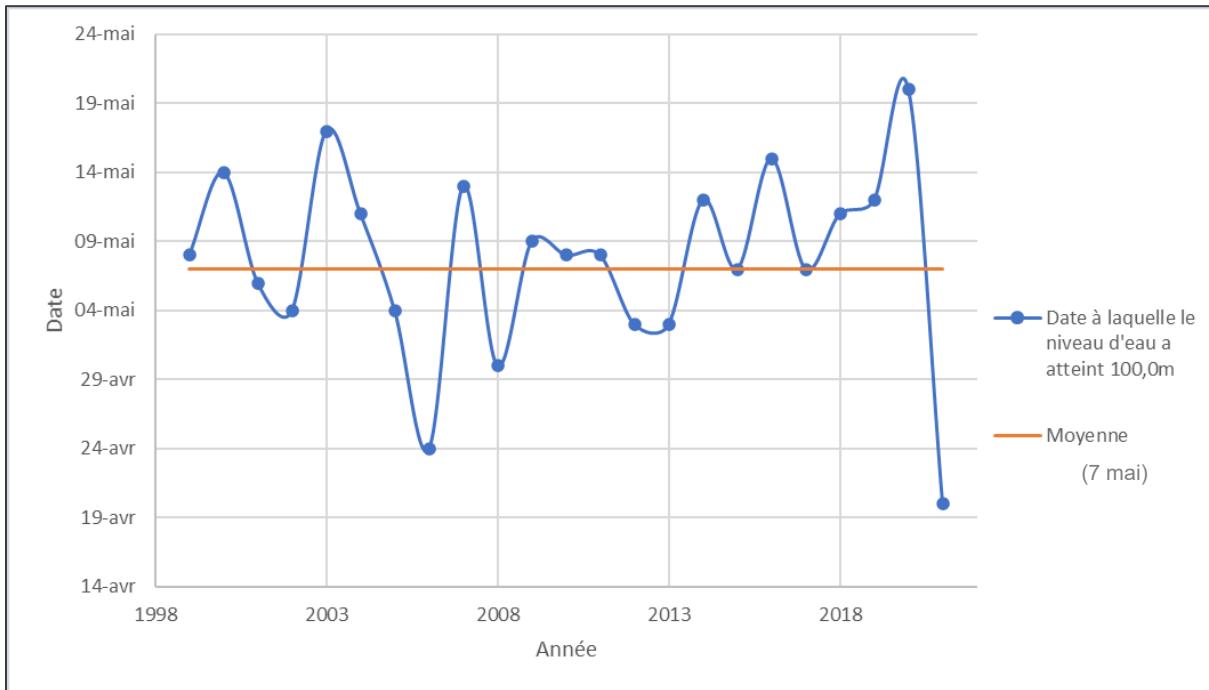


Figure 3-2 Date à laquelle le niveau du lac Saint-Jean a atteint l'élévation 100,0 m.

3.2 HYDROLOGIE DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE

À son embouchure, le bassin versant de la rivière Belle Rivière draine une superficie de 496 km². Les débits de la rivière Belle Rivière sont mesurés depuis l'automne 1996 à la station hydrométrique n° 06137 gérée par le ministère de l'Environnement et la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). À la station, le bassin versant de la rivière Belle Rivière draine une superficie de 316 km². Un facteur de majoration, déterminé à partir du ratio de la superficie des bassins versants, a été appliqué afin de transférer les valeurs de débit de la station à l'embouchure de la rivière.

La Figure 3-3 illustre l'hydrogramme à l'embouchure entre 1997 et 2021 pour la période de crue, soit du 1^{er} mars au 30 mai. On constate que la pointe de la crue survient généralement entre la troisième semaine du mois d'avril et la première du mois de mai. Pour l'année 2021, elle est toutefois survenue plus tôt, soit dans la première semaine du mois d'avril. Le débit journalier maximal à l'exutoire de la rivière Belle Rivière a aussi été extrait pour la période de crue considérée (Figure 3-4) de 1999 à 2021. Le débit pour différentes récurrences a aussi été établi. Le débit maximum journalier en 2021 a été de 27 m³/s, soit 30% plus faible que les minimums précédents d'environ 39 m³/s atteint en 1999, 2003 et 2015, et 60% plus faible qu'un débit maximum de récurrence 2 ans (68 m³/s). La probabilité que le débit maximum soit inférieur à 27 m³/s est d'environ 1 fois en 50 ans, alors que la probabilité que le débit maximum n'excède pas 39 m³/s est d'une fois en 15 ans. Ce faible débit a donc eu un impact direct sur la réduction de l'érosion du chenal et a provoqué un plus faible nettoyage et une capacité d'emmagasinement réduite. Finalement, le débit maximum de la crue de 2021 (27 m³/s) a été atteint alors que le niveau du lac Saint-Jean était de 98,5 m, soit 0,3 m plus haut que le maximum précédent et environ 0,8 m plus haut que la moyenne). Un niveau d'eau plus élevé dans le lac Saint-Jean peut contribuer à une réduction des vitesses dans le chenal.

d'écoulement de la rivière Belle Rivière, ce qui constitue un autre facteur réduisant la capacité du cours d'eau à nettoyer son embouchure.

Une crue printanière particulièrement faible a été observée sur plusieurs cours d'eau de la région. Une tendance similaire a notamment été observée sur la rivière Métabetchouane (Figure 3-5).

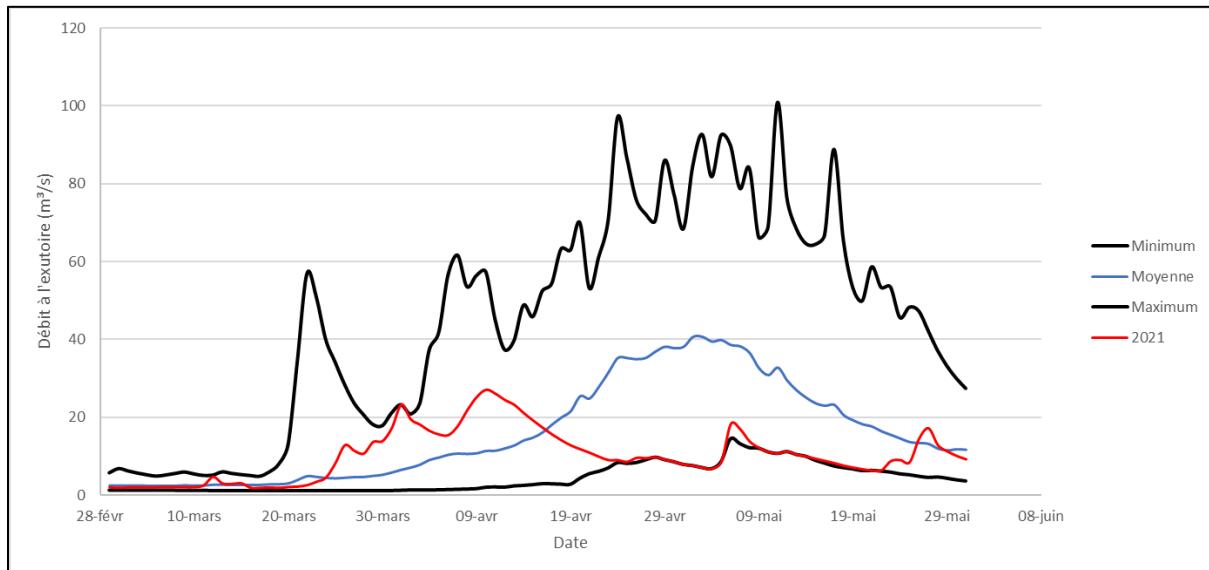


Figure 3-3 Débit moyen journalier historique transféré à l'embouchure de la rivière Belle Rivière de 2000 à 2021 pour la période de crue printanière (1^{er} mars au 30 mai).

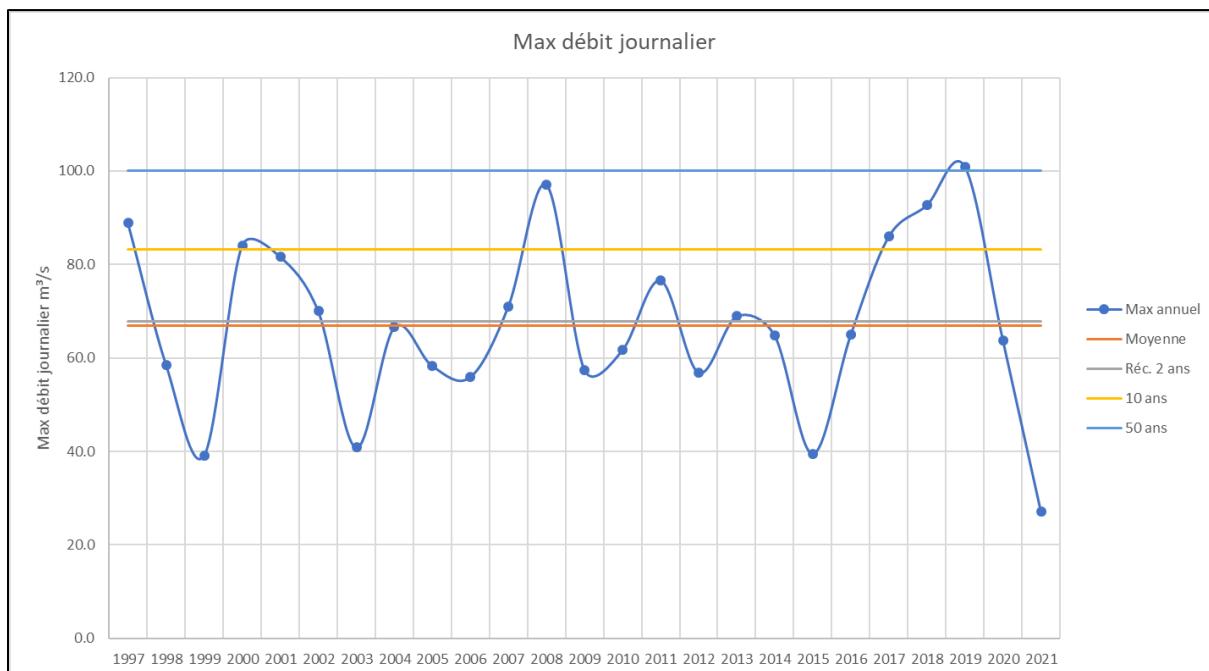


Figure 3-4 Débit maximal annuel de crue à l'embouchure de la rivière Belle Rivière pour la période de mars à mai, inclusivement.

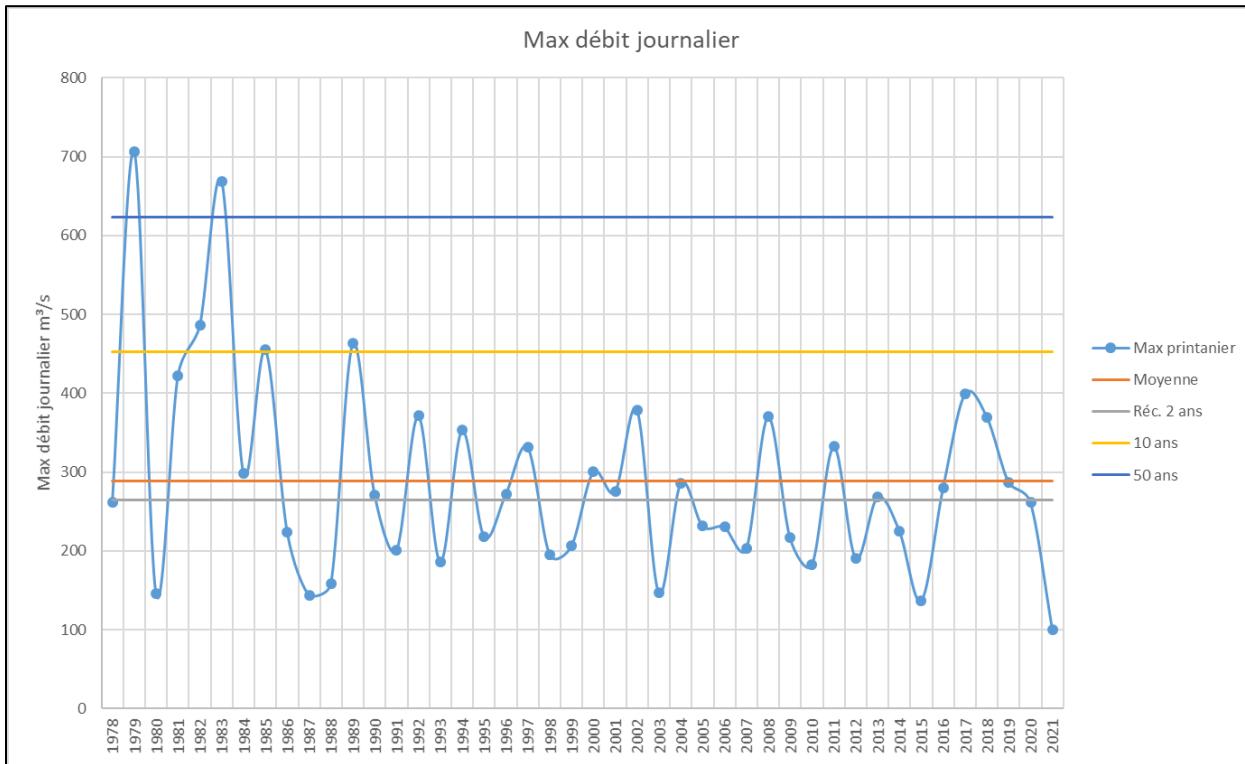


Figure 3-5 Débit maximal annuel de crue sur la rivière Métabetchouane pour la période de mars à mai, inclusivement.

Un autre paramètre important pour la caractérisation de la crue 2021 est le volume de crue, soit le volume d'eau total transitant par l'embouchure de la rivière Belle Rivière pour la période de crue. La Figure 3-6 illustre le volume de crue, exprimé en million de mètres cubes (Mm^3), à l'embouchure de la rivière Belle Rivière pour la période de 1997 à 2021. En 2021, le volume de crue a été de 82 Mm^3 , ce qui est comparable à quelques minimums précédents (1999, 2003, 2007 et 2015), mais demeure 34% plus faible que la moyenne (référence 2 ans). La probabilité que le volume de crue n'excède pas 82 Mm^3 est d'environ une fois en 15 ans.

Le volume de crue passé dans l'embouchure de la rivière Belle Rivière avant que le niveau du lac Saint-Jean atteigne le niveau 100,0 m est de 41 Mm^3 , représentant le minimum pour la période 1997-2021. Ce volume correspond à environ 50% de la crue printanière, alors qu'en moyenne, 65% du volume d'eau transite avant que le niveau d'eau atteigne 100,0 m. Une quantité d'eau plus faible que la moyenne est donc passée dans l'embouchure pendant la période où le niveau d'eau était « bas ». La période pendant laquelle les vitesses d'écoulement auraient pu être « plus élevées », permettant un meilleur nettoyage du chenal, a donc été plus courte qu'à la normale.

Somme toute, la crue 2021 a été caractérisée par des conditions les plus faibles observées depuis 1997, en termes de débit maximum journalier et de volume de crue, mais demeurent malgré tout proche de celles observées lors d'années antérieures, notamment en 1999.

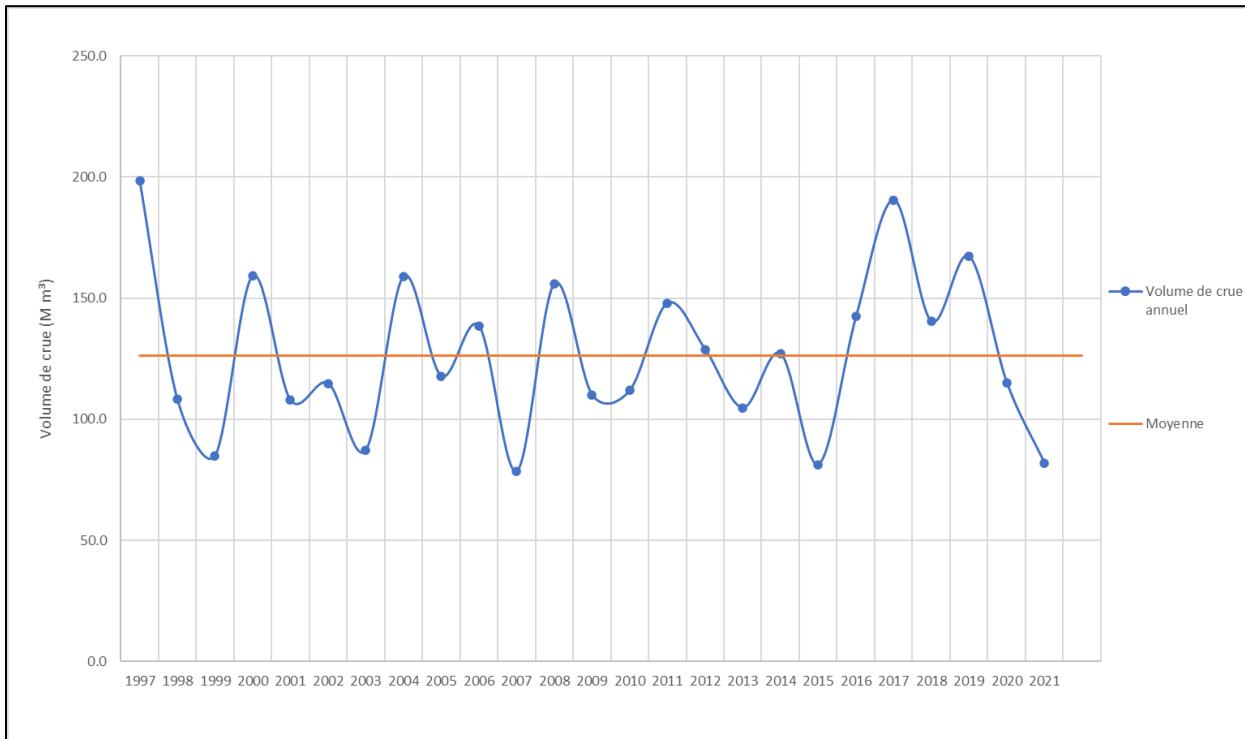


Figure 3-6 Volume de crue à l'embouchure de la rivière Belle Rivière pour la période de mars à mai, inclusivement.

3.3 CLIMAT DES VENTS

Les données de vents des stations d'Environnement Canada de Mistook (n°7065012) et de Roberval (n°7066686) ont été considérées pour la présente étude. Le Tableau 3-1 résume les caractéristiques des deux stations météorologiques et la Figure 3-7 présente la localisation de ces dernières par rapport au site d'étude.

Tableau 3-1 Caractéristiques des stations météorologiques retenues pour l'étude.

NOM DE LA STATION (N° DE LA STATION)	PÉRIODE D'ENREGISTREMENT	DISTANCE DU SITE À L'ÉTUDE (KM)	ÉLÉVATION (M)
Mistook (n°7065012)	1994-2021	17	112,50
Roberval (n°7066686)	1958-2021	35	178,60

Source : http://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html.



Figure 3-7 Localisation des stations météorologiques d'Environnement Canada situées à Roberval (n° 7066686) et Mistook (n° 7065012).

Après avoir analysé les données des deux stations à proximité du site à l'étude, la station de Mistook semble plus représentative des vents locaux que celle de Roberval. Les données de la station de Mistook ont donc été retenues pour l'analyse du climat des vents au large de l'embouchure de la rivière Belle Rivière.

Les vitesses de vent comportent plusieurs pointes entre 50 et 70 km/h et ont dépassé 70 km/h à quelques reprises entre 1995 et 2021. Il peut être observé que les données de vent de l'année 2014 sont beaucoup plus élevées que pour le reste de la série temporelle. Ceci pourrait être dû à un problème d'instrumentation. Pour cette raison, les données de l'année 2014 ont été supprimées de la série temporelle. La rose des vents résultante est présentée à la Figure 3-9.

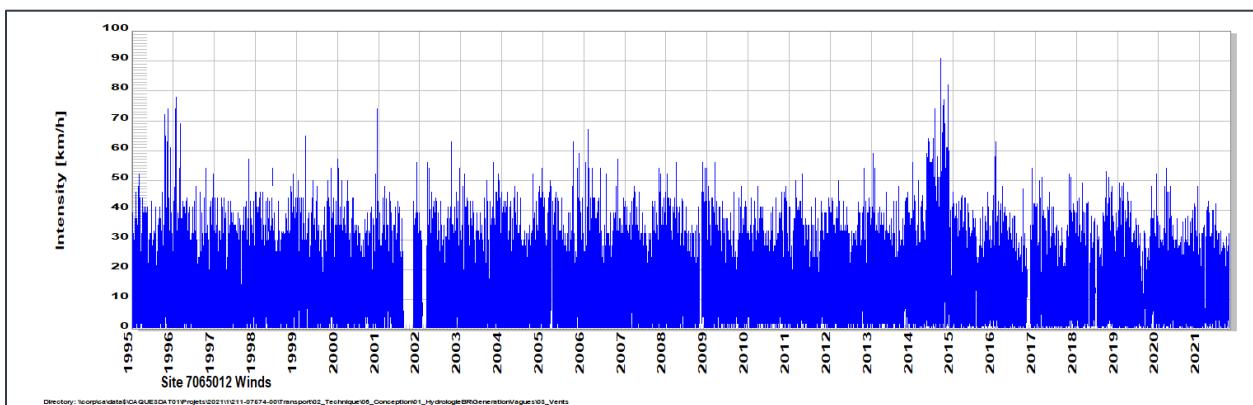


Figure 3-8 Série temporelle de la vitesse du vent enregistrée à la station de Mistook.

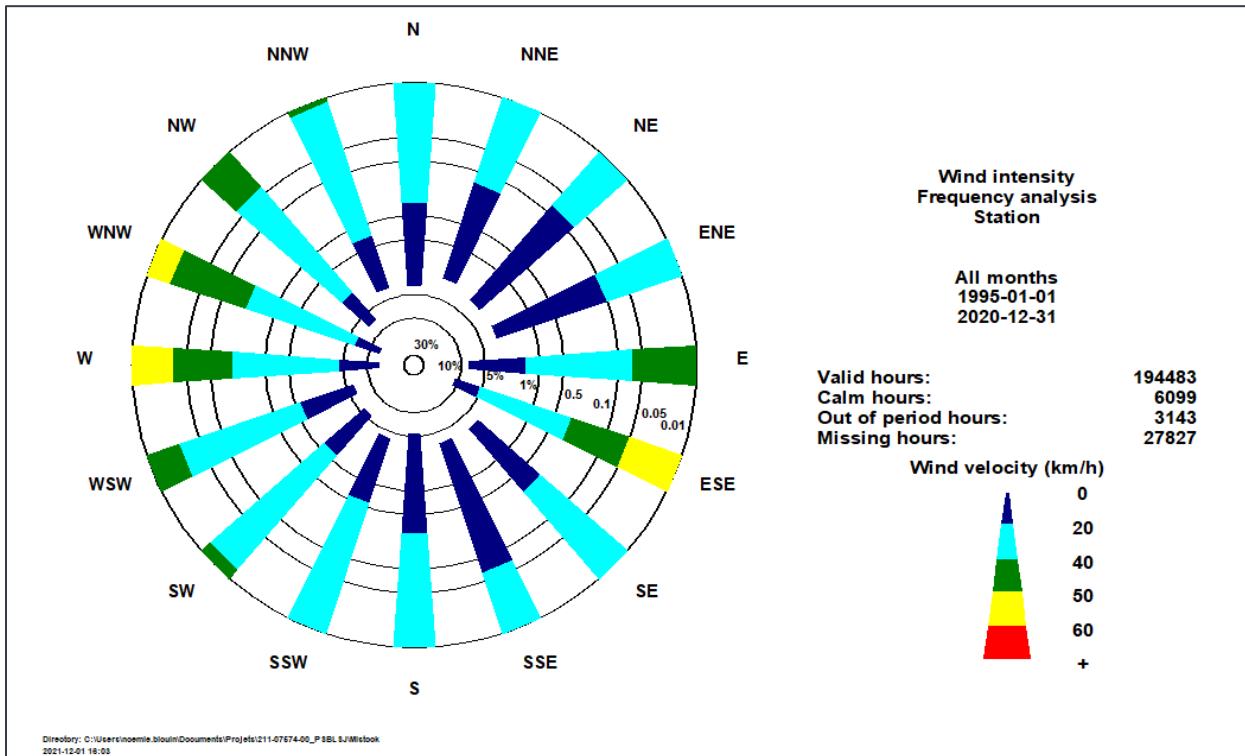


Figure 3-9 Rose des vents à la station de Mistook (période 1995 à 2021).

3.4 CLIMAT DE VAGUES AU LARGE DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE

En l'absence de mesures de vagues historiques à proximité de l'embouchure et pour obtenir un climat des vagues sur une longue période, un modèle paramétrique de génération de vagues doit être utilisé. Ce type de modèle numérique permet de générer des vagues en eau profonde au pas de temps horaire. Il utilise comme intrant les données de vent au pas de temps horaire qui sont mesurées à une station anémométrique située à proximité et à une distance effective sur le plan d'eau, pour laquelle le vent contribue à la formation de la vague. La mise en œuvre du modèle s'effectue selon les étapes suivantes :

- déterminer un point focal en eau profonde pour lequel les vagues au pas de temps horaire seront calculées;
- calculer les radiales entre ce point focal et tout obstacle de nature terrestre (rive, île) limitant la surface du plan d'eau, et ce, à tous les degrés (360 valeurs en tout);
- calculer la valeur du *fetch* effectif à tous les degrés selon la méthode décrite dans Dupuis (1996). Aucun choix n'est possible quant à la méthode d'évaluation du *fetch*, car les équations utilisées par le modèle de génération ont été établies en considérant l'approche décrite dans les références citées;
- retenir une série temporelle de vents (intensité et provenance au pas de temps horaire) permettant d'obtenir l'intensité du vent sur l'eau en minimisant toutes modifications des mesures;

- générer, à l'aide du modèle paramétrique, la hauteur de vague significative, la direction et la période moyenne à chaque heure. La hauteur de vague significative (H_s) est définie comme étant la hauteur moyenne du tiers supérieur d'un train de vagues (p. ex. moyenne de la hauteur des 100 plus grandes vagues parmi un train de 300 vagues).

Pour la présente étude, le point focal est localisé au point de coordonnées [293 100, 5 374 450] dans le système de coordonnées UTM fuseau 19. La localisation du point focal a été sélectionnée dans le but de maximiser la longueur des *fetchs*. Les radiales (traits minces de couleur bleue) et le *fetch* effectif (trait rouge gras) sont illustrés à la Figure 3-10. Les longueurs maximales du *fetch* effectif sont d'environ 20 km en direction nord-ouest et en direction ouest. Comme mentionné à la section précédente, les conditions locales du vent à une heure donnée (intensité et provenance) sont celles de la station Mistook.

Le module de génération des vagues du logiciel AquaWave (Dupuis, 1996) est utilisé pour générer le climat des vagues pour la période 1995-2021, laquelle correspond logiquement à la durée de la série temporelle du signal de vent.

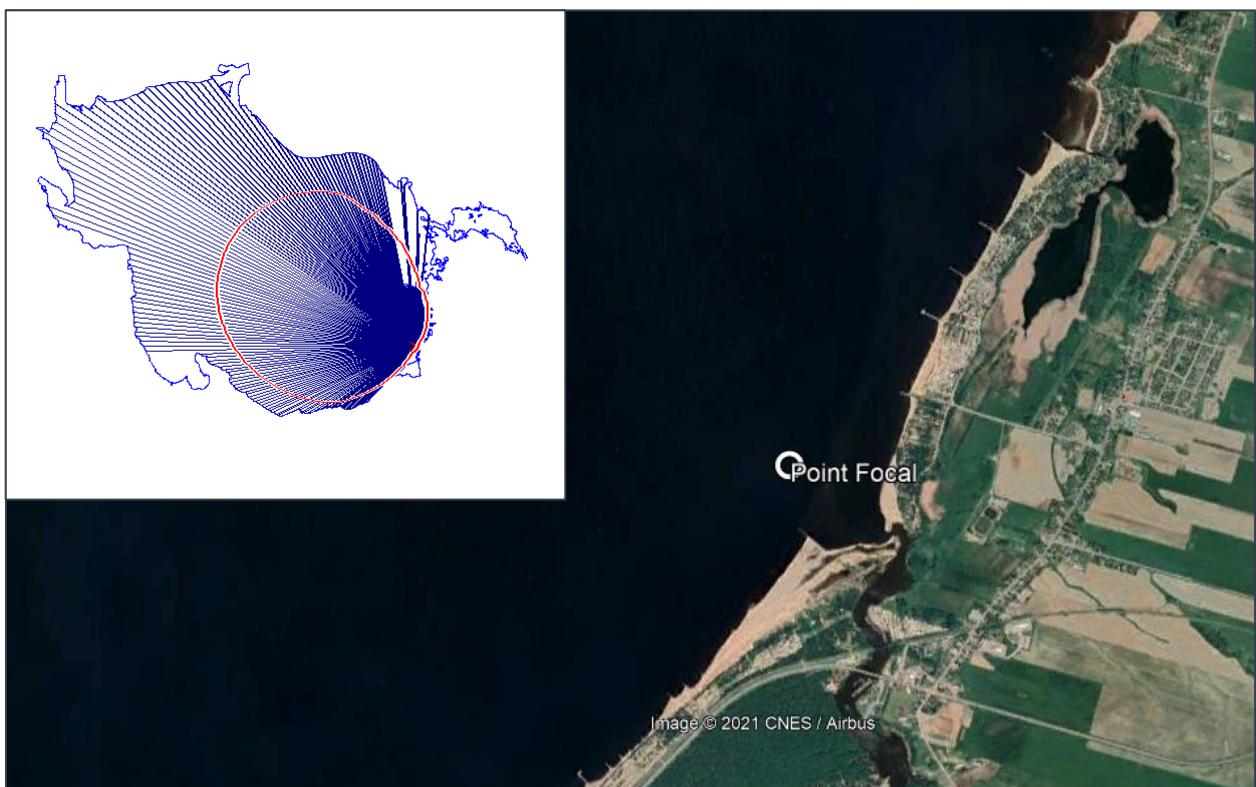


Figure 3-10 Localisation du point focal, des radiales (bleues) et des fetchs effectifs (rouges) pour la génération au large du site à l'étude.

La hauteur des vagues au large générées, entre 1995 et 2021 pour les mois d'avril à août, est généralement inférieure à 1 m, mais comporte plusieurs événements dont la hauteur est comprise entre 1 et 2 m et aurait atteint une valeur maximale de plus de 2,5 m en 2008 (Figure 3-11). Les vagues au-dessus de 1 m de hauteur proviennent toutes des secteurs ouest-sud-ouest (OSO) au nord-ouest (NO). Les vagues les plus fréquentes proviennent de l'ouest (O) (Figure 3-12).

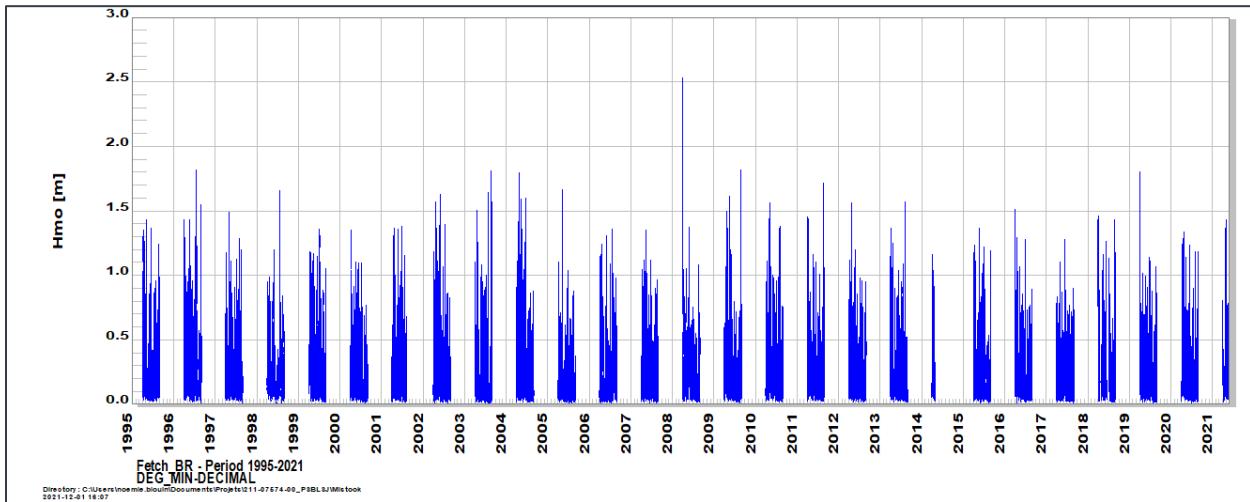


Figure 3-11 Série temporelle de hauteurs de vagues significatives générées au large du site à l'étude pour les mois d'avril à août de 1995 à 2021.

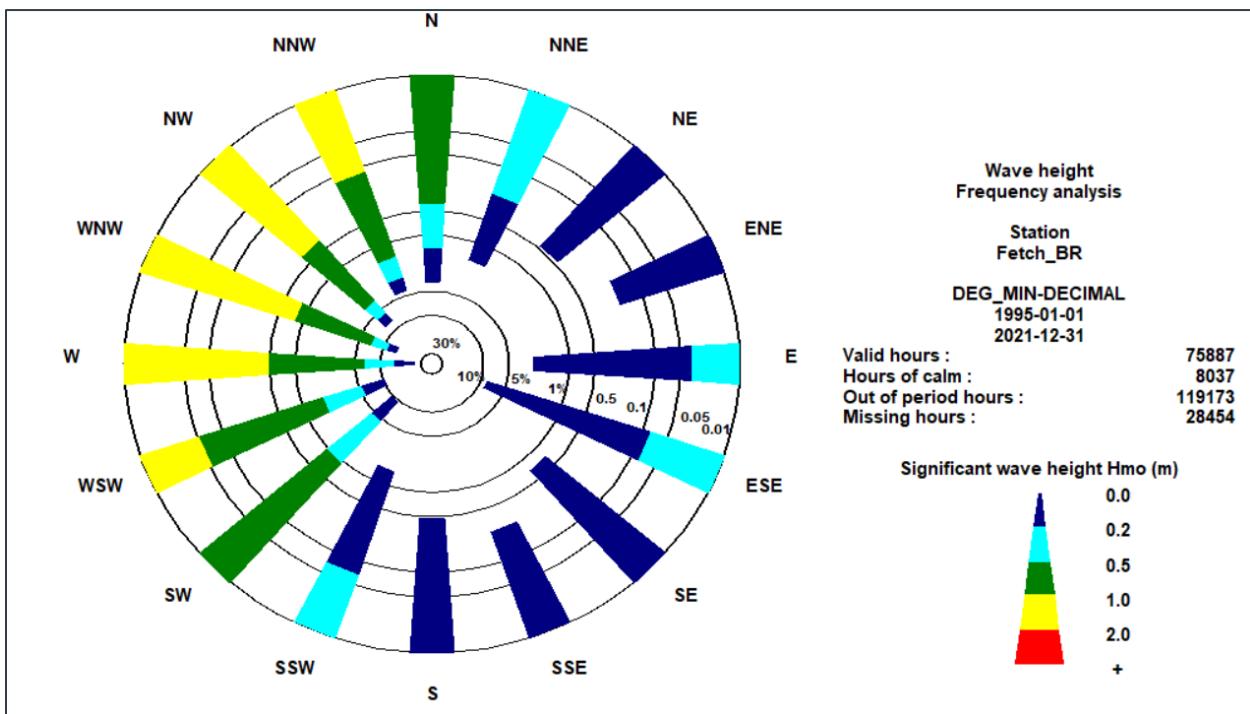


Figure 3-12 Rose des vagues résultantes générées au large du site à l'étude pour les mois d'avril à août de 1995 à 2021.

3.5 ESTIMATION DU TRANSPORT INDUIT PAR LES VAGUES

Le transport de sédiments au droit de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac est principalement induit par l'effet des vagues à l'approche de la côte. Selon l'orientation de la rive au site à l'étude, une vague en provenance des secteurs sud-ouest à ouest (directions de 280° et moins) induit un transport vers le nord-est (vers Saint-Gédéon), alors qu'une vague en provenance des secteurs nord-ouest à nord (directions de 300° et plus) induit un transport vers le sud-ouest (vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière), tel qu'illustré à la Figure 3-13.

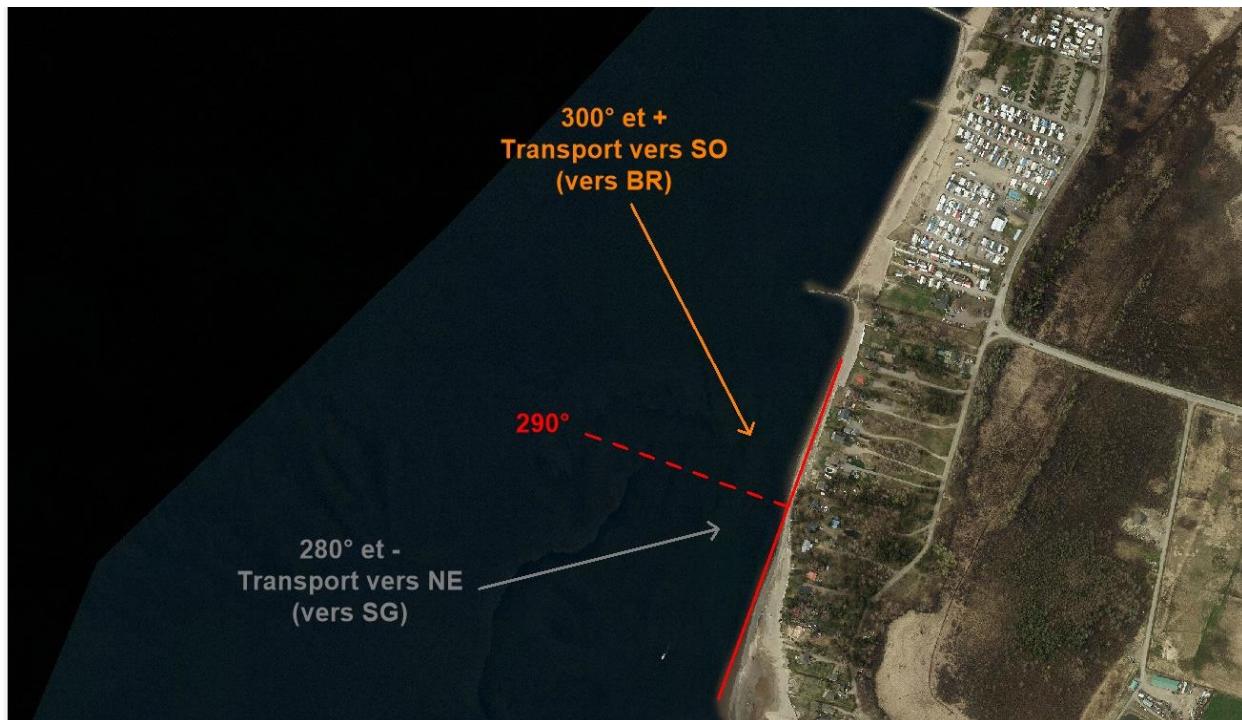


Figure 3-13 Définition de la direction du transport induit en fonction de l'orientation des vagues.

Pour cadrer les conditions hydrosédimentaires observées le long de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac en 2021 par rapport aux conditions historiques, le nombre d'heures où les vagues auraient induit du transport dans chaque direction a été comptabilisé. Pour les besoins de l'exercice, par contre, seules les heures où les vagues affichaient une hauteur supérieure à 0,5 m ont été considérées, car ce sont pendant ces périodes où le transport sédimentaire est réputé être le plus important. Par ailleurs, les analyses se sont limitées aux moments où le niveau du lac Saint-Jean était supérieur à 100,0 m, puisque c'est à partir de ce niveau que les vagues peuvent atteindre la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac et induire du transport littoral. Les données ont ensuite été tronquées à la fin du mois d'août pour clôturer l'analyse.

La Figure 3-14 présente les résultats de l'analyse. La courbe orange illustre les résultats annuels pour les vagues induisant un transport vers le nord-est (vers Saint-Gédéon), alors que la courbe bleue illustre les résultats annuels pour les vagues induisant un transport vers le sud-ouest (vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière).

En 2021, le transport vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière totalisait 248 heures, soit 10% de plus que le maximum précédent (228 heures en 2002) et 100% de plus que la moyenne pour la période 1999-2021 (123 heures). Le transport vers Saint-Gédéon était quant à lui 72% plus élevé que la moyenne pour la période 1999-2021 (103 heures). Il est considéré qu'une partie de ces augmentations est attribuable au fait que le niveau d'eau de 100,0 m dans le lac Saint-Jean a été atteint beaucoup plus tôt qu'à l'habitude (Figure 3-2). Les heures de transport comptabilisées en 2021 demeurent malgré tout comparables à celles des années 1999 et 2002.

Il demeure important de rappeler que les conditions de vagues considérées dans le cadre de cet exercice sont celles au large du site à l'étude. Elles excluent les effets de transformation (réfraction, rehaussement) normalement subis lors de la propagation vers la berge, qui peuvent modifier leur hauteur et leur orientation. L'analyse fournit malgré tout un portrait représentatif de la tendance interannuelle observée.

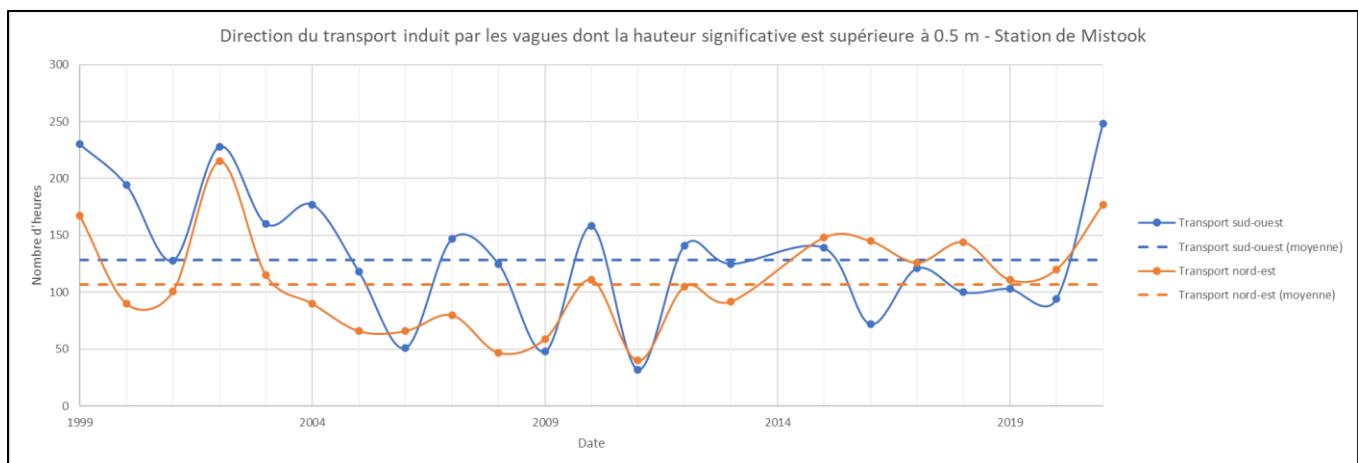


Figure 3-14 Nombre d'heures pour lequel la hauteur significative au large du site à l'étude était supérieure à 0,5 m, induisant un transport de sédiments.

3.6 ANALYSES HYDROSÉDIMENTAIRES EFFECTUÉES PAR LASALLE-NHC

Les analyses réalisées par Lasalle-NHC (2021) corroborent les tendances observées au niveau de la dynamique hydrosédimentaire le long de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac. Les modèles numériques mis en œuvre par ce consultant permettent de simuler la propagation des vagues du large vers la côte, ainsi que le transport sédimentaire induit le long du littoral. Les résultats confirment que l'année 2021 se distingue des conditions historiques, autant en termes de transport littoral brut (chaque direction) que de transport littoral net (Figure 3-15 et Figure 3-16). Les taux de transports évalués pour 2021 sont environ deux fois plus importants que la moyenne historique. Par ailleurs, les analyses démontrent que la flèche de sable à l'embouchure de la rivière Belle Rivière constitue un lieu de dépôt pour les sédiments qui dérivent le long de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac (Figure 3-17). Enfin, les modélisations indiquent que les travaux de réaménagement de l'embouchure réalisés en 2019 n'ont pas eu d'impact significatif sur le taux de sédimentation observée au niveau de la flèche de sable (voir note technique en annexe). Ils n'ont ni amplifié ni réduit l'ensablement de l'embouchure.

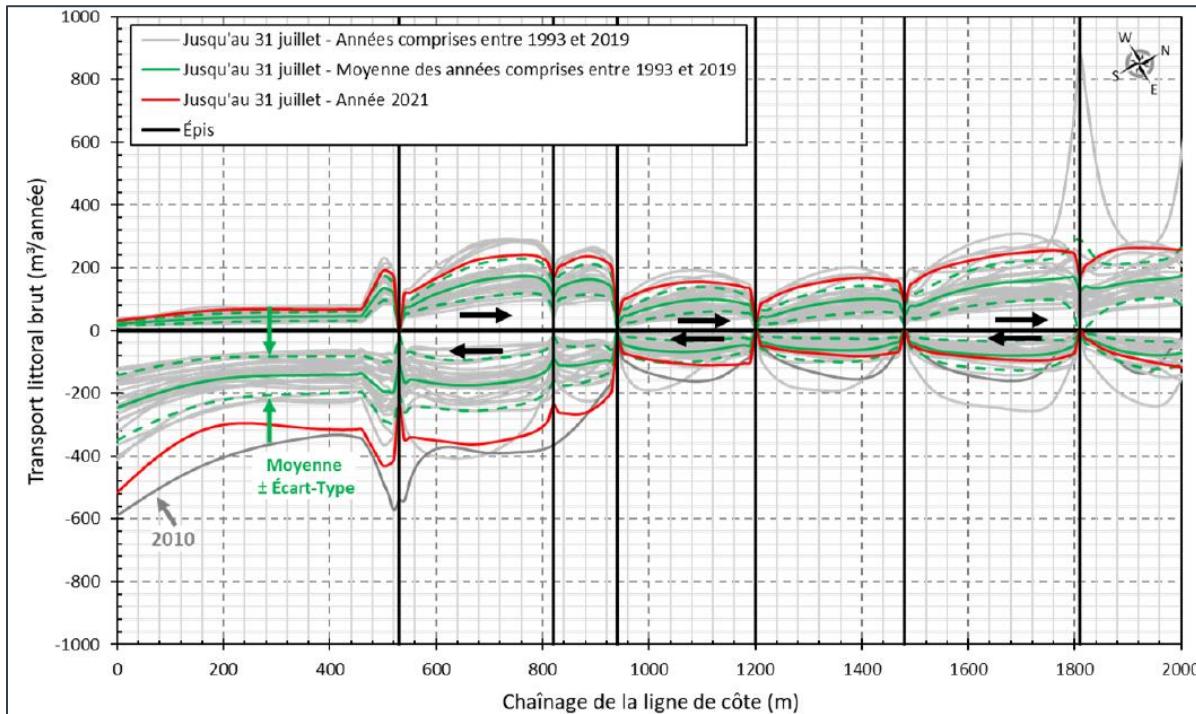


Figure 3-15 Transport littoral brut observé en 2021 par rapport aux conditions historiques, pour la période se terminant le 31 juillet (extrait de Lasalle-NHC, 2021).

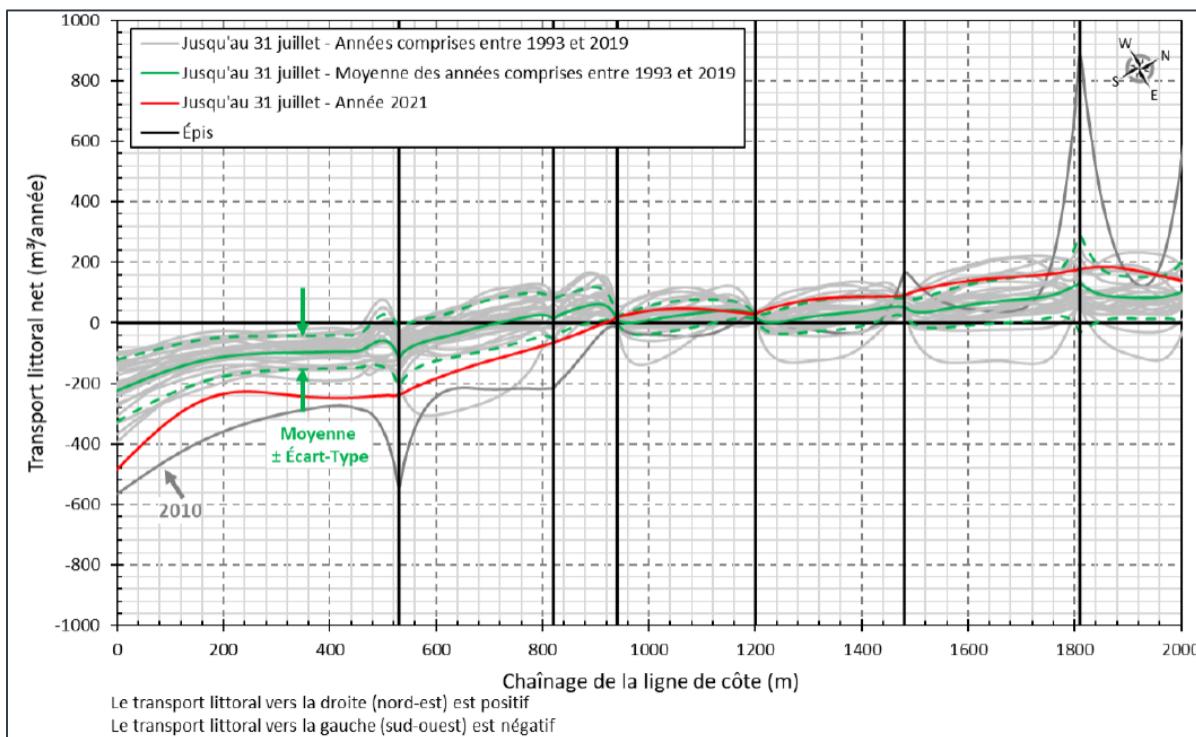


Figure 3-16 Transport littoral net observé en 2021 par rapport aux conditions historiques, pour la période se terminant le 31 juillet (extrait de Lasalle-NHC, 2021).

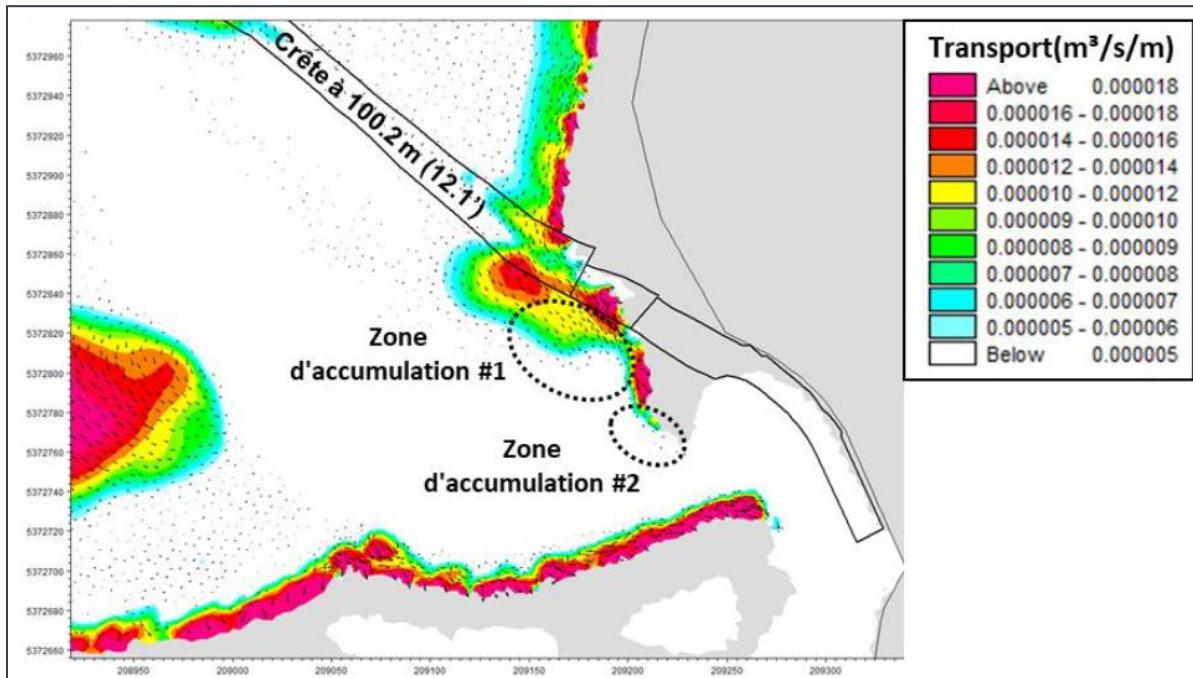


Figure 3-17 Dynamique hydrosédimentaire au niveau de la flèche de sable à l'embouchure de la rivière Belle Rivière (extrait de Lasalle-NHC, 2021).

3.7 MODÉLISATION DE LA DYNAMIQUE HYDROSÉDIMENTAIRE À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE BELLE RIVIÈRE

3.7.1 APPROCHE

Les suivis et les analyses permettent difficilement de distinguer l'influence spécifique de la crue printanière et de la dérive des sédiments en provenance de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac sur l'évolution de la problématique d'ensablement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière. Une des questions qui persiste est de savoir si l'obstruction du chenal aurait été aussi importante si la crue printanière avait été plus « standard », ou si les apports sédimentaires avaient été plus faibles. D'autre part, quelle évolution est-il possible d'anticiper en 2022?

L'approche préconisée pour tenter de répondre à ces questions s'appuie alors sur une modélisation de la dynamique hydrosédimentaire à l'embouchure de la rivière Belle Rivière pour évaluer la capacité du cours d'eau à nettoyer son chenal d'écoulement. Un modèle bidimensionnel à fond mobile a été mis en œuvre afin de simuler l'évolution du lit à l'embouchure de la rivière Belle Rivière sous différents scénarios de crue printanière, dont celle de 2021. Des scénarios de crue standard et extrême ont également été considérés. La capacité de « nettoyage » de la rivière a ensuite été quantifiée en évaluant les volumes de sédiments érodés dans le chenal d'écoulement.

Seuls les processus fluviaux (débits/vitesses dans la rivière et niveau d'eau du lac Saint-Jean) ont été pris en compte dans ces modélisations, car ce sont eux qui conditionnent l'évolution du lit de la rivière lors de la crue printanière.

3.7.2 LOGICIEL UTILISÉ

Le modèle hydrodynamique TELEMAC-2D a été utilisé pour la présente étude. Ce modèle résout, par éléments finis, les équations bidimensionnelles des écoulements à surface libre de Saint-Venant en moyennant les conditions hydrodynamiques sur la verticale. Ce modèle a la particularité d'employer un maillage triangulaire irrégulier et peut prendre en compte différents processus nécessaires à la modélisation du transport de sédiments.

3.7.3 ÉLABORATION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE

Le modèle TELEMAC-2D développé pour le projet couvre un tronçon de 750 m de la rivière Belle Rivière jusqu'à son embouchure et puis continue sur une distance additionnelle de 750 m dans le Lac-Saint-Jean. Le domaine s'étend aussi de l'épi 9 du côté de Metabetchouan-Lac-à-la-Croix et jusqu'à l'épi 2 à Saint-Gédéon-sur-le-Lac. Les relevés bathymétriques récoltés en novembre 2020 ont été considérés pour définir l'état de référence du lit de la rivière au début de la simulation pour la crue 2021, tandis que les relevés bathymétriques de juin 2021 ont été utilisés pour simuler l'évolution du lit de la rivière lors de la crue 2022.

Les Figure 3-18 et Figure 3-19 illustrent l'étendue du domaine de calcul du modèle TELEMAC-2D, ainsi que la bathymétrie du fond interpolée sur le maillage de modélisation pour les modèles numériques de terrain de 2021 et de 2022, respectivement. Le maillage est constitué d'une grille triangulaire non structurée à résolution variable. La résolution maximale du maillage est de 5 m, mais des résolutions aussi petites que 1,15 m ont été employées dans les secteurs nécessitant une meilleure représentation, notamment à proximité de la flèche de sable à l'embouchure de la rivière.

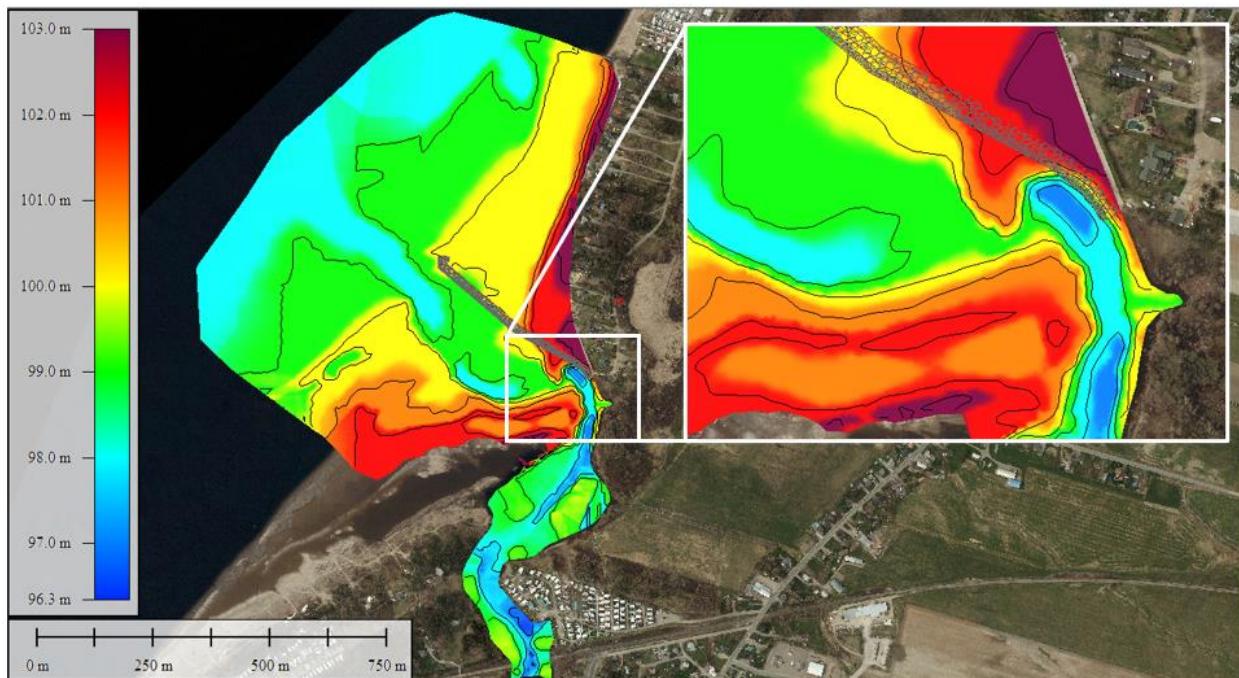


Figure 3-18 Modèle numérique de terrain élaboré à partir des relevés bathymétriques de novembre 2020.

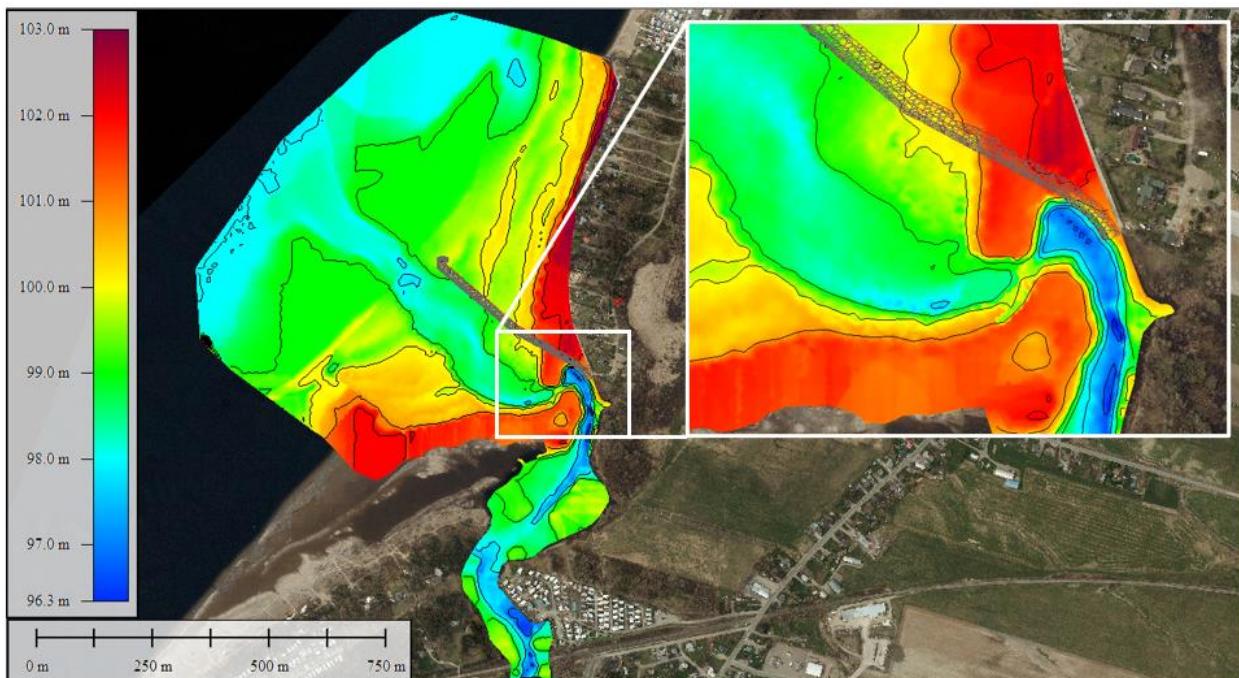


Figure 3-19 Modèle numérique de terrain élaboré à partir des relevés bathymétriques de juin 2021.

3.7.4 PARAMÉTRISATION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE

Le modèle TELEMAC-2D a été employé avec l'équation de Manning pour le frottement sur le fond et le modèle k-E pour le traitement de la turbulence horizontale avec un coefficient de diffusion des vitesses de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. La force de Coriolis et les bancs découvrant ont également été pris en compte dans le modèle. Un pas de temps de calcul de 1,0 seconde a été employé avec une fréquence de 6 minutes pour l'écriture des résultats. De plus, le D_{50} utilisé pour caractériser les sédiments dans le lit de la rivière est de 1 mm. Cette valeur correspond à la granulométrie des sédiments échantillonnés sur la flèche de sable à l'été 2021.

Le modèle hydrodynamique présente deux frontières où les conditions hydrauliques sont imposées. Le modèle est forcé à la frontière amont avec une condition limite de débit, alors qu'à la frontière aval, un niveau d'eau est imposé comme condition limite.

3.7.5 SCÉNARIOS DE MODÉLISATION

Tel que mentionné précédemment, l'objectif de la modélisation hydrosédimentaire était de quantifier l'érosion du chenal d'écoulement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière lors de différents scénarios de crue. Trois scénarios ont été développés pour des crues faible, moyenne (récurrence 2 ans) et extrême (récurrence 50 ans). Les scénarios se sont inspirés des données reconstituées à l'exutoire du cours d'eau, en termes de débit maximum journalier (Figure 3-20) et de volume de crue (Figure 3-21). L'année 2021 a été retenue pour le scénario de crue faible, tandis que l'année 2014 correspondait à une crue moyenne. Le scénario de crue extrême a quant à lui été élaboré en combinant les années 2018 et 2019, créant ainsi un scénario synthétique représentatif du débit maximum journalier et du volume de crue de la récurrence ciblée. La Figure 3-22 illustre les séries temporelles de débits retenues pour chaque scénario de crue et imposées à la frontière amont du modèle.

Les séries temporelles de niveaux d'eau dans le lac Saint-Jean correspondant à chaque année de crue retenue ont quant à elles été considérées pour les conditions limites à la frontière aval du modèle (Figure 3-23).

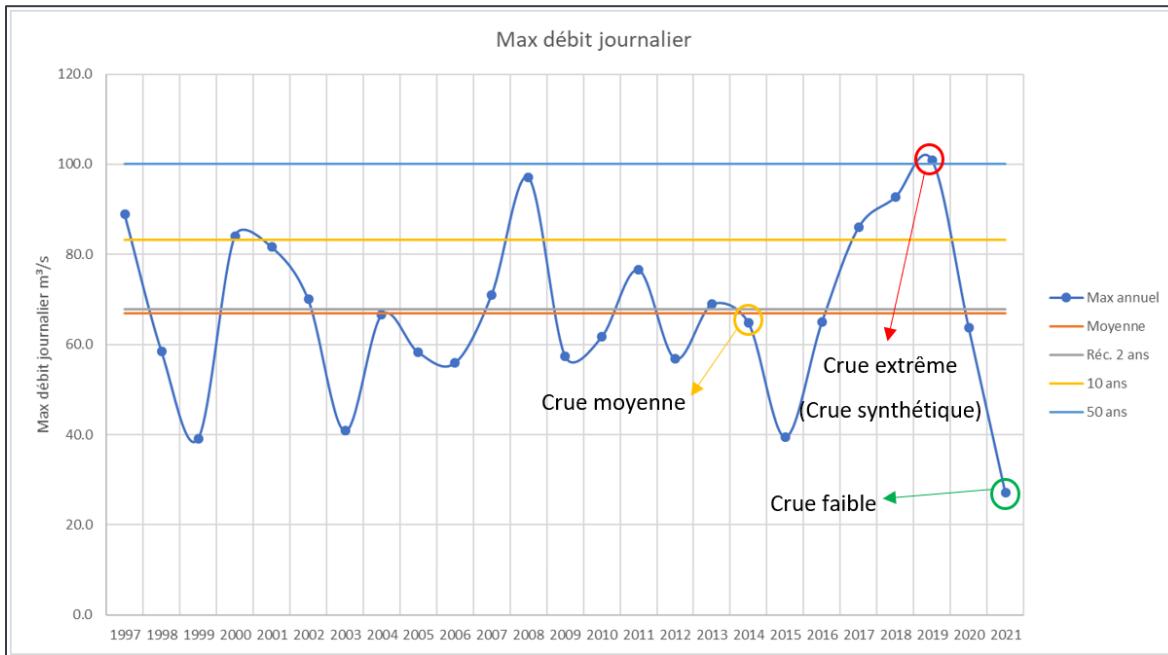


Figure 3-20 Rivière Belle Rivière : Débit maximal annuel de crue (période de mars à mai inclusivement).

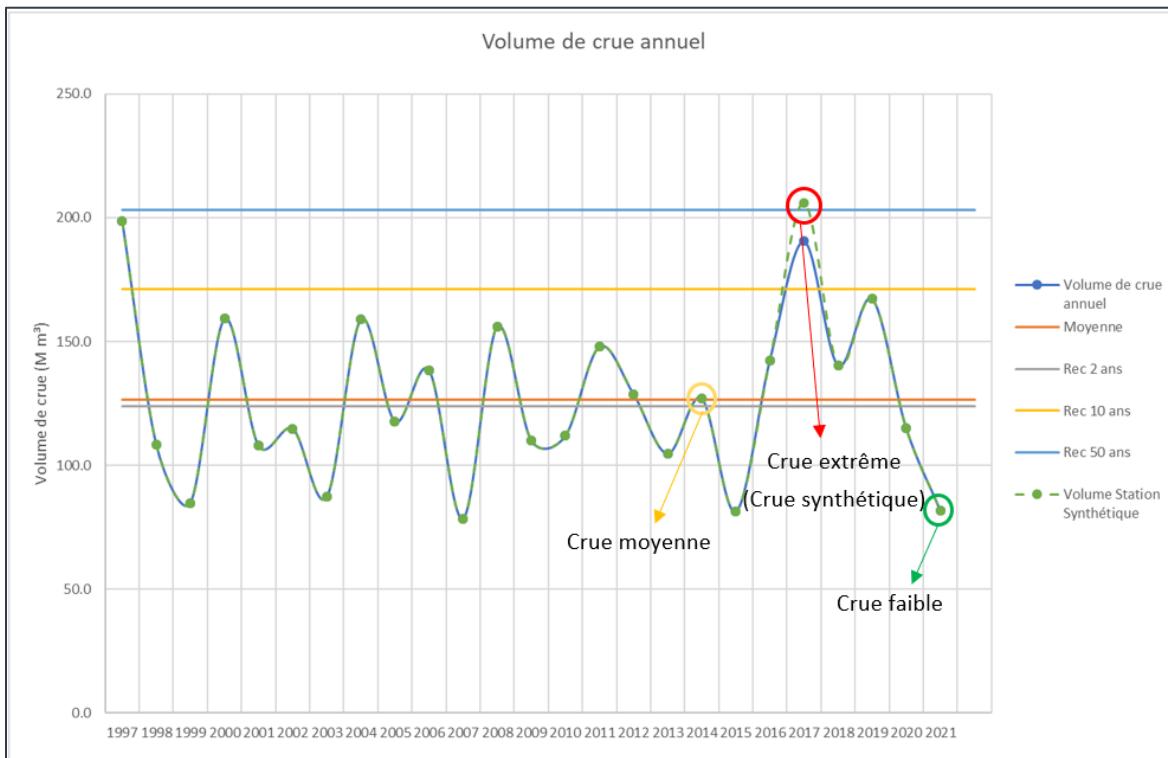


Figure 3-21 Rivière Belle Rivière : Volume de crue annuel (période de mars à mai inclusivement)

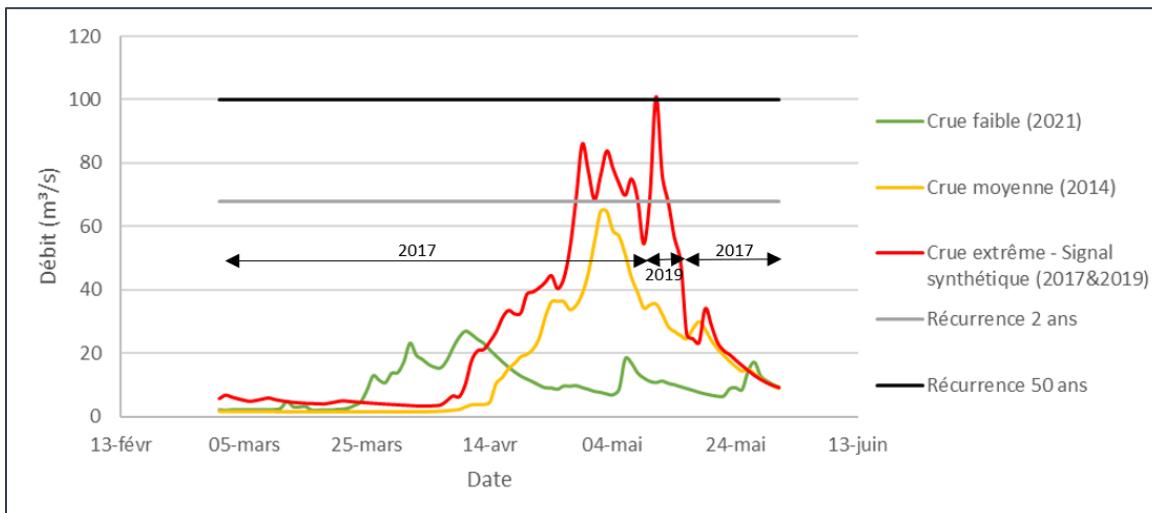


Figure 3-22 Frontière amont : Séries temporelles de débit utilisées pour les différents scénarios de modélisation.

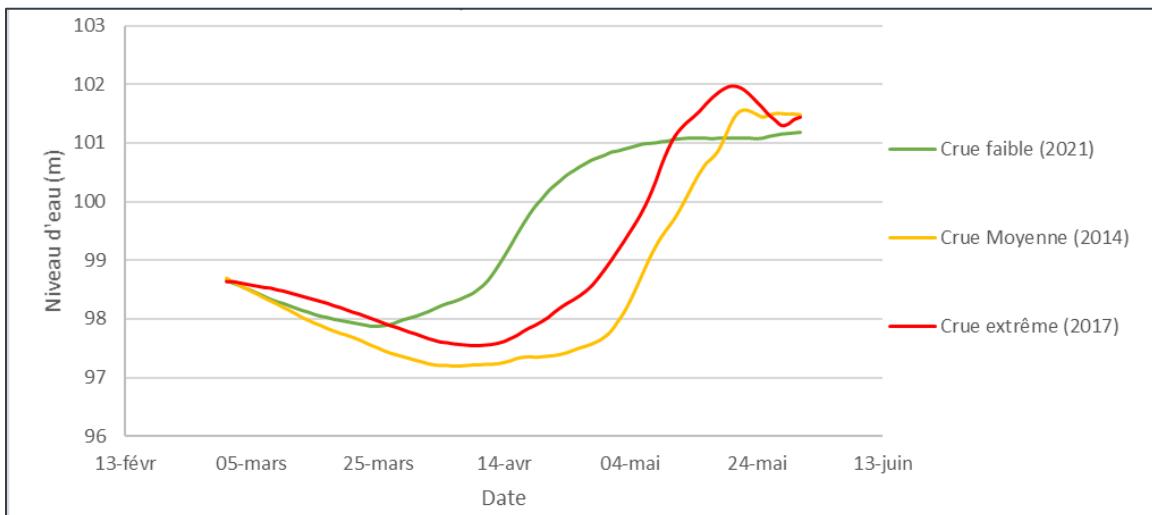


Figure 3-23 Frontière aval : Séries temporelles de niveaux d'eau utilisées pour les différents scénarios de modélisation.

3.7.6 RÉSULTATS DE MODÉLISATION

Les Figures 3-24 à Figure 3-26 illustrent les résultats de modélisation pour les trois scénarios de crues considérés pour l'année 2021, tandis que les Figures 3-27 à Figure 3-29 illustrent ceux anticipés pour l'année 2022. Les zones ayant subi de l'érosion sont représentées par des teintes de rouge, orange et jaune, alors que les zones ayant subi des accumulations sont illustrées dans des teintes de bleu et de vert. Les zones blanches dénotent quant à elles une variation non significative du fond. Des polygones délimitent les secteurs à l'intérieur desquels les volumes d'érosion au niveau de la flèche de sable sont évalués. Les résultats sont consignés au Tableau 3-2.

Tableau 3-2 Volume d'érosion au niveau de la flèche de sable.

SCÉNARIO DE MODÉLISATION	VOLUME D'ÉROSION 2021 (m ³)	VOLUME D'ÉROSION 2022 (m ³)
Crue faible	-2 728	-1 310
Crue moyenne	-4 703	-5 203
Crue extrême	-6 422	-5 556

Les résultats démontrent, sans surprise, que les volumes d'érosion augmentent avec l'intensité des crues. Les résultats obtenus pour les années 2021 et 2022 demeurent sensiblement du même ordre de grandeur. Les différences observées sont attribuées à la complexité des processus hydrodynamiques actifs dans la zone d'étude et aux variations intrinsèques découlant du paramétrage des modèles numériques.

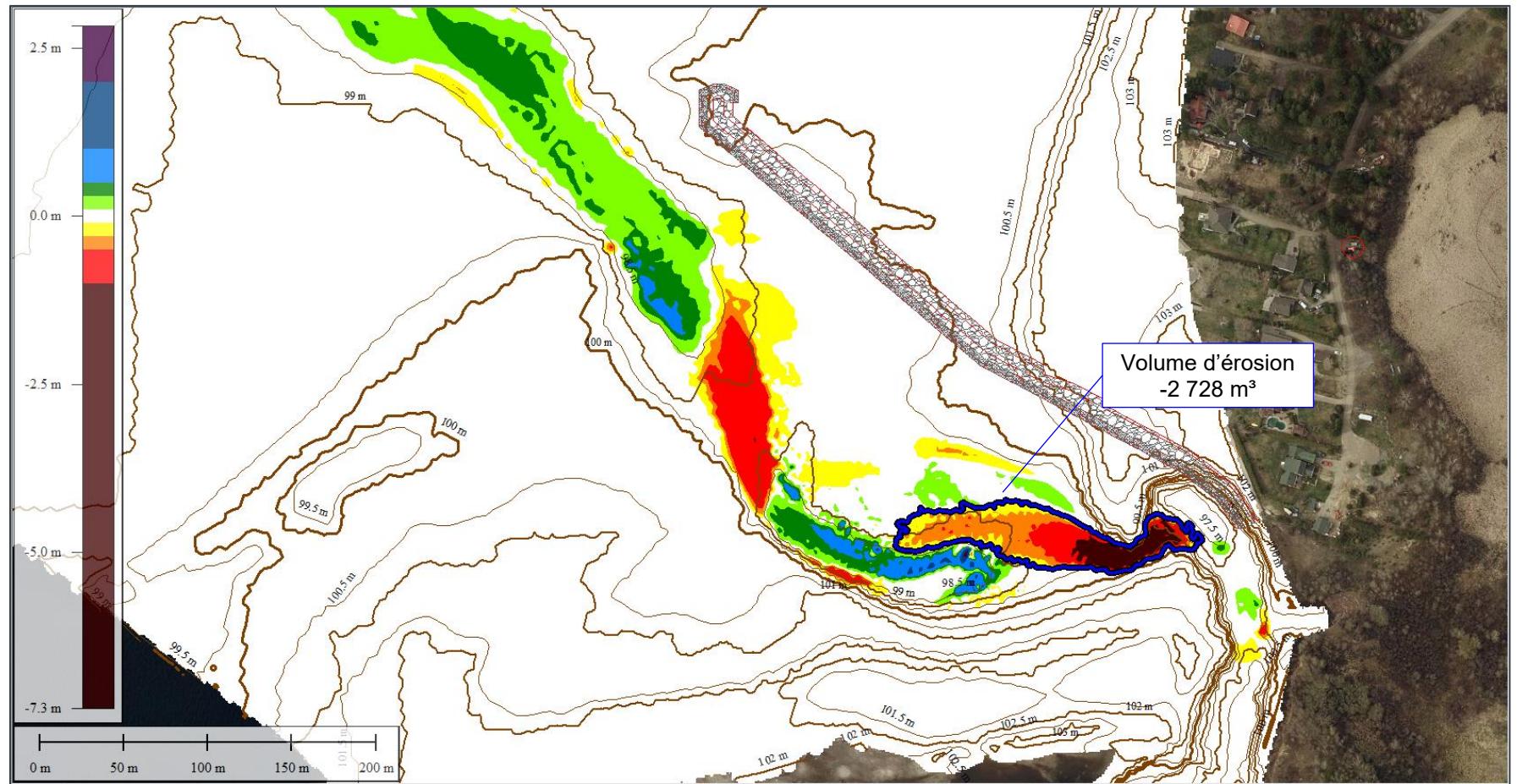


Figure 3-24 Modélisation de l'érosion potentielle lors de la crue printanière 2021 (scénario de crue faible).

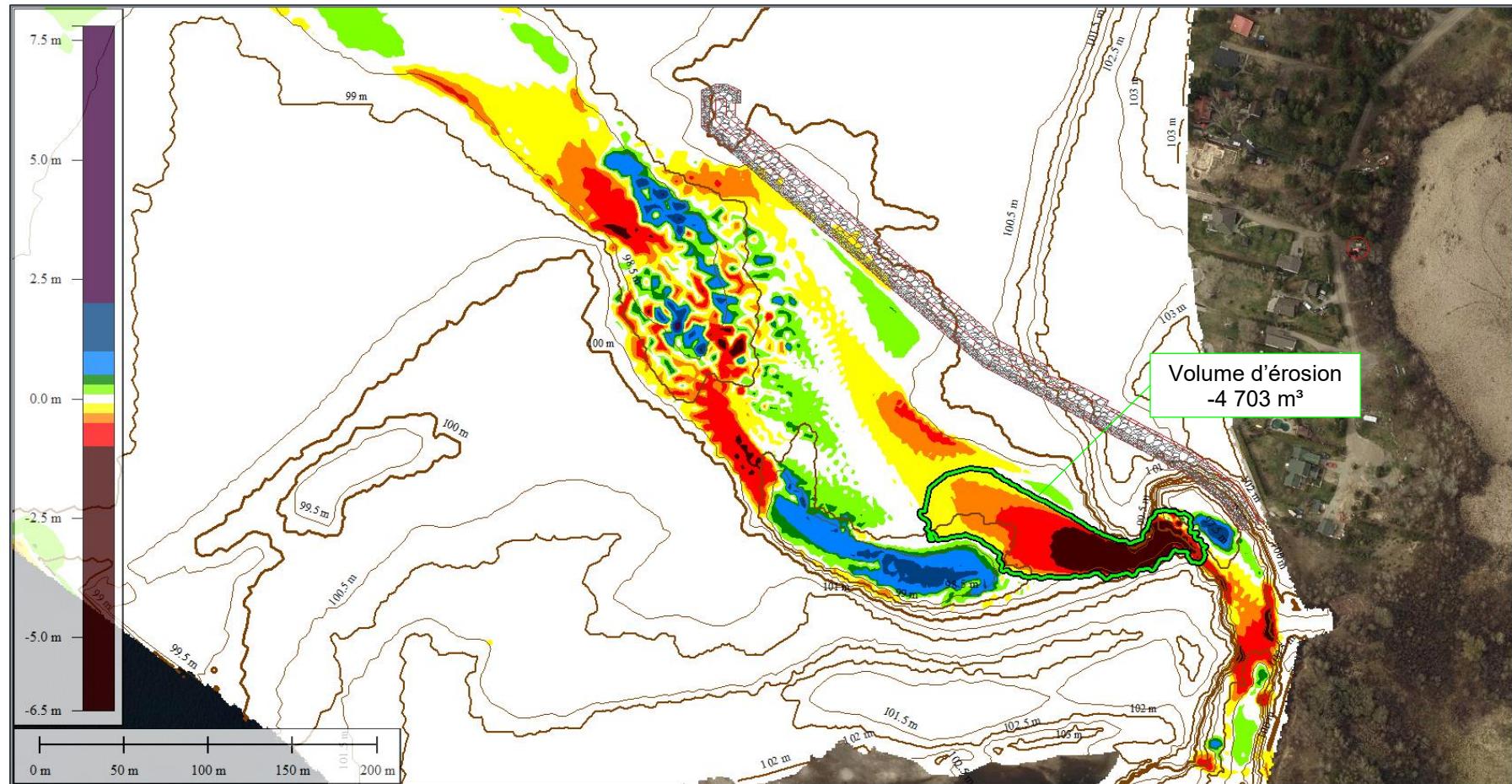


Figure 3-25 Modélisation de l'érosion potentielle lors de la crue printanière 2021 (scénario de crue moyenne).

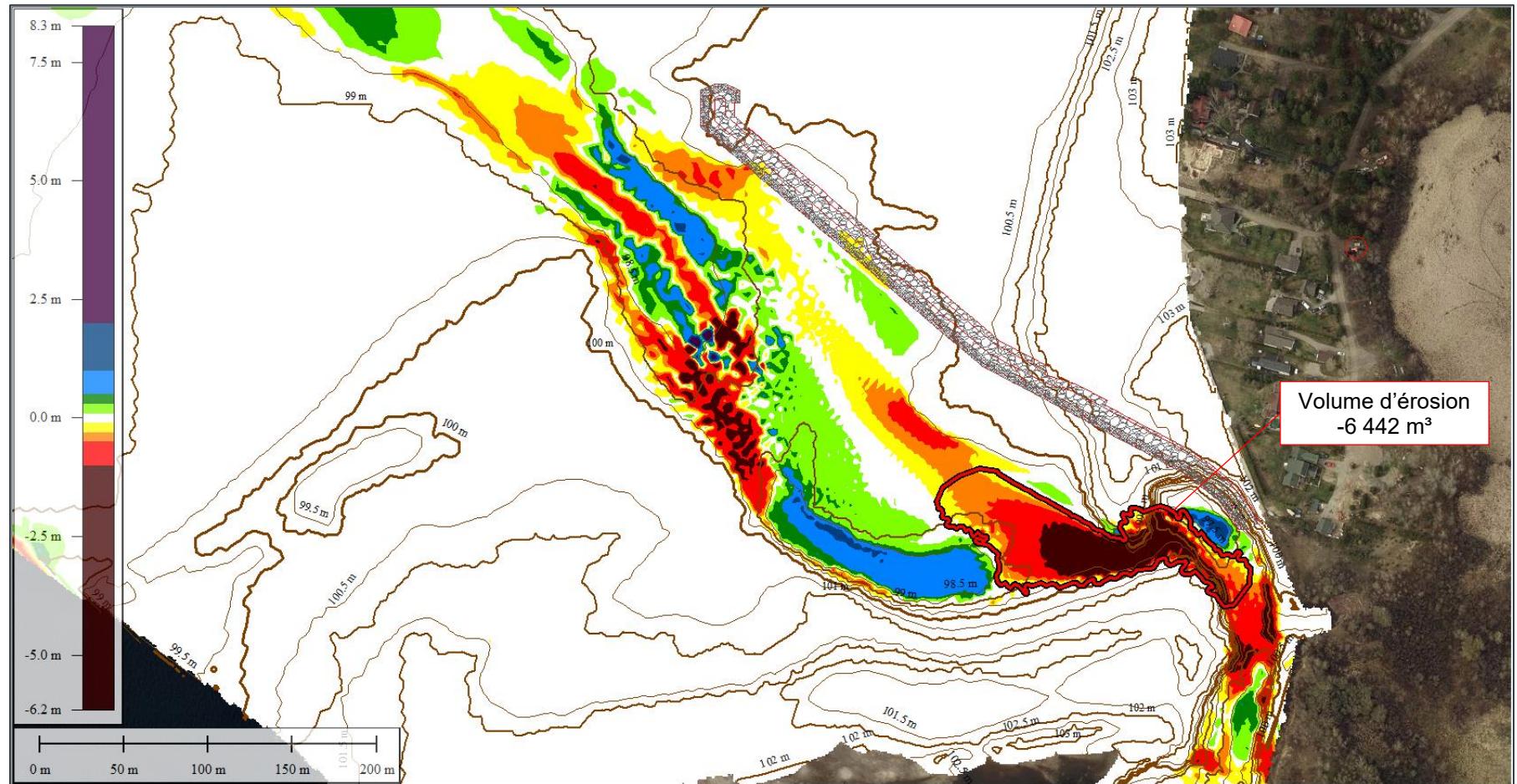


Figure 3-26 Modélisation de l'érosion potentielle lors de la crue printanière 2021 (scénario de crue extrême).

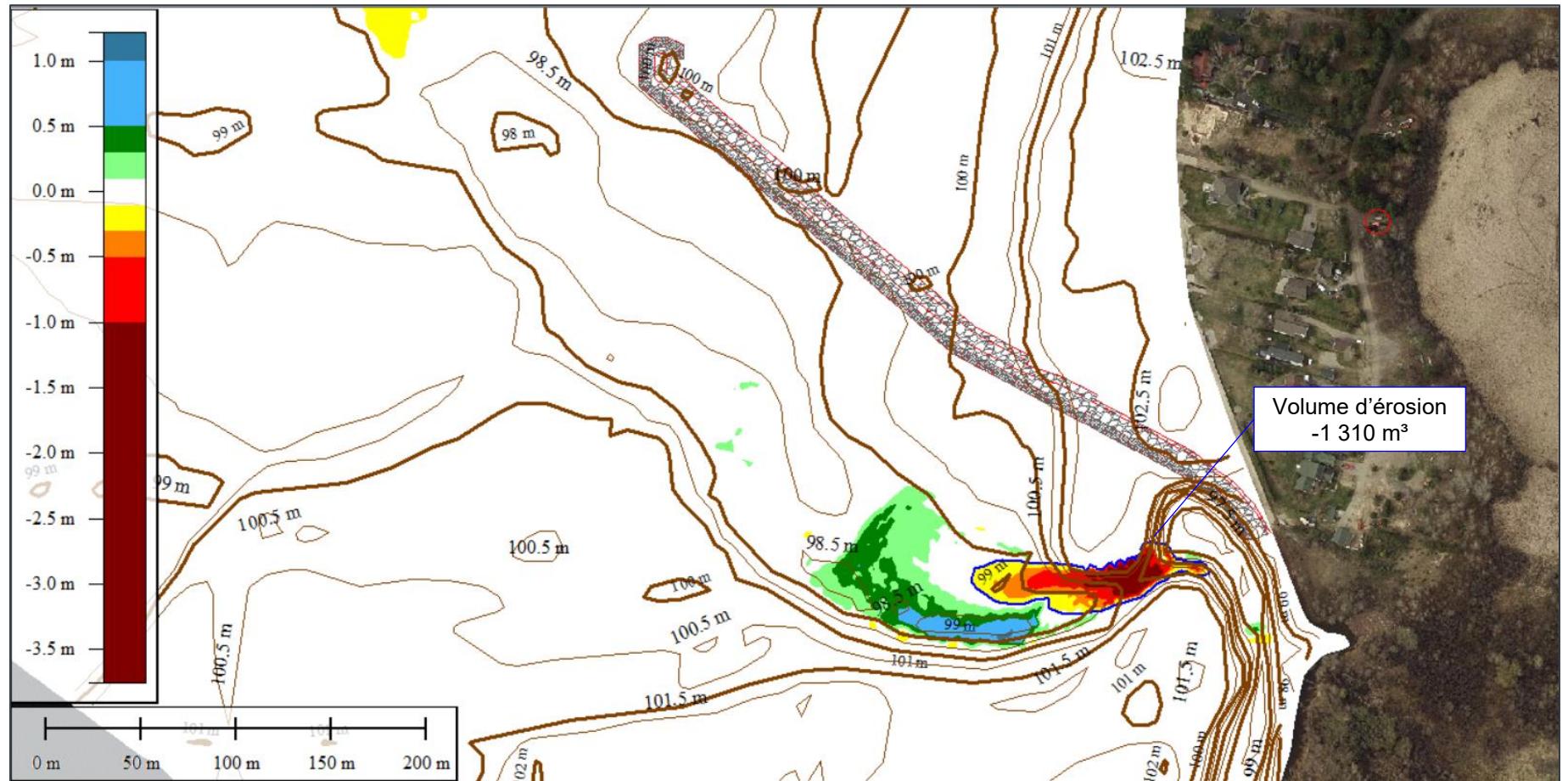


Figure 3-27 Modélisation de l'érosion potentielle lors de la crue printanière 2022 (scénario de crue faible).

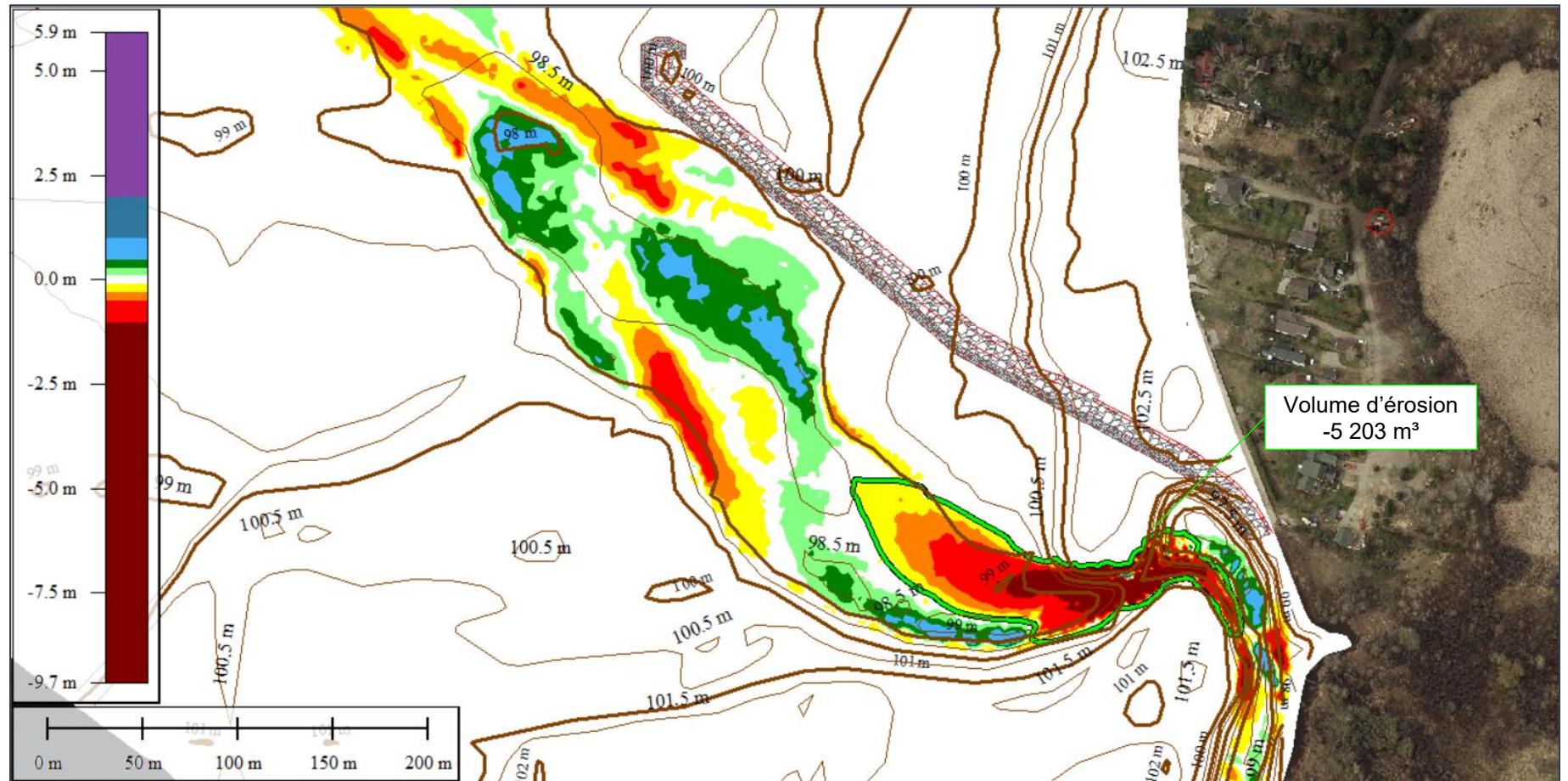


Figure 3-28 Modélisation de l'érosion potentielle lors de la crue printanière 2022 (scénario de crue moyenne).

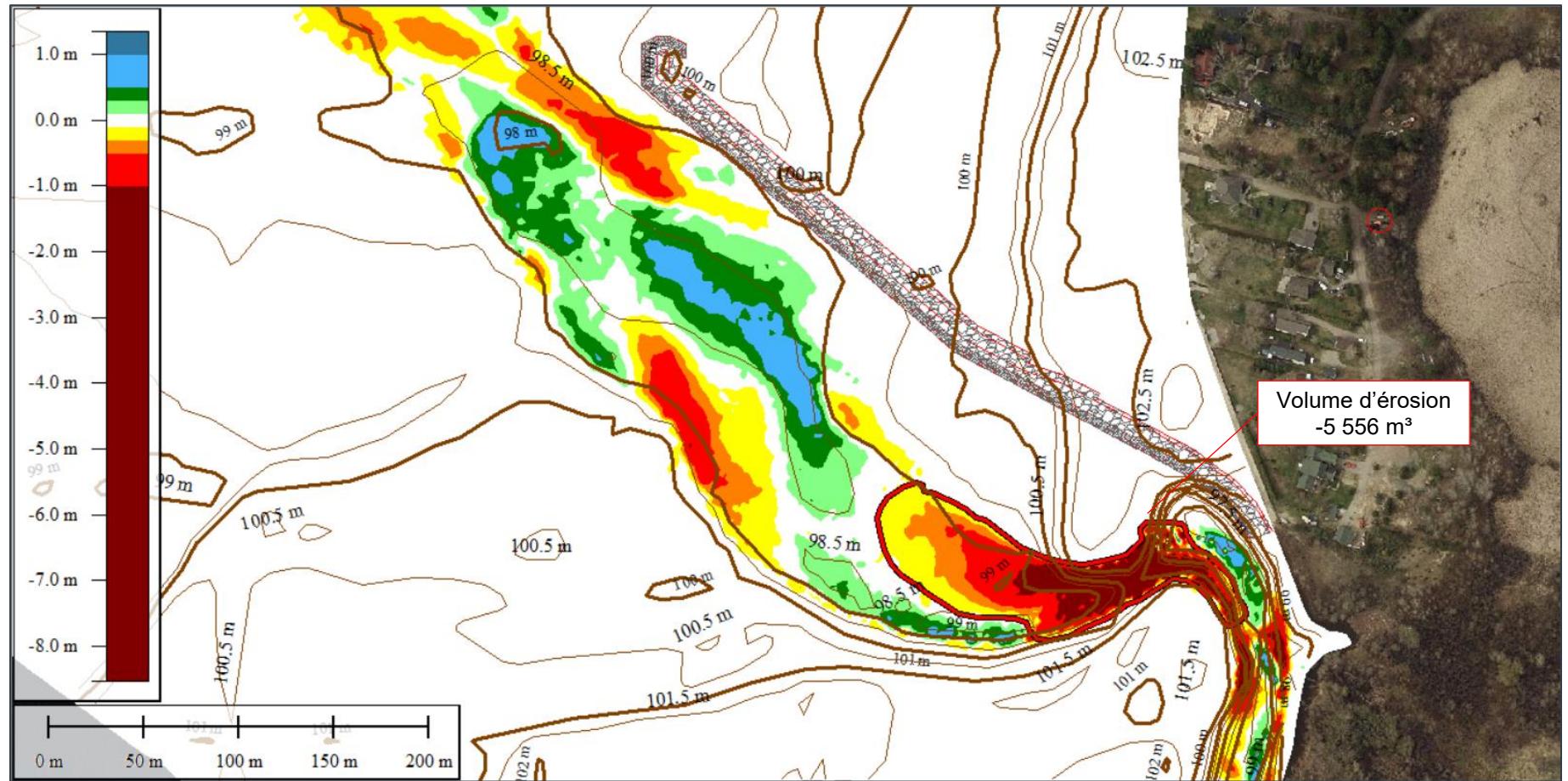


Figure 3-29 Modélisation de l'érosion potentielle lors de la crue printanière 2022 (scénario de crue extrême).

3.8 SYNTHESE

Les résultats d'analyses présentés dans les sections précédentes démontrent que l'année 2021 a été caractérisée par une combinaison de plusieurs facteurs rares. Spécifiquement, la crue printanière dans la rivière Belle Rivière a été environ 60% plus faible que la normale et les apports de sédiments en provenance de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac ont été près de deux fois plus importants que la moyenne historique. Ces conditions se seraient donc traduites par un « nettoyage » insuffisant de l'embouchure de la rivière Belle Rivière, suivi d'une accumulation de sédiments plus importante qu'à l'habitude. Le contexte était donc propice à l'engraissement de la flèche de sable à l'embouchure de la rivière Belle Rivière, qui est présente depuis plusieurs années, et à l'ensablement du chenal d'écoulement.

Les modélisations hydrosédimentaires indiquent pour leur part que l'érosion subie dans le chenal d'écoulement lors de la crue printanière 2021 aurait été d'environ 2 000 m³. Combiné au bilan sédimentaire net de 4 000 m³ d'accumulation mesuré avec les relevés bathymétriques, la quantité totale de matériaux ayant dérivés vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière s'élève à près de 6 000 m³. Une crue printanière moyenne ou extrême aurait possiblement permis d'augmenter la capacité de l'embouchure à emmagasiner les matériaux provenant de la plage, diminuant ainsi les risques d'obstruction du chenal, mais il demeure possible que l'obstruction aurait simplement été décalée dans le temps.

Compte tenu de la quantité importante de sédiments toujours présents sur la flèche de sable, le risque d'obstruction du chenal persiste en 2022, et ce, même advenant un retour d'une dynamique plus « standard » lors du nettoyage printanier et de l'ensablement estival. Une crue supérieure à la moyenne pourrait être requise pour assurer un nettoyage adéquat du chenal d'écoulement. Un retour à la normale pourrait même s'échelonner sur plus d'une année.

Les chances qu'une situation pire que 2021 se concrétise en 2022 paraissent malgré tout faibles. En termes statistiques, la probabilité que des conditions de crue printanière et de dérive littorale aussi atypiques que 2021 se suivent et se combinent lors de deux années consécutives demeure faible. Par ailleurs, il a été démontré en août 2021 que la rivière conserve une certaine capacité d'auto-nettoyage en cas d'obstruction complète de l'embouchure. Enfin, en l'absence de recharge de plage à Saint-Gédéon-sur-le-Lac, les apports aggravants de sédiments seront réduits.

Sans la mise en place de structures de rétention de sédiments sur la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac, par contre, la dérive de sédiments maintiendra toujours une flèche de sable à l'embouchure de la rivière Belle Rivière et le secteur demeurera vulnérable aux obstructions en cas de crues faibles et de conditions de vagues favorisant le transport vers l'embouchure. Par ailleurs, dans un contexte de changements climatiques, caractérisés notamment par moins de neige en hiver et des périodes de redoux plus fréquentes, il est possible que des crues printanières faibles, comme celle observée en 2021, deviennent plus fréquentes. Pour permettre la poursuite des rechargements de la plage à Saint-Gédéon-sur-le-Lac et minimiser le risque d'obstruction du chenal d'écoulement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière, la mise en place de structures de rétention (épis, brise-lames) est donc recommandée.

4 VARIANTES D'INTERVENTION PROPOSÉES

Les sections précédentes démontrent les enjeux que doit adresser l'élaboration de solutions durables pour la stabilisation de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac, tout en évitant d'exacerber la problématique d'ensablement de l'embouchure de la rivière Belle Rivière. Dans ce contexte, cinq variantes d'intervention ont été explorées et incluent :

- Variante 1 : Statu quo (poursuite des rechargements);
- Variante 2 : Rehaussement de la digue submergée et poursuite des rechargements;
- Variante 3 : Rehaussement de la digue submergée, ajout d'un épi intermédiaire et poursuite des rechargements;
- Variante 4 : Rehaussement de la digue submergée, ajout de brise-lames détachés et poursuite des rechargements;
- Variante 5 (non considérée par Rio Tinto) : Non-intervention (arrêt de toutes les interventions de stabilisation des berges).

Les sections qui suivent présentent les principales caractéristiques de ces variantes, ainsi que leurs impacts anticipés sur l'évolution du littoral dans le secteur. Une analyse multicritère permet ensuite de comparer les variantes selon des variables discriminantes spécifiques à la zone d'étude, de natures technique, environnementale et sociale, afin de supporter le processus de décision pour la sélection de la solution optimale.

Il est toutefois important de rappeler que les caractéristiques techniques des variantes présentées sont d'ordre conceptuel et demeurent préliminaires. Des études complémentaires seront requises pour optimiser les dimensions et l'emplacement final des ouvrages privilégiés en ingénierie détaillée.

4.1 VARIANTE 1 : STATU QUO (POURSUITE DES RECHARGEMENTS)

La variante 1 s'inscrit en continuité avec l'approche préconisée jusqu'à maintenant pour compenser l'érosion de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac et consiste en la poursuite des interventions de rechargements de gravillon et de sable, selon les besoins, en fonction de la sévérité de l'érosion subie sur la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac (Figure 4-1).

Historiquement, des rechargements d'environ 10 000 à 20 000 tonnes étaient réalisés annuellement dans ce secteur. Depuis l'achèvement des travaux de redressement de l'embouchure de la rivière Belle Rivière et de remblayage de l'ancien chenal d'écoulement réalisés en 2019, une réduction des taux d'érosion est toutefois anticipée, ce qui pourrait réduire, à long terme, la fréquence et l'envergure des rechargements requis.

Il demeure malgré tout anticipé qu'une dérive de matériaux persiste en direction sud-ouest (vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière), compte tenu de l'orientation du trait de côte par rapport à la direction dominante des vagues. Puisque le secteur ne bénéficie pas d'apport naturel significatif, l'érosion graduelle de la plage maintiendra la nécessité d'effectuer des

rechargements périodiques. La dérive des matériaux devrait quant à elle continuer à franchir la crête de la digue submergée et s'accumuler à proximité du chenal de sortie de la rivière Belle Rivière. Une obstruction de l'embouchure pourrait même être observée à nouveau, advenant la conjoncture de conditions hydrodynamiques comparables à celles observées en 2021.

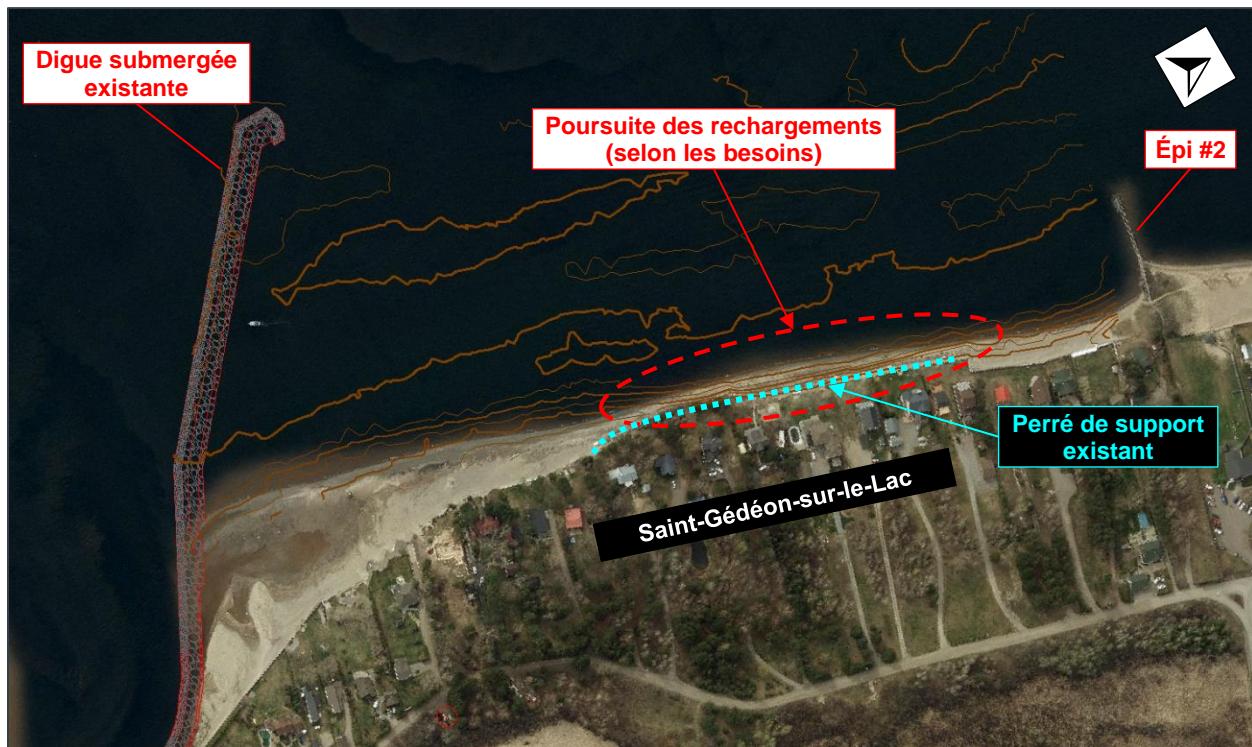


Figure 4-1 Variante 1 : Statut quo (poursuite des rechargements).

4.2 VARIANTE 2 : REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE ET POURSUITE DES RECHARGEMENTS

La variante 2 maintient les interventions de rechargements sur la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac, mais circonscrit la dérive des matériaux vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière en rehaussant partiellement la digue submergée, la transformant en épi en enrochement. De cette manière, les sédiments dérivant le long de la plage seront captés sur le flanc nord-est de l'épi et ne pourront plus s'accumuler devant l'embouchure de la rivière Belle Rivière.

Pour déterminer la longueur de rehaussement requise, une évaluation de la position du trait de côte à l'équilibre le long de la plage a été réalisée. De façon générale, en l'absence d'apports ou de déficits sédimentaires, les traits de côte ont tendance à s'orienter de façon perpendiculaire à la direction dominante des vagues. Dans le cadre de cette étude, il a été considéré que les secteurs situés au nord-est de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac et caractérisés par des tronçons de plage circonscrits entre des épis en enrochement correspondaient à des secteurs en équilibre (Figure 4-2). Aucune intervention de rechargement n'a été réalisée dans ces secteurs depuis la construction des épis, en 1987.

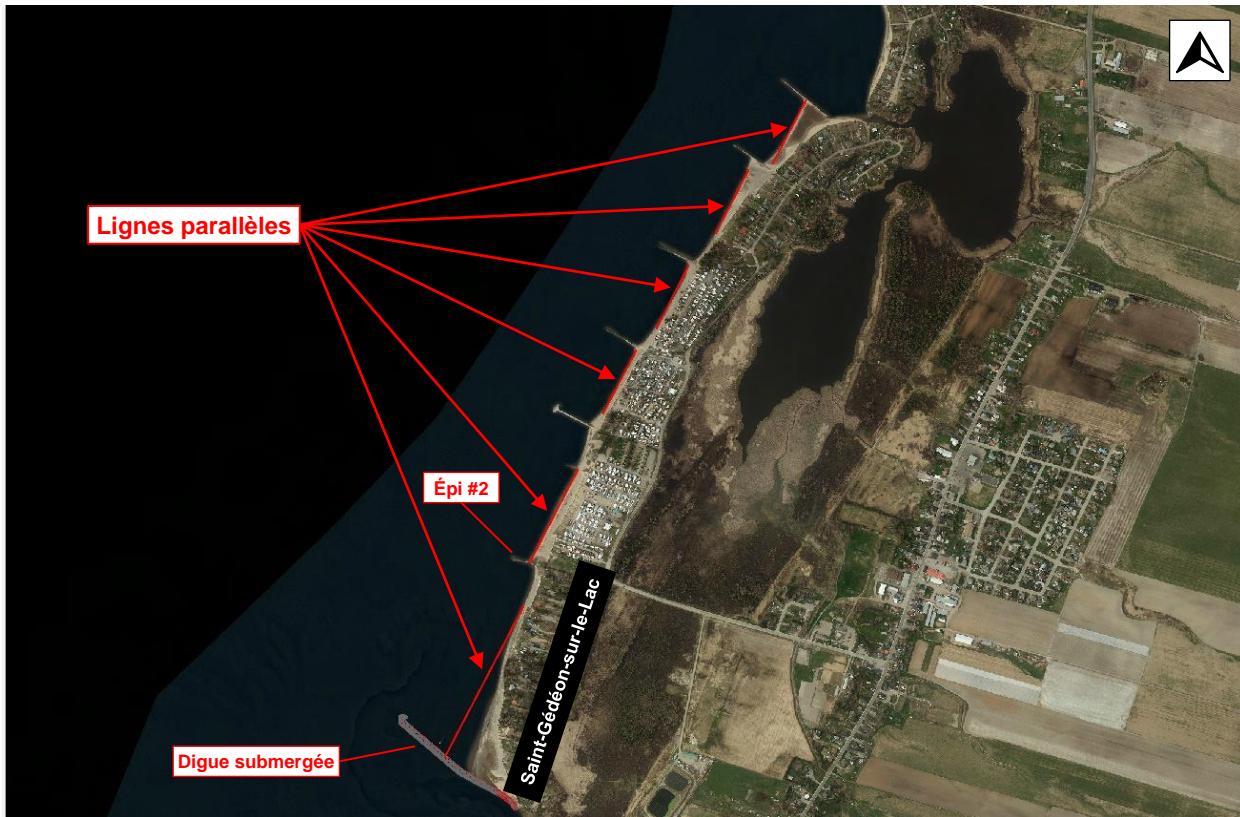


Figure 4-2 Comparaison de l'orientation du trait de côte dans le secteur de Saint-Gédéon.

L'analyse visuelle de la photographie aérienne prise en 2017 confirme que les traits de côte possèdent tous la même orientation. Il est donc raisonnable de croire que la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac tendrait vers une orientation similaire advenant le rehaussement de la digue submergée et la rétention des sédiments au nord-est.

Pour permettre au trait de côte d'évoluer vers cet état d'équilibre, le rehaussement de la digue doit non seulement atteindre la position anticipée du haut de la plage, mais doit également être prolongé pour assurer la stabilité du pied de la plage. La position du pied de la plage varie, toutefois, en fonction de la bathymétrie du fond marin et la pente d'équilibre transversale de la plage. Pour les besoins de cette étude, le comportement de la plage dans le secteur adjacent au nord-est a encore une fois été considéré comme témoignant d'un état d'équilibre (Figure 4-3). Une analyse des relevés bathymétriques effectués en juin 2019 indique que la pente transversale est caractérisée par un dénivèlement de 30H : 1V et que le pied de la plage se trouve à l'élévation approximative de 100,0 m.

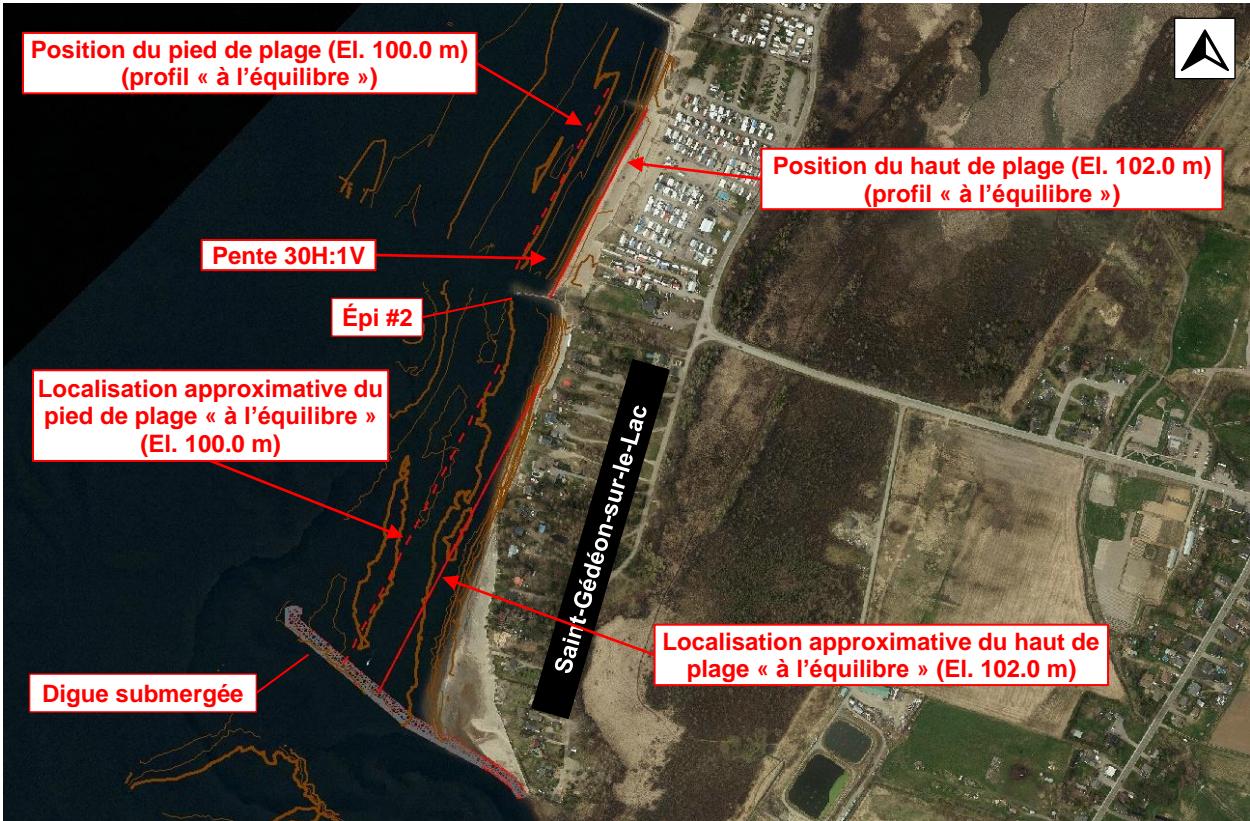


Figure 4-3 Évaluation de la position anticipée du pied de la plage, selon la pente d'équilibre transversale de la plage dans le secteur adjacent au nord-est.

À la lumière de ces résultats, un rehaussement de la digue submergée d'environ 200 m serait requis pour permettre à la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac de tendre vers son orientation d'équilibre. Advenant un rehaussement plus court, une dérive de sédiment pourrait persister à l'extrémité de l'épi, favorisant ainsi la formation d'une nouvelle flèche de sable à l'embouchure de la rivière Belle Rivière. Par ailleurs, la zone d'influence de l'épi serait également réduite, ce qui pourrait laisser l'extrémité nord-est de la plage vulnérable à l'érosion.

La variante 2 proposée dans le cadre de cette étude considère un rehaussement de la digue submergée de 200 m. La Figure 4-4 illustre l'envergure de cette intervention, ainsi que les positions anticipées du haut et du pied de la plage à l'état d'équilibre. La Figure 4-5 présente quant à elle les caractéristiques de la section transversale proposée pour le rehaussement de la digue.

Environ 6 000 tonnes de pierres seraient nécessaires pour modifier la digue, alors que près de 120 000 tonnes de gravillon/sable seraient requises pour permettre à la plage d'atteindre son état d'équilibre. La superficie d'empietement occasionné par la modification de la digue est quant à elle évaluée à environ 800 m², alors que celle du rechargeement complet atteint près de 50 000 m². À terme, cette solution provoquerait un élargissement de la plage pouvant atteindre environ 90 m dans le secteur attenant à la digue, où la plage bénéficie déjà d'une largeur de l'ordre de 60 m. La mise en place des rechargeements pourrait malgré tout être réalisée progressivement, en fonction de la sévérité de l'érosion subie sur la plage, s'étalant ainsi sur plusieurs années.

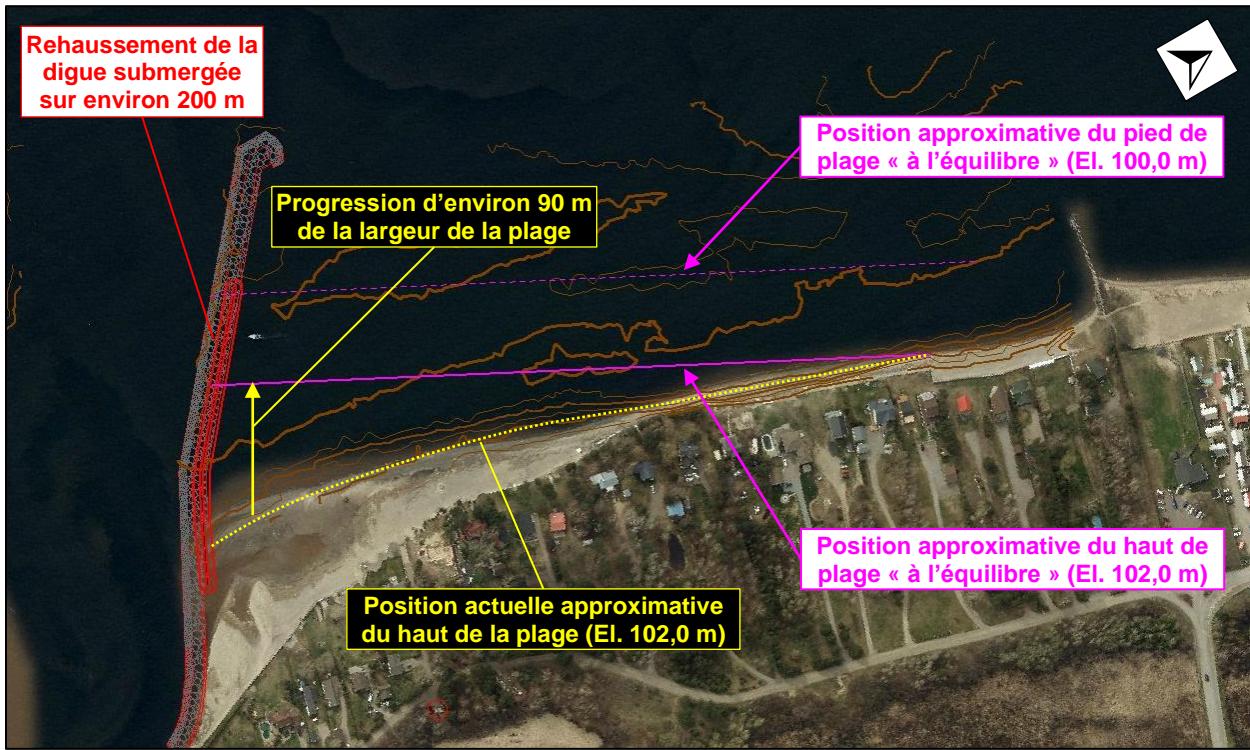


Figure 4-4 Variante 2 : Rehaussement de la digue submergée et poursuite des rechargements.

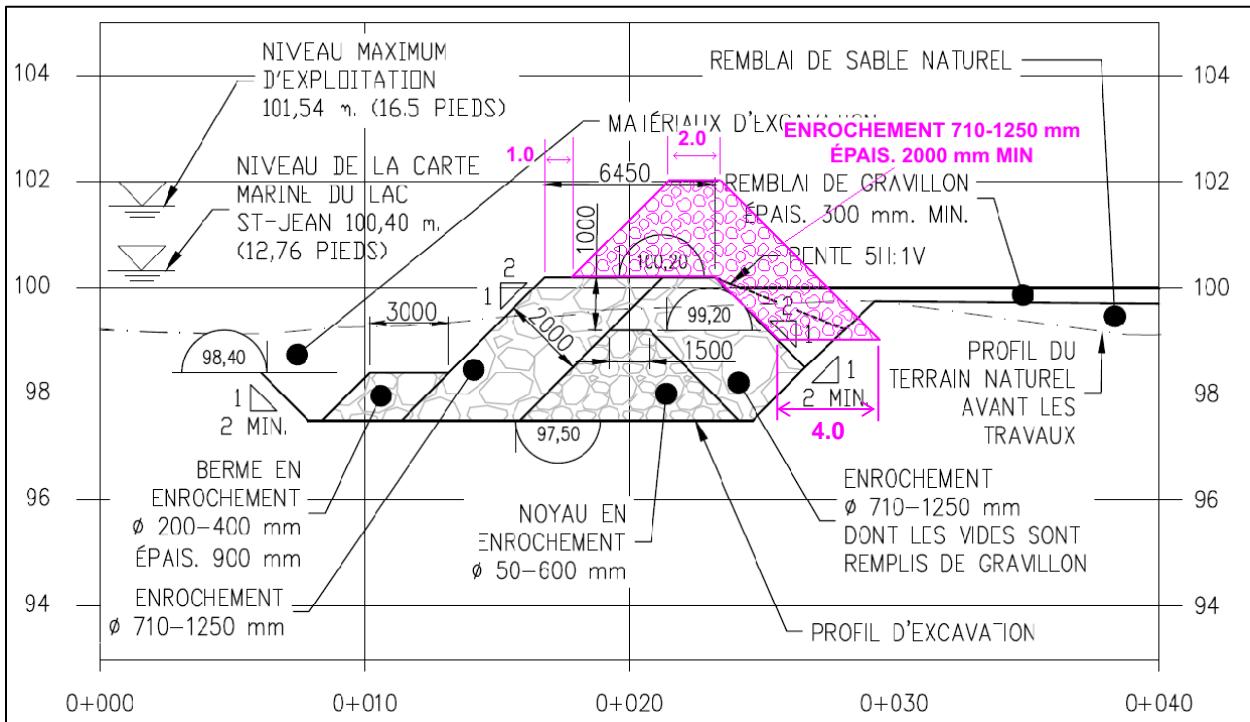


Figure 4-5 Variante 2 : Section transversale proposée pour le rehaussement de la digue (traits magenta) superposée sur la section existante de la digue submergée (traits noirs).

4.3 VARIANTE 3 : REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE, AJOUT D'UN ÉPI INTERMÉDIAIRE ET POURSUITE DES RECHARGEMENTS

La variante 3 s'inscrit en continuité avec la variante 2, mais propose l'ajout d'un épi intermédiaire entre les numéros civiques #14 et #15 (Figure 4-6). Cette modification permettrait de circonscrire les sédiments plus proches de la zone sensible à l'érosion et éviter qu'ils ne dérivent vers le secteur sud-ouest de la plage, faisant en sorte de l'élargir de façon moins importante. L'épi pourrait toutefois provoquer le développement d'une zone d'érosion au sud-ouest de l'ouvrage, en raison de l'interruption de la dérive littorale. Pour assurer la stabilité de ce tronçon de plage, un rehaussement de la digue submergée demeure requis afin de permettre au trait de côte d'atteindre son orientation d'équilibre. En raison de la configuration des structures et de la plage, par contre, le rehaussement de la digue submergée pourrait être plus court que celui proposé à la variante 2.

En termes quantitatifs, les structures proposées sous la variante 3 auraient les caractéristiques présentées au Tableau 4-1. Les dimensions proposées pour l'épi intermédiaire demeurent comparables à celle des ouvrages construits dans les secteurs adjacents.

Tableau 4-1 Caractéristiques préliminaires des structures proposées à la variante 3.

PARAMÈTRE	REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE	ÉPI INTERMÉDIAIRE
Longueur en crête	160 m	120 m
Longueur à la base	166 m	126 m
Élévation de la crête	102,0 m	102,0 m
Largeur de la crête	2 m	2 m
Largeur de la base	4 m	14 m
Pentes	2H : 1V	2H : 1V
Élévation du pied	99,0 m	99,0 m

Environ 4 800 tonnes de pierres seraient requises pour modifier la digue, tandis que l'aménagement de l'épi intermédiaire nécessiterait 6 000 tonnes de pierres. Près de 80 000 tonnes de gravillon/sable seraient quant à eux requises pour permettre à la plage d'atteindre son état d'équilibre. La superficie d'empietement occasionné par les éléments d'empierrement est pour sa part évaluée à environ 2 500 m², alors que celle du rechargement complet est de 40 000 m². Les rechargements devront par ailleurs être réalisés autant au nord-est de l'épi intermédiaire qu'au sud-ouest. Ces interventions pourront toutefois être réalisées progressivement, en fonction de la sévérité de l'érosion subie sur la plage, s'étalant ainsi sur plusieurs années.

L'élargissement anticipé de la plage dans le secteur attenant la digue submergée serait plus faible que celui prévu pour la variante 2 et de l'ordre de 55 m. Au nord-est de l'épi intermédiaire, un élargissement de la plage d'environ 30 m serait anticipé. Enfin, un retrait du perré de support existant au nord-est de l'épi intermédiaire projeté pourrait être envisagé au cours des phases subséquentes de raffinement de l'ingénierie.

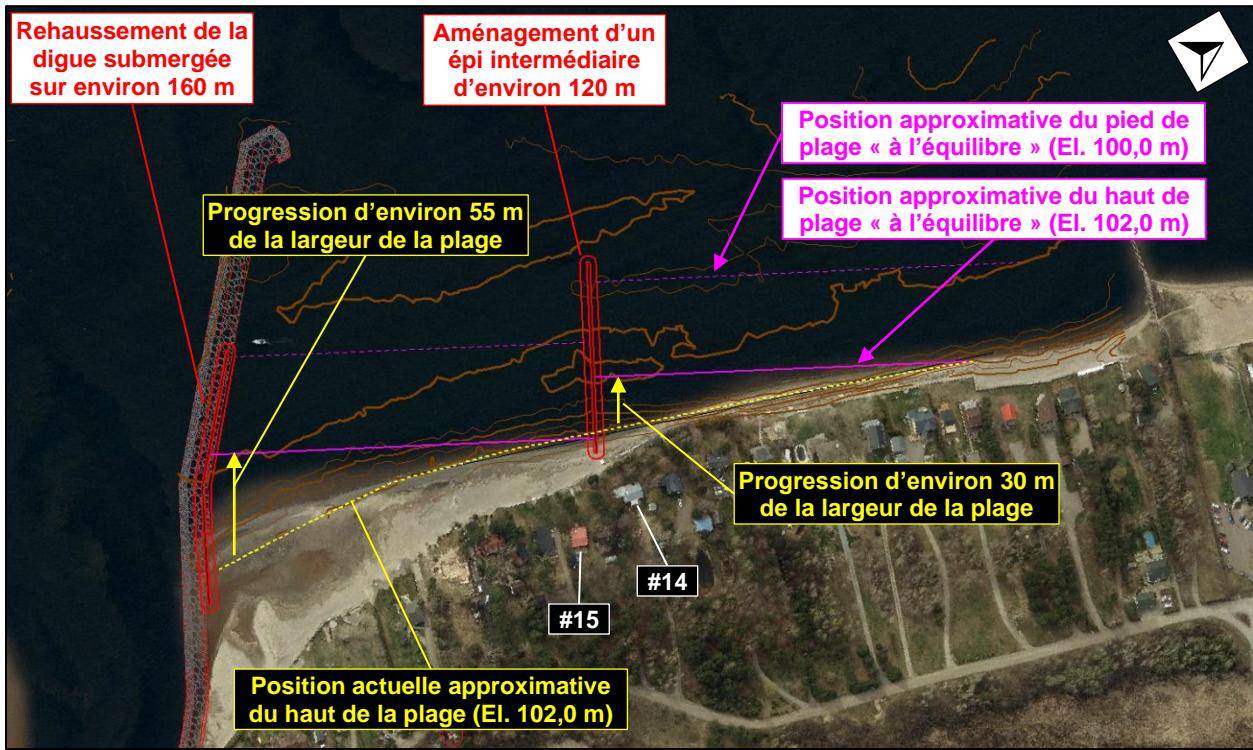


Figure 4-6 Variante 3 : Rehaussement de la digue submergée, ajout d'un épi intermédiaire et poursuite des rechargements.

4.4 VARIANTE 4: REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE, AJOUT DE BRISE-LAMES DÉTACHÉS ET POURSUITE DES RECHARGEMENTS

La variante 4 explore l'utilisation de brise-lames détachés pour assurer la protection de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac. Ce type de structure crée un obstacle à la propagation des vagues avant qu'elles n'atteignent la berge et provoque la formation de tombolos sur les tronçons de plage situés derrière les ouvrages. Les sédiments se retrouvent ainsi confinés grâce à une neutralisation de la dérive littorale.

De façon similaire à la variante 2, l'élaboration du concept préliminaire pour les brise-lames détachés s'est inspirée d'un site témoin existant, situé à proximité de la zone d'étude. Le site retenu correspond à celui de l'Étang-des-Îles, situé à environ 3,5 km au nord-est de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac (Figure 4-7). Deux brise-lames détachés, d'une longueur de 70 m chacun et un espacement de 50 m, ont été aménagés à cet endroit en 1988. Une analyse visuelle de la photographie aérienne prise en 2012 permet de tracer la réponse du trait de côte à la présence de ces ouvrages. Étant donné la proximité des deux secteurs, il demeure raisonnable de croire que la réponse du trait de côte serait similaire à Saint-Gédéon-sur-le-Lac.

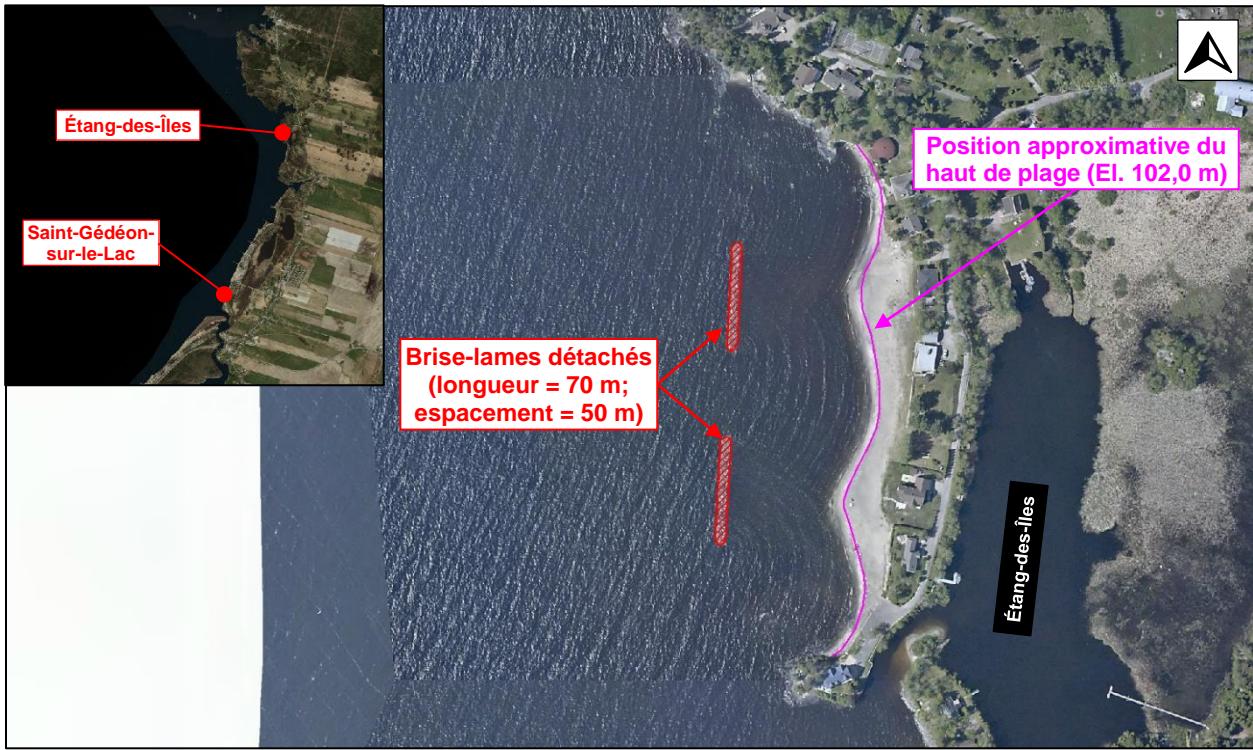


Figure 4-7 Site témoin considéré pour la conception des brise-lames détachés (Etang-des-îles).

Une transposition des ouvrages et du profil du trait de côte a été effectuée pour la conception de la variante 4 (Figure 4-8). Une troisième structure a été ajoutée afin d'assurer une protection adéquate de la zone de plage la plus vulnérable à l'érosion. La position du pied de la plage a quant à elle été établie en supposant une pente d'équilibre transversale de 30H : 1V.

Pour prévenir la formation d'une zone d'érosion sur la plage au sud-ouest des brise-lames, un rehaussement de la digue submergée est recommandé pour permettre au trait de côte d'atteindre son orientation d'équilibre. En raison de la configuration des structures et de la plage, par contre, le rehaussement de la digue submergée pourrait être davantage réduit par rapport à la variante 3.

Les caractéristiques des structures proposées sont présentées au Tableau 4-2. Les dimensions des brise-lames sont équivalentes à celles des ouvrages construits à l'Etang-des-îles.

Tableau 4-2 Caractéristiques des structures proposées à la variante 4.

PARAMÈTRE	REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE	BRISE-LAMES DÉTACHÉS (x 3)
Longueur en crête	140 m	70 m
Longueur à la base	146 m	82 m
Élévation de la crête	102,0 m	102,0 m
Largeur de la crête	2 m	3 m
Largeur à la base	4 m	15 m
Pentes	2H : 1V	2H : 1V
Élévation du pied	99,0 m	99,0 m

Environ 4 200 tonnes de pierres seraient requises pour modifier la digue, tandis que l'aménagement des brise-lames nécessiterait 18 000 tonnes de pierres. Près de 70 000 tonnes de gravillon/sable seraient quant à elles requises pour permettre à la plage d'atteindre son état d'équilibre. Contrairement aux variantes préconisant les épis, où les rechargements pourraient être réalisés progressivement, la mise en place du volume complet de sédiments serait recommandée dès la construction des brise-lames. Ce type d'aménagement modifie de façon importante la dynamique hydrosédimentaire du secteur où ils sont aménagés et provoque des changements rapides du trait de côte. L'ajout de sédiments permet alors de faciliter la transition vers le nouvel état d'équilibre de la plage, tout en prévenant une érosion indue du littoral existant.

La superficie d'empietement occasionné par les éléments d'empierrement est évaluée à environ 4 500 m², alors que celle du rechargement complet est de 45 000 m². L'élargissement anticipé de la plage dans le secteur attenant la digue submergée est davantage réduit par rapport à la variante 3 et de l'ordre de 45 m. Par ailleurs, de façon similaire à la variante 3, cette solution permettrait d'envisager un retrait du perré de support existant sur le haut de la plage, si l'évolution de cette dernière venait à démontrer une stabilité durable du littoral.

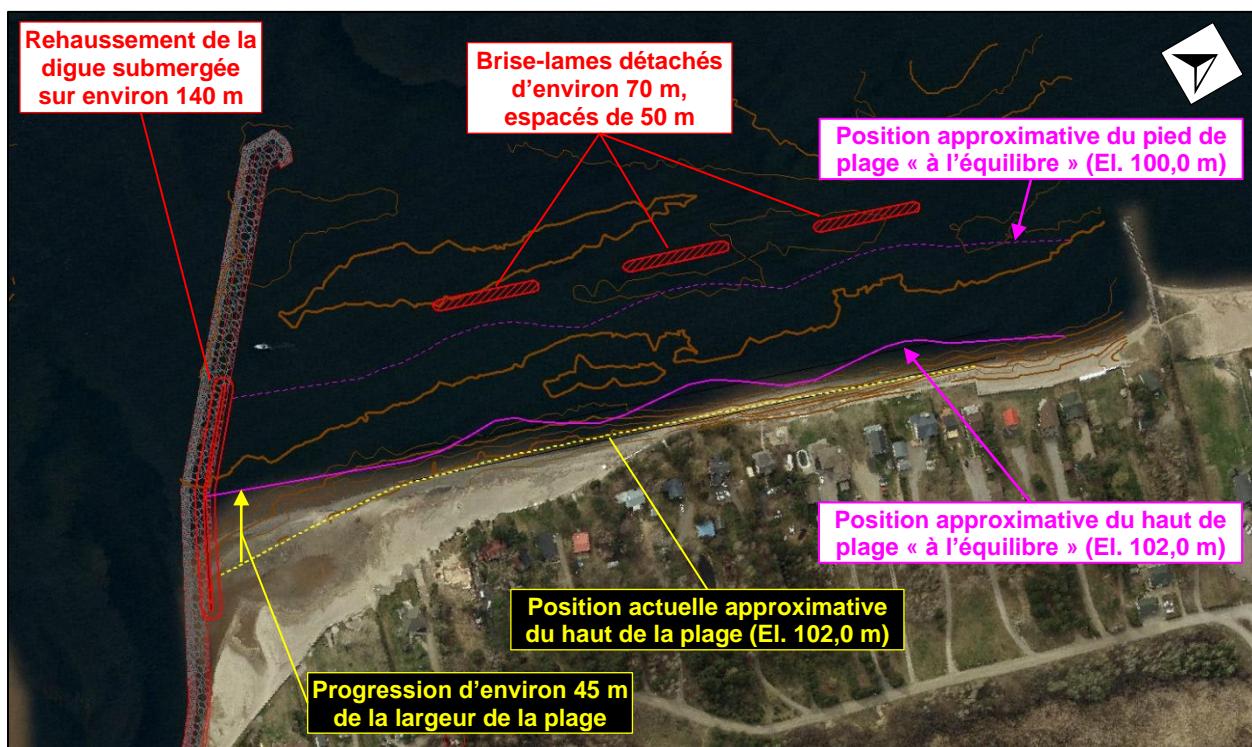


Figure 4-8 Variante 4 : Rehaussement de la digue submergée, ajout de brise-lames détachés et poursuite des rechargements.

4.5 VARIANTE 5: NON-INTERVENTION (ARRÊT DES RECHARGEMENTS ET RECUL DES PROPRIÉTÉS À PROXIMITÉ DE LA BERGE)

L'approche proposée pour la variante 5 n'est pas considérée par Rio Tinto, mais permet de mettre en perspective l'envergure de la problématique d'érosion à Saint-Gédéon-sur-le-Lac. Cette variante accorderait la priorité au milieu naturel et aux processus côtiers. Le scénario verrait l'arrêt de toutes les interventions de stabilisation de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac. À terme, l'érosion progressive anticipée de la plage déstabiliseraient le perré de support, qui devrait être retiré, et provoquerait une régression du trait de côte qui nécessiterait un recul des propriétés riveraines et des aménagements à proximité de la berge. Les matériaux érodés au cours de cette période continueraient quant à eux à dériver vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière, entretenant ainsi un risque d'obstruction du chenal de navigation, advenant la conjoncture de conditions hydrodynamiques comparables à celles observées en 2021.

La Figure 4-9 présente un aperçu de la zone pouvant être affectée par la transformation du littoral. Les éléments illustrés sur cette figure ont été établis de la manière suivante :

- Pied de la plage : position actuelle du pied de la plage;
- Haut de la plage : position projetée du haut de la plage, considérant une pente d'équilibre transversale de 30H : 1V à partir du pied de la plage. Un recul supplémentaire de 10 m a également été ajouté, car l'étude de modélisation de l'évolution du trait de côte effectuée par Lasalle-NHC (2016) indique une régression de cette envergure sur 23 ans, en l'absence de rechargements (Figure 4-10);
- Zone tampon : zone tampon de 30 m par rapport à la position projetée du haut de la plage.

Tous les bâtiments et les infrastructures situés à proximité de la berge devraient être retirés, minimalement, derrière la limite tampon de 30 m.

Bien entendu, une transformation de cette envergure du littoral demeure difficile à prévoir et à quantifier. Les résultats présentés à la Figure 4-9 s'accompagnent d'une importante marge d'incertitudes. L'évolution du trait de côte peut être influencée par plusieurs facteurs, dont le climat des vagues, la gestion des niveaux d'eau dans le lac Saint-Jean, ainsi que la nature des sols sous-jacents sur la berge. Par ailleurs, il est important de souligner que ce scénario ne cadre pas avec les engagements du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean. La variante est plutôt présentée à titre indicatif pour prendre conscience du patrimoine actuellement protégé par les interventions de stabilisation de la plage.

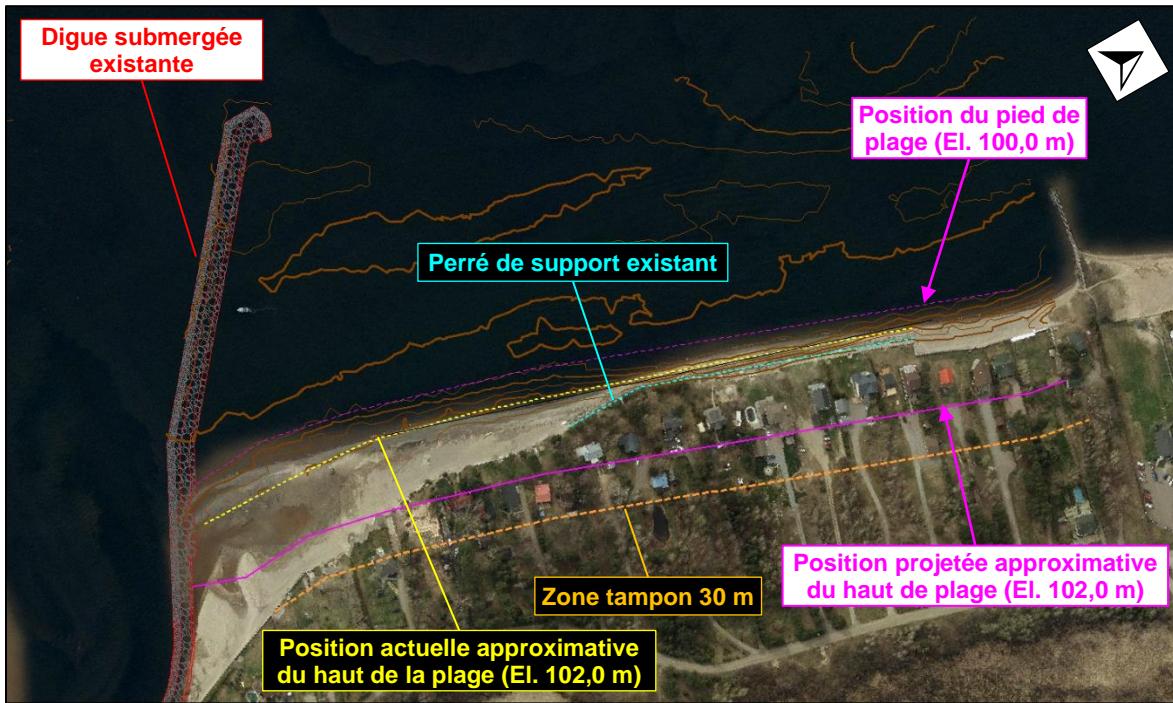


Figure 4-9 Variante 5 : Zone pouvant être affectée par la transformation du littoral, advenant l'arrêt des interventions de stabilisation de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac et le retrait du perré de support.

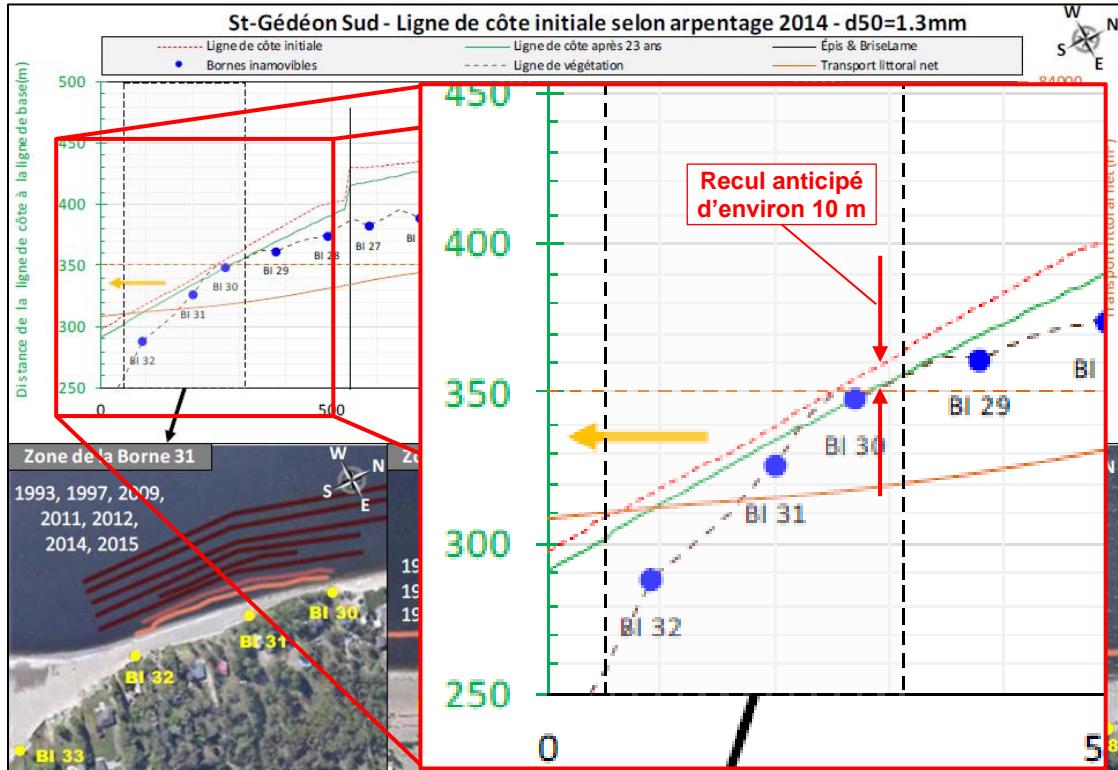


Figure 4-10 Évolution du trait de côte anticipée sur 23 ans, en l'absence de rechargements (extrait de Lasalle-NHC, 2016).

4.6 COMPARAISON MULTICRITÈRE

Le Tableau 4-3 présente une comparaison multicritère des solutions d'aménagement proposées dans le cadre de la présente étude. Cet exercice permet de comparer les variantes une à une, selon des critères discriminants de natures technique, environnementale et socioéconomique. Les critères à caractère technique visent à qualifier l'efficacité anticipée de chaque solution, leur pérennité, l'effort de mise en œuvre, la durée des travaux et les délais d'intervention, l'impact anticipé sur le régime hydrosédimentaire, l'effort de suivi et d'entretien requis, l'envergure des études de conception à réaliser en ingénierie détaillée et les coûts. L'analyse environnementale identifie pour sa part les principaux enjeux sur les milieux physique et biologique, ainsi que les autorisations environnementales requises. Enfin, le volet socioéconomique de l'analyse considère les enjeux associés à l'acceptabilité sociale, l'esthétisme général des aménagements, la perturbation de la circulation, et l'empietement.

Enfin, afin de faciliter la lecture et la compréhension générale du tableau et discriminer les solutions sur la base de chaque critère d'analyse, un code de couleur est utilisé. Le vert identifie une solution favorable tandis que l'orange distingue une solution défavorable. La couleur blanche distingue quant à elle une solution neutre ou un volet non applicable.

Tableau 4-3 Analyse multicritère pour les 5 variantes d'aménagement proposées.

Légende :

	Favorable	Plutôt favorable	Neutre	Plutôt défavorable	Défavorable	
TECHNIQUE	VARIABLE DISCRIMINANTE	VARIANTE 1 STATU QUO (POURSUITE DES RECHARGEMENTS)	VARIANTE 2 REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE	VARIANTE 3 AJOUT D'UN ÉPI INTERMÉDIAIRE	VARIANTE 4 AMÉNAGEMENT DE BRISE-LAMES DÉTACHÉS	VARIANTE 5 NON-INTERVENTION & RECUL DES PROPRIÉTÉS RIVERAINES
	Efficacité technique (performance pour stabiliser la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac (SGSLL) et atténuer la problématique d'ensablement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière)	<p>La réalisation de rechargements est une technique ayant démontré son efficacité pour contrecarrer les effets de l'érosion de la plage de SGSLL.</p> <p>L'ajout récurrent de sédiments risque cependant d'exacerber la problématique d'ensablement du chenal à l'embouchure de la rivière Belle Rivière, car rien n'empêche la dérive des matériaux vers cet endroit. Le chenal demeurera donc vulnérable à des périodes d'obstruction partielle ou complète, selon les conditions hydrosédimentaires (érosion fluviale au printemps et dérive littorale à l'été/automne) observées pendant les périodes d'eau libre.</p> <p>Grâce aux travaux de relocalisation de l'embouchure de la rivière Belle Rivière réalisés en 2019, il demeure malgré tout anticipé que les taux d'érosion de la plage de SGSLL diminuent progressivement au fil des années, réduisant par le fait même les besoins en rechargements.</p>	<p>Le rehaussement de la digue submergée pour la transformer en épi permettra de capturer efficacement les sédiments qui dérivent le long de la plage de SGSLL, avant qu'ils ne parviennent à l'embouchure de la rivière Belle Rivière.</p> <p>L'accumulation au nord-est de l'épi risque cependant de provoquer un élargissement important de la plage attenante à la structure, qui est déjà très large.</p> <p>Le rehaussement à lui seul de la digue submergée ne permettra pas une stabilisation immédiate de la plage de SGSLL tant que la zone d'accumulation au nord-est n'aura pas progressé jusqu'au secteur le plus vulnérable à l'érosion. Une poursuite des rechargements sera donc requise pour combler cette zone d'accumulation, jusqu'à l'atteinte de l'état d'équilibre.</p> <p>Les rechargements pourront malgré tout être réalisés progressivement, selon les besoins, en fonction de la sévérité de l'érosion subie sur la plage de SGSLL.</p>	<p>L'ajout d'un épi intermédiaire vise à circonscrire les sédiments plus proches du secteur vulnérable à l'érosion le long de la plage de SGSLL, devant le perré de support.</p> <p>Cette structure risque cependant de provoquer le développement d'une zone d'érosion au sud-ouest de l'ouvrage, en raison de l'interruption de la dérive littorale. Un rehaussement partiel de la digue submergée demeure donc requis, afin de permettre au trait de côte d'atteindre son orientation d'équilibre.</p> <p>La longueur du rehaussement peut cependant être plus courte que celui proposé à la variante 2, réduisant ainsi la quantité de sédiments requise pour atteindre l'état d'équilibre de la plage et diminuant l'élargissement anticipé de la plage attenante au nord-est.</p> <p>Une poursuite des rechargements sera malgré tout requise pour combler les zones d'accumulation au nord-est de chaque structure, jusqu'à l'atteinte de l'état d'équilibre.</p>	<p>La mise en place de brise-lames détachés permet de circonscrire les sédiments sur la plage de SGSLL, en favorisant le développement de tombolos derrière les structures, où les matériaux de plage s'accumulent et s'immobilisent.</p> <p>La formation d'une zone d'érosion au sud-ouest des aménagements demeure toutefois possible, en raison de l'interruption de la dérive littorale. Un rehaussement partiel de la digue submergée demeure donc requis, afin de permettre au trait de côte d'atteindre son orientation d'équilibre. La longueur du rehaussement se trouve cependant davantage réduite par rapport à la variante 3.</p> <p>Un rechargement est également requis pour permettre à la plage d'évoluer vers son nouvel état d'équilibre. La mise en place du volume complet est par ailleurs recommandée dès la construction des brise-lames, pour faciliter la transition et éviter une érosion indue du littoral existant.</p>	<p>Suivant cette approche, la plage de SGSLL subirait un remodelage et un rééquilibrage naturel, au gré des conditions érosives. Une relocalisation des propriétés riveraines serait alors requise pour assurer la pérennité des habitations. Un retrait du perré de support serait également recommandé, car cet ouvrage risque d'être éventuellement déchaussé et contourné par l'érosion.</p> <p>Les matériaux érodés pendant cette période continueraient de dériver vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière. Le chenal demeurera donc vulnérable à des périodes d'obstruction partielle ou complète, selon les conditions hydrosédimentaires (érosion fluviale au printemps et dérive littorale à l'été/automne) observées pendant les périodes d'eau libre.</p> <p>À terme, par contre, une diminution progressive des taux d'érosion de la plage serait anticipée, au fur et à mesure que le trait de côte évolue vers son état d'équilibre.</p>

	VARIABLE DISCRIMINANTE	VARIANTE 1 STATU QUO (POURSUITE DES RECHARGEMENTS)	VARIANTE 2 REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE	VARIANTE 3 AJOUT D'UN ÉPI INTERMÉDIAIRE	VARIANTE 4 AMÉNAGEMENT DE BRISE-LAMES DÉTACHÉS	VARIANTE 5 NON-INTERVENTION & RECUL DES PROPRIÉTÉS RIVERAINES
TECHNIQUE	Pérennité	<p>Stabilisation de la plage à SGSLL pérenne, tant que les interventions de rechargements sont maintenues.</p> <p>Solution n'adresse pas la problématique d'ensablement de l'embouchure de la rivière Belle Rivière.</p>	<p>Solution pérenne permettant de réduire la dérive de sédiments vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière.</p> <p>Stabilisation de la plage de SGSLL anticipée à long-terme.</p>	<p>Solution pérenne permettant de réduire la dérive de sédiments vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière.</p> <p>Stabilisation de la plage de SGSLL anticipée à moyen-terme.</p>	<p>Solution pérenne permettant de réduire la dérive de sédiments vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière.</p> <p>Stabilisation de la plage de SGSLL anticipée à court-terme.</p>	<p>Solution pérenne permettant à la plage de SGSLL d'évoluer vers son état d'équilibre naturel.</p> <p>Solution n'adresse pas la problématique d'ensablement de l'embouchure de la rivière Belle Rivière à court et moyen-terme.</p>
Mise en œuvre	<p>Les rechargements de plage sont une intervention connue, maîtrisée et simple à exécuter.</p> <p>L'ensablement de l'embouchure de la rivière Belle Rivière pourrait cependant nécessiter une intervention mécanique (dragage), si la problématique devient trop fréquente ou trop sévère.</p>	<p>Rehaussement de la digue submergée pour la transformer en épi est une intervention autorisée dans le cadre du décret du Programme de stabilisation des berges et relativement simple à exécuter.</p> <p>Les conditions de terrain et les enjeux potentiels sont relativement bien connus, en raison de l'expérience acquise lors des travaux de 2019.</p> <p>Il demeure anticipé que les ouvrages pourraient être construits « à sec », en hiver, lorsque le niveau du lac Saint-Jean est suffisamment bas.</p> <p>Les rechargements de plage sont une intervention connue, maîtrisée et simple à exécuter.</p>	<p>La construction d'épis est une intervention autorisée dans le cadre du décret du Programme de stabilisation des berges et relativement simple à exécuter. Il demeure anticipé que ces ouvrages pourraient être construits « à sec », en hiver, lorsque le niveau du lac Saint-Jean est suffisamment bas.</p> <p>Des investigations géotechniques complémentaires pourraient toutefois être requises, puisque l'épi intermédiaire serait situé sur le remblai de l'ancien chenal de la rivière Belle Rivière, comblé en 2019. La consolidation des matériaux pourrait y être encore en progression, pouvant occasionner des tassements ou des affaissements à l'extrémité de l'épi.</p> <p>Les rechargements de plage sont une intervention connue, maîtrisée et simple à exécuter.</p>	<p>La construction de brise-lames détachés est une intervention autorisée dans le cadre du décret du Programme de stabilisation des berges et relativement simple à exécuter. Il demeure anticipé que ces ouvrages pourraient être construits « à sec », en hiver, lorsque le niveau du lac Saint-Jean est suffisamment bas.</p> <p>Des investigations géotechniques complémentaires pourraient toutefois être requises, puisque les structures seraient situées sur le remblai de l'ancien chenal de la rivière Belle Rivière, comblé en 2019. La consolidation des matériaux pourrait y être encore en progression, pouvant occasionner des tassements ou des affaissements sur les brise-lames.</p> <p>Les rechargements de plage demeurent une intervention connue, maîtrisée et simple à exécuter.</p>	<p>Le retrait du perré de support et la relocalisation des propriétés riveraines sont des interventions techniquement faisables, avec peu de risques et ayant été réalisées à plusieurs endroits au Québec.</p> <p>L'acceptation sociale de cette approche demeure cependant un enjeu très important et hautement sensible.</p>	

	VARIABLE DISCRIMINANTE	VARIANTE 1 STATU QUO (POURSUITE DES RECHARGEMENTS)	VARIANTE 2 REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE	VARIANTE 3 AJOUT D'UN ÉPI INTERMÉDIAIRE	VARIANTE 4 AMÉNAGEMENT DE BRISE-LAMES DÉTACHÉS	VARIANTE 5 NON-INTERVENTION & RECUL DES PROPRIÉTÉS RIVERAINES
TECHNIQUE	Durée de travaux	Quelques jours	Quelques semaines	Plusieurs semaines	Plusieurs semaines	Plusieurs mois
	Délais d'intervention / dates de travaux	Maintien de la planification habituelle des travaux. La nécessité d'une intervention de dragage à l'embouchure de la rivière Belle Rivière pourrait toutefois occasionner des délais supplémentaires pour obtenir les autorisations environnementales requises.	Maintien de la planification habituelle des travaux. Les délais pour obtenir les autorisations environnementales ne devraient pas mettre en jeu la réalisation des travaux à l'hiver 2023.	Maintien de la planification habituelle des travaux. Les délais pour obtenir les autorisations environnementales et effectuer les études complémentaires ne devraient pas mettre en jeu la réalisation des travaux à l'hiver 2023.	Maintien de la planification habituelle des travaux. Les délais pour obtenir les autorisations environnementales et effectuer les études complémentaires ne devraient pas mettre en jeu la réalisation des travaux à l'hiver 2023.	Périodes de consultations longues à prévoir et contestations juridiques possibles. Très difficile à ce moment de prévoir à quand cette solution pourrait être mise en œuvre.
	Impacts sur le régime hydrosédimentaire	Aucun changement par rapport aux conditions existantes. Progression probable de la flèche de sable vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière. Le chenal d'écoulement demeurera donc vulnérable à des événements d'obstruction partielle ou complète, selon les conditions hydrosédimentaires (érosion fluviatile au printemps et dérive littorale à l'été/automne) observées pendant les périodes d'eau libre.	Réduction des apports à l'embouchure de la rivière Belle Rivière en provenance de la plage de SGSLL. Érosion de la flèche de sable et migration du chenal d'écoulement à proximité de la digue submergée possible, mais digue conçue pour résister à ce comportement. Poursuite de la dérive de sédiments sur la plage de SGSLL vers le sud-ouest et accumulation au nord-est de la digue submergée. Augmentation significative de la largeur de la plage à cet endroit.	Réduction des apports à l'embouchure de la rivière Belle Rivière en provenance de la plage de SGSLL. Érosion de la flèche de sable et migration du chenal d'écoulement à proximité de la digue submergée possible, mais digue conçue pour résister à ce comportement. Accumulation de sédiments au nord-est des structures. Augmentation de la largeur de la plage attenante à la digue submergée réduite par rapport à la variante 2.	Réduction des apports à l'embouchure de la rivière Belle Rivière en provenance de la plage de SGSLL. Érosion de la flèche de sable et migration du chenal d'écoulement à proximité de la digue submergée possible, mais digue conçue pour résister à ce comportement. Formation de tombolos derrière les brise-lames. Augmentation de la largeur de la plage attenante à la digue submergée réduite par rapport à la variante 3.	Poursuite de l'érosion de la plage à SGSLL et dérive des sédiments vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière. Bien que l'arrêt des rechargements permette d'éviter l'ajout de sédiments facilement mobilisables vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière, l'érosion naturelle de la berge à court et moyen terme maintiendra des apports à la flèche de sable. Le chenal d'écoulement demeurera donc vulnérable à des événements d'obstruction partielle ou complète, selon les conditions hydrosédimentaires (érosion fluviatile au printemps et dérive littorale à l'été/automne) observées pendant les périodes d'eau libre.

	VARIABLE DISCRIMINANTE	VARIANTE 1 STATU QUO (POURSUITE DES RECHARGEMENTS)	VARIANTE 2 REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE	VARIANTE 3 AJOUT D'UN ÉPI INTERMÉDIAIRE	VARIANTE 4 AMÉNAGEMENT DE BRISE-LAMES DÉTACHÉS	VARIANTE 5 NON-INTERVENTION & RECUL DES PROPRIÉTÉS RIVERAINES
TECHNIQUE	Besoins en études supplémentaires	Suivi régulier (semi-annuel) de l'évolution de la flèche de sable et de l'évolution de la plage à SGSLL. Préparation d'un plan d'intervention d'urgence en cas d'obstruction du chenal de navigation.	Suivi régulier (annuel) de la bathymétrie à l'embouchure de la rivière Belle Rivière et de la plage à SGSLL pendant les premières années suivant les travaux pour s'assurer que le secteur évolue selon les prévisions.	Suivi régulier (annuel) de la bathymétrie à l'embouchure de la rivière Belle Rivière et de la plage à SGSLL pendant les premières années suivant les travaux pour s'assurer que le secteur évolue selon les prévisions. Études géotechniques complémentaires requises pour caractériser le comportement des structures reposant sur le remblai de l'ancien chenal de la rivière Belle Rivière.	Suivi régulier (annuel) de la bathymétrie à l'embouchure de la rivière Belle Rivière et de la plage à SGSLL pendant les premières années suivant les travaux pour s'assurer que le secteur évolue selon les prévisions. Études géotechniques complémentaires requises pour caractériser comportement des structures reposant sur le remblai de l'ancien chenal de la rivière Belle Rivière.	Suivi régulier (semi-annuel) de l'évolution de la flèche de sable et de l'évolution de la plage à SGSLL. Modélisation hydrosédimentaire plus détaillée requise pour évaluer la zone vulnérable au retrait à long-terme et élaborer un plan de relocalisation robuste.
	Effort d'entretien	Modéré. Suivi régulier de la plage de SGSLL et planification des interventions de recharge au besoin. Entretien récurrent du chenal de navigation possible si intervention de dragage requise.	Faible. Entretien d'usage à prévoir pour les structures en enrochement et suivi de la plage de SGSLL pour planification des interventions de recharge au besoin.	Faible. Entretien d'usage à prévoir pour les structures en enrochement et suivi de la plage de SGSLL pour planification des interventions de recharge au besoin.	Faible. Entretien d'usage à prévoir pour les structures en enrochement et suivi de la plage de SGSLL pour planification des interventions de recharge au besoin.	Faible à modéré. Suivi régulier de la plage de SGSLL pour s'assurer d'une progression conforme aux prévisions. Entretien récurrent du chenal de navigation possible si intervention de dragage requise.
	Coûts (\$)	Faibles à court-terme. Modérés à élevés à long-terme. Coûts récurrents pour recharger la plage de SGSLL selon les besoins et pour les études de suivi. Coûts possibles pour réaliser dragage d'urgence advenant l'obstruction complète du chenal de navigation.	Modérés à court-terme. Modérés à élevés à long-terme. Coûts initiaux pour le rehaussement de la digue submergée et la réalisation d'un recharge primaire. Coûts récurrents pour recharger la plage de SGSLL selon les besoins et pour les études de suivi.	Modérés à élevés à court-terme. Modérés à élevés à long-terme. Coûts initiaux plus élevés que la variante 2 pour le rehaussement de la digue submergée, la construction de l'épi intermédiaire et la réalisation d'un recharge primaire. Coûts récurrents plus faibles que la variante 2 pour recharger la plage de SGSLL selon les besoins et pour les études de suivi.	Élevés à court-terme. Modérés à élevés à long-terme. Coûts initiaux plus élevés que la variante 3 pour le rehaussement de la digue submergée, la construction des brise-lames et la réalisation d'un recharge primaire. Coûts récurrents plus faibles que la variante 3 pour recharger la plage de SGSLL selon les besoins et pour les études de suivi.	Très élevés à court-terme. Modérés à élevés à long-terme. Coûts initiaux élevés pour la compensation des riverains, la relocalisation de leur résidence et le retrait du perré. Possiblement plus dispendieux que la mise en place d'une technique de stabilisation de la plage. Coûts récurrents pour les études de suivi. Coûts possibles pour réaliser dragage d'urgence advenant l'obstruction complète du chenal de navigation.

	VARIABLE DISCRIMINANTE	VARIANTE 1 STATU QUO (POURSUITE DES RECHARGEMENTS)	VARIANTE 2 REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE	VARIANTE 3 AJOUT D'UN ÉPI INTERMÉDIAIRE	VARIANTE 4 AMÉNAGEMENT DE BRISE-LAMES DÉTACHÉS	VARIANTE 5 NON-INTERVENTION & RECUL DES PROPRIÉTÉS RIVERAINES
ENVIRONNEMENT	Impact sur la libre circulation du poisson	<p>Circulation réduite advenant une obstruction partielle ou complète de l'embouchure de la rivière Belle Rivière.</p> <p>Le risque d'obstruction sera toutefois circonscrit à la période estivale, qui n'est pas une période particulièrement sensible pour les poissons.</p> <p>L'accès printanier et automnal sera quant à lui maintenu grâce à l'écoulement des eaux dans la rivière Belle Rivière, qui nettoiera le chenal à l'embouchure.</p>	Réduction du risque d'obstruction du chenal d'écoulement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière pendant la saison estivale, ce qui permettra de maintenir le lien hydrique entre le lac Saint-Jean et le Grand Marais.	Réduction du risque d'obstruction du chenal d'écoulement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière pendant la saison estivale, ce qui permettra de maintenir le lien hydrique entre le lac Saint-Jean et le Grand Marais.	Réduction du risque d'obstruction du chenal d'écoulement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière pendant la saison estivale, ce qui permettra de maintenir le lien hydrique entre le lac Saint-Jean et le Grand Marais.	<p>Circulation réduite advenant une obstruction partielle ou complète de l'embouchure de la rivière Belle Rivière.</p> <p>Le risque d'obstruction sera toutefois circonscrit à la période estivale, qui n'est pas une période particulièrement sensible pour les poissons.</p> <p>L'accès printanier et automnal sera quant à lui maintenu grâce à l'écoulement des eaux dans la rivière Belle Rivière, qui nettoiera le chenal à l'embouchure.</p>
	Gestion des matériaux excavés	<p>Développement d'un plan de gestion des matériaux excavés dans l'éventualité où un dragage d'urgence serait requis à l'embouchure de la rivière Belle Rivière.</p> <p>Efforts et coûts pour la réutilisation/revalorisation ou dépôt en milieu terrestre (à confirmer).</p>	N/A	N/A	N/A	<p>Développement d'un plan de gestion des matériaux excavés dans l'éventualité où un dragage d'urgence serait requis à l'embouchure de la rivière Belle Rivière.</p> <p>Efforts et coûts pour la réutilisation/revalorisation ou dépôt en milieu terrestre (à confirmer).</p>
	Risques associés aux travaux	N/A	N/A	N/A	N/A	<p>L'érosion de la berge provoquera la chute d'arbres et pourrait intercepter des sols contaminés ou des infrastructures enfouies non répertoriées.</p>

	VARIABLE DISCRIMINANTE	VARIANTE 1 STATU QUO (POURSUITE DES RECHARGEMENTS)	VARIANTE 2 REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE	VARIANTE 3 AJOUT D'UN ÉPI INTERMÉDIAIRE	VARIANTE 4 AMÉNAGEMENT DE BRISE-LAMES DÉTACHÉS	VARIANTE 5 NON-INTERVENTION & RECUL DES PROPRIÉTÉS RIVERAINES
ENVIRONNEMENTAL	Habitat du poisson	Perturbation temporaire advenant la réalisation d'un dragage d'urgence à l'embouchure de la rivière Belle Rivière.	Empiètement dans l'habitat du poisson d'environ 800 m ² des éléments en empierrement et de 50 000 m ² pour le rechargement complet.	Empiètement dans l'habitat du poisson d'environ 2 500 m ² des éléments en empierrement de 40 000 m ² pour le rechargement complet.	Empiètement dans l'habitat du poisson d'environ 4 500 m ² des éléments en empierrement de 45 000 m ² pour le rechargement complet.	Impacts négatifs potentiels selon la nature des matériaux interceptés par l'érosion de la berge le long de la plage de SGSLL. Perturbation temporaire advenant la réalisation d'un dragage d'urgence à l'embouchure de la rivière Belle Rivière.
	Compensations pour détérioration de l'habitat du poisson	Compensations possiblement requises en cas de dragage d'urgence (selon superficies affectées).	Compensations équivalentes à la superficie d'empietement (faible) probablement requises (MELCC ou MFFP/MPO).	Compensations équivalentes à la superficie d'empietement (modéré) probablement requises (MELCC ou MFFP/MPO).	Compensations équivalentes à la superficie d'empietement (élevé) probablement requises (MELCC ou MFFP/MPO).	Compensations possiblement requises en cas de dragage d'urgence (selon superficies affectées).
	Autorisations environnementales	Dragage d'urgence ne respecte pas le cadre du décret existant. Autorisations requises par MELCC/MFFP et MPO (distance linéaire et superficie à valider ¹).	Interventions autorisées dans le cadre du décret existant. Autorisations requises par MELCC/MFFP et MPO.	Interventions autorisées dans le cadre du décret existant. Autorisations requises par MELCC/MFFP et MPO.	Interventions autorisées dans le cadre du décret existant. Autorisations requises par MELCC/MFFP et MPO.	Dragage d'urgence ne respecte pas le cadre du décret existant. Autorisations requises par MELCC/MFFP et MPO (distance linéaire et superficie à valider ¹).

¹ LISTE DES PROJETS ASSUJETTIS À LA PROCÉDURE D'ÉVALUATION ET D'EXAMEN DES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT : des travaux de dragage, de déblai, de remblai ou de redressement, à quelque fin que ce soit, à l'intérieur de la limite des inondations de récurrence de 2 ans d'une rivière ou d'un lac, sur une distance cumulative égale ou supérieure à 500 m ou sur une superficie cumulative égale ou supérieure à 5 000 m², pour une même rivière ou un même lac;

	VARIABLE DISCRIMINANTE	VARIANTE 1 STATU QUO (POURSUITE DES RECHARGEMENTS)	VARIANTE 2 REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE	VARIANTE 3 AJOUT D'UN ÉPI INTERMÉDIAIRE	VARIANTE 4 AMÉNAGEMENT DE BRISE-LAMES DÉTACHÉS	VARIANTE 5 NON-INTERVENTION & RECUL DES PROPRIÉTÉS RIVERAINES
SOCIAL	Impact sur les riverains du Grand Marais et les utilisateurs du chenal de navigation	<p>Apports de sédiments en provenance de la plage de SGSLL maintenus.</p> <p>Risque d'obstruction partielle ou complète du chenal de navigation, advenant une crue printanière faible ou modérée et/ou une dérive de sédiments supérieure à la normale provenant de la plage de SGSLL.</p> <p>Enjeux en cas d'obstruction du chenal :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Circulation nautique réduite ou interrompue; – Rehaussement des niveaux d'eau et risque d'infiltrations d'eau pour les propriétés riveraines et les installations nautiques en amont; – Migration du chenal lors de la réouverture de l'obstruction. 	<p>Interruption des apports en sédiments en provenance de la plage de SGSLL.</p> <p>Probabilité élevée de pouvoir maintenir un chenal de navigation large et non-obstrué.</p> <p>Érosion de la flèche de sable et migration du chenal de navigation à proximité de la digue submergée possible.</p>	<p>Interruption des apports en sédiments en provenance de la plage de SGSLL.</p> <p>Probabilité élevée de pouvoir maintenir un chenal de navigation large et non obstrué.</p> <p>Érosion de la flèche de sable et migration du chenal de navigation à proximité de la digue submergée possibles.</p>	<p>Interruption des apports en sédiments en provenance de la plage de SGSLL.</p> <p>Probabilité élevée de pouvoir maintenir un chenal de navigation large et non obstrué.</p> <p>Érosion de la flèche de sable et migration du chenal de navigation à proximité de la digue submergée possible.</p>	<p>Apports de sédiments en provenance de la plage de SGSLL maintenus à court et moyen-terme.</p> <p>Risque d'obstruction partielle ou complète du chenal de navigation, advenant une crue printanière faible ou modérée et/ou une dérive de sédiments supérieure à la normale provenant de la plage de SGSLL.</p> <p>Enjeux en cas d'obstruction du chenal :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Circulation nautique réduite ou interrompue; – Rehaussement des niveaux d'eau et risque d'infiltrations d'eau pour les propriétés riveraines et les installations nautiques en amont; – Migration du chenal lors de la réouverture de l'obstruction.
	Impact sur les riverains de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac	<p>Poursuite des interventions de rechargements requise, selon la sévérité d'érosion de la plage, pour assurer une largeur de plage satisfaisante.</p> <p>Grâce aux travaux de relocalisation de l'embouchure de la rivière Belle Rivière réalisés en 2019, il demeure malgré tout anticipé que les taux d'érosion de la plage de SGSLL diminuent progressivement au fil des années, réduisant par le fait même les besoins en rechargements.</p>	<p>Poursuite des interventions de rechargement requise, selon la sévérité d'érosion de la plage, pour assurer une largeur de plage satisfaisante.</p> <p>Le rehaussement de la digue submergée provoquera une accumulation de sédiments au nord-est de l'ouvrage, augmentant ainsi de façon importante la largeur de la plage à un endroit où elle est déjà très large.</p> <p>Stabilisation de la section de plage vulnérable à l'érosion seulement envisageable lorsque la zone d'influence de l'épi aura progressé jusqu'à cet endroit.</p>	<p>Poursuite des interventions de rechargement requise, selon la sévérité d'érosion de la plage, pour assurer une largeur de plage satisfaisante.</p> <p>Atteinte de l'état d'équilibre et stabilisation plus rapide de la zone de plage vulnérable à l'érosion.</p> <p>Retrait du perré de support envisageable, selon l'évolution de la plage dans la zone d'influence de l'épi intermédiaire.</p> <p>Volumes de rechargements requis plus faibles que la variante 2 et augmentation réduite de la largeur de plage attenante à la digue.</p> <p>L'aménagement de l'épi intermédiaire peut toutefois constituer une entrave aux activités récréatives sur la plage.</p> <p>Le développement d'une zone d'érosion au sud-ouest de l'ouvrage est également possible, pouvant nécessiter des interventions de rechargements si le recul de la plage y est trop sévère.</p>	<p>La création de tombolos derrière les brise-lames permettra de maintenir une plage stable et de largeur adéquate.</p> <p>L'aménagement de structures au large permet de réduire l'entrave aux activités récréatives sur la plage.</p> <p>Un rehaussement plus court de la digue submergée limitera davantage l'augmentation de la largeur de la plage au nord-est.</p> <p>Mise en place d'un volume important de rechargement recommandé lors de la construction des brise-lames afin d'éviter une érosion excessive de la plage entre les tombolos.</p>	<p>Relocalisation des propriétés riveraines.</p> <p>Érosion significative de la plage et du littoral.</p> <p>Risque élevé que les accès au bord de l'eau deviennent impraticables.</p>

	VARIABLE DISCRIMINANTE	VARIANTE 1 STATU QUO (POURSUITE DES RECHARGEMENTS)	VARIANTE 2 REHAUSSEMENT DE LA DIGUE SUBMERGÉE	VARIANTE 3 AJOUT D'UN ÉPI INTERMÉDIAIRE	VARIANTE 4 AMÉNAGEMENT DE BRISE-LAMES DÉTACHÉS	VARIANTE 5 NON-INTERVENTION & RECUL DES PROPRIÉTÉS RIVERAINES
SOCIAL	Éléments de responsabilité devant être assurés par le PSBLSJ	Advenant la nécessité d'un dragage d'urgence suivant une obstruction du chenal de navigation à l'embouchure de la rivière Belle Rivière, le PSBLSJ pourrait devenir responsable de l'entretien du chenal à long-terme (signalisation maritime, balisage, relevés, avis à la navigation, dragages d'entretiens, etc.).	Aucun nouvel élément de responsabilité anticipé.	Balisage requis sur l'épi intermédiaire.	Balisage requis sur les brise-lames détachés. Risque accru de conflit avec la circulation nautique dans le secteur.	Advenant la nécessité d'un dragage d'urgence suivant une obstruction du chenal de navigation à l'embouchure de la rivière Belle Rivière, le PSBLSJ pourrait devenir responsable de l'entretien du chenal à long-terme (signalisation maritime, balisage, relevés, avis à la navigation, dragages d'entretiens, etc.).
	Impact visuel	N/A	Impact visuel faible du rehaussement de la digue submergée. Augmentation importante de la largeur de plage au nord-est de la digue.	Impact visuel modéré de l'ajout de l'épi intermédiaire. Rehaussement plus court que la variante 2 de la digue submergée. Augmentation modérée de la largeur de plage au nord-est de la digue.	Impact visuel important des structures au large (brise-lames). Rehaussement plus court que la variante 3 de la digue submergée. Augmentation modérée de la largeur de plage au nord-est de la digue.	Éloignement des propriétés du bord de l'eau. Dégradation progressive de l'aspect visuel de la berge en raison de l'érosion.

4.7 DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

La comparaison multicritère indique que les solutions permettant de limiter la dérive de sédiments vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière (variantes 2, 3 et 4) répondent de façon plus favorable à l'ensemble des critères discriminants considérés pour la zone d'étude. Ces scénarios préconisent l'utilisation de structures (épis, brise-lames) pour stabiliser les matériaux sur la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac et éviter qu'ils n'atteignent le chenal de navigation à l'embouchure de la rivière Belle Rivière.

La variante 1 (statut quo) demeure quant à elle une approche efficace pour pallier l'érosion de la plage, mais le risque de revivre une situation comparable à celle observée en 2021 à l'embouchure de la rivière Belle Rivière persiste, en raison de la dérive des matériaux dans cette direction. Or, une obstruction partielle ou complète de l'embouchure peut avoir des impacts significatifs sur les riverains du Grand Marais et les utilisateurs du chenal de navigation. La circulation nautique entre la rivière Belle Rivière et le lac Saint-Jean peut notamment être réduite ou interrompue. Un rehaussement des niveaux d'eau en amont de l'obstruction peut également se produire, en raison de l'accumulation des apports dans la rivière. En cas de débits forts ou de niveaux d'eau élevés, ce phénomène pourrait constituer un risque d'infiltration d'eau pour les propriétés riveraines et les installations nautiques en amont. Enfin, il persiste un risque que la réouverture du chenal d'écoulement s'effectue ailleurs qu'à l'endroit de l'obstruction. La formation d'une brèche dans les autres flèches de sable observées à l'embouchure pourrait alors menacer le milieu écologique ayant colonisé ces formations et provoquer une migration subite du chenal de navigation.

Le maintien du statut quo reléguerait le contrôle de l'ensablement de l'embouchure de la rivière Belle Rivière aux aléas naturels du milieu et à l'interrelation entre l'érosion fluviatile au printemps et l'ensablement à l'été et à l'automne. Ces conditions demeurent toutefois très variables d'une année à l'autre. Compte tenu de la rapidité à laquelle les changements morphologiques peuvent se produire, le maintien d'un suivi visuel et bathymétrique fréquent serait alors requis pour surveiller la progression des zones d'accumulation et planifier les mesures adaptatives requises selon l'état du chenal de navigation.

En ce qui concerne les solutions structurales, le rehaussement seul de la digue submergée (variante 2) constitue le scénario où l'empiètement des éléments d'empierrement dans le milieu aquatique et l'impact visuel sont les plus faibles parmi les trois variantes considérées. L'élargissement de la plage attenante à la digue submergée et le volume de rechargements requis pour permettre à la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac d'atteindre son état d'équilibre sont toutefois les plus élevés. Par ailleurs, une stabilisation de la section de plage la plus vulnérable à l'érosion (devant le perré de support) ne serait envisageable que lorsque la zone d'influence de la digue/épi aurait progressé jusqu'à cet endroit.

Inversement, l'aménagement de brise-lames détachés (variante 4) constitue l'approche ayant l'empiètement des éléments d'empierrement dans le milieu aquatique et l'impact visuel les plus importants. Toutefois, l'augmentation de la largeur de la plage attenante à la digue submergée et le volume de rechargements requis pour permettre à la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac d'atteindre son état d'équilibre sont les plus faibles. La mise en place du volume complet de sédiments dès la construction des brise-lames demeure toutefois recommandée pour cette

solution, afin de faciliter la transition vers le nouvel état d'équilibre de la plage, tout en prévenant une érosion indue du littoral existant.

Dans cette perspective, l'aménagement d'un épi intermédiaire (variante 3) semble constituer un compromis entre les deux approches. La stabilisation de la section de plage la plus vulnérable à l'érosion serait plus rapide qu'avec la variante 2 et l'élargissement de la plage attenante à la digue submergée plus modéré. L'empiètement des éléments d'empierrement et l'impact visuel seraient quant à eux plus faibles que la variante 4 et la mise en place des volumes de rechargements requis pourrait continuer à être réalisée de manière progressive.

Pour l'ensemble des solutions structurales, les interventions proposées font déjà partie du décret existant du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean et les délais requis pour obtenir les autorisations environnementales ne devraient pas mettre en jeu la réalisation des travaux à l'hiver 2023. Une révision et une optimisation des dimensions et de l'emplacement des ouvrages demeurent toutefois requises en phase d'ingénierie détaillée. Par ailleurs, des études géotechniques complémentaires sont recommandées pour caractériser le comportement des structures reposant sur le remblai de l'ancien chenal de la rivière Belle Rivière.

En ce qui concerne la variante 5 (non-intervention), il est important de rappeler que ce scénario n'est pas considéré par Rio Tinto et ne cadre pas avec les engagements du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean. La variante est présentée à titre indicatif seulement pour illustrer l'envergure de la problématique d'érosion et le patrimoine potentiellement à risque selon cette approche. L'analyse démontre que la quasi-totalité des propriétés riveraines devraient être reculées afin d'assurer leur sécurité et leur pérennité. Entretemps, les matériaux érodés sur la berge continueraient à dériver vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière, perpétuant le risque d'obstruction du chenal de navigation advenant la conjoncture de conditions hydrodynamiques comparables à celles observées en 2021.

5 CONCLUSION

Les objectifs de la présente étude étaient de faire un diagnostic du phénomène d'ensablement de l'embouchure de la rivière Belle Rivière observé à l'été 2021, de comprendre les causes possibles ainsi que les facteurs aggravants, et de proposer des solutions permettant de bonifier l'efficacité des structures en place à Saint-Gédéon-sur-le-Lac, en plus de minimiser le risque d'obstruction du chenal d'écoulement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière.

Les analyses effectuées démontrent que l'année 2021 a été caractérisée par une combinaison de plusieurs facteurs rares. Spécifiquement, la crue printanière dans la rivière Belle Rivière a été environ 60% plus faible que la normale et les apports de sédiments en provenance de la plage de Saint-Gédéon-sur-le-Lac ont été près de deux fois plus importants que la moyenne historique. Ces conditions se seraient donc traduites par un « nettoyage » insuffisant de l'embouchure de la rivière Belle Rivière au printemps, suivi d'une accumulation de sédiments plus importante qu'à l'habitude pendant la période estivale. Le contexte était donc propice à l'engraissement de la flèche de sable à l'embouchure de la rivière Belle Rivière, qui est présente depuis plusieurs années, et à l'ensablement du chenal d'écoulement.

Dans l'éventualité où la crue printanière aurait été plus « standard », un emmagasinement accru de matériaux provenant de la plage aurait pu se produire, diminuant ainsi le risque d'obstruction du chenal d'écoulement, mais il demeure possible que l'obstruction ait simplement été décalée, sans être évitée pour autant.

Par ailleurs, compte tenu de la quantité importante de sédiments toujours présents sur la flèche de sable, le risque d'obstruction du chenal persiste en 2022, et ce, même advenant un retour d'une dynamique plus « standard » lors du nettoyage printanier et de l'ensablement estival. Une crue supérieure à la moyenne pourrait être requise pour assurer un nettoyage adéquat du chenal d'écoulement. Un retour à la normale pourrait même s'échelonner sur plus d'une année. D'autre part, dans un contexte de changements climatiques, caractérisés notamment par moins de neige en hiver et des périodes de redoux plus fréquentes, il est possible que des crues printanières faibles, comme celle observée en 2021, deviennent plus fréquentes.

Pour permettre la poursuite des rechargements et minimiser le risque d'obstruction du chenal d'écoulement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière, la mise en place de structures de rétention des sédiments (épis, brise-lames) est recommandée. À cet effet, plusieurs variantes d'aménagement ont été développées dans le cadre de cette étude et ont été examinées à l'aide d'une analyse multicritère s'appuyant sur des variables discriminantes de natures techniques, environnementales et sociales. Les variantes incluaient le rehaussement partiel de la digue submergée, combiné ou non à l'ajout d'épis ou de brise-lames détachés le long de la plage. Par ailleurs, des solutions considérant le maintien du statu quo (poursuite des rechargements de la plage), ainsi que la non-intervention (arrêt des rechargements et recul des propriétés riveraines) ont également été examinées, mais ne sont pas considérées par Rio Tinto.

La comparaison multicritère conclut que les solutions permettant de limiter la dérive de sédiments vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière à l'aide de structures de rétention répondent de façon plus favorable à l'ensemble des critères discriminants considérés pour la zone d'étude. Plus spécifiquement, le rehaussement partiel de la digue submergée, combiné à l'aménagement d'un épi intermédiaire (variante 3) se distingue par rapport au rehaussement seul de la digue submergée (variante 2) et l'aménagement de brise-lames détachés (variante 4).

Cette variante permettrait une stabilisation plus rapide de la plage devant le perré de support, tout en limitant l'élargissement de la plage attenante à la digue submergée. L'empietement et l'impact visuel des éléments d'empierrement seraient quant à eux plus faibles que ceux des brise-lames et la mise en place des volumes de rechargements requis pourrait continuer à être réalisée de manière progressive. Par ailleurs, avec la variante 3, le retrait du perré de support pourrait être envisagé et analysé au cours des prochaines phases.

Pour l'ensemble des solutions structurales, les interventions proposées font déjà partie du décret existant du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean et les délais requis pour obtenir les autorisations environnementales ne devraient pas mettre en jeu la réalisation des travaux à l'hiver 2023. Une révision et une optimisation des dimensions et de l'emplacement des ouvrages demeurent toutefois requises en phase d'ingénierie détaillée. Par ailleurs, des études géotechniques complémentaires sont recommandées pour caractériser le comportement des structures reposant sur le remblai de l'ancien chenal de la rivière Belle Rivière.

Le maintien du statu quo (variante 1) ne permet pas, pour sa part, d'adresser la problématique d'ensablement à l'embouchure de la rivière Belle Rivière. L'évolution du milieu serait alors conditionnée par les aléas naturels et continuerait à dépendre de l'interrelation entre l'érosion fluviatile au printemps et l'ensablement à l'été et à l'automne. Le maintien de suivis visuels et bathymétriques fréquents serait alors requis pour surveiller la progression des zones d'accumulation et planifier les mesures adaptatives requises selon l'état du chenal de navigation.

Finalement, en ce qui concerne la variante 5 (non-intervention), il est important de rappeler que ce scénario n'est pas considéré par Rio Tinto et ne cadre pas avec les engagements du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean et que la variante est présentée à titre indicatif seulement pour illustrer l'envergure de la problématique d'érosion et le patrimoine potentiellement à risque selon cette approche. L'analyse démontre que la quasi-totalité des propriétés riveraines devraient être reculées afin d'assurer leur sécurité et leur pérennité. Entretemps, les matériaux érodés sur la berge continueraient à dériver vers l'embouchure de la rivière Belle Rivière, perpétuant ainsi le risque d'obstruction du chenal de navigation advenant la conjoncture de conditions hydrodynamiques comparables à celles observées en 2021.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DUPUIS, P., TOURNIER, J.-P., CARON, O. 1996. *Wave climate of Large Reservoirs and a Revised Wave Hindcast Formula*. ICCE No 25 (1996): Proceedings of 25th Conference on Coastal Engineering, Orlando, Florida. 14 p.
- LASALLE-NHC. 2021. *Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean – Suivi annuel des conditions érosives – Analyse de la dynamique sédimentaire de l'embouchure de la rivière Belle Rivièr*e. Rapport d'étude R.0398. Rapport final de Lasalle | NHC à Rio Tinto Alcan. 25 p.
- LASALLE-NHC. 2016. *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 1. Rapport final de Lasalle | NHC à Rio Tinto Alcan. 216 p. et annexes.

ANNEXE

A RAPPORT D'ÉTUDE LASALLE-NHC



**PROGRAMME DE STABILISATION DES BERGES DU LAC SAINT-JEAN
SUIVI ANNUEL DES CONDITIONS ÉROSIVES – ANALYSE DE LA DYNAMIQUE
SÉDIMENTAIRE DE L'EMBOUCHURE DE BELLE-RIVIÈRE**

RAPPORT D'ÉTUDE R.0398

Préparé pour:

Rio Tinto
Québec

Préparé par:

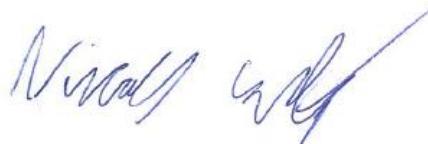
Lasalle | NHC
Montréal, Québec

Novembre 2021

Préparé par:



Tristan Aubel, ing., M.Eng.
Ingénieur de projets, associé
No OIQ : 129611



Nicolas Gallant, ing., M.Eng.
Ingénieur de projets
No OIQ : 5047189

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** et de leurs représentants autorisés dans le cadre spécifique du projet **Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (2017-2026) – Suivi des conditions érosives**. 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**.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	2
1. INTRODUCTION.....	3
2. MÉTHODOLOGIE	4
2.1 Données utilisées.....	4
2.2 Outils utilisés	4
2.3 Synthèse de la méthodologie	4
3. DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE DE L'EMBOUCHURE.....	6
3.1 Analyse globale.....	6
3.2 Impacts du niveau d'eau, du débit de rivière et des vagues sur la dynamique sédimentaire	11
3.2.1 Impact du niveau d'eau du lac	11
3.2.2 Impact du débit de Belle-Rivière	11
3.2.3 Impact de l'orientation des vagues	11
4. CARACTÉRISATION DE L'ANNÉE 2021 (AVRIL-JUILLET)	16
4.1 Crue de printemps 2021	16
4.2 Comparaison des vagues à St-Gédéon Sud	16
4.3 Comparaison du transport littoral à St-Gédéon Sud	18
4.4 Synthèse	19
5. IMPACTS DES TRAVAUX D'HIVER 2019	20
6. IMPACTS DES RECHARGEMENTS RÉCURRENTS À SAINT-GÉDÉON	23
7. CONCLUSION	24

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Illustration des modèles 2D (global et local).....	5
Figure 2: Résultats de modélisation 2D des vagues et des courants (tempête du 23 mai 2021).....	7
Figure 3 : Résultats de modélisation 2D du transport sédimentaire (tempête du 23 mai 2021)	8
Figure 4 : Progression de la flèche sableuse vers le sud (Photos satellites Sentinel-2).....	9
Figure 5 : Nettoyage de l'embouchure de la rivière (Photos satellites Sentinel-2).....	10
Figure 6 : Impact du niveau d'eau du lac sur la progression de la flèche sableuse vers le sud.....	12
Figure 7: Impact du niveau d'eau du lac sur le nettoyage de l'embouchure de la rivière	13
Figure 8: Impact du débit de Belle-Rivière sur le nettoyage de l'embouchure	14
Figure 9 : Impact de la direction des vents sur la progression de la flèche sableuse	15
Figure 10 : Comparaison de la rose des vagues entre l'année 2021 et la période de référence 1993-2019 en conservant uniquement les vagues du début de la période d'eau libre jusqu'au 31 juillet.....	17
Figure 11 : Comparaison du transport littoral brut entre l'année 2021 et la période de référence 1993-2019 en conservant uniquement le transport entre la période d'eau libre et le 31 juillet.....	18
Figure 12: Comparaison du transport littoral net entre l'année 2021 et la période de référence 1993-2019 en conservant uniquement le transport entre la période d'eau libre et le 31 juillet.....	19
Figure 13 : Bathymétrie de l'embouchure avant et après les travaux d'hiver 2019	20
Figure 14 : Comparaison des résultats de modélisation de dépôt de sédiments après 37h de tempête..	22

1. INTRODUCTION

Le 31 juillet 2021, il a été rapporté que le chenal de l'embouchure de Belle-Rivière a été obstrué en raison du dépôt de sédiments menant à une progression de la flèche sableuse vers le sud. La présente note technique a pour but d'analyser la dynamique sédimentaire de l'embouchure de la rivière et de comprendre les causes potentielles ayant menées à l'obstruction du chenal durant l'été 2021.

La présente note technique est divisée en 7 chapitres. Le chapitre 2 résume brièvement la méthodologie utilisée dans cette étude. Le chapitre suivant analyse la dynamique sédimentaire de l'embouchure. Le chapitre 4 enchaîne avec une caractérisation de l'année 2021 afin d'analyser les événements ayant menés à l'obstruction du chenal. Les chapitres 5 et 6 abordent respectivement les questions d'impacts des travaux d'hiver 2019 et de rechargements à Saint-Gédéon. Finalement, la conclusion est exposée au chapitre 7 de cette note.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Données utilisées

Sans s'y limiter, les données utilisées dans la présente étude se résument comme suit :

- Les photos satellites historiques de Sentinel-2 (2016-présent);
- Les débits de Belle-Rivière mesurés à la station #061307 (facteur de transposition de 1.5);
- Les vagues modélisées par le modèle global de Lasalle|NHC (figure 1a) sur la base des vents à la station de Mistook;
- Les données bathymétriques compilées dans le projet d'étude de réaménagement de l'embouchure de Belle-Rivière (R0195 – novembre 2018);
- Les plans de la digue submersible construit en hiver 2019;
- Les données bathymétriques récentes mesurées le 17 novembre 2020 (post-travaux);

2.2 Outils utilisés

Trois modèles numériques ont été utilisés pour réaliser la présente étude :

- Le modèle global 2D de génération de vagues utilisés dans la grande étude de 2016 ainsi que dans les suivis annuels depuis 2016 (figure 1a). Ce modèle est alimenté par les vents de Mistook majorés d'un facteur de 1.05 ainsi que par les niveaux d'eau pondérés du lac (niveau d'eau officiel du lac).
- Le modèle local 2D du secteur de l'embouchure de Belle-Rivière (figures 1b et 1c). Ce modèle est forcé au large par les vagues générées par le modèle global et par un débit à Belle-Rivière.
- Le modèle LITPACK (1D) de transport sédimentaire littoral à Saint-Gédéon (voir étendue du modèle sur la figure 1a). Ce modèle est alimenté au large par les vagues générées par le modèle global ainsi que par les niveaux d'eau pondérés.

2.3 Synthèse de la méthodologie

La présente étude s'est réalisée principalement sur la base d'analyse des résultats de modélisation et de photos satellites. L'étude s'est réalisée en deux grandes étapes.

En premier lieu, les résultats de modélisation et les photos satellites ont été mis à profit pour comprendre le comportement hydrosédimentaire de l'embouchure de Belle-Rivière (section 3.1). Cette première étape se veut qualitative plutôt que quantitative.

En second lieu, des comparaisons d'ordre quantitatives ont été effectuées sur la base des résultats de modélisation numérique (sections 3.2, 4 et 5). Cette étape permet d'évaluer le niveau d'influence de divers paramètres (niveau du lac, débit de Belle-Rivière, bathymétrie, etc.) sur la dynamique sédimentaire de l'embouchure de la rivière ou encore de comparer et situer l'année 2021 par rapport aux années antérieures.

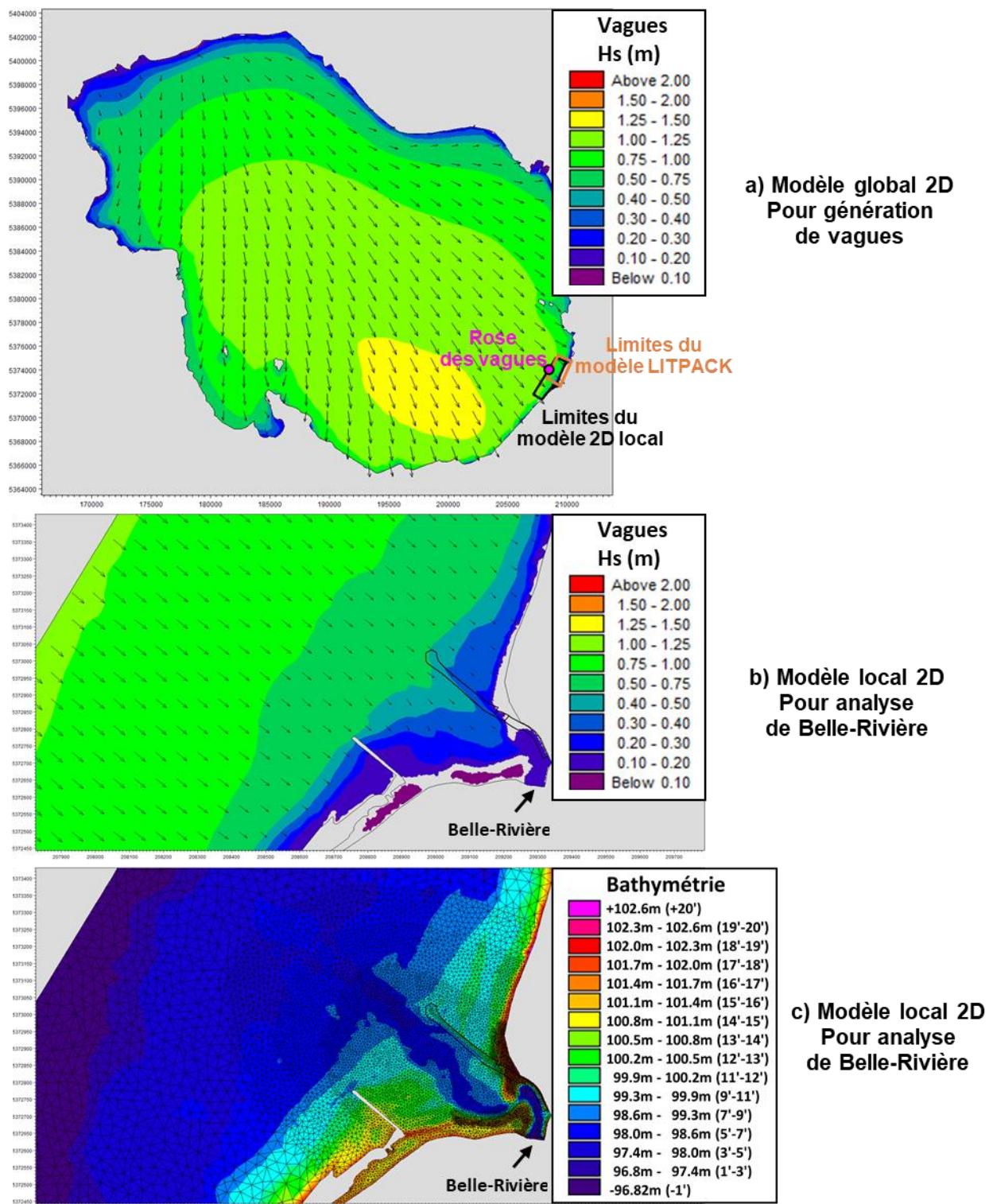


Figure 1 : Illustration des modèles 2D (global et local)

Note : Le fond du lac est à une élévation de 96.2 m au point d'extraction de la rose des vagues

3. DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE DE L'EMBOUCHURE

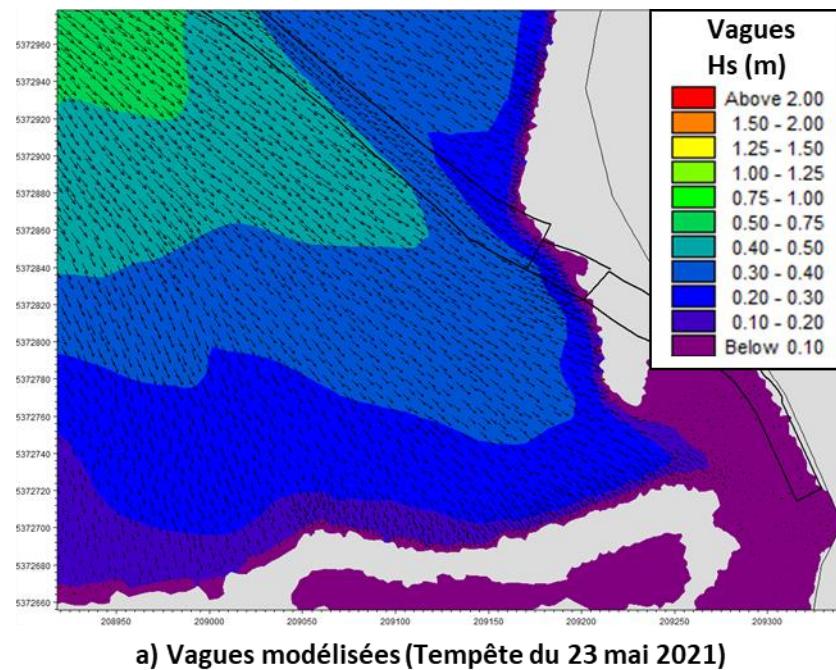
3.1 Analyse globale

Sur l'échelle temporelle de l'ordre de l'année, la dynamique sédimentaire de l'embouchure de Belle-Rivière peut se diviser en deux étapes principales, soit la progression de la flèche sableuse vers le sud durant l'ensemble de la période d'eau libre et le nettoyage de l'embouchure de la rivière durant la crue printanière.

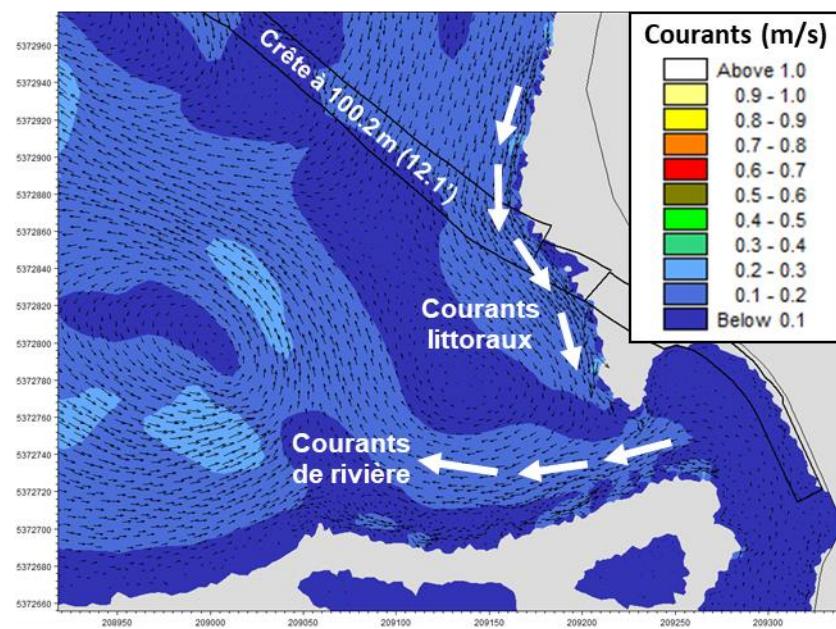
Les figures 2 et 3 illustrent les résultats de modélisation 2D de la tempête du 23 mai 2021 où des vents de 32 km/h en provenance du NNO ont été observés sur le lac. La figure 2b affiche les courants de rivière engendrés par un débit d'étiage de 5 m³/s ainsi que les courants littoraux qui résultent de l'action des vagues générées durant la tempête. Ces courants littoraux génèrent un transport sédimentaire orienté vers le sud tel qu'illustré sur la figure 3a. Sur cette même figure, deux zones sont identifiées comme étant propices à l'accumulation de sédiments en raison d'une vitesse d'écoulement plus faible. Ainsi, l'extrémité sud de la flèche sableuse a tendance à se prolonger davantage vers le sud avec le temps sous l'effet des vagues. Ce constat peut également être observé sur les photos satellites historiques prise en mai 2021 ainsi qu'en juillet 2021 (voir comparaison à la figure 4).

Au printemps, la crue permet d'augmenter la vitesse des courants de rivière dans l'embouchure de Belle-Rivière. Cela résulte en une érosion des sédiments ayant été déposés au cours de l'année précédente et donc, à un certain nettoyage de la flèche sableuse au début de la période d'eau libre (généralement au mois de mai). Toutefois, un certain débit minimum demeure nécessaire pour générer les vitesses d'écoulement permettant d'éroder les sédiments dans l'embouchure. À cet effet, la figure 5 montre que les débits de crue d'une période de retour 50 ans (5a) et 10 ans (5b) semblent amplement suffisants pour bien nettoyer l'embouchure de la rivière alors que le débit moyen d'une récurrence d'environ 2 ans (5c) permet de nettoyer légèrement l'embouchure. En contrepartie, la figure 5d révèle que le débit de crue de printemps 2021 n'a évidemment pas été assez fort pour nettoyer l'embouchure de la rivière. À titre indicatif, cette crue se caractérise par un non-dépassement d'une période de retour de 50 ans. Autrement dit, la probabilité qu'une crue de printemps n'excède pas celle de 2021 est de 1/50 ce qui révèle que la très faible crue de 2021 est un événement rare.

Les photos satellites de haute-résolution Sentinel-2 débutant uniquement à partir de l'année 2016, il devient difficile de déterminer avec certitude le débit de crue minimum permettant de nettoyer adéquatement l'embouchure de Belle-Rivière. Toutefois a priori, l'analyse des photos satellites d'automne 2019 et de printemps 2020 (figure 5c) semble pointer vers un débit de crue moyenne (référence d'environ 2 ans) pour permettre le nettoyage naturel de l'embouchure. Cependant, il est aussi fort probable que le débit minimum dépendra de la quantité de sédiments ayant été accumulée dans l'embouchure au cours de l'année précédente. En effet, une plus grande accumulation de sédiments dans l'embouchure, tel qu'observée au courant de l'année 2021, pourrait nécessiter un débit de crue davantage élevé pour permettre le nettoyage adéquat de l'embouchure.

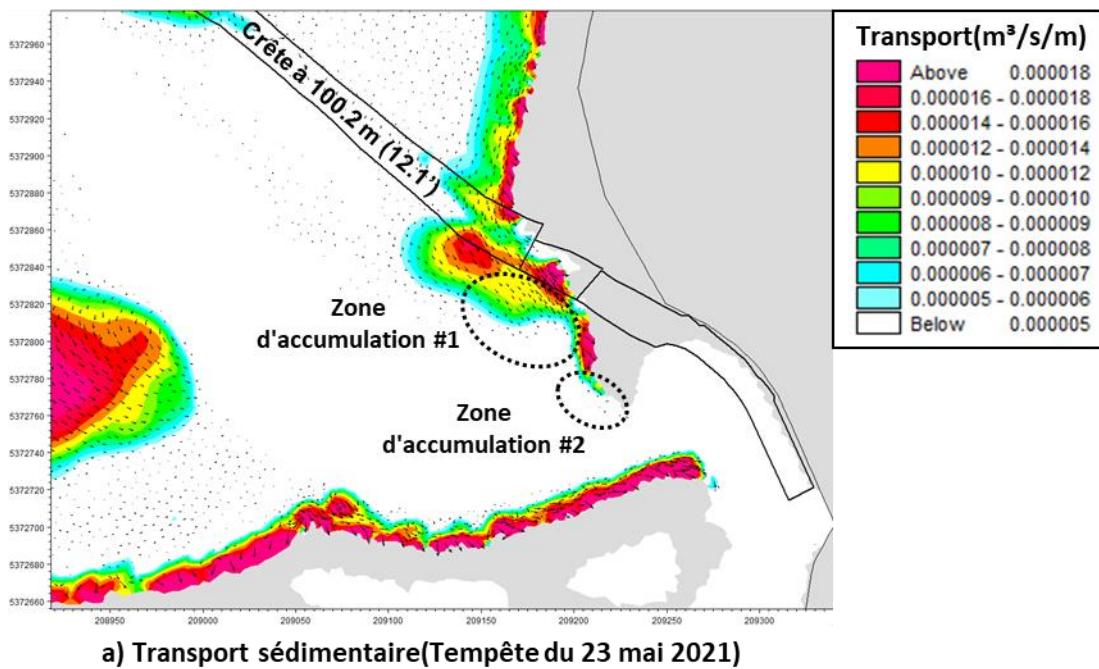


a) Vagues modélisées (Tempête du 23 mai 2021)

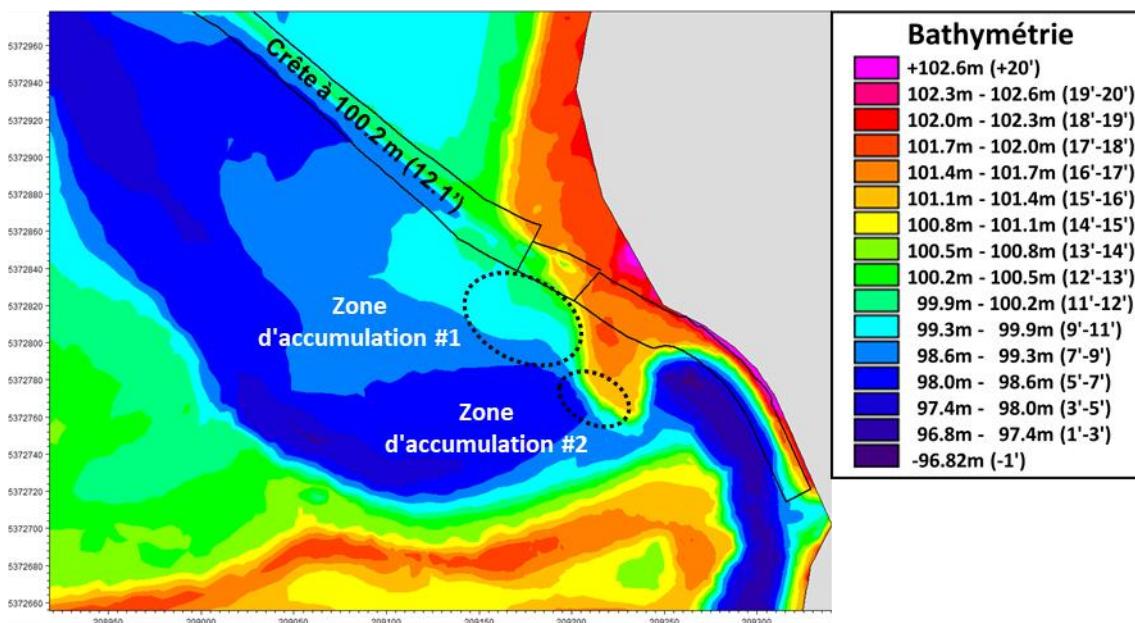


b) Courants modélisées (Tempête du 23 mai 2021)

Figure 2: Résultats de modélisation 2D des vagues et des courants (tempête du 23 mai 2021)



a) Transport sédimentaire(Tempête du 23 mai 2021)



b) Bathymétrie (relevés du 17 novembre 2020)

Figure 3 : Résultats de modélisation 2D du transport sédimentaire (tempête du 23 mai 2021)



Figure 4 : Progression de la flèche sableuse vers le sud (Photos satellites Sentinel-2)

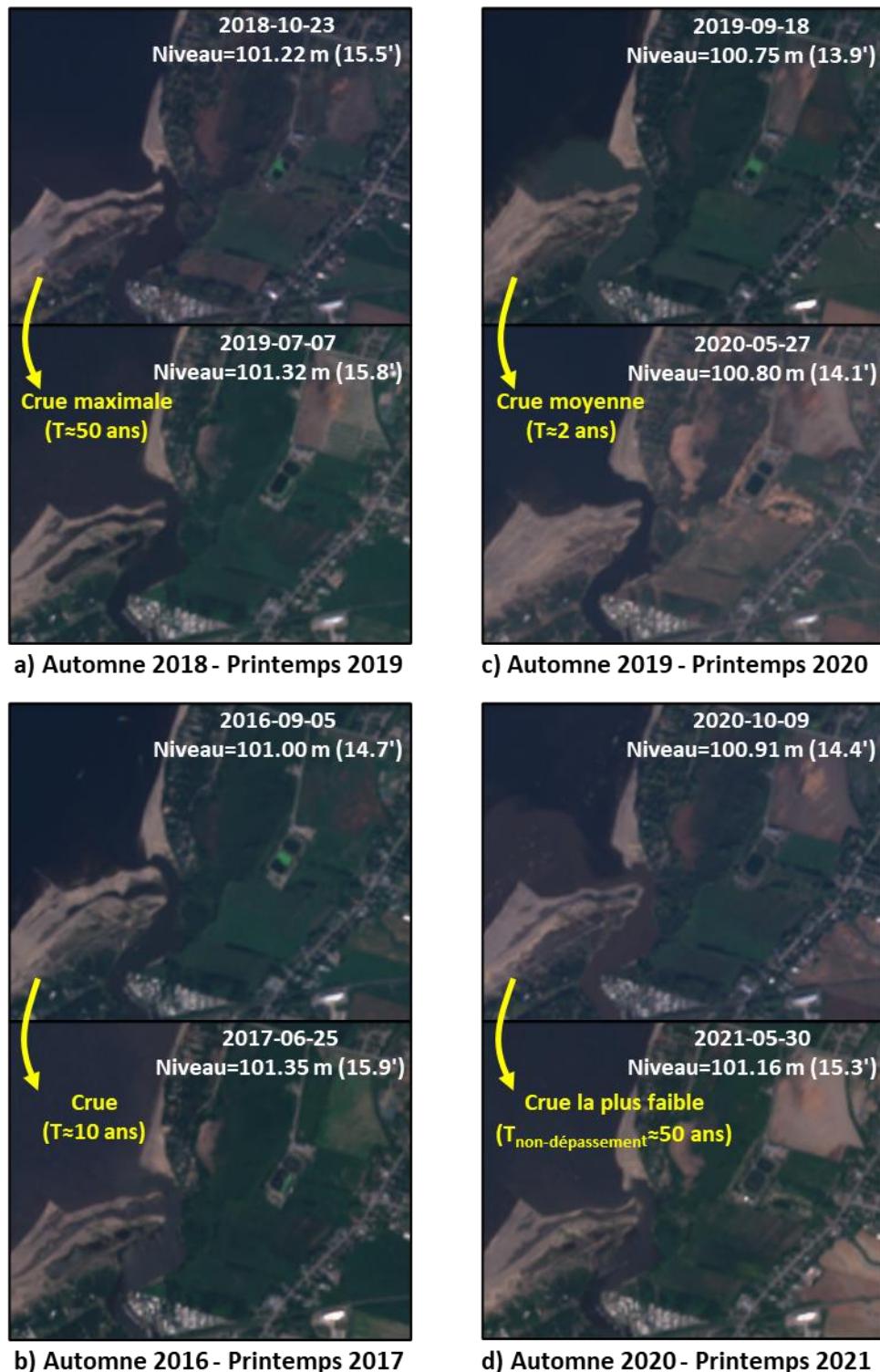


Figure 5 : Nettoyage de l'embouchure de la rivière (Photos satellites Sentinel-2)

3.2 Impacts du niveau d'eau, du débit de rivière et des vagues sur la dynamique sédimentaire

Dans le but d'analyser les impacts du niveau d'eau du lac, du débit de Belle-Rivière et de la direction des vagues sur la dynamique sédimentaire de l'embouchure, diverses simulations 2D ont été lancées en variant un seul des trois paramètres à la fois. Par ailleurs, l'impact du réaménagement de l'embouchure de Belle-Rivière, réalisé en hiver 2019, est traité à la section 5 de ce rapport.

3.2.1 Impact du niveau d'eau du lac

Le niveau d'eau du lac engendre un impact sur la dynamique sédimentaire de l'embouchure et ce, autant sur la progression de la flèche sableuse vers le sud que sur le nettoyage de l'embouchure durant la crue de printemps.

La figure 6 montre qu'un rehaussement du niveau du lac accélère le dépôt de sédiments sur la flèche sableuse. Cela s'explique par le fait qu'un niveau d'eau plus élevé permet de maintenir les vagues plus hautes en raison d'une dissipation plus faible de celles-ci. Néanmoins, les patrons de transport sédimentaire demeurent semblables à niveau bas (figure 6a) ainsi qu'à niveau haut (figure 6b).

La figure 7 révèle qu'un abaissement du niveau d'eau tend à augmenter la vitesse d'écoulement dans l'embouchure de la rivière. Cela s'explique, d'une part, par l'augmentation du gradient hydraulique (pente de l'eau plus abrupte) et, d'autre part, par la contraction plus prononcée de l'écoulement en raison de la diminution de l'aire mouillée dans le secteur de la flèche sableuse. Ainsi, un niveau d'eau plus bas tend à favoriser le nettoyage naturel de l'embouchure de la rivière en temps de crue.

3.2.2 Impact du débit de Belle-Rivière

Tel qu'analysé précédemment à l'aide des photos satellites, un débit de crue plus élevé permet de favoriser un nettoyage naturel de l'embouchure de la rivière. Cette analyse est cohérente avec les résultats de modélisation 2D présentés à la figure 8 : l'érosion à l'endroit de la flèche sableuse est plus élevée avec un débit de 50 m³/s (figure 8b) qu'avec un débit de 20 m³/s (figure 8a).

3.2.3 Impact de l'orientation des vagues

La figure 9 offre un comparatif des vagues générées par des vents de vitesse similaire (32 versus 33 km/h), mais d'orientation différente (340° versus 290°). Cette figure montre que les patrons de vagues sont similaires sur les figures 9a et 9b et ce, autant au niveau de la hauteur de vagues que de l'orientation de celles-ci. Cela s'explique par le fait que, puisque la profondeur d'eau est relativement faible dans le secteur de Belle-Rivière, le phénomène de réfraction de vagues devient très important dans ce secteur. Autrement dit, les vagues sont fortement impactées par le frottement avec le fond ce qui tend à les réorienter vers une direction similaire sur les figures 9a et 9b. Ainsi, les résultats de modélisation révèlent que ce n'est pas un événement de vents en particulier qui est responsable de la progression de la flèche sableuse vers le sud, mais bien une combinaison de l'ensemble des tempêtes survenant durant la période d'eau libre.

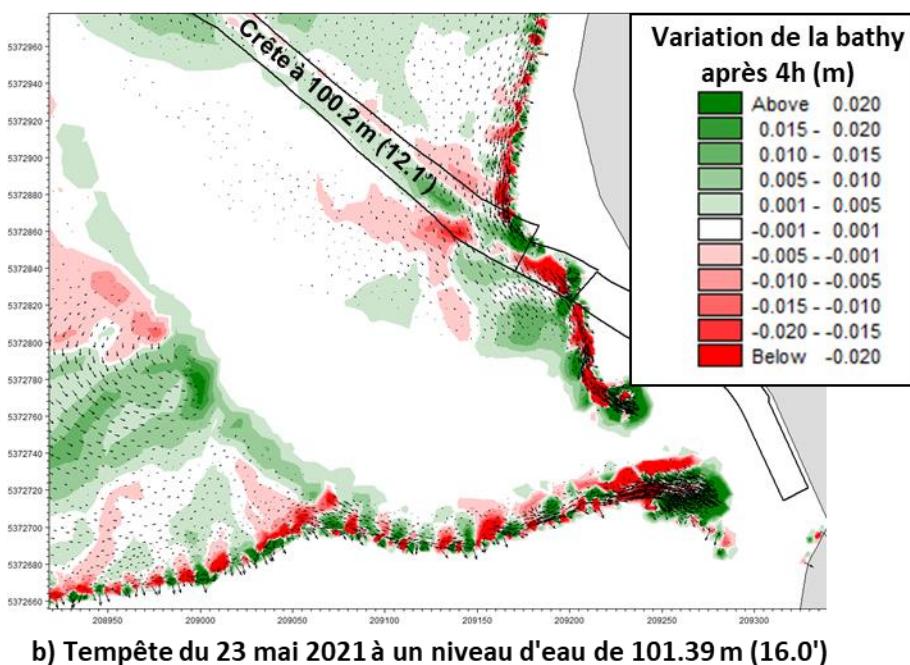
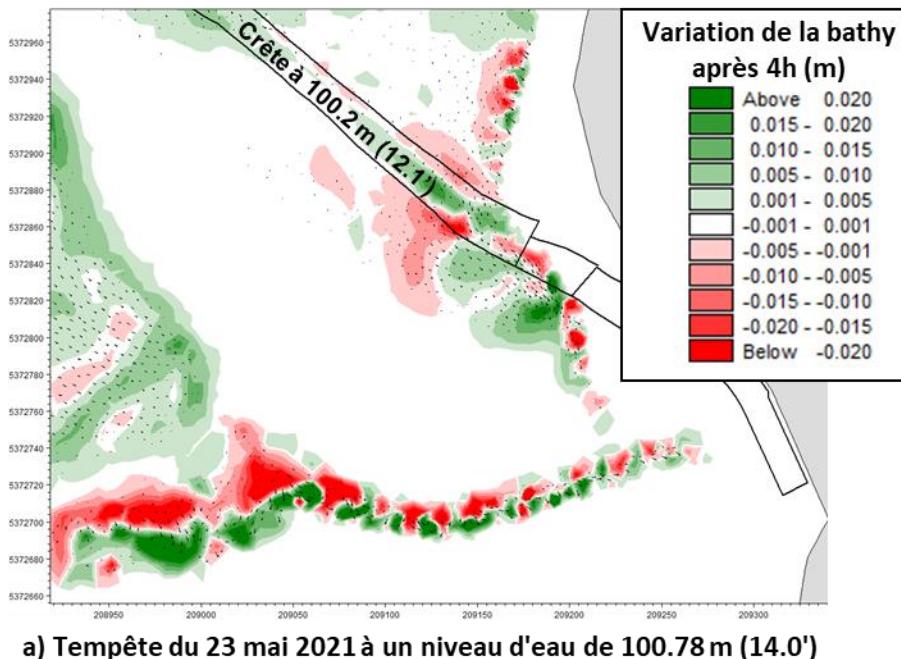
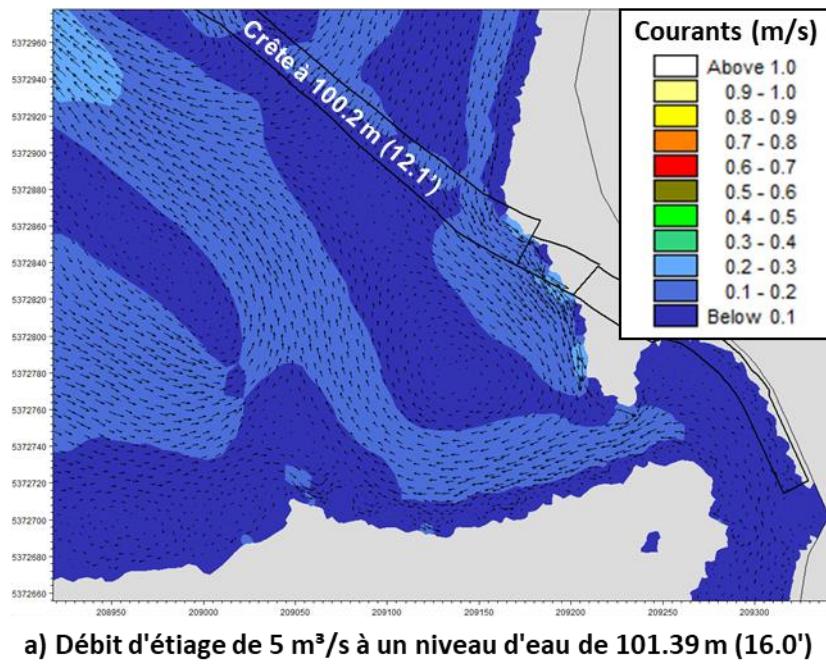
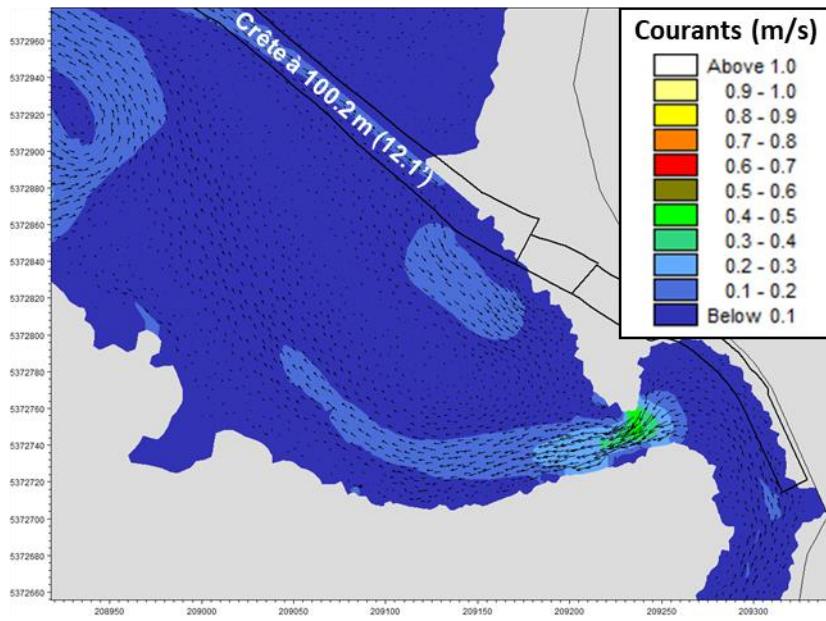


Figure 6 : Impact du niveau d'eau du lac sur la progression de la flèche sableuse vers le sud



a) Débit d'étiage de 5 m³/s à un niveau d'eau de 101.39 m (16.0')



b) Débit d'étiage de 5 m³/s à un niveau d'eau de 100.02 m (11.5')

Figure 7: Impact du niveau d'eau du lac sur le nettoyage de l'embouchure de la rivière

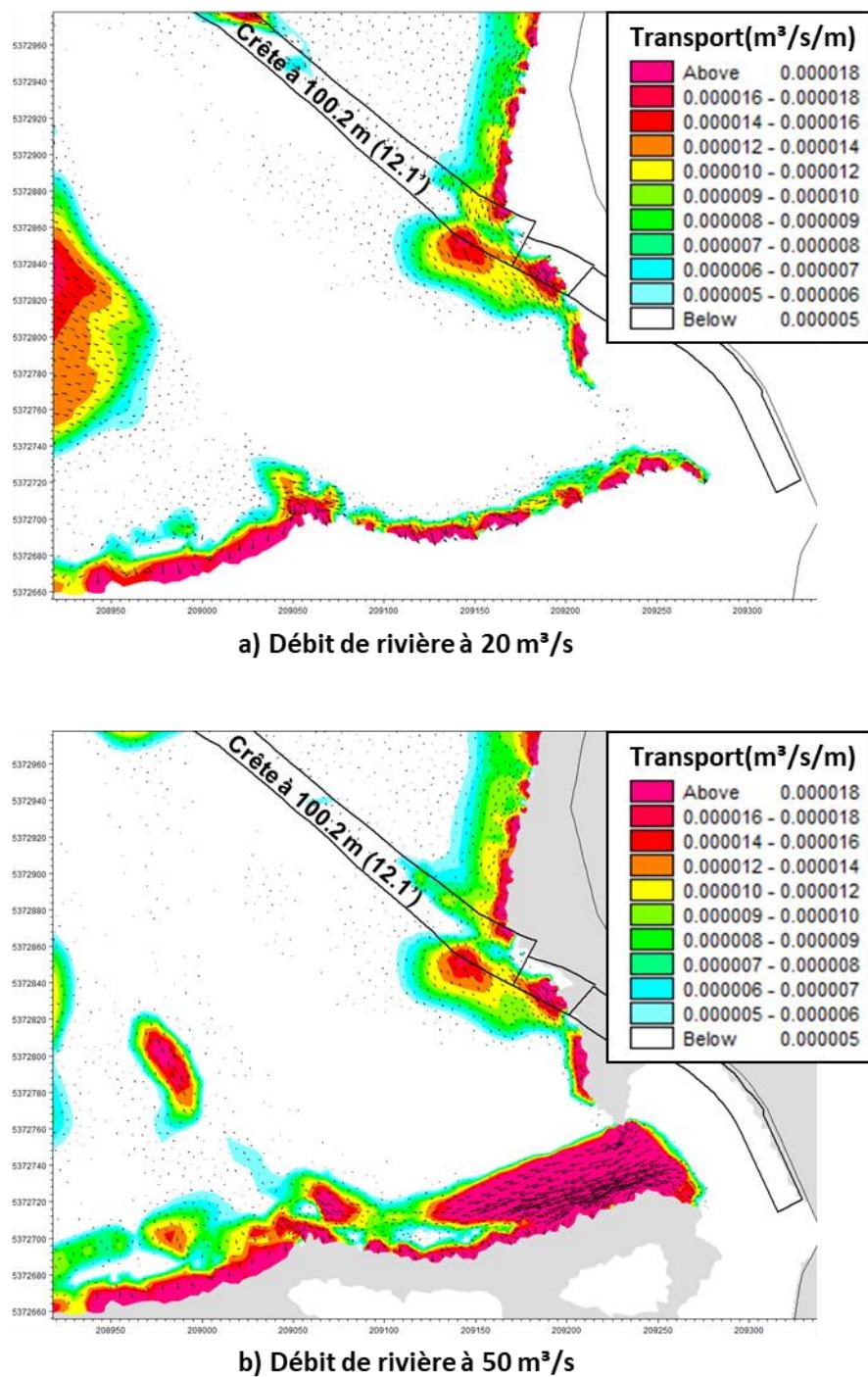
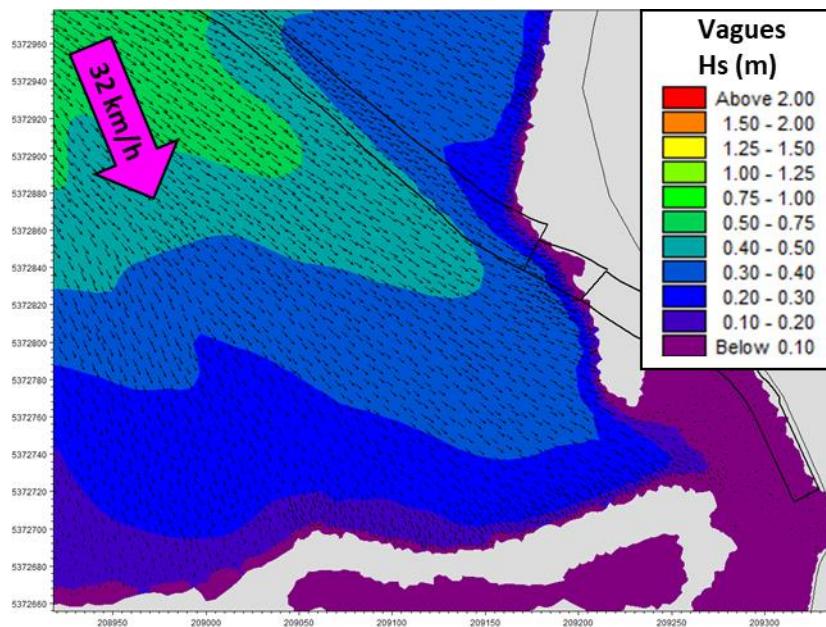
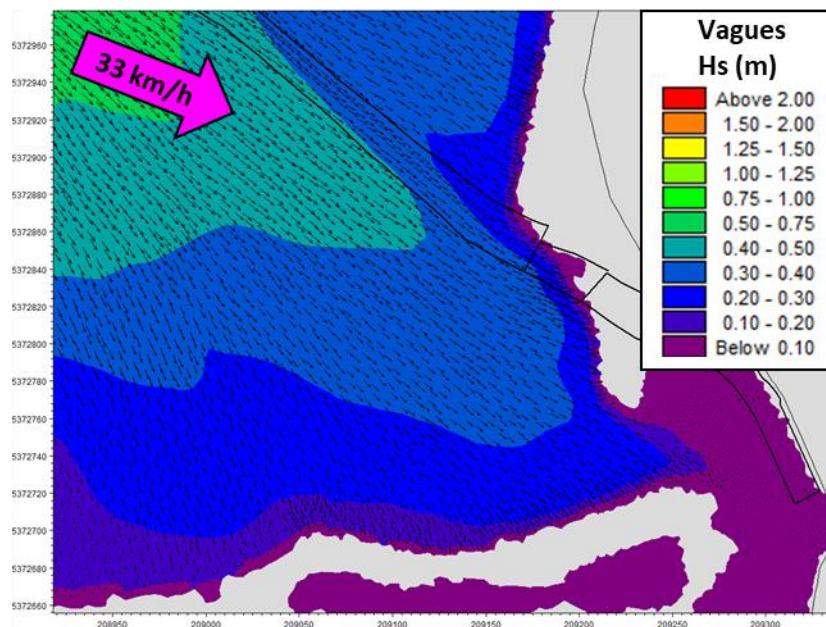


Figure 8: Impact du débit de Belle-Rivière sur le nettoyage de l'embouchure



a) Vagues générées par des vents de 32 km/h en provenance du NNO (340°)



b) Vagues générées par des vents de 33 km/h en provenance de l'ONO (290°)

Figure 9 : Impact de la direction des vents sur la progression de la flèche sableuse

4. CARACTÉRISATION DE L'ANNÉE 2021 (AVRIL-JUILLET)

4.1 Crue de printemps 2021

Tel que mentionné précédemment, la crue de printemps 2021 se caractérise par un non-dépassement d'une période de retour de 50 ans. Autrement dit, la probabilité qu'une crue de printemps n'excède pas celle de 2021 est de 1/50 ce qui révèle que la très faible crue de 2021 est un événement rare. Le potentiel de nettoyage naturel de l'embouchure de Belle-Rivière était donc très faible pour l'année 2021.

4.2 Comparaison des vagues à St-Gédéon Sud

Dans le but de caractériser le climat de vagues de l'année 2021, les vagues modélisées pour l'année 2021 ont été comparées avec celles modélisées pour la période de référence de 1993 à 2019. À cet effet, seules les vagues modélisées entre le début de la période d'eau libre (variant d'une année à l'autre) et le 31 juillet (fermeture de l'embouchure de Belle-Rivière en 2021) ont été conservées pour réaliser la comparaison et ce, autant pour l'année 2021 que pour la période de référence 1993-2019. Ce triage de données a pour but d'éliminer les biais potentiels dans l'exercice de comparaison des vagues.

La figure 10 illustre les roses de vagues à proximité de Belle-Rivière pour la période de référence 1993-2019 et pour l'année 2021 (voir localisation du point d'extraction sur la figure 1 à la p.5). Ce comparatif montre que les vagues sont plus fréquentes et énergétiques pour l'année 2021 par rapport à la moyenne de la période de référence et ce, surtout pour les vagues étant orientées d'une manière à générer un transport sédimentaire vers le sud (voir ligne en pointillée sur la figure 10). La section 4.3 aborde la question du transport sédimentaire littoral à St-Gédéon Sud à proximité de l'embouchure de Belle-Rivière.

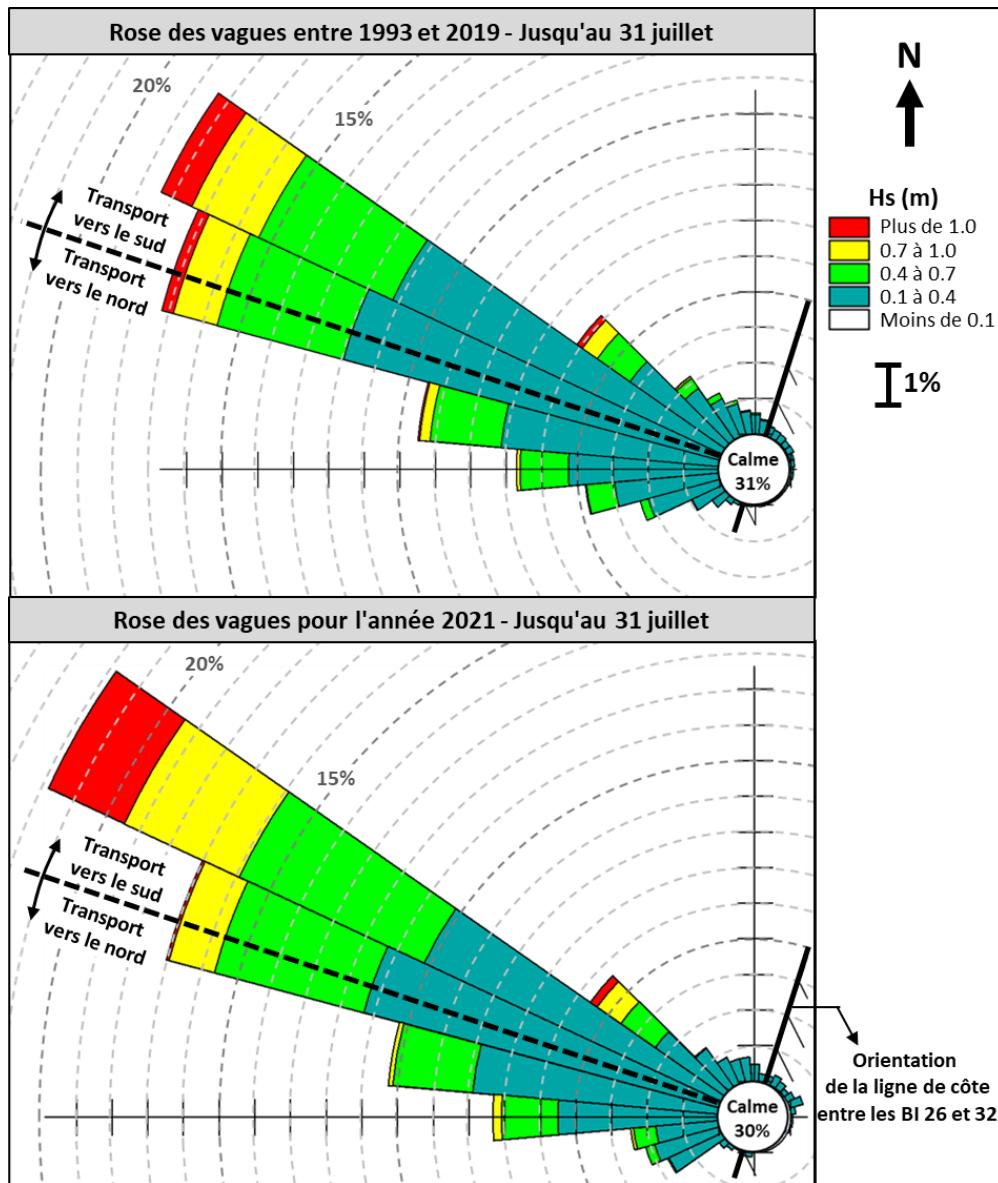


Figure 10 : Comparaison de la rose des vagues entre l'année 2021 et la période de référence 1993-2019 en conservant uniquement les vagues du début de la période d'eau libre jusqu'au 31 juillet

4.3 Comparaison du transport littoral à St-Gédéon Sud

Le modèle LITPACK a été utilisé pour modéliser le transport littoral à long-terme dans le secteur de Saint-Gédéon Sud dans le but de comparer l'apport sédimentaire à la flèche sableuse pour l'année 2021 par rapport à la moyenne de la période de référence 1993-2019. Tout comme dans l'analyse des roses de vagues, seul le transport littoral modélisé entre le début de la période d'eau libre (variant d'une année à l'autre) et le 31 juillet (fermeture de l'embouchure de Belle-Rivière en 2021) a été conservé pour réaliser la comparaison et ce, autant pour l'année 2021 que pour la période de référence 1993-2019.

Les figures 11 et 12 offrent un comparatif du transport littoral (brut et net respectivement) entre l'année 2021 et la période de référence 1993-2019. Ce comparatif révèle qu'à l'extrémité sud du secteur de Saint-Gédéon, le transport littoral orienté vers la gauche (et donc vers Belle-Rivière) est beaucoup plus élevé (+116%) pour l'année 2021 comparativement aux années de la période de référence 1993-2019. Ainsi, le printemps et l'été de l'année 2021 se caractérisent par un apport sédimentaire beaucoup plus important permettant d'accélérer la progression de la flèche sableuse dans l'embouchure de la rivière. En effet au cours des 27 dernières années, seule l'année 2010 s'est caractérisée par un apport sédimentaire encore plus important que celui de l'année 2021.

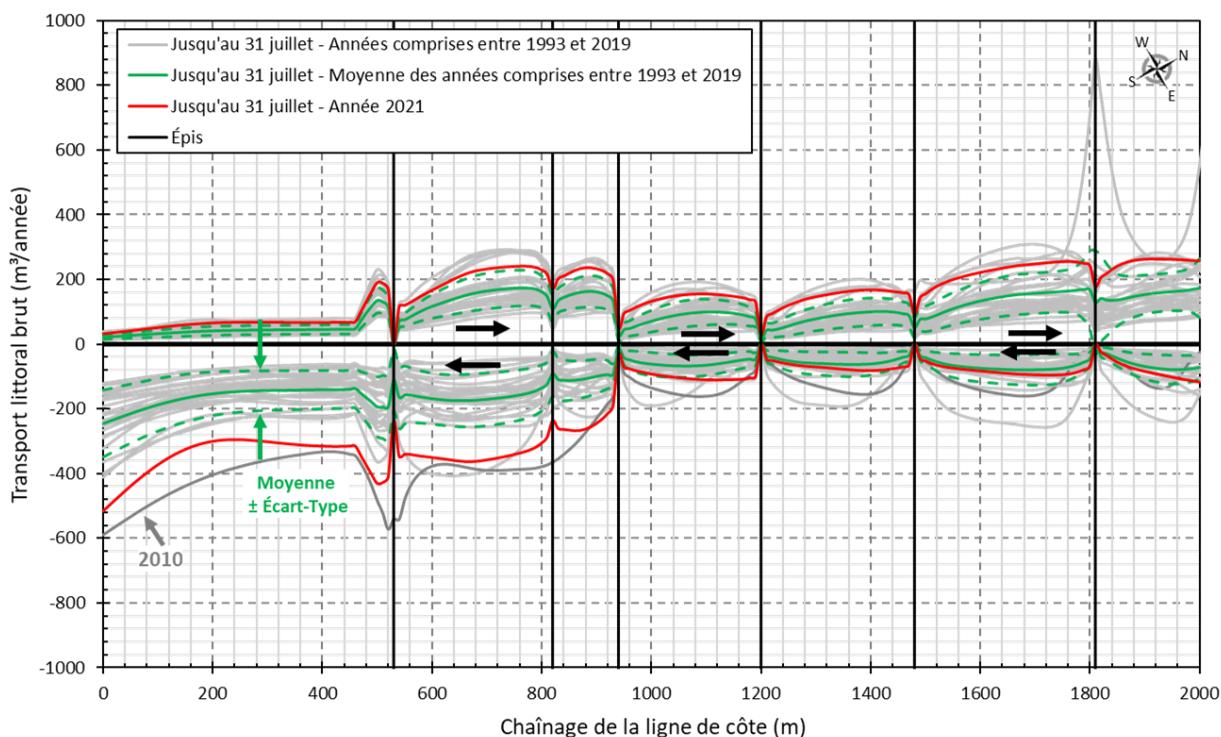


Figure 11 : Comparaison du transport littoral brut entre l'année 2021 et la période de référence 1993-2019 en conservant uniquement le transport entre la période d'eau libre et le 31 juillet

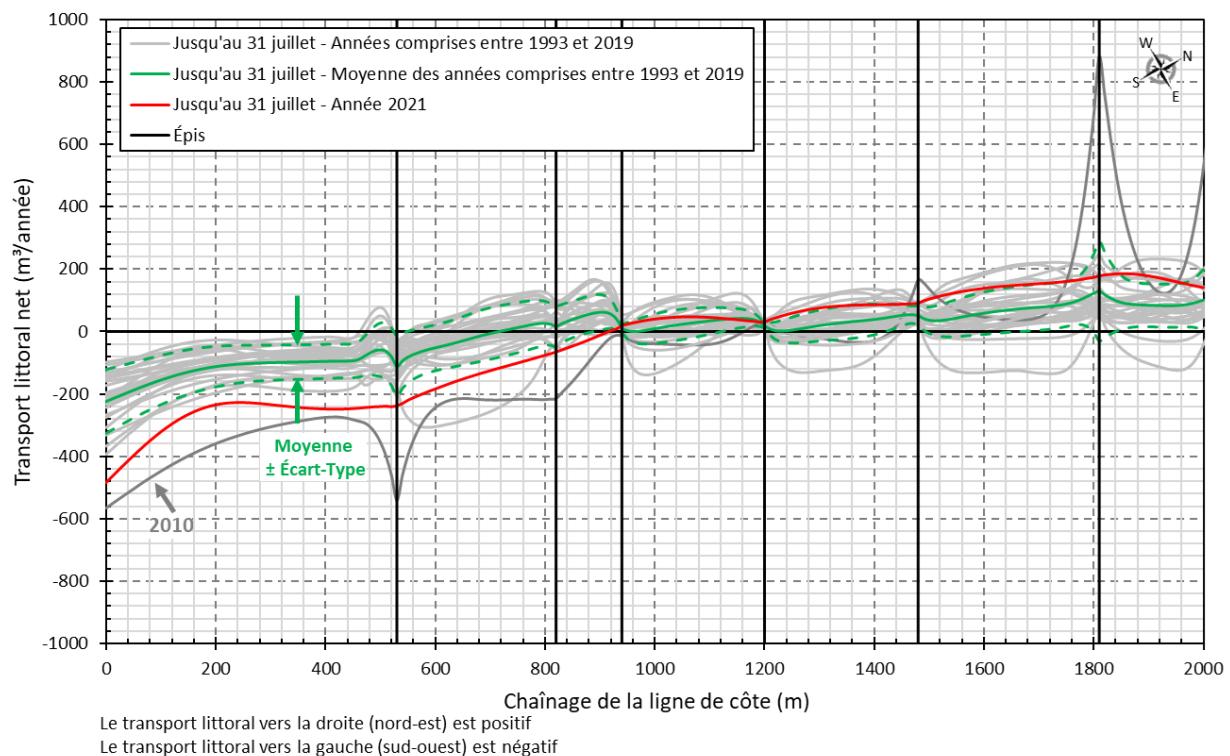


Figure 12: Comparaison du transport littoral net entre l'année 2021 et la période de référence 1993-2019 en conservant uniquement le transport entre la période d'eau libre et le 31 juillet

4.4 Synthèse

Les faits saillants de l'année 2021 peuvent se résumer comme suit :

- La crue printanière de 2021, qui a été très faible, n'a pas été suffisamment forte pour nettoyer l'embouchure de Belle-Rivière. Cette crue se caractérise par un non-dépassement d'une période de retour de 50 ans. Le potentiel de nettoyage naturel de l'embouchure de Belle-Rivière était donc très faible pour l'année 2021.
- À Saint-Gédéon Sud, la dérive littorale vers Belle-Rivière en 2021 a été beaucoup plus importante (+116%) durant la période avril-juillet par rapport à ce qui a été observé dans le passé. La progression de la flèche sableuse a donc potentiellement été accélérée en raison d'un apport sédimentaire plus important pour l'année 2021.

5. IMPACTS DES TRAVAUX D'HIVER 2019

La figure 13 affiche la comparaison de la bathymétrie avant et après les travaux de réaménagement de l'embouchure de Belle-Rivière, ceux-ci s'étant réalisé en hiver 2019.

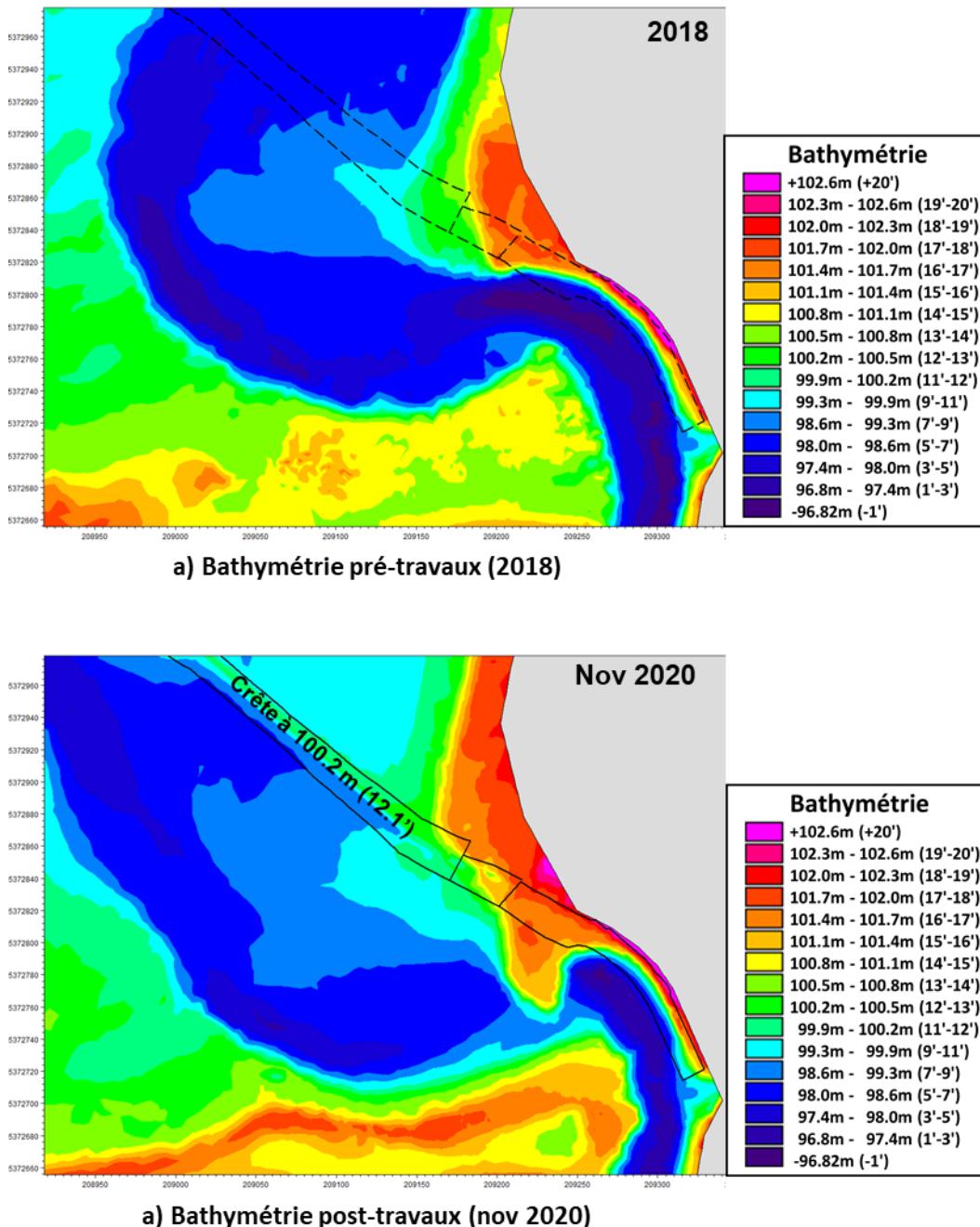


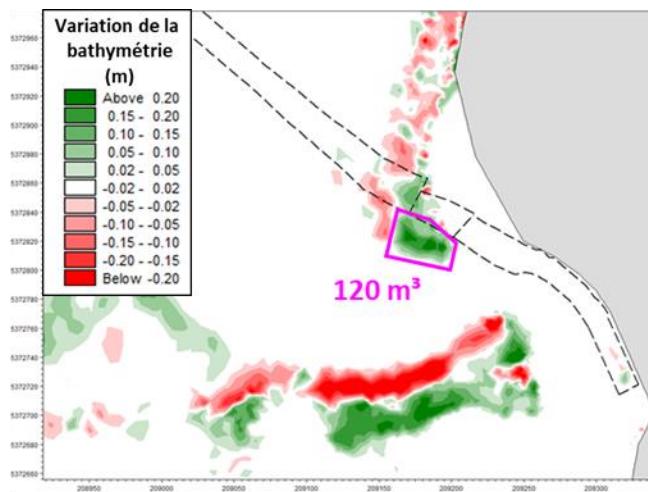
Figure 13 : Bathymétrie de l'embouchure avant et après les travaux d'hiver 2019

Dans le but d'analyser l'impact engendré par le réaménagement de l'embouchure, le modèle 2D de transport sédimentaire a été mis à profit pour lancer deux simulations distinctes. La première simulation utilise la bathymétrie de 2018 (pré-travaux) comme condition initiale alors que la seconde simulation utilise celle de novembre 2020 (post-travaux). Dans les deux cas, l'ensemble des paramètres (vagues, niveau d'eau, débit, etc.) sont demeurés inchangés pour éliminer les biais de comparaison entre les deux jeux de résultats.

En guise d'information, une compilation de 37 heures de tempêtes survenues en 2021 ont été utilisés pour modéliser le transport sédimentaire. Ces tempêtes se caractérisent par des vagues en provenance des secteurs ONO à NO ce qui représentent les conditions les plus critiques pour le transport sédimentaire vers la flèche sableuse. À cet effet, le choix d'alimenter le modèle 2D avec une compilation de tempêtes plutôt qu'avec l'entièreté de la série temporelle s'étalant du début de la période d'eau libre de l'année 2021 jusqu'au 31 juillet se justifie par le fait que les modèles 2D ne sont pas conçus pour modéliser l'évolution de la bathymétrie sur le long-terme puisque les petites erreurs de calcul tendent à s'accumuler pour arriver à une erreur non-négligeable sur le long-terme. L'utilisation du modèle LITPACK (conçu pour le long-terme) dans l'embouchure n'est quant à elle pas possible en raison de la géométrie trop complexe du secteur en question

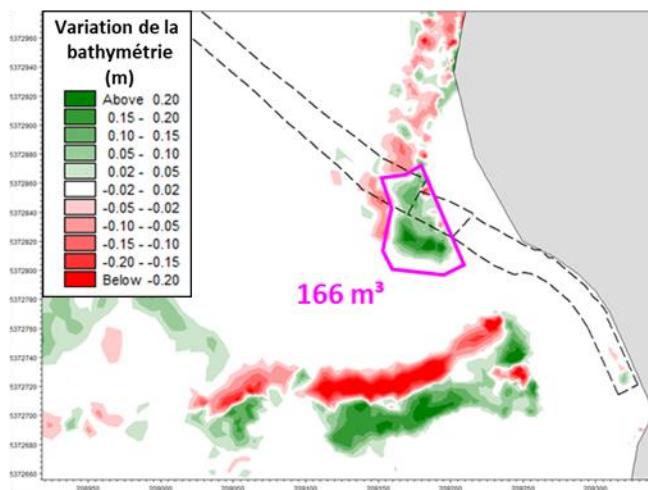
La figure 14 illustre les résultats de modélisation pour ce qui a trait à l'érosion et au dépôt de sédiments. Les figures 14a et 14b affichent les résultats obtenus en utilisant la bathymétrie de 2018 (pré-travaux) comme condition initiale alors que la figure 14c montre les résultats obtenus en utilisant celle de novembre 2020 (post-travaux).

Dépendamment de la zone considérée pour le calcul, le volume de sédiments accumulés varie entre 120 m³ et 166 m³ lorsque la bathymétrie de 2018 (pré-travaux) est utilisée en tant que condition initiale. En utilisant celle de novembre 2020 (post-travaux), le volume de sédiments accumulés est de 141 m³ ce qui représente une augmentation de +20% ou une diminution de -13% dépendamment de la zone considérée pour le calcul. Aucune tendance claire ne peut donc être obtenue ce qui indique que les impacts engendrés par le réaménagement de l'embouchure de la rivière ne sont pas significatifs au niveau du taux de sédiments accumulés dans l'embouchure.



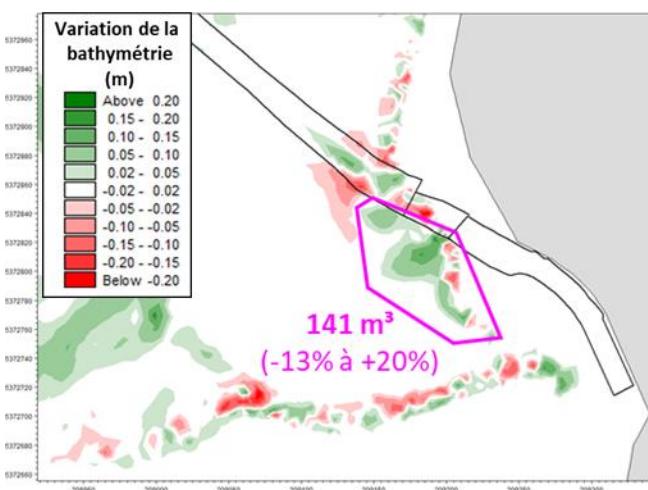
a) Départ de la bathymétrie de 2018
(Pré-travaux)

Accumulation de sédiments: Méthode de calcul #1



b) Départ de la bathymétrie de 2018
(Pré-travaux)

Accumulation de sédiments: Méthode de calcul #2



c) Départ de la bathymétrie de 2018
(Pré-travaux)

Comparaison des volumes
d'accumulation de sédiments

Figure 14 : Comparaison des résultats de modélisation de dépôt de sédiments après 37h de tempête
Pré-travaux (2018) vs Post-travaux (novembre 2020)

6. IMPACTS DES RECHARGEMENTS RÉCURRENTS À SAINT-GÉDÉON

Sous l'action des vagues, une plage tend généralement à se remodeler d'une manière à se rapprocher d'un certain état d'équilibre. Plus la géométrie de celle-ci se rapproche de son état d'équilibre, plus petit sera le transport sédimentaire. À l'inverse, le transport sédimentaire sera plus élevé dans le cas où la géométrie de celle-ci s'éloigne de son état d'équilibre.

Le fait de recharger une plage localement conduit généralement à une forme qui tend à éloigner sa géométrie de son état d'équilibre et donc à augmenter le transport sédimentaire. Ainsi dans le cas spécifique de Saint-Gédéon, les rechargements récurrents de la plage peuvent augmenter le transport sédimentaire ce qui peut, en conséquence, accélérer le dépôt de sédiments dans l'embouchure de Belle-Rivière. Toutefois, les rechargements granulaires à Saint-Gédéon utilisent des matériaux de gravillon, ceux-ci étant plus lourds et plus difficiles à déplacer que les matériaux naturels de sable fin composant la plage, ce qui tend inversement à réduire le transport sédimentaire et donc, à ralentir le dépôt de sédiments dans l'embouchure. Ainsi dans un contexte de comparaison d'une plage rechargée au gravier avec une plage naturelle de sable, il devient difficile d'affirmer avec certitude si les rechargements récurrents à Saint-Gédéon tendent à accélérer la progression de la flèche sableuse ou, à l'inverse, à ralentir cette progression.

Un dernier élément à considérer est le potentiel de nettoyage naturel de l'embouchure de la rivière offert par les crues de printemps. Dans un cas où des gravillons (au lieu du sable naturel) se déposeraient dans l'embouchure, des vitesses d'écoulement plus élevées correspondant à des crues printanières plus fortes seraient requises pour permettre le nettoyage naturel de l'embouchure. Toutefois, les photos satellites historiques montrent que les crues printanières sont en mesure de nettoyer l'embouchure et ce, malgré les rechargements récurrents de gravillons sur la plage de Saint-Gédéon depuis plus d'une dizaine d'années.

7. CONCLUSION

Le 31 juillet 2021, il a été rapporté que le chenal de l'embouchure de Belle-Rivière a été obstrué en raison d'un dépôt de sédiments menant à une progression de la flèche sableuse vers le sud.

L'analyse des photos satellites historiques a révélé que la progression de cette flèche sableuse était déjà observée avant les travaux de réaménagement de l'embouchure de la rivière en hiver 2019. À cet effet, les résultats de modélisation n'ont démontré aucune tendance claire pour ce qui a trait à l'impact de ces travaux sur le taux de progression de la flèche sableuse. Cela indique donc que les travaux de réaménagement de l'embouchure n'ont pas joué un rôle significatif dans l'obstruction du chenal durant l'été 2021. Il est également difficile d'affirmer avec certitude si les rechargements récurrents à Saint-Gédéon tendent à accélérer la progression de la flèche sableuse ou, à l'inverse, à ralentir cette progression dans un contexte de comparaison d'une plage rechargée au gravier avec une plage naturelle de sable.

L'année 2021 se démarque des autres années antérieures par deux éléments principaux. Premièrement, la crue printanière de 2021, qui a été très faible, n'a pas été suffisamment forte pour nettoyer l'embouchure de Belle-Rivière. Cette crue se caractérise par un non-dépassement d'une période de retour de 50 ans. Le potentiel de nettoyage naturel de l'embouchure de Belle-Rivière était donc très faible pour l'année 2021. Deuxièmement, à Saint-Gédéon Sud, la dérive littorale vers Belle-Rivière en 2021 a été beaucoup plus importante durant la période avril-juillet par rapport à ce qui a été observé dans le passé. À cet effet, la dérive littorale a été deux fois plus importante pour l'année 2021 comparativement à la moyenne de la période de référence 1993-2019. La progression de la flèche sableuse a donc potentiellement été accélérée en raison d'un apport sédimentaire plus important pour l'année 2021.

Les photos satellites de haute-résolution Sentinel-2 débutant uniquement à partir de l'année 2016, il devient difficile de déterminer avec certitude le débit de crue minimum permettant de nettoyer adéquatement l'embouchure de Belle-Rivière. Toutefois a priori, l'analyse des photos satellites semble pointer vers un débit de crue moyenne pour permettre le nettoyage naturel de l'embouchure. Cependant, il est aussi fort probable que le débit minimum dépendra de la quantité de sédiments s'étant accumulé dans l'embouchure au cours de l'année précédente. En effet, une plus grande accumulation de sédiments dans l'embouchure, tel qu'observée au courant de l'année 2021, pourrait nécessiter un débit de crue davantage élevé pour permettre un nettoyage naturel et adéquat de l'embouchure.

Finalement, les résultats de modélisation ont révélé que, mise à part le débit de Belle-Rivière, le niveau d'eau du lac est le paramètre qui engendre le plus d'impacts sur la dynamique sédimentaire de l'embouchure. En effet, un niveau d'eau plus élevé tend à augmenter le transport sédimentaire littoral ce qui, en conséquence, tend à accélérer la progression de la flèche sableuse vers le sud. À l'opposé, un niveau d'eau plus bas permet d'augmenter le potentiel de nettoyage de l'embouchure durant la crue printanière.

Qualification pour la période jusqu'au 31 juillet 2021			
Paramètre	Élevé (>Moyenne +écart type)	Moyen (moyenne)	Faible (<Moyenne - écart type)
Période d'eau libre	X		
Crue			X
Transport vers le sud	X		
Niveau d'eau du lac	X		

Qualification de l'impact des paramètres			
Paramètre	Significatif	non significatif	Commentaire
Niveau d'eau du lac	X		Transport sédimentaire accru vers la flèche
Débit de crue	X		Érosion du chenal de l'embouchure hautement dépendant du débit de crue et de la durée de la crue
Direction des vagues d'une tempête ponctuelle		X	La très forte réfraction des vagues conduit à des vagues incidentes de direction comparable à la côte, c'est surtout la fréquence d'occurrence qui a un impact significatif et non un évènement isolé
Travaux de 2019		X	Le taux de progression de la flèche est comparable pour les conditions pré et post travaux