

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

Étude et modélisation de l'érosion des berges

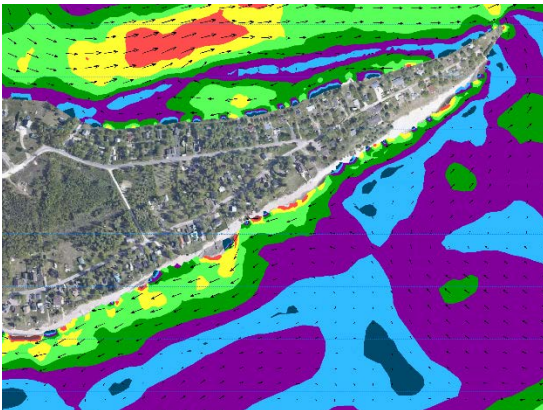
R.0024 Volume 3 Secteur Pointe Langevin



Préparé pour:

Rio Tinto Alcan

Rio Tinto Alcan



7 juin 2016

No référence lasalle | NHC 08000118

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

**RAPPORT D'ÉTUDE R.0024
VOLUME 3 - SECTEUR POINTE LANGEVIN**

Préparé pour:

Rio Tinto Alcan
Québec

Préparé par:

Lasalle | NHC
Montréal, Québec

7 juin 2016

Préparé par:



Catherine Denault, ing., M.A.Sc.
Ingénieure de projets, associée
No OIQ : 129802



Arian Cueto Bergner, ing., M.Sc.
Ingénieure
No OIQ : 143692

CLAUSE DE LIMITATION DE RESPONSABILITÉ

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

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

SOMMAIRE EXÉCUTIF

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

Le secteur de Pointe Langevin à Dolbeau-Mistassini présente une dynamique sédimentaire particulière par rapport aux autres secteurs faisant l'objet d'un suivi autour du lac Saint-Jean, qui se manifeste par une alternance de zones d'accrétion et d'érosion le long du rivage. Ces formations sont caractéristiques de milieux côtiers instables, exposés à des vagues de forte obliquité.

L'examen des photos historiques du site montre que les figures sédimentaires du site migrent et évoluent depuis plusieurs décennies, avec des changements plus marqués ces trente dernières années. Une revue de littérature portant sur les vagues ayant un angle d'incidence élevé a permis d'identifier plusieurs mécanismes pouvant être à l'origine de ces formes. Ceux se prêtant à une représentation bidimensionnelle ont ensuite été vérifiés par modélisation numérique.

Les résultats de modélisation numérique ont permis de confirmer que le climat de vagues et les courants littoraux générés par celles-ci sont effectivement favorables au transport sédimentaire le long du rivage de Pointe Langevin et à la formation de cordons littoraux et/ou de zones localisées d'érosion (*erosional hot spots*). Ils n'ont pu par contre mettre en évidence des forces érosives suffisamment importantes pour expliquer les érosions sévères observées à certains endroits ces dernières années. L'approche de modélisation bidimensionnelle, la représentation limitée des effets de vagues, et la complexité des phénomènes en jeu expliquent probablement ce résultat moins concluant.

Sur la base des informations trouvées dans la littérature, des interventions passées et de la compréhension globale de la dynamique sédimentaire du secteur, l'ajout d'ouvrages de contrôle ne semble pas bénéfique pour contrer l'érosion. Les rechargements apparaissent comme étant une solution mieux adaptée, si placés de façon à créer une plage davantage rectiligne.

Un suivi régulier du secteur est recommandé pour bien identifier les épisodes érosifs et pouvoir ainsi documenter les conditions menant aux problèmes d'érosion affectant le site (vents, vagues, débit en rivière, niveau d'eau du lac, etc.). Une meilleure compréhension des phénomènes en jeu et de leur échelle de temps permettra de mieux orienter les interventions futures, tout en évitant des réactions en chaîne indésirables pouvant réinitialiser les mécanismes d'érosion ciblés à la base.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----|
| SOMMAIRE EXÉCUTIF..... | I |
| TABLE DES MATIÈRES | II |
| LISTE DE FIGURES | III |
| 1 INTRODUCTION..... | 1 |
| 2 MISE EN CONTEXTE | 2 |
| 2.1 Site à l'étude | 2 |
| 2.2 Conditions érosives..... | 3 |
| 2.2.1 Vagues de tempête..... | 3 |
| 2.2.2 Crues des rivières..... | 6 |
| 2.3 Problématique d'érosion observée..... | 8 |
| 2.3.1 Interventions du PSBLSJ..... | 8 |
| 2.3.2 Évolution historique du site..... | 9 |
| 2.3.3 Mécanismes de formation..... | 13 |
| 3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE..... | 17 |
| 3.1 Outils de modélisation | 17 |
| 3.2 Zone modélisée..... | 18 |
| 3.3 Étapes de modélisation..... | 19 |
| 4 RÉSULTATS DE MODÉLISATION | 23 |
| 4.1 Vagues..... | 23 |
| 4.2 Courants fluviaux | 25 |
| 4.3 Action combinée des courants littoraux et fluviaux | 31 |
| 4.4 Synthèse des résultats | 34 |
| 5 DISCUSSION | 35 |
| 5.1 Ouvrages de protection | 35 |
| 5.2 Rechargements de plage..... | 37 |
| 6 CONCLUSION | 39 |
| RÉFÉRENCES | 40 |

LISTE DE FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 2.1 : Localisation générale du secteur Pointe Langevin | 2 |
| Figure 2.2: Sites d'intervention 88.11.01 et 92.11.01, bornes inamovibles 1 à 12..... | 3 |
| Figure 2.3: Rivière Péribonka en amont de la Pointe Langevin..... | 4 |
| Figure 2.4: Rose des vents en période d'eau libre à la station de Mistook | 4 |
| Figure 2.5: Inventaire des tempêtes enregistrées à Mistook entre 2005 et 2014..... | 5 |
| Figure 2.6: Niveaux d'eau historiques du lac Saint-Jean (1997-2014) | 5 |
| Figure 2.7: Débits historiques journaliers de la rivière Petite Péribonka (1992-2014) | 6 |
| Figure 2.8: Débits historiques journaliers de la rivière Péribonka (1992-2014) | 7 |
| Figure 2.9: Débits historiques au site de Pointe Langevin (1992-2014)..... | 7 |
| Figure 2.10: Historique des interventions à Pointe Langevin | 8 |
| Figure 2.11: Photo aérienne du site en 1926 | 9 |
| Figure 2.12: Photos aériennes du site en 1937 et 1947..... | 10 |
| Figure 2.13: Photos aériennes du site en 1964 et 1981..... | 11 |
| Figure 2.14: Photos aériennes du site en 1986 et 1995..... | 12 |
| Figure 2.15: Photo aérienne du site en 2005 | 13 |
| Figure 2.16: Dérive littorale pour des vagues ayant un angle d'incidence élevé (réf. [4]) | 13 |
| Figure 2.17: Évolution de différentes formations géomorphologiques (réf. [3])..... | 15 |
| | |
| Figure 3.1: Limites du modèle partiel de Pointe Langevin | 18 |
| Figure 3.2: Bathymétrie numérique du modèle partiel de Pointe Langevin..... | 20 |
| Figure 3.3: Résolution du maillage numérique à l'approche du secteur étudié | 21 |
| Figure 3.4: Bathymétrie numérique dans le secteur Pointe Langevin | 22 |
| | |
| Figure 4.1: Rose de vagues 1992-2014 au large de Pointe Langevin | 23 |
| Figure 4.2: Incidence des vagues dominantes au site de Pointe Langevin | 24 |
| Figure 4.3: Statistiques des débits à Pointe Langevin et des niveaux d'eau du lac Saint-Jean | 25 |
| Figure 4.4: Vitesses lors de la crue printanière (4 mai 2004) – $Q_t = 1\,157\text{ m}^3/\text{s}$ et $H_{LSJ} = 98,47\text{ m}$ | 27 |
| Figure 4.5: Vitesses pour le débit maximal (7 novembre 1999) – $Q_t = 1\,899\text{ m}^3/\text{s}$ et $H_{LSJ} = 101,52\text{ m}$ | 28 |
| Figure 4.6: Vitesses pour le débit médian et le niveau maximal du lac – $Q_t = 672\text{ m}^3/\text{s}$ et $H_{LSJ} = 101,54\text{ m}$ | 29 |
| Figure 4.7: Vitesses pour les conditions médianes du mois de novembre – $Q_t = 650\text{ m}^3/\text{s}$ et $H_{LSJ} = 101,14\text{ m}$.. | 30 |
| Figure 4.8: Courants dus à l'action combinée des vagues de l'ouest et des débits médians | 32 |
| Figure 4.9: Courants dus à l'action combinée des vagues de l'ESE et des débits médians..... | 33 |
| | |
| Figure 5.1: Effet de la construction d'un épi sur la formation de cordons littoraux..... | 36 |
| Figure 5.2: Effet de la construction d'un brise-lames sur la formation de cordons littoraux | 37 |
| Figure 5.3: Rechargements de plage à largeur constante et rectiligne..... | 38 |

1 INTRODUCTION

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

En vue de bien préparer les démarches qui mèneront à la définition de la prochaine entente (2017-2026), Rio Tinto Alcan souhaite mettre à jour les moyens d'étude et de modélisation mis en œuvre pour évaluer l'érosion des berges et les différents modes de gestion des niveaux du lac et leurs impacts sur l'érosion.

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

Le rapport comprend cinq principaux chapitres. Le chapitre 2 offre une description du secteur à l'étude et de la dynamique sédimentaire du site, incluant une revue de littérature. Le chapitre 3 décrit les principales caractéristiques du modèle numérique mis en œuvre pour étudier le site. Le chapitre 4 présente les résultats de modélisation obtenus pour différentes conditions de niveaux, débits et vagues. Le chapitre 5 discute finalement des différentes solutions pouvant être envisagées pour minimiser les problèmes d'érosion du site.

2 MISE EN CONTEXTE

2.1 Site à l'étude

Le secteur de Pointe Langevin est situé dans la région nord du lac Saint-Jean, dans la portion est du secteur Dolbeau-Mistassini. Il est caractérisé par l'embouchure des rivières Péribonka et Petite Péribonka (figure 2.1).

Dans le programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (PSBLSJ), le secteur de Pointe Langevin comprend les sites d'intervention 88.11.01 et 92.11.01, et s'étend entre les bornes inamovibles 1 à 12 (figure 2.2).

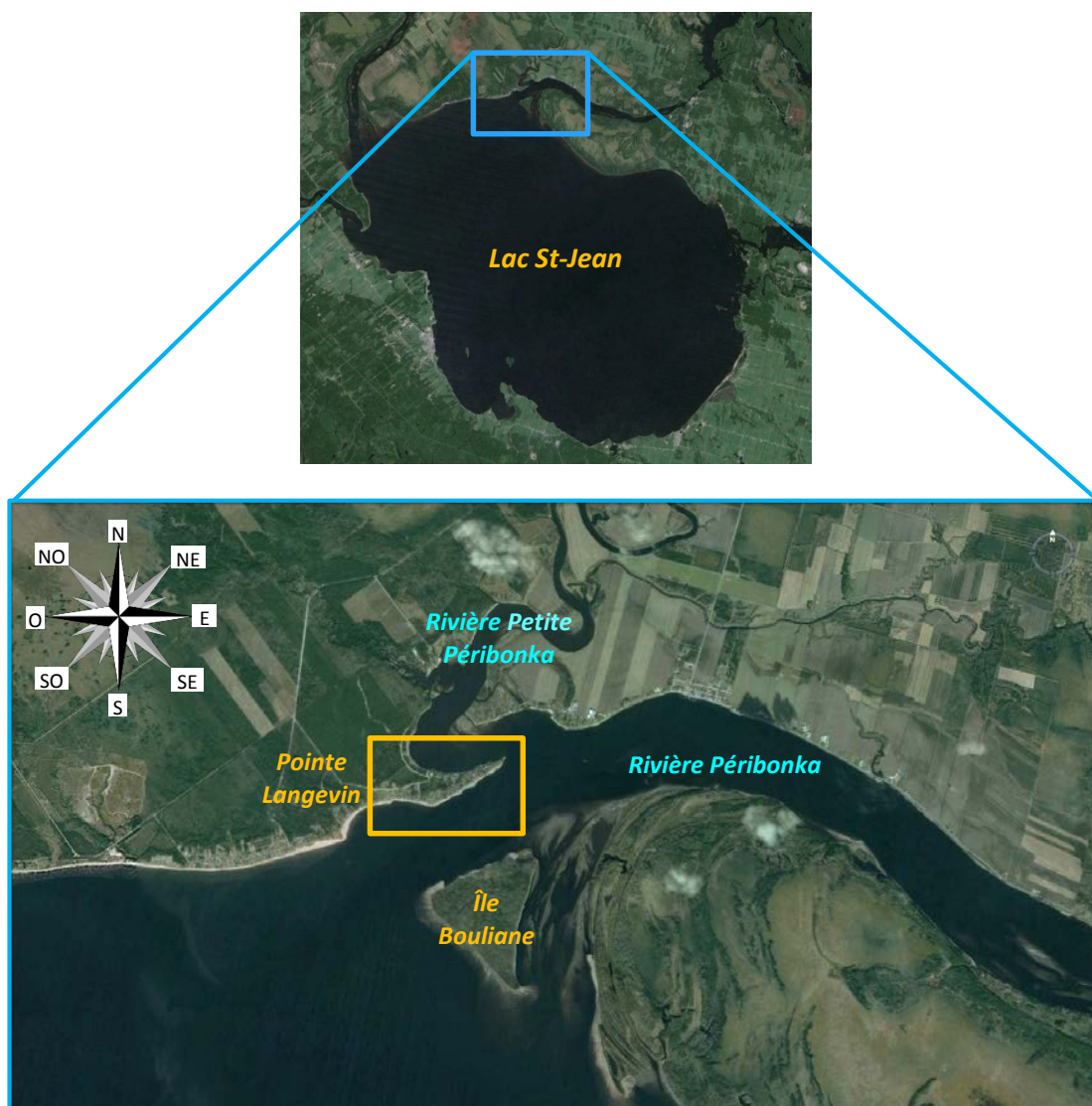


Figure 2.1 : Localisation générale du secteur Pointe Langevin



Figure 2.2: Sites d'intervention 88.11.01 et 92.11.01, bornes inamovibles 1 à 12

2.2 Conditions érosives

A priori, le secteur de Pointe Langevin est exposé à trois principales catégories de forces érosives : les vagues et les courants littoraux générés par les vents soufflant sur le lac, les vagues et les courants littoraux générés par les vents soufflant sur la rivière Péribonka et les vitesses en rivière.

2.2.1 Vagues de tempête

La position du secteur de Pointe Langevin par rapport à l'ensemble du lac Saint-Jean fait en sorte qu'il est particulièrement exposé aux vagues générées par les vents en provenance des directions comprises entre le sud et l'ouest. Les vents en provenance du sud ont un plus long fetch, mais leur accès au site est en grande partie bloqué par la présence de l'île Bouliane, située dans l'embouchure de la rivière Péribonka (voir figure 2.1).

En amont de la confluence avec la rivière Petite Péribonka, la rivière Péribonka suit une trajectoire relativement rectiligne. Sur près de 9 kilomètres, la rivière est orientée selon un angle moyen de 23° par rapport à l'horizontal (figure 2.3).

D'après les vents enregistrés à la station de Mistook depuis 1994, les vents les plus forts et les plus fréquents soufflant dans la région en période d'eau libre proviennent des directions ouest (O), ouest-nord-ouest (ONO) et est-sud-est (ESE) (figure 2.4, réf. [1]).



Figure 2.3: Rivière Péribonka en amont de la Pointe Langevin

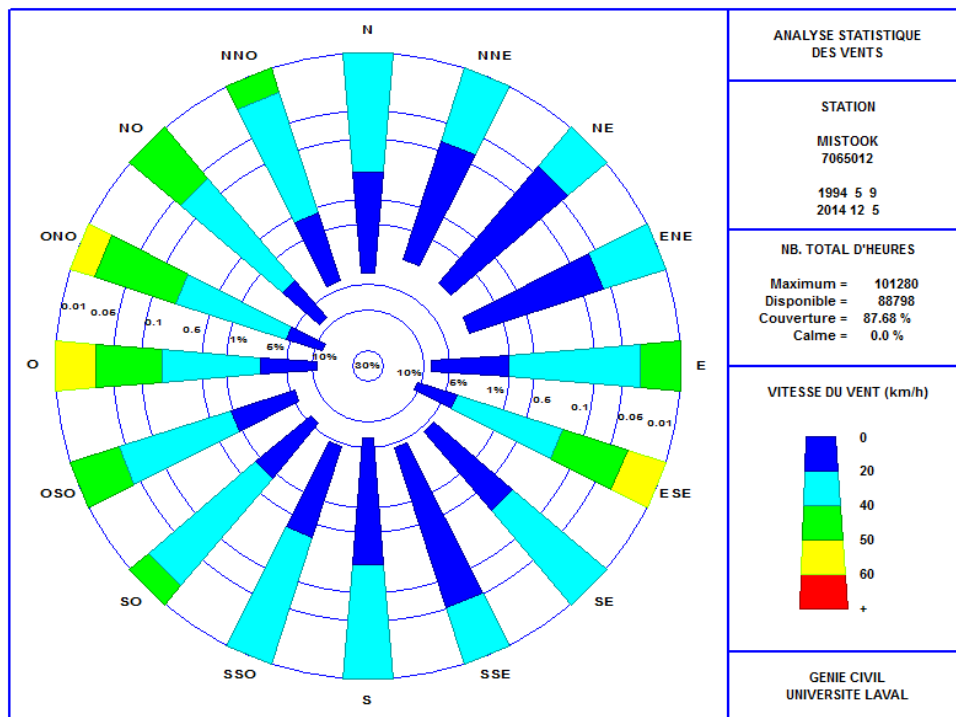


Figure 2.4: Rose des vents en période d'eau libre à la station de Mistook

Sur cette base, il apparaît donc probable que le secteur de Pointe Langevin soit exposé à des vagues fortes lorsque des vents d’ouest soufflent sur le lac et lorsque des vents d’ESE (angle de 22,5°) soufflent sur la rivière Péribonka. Le régime de vagues au site a été vérifié par modélisation et fait l’objet de la section 4.1.

L’analyse des données de vents réalisée par la firme CRI (réf. [1]) révèle que les mois ayant le plus de tempêtes en provenance des secteurs est et ouest est le mois de novembre (figure 2.5), mois pendant lequel les niveaux du lac sont en moyenne au-dessus de 101,0 m (figure 2.6). Cette combinaison de vagues de tempêtes et de niveau haut donne généralement lieu à des conditions particulièrement érosives.

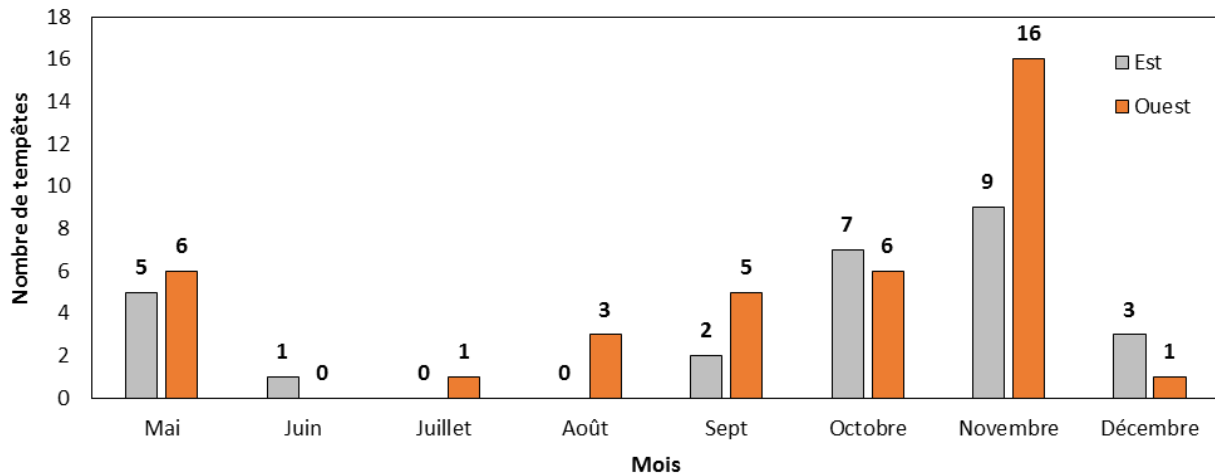


Figure 2.5: Inventaire des tempêtes enregistrées à Mistook entre 2005 et 2014

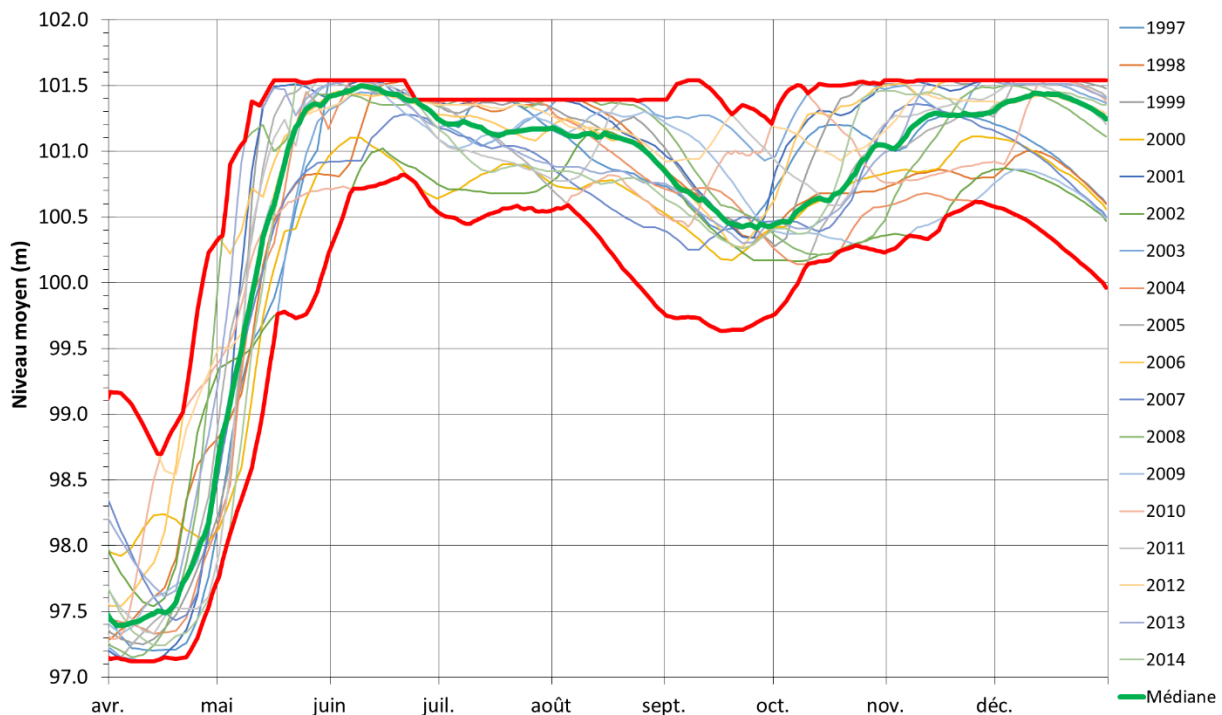


Figure 2.6: Niveaux d’eau historiques du lac Saint-Jean (1997-2014)

Les mois de septembre, octobre et mai sont les autres mois pendant lesquels les tempêtes d’est et d’ouest se produisent le plus souvent. Les niveaux du lac pour ces mois sont toutefois plus variables et les combinaisons de vagues fortes et niveaux hauts sont moins fréquentes.

2.2.2 Crues des rivières

Les figures 2.7 et 2.8 présentent les débits journaliers des rivières Petite Péribonka et Péribonka, pour la période 1992-2014.

Les débits de la rivière Petite Péribonka proviennent de la station 61801 opérée par le Centre d’expertise hydrique du Québec (CEHQ) tandis que les débits de la rivière Péribonka sont ceux mesurés à la centrale de Chute-à-la-Savane, tels que fournis par Rio Tinto Alcan.

Les débits de la rivière Péribonka sont environ dix fois plus élevés que ceux de la Petite Péribonka. Ils peuvent atteindre des valeurs maximales supérieures à 1 600 m³/s au printemps et en automne.

La figure 2.9 présente le débit au site de Pointe Langevin, obtenu simplement en additionnant les débits de chaque rivière. En moyenne, le débit se situe autour de 600 m³/s, à l’exception de la période printanière, qui voit le débit dépasser cette valeur pendant environ 1 mois et demi, de la mi-avril à la fin mai. Le pic de crue atteint une valeur médiane de l’ordre de 900 m³/s. Les vitesses en rivière résultant de ces débits près des berges de Pointe Langevin font l’objet de la section 4.2.

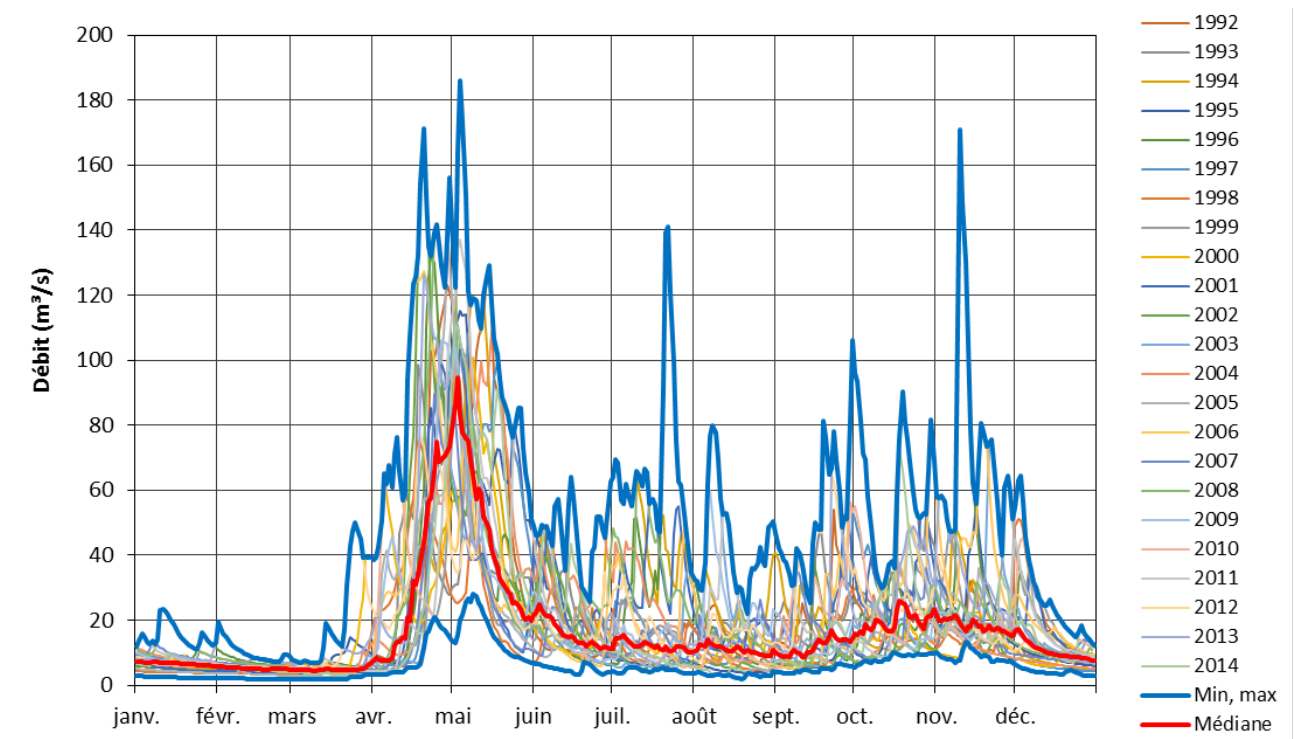


Figure 2.7: Débits historiques journaliers de la rivière Petite Péribonka (1992-2014)

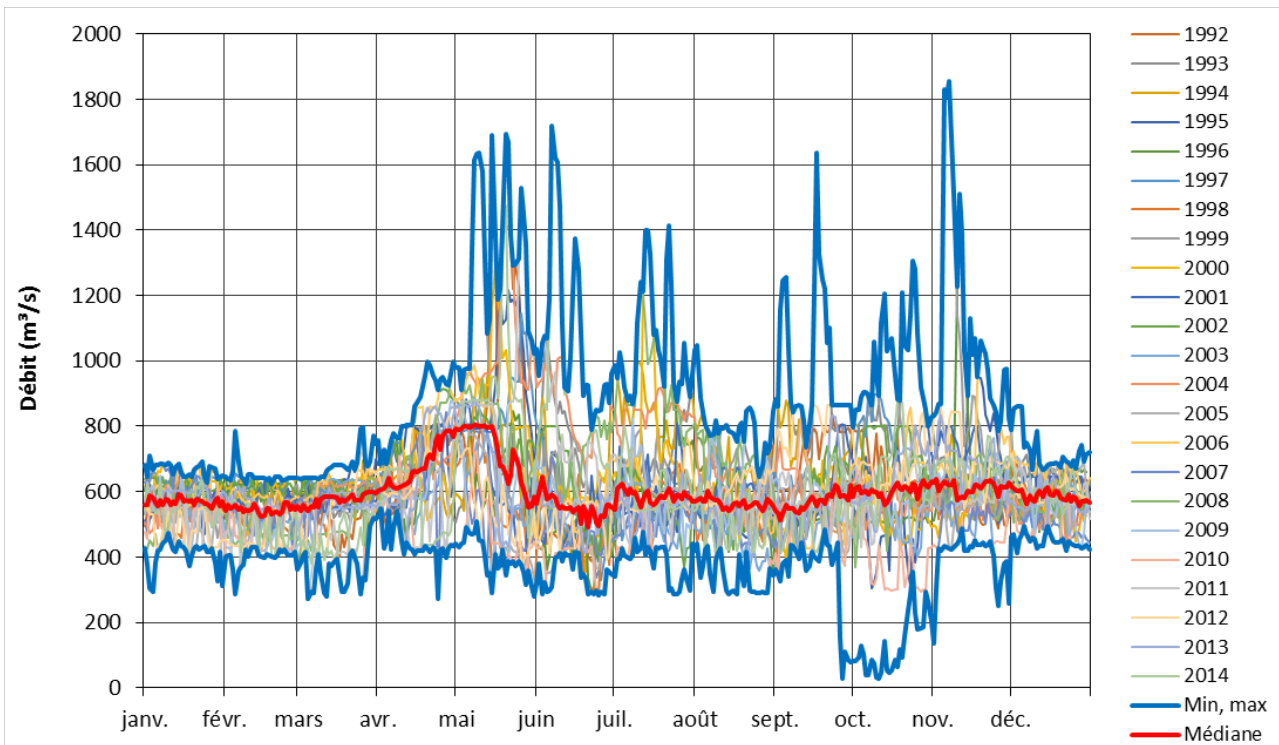


Figure 2.8: Débits historiques journaliers de la rivière Péribonka (1992-2014)

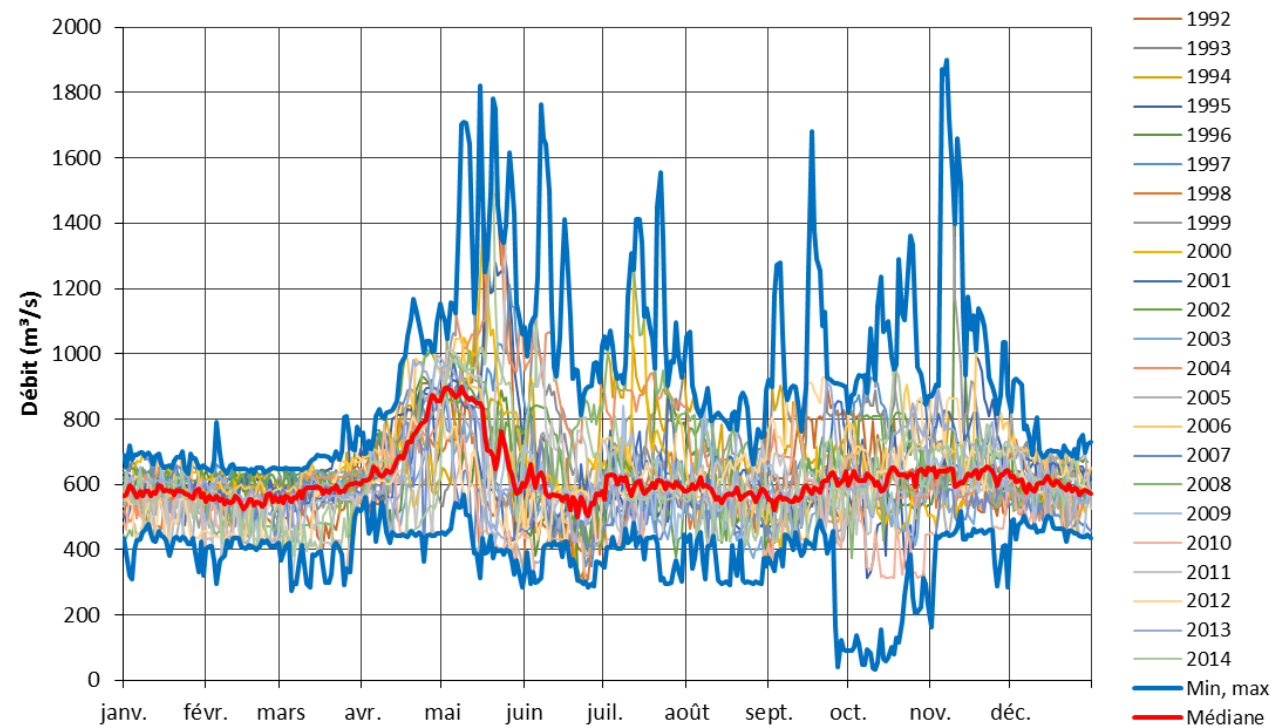


Figure 2.9: Débits historiques au site de Pointe Langevin (1992-2014)

2.3 Problématique d'érosion observée

La Pointe Langevin présente des figures sédimentaires bien distinctes, qui ne sont pas observées ailleurs dans les autres secteurs faisant partie du PSBLSJ. La Pointe Langevin présente en effet une succession d'accumulations de sable, intercalées par de petites baies, souvent en érosion.

2.3.1 Interventions du PSBLSJ

Depuis le début du programme en 1986, le secteur de Pointe Langevin a fait l'objet de plusieurs rechargements (figure 2.10). Le site d'intervention 88.11.01 a été rechargé en 1988, 1992, 1997, 1998 et 2004, tandis que le site 92.11.01 a été rechargé en 1992, 2000, et 2011. Les deux sites ont été rechargés sur 520 m en 2015, entre les bornes inamovibles 10 et 1.

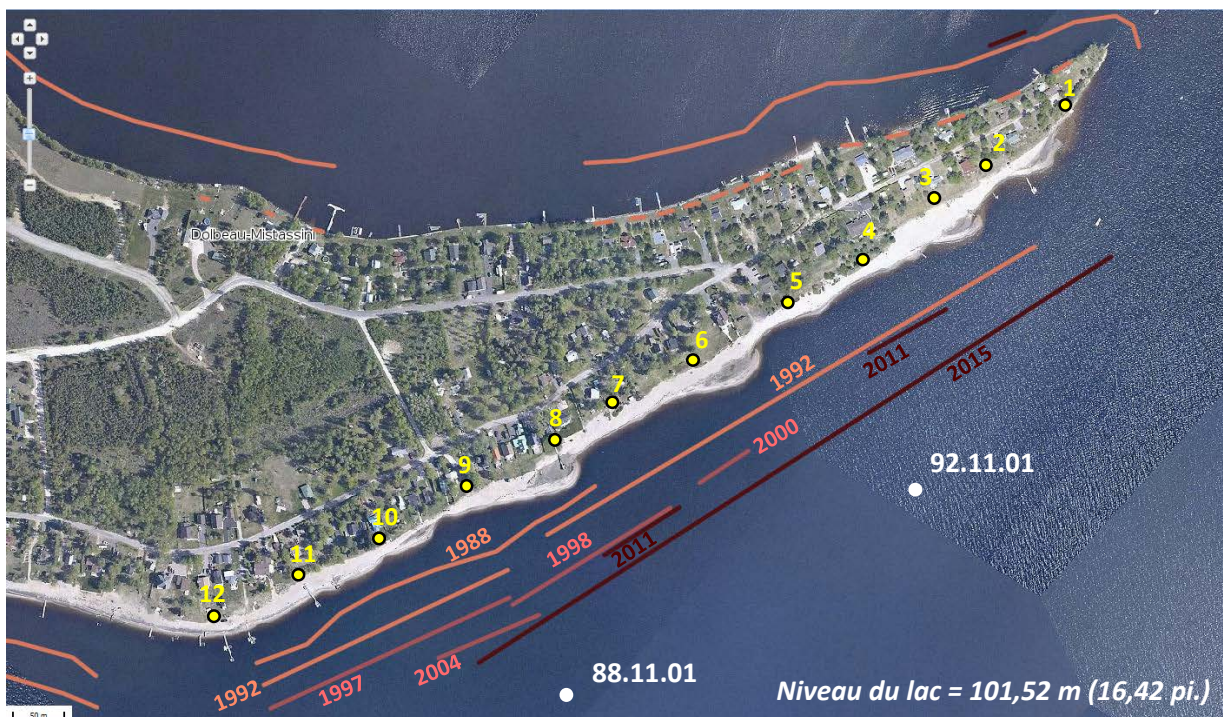


Figure 2.10: Historique des interventions à Pointe Langevin

L'historique des rechargements montre que la portion la plus au sud de Pointe Langevin semble avoir atteint un certain équilibre, les rechargements depuis 1997 n'étant que ponctuels. La photo aérienne de la figure 2.10, prise en 2012, montre d'ailleurs un rivage relativement rectiligne entre les bornes 12 et 10.

Plus au nord, l'érosion des berges demeure problématique, notamment en face des propriétés civiles 232 et 234, situées à proximité de la borne inamovible 4. Malgré des travaux de nivellement de plage en 2007, 2008 et 2012, la berge est fréquemment érodée à cet endroit (réf. [2]).

2.3.2 Évolution historique du site

La banque de données de Rio Tinto Alcan comprend plusieurs photos aériennes du site prises depuis la mise en service de la centrale de l'Isle-Maligne. Présentées aux figures 2.11 à 2.15, ces photos permettent de retracer l'évolution du site sur une période de près de 100 ans. La photo disponible la plus récente date de 2012 et est illustrée en arrière-plan de la figure 2.10.

Les photos de 1926 et 1937 montrent une mince bande de sable dans le secteur de Pointe Langevin. Bien que peu prononcées, de légères perturbations sont visibles le long du rivage (figures 2.11 et 2.12a).

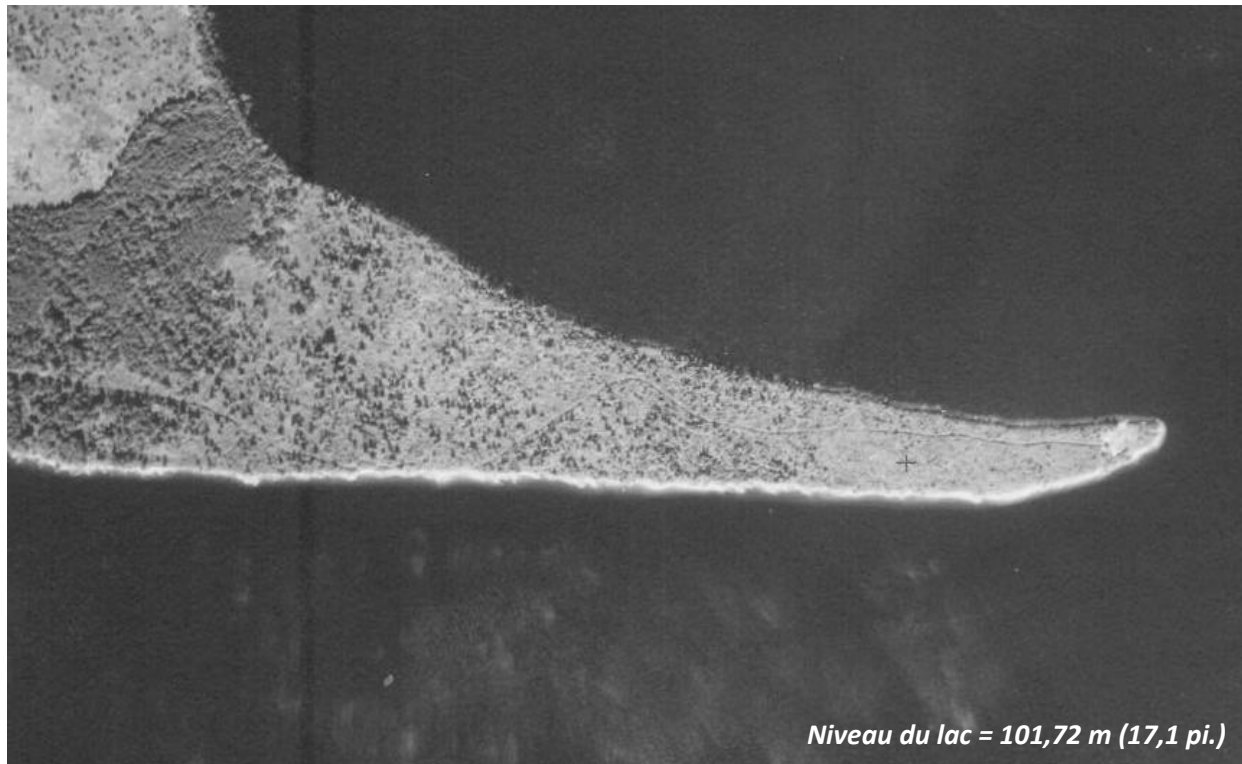
Les ondulations du rivage sont plus marquées en 1947 (figure 2.12b), et apparaissent clairement sur la photo de 1964 (figure 2.13a). À cette époque, le secteur est habité (quais visibles) et semble déjà sujet à des problèmes d'érosion, tel que démontré par la présence d'un brise-lames dans la portion nord du secteur.

En 1981 (figure 2.13b) et 1986 (figure 2.14a), la largeur de plage est relativement étroite dans la portion sud de la pointe, alors que la portion nord montre des accumulations importantes. Par la suite, en 1995 (figure 2.14b) et 2005 (figure 2.15), la bande de plage s'élargit dans la portion sud de la pointe (rechargements en 1988, 1992, 1997, 1998 et 2004) tandis que la portion nord présente des zones d'accumulation de plus en plus importantes.

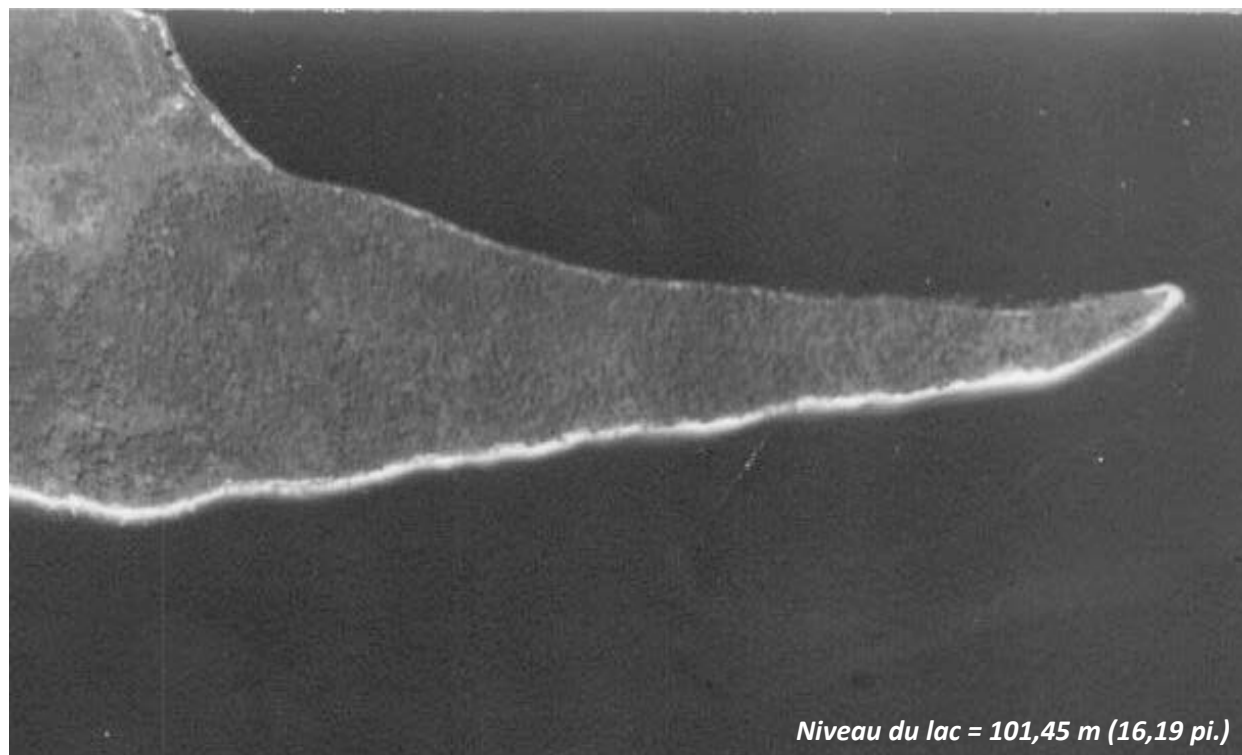
En 2012 (voir photo 2.10), les accumulations ont une forme plus allongée, et encerclent de petites lagunes.



Figure 2.11: Photo aérienne du site en 1926

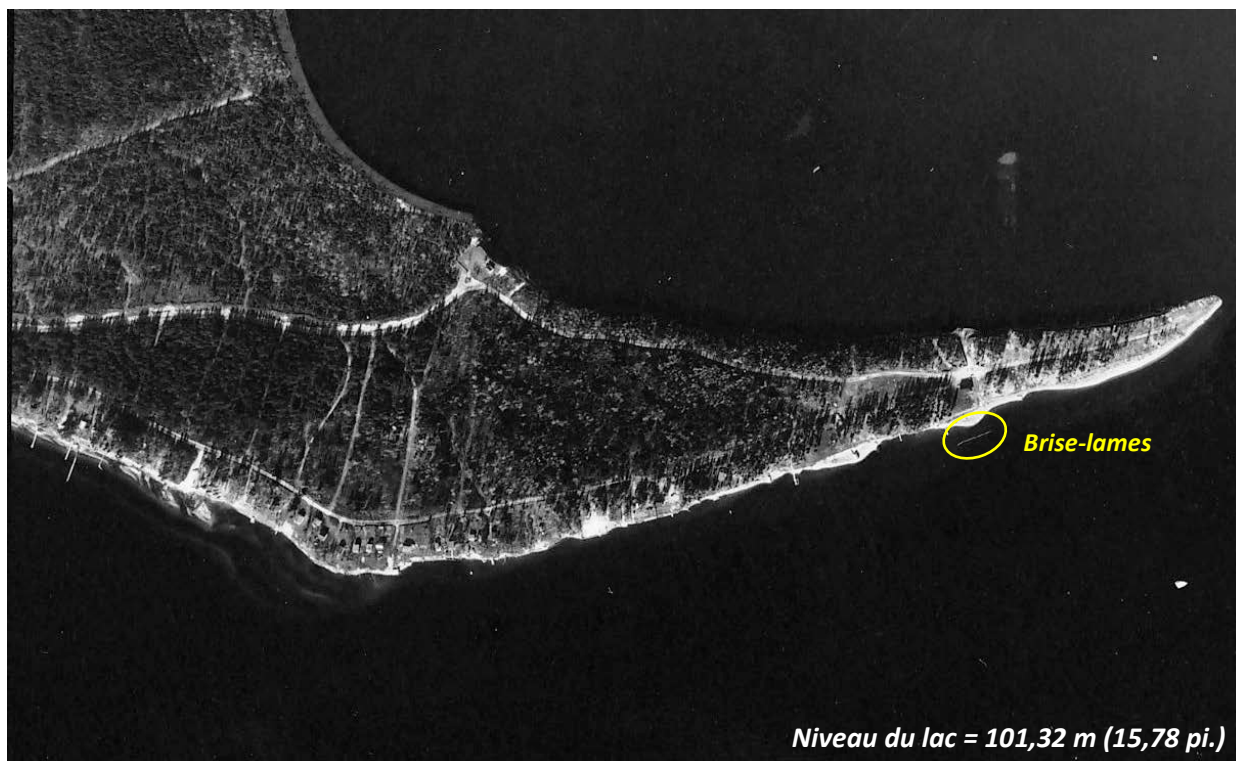


a) 1937



b) 1947

Figure 2.12: Photos aériennes du site en 1937 et 1947



a) 1964



b) 1981

Figure 2.13: Photos aériennes du site en 1964 et 1981



a) 1986



b) 1995

Figure 2.14: Photos aériennes du site en 1986 et 1995



Figure 2.15: Photo aérienne du site en 2005

2.3.3 Mécanismes de formation

Lorsque des vagues atteignent un site avec une certaine obliquité, leur déferlement génère un courant parallèle à la côte, appelé courant littoral. Sur une côte sableuse, ce courant est généralement en mesure de transporter des sédiments.

Le taux de transport longitudinal des sédiments, ou dérive littorale Q_s , dépend de l'angle relatif entre la ligne de rivage et les vagues, et est maximisé lorsque l'angle d'incidence des vagues est d'environ 45° (réf. [3]). Près d'une perturbation dans la ligne de rivage, le taux de transport des sédiments varie, et mène à la formation de zones d'accrétion et d'érosion, tel qu'illustré à la figure 2.16.

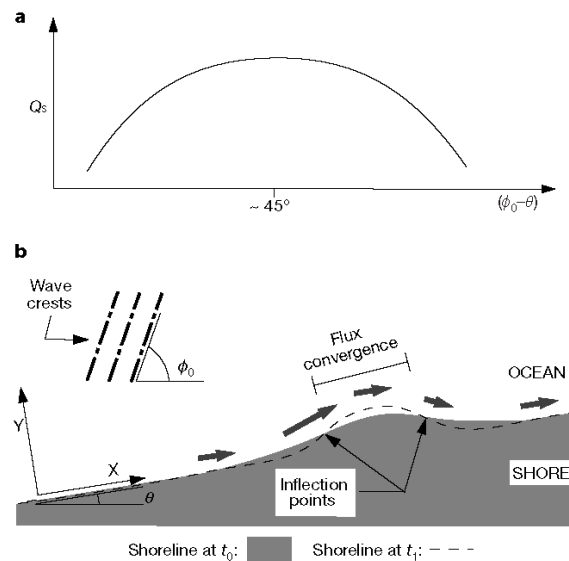


Figure 2.16: Dérive littorale pour des vagues ayant un angle d'incidence élevé (réf. [4])

À long terme, la dérive littorale tend à unifier les ondulations de la ligne de rivage à travers un phénomène de diffusion. Les rivages soumis à des vagues ayant un angle d'incidence prononcé constituent toutefois une exception à cette règle. Ils demeurent en effet instables et se réorganisent au fil du temps sous différentes formes géomorphologiques : dunes hydrauliques (*sand waves*), croissants de plage (*beach cusps*) et cordons littoraux (*sand spits*).

La création d'une forme géomorphologique plutôt qu'une autre dépend de l'angle d'incidence des vagues dominantes et de la fréquence de celles-ci. La figure 2.17 illustre l'évolution et les caractéristiques typiques de chacune d'elles. Ces images ont été obtenues à l'aide d'un modèle numérique tridimensionnel simulant le transport sédimentaire à long terme d'une plage initialement rectiligne sous différentes conditions de vagues incidentes (réf. [3]).

Sans entrer dans les détails des images présentées à la figure 2.17, il apparaît clairement que les formations sableuses observées à Pointe Langevin s'apparentent davantage aux cordons littoraux (image *f*) qu'aux autres formes géomorphologiques. D'après la figure 2.17a, les cordons littoraux (codes *S* et *R*) sont susceptibles de se former dans un milieu côtier où les vagues présentent une incidence supérieure à 45° dans plus de 50% des cas, avec une dominance d'au moins 60%.

Les plages dont les berges et les isobathes présentent des variations subites par rapport à la ligne générale de rivage peuvent également développer des zones localisées d'érosion (traduction libre du terme *erosional hot spots*). Ces zones sont définies dans la littérature comme étant des segments de plage ayant un taux d'érosion élevé comparativement aux segments adjacents, ou présentant un comportement érosif inattendu. Ces zones sont souvent observées dans les plages faisant l'objet de rechargements, et peuvent apparaître très peu de temps après la mise en place des matériaux de rechargement (réf. [5]).

Les causes exactes de formation des zones localisées d'érosion ne sont pas connues avec certitude. De nombreuses explications sont fournies dans la littérature :

- Variation importante du taux de transport longitudinal causée par un angle d'incidence de vagues élevé et la présence d'une forme convexe du rivage (mécanisme similaire à celui décrit pour les cordons littoraux);
- Présence d'irrégularités bathymétriques en eau plus profonde, affectant la transformation des vagues à l'approche du rivage (exemples cités : hauts fonds, canyons sous-marins);
- Direction des vagues incidentes limitée par la présence de structures côtières, d'îles ou de chenaux;
- Présence d'ouvrages et de murs de protection des berges.

Les raisons citées pointent toutes vers l'influence du climat de vagues, localement modifié par la présence d'éléments naturels ou artificiels. L'interaction entre les phénomènes de réfraction, diffraction et réflexion peut en effet venir renforcer les vagues et générer des courants de recirculation tridimensionnelle (réf. [6]) et des courants d'arrachement (réf. [7]).

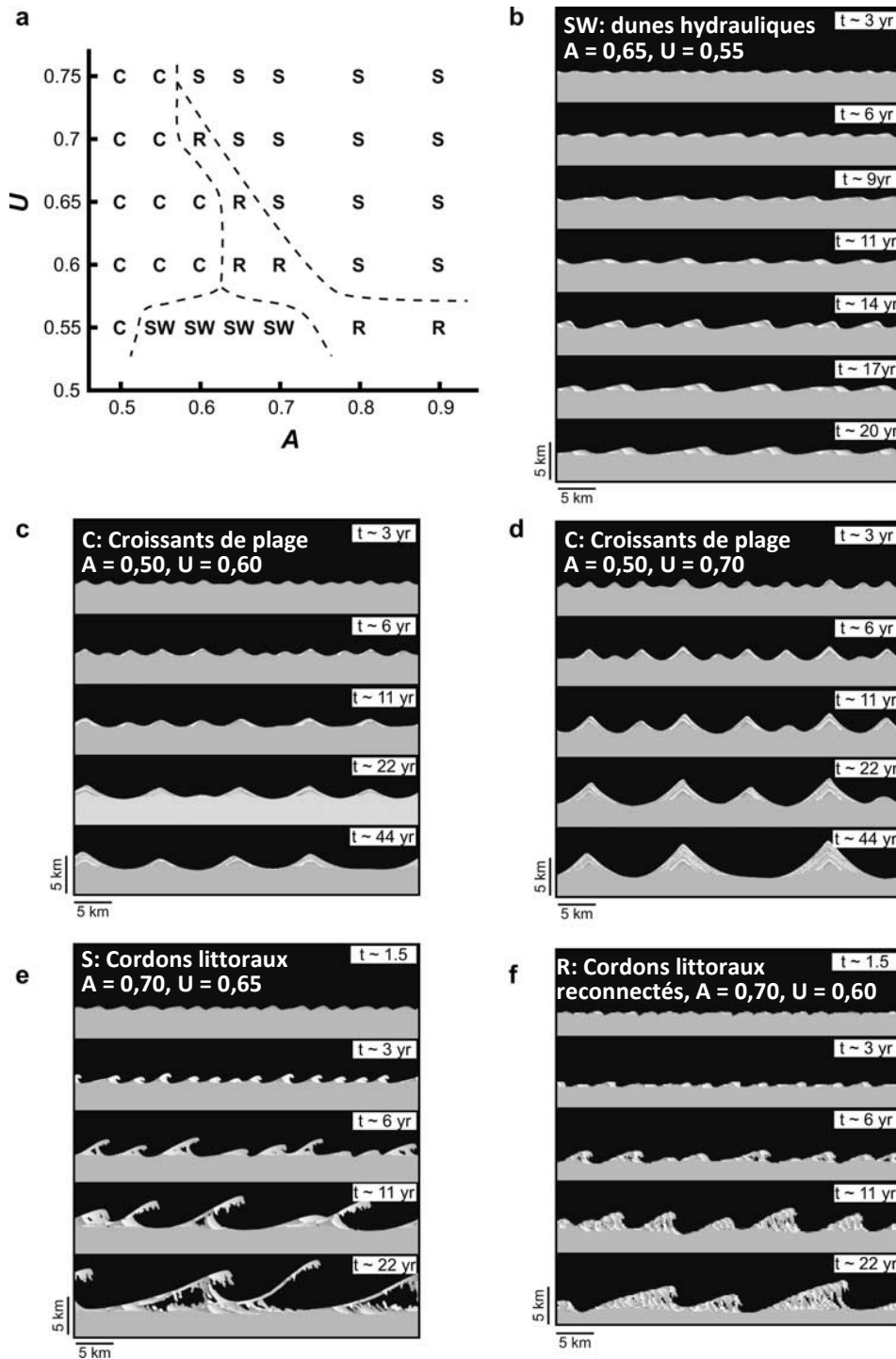


Figure 2.17: Évolution de différentes formations géomorphologiques (réf. [3])

U = proportion de vagues à angle d'incidence élevé, A = proportion de vagues provenant d'une direction donnée (asymétrie), C = cuspatés (croissant de plage), SW = sand waves (dunes hydrauliques), S = sand spits (cordons littoraux) et R = reconnected sand spits (cordons littoraux reconnectés)

Finalement, mentionnons que l'interaction entre les courants littoraux induits par les vagues et les courants fluviaux de la rivière Péribonka génère probablement aussi des écoulements complexes, surtout lorsqu'ils sont de directions opposées. Des effets de stratification sont fort probables, compte tenu que les phénomènes de vagues et de vents sont dominants en surface, tandis que l'écoulement en rivière est bien distribué sur la colonne d'eau.

Sur la base des informations trouvées dans la littérature et des observations disponibles, le secteur de Pointe Langevin présente une dynamique sédimentaire particulièrement complexe. Les zones en érosion qui y sont observées semblent être le résultat d'une combinaison de plusieurs facteurs, à la fois naturels et anthropiques (rehaussement du niveau et rechargements successifs), se déroulant sur des échelles de temps à court et long terme.

3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

La revue de littérature et les observations historiques du site présentées au chapitre précédent a permis d'identifier plusieurs mécanismes pouvant être à l'origine des problèmes d'érosion affectant le secteur de Pointe Langevin. D'un point de vue modélisation, la simulation des conditions hydrosédimentologiques du secteur n'est pas évidente :

- Échelles de temps très différentes. Par exemple, les cordons littoraux peuvent évoluer sur des décennies alors que les crues ou les tempêtes ne durent que quelques jours;
- Composante tridimensionnelle non-négligeable de l'écoulement due à des effets de stratification, turbulence et recirculation;
- Effets combinés de réfraction, diffraction et réflexion des vagues venant renforcer localement leur énergie.

Comparativement au secteur de l'embouchure de la rivière Belle-Rivière (réf. [8]), le secteur de Pointe Langevin se prête moins bien à une modélisation bidimensionnelle. Sa dynamique sédimentaire est beaucoup plus complexe et comporte une composante tridimensionnelle non-négligeable. De plus, le module de génération des vagues du modèle MIKE 21 ne simule pas les effets de réflexion des vagues et n'offre qu'une représentation partielle des effets de diffraction.

Plutôt que d'effectuer des simulations de transport sédimentaire, trop schématiques et très longues, les outils de modélisation disponibles ont plutôt été utilisés pour valider l'existence de conditions de vagues et de courants propices à la formation de cordons littoraux et de zones localisées d'érosion.

3.1 Outils de modélisation

L'ensemble des travaux de modélisation, de même que le montage des modèles numériques de terrain, ont été réalisés à l'aide des modules de la suite logicielle MIKE, conçue et commercialisée par la firme danoise *DHI Water & Environment*. Les modèles mis au point dans le premier volet d'étude ont été mis à profit et adaptés au secteur de Pointe Langevin (se référer au premier volume du rapport d'étude, réf. [9]).

Le modèle *MIKE21/3 Coupled Model FM* a été utilisé avec deux de ses principaux modules :

- Module hydrodynamique (*MIKE 21 FM HD*): modélisation des niveaux d'eau et des courants littoraux générés par les vagues (chapitre 7 du volume 1);
- Module d'analyse spectrale des vagues (*MIKE 21 SW*) : génération des vagues par le vent, transformation des vagues à l'approche du littoral, génération des contraintes de radiation produisant les courants littoraux (chapitre 8 du volume 1).

3.2 Zone modélisée

Afin d’obtenir une meilleure résolution dans la zone de déferlement des vagues, le maillage du modèle numérique développé dans le premier volet d’étude a été raffiné dans le secteur de Pointe Langevin. Compte tenu qu’un raffinement de maillage se traduit automatiquement par une augmentation importante des temps de calculs, un modèle partiel a été mis au point. Le modèle partiel de la zone de Pointe Langevin s’étend environ 6 km vers le large à partir de l’embouchure de la rivière Péribonka. Ses limites par rapport au modèle d’ensemble sont illustrées à la figure 3.1.

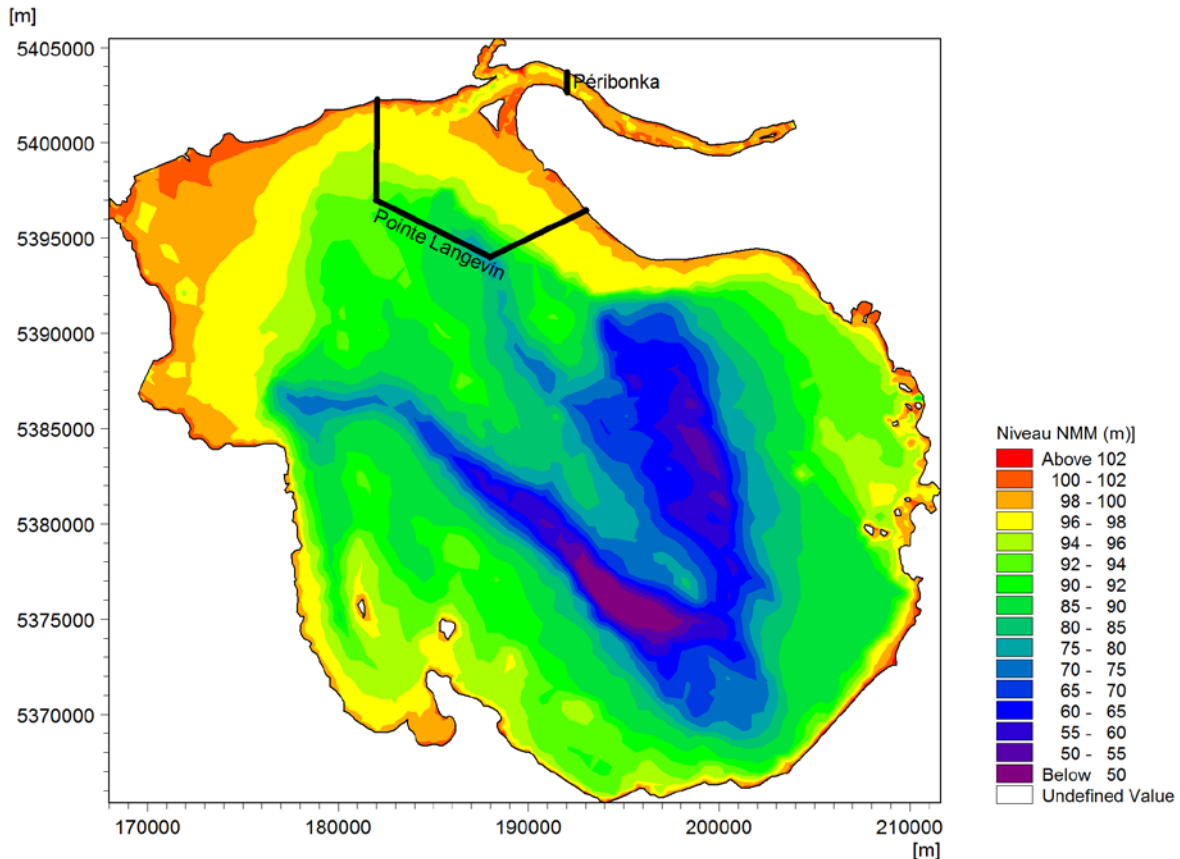


Figure 3.1: Limites du modèle partiel de Pointe Langevin

Le modèle partiel, présenté à la figure 3.2, offre une réduction significative de superficie par rapport à l’ensemble du lac, mais demeure relativement grand par rapport au secteur étudié. La taille du modèle n’a pu être davantage réduite, compte tenu de la nécessité de maintenir suffisamment éloignées les frontières du modèle, qui introduisent inévitablement un certain degré d’imprécision.

La résolution du maillage a été optimisée pour réduire les temps de calculs (figure 3.3). Celle-ci augmente progressivement à l’approche du site étudié, passant d’une taille maximale de maille de 1 000 m² au large, à 500 m² à l’intérieur de l’embouchure de la rivière Péribonka puis à 200 m² sur les rives. Près du tronçon de plage à l’étude, entre les bornes 12 et 1, la résolution du maillage est de l’ordre de 50 m².

La figure 3.4 illustre une vue rapprochée de la bathymétrie de la plage dans le secteur étudié. Grâce aux relevés détaillés de 2014 (cf. chapitre 6 du volume 1 du rapport d'étude), les figures sédimentaires sont bien visibles le long de la pointe. Les sections de plage les plus étroites sont observées aux bornes inamovibles 2, 4, 5 et 7.

3.3 Étapes de modélisation

La modélisation des vagues et des courants dans le secteur de Pointe Langevin a été réalisée en deux principales étapes.

Dans un premier temps, les vagues et les courants littoraux induits par celles-ci ont été générées par le vent dans le modèle d'ensemble du lac incluant un tronçon des rivières Petite Péribonka et Péribonka. Cette première étape ne pouvait être réalisée avec le modèle partiel, celui-ci offrant des fetchs de longueur trop limitée.

Les résultats obtenus dans le modèle d'ensemble aux limites du modèle partiel ont ensuite été extraits sous formes de séries temporelles de niveau d'eau, vitesse de courant, hauteur, direction et période des vagues. Pour la limite correspondant à l'entrée du débit des rivières, les valeurs basées sur les mesures de la station 61801 et celles fournies par Rio Tinto Alcan ont été imposées respectivement aux frontières de la rivière Petite Péribonka et de la rivière Péribonka (cf. section 2.2.2).

Malgré la forte réduction de temps de calcul obtenu en développant un modèle partiel, les temps de calcul liés à la modélisation bidimensionnelle et aux nombreux phénomènes modélisés n'ont pas permis de simulations de longue durée. Pour les simulations impliquant des vagues, des tempêtes synthétiques de vents de courte durée, mais suffisamment longues pour donner un état permanent, ont été mises au point.

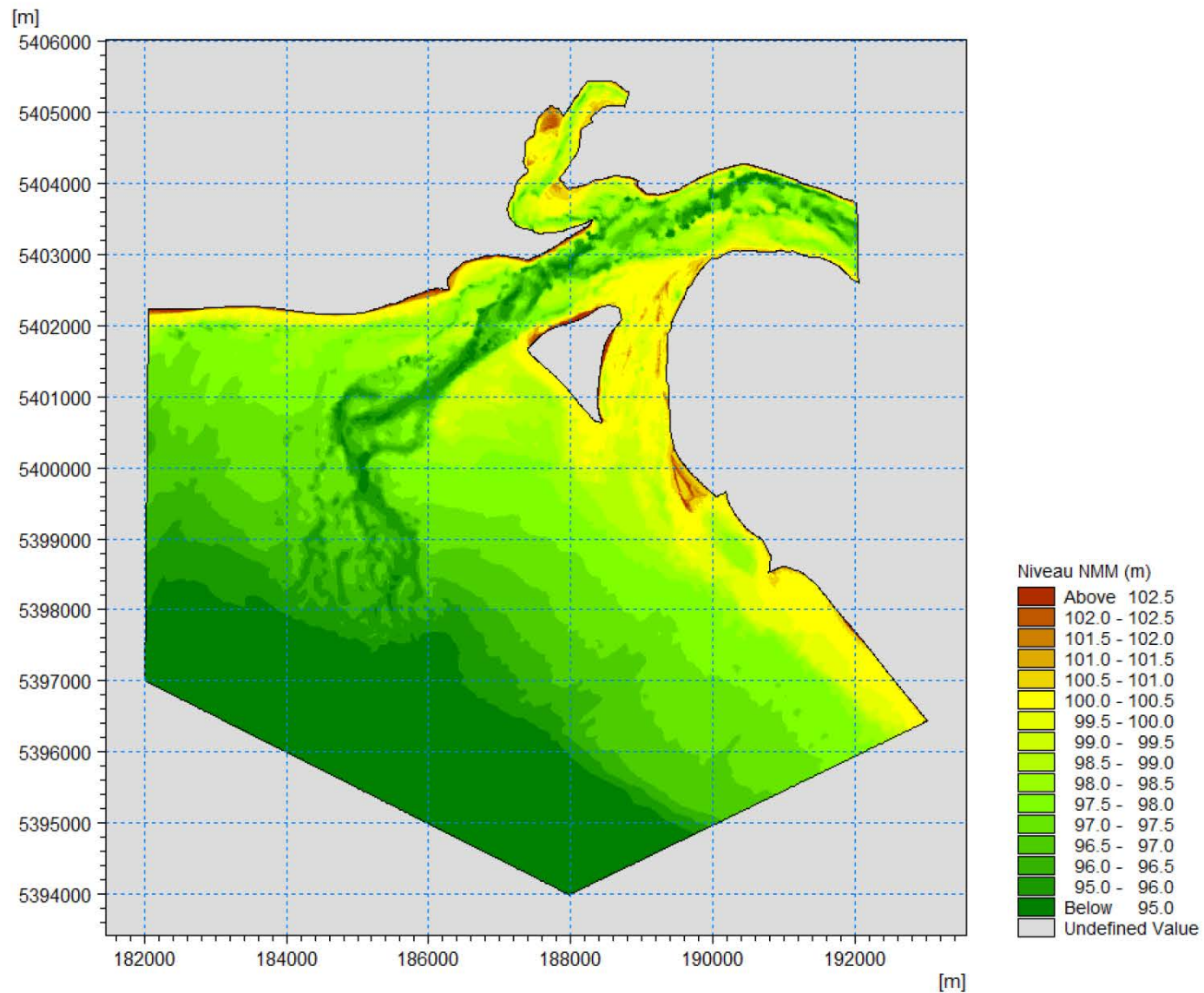


Figure 3.2: Bathymétrie numérique du modèle partiel de Pointe Langevin

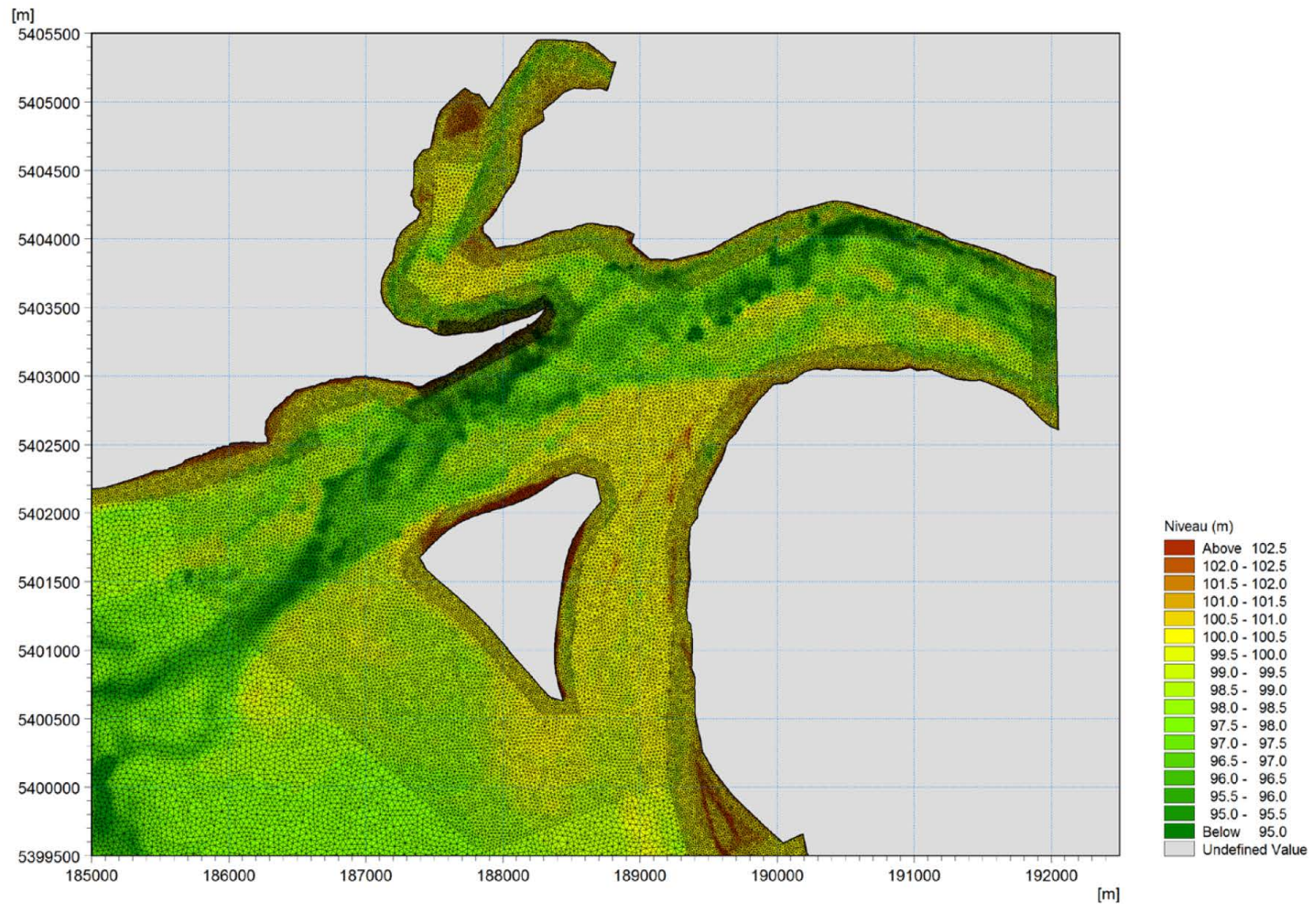


Figure 3.3: Résolution du maillage numérique à l'approche du secteur étudié

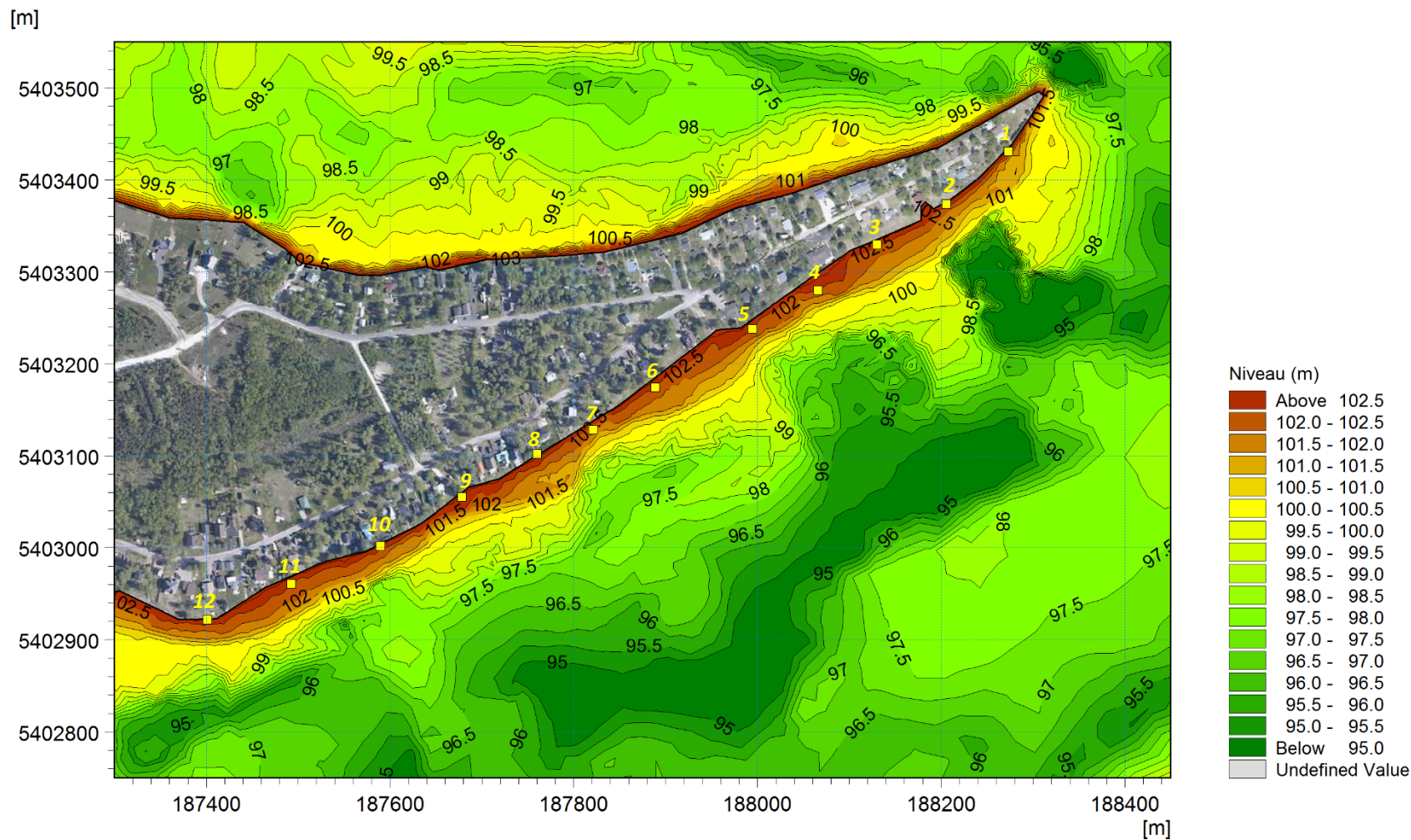


Figure 3.4: Bathymétrie numérique dans le secteur Pointe Langevin

4 RÉSULTATS DE MODÉLISATION

Pour permettre une meilleure compréhension des résultats de modélisation, les différentes conditions hydrodynamiques et de vagues pouvant être à l'origine de l'érosion des berges de Pointe Langevin ont d'abord été simulées individuellement, puis simultanément:

- Vagues (section 4.1);
- Courants fluviaux dus aux rivières Péribonka et Petite Péribonka (section 4.2);
- Courants fluviaux et vagues (section 4.3).

La discussion des résultats dans leur ensemble est présentée à la section 4.4.

4.1 Vagues

Afin de déterminer le régime de vagues au site, les données de vents horaires enregistrées entre 1992 et 2014 à la station météorologique de Mistook ont été utilisées pour générer des vagues sur le modèle d'ensemble du lac Saint-Jean et un tronçon de la rivière Péribonka long d'environ 18 km.

La rose des vagues intégrant les résultats de simulation au large du site est illustrée à la figure 4.1.

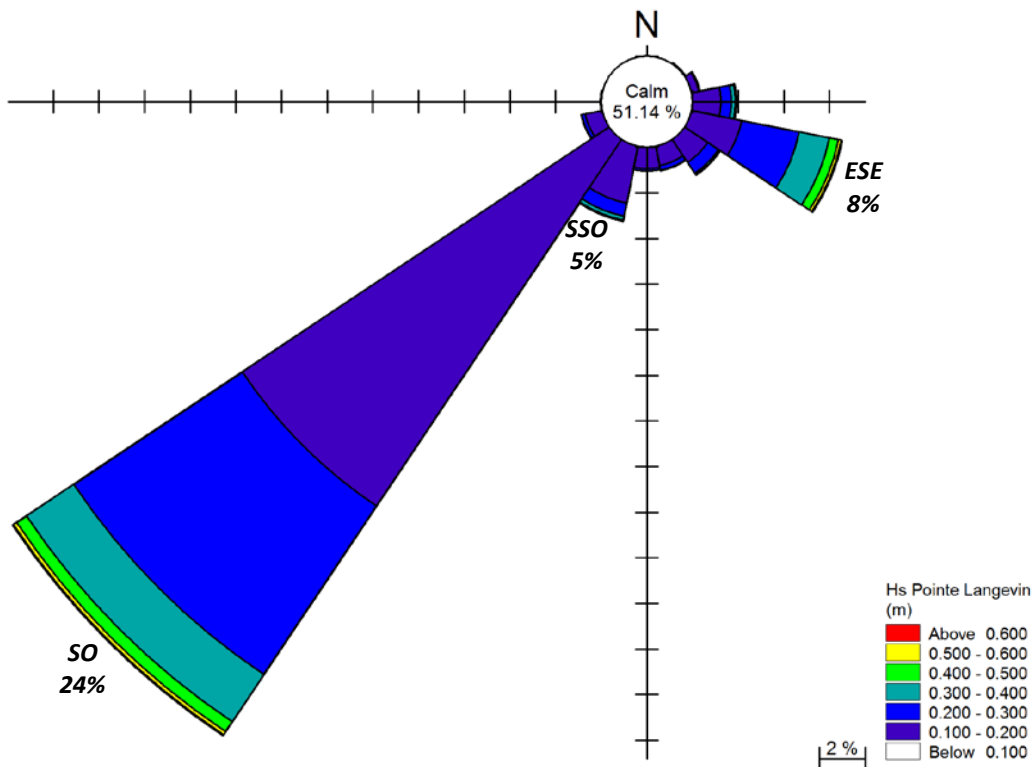


Figure 4.1: Rose de vagues 1992-2014 au large de Pointe Langevin

D'après la figure 4.1, les vagues proviennent de deux secteurs dominants, soit le sud-ouest (SO) et l'est-sud-est (ESE). En négligeant les vagues de faible hauteur, ces deux directions de vagues comptent pour environ 65% des vagues observées au site.

Par rapport à l'angle normal formé avec la côte, les vagues du SO et de l'ESE forment des angles d'incidence respectifs d'environ 76° et 36° (figure 4.2). Les vagues en provenance du SO parviennent donc au site avec une obliquité prononcée (supérieure à 45°), caractéristique des rivages instables. La dominance de ces vagues par rapport aux autres vagues du site vient également confirmer la migration observée des accumulations de sable vers le nord-est.



Figure 4.2: Incidence des vagues dominantes au site de Pointe Langevin

En référence à la figure 2.17, qui classe les différentes formes géomorphologiques en fonction du régime des vagues incident, la rose des vagues obtenue au large de Pointe Langevin donne une valeur de A égale à 0,75 (proportion de vagues asymétriques) et une valeur de U égale à 0,78 (proportion de vagues ayant un angle d'incidence élevé), ce qui indique des conditions propices à la formation de cordons littoraux.

Les vagues inférieures à 10 cm comptent pour 51% des vagues au site. Pour les deux directions dominantes de vagues, moins de 1% des vagues ont une hauteur significative supérieure à 40 cm. Comparativement aux autres secteurs du PSBLSJ, le secteur de Pointe Langevin est exposé à des vagues beaucoup plus faibles.

À noter que les vagues provenant du secteur SO sont majoritairement causées par des vents d'ouest soufflant sur le lac. En effet, au passage de l'île Bouliane, les vagues n'ont d'autre choix que de tourner selon un axe sud-ouest/nord-est. Pour ce qui est des vagues du secteur ESE, elles sont causées par des vents soufflant de la même direction sur la rivière Péribonka.

4.2 Courants fluviaux

La figure 4.3 superpose les valeurs minimales, médianes et maximales de niveaux et de débits déjà présentées au chapitre 2 au site de la Pointe Langevin. Ce graphique permet de voir plus clairement la simultanéité des conditions hydrodynamiques et permet d'élaborer des scénarios de modélisation réalistes.

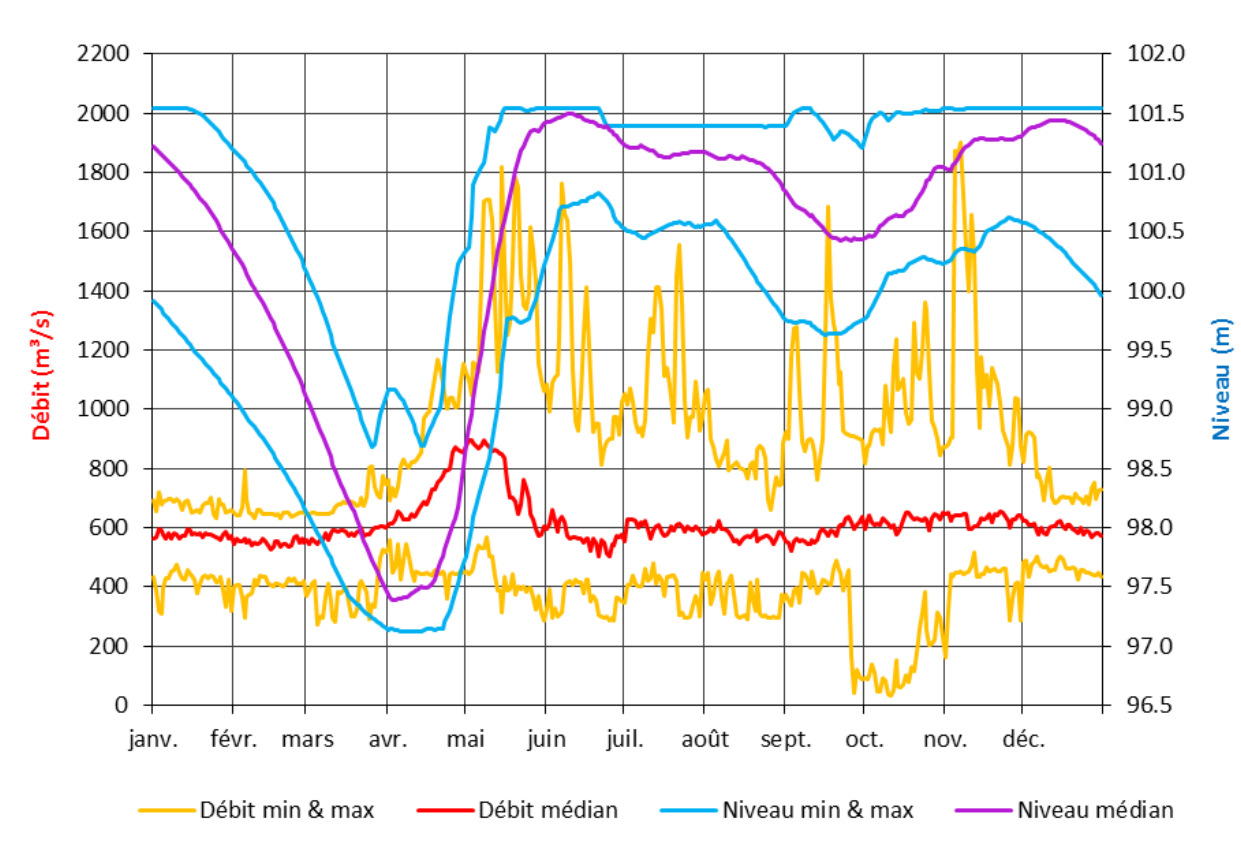


Figure 4.3: Statistiques des débits à Pointe Langevin et des niveaux d'eau du lac Saint-Jean

Quatre scénarios ont été mis au point pour simuler des vitesses fluviales érosives le long des berges de Pointe Langevin:

1. Débit de crue printanière : conditions hydrodynamiques qui maximisent les vitesses en rivière. Un cas de crue réelle, en avril-mai 2004, a été utilisé pour cette simulation. Les résultats sont présentés pour le 4 mai 2004, date à laquelle les vitesses les plus élevées sont obtenues lors de cette crue;
2. Débit de crue à niveau haut : débit en rivière maximum avec niveau d'eau élevé pour générer une bande de vitesses fortes le plus près possible du rivage. Le débit total maximal enregistré, soit 1 899 m³/s le 7 novembre 1999, a été utilisé pour cette simulation;

3. Débit médian sous le niveau maximum de 101,54 m : cas plus probable que le cas d'hydraulicité maximale à niveau haut ;
4. Conditions médianes en novembre : conditions représentatives de la période pendant laquelle les tempêtes d'ouest sont les plus fréquentes.

Le tableau ci-dessous résume les conditions modélisées pour chacun de ces scénarios, et les figures 4.4 à 4.7 illustrent les résultats obtenus en termes de vitesses d'écoulement dans le secteur de Pointe Langevin.

Conditions modélisées dans la simulation des courants fluviaux

| Scénario | Débit Péribonka (m ³ /s) | Débit Petite Péribonka (m ³ /s) | Niveau du LSJ (m) |
|----------|--|---|----------------------|
| 1 | 971 | 186 | 98,47 |
| 2 | 1854 | 45 | 101,52 |
| 3 | 648 | 24 | 101,54 |
| 4 | 629 | 21 | 101,14 |

Les vitesses d'écoulement les plus élevées sont obtenues pour les conditions de crue printanière lorsque le débit des rivières est à la hausse et que le niveau du lac n'a pas encore atteint les maximums observés en fin de crue (figure 4.4). Des vitesses supérieures à 1 m/s, avec des veines d'écoulement plus rapides, sont simulées dans le chenal principal de la rivière Péribonka. Le long du rivage, les vitesses sont moins élevées, à l'exception de quelques endroits localisés près des accumulations sableuses. Des zones de recirculation sont observées dans les baies, notamment entre les bornes 4 et 5 où des vitesses de l'ordre de 0,4-0,5 m/s sont obtenues. Les courants de retour dans les autres baies en érosion (bornes 2 et 7) sont toutefois de plus faible intensité.

Pour le cas de crue automnale (figure 4.5), bien que le débit soit pratiquement doublé par rapport au scénario de crue printanière, le niveau du lac plus haut fait en sorte que les vitesses sont significativement réduites. En effet, les vitesses simulées dans le chenal de la rivière Péribonka sont en moyenne de 0,55 m/s, et ne dépassent pas 0,25 m/s au passage des zones moins profondes près de la plage. Les zones de recirculation protègent les secteurs en érosion, avec des vitesses très faibles, de l'ordre de 0,05 m/s.

Pour les deux derniers scénarios modélisés, les conditions imposées au modèle sont très similaires et les patrons d'écoulement résultants présentent peu de différences (figures 4.6 et 4.7). Seules les vitesses sont légèrement plus fortes pour le scénario 4, qui comporte un niveau d'eau moins élevé (voir tableau ci-haut). Dans les deux cas, les vitesses moyennes dans le chenal principal de la rivière Péribonka devant Pointe Langevin sont d'environ 0,2 m/s. Près de la plage, les vitesses sont du même ordre, à l'exception de celles dans les zones de recirculation, qui sont pratiquement nulles (inférieures à 0,05 m/s).

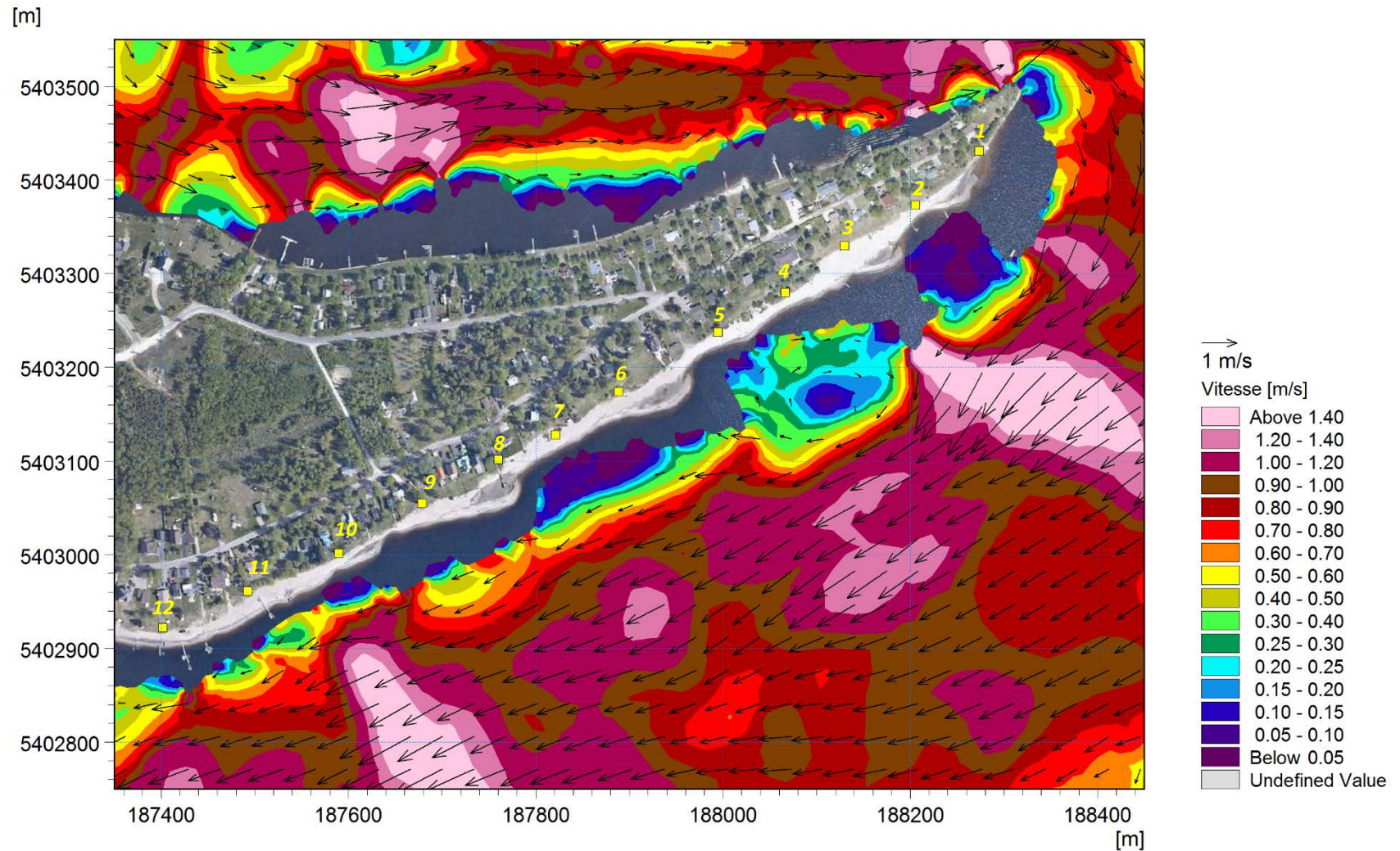


Figure 4.4: Vitesses lors de la crue printanière (4 mai 2004) – $Q_t = 1\,157\text{ m}^3/\text{s}$ et $H_{LSJ} = 98,47\text{ m}$

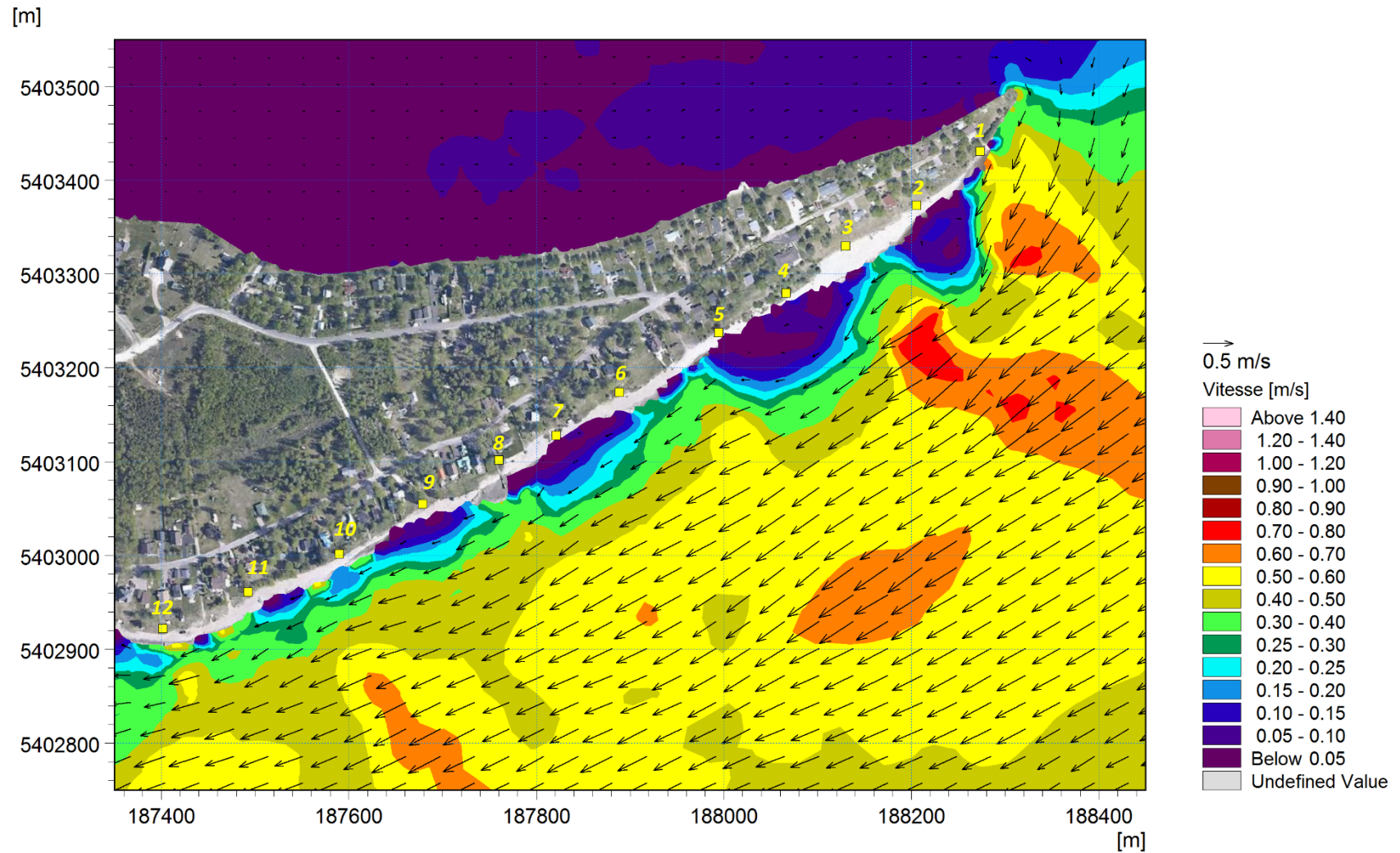


Figure 4.5: Vitesses pour le débit maximal (7 novembre 1999) – $Q_t = 1\,899\text{ m}^3/\text{s}$ et $H_{LSJ} = 101,52\text{ m}$

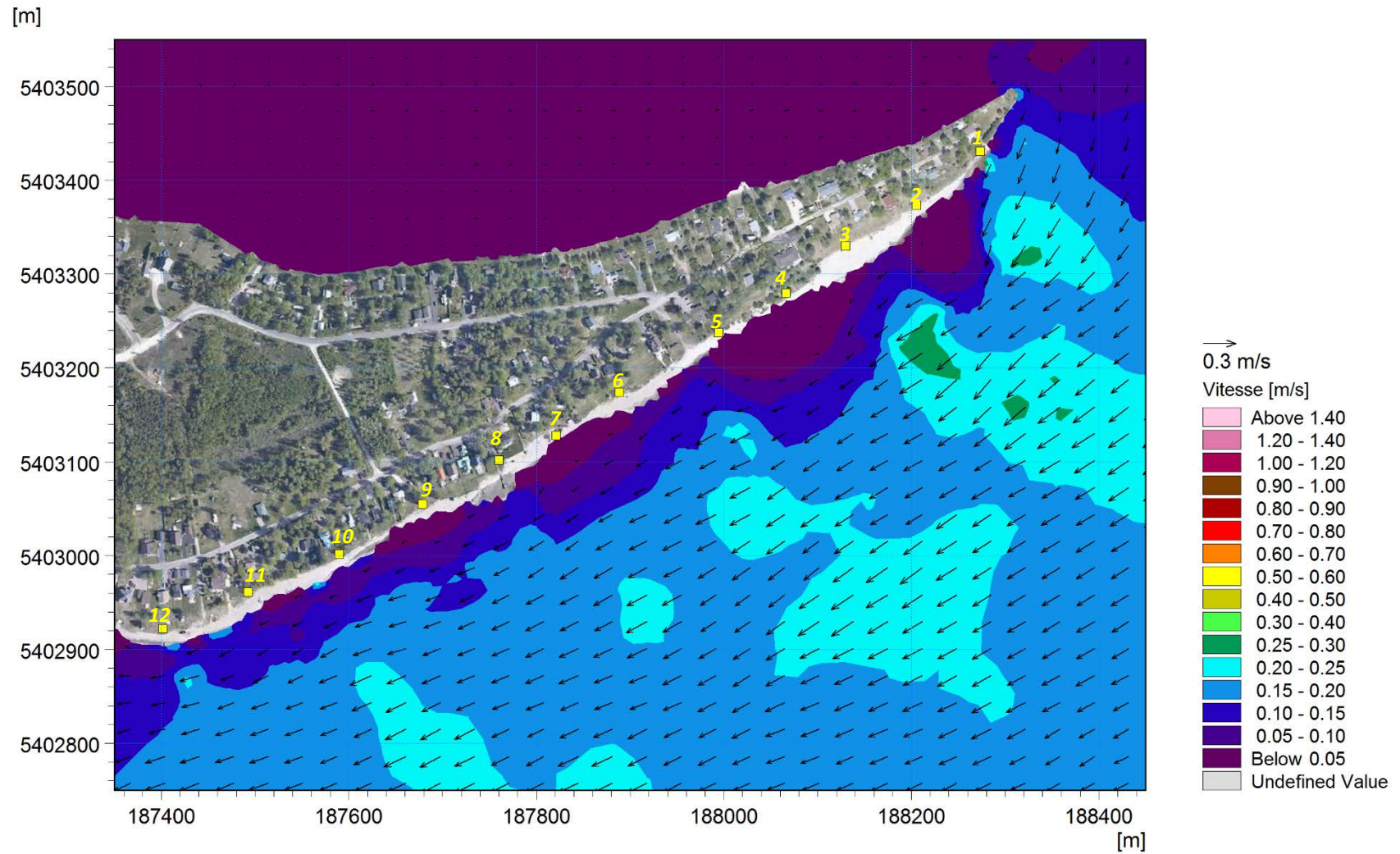


Figure 4.6: Vitesses pour le débit médian et le niveau maximal du lac – $Q_t = 672 \text{ m}^3/\text{s}$ et $H_{LSJ} = 101,54 \text{ m}$

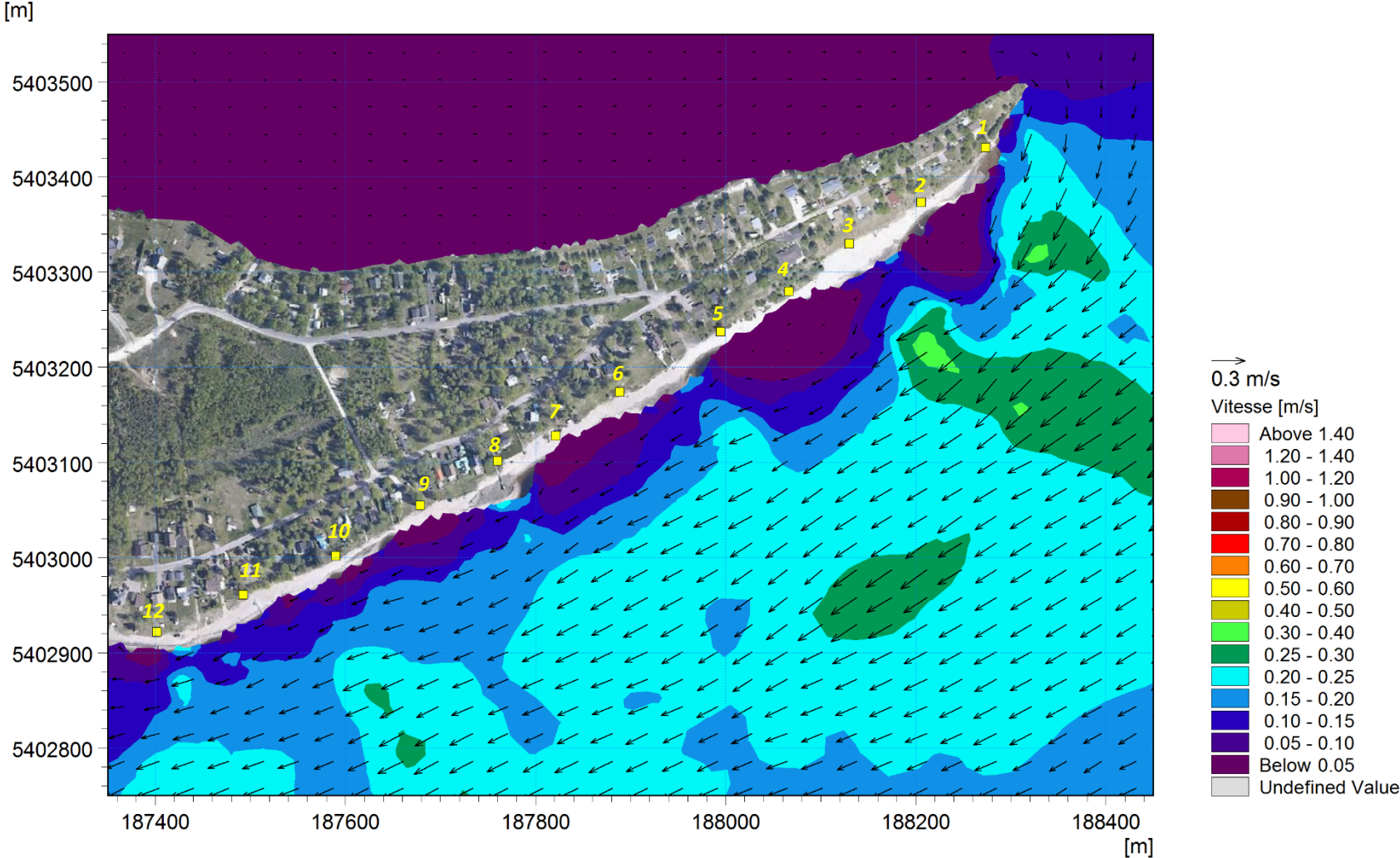


Figure 4.7: Vitesses pour les conditions médianes du mois de novembre – $Q_t = 650 \text{ m}^3/\text{s}$ et $H_{Lsj} = 101,14 \text{ m}$

D'après les résultats présentés aux figures précédentes, les vitesses induites par le débit en rivière près des berges de Pointe Langevin ne semblent pas être à l'origine des problèmes d'érosion observés. Des vitesses potentiellement érosives sont uniquement obtenues lors de la crue printanière, mais seulement dans l'une des baies en érosion. Le niveau bas pendant cette période fait également en sorte que les hauts de plage ne sont pas exposés à ces vitesses. Pendant le reste de l'année, les vitesses causées par les rivières sont plutôt faibles, et même pratiquement nulles dans les zones de recirculation situées devant les secteurs en érosion.

4.3 Action combinée des courants littoraux et fluviaux

Sur la base du régime des vagues établis à la section 4.1, les courants littoraux ont été simulés pour les deux directions de vagues dominantes au site, soit les vagues du SO et de l'ESE. Des simulations préliminaires ont permis d'établir qu'une vitesse de vent de 40 km/h permettait d'obtenir des vagues fortes, sans être trop rares.

Pour maximiser l'énergie des vagues à l'approche du site et simuler un débit en rivière fréquent, les paramètres hydrodynamiques du scénario 3 (niveau de 101,54 m et débit médian) de la section 4.2 ont été couplés aux vagues de tempête. Les résultats obtenus pour ces simulations sont présentés aux figures 4.8 et 4.9.

Par vents d'ouest, les courants littoraux générés par les vagues sont de sens opposé au courant de la rivière, et il se forme une bande de cisaillement entre les deux principales veines d'écoulement (figure 4.8). Ce type d'écoulement, bien que de faible vitesse, est connu pour être particulièrement turbulent. De plus, il permet de maintenir une bande de courants littoraux près de la berge orientée vers le nord-est, qui présente des vitesses de l'ordre de 0,2 m/s. Des vitesses plus élevées sont simulées localement (0,3-0,5 m/s), principalement sur les accumulations sableuses, où la profondeur d'écoulement est réduite. Dans les baies en érosion, les vitesses d'écoulement sont faibles.

Par vents d'ESE, les courants littoraux générés par les vagues et les courants en rivière sont dans le même sens et créent une veine d'écoulement plus uniforme que par vents d'ouest dans le chenal principal de la rivière (figure 4.9). Près de la rive, les patrons d'écoulement sont différents mais présentent sensiblement des vitesses du même ordre. Encore une fois, les baies ne semblent pas être soumises à des vitesses très érosives.

Les résultats présentés aux figures 4.8 et 4.9 mettent en évidence des courants littoraux près des berges de l'ordre de 0,2 à 0,4 m/s pour les deux directions de vents simulées. Pour des profondeurs d'écoulement faibles, telles que sur les accumulations de sable, de telles vitesses sont en mesure de déplacer des sables de calibre allant jusqu'à environ 1,5 mm (réf. [10]). Le déplacement des cordons littoraux est donc possible dans les deux sens le long du rivage. Compte tenu de la fréquence plus élevée des vagues du sud-ouest, le déplacement net est toutefois anticipé vers le nord-est, ce qui est en accord avec les observations historiques.

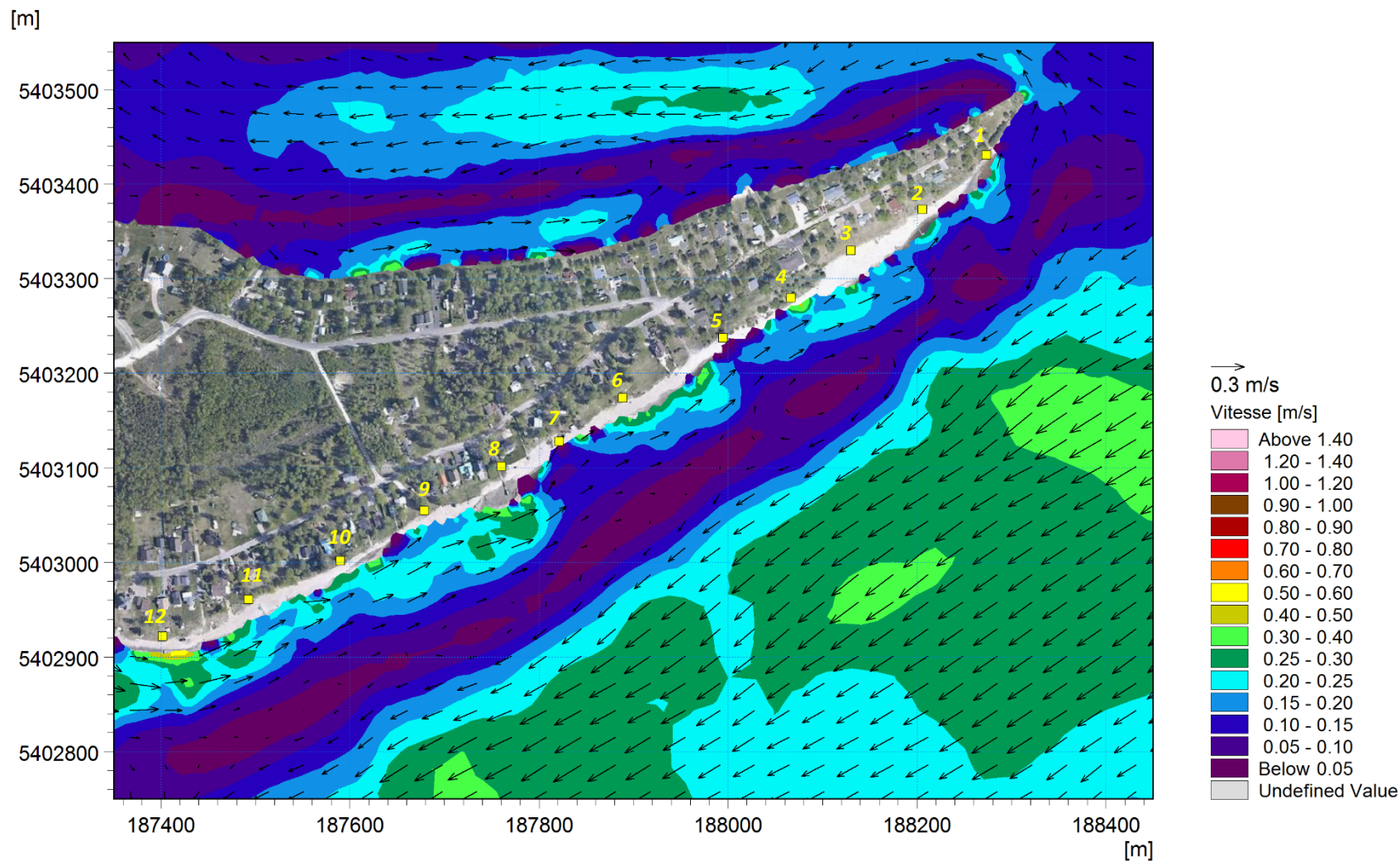


Figure 4.8: Courants dus à l'action combinée des vagues de l'ouest et des débits médians

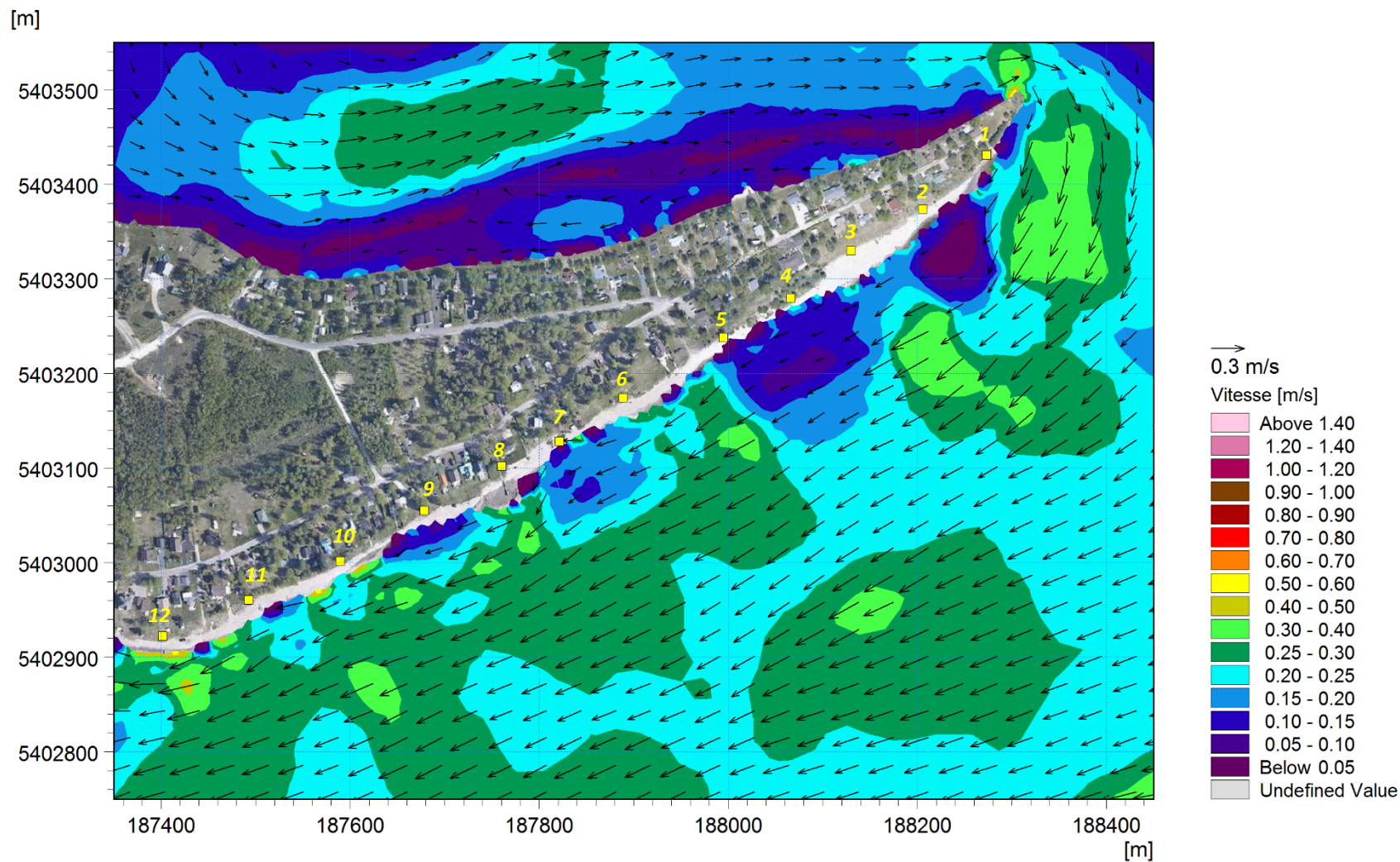


Figure 4.9: Courants dus à l'action combinée des vagues de l'ESE et des débits médians

4.4 Synthèse des résultats

La modélisation des vagues, des courants en rivière et des courants littoraux a permis de valider plusieurs hypothèses relatives aux formes géomorphologiques observées dans le secteur de Pointe Langevin. Le climat de vagues et les courants littoraux générés par les vagues réunissent en effet des conditions favorables à la formation et à l'évolution de cordons littoraux.

Les zones en érosion entre les cordons littoraux sont toutefois plus difficiles à expliquer. En effet, la modélisation ne permet pas d'y simuler des conditions particulièrement érosives. Les vitesses d'écoulement y sont faibles et les vagues incidentes obliques. Pourtant, les photos prises sur le site montrent des dommages importants, s'apparentant davantage à une érosion produite à court terme par des vagues de tempêtes (cf. section 2.3.1).

Les limitations du modèle numérique expliquent probablement en partie ces résultats mitigés. Tel que mentionné précédemment, le secteur de Pointe Langevin présente une dynamique sédimentaire particulièrement complexe, dont la composante tridimensionnelle n'est pas négligeable et dont les effets de vagues ne sont que partiellement représentés (réflexion, diffraction).

Une autre explication possible réside dans les zones localisées d'érosion (*erosional hot spots*), un phénomène mal compris observé dans les plages rechargées et dont les causes principales sont généralement associées à la transformation des vagues et au transport sédimentaire qui en résulte (réf. [5] et [11]).

Le chapitre suivant complète la revue de littérature amorcée au chapitre 2 et présente des études de cas et des recommandations pour des milieux côtiers présentant des cordons littoraux et des zones localisées d'érosion.

5 DISCUSSION

La dynamique sédimentaire du secteur de Pointe Langevin fait en sorte qu'il s'y crée une alternance de zones d'accrétion et d'érosion. Ce type de rivage est typique des milieux côtiers soumis à des vagues dominantes ayant un angle d'incidence élevé, qui maintiennent le rivage dans des conditions instables. Une première discontinuité amorce généralement le processus, que ce soit un ouvrage, un rechargement de plage ou une accumulation de source naturelle, suivie d'une réaction en chaîne favorisant la formation d'accumulations et de zones d'érosion. Dans le cas du lac Saint-Jean, il est probable que la quantité de sédiments introduite par l'érosion importante des berges résultant du rehaussement du lac en 1926 ait amorcé le processus. Les rechargements de plage l'ont probablement accéléré par la suite.

Le milieu physique de Pointe Langevin étant ce qu'il est (localisation, exposition aux vagues, régulation du lac, etc.), les interventions pour minimiser les problèmes d'érosion perturbent inévitablement la dynamique du milieu, aggravant dans certains cas la situation. Les mécanismes d'érosion étant complexes, il importe de surveiller le site de façon régulière pour mieux comprendre sa dynamique sédimentaire suite à des épisodes de tempête ou à des altérations de son rivage (nivellement, rechargements, etc.). Les informations disponibles actuellement ne permettent pas de bien corréliser les érosions de plage rapportées par les riverains avec des conditions érosives précises.

Depuis le début du PSBLSJ, les rechargements ont été privilégiés pour contrer les problèmes d'érosion dans le secteur de Pointe Langevin. Les exemples présentés à la section 5.1 semblent confirmer la justesse de ce choix, avec deux types d'ouvrage (épis et de brise-lames) n'offrant aucune amélioration dans une zone soumise à des vagues obliques. Quelques points intéressants et pistes de réflexion associés aux rechargements de plage sont présentés à la section 5.2.

5.1 Ouvrages de protection

D'après la littérature consultée, les interventions habituellement appliquées aux rivages pour contrôler l'érosion ont peu de succès dans les zones littorales où les vagues parviennent au site avec un angle d'incidence élevé.

Uda et al. (réf. [13]) ont réalisé une étude qui s'applique particulièrement bien au cas présent. À l'aide d'un modèle numérique tridimensionnel, le transport sédimentaire a été simulé à long terme le long d'une plage soumise à des vagues dominantes ayant un angle d'incidence de 60°. Sans ouvrage, ce modèle a reproduit avec succès la formation de cordons littoraux.

L'influence d'un seul épi perpendiculaire, puis d'un brise-lames détaché, a ensuite été testée dans le même modèle. Les figures 5.1 et 5.2 présentent l'évolution morphologique des cordons littoraux obtenue suite à ces changements.

Tel qu'illustré à la figure 5.1, l'épi ne permet pas d'arrêter le déplacement des cordons littoraux, qui finissent par le contourner. La plage en aval de l'épi, privée de sédiments, présente par ailleurs une érosion encore plus importante qu'avant la mise en place de l'épi.

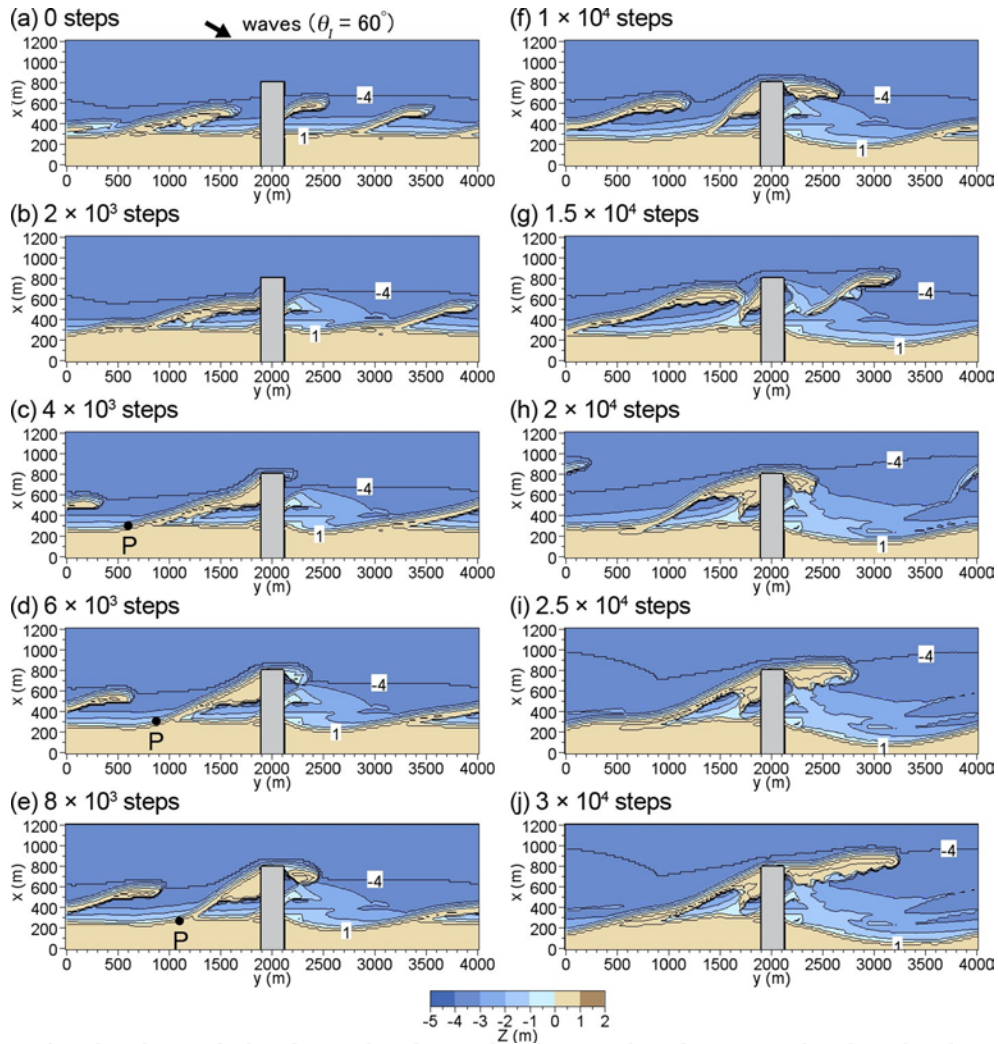


Figure 5.1: Effet de la construction d'un épi sur la formation de cordons littoraux

L'effet du brise-lames semble encore pire que celui de l'épi (figure 5.2). Les résultats de modélisation montrent la formation d'une accumulation importante entre le brise-lames et le rivage (tombolo), qui bloque complètement la dérive littorale. Le trait de côte en aval du brise-lames montre un retrait prononcé.

La mise en place d'un brise-lames a été testée sur le site il y a plus de 50 ans (cf. section 2.3.2). D'après les photos aériennes disponibles, celui-ci aurait été construit entre 1947 et 1964. Un tombolo est d'ailleurs apparent en 1964. En 1981, le brise-lames n'existe plus. La raison exacte de son démantèlement est toutefois inconnue.

Sur la base des résultats de modélisation obtenus par Uda et al. (réf. [13]) et des observations historiques (brise-lames), l'implantation de structures uniques dans le secteur de Pointe Langevin n'apparaît pas comme étant une option recommandable.

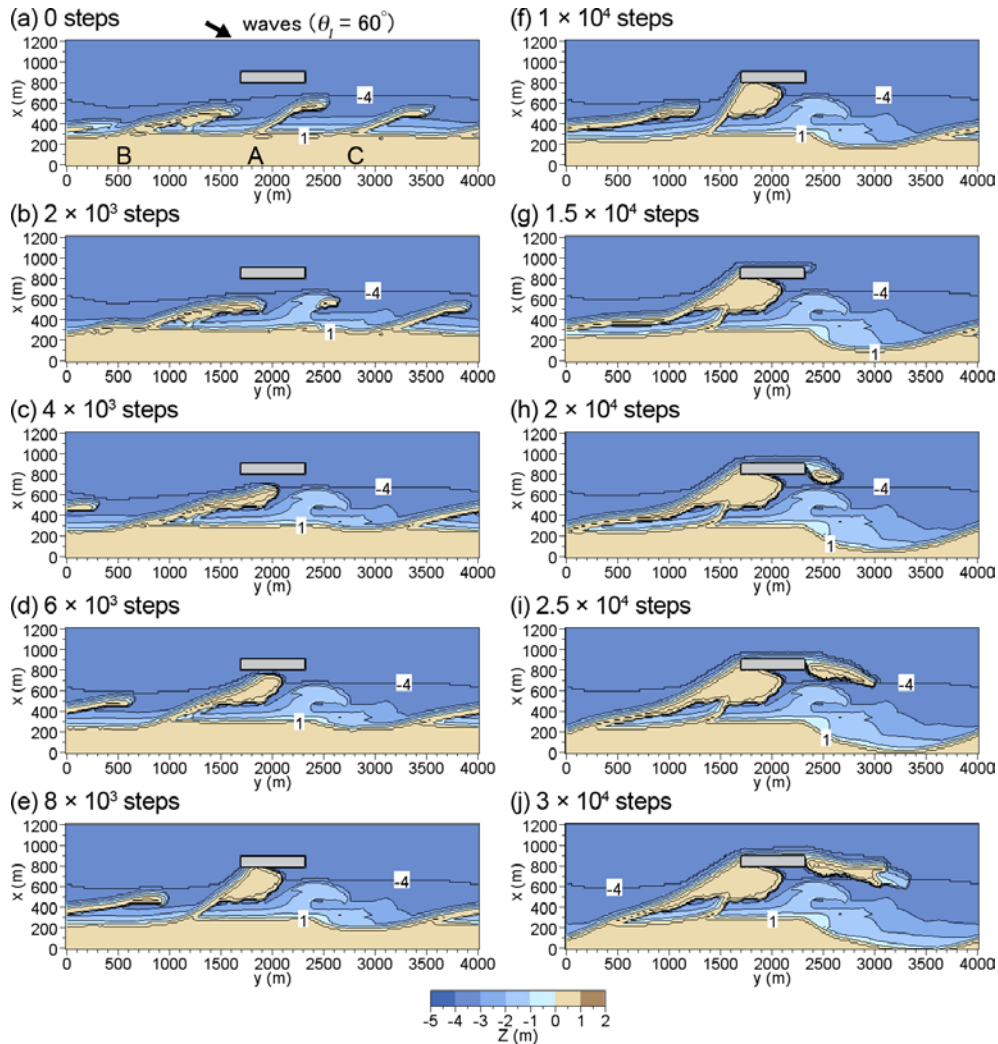


Figure 5.2: Effet de la construction d'un brise-lames sur la formation de cordons littoraux

5.2 Rechargements de plage

Les rechargements de plage sont pratique courante pour protéger les berges de l'érosion. Ils constituent toutefois une perturbation à l'équilibre de la plage rechargée et peuvent aussi être à l'origine de problèmes d'érosion si la plage rechargée est exposée à des vagues très obliques.

Un rechargement effectué sur un segment limité de plage introduit en effet une perturbation dans la ligne de côte. Dans un milieu dynamique avec une dérive littorale importante, cela peut créer une zone localisée d'érosion plus en aval (*erosional hot spot*), et ce même très peu de temps après la fin des travaux. Ce type d'érosion est problématique, car il vient compromettre l'efficacité générale et la perception du public de l'ensemble du projet de rechargement (réf. [5]).

À plus long terme, une réaction en chaîne peut se produire et contribuer à former au fil du temps une succession de zones d'accrétion et d'érosion, migrant dans la direction dominante du transport littoral.

Peu de mesures d'atténuation ont été trouvées dans la littérature pouvant s'appliquer au secteur de Pointe Langevin. De façon générale, il est recommandé d'opter pour un rechargement tendant vers un retour à la ligne de rivage naturelle, ce qui n'est pas véritablement une option dans un secteur habité près d'un lac régularisé. Un rechargement donnant lieu à une plage plus rectiligne, plutôt qu'à largeur constante (figure 5.3), est aussi suggéré pour diminuer les effets liés aux vagues. À ce titre, les travaux de nivellement de plage faits ces dernières années ne sont pas nuisibles. Finalement, une attention particulière est également recommandée dans la conception des sections de transition aux extrémités des zones de rechargement (réf. [5]).

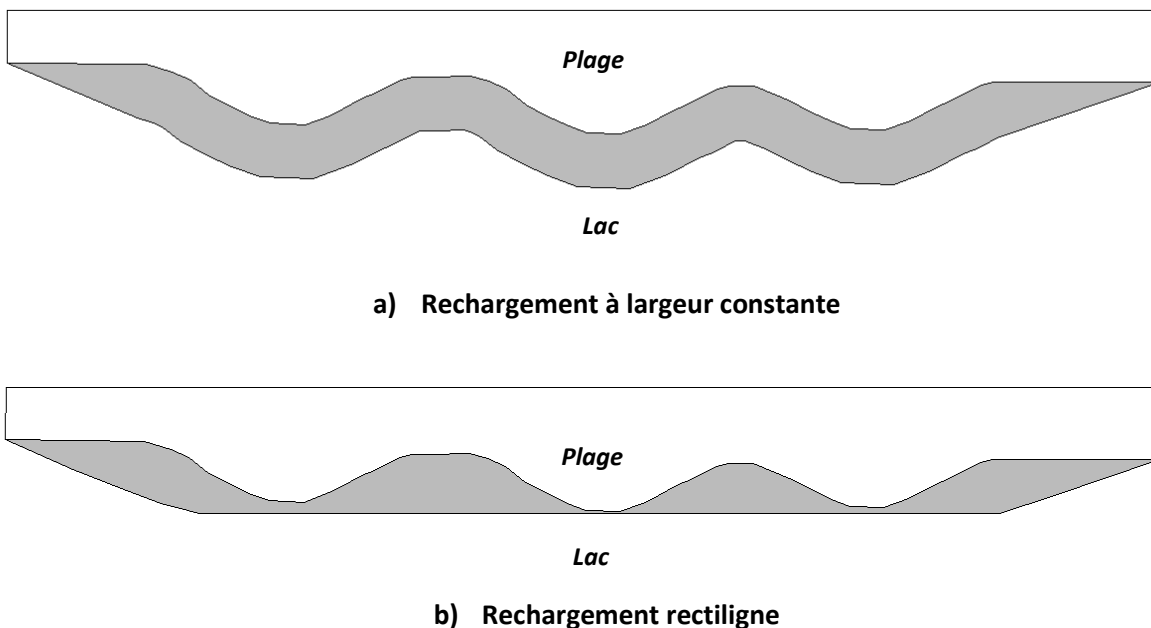


Figure 5.3: Rechargements de plage à largeur constante et rectiligne

Suivant ce raisonnement, les rechargements de plage à Pointe Langevin devraient être réalisés de sorte à « lisser » le plus possible les ondulations du rivage. Le rechargement effectué en 2015 entre les bornes 1 et 10 sera à cet égard très intéressant. Un suivi régulier des zones en érosion, si elles se produisent, est recommandé pour mieux comprendre les conditions érosives particulièrement complexes de ce site.

6 CONCLUSION

Le secteur de Pointe Langevin à Dolbeau-Mistassini présente une dynamique sédimentaire particulière par rapport aux autres secteurs suivis dans le cadre du PSBLSJ, qui se manifeste par une alternance de zones d'accrétion et d'érosion le long de son rivage. Ces formations sont caractéristiques de milieux côtiers instables, exposés à des vagues de forte obliquité.

L'examen des photos historiques du site montre que les figures sédimentaires du site migrent et évoluent depuis plusieurs décennies, avec des changements plus marqués ces trente dernières années. Une revue de littérature portant sur les vagues ayant un angle d'incidence élevé a permis d'identifier plusieurs mécanismes pouvant être à l'origine de ces formes. Ceux se prêtant à une représentation bidimensionnelle ont ensuite été vérifiés par modélisation numérique.

Les résultats de modélisation numérique ont permis de confirmer que le climat de vagues et les courants littoraux générés par celles-ci sont effectivement favorables au transport sédimentaire le long du rivage de Pointe Langevin et à la formation de cordons littoraux et/ou de zones localisées d'érosion (*erosional hot spots*). Ils n'ont pu par contre mettre en évidence des forces érosives suffisamment importantes pour expliquer l'érosion sévère observée à certains endroits ces dernières années. L'approche de modélisation bidimensionnelle, la représentation limitée des effets de vagues, et la complexité des phénomènes en jeu expliquent probablement ce résultat moins concluant.

Sur la base des informations trouvées dans la littérature, des interventions passées et de la compréhension globale de la dynamique sédimentaire du secteur, l'ajout d'ouvrages de contrôle ne semble pas bénéfique pour contrer l'érosion. Les rechargements apparaissent comme étant une solution mieux adaptée, si faits de façon à créer autant que possible une plage rectiligne.

Un suivi régulier du secteur est recommandé pour bien identifier les épisodes érosifs et pouvoir ainsi documenter les conditions menant aux problèmes d'érosion affectant le site (vents, vagues, débit en rivière, niveau d'eau du lac, etc.). Une meilleure compréhension des phénomènes en jeu et de leur échelle de temps permettra de mieux orienter les interventions futures, tout en évitant des réactions en chaîne indésirables pouvant réinitialiser les mécanismes d'érosion ciblés à la base.

RÉFÉRENCES

- [1] ROPARS, Y. (2015). *Érosion des berges du lac Saint-Jean – Étude des vents – Rapport technique*. Préparé pour Lasalle|NHC, pour le compte de Rio Tinto Alcan, mars 2015.
- [2] MASSÉ, G. (2014). *Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean – Avis technique – Sites 88.11.01 et 92.11.01 / Pointe Langevin*. N/D : 101667.104-001. Préparé par Roche, Groupe-Conseil, pour le compte de Rio Tinto Alcan, mars 2014.
- [3] ASHTON, A. D., & MURRAY A. B. (2006). *High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits, and capes*. Journal of Geophysical Research, 111 (F4).
- [4] ASHTON, A., MURRAY, A.B. & ARNAULT, O. (2001). Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high-angle waves. Nature, vol. 414, 296-300.
- [5] U.S. Army Corps of Engineers (2002). *Coastal Engineering Manual*. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (en 6 volumes).
- [6] Kraus, N.C. et Galgano, F.A. (2001). *Beach erosional Hot Spots: Types, Causes and Solutions*. USACE, ERDC/CHL CHETN-II-44.
- [7] XHARDÉ, R., LONG, B.F. ET FORBES, D. L. (2011). *Short-Term and Shoreface Evolution on a Cuspate Foreland Observed with Airborne Topographic and Bathymetric LIDAR*. Journal of Coastal Research, 62, 50-61.
- [8] Denault, C., Cueto-Bergner A. et Villeneuve M. (2016). *Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (2017-2026) – Étude et modélisation de l'érosion des berges – Secteur Belle-Rivière – Volume 2*. Rapport Lasalle|NHC R.0024-2 préparé pour Rio Tinto Alcan, mars 2016.
- [9] AUBEL, T., DENAULT, C., CUETO-BERGNER, A., GALLANT, N ET VILLENEUVE M. (2016). *Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (2017-2026) – Étude et modélisation de l'érosion des berges – Rapport d'étude – Volume 1*. Rapport Lasalle|NHC R.0024-1 préparé pour Rio Tinto Alcan, mars 2016.
- [10] VAN RIIJN, L.C. (2014). Simple General Formulae for Sand Transport ne Rivers, Estuaries and Coastal Waters. <http://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Formulaesandtransport.pdf>.
- [11] BENEDET, L. FINKL C. W. ET HARTOG W.M. (2007). *Processes Controlling Development of Erosional Hot Spots on a Beach Nourishment Project*. Journal of Coastal Research Volume 23, Issue 1: 33-48, 2007.
- [12] DEAN, R. G. (2002). *Beach Nourishment – Theory and Practice*. Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 18. World Scientific Publishing.
- [13] UDA, T., SERIZAWA, M., & MIYAHARA, S. (2014). *Development of sand spits and cuspate forelands with rhythmic shapes and their deformation by effects of construction of coastal structures (Chap. 19)*. INTEC. <http://www.intechopen.com/books/computational-and-numerical-simulations/development-of-sand-spits-and-cuspate-forelands-with-rhythmic-shapes-and-their-deformation-by-effect#article-front>, 419-450.
- [14] VAN DEN BERG, N., FALQUÉS, A., & RIBAS, F. (2011). *Long-term evolution of nourished beaches under high angle wave conditions*. Journal of Marine Systems, 88(1), 102-112.