

## NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

### Simulation numérique de l'aléa d'inondation côtière dans la région de la Péninsule acadienne au Nouveau-Brunswick

Ferguson, Sean; Provan, Mitchel; Murphy, Enda; Kim, Joseph

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

#### **Publisher's version / Version de l'éditeur:**

<https://doi.org/10.4224/40003454>

*Technical Report (Conseil national de recherches du Canada. Centre de recherche en génie océanique, côtier et fluvial); n° NRC-OCRE-2021-TR-060, 2022-03-31*

#### **NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :**

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=0b754ee8-85fd-4c4e-a23b-d63832e8e9f4>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=0b754ee8-85fd-4c4e-a23b-d63832e8e9f4>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

**Questions?** Contact the NRC Publications Archive team at

PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

**Vous avez des questions?** Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

**CMRC-NRC**

# **Simulation numérique de l'aléa d'inondation côtière dans la région de la Péninsule acadienne au Nouveau-Brunswick**

Rapport n° : NRC-OCRE-2021-TR-060

Préparé pour :  
Programme canadien pour la sûreté et la sécurité de  
Recherche et développement pour la défense Canada

Préparé par :  
Centre de recherche en génie océanique, côtier et fluvial  
Conseil national de recherches du Canada  
Ottawa (Ontario)

Auteurs : Sean Ferguson, Mitchel Provan,  
Enda Murphy, Joseph Kim

Date : Mars 2022



### Historique des révisions

Version du document	Nom	Organisme d'appartenance	Date des changements	Commentaires
0.1	SF	GOCF CNRC	31-03-2022	Rapport final

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le Conseil national de recherches du Canada, 2022.

#### Restriction quant à la divulgation

Le présent document contient des renseignements exclusifs qui ne peuvent être divulgués, dupliqués ou utilisés, en tout ou en partie, à d'autres fins que celles pour lesquelles ils ont été divulgués. À tout moment, et sur demande du Conseil national de recherches du Canada, toutes les copies physiques ou numériques de ce document doivent être détruites ou retournées au Conseil national de recherches du Canada.

## Résumé

Les travaux décrits dans ce rapport ont été réalisés dans le cadre du projet Atténuation des inondations côtières au Canada, qui vise à : réunir des chercheurs, des praticiens et des communautés pour partager des connaissances et de l'expertise à l'appui des stratégies de réduction des risques de catastrophe en cas d'onde de tempête côtière et de tsunami; élaborer et promouvoir une approche fondée sur les données probantes pour la prise de décisions sur la réduction de risque de désastre en cas de tsunamis et d'ondes de tempête; faire la démonstration des meilleures pratiques. Pour les trois études de cas en cours, une pour chacune des côtes canadiennes – atlantique, arctique et pacifique, l'équipe de projet a réalisé, ou travaille à réaliser, une évaluation des risques et des aléas d'inondation côtière. Les connaissances tirées de chaque étude de cas faciliteront l'élaboration de lignes directrices résumant les pratiques exemplaires et les méthodes d'évaluation des aléas d'inondation côtière à l'appui des analyses fondées sur les risques.

Les aléas d'inondation, actuels et futurs, causés par les ondes de tempête dans la Péninsule acadienne, au Nouveau-Brunswick, ont été évalués dans le cadre de l'étude de cas sur la côte atlantique. Les objectifs et la portée de l'étude ont été élaborés en consultation avec les partenaires du projet, des experts locaux, des universitaires, des groupes privés ou à but non lucratif et des représentants du gouvernement et des collectivités. L'évaluation des aléas reposait sur des modèles hydrodynamiques numériques, aux échelles régionale et communautaire, mis au point pour simuler les ondes de tempête dans les eaux côtières de l'Atlantique canadien, y compris une simulation détaillée des inondations des terres dans sept collectivités côtières de la Péninsule acadienne.

Le modèle régional d'onde de tempête couvre une grande partie de la côte atlantique et du plateau continental du Canada et est suffisamment grand pour refléter les ondes de tempête générées par le forçage météorologique synoptique. La compétence du modèle régional a été évaluée à l'aide des données fournies par les enregistrements des marégraphes. Les effets de la glace de mer sur les ondes de tempête et la contribution potentielle de la surcote liée aux vagues aux niveaux totaux d'eau sur la côte est de la Péninsule acadienne ont été étudiés à l'échelle régionale. Les résultats de l'analyse ont indiqué que la surcote liée aux vagues causée par des vents forts et soutenus de l'est ou du nord-est peut contribuer à l'élévation des niveaux d'eau sur la côte. Inversement, l'analyse a montré que de fortes concentrations de glace de mer peuvent atténuer les ondes de tempête. Des méthodes permettant d'incorporer les effets de la glace de mer dans la modélisation hydrodynamique des ondes de tempête ont été explorées et appliquées avec un certain succès; ces résultats constituent le fondement d'éventuelles recherches futures axées sur l'évolution des aléas d'inondation côtière dans le golfe du Saint-Laurent dans le contexte de la diminution de la glace de mer pour de futurs scénarios de changements climatiques.

Le modèle à l'échelle communautaire, axé spécialement sur la Péninsule acadienne, est imbriqué dans le modèle régional et offre une haute résolution spatiale (environ 10 m) dans sept collectivités de la Péninsule acadienne : Maisonnette, Caraquet, Bas-Caraquet, Pointe-Brûlée, Shippagan, Le Goulet et Lamèque. En raison de la rareté des enregistrements des marégraphes dans les environs de la Péninsule acadienne, des méthodes non conventionnelles ont été explorées pour faciliter l'étalonnage et la validation. Le modèle à l'échelle communautaire a été étalonné à l'aide d'indicateurs de niveaux d'eau élevés ayant fait l'objet de relevés et fournis par le gouvernement du Nouveau-Brunswick. La compétence du modèle a également été évaluée d'après des preuves photographiques et vidéo des inondations.

Dans la Péninsule acadienne, la plupart des ondes de tempête extrêmes se produisent pendant la saison hivernale, entre octobre et mars, et en grande partie entre novembre et février. Ces événements coïncident en majorité avec des ondes de tempête provoquées par des tempêtes hivernales extratropicales. Toutefois, une petite proportion d'entre eux représente des ondes de tempête provoquées par des cyclones post-tropicaux, qui ont tendance à se produire en été et en automne. L'aléa d'inondation côtière a été évalué pour une série de probabilités selon une approche fondée sur le risque. Pour soutenir cette analyse, on a élaboré des événements d'ondes de tempête synthétiques, présentant chacun une probabilité ou vraisemblance de dépassement annuel (PDA) unique. On a examiné un certain nombre de méthodes statistiques pour étudier la probabilité et l'ampleur des aléas dus aux ondes de tempête dans la Péninsule acadienne, notamment des analyses univariées des valeurs extrêmes des ondes de tempête et des niveaux d'eau, ainsi que des méthodes multivariées qui intègrent la probabilité conjointe des marées et des ondes de tempête. Six événements synthétiques d'aléas dus aux ondes de tempête ont été élaborés à partir des données disponibles provenant du marégraphe de Belledune pour représenter des événements d'onde de tempête avec des probabilités de dépassement annuel prescrites dans les conditions actuelles du niveau de la mer. On a mis au point 18 autres événements d'aléa dus aux ondes de tempête, représentant les mêmes événements d'onde de tempête, mais selon trois scénarios différents d'élévation du niveau relatif de la mer.

Chacun des 24 aléas d'inondation liés aux ondes de tempête et à l'élévation du niveau de la mer a été modélisé aux échelles régionale et communautaire. On a ainsi produit des cartes illustrant les hauteurs maximales des crues, les étendues des inondations et les aléas liés au débit pendant chaque événement dans chacune des sept collectivités de la Péninsule acadienne. Dans la mesure du possible, on a comparé les résultats du modèle aux cartes des inondations existantes disponibles dans la documentation et élaborées à l'aide d'autres techniques. Les principaux résultats sont résumés ci-après :

- Les résultats du modèle indiquent qu'au moins une partie des infrastructures de toutes les collectivités de la Péninsule acadienne étudiées en détail, à l'exception de Caraquet, est exposée à des aléas d'inondation lors d'ondes de tempête courantes (par exemple, des probabilités de dépassement annuel de 50 % ou de 20 %) dans les conditions actuelles du niveau de la mer; à Caraquet, les infrastructures ne sont pas exposées à des aléas dus aux ondes de tempête ayant des probabilités de dépassement annuel de 10 % ou plus.
- Dans les conditions actuelles du niveau de la mer, les aléas liés au débit dépassant les critères de sécurité des piétons et les dommages structuraux sont rares dans les collectivités d'intérêt; les aléas liés au débit dépassant les critères de sécurité des piétons et les dommages structuraux sont limités à des emplacements localisés et distincts, coïncidant avec les étranglements hydrauliques causés par les structures des chaussées.
- Selon les résultats du modèle, l'exposition aux aléas d'inondation augmente avec l'élévation du niveau de la mer. Dans les sept collectivités de la Péninsule acadienne, les aléas d'inondation due à une onde de tempête pour un événement ayant une probabilité de dépassement annuel de 10 % selon le scénario d'élévation du niveau mondial de la mer (ENMM) de 0,5 m ressemblaient à l'événement présentant une probabilité de dépassement annuel de 1 % selon les niveaux de la mer actuels. De manière générale (dans six des sept collectivités), les aléas d'inondation associés aux ondes de tempête ayant une probabilité de dépassement annuel de 50 % dans le scénario d'élévation du niveau de la mer mondial de 0,5 m ressemblaient à l'événement avec une probabilité de dépassement annuel de 5 % ou de 2 % dans les conditions actuelles du niveau de la mer.

- De manière générale, les étendues des inondations délimitées à partir de la modélisation hydrodynamique des événements d'aléa d'ondes de tempête dans cette étude concordent bien avec la modélisation « en baignoire » réalisée dans d'autres études pour des probabilités d'événements comparables. La modélisation hydrodynamique a permis d'obtenir des informations supplémentaires par rapport à la modélisation en baignoire, concernant la propagation spatiale et temporelle de la crue, les vitesses du débit et la durée des inondations. Certaines divergences ont été observées entre les résultats du modèle hydrodynamique et ceux du modèle en baignoire à proximité des caractéristiques à résolution fine de la côte (par exemple, les structures côtières). Les résultats donnent à penser que ces divergences sont liées aux différences de résolution des modèles. Bien que la modélisation en baignoire ne renseigne pas sur la dynamique du débit, cette approche de modélisation permet une haute résolution des caractéristiques de la plaine d'inondation côtière et est bien adaptée pour estimer l'étendue maximale des inondations et la hauteur maximale des crues lorsque les interactions dynamiques avec la topographie et les caractéristiques de la plaine d'inondation ne sont pas importantes.

Les résultats de l'évaluation des aléas étayeront les évaluations des risques effectuées par Ressources naturelles Canada pour les sept collectivités de la Péninsule acadienne. Les résultats serviront à déterminer les infrastructures et les autres actifs exposés et touchés par les inondations côtières. D'autres analyses chercheront à évaluer les dommages et les impacts sur les collectivités afin de guider l'atténuation des aléas d'inondation côtière. Les résultats de la modélisation régionale seront également mis à la disposition des utilisateurs potentiels afin de soutenir les initiatives futures d'évaluation des aléas et des risques à proximité de la zone d'étude du modèle régional.

# Table des matières

Résumé.....	iii
Table des matières.....	vi
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xi
Acronymes et abréviations.....	xii
1 Introduction et contexte.....	13
1.1 Aperçu du projet.....	13
1.2 Risques et aléas d'inondation côtière.....	13
1.3 Portée.....	14
2 Établir des objectifs grâce à la consultation des collectivités et des partenaires.....	14
3 Sommaire des recherches antérieures.....	15
4 Données disponibles.....	16
4.1 Bathymétrie.....	16
4.2 Topographie.....	17
4.3 Niveaux d'eau.....	17
4.3.1 Marégraphes et niveaux d'eau mesurés.....	17
4.3.2 Résidus non tidaux.....	20
4.3.3 Caractère saisonnier des événements d'onde de tempête.....	22
4.4 Vent et pression atmosphérique.....	23
4.5 Données sur la glace de mer.....	26
4.6 Couverture terrestre.....	27
4.7 Bâtiments et infrastructures.....	27
4.8 Élévation du niveau relatif de la mer.....	28
4.9 Mesures des niveaux d'eau élevés.....	29
4.10 Preuves photographiques et vidéo des inondations.....	30
5 Aperçu de l'approche de modélisation.....	30
6 Élaboration d'un modèle régional d'ondes de tempête sur la côte est.....	31
6.1 Configuration du modèle.....	31
6.2 Conditions aux limites du modèle.....	32
6.3 Étalonnage du modèle.....	33
6.4 Validation des modèles.....	37
6.4.1 Influence des vagues et de la glace de mer.....	39

7	Élaboration du modèle à l'échelle communautaire .....	44
7.1	Configuration du modèle .....	44
7.1.1	Maillage du modèle .....	44
7.1.2	Élévations du modèle .....	46
7.1.3	Empreintes des bâtiments .....	48
7.1.4	Considérations spéciales pour les événements d'onde de tempête du 6 décembre 2010 et du 21 décembre 2010 .....	50
7.2	Conditions aux limites du modèle .....	50
7.3	Étalonnage du modèle.....	51
7.3.1	Approche d'étalonnage.....	51
7.3.2	Inondations de décembre 2010.....	52
7.3.3	Comparaison avec les indicateurs des niveaux d'eau élevés relevés .....	53
7.4	Validation des modèles .....	57
7.5	Limites .....	59
8	Élaboration d'évènements d'aléa.....	60
8.1	Sélection des marégraphes .....	60
8.2	Analyse statistique des données des marégraphes.....	64
8.2.1	Statistiques des valeurs extrêmes des pointes dépassant un seuil.....	65
8.2.2	Probabilité conjointe des marées et des ondes de tempête .....	68
8.3	Comparaison avec les études antérieures .....	72
8.4	Évènements d'aléa.....	74
9	Simulations d'ondes de tempête synthétiques .....	75
9.1	Mise à l'échelle des événements de tempête.....	75
9.2	Modélisation de l'élévation du niveau relatif de la mer.....	76
9.3	Résultats.....	76
9.3.1	Aléa d'inondation actuel.....	76
9.3.2	Prise en compte des aléas d'inondation futurs pour l'élévation du niveau de la mer .....	82
9.3.3	Aléa de débit .....	84
10	Discussion .....	88
10.1	Comparaison avec la modélisation en baignoire .....	88
10.1.1	Le Goulet.....	88
10.1.2	Shippagan .....	90
10.1.3	Bas-Caraquet .....	92
10.1.4	Maisonnette.....	94
10.1.5	Synthèse .....	96

10.2	Considérations sur les données pour la Péninsule acadienne .....	96
10.3	Aléa actuel et futur d'inondation due à une onde de tempête .....	97
11	Conclusions et prochains travaux.....	98
12	Remerciements.....	99
	Références.....	100
	Annexe A – Étendues des inondations modélisées par rapport aux indicateurs des niveaux d'eau élevés relevés .....	107
	Annexe B – Comparaison de l'étendue de l'inondation modélisée aux preuves photographiques de l'évènement du 6 décembre 2010 .....	108
	Annexe C – Comparaison de l'étendue de l'inondation modélisée aux preuves photographiques et vidéo de l'évènement du 21 décembre 2010 .....	113
	Annexe D – Aléa d'inondation dans les conditions actuelles.....	124
	Annexe E – Aléa d'inondation dans des conditions futures tenant compte de l'élévation potentielle du niveau de la mer .....	144
	Annexe F – Aléa lié au débit dans les conditions actuelles et les conditions futures tenant compte de l'élévation potentielle du niveau de la mer.....	148

## Liste des figures

Figure 1. Atelier sur les inondations côtières organisé par Valorès en mars 2020.....	15
(crédit photo : RNCa).....	
Figure 2. Marégraphes dans les environs de la Péninsule acadienne.....	18
Figure 3. Enregistrements des niveaux d'eau pour le marégraphe d'Escuminac et le marégraphe de Belledune.....	19
Figure 4. Saisonnalité des plus grandes ondes de tempête enregistrées par le marégraphe d'Escuminac et le marégraphe de Belledune.....	22
Figure 5. Emplacement des bouées de mesure des vagues.....	24
Figure 6. Modèle ERA5 comparé à la pression atmosphérique et à la vitesse du vent mesurées à la bouée de mesure des vagues c44139 (située dans l'océan Atlantique) pour l'évènement E1.....	25
Figure 7. Comparaison des réanalyses ERA5 avec la pression atmosphérique mesurée et la vitesse du vent mesurée à la bouée c44153 (située dans le golfe du Saint-Laurent) pour l'évènement E33.....	26
Figure 8. Données sur la couverture terrestre près de Le Goulet.....	27
Figure 9. Empreintes des bâtiments et des infrastructures près de Maisonnette.....	28
Figure 10. Exemples d'indicateurs de niveaux d'eau élevés à Pointe-Brûlée et à Le Goulet.....	30
Figure 11. Maillage de calcul pour le modèle régional des ondes de tempête.....	32
Figure 12. Résultats de l'étalonnage final pour l'évènement E4 (B3) au marégraphe d'Escuminac.....	34
Figure 13. Résultats de l'étalonnage final pour l'évènement E23 (B38) au marégraphe d'Escuminac.....	35
Figure 14. Résultats de l'étalonnage final pour l'évènement B3 (E4) au marégraphe de Belledune.....	36
Figure 15. Résultats de l'étalonnage final pour l'évènement B38 (E23) au marégraphe de Belledune.....	36
Figure 16. Hauteur des vagues modélisée dans le golfe du Saint-Laurent jusqu'à l'onde de tempête maximale de l'évènement E1.....	40
Figure 17. Résidus mesurés au marégraphe d'Escuminac comparés à l'onde modélisée sans correction pour la glace et la surcote liée aux vagues et à l'onde modélisée avec correction pour la glace et la surcote liée aux vagues.....	41
Figure 18. Carte de la concentration de glace coïncidant avec l'évènement E26 (B35) (Service canadien des glaces, 2019).....	43
Figure 19. Maillage du modèle à l'échelle communautaire et données sur l'élévation de l'année 2018 référencées au niveau d'eau moyen.....	44
Figure 20. Zones modélisées avec une résolution spatiale haute (résolution de 10 m).....	45
Figure 21. Maillage du modèle à l'échelle communautaire près de la rue Principale dans le village de Le Goulet.....	46
Figure 22. Données topographiques utilisées dans le modèle à l'échelle communautaire.....	47
Figure 23. Données bathymétriques utilisées dans le modèle à l'échelle communautaire.....	48
Figure 24. Exemple de zones de traînée des bâtiments appliquées dans les collectivités de Shippagan et de Pointe-Brûlée.....	49
Figure 25. Définition des conditions aux limites du modèle à l'échelle communautaire.....	50
Figure 26. Étendue de l'inondation modélisée selon la configuration initiale du modèle pour l'évènement du 6 décembre 2010 et l'évènement du 21 décembre 2010, à Pointe-Brûlée et à Bas-Caraquet.....	52
Figure 27. Emplacements des relevés.....	53
Figure 28. Comparaison des résultats modélisés aux données des points des relevés pour l'emplacement PB1.....	55
Figure 29. Emplacements approximatifs des zones d'évaluation qualitative pour l'évènement du 6 décembre 2010 et l'évènement du 21 décembre 2010.....	58
Figure 30. Données sur l'élévation disponibles pour les baies intérieures de la Péninsule acadienne.....	60

Figure 31. Relation entre l'onde de tempête maximale modélisée dans la Péninsule acadienne et le résidu maximal mesuré et l'onde de tempête maximale modélisée au marégraphe d'Escuminac. ....	62
Figure 32. Relation entre l'onde de tempête maximale modélisée dans la Péninsule acadienne et le résidu maximal mesuré et l'onde de tempête maximale modélisée au marégraphe de Belledune. ....	63
Figure 33. Ajustement de la distribution de Pareto généralisée aux valeurs maximales des ondes de tempête enregistrées au marégraphe de Belledune et estimations des ondes de tempête ainsi obtenues pour les principales probabilités de dépassement annuel. ....	66
Figure 34. Ajustement de la distribution de Pareto généralisée aux valeurs maximales des ondes de tempête enregistrées au marégraphe de Belledune, y compris les évènements de cyclone/ouragan post-tropical, et estimations des ondes de tempête ainsi obtenues pour les évènements présentant les principales probabilités de dépassement annuel. ....	67
Figure 35. Ajustement de la distribution de Pareto généralisée aux niveaux d'eau maximaux enregistrés au marégraphe de Belledune et estimations ainsi obtenues pour les évènements présentant les principales probabilités de dépassement annuel. ....	68
Figure 36. Relation entre l'écart-type des résidus et la phase de la marée au marégraphe de Belledune. ....	69
Figure 37. Distribution de probabilité des résidus et de la phase de la marée au marégraphe de Belledune. ....	70
Figure 38. Graphique des probabilités de dépassement annuel des niveaux d'eau en fonction de la probabilité conjointe des ondes de tempête et des marées. ....	71
Figure 39. Aléa d'inondation causé par l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 10 % à Maisonnette, près de la route 303 à l'ouest de l'intersection avec la route 320. ....	77
Figure 40. Aléa d'inondation causé par l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % à Caraquet, près de la route 145 à l'est de l'intersection avec la rue de la Saline. ....	78
Figure 41. Aléa d'inondation causé par un évènement dont la probabilité de dépassement annuel est de 50 % près du pont-jetée/de la traversée de pont de la route 145 du côté est de Bas-Caraquet. ....	79
Figure 42. Aléa d'inondation causé par un évènement à la probabilité de dépassement annuel de 10 %, près de l'intersection de la rue Pointe-Brûlée et du boulevard J.D. Gauthier. Des inondations sont observées sur le boulevard J.D. Gauthier, entre les intersections avec la rue Mallet et la rue Audet. ....	80
Figure 43. Aléa d'inondation causé par un évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % à Le Goulet. ....	81
Figure 44. Aléa d'inondation causé par un évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % à Lamèque. ....	82
Figure 45. Produit profondeur-vitesse pour l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % près du pont-jetée/de la traversée de pont de la route 145 du côté est de Bas-Caraquet. ....	86
Figure 46. Flux de quantité de mouvement dépassant $0,45 \text{ m}^3/\text{s}^2$ pour l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % près du pont-jetée de la route 113 reliant Shippagan à Savoy Landing. ....	87
Figure 47. Comparaison des étendues des inondations estimées à partir de la modélisation en baignoire réalisée par Robichaud et coll. (2011) et de la modélisation hydrodynamique numérique pour Le Goulet. ....	89
Figure 48. Comparaison des étendues des inondations estimées à partir de la modélisation en baignoire réalisée par Robichaud et coll. (2011) et de la modélisation hydrodynamique numérique de Shippagan. ....	91
Figure 49. Comparaison des étendues des inondations estimées à partir de la modélisation en baignoire réalisée par Robichaud et coll. (2011) et de la modélisation hydrodynamique numérique de Bas-Caraquet. ....	93
Figure 50. Comparaison des étendues des inondations estimées à partir de la modélisation en baignoire réalisée par Aubé et coll. (2016) et de la modélisation hydrodynamique numérique de Maisonnette. ....	95

## Liste des tableaux

Tableau 1. Évènements d'ondes de tempête positives les plus grandes observées aux marégraphes proches avant le 29 juin 2019. ....	21
Tableau 2. Comparaison de l'onde de tempête maximale modélisée et de l'onde de tempête maximale mesurée pour 44 des 50 évènements les plus importants. ....	38
Tableau 3. Estimations initiales de la rugosité du sol.....	51
Tableau 4. Sommaire des points des relevés.....	54
Tableau 5. Comparaison des élévations de crue modélisées et des données des relevés.....	56
Tableau 6. Comparaison des étendues des inondations modélisées et des données des relevés.....	56
Tableau 7. Probabilités de dépassement annuel des niveaux d'eau d'après la probabilité conjointe des ondes de tempête et des marées.....	71
Tableau 8. Comparaison des estimations de la probabilité de dépassement annuel des ondes de tempête. ....	72
Tableau 9. Estimations de la probabilité de dépassement annuel de l'onde de tempête plus niveau de référence typique de la marée .....	73
Tableau 10. Estimations de la probabilité de dépassement annuel du niveau d'eau .....	73
Tableau 11. Estimation des ondes de tempête extrêmes et des niveaux d'eau au marégraphe de Belledune. ....	75
Tableau 12. Évènements d'aléa d'inondation actuels et futurs qui ont produit des inondations similaires. ....	83

## Acronymes et abréviations

CGVD2013	Système canadien de référence altimétrique de 2013
CGVD28	Système canadien de référence altimétrique de 1928
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
CSS	Centre des sciences pour la sécurité
DPG	Distribution de Pareto généralisée
ENMM	Élévation du niveau mondial de la mer
EQM	Erreur quadratique moyenne
GEBCO	Carte générale bathymétrique des océans
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GOFC	Centre de recherche en génie océanique, côtier et fluvial
GPS	Système mondial de localisation
MAN	Modèle altimétrique numérique
NEM	Niveau d'eau moyen
NMM	Niveau moyen de la mer
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NONNA	Non navigationnel
ONU	Nations Unies
PCSS	Programme canadien pour la sûreté et la sécurité
PDA	Probabilité de dépassement annuel
PDS	Pointes dépassant un seuil
PMSGM	Pleine mer supérieure, grande marée
PMSMM	Pleine mer supérieure, marée moyenne
QAA	Qualitative Assessment Area (en française, zone d'évaluation qualitative)
RDC	Réduction des risques de catastrophes
RDDC	Recherche et développement pour la défense Canada
RE4	Quatrième rapport d'évaluation
RE5	Cinquième rapport d'évaluation
RMSE	Root mean square error (en française, erreur quadratique moyenne – EQM)
RNCan	Ressources naturelles Canada
SHC	Service hydrographique du Canada
VCR	Voie de concentration représentative
ZC	Zéro des cartes

# 1 Introduction et contexte

## 1.1 Aperçu du projet

Ressources naturelles Canada (RNCan), en partenariat avec Pêches et Océans Canada, le Conseil national de recherches du Canada, Ocean Networks Canada, l'Université de Victoria, Emergency Management British Columbia et Services aux Autochtones Canada, dirige le projet pluriannuel Atténuation des inondations côtières au Canada, qui vise à mieux comprendre les risques d'inondation côtière afin de favoriser la réduction des risques de catastrophe au Canada. Le projet est financé par le Centre des sciences pour la sécurité de Recherche et développement pour la défense Canada (CSS – RDDC) et le Programme canadien pour la sûreté et la sécurité (PCSS). Les principaux objectifs du projet sont les suivants :

- Réunir des chercheurs, des praticiens et des collectivités pour partager des connaissances et de l'expertise à l'appui des stratégies de réduction des risques de catastrophe en cas d'onde de tempête côtière et de tsunami;
- Créer et promouvoir des données, des outils, des approches fondées sur les preuves et des lignes directrices pour l'évaluation des risques d'inondation côtière;
- Faire la démonstration des meilleures pratiques d'évaluation et de réduction des risques d'inondation côtière avec les collectivités des régions des côtes du Pacifique, de l'Arctique et de l'Atlantique.

Le projet comporte trois études de cas, une pour chacune des côtes canadiennes – atlantique, arctique et pacifique, pour lesquelles l'équipe de projet a réalisé, ou travaille à réaliser, une évaluation des risques et des aléas d'inondation côtière. Les connaissances tirées de chaque étude de cas faciliteront l'élaboration de lignes directrices résumant les pratiques exemplaires et les méthodes d'évaluation des aléas d'inondation côtière à l'appui des analyses fondées sur les risques. Ces lignes directrices contribueront à fournir une base pour comprendre le risque d'inondation côtière dans toutes ses dimensions, une priorité du Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe (RRC), sur lequel repose la politique de réduction des risques de catastrophe du Canada.

Le présent rapport résume les travaux réalisés par les chercheurs du Centre de recherche en génie océanique, côtier et fluvial (GOCF) du Conseil national de recherches du Canada (CNRC) à l'appui de l'étude de cas de la côte atlantique. Le Centre de recherche en génie océanique, côtier et fluvial du CNRC a été chargé d'élaborer des modèles numériques aux échelles régionale et communautaire pour évaluer l'aléa d'inondation côtière dans la région de la Péninsule acadienne au Nouveau-Brunswick. Les résultats de la modélisation analysés dans ce rapport serviront à étayer les évaluations des risques d'inondation côtière pour les collectivités de la Péninsule acadienne.

## 1.2 Risques et aléas d'inondation côtière

Le Cadre d'action de Sendai (Nations Unies, 2004, 2015) définit un aléa comme suit : « phénomène, manifestation physique ou activité humaine susceptible d'occasionner des pertes en vies humaines ou des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement ». L'aléa d'inondation peut être interprété comme la source du danger (par exemple, une onde de tempête provoquée par un événement de tempête violente) et l'ampleur de l'aléa peut être décrite par divers paramètres, notamment la hauteur de l'eau de crue et les vitesses du débit.

Le risque d'inondation est défini comme « la probabilité de l'apparition d'évènements nuisibles (morts, blessés, biens, moyens de subsistance, rupture de l'activité économique, dommages causés à l'environnement) suite à des interactions entre des aléas naturels ou anthropiques et des conditions de vulnérabilité » (Nations Unies, 2004). Dans le contexte des inondations côtières, on peut évaluer le risque associé à un évènement donné en étudiant la probabilité ou la vraisemblance d'un évènement d'inondation côtière (ou aléa) et les conséquences correspondantes sur la santé humaine, l'environnement et l'économie.

## 1.3 Portée

Le présent rapport résume l'évaluation des aléas de l'étude de cas de la côte atlantique pour le projet d'atténuation des inondations côtières du Canada et couvre les points suivants :

- Données disponibles pour étayer l'évaluation des aléas d'onde de tempête dans le golfe du Saint-Laurent et la Péninsule acadienne;
- Élaboration d'un modèle hydrodynamique numérique à l'échelle régionale pour faciliter la simulation et l'évaluation des ondes de tempête dans la région côtière de l'Atlantique du Canada;
- Élaboration d'un modèle hydrodynamique numérique à l'échelle communautaire pour appuyer la simulation des inondations côtières causées par les ondes de tempête dans sept collectivités de la Péninsule acadienne : Maisonnette, Caraquet, Bas-Caraquet, Pointe-Brûlée, Shippagan, Le Goulet et Lamèque;
- Élaboration d'évènements d'aléa d'ondes de tempête et des probabilités connexes, pour soutenir l'évaluation des risques d'inondation côtière dans la Péninsule acadienne;
- Simulations de 24 ondes de tempête avec des probabilités de dépassement annuel définies (50 %, 20 %, 10 %, 5 %, 2 % et 1 %) dans des scénarios de niveau de la mer actuel et futur.

## 2 Établir des objectifs grâce à la consultation des collectivités et des partenaires

Au cours de la semaine du 9 mars 2020, l'équipe de projet s'est rendue dans la Péninsule acadienne pour rencontrer des représentants des collectivités et des experts locaux. L'objectif de la visite était de mieux connaître les intérêts et les préoccupations des collectivités locales, de s'informer sur les aléas d'inondation côtière dans la région, de mieux comprendre les contextes locaux et les actifs importants, d'en savoir plus sur les recherches passées et en cours, ainsi que d'établir la portée et les objectifs de la modélisation des risques et des aléas à venir.

Le 11 mars 2020, l'équipe de projet s'est rendue dans certaines des collectivités de la Péninsule acadienne avec des représentants et des experts locaux du gouvernement du Nouveau-Brunswick et de Valorès. Le 12 mars 2020, un atelier a été organisé dans les bureaux de Valorès à Shippagan, au Nouveau-Brunswick, auquel ont participé des partenaires du projet, des experts locaux, des universitaires, des groupes privés/à but non lucratif et des représentants du gouvernement et de la collectivité (figure 1). Valorès est un institut de recherche en sciences appliquées à but non lucratif, affilié à l'Université de Moncton, et participe activement à la recherche en cours dans la Péninsule acadienne, axée sur la détermination des inondations et de l'érosion côtières et sur l'adaptation à celles-ci. L'atelier comprenait un bref exposé de l'équipe du projet résumant les objectifs généraux et l'état d'avancement du projet, suivi d'une discussion de groupe pour mieux comprendre les contextes locaux et les besoins des collectivités pour résister aux inondations

côtières. Un court rapport sommaire a été préparé pour présenter l'ordre du jour de l'atelier, ses principaux messages et résultats, de même que les prochaines étapes proposées (RNCan, 2020).



Figure 1. Atelier sur les inondations côtières organisé par Valorès en mars 2020 (crédit photo : RNCan).

Pendant la visite des collectivités et les activités de l'atelier, l'équipe de projet était chargée de concentrer ses efforts de modélisation des aléas sur sept collectivités : Maisonnette, Caraquet, Bas-Caraquet, Pointe-Brûlée, Shippagan, Le Goulet et Lamèque. Le Projet Adaptation Péninsule Acadienne, coordonné par Valorès, a déjà réalisé une certaine évaluation de l'aléa d'inondation côtière. L'équipe de projet devait reprendre cette recherche en menant une évaluation indépendante de l'aléa d'inondation côtière selon une approche de modélisation hydrodynamique numérique, afin de mieux comprendre ces aléas, actuels et futurs, dans la région.

On a également relevé des possibilités d'échange de données. Des membres du gouvernement du Nouveau-Brunswick et de l'Université de Moncton ont transmis des données relatives aux élévations topographiques, aux infrastructures construites, aux infrastructures de drainage et aux observations de niveaux d'eau élevés, qui se sont avérées d'une valeur inestimable pour l'élaboration du modèle et l'évaluation de sa compétence.

### 3 Sommaire des recherches antérieures

Comme nous l'avons mentionné, Valorès est fortement impliqué dans les recherches passées et actuelles sur les aléas d'inondation côtière dans la Péninsule acadienne, menées dans le cadre du Projet Adaptation Péninsule Acadienne (<https://adaptationpa.ca/fr/>). Le site Web du projet propose un résumé de la recherche et un référentiel des rapports de projet. Les recherches antérieures (et les rapports associés) menées à Le Goulet, à Shippagan, à Bas-Caraquet et à Maisonnette (Aubé et coll., 2016; Robichaud et coll., 2011) sont particulièrement pertinentes pour les travaux réalisés pour le projet d'atténuation des inondations côtières au Canada. Les rapports résument les évaluations de l'étendue des inondations côtières, dans lesquelles les niveaux d'eau extrêmes statiques et uniformes dans l'espace ont été cartographiés sur une topographie à haute résolution. Cette approche de modélisation est communément appelée modélisation « en

baaignoire » (Anderson et coll., 2018). Telle qu'elle est décrite dans Didier et coll. (2019), la modélisation en baaignoire est couramment appliquée pour faciliter l'étude des aléas d'inondation et l'élaboration de produits cartographiques connexes (par exemple, Aucelli et coll., 2017; Creach et coll., 2016). Les cartes d'inondation produites par la modélisation en baaignoire réalisée pour le Projet Adaptation Péninsule Acadienne fournissent une intéressante base de comparaison avec l'évaluation des aléas d'inondation côtière présentée dans le présent rapport, tirée de la modélisation hydrodynamique numérique. Les recherches menées dans le cadre du Projet Adaptation Péninsule Acadienne comprennent également un aperçu des risques d'érosion, qui ne sont pas abordés dans la présente étude.

Des recherches antérieures ont également été menées pour estimer les ondes de tempête extrêmes actuelles et futures et les niveaux d'eau sur la côte du Nouveau-Brunswick et dans le golfe du Saint-Laurent (Bernier, 2005; Daigle, 2017; Environnement Canada, 2006). De manière générale, ces estimations ont servi de fondement à la modélisation des inondations réalisée dans le cadre du Projet Adaptation Péninsule Acadienne et fournissent une base de comparaison avec les événements d'aléa extrêmes estimés dans la présente étude.

## 4 Données disponibles

Les sections suivantes décrivent les données disponibles utilisées à l'appui de la modélisation régionale des ondes de tempête et les évaluations des aléas d'inondation côtière à l'échelle locale.

### 4.1 Bathymétrie

Trois sources de données bathymétriques ont été utilisées pour faciliter la mise au point du modèle :

- Les meilleures données bathymétriques disponibles du Service hydrographique du Canada (SHC) (Service hydrographique du Canada, 2020);
- Les données bathymétriques non navigationnelles (NONNA) du SHC (Service hydrographique du Canada, 2019);
- Les données de la carte générale bathymétrique des océans (GEBCO) élaborée par le projet Seabed 2030 (GEBCO Compilation Group, 2019).

Les données bathymétriques acquises auprès du SHC sont référencées au zéro des cartes (ZC). Les données bathymétriques de GEBCO (2019) « sont générées par assimilation de types de données hétérogènes, en supposant qu'elles sont toutes référencées au niveau moyen de la mer » (NMM). Dans la présente étude, le niveau moyen de la mer et le niveau d'eau moyen (NEM) sont considérés comme équivalents. Les surfaces de séparation verticale hydrographique (HyVSEP) ont été fournies par le SHC afin d'appuyer la conversion du zéro des cartes en niveau d'eau moyen ou dans le Système canadien de référence altimétrique de 2013 (CGVD2013) (Robin et coll., 2016). Les données bathymétriques ont été transformées en niveau d'eau moyen pour permettre la modélisation aux échelles régionale et communautaire.

## 4.2 Topographie

Plusieurs ensembles de données topographiques ont été utilisés pour élaborer le modèle à l'échelle communautaire, notamment :

- Un modèle numérique d'élévation (MNE) hydrologiquement conforme, d'une résolution de 1 m, représentant l'année 2018 et couvrant les zones densément peuplées de la Péninsule acadienne, y compris les sept collectivités d'intérêt (fourni par le gouvernement du Nouveau-Brunswick);
- Un modèle numérique d'élévation (MNE) d'une résolution de 1 m (non hydrologiquement conforme), représentant l'année 2018 et couvrant toute la Péninsule acadienne (gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2019a);
- Un modèle numérique d'élévation d'une résolution de 1 m (non hydrologiquement conforme), représentant l'année 2009 et couvrant les environs de Le Goulet (fourni par le gouvernement du Nouveau-Brunswick);
- Des données ponctuelles LiDAR, représentant l'année 2018 et couvrant toute la Péninsule acadienne (gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2019d).

Le MNE hydrologiquement conforme de 2018 comprend une modification spéciale des données d'élévation à proximité des ponceaux et des éléments de drainage, permettant un drainage et une connectivité plus réalistes entre les parcelles de terrain. En plus du MNE hydrologiquement conforme, un fichier de forme complémentaire indiquant l'emplacement des ponceaux a été fourni par le gouvernement du Nouveau-Brunswick. Le MNE de 2018 et les données ponctuelles LiDAR ont été téléchargés à partir du référentiel d'information géographique en ligne du gouvernement du Nouveau-Brunswick, GeoNB (gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2021).

## 4.3 Niveaux d'eau

Les niveaux d'eau dans les régions côtières reflètent les contributions de diverses composantes distinctes, y compris le niveau moyen de la mer (et le changement du niveau moyen de la mer résultant du changement du niveau relatif de la mer), les marées astronomiques et les effets météorologiques. La composante maréale du niveau d'eau est cyclique et largement prévisible, étant générée principalement par les forces gravitationnelles associées à la lune et au soleil, bien que la réaction du niveau d'eau à un endroit donné dépende d'une combinaison des forces astronomiques et des effets de la faible profondeur. Les phénomènes météorologiques, tels que le vent et la pression barométrique, influent sur les niveaux d'eau et se manifestent sous la forme d'une surcote (ou décote) due au vent, d'une surcote (ou décote) barométrique et d'effets de vagues (y compris une surcote due aux vagues). La différence entre la marée astronomique théorique (prédite) et le niveau d'eau observé est appelée résidu du niveau d'eau (ou résidu non tidal du niveau d'eau). Dans cette étude, l'onde de tempête a été modélisée uniquement comme les effets combinés de la surcote due au vent et de la surcote barométrique.

### 4.3.1 Marégraphes et niveaux d'eau mesurés

Les mesures horaires des niveaux d'eau proviennent de marégraphes gérés par Pêches et Océans Canada (Pêches et Océans Canada, 2019a). Deux marégraphes ayant des périodes d'enregistrement suffisamment longues pour permettre des analyses statistiques de valeurs extrêmes ont été découverts dans les environs de la Péninsule acadienne (figure 2). Le marégraphe de Lower Escuminac (station numéro 2000, ou marégraphe d'Escuminac), situé à environ 75 km au sud de Shippagan, contient un enregistrement presque continu de mesures du niveau d'eau de 1973 à aujourd'hui (47 ans au moment de

l'analyse). Le marégraphe de Belledune (station numéro 2145), situé à environ 85 km à l'ouest de Shippagan, contient un enregistrement presque continu de mesures du niveau d'eau de 1999 à aujourd'hui (20 ans au moment de l'analyse). Les niveaux d'eau enregistrés avant le 29 juin 2019 (au moment de l'analyse) par chaque marégraphe sont indiqués sur la figure 3.

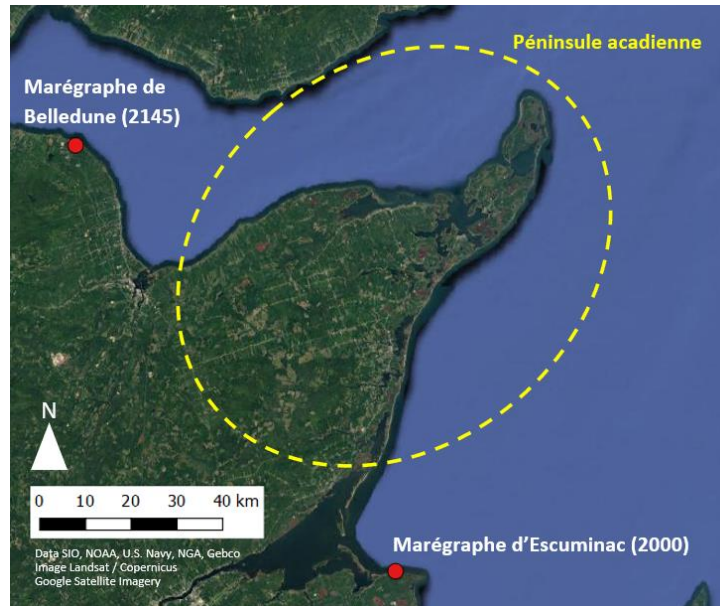


Figure 2. Marégraphes dans les environs de la Péninsule acadienne.

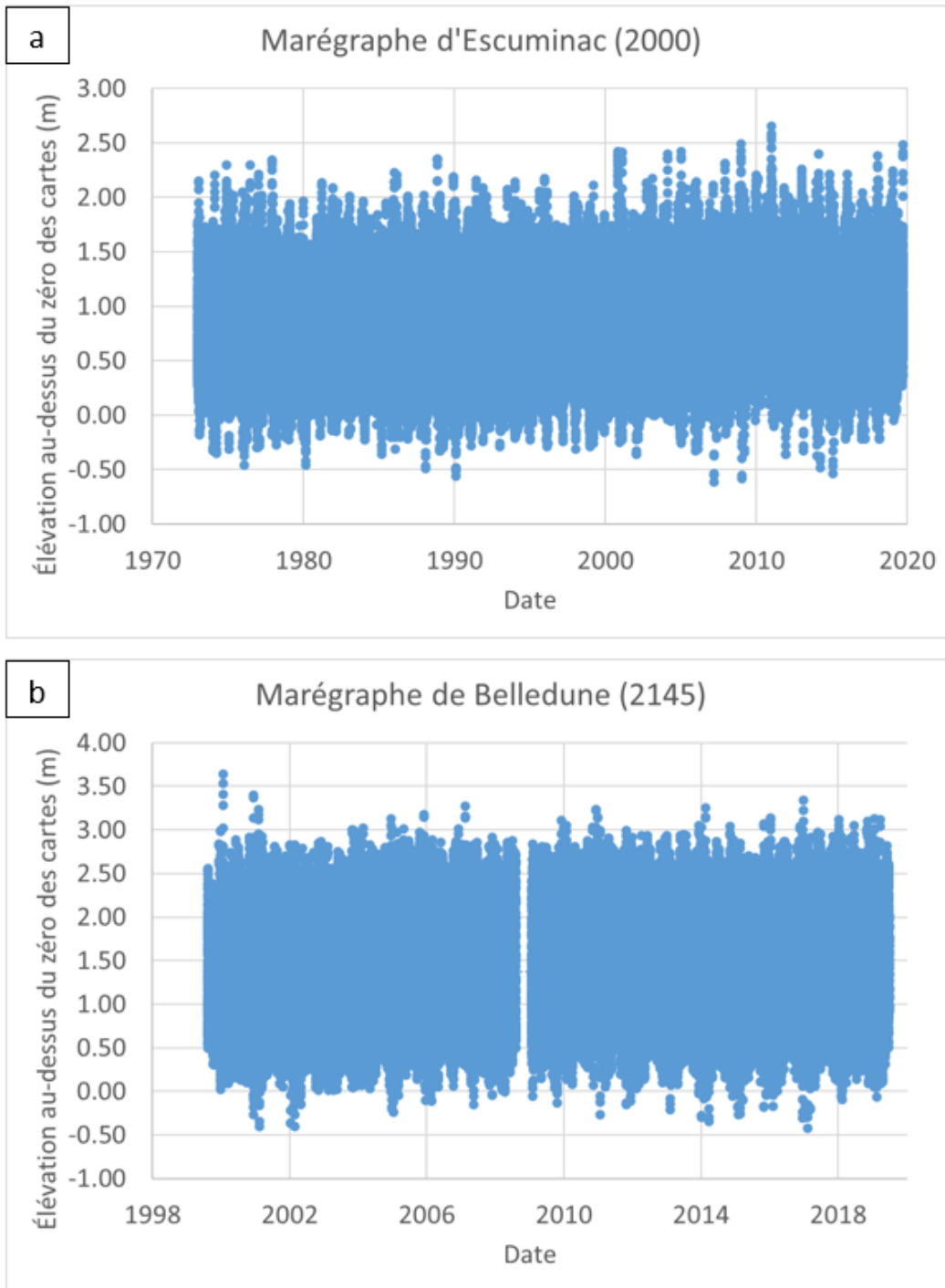


Figure 3. Enregistrements des niveaux d'eau pour a) le marégraphe d'Escuminac et b) le marégraphe de Belledune.

### 4.3.2 Résidus non tidaux

Les contributions des marées astronomiques aux niveaux totaux d'eau ont été estimées à partir des composantes des marées pour le marégraphe d'Escuminac et le marégraphe de Belledune fournies par le SHC, selon la méthodologie décrite dans Foreman (1977). Les niveaux résiduels ont été calculés comme la différence entre les niveaux d'eau mesurés et la hauteur de marée astronomique théorique (prédite), avec redressement linéaire pour éliminer l'effet de l'élévation du niveau relatif de la mer. On a ainsi obtenu deux ensembles de niveaux d'eau résiduels, l'un représentatif de l'onde de tempête observée au marégraphe d'Escuminac, l'autre de l'onde de tempête observée au marégraphe de Belledune. Les 50 événements positifs les plus importants tirés des niveaux résiduels redressés et désagrégés enregistrés avant le 29 juin 2019<sup>1</sup> sont répertoriés dans le tableau 1. Il est intéressant de noter qu'il existe quelques lacunes dans les données des enregistrements horaires des niveaux d'eau tirés des marégraphes. Plus particulièrement, le marégraphe d'Escuminac n'était pas opérationnel lors de l'évènement du 21 janvier 2000, qui est le plus grand évènement enregistré au marégraphe de Belledune et qui est reconnu comme une onde de tempête importante dans la région (Environnement Canada, 2006).

---

<sup>1</sup> Peu après l'évaluation initiale des évènements extrêmes décrits dans la section 4.3 et la mise au point du modèle régional décrit dans la section 6, les vestiges post-tropicaux de l'ouragan Dorian ont traversé l'Atlantique canadien. Comme il est indiqué dans la section 4.3, les enregistrements initiaux des niveaux d'eau utilisés pour l'analyse ont été tronqués au 28 juin 2019. Pour faciliter la préparation de l'évènement d'aléa décrit dans la section 8, les enregistrements des niveaux d'eau ont été prolongés jusqu'au 13 septembre 2019 afin de refléter l'évènement de l'ouragan Dorian. À titre de référence, le résidu redressé produit par l'ouragan Dorian était égal à 1,18 m et à 0,77 m aux marégraphes d'Escuminac et de Belledune, respectivement. Si l'on ajoute l'évènement de l'ouragan Dorian au Tableau 1, il se classerait comme le 14<sup>e</sup> et le 32<sup>e</sup> plus grand évènement d'onde de tempête sur les marégraphes d'Escuminac et de Belledune, respectivement.

Tableau 1. Évènements d'ondes de tempête positives les plus grandes observées aux marégraphes proches avant le 29 juin 2019.

Marégraphe d'Escuminac (2000)			Marégraphe de Belledune (2145)		
Nom de l'évènement	Date	Résidu maximal (m)	Nom de l'évènement	Date	Résidu maximal (m)
E1	22 décembre 2008	1,61	B1	21 janvier 2000	1,31
E2	17 mars 1976	1,58	B2	5 janvier 2018	1,23
E3	29 octobre 2000	1,51	B3	3 janvier 2010	1,17
E4	3 janvier 2010	1,50	B4	30 décembre 2016	1,12
E5	22 novembre 1986	1,49	B5	14 février 2014	1,11
E6	28 décembre 2010	1,45	B6	16 octobre 2005	1,05
E7	4 janvier 1986	1,43	B7	16 février 2015	1,04
E8	7 décembre 1977	1,31	B8	14 novembre 2003	0,99
E9	16 février 2015	1,28	B9	6 décembre 2010	0,96
E10	4 décembre 2007	1,25	B10	25 février 2012	0,96
E11	21 novembre 1988	1,21	B11	29 octobre 2006	0,96
E12	30 octobre 1998	1,20	B12	15 février 2007	0,95
E13	18 février 2013	1,20	B13	27 décembre 2010	0,93
E14	26 novembre 1974	1,17	B14	18 février 2013	0,89
E15	22 décembre 2010	1,16	B15	27 mars 2014	0,88
E16	27 décembre 2005	1,13	B16	29 octobre 2000	0,87
E17	5 janvier 2018	1,09	B17	10 janvier 2019	0,84
E18	29 novembre 2018	1,08	B18	23 novembre 2005	0,84
E19	14 janvier 2002	1,07	B19	17 décembre 2007	0,84
E20	5 janvier 1989	1,06	B20	5 juillet 2014	0,84
E21	25 décembre 2017	1,06	B21	5 novembre 2004	0,83
E22	17 mars 1981	1,06	B22	18 décembre 2003	0,82
E23	19 février 2004	1,05	B23	9 mars 2005	0,79
E24	21 novembre 1974	1,05	B24	23 mars 2001	0,79
E25	5 octobre 2011	1,04	B25	15 mars 2017	0,78
E26	27 mars 2014	1,03	B26	11 janvier 2000	0,78
E27	22 novembre 2008	0,01	B27	12 février 2003	0,78
E28	14 février 2014	1,00	B28	25 février 2019	0,78
E29	4 décembre 1989	0,99	B29	12 février 2012	0,78
E30	13 janvier 2016	0,99	B30	6 février 2001	0,78
E31	12 septembre 2002	0,99	B31	18 novembre 2002	0,77
E32	30 décembre 1976	0,98	B32	13 janvier 2011	0,77
E33	2 décembre 1995	0,98	B33	10 décembre 2009	0,77
E34	12 janvier 1987	0,98	B34	23 mars 2019	0,76
E35	28 janvier 2015	0,98	B35	2 décembre 2006	0,76
E36	21 novembre 1989	0,98	B36	21 octobre 2006	0,75
E37	7 mars 1997	0,98	B37	21 décembre 2010	0,75
E38	6 février 2001	0,97	B38	20 février 2004	0,75
E39	6 février 1974	0,96	B39	28 janvier 2015	0,75
E40	3 novembre 2014	0,95	B40	21 janvier 2019	0,74
E41	19 novembre 1981	0,95	B41	10 mars 2018	0,74
E42	16 décembre 2016	0,94	B42	16 décembre 2003	0,74
E43	12 novembre 1991	0,94	B43	12 décembre 2000	0,74
E44	21 janvier 2019	0,94	B44	2 février 2002	0,74
E45	12 octobre 2004	0,93	B45	13 janvier 2016	0,74
E46	13 janvier 2011	0,92	B46	22 septembre 2010	0,74
E47	17 décembre 1987	0,92	B47	13 février 2002	0,73
E48	6 décembre 2010	0,92	B48	23 février 2009	0,71
E49	9 février 2016	0,91	B49	27 février 2011	0,71
E50	23 juin 1993	0,90	B50	27 décembre 2005	0,70

### 4.3.3 Caractère saisonnier des évènements d’onde de tempête

La figure 4 illustre la saisonnalité des 51 plus grandes ondes de tempête enregistrées par les marégraphes d’Escuminac et de Belledune (c.-à-d. les évènements énumérés dans le tableau 1 plus l’évènement de l’ouragan Dorian).

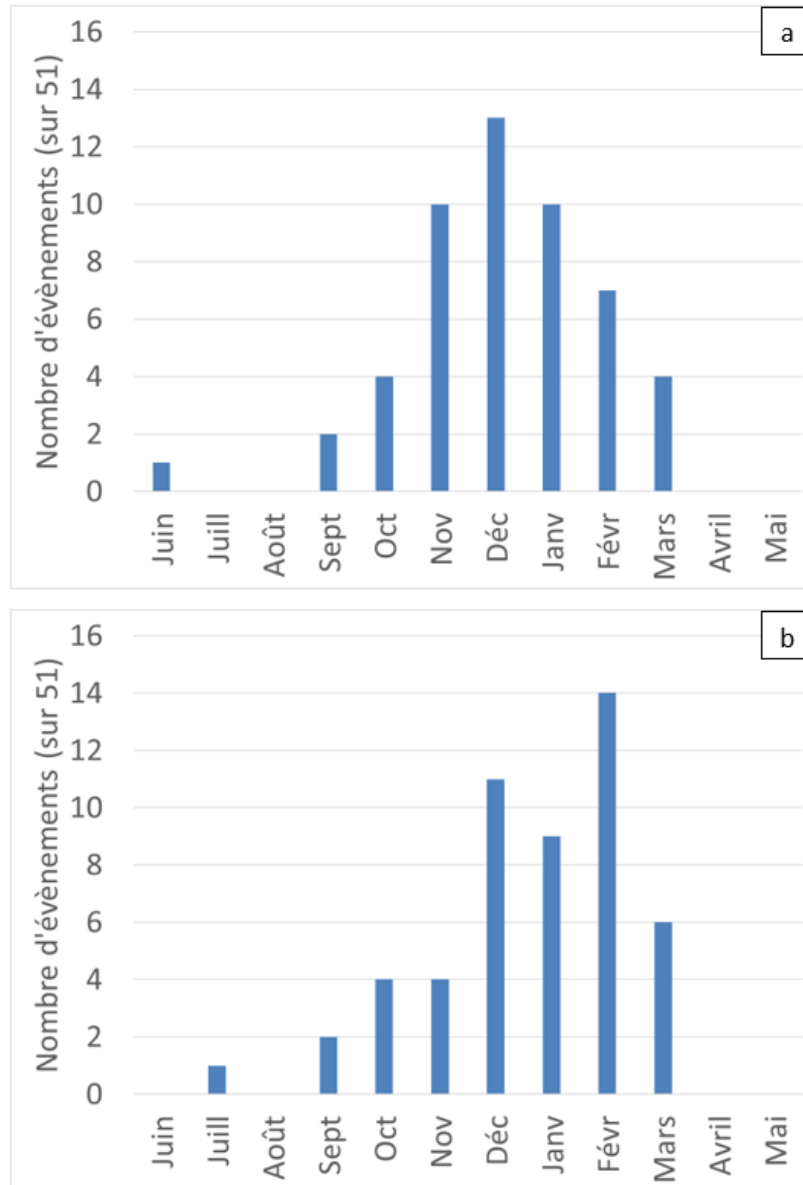


Figure 4. Saisonnalité des plus grandes ondes de tempête enregistrées par le marégraphe d’Escuminac (a) et le marégraphe de Belledune (b). Comprend les évènements indiqués dans le tableau 1 plus l’évènement de l’ouragan Dorian.

Comme on peut le constater, la plupart des grandes ondes de tempête se sont produites pendant la saison hivernale, entre octobre et mars, et une grande partie entre novembre et février. Ces évènements coïncidaient en majorité avec des ondes de tempête provoquées par des tempêtes hivernales extratropicales. Toutefois, une petite proportion d’entre eux représente des ondes de tempête provoquées

par des cyclones post-tropicaux, qui ont tendance à se produire en été et en automne. Nous avons utilisé l'outil Historical Hurricane Tracks de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [NOAA, 2021] pour déterminer les événements qui coïncident avec des cyclones post-tropicaux. Sur les 51 événements les plus importants enregistrés par le marégraphe d'Escuminac, trois coïncidaient avec des cyclones post-tropicaux (deux en septembre et un en octobre). Sur les 51 événements les plus importants enregistrés par le marégraphe de Belledune, quatre coïncidaient avec des cyclones post-tropicaux (un en juillet, deux en septembre et un en octobre). Ces résultats viennent étayer l'affirmation d'Environnement Canada (2006) selon laquelle les ondes de tempête dans le golfe du Saint-Laurent sont surtout associées aux tempêtes extratropicales, mais peuvent également être liées aux cyclones post-tropicaux.

## 4.4 Vent et pression atmosphérique

Les données sur le vent et la pression atmosphérique ont été utilisées pour alimenter les modèles d'ondes de tempête aux échelles régionale et communautaire. Elles provenaient de l'ensemble de données de réanalyse atmosphérique mondiale ERA5 (Hersbach et coll., 2018). Cet ensemble de données mondiales est produit par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme et contient des données atmosphériques, notamment la pression atmosphérique au niveau moyen de la mer et la vitesse du vent à une altitude de 10 m au-dessus de la surface terrestre; les données fournies ont une résolution de 30 km. Au moment de l'analyse, les données horaires étaient disponibles de 1979 à août 2019.

On a validé les données ERA5 localement en comparant la réanalyse aux vents et à la pression atmosphérique mesurés par deux bouées de mesure des vagues (figure 5); une de ces bouées était située dans le golfe du Saint-Laurent (bouée de mesure des vagues c44153) et l'autre dans l'océan Atlantique (bouée de mesure des vagues c44139) (Pêches et Océans Canada 2019b). Deux paramètres ont été utilisés pour évaluer la qualité des données ERA5 :

- L'erreur quadratique moyenne,  $EQM$  (ou en anglais, *root mean square error – RMSE*) – une valeur qui quantifie les différences entre la réanalyse et les données mesurées, les plus petites valeurs indiquant une meilleure concordance globale.
- Le coefficient de corrélation,  $R$  – une valeur comprise entre 0 et 1, les valeurs les plus élevées indiquant une corrélation plus étroite entre la réanalyse et les données mesurées.

L'erreur quadratique moyenne  $EQM$  est calculée selon la formule :

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_i^N (x_{m,i} - x_{o,i})^2}{N}} \quad (1)$$

où  $x_{m,i}$  est la donnée de réanalyse,  $x_{o,i}$  est la donnée mesurée et  $i = 1$  à  $N$  est le nombre de points de données comparés.

Le coefficient de corrélation,  $R$ , est calculé comme suit :

$$R = \frac{\sum_i^N (x_{m,i} - \bar{x}_m)(x_{o,i} - \bar{x}_o)}{\sqrt{\sum_i^N (x_{m,i} - \bar{x}_m)^2 \sum_i^N (x_{o,i} - \bar{x}_o)^2}} \quad (2)$$

où  $\bar{x}_m$  est la moyenne des données modélisées,  $\bar{x}_o$  est la moyenne des données mesurées et les autres variables sont conformes à celles indiquées dans l'équation (1).

Les données mesurées par la bouée de mesure des vagues c44139 ont été comparées aux données de la réanalyse ERA5 à un point de la grille approximativement cositué pour l'évènement E1 (tel que défini dans le tableau 1). L'erreur quadratique moyenne et le coefficient de corrélation ont été calculés pour la pression atmosphérique et la vitesse du vent. L'erreur quadratique moyenne  $EQM$  pour la pression atmosphérique était de 1,9 kPa avec un coefficient de corrélation de 0,983. L'erreur quadratique moyenne  $QME$  pour la vitesse du vent était de 1,31 m/s avec un coefficient de corrélation de 0,953. D'après les statistiques calculées et la comparaison visuelle des données tracées (figure 6), les données de réanalyse ERA5 sont raisonnablement cohérentes avec les vitesses des vents de tempête et la pression atmosphérique mesurées pour l'évènement E1 à la bouée de mesure des vagues c44139.

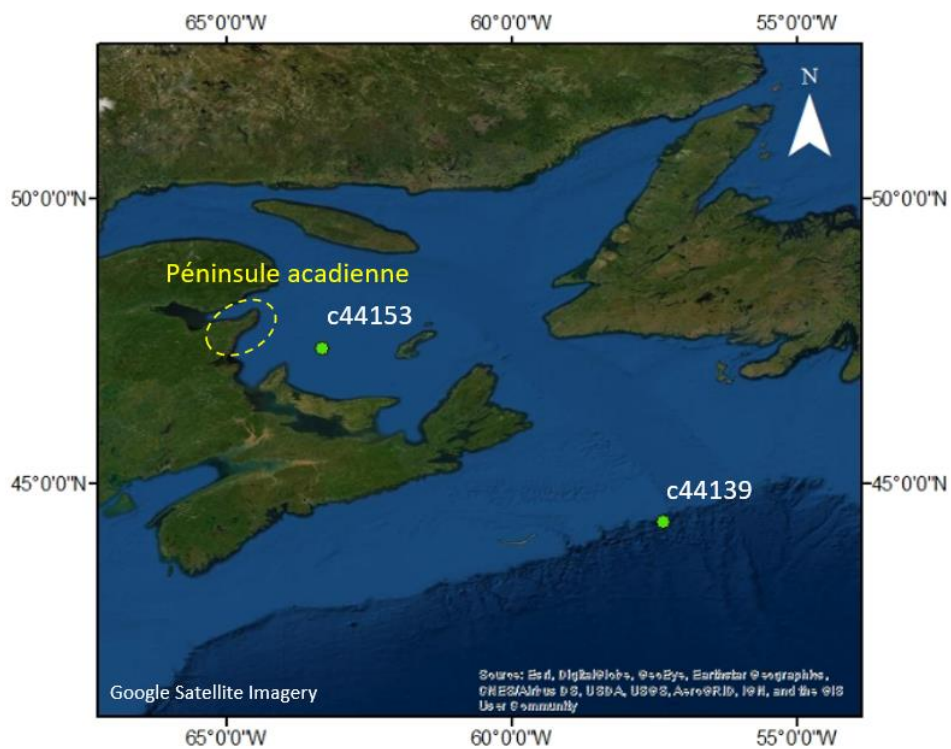


Figure 5. Emplacement des bouées de mesure des vagues.

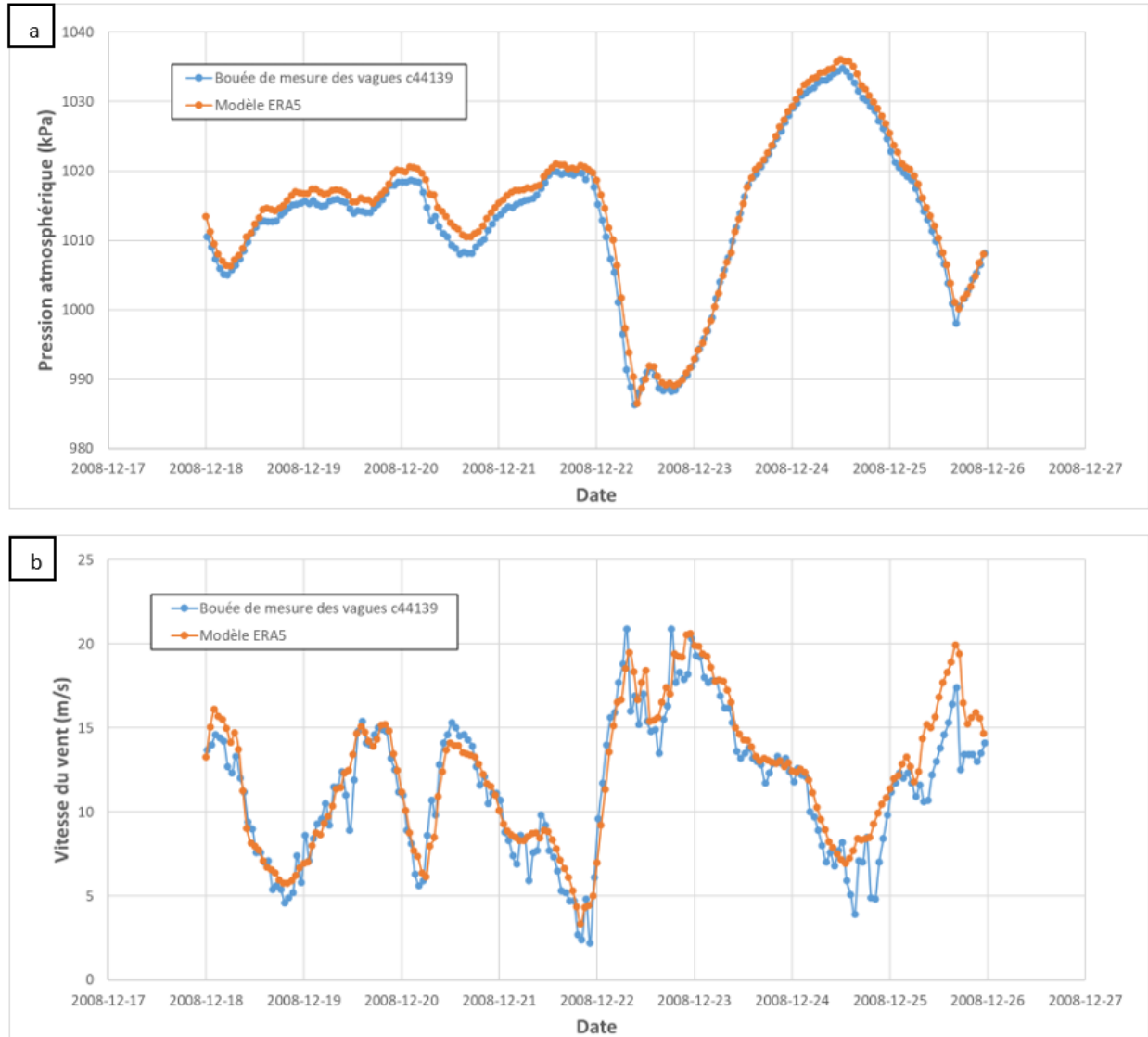


Figure 6. Modèle ERA5 comparé à la pression atmosphérique (a) et à la vitesse du vent (b) mesurées à la bouée de mesure des vagues c44139 (située dans l’océan Atlantique) pour l’évènement E1.

Les données mesurées étaient limitées pour la bouée de mesure des vagues c44153 (dans le golfe du Saint-Laurent). Elles ont été comparées aux données de réanalyse de l’ensemble de données ERA5 pour l’évènement E33. On a calculé l’erreur quadratique moyenne *EQM* et le coefficient de corrélation pour la pression atmosphérique et les vitesses du vent pour l’évènement E33. L’erreur quadratique moyenne *EQM* pour la pression atmosphérique était de 1,4 kPa avec un coefficient de corrélation de 0,987. L’erreur quadratique moyenne *EQM* pour la vitesse du vent était de 1,03 m/s avec un coefficient de corrélation de 0,969. D’après les statistiques calculées et la comparaison visuelle des données tracées (figure 7), on a conclu que les données du modèle ERA5 sont raisonnablement cohérentes avec les vitesses des vents et la pression atmosphérique mesurées pour l’évènement E33 à la bouée de mesure des vagues c44153.

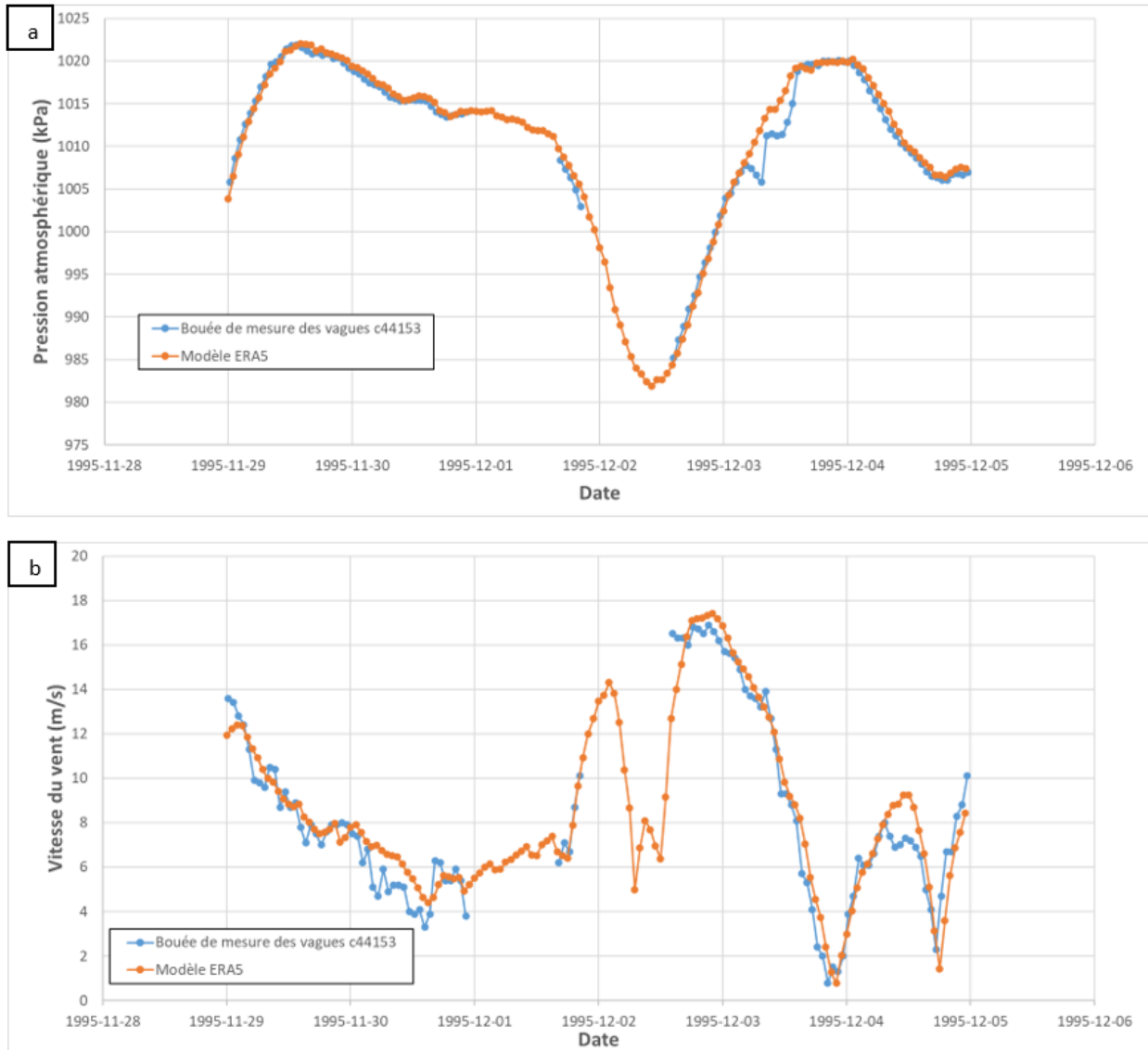


Figure 7. Comparaison des réanalyses ERA5 avec a) la pression atmosphérique mesurée et b) la vitesse du vent mesurée à la bouée c44153 (située dans le golfe du Saint-Laurent) pour l'évènement E33. Les lacunes dans les données des enregistrements de la bouée de mesure des vagues sont dénotées par l'absence de points de données bleus.

## 4.5 Données sur la glace de mer

Les cartes historiques hebdomadaires de la concentration de glace étaient disponibles en ligne dans les archives du Service canadien des glaces (Service canadien des glaces, 2019). Les effets potentiels de la glace de mer sur les ondes de tempête sont examinés dans la section 6.4.1, et un exemple de carte de la concentration de glace coïncidant avec l'évènement E26 (B15) est représenté sur la figure 18.

## 4.6 Couverture terrestre

Les données sur la couverture terrestre étaient disponibles dans GeoNB. Les polygones géoréférencés (fichiers de forme) représentant les terres boisées, les terres non boisées et les zones humides ont été téléchargés à partir du référentiel de données en ligne (gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2019e, 2019b, 2019c). Le fichier de forme des polygones représentant les terres non boisées contenait des données d'attribut fournissant des détails supplémentaires sur le type de couverture terrestre non boisée présente dans certains polygones. Les terres non boisées ont été classées dans les catégories suivantes : pas de végétation; graminées, cultures ou autres; arbustes; arbres. Un exemple de données sur la couverture terrestre près de Le Goulet est présenté sur la Figure 8.



Figure 8. Données sur la couverture terrestre près de Le Goulet.

## 4.7 Bâtiments et infrastructures

Les polygones géoréférencés (fichiers de forme) représentant les empreintes des bâtiments et des infrastructures ont été obtenus auprès du gouvernement du Nouveau-Brunswick. Les empreintes des bâtiments et des infrastructures étaient disponibles pour les sept collectivités incluses dans la modélisation à l'échelle communautaire. Un exemple de données sur l'empreinte des bâtiments et des infrastructures près de Maisonnette est présenté sur la figure 9.



Figure 9. Empreintes des bâtiments et des infrastructures près de Maisonnette.

## 4.8 Élévation du niveau relatif de la mer

Les surfaces géoréférencées et quadrillées représentant les projections de l'élévation du niveau relatif de la mer dans la zone d'étude ont été fournies par Thomas James, de la Commission géologique du Canada. Les données reflètent les variations projetées du niveau de la mer qui se produisent par rapport à la surface solide de la Terre, ce qui comprend celles du niveau de la mer ainsi que le soulèvement et l'affaissement des terres (James et coll., 2021). Les données rectangulaires ont été fournies avec une résolution spatiale (horizontale) de 0,1°. Trois projections de la variation du niveau relatif de la mer, correspondant à une élévation de 0,5 m, de 1 m et de 2 m du niveau mondial de la mer (ENMM), ont été fournies afin de faciliter l'évaluation des aléas futurs d'ondes de tempête dans la Péninsule acadienne. Les trois scénarios d'élévation du niveau de la mer sont conformes aux scénarios suivants, fondés sur le cinquième rapport d'évaluation (RE5) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (Church et coll., 2013) :

- Une élévation de 0,5 m du niveau mondial de la mer représente approximativement une projection médiane à l'horizon 2080, selon le scénario d'émissions élevées RCP8.5 (profil représentatif d'évolution de concentration 8.5).
- Une élévation de 1,0 m du niveau mondial de la mer représente approximativement la projection du 95<sup>e</sup> centile supérieur en 2100, selon le scénario d'émissions élevées RCP8.5.

- Une élévation de 2 m du niveau mondial de la mer représente un scénario à faible probabilité et de la fourchette supérieure pour l'année 2100 ou une élévation du niveau de la mer à un moment donné après 2100, selon le scénario climatique.

Les trois scénarios d'élévation du niveau mondial de la mer présentés ci-dessus correspondent à des valeurs d'élévation du niveau local de la mer d'environ 0,56 m, 1,16 m et 2,37 m près de la collectivité de Shippagan.

## 4.9 Mesures des niveaux d'eau élevés

Des indicateurs de niveaux d'eau élevés ont été relevés après deux ondes de tempête majeures survenues le 6 décembre 2010 et le 21 décembre 2010 (événements E48 [B9] et E15 [B37], respectivement). Les relevés ont été effectués par des représentants du gouvernement du Nouveau-Brunswick, Dominique Bérubé et Marc Desrosiers, à l'aide d'une technologie GPS (Global Positioning System) de haute précision (Robichaud et coll., 2011). Ils ont été réalisés le 9 décembre 2010 dans les environs de Le Goulet et de Shippagan, le 23 juin 2011 à proximité de Pointe-Brûlée, et le 28 juin 2011 près de Bas-Caraquet. Les données des relevés consistent en des mesures ponctuelles indiquant la position horizontale (coordonnées X et Y) et l'altitude géoréférencée au Système canadien de référence altimétrique de 1928 (CGVD28).

Les données recueillies le 9 décembre 2010 reflètent les niveaux d'eau élevés produits lors de l'évènement du 6 décembre 2010. Selon une communication personnelle avec Dominique Bérubé, on pense que les données recueillies en juin 2011 représentent les niveaux d'eau élevés lors de l'évènement du 6 décembre 2010, mais il est possible qu'elles reflètent en fait les niveaux associés à l'évènement du 21 décembre 2010, qui a produit des quantités similaires d'inondations dans la Péninsule acadienne.

La plupart des données des relevés reposaient sur l'observation des débris (zostère marine) déposés sur la côte par les eaux de crue (figure 10a). Le relevé du 28 juin 2011 à Bas-Caraquet reflète les observations de dépôts de gravier poussés sur la terre par les eaux de crue. Certains des points du relevé du 9 décembre 2010 indiquent une observation directe des niveaux d'eau observés pendant le pic de la crue, marqués par des jalons de relevé au moment de l'observation (figure 10b). Dominique Bérubé a rappelé que, en plus de l'onde de tempête et de la phase de la marée, les débris relevés pouvaient refléter les contributions de la remontée des vagues et de l'inondation résultant du franchissement des vagues ou de la rupture des dunes et des îles-barrières, contributions qui n'ont pas été prises en compte dans la modélisation décrite dans le présent rapport. On soupçonne que la contribution de la remontée des vagues aux niveaux totaux d'eau a pu être relativement importante par rapport aux composantes dues aux marées et aux ondes de tempête à Bas-Caraquet, une localité exposée à la baie des Chaleurs, et où les eaux de crue observées ne sont pas parvenues loin à l'intérieur des terres.

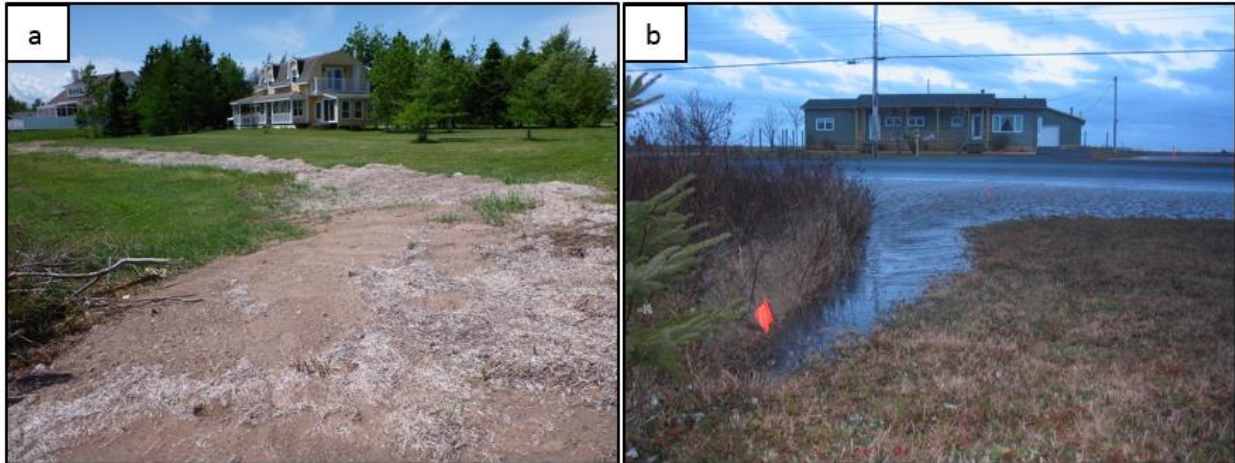


Figure 10. Exemples d'indicateurs de niveaux d'eau élevés a) à Pointe-Brûlée et b) à Le Goulet. La figure a) illustre des débris de zostère marine déposés sur la côte par les eaux de crue et la figure b) montre des jalons orange placés par Dominique Bérubé et Marc Desrosiers, indiquant les niveaux d'eau élevés observés au plus fort de l'évènement du 6 décembre 2010. Photos fournies par Dominique Bérubé et Marc Desrosiers.

## 4.10 Preuves photographiques et vidéo des inondations

Des preuves photographiques et vidéos des événements du 6 décembre 2010 et du 21 décembre 2010 (les événements E48 [B9] et E15 [B37], respectivement) ont été fournies à l'équipe de recherche. Les preuves photographiques ont été fournies par Dominique Bérubé (gouvernement du Nouveau-Brunswick), Marc Desrosiers (gouvernement du Nouveau-Brunswick) et André Robichaud (Ph. D.; Université de Moncton). Des preuves vidéo des inondations causées par l'évènement du 21 décembre 2010 ont été trouvées sur YouTube (Doucet, 2010). André Robichaud a fourni des informations sur les emplacements présentés dans la vidéo YouTube et a communiqué avec le propriétaire de la vidéo (Maxime Doucet) pour confirmer les lieux de la séquence.

## 5 Aperçu de l'approche de modélisation

Les ondes de tempête générées par des événements météorologiques d'échelle synoptique (tels que les tempêtes extratropicales ou les cyclones post-tropicaux) sur la côte du Canada atlantique sont modifiées et, dans certains cas, amplifiées par les interactions avec la bathymétrie côtière et des caractéristiques telles que les îles, les bras de mer et les baies à des échelles spatiales pouvant atteindre des centaines de kilomètres. Cependant, les aléas d'inondation côtière due à une onde de tempête et l'étendue de l'inondation peuvent être influencés par des éléments de la plaine d'inondation (par exemple, les ponceaux, les voies en remblai) caractérisés par des échelles spatiales de l'ordre du mètre. Des approches de modélisation multiéchelle (imbriquée) ou de réduction d'échelle dynamique sont souvent nécessaires pour résoudre les processus importants responsables des inondations côtières à ces échelles spatiales (et temporelles) distinctes (par exemple, Barnard et coll., 2014) avec un effort de calcul raisonnable. Dans cette étude, la modélisation a été réalisée selon une approche multiéchelle (ou modélisation imbriquée), comprenant l'élaboration d'un modèle régional et d'un modèle communautaire d'onde de tempête.

Le modèle régional d'onde de tempête couvrait une grande partie de la côte atlantique et du plateau continental du Canada, avec un domaine suffisamment étendu pour refléter les ondes de tempête générées par le passage de systèmes météorologiques d'échelle synoptique. Le modèle d'aléas d'inondation à l'échelle communautaire, axé précisément sur la Péninsule acadienne, était imbriqué (hors ligne, découplé) dans le modèle régional et affichait une résolution spatiale et des détails suffisants pour simuler la propagation au-dessus du sol des eaux de crue et l'inondation. Le modèle régional a servi à simuler les ondes de tempête dans les régions côtières du Canada atlantique, et les résultats de la simulation régionale ont été appliqués à la limite extracôtière du modèle à l'échelle communautaire pour effectuer des simulations à haute résolution des aléas côtiers liés aux ondes de tempête, aux marées et à l'élévation du niveau de la mer dans les sept collectivités d'intérêt de la Péninsule acadienne.

La modélisation de l'onde de tempête régionale et de l'inondation des collectivités entreprise dans cette étude a été mise en œuvre à l'aide de TELEMAC-2D. TELEMAC-2D résout les équations de Saint-Venant bidimensionnelles (moyennées en fonction de la profondeur) qui décrivent l'hydrodynamique des eaux peu profondes; les calculs sont effectués sur un maillage non structuré selon les méthodes des éléments finis ou des volumes finis (Ata, 2018). Ce logiciel incorpore de nombreux processus pertinents pour la modélisation des ondes de tempête dans les eaux côtières, notamment le frottement sur le fond, la force de Coriolis, la traînée des bâtiments, la turbulence et le forçage par les vents et la pression atmosphérique variant dans l'espace et dans le temps.

## 6 Élaboration d'un modèle régional d'ondes de tempête sur la côte est

### 6.1 Configuration du modèle

Le domaine de calcul du modèle régional, illustré sur la figure 11, englobe une grande partie de la côte atlantique canadienne. Le domaine du modèle couvre une zone allant de Portland, dans le Maine, au sud, à la baie Sandwich, au Labrador, au nord. La limite du modèle en haute mer a été établie au large du plateau continental, à des profondeurs d'eau supérieures à 4 000 m, afin de réduire les influences des conditions des limites artificielles sur les ondes de tempête simulées dans les zones côtières d'intérêt. Le maillage du modèle a été généré à l'aide du logiciel Blue Kenue (Barton, 2019; Centre d'hydraulique canadien, 2011). Le maillage est constitué d'environ 476 000 nœuds de calcul avec une résolution de 200 m autour de la Péninsule acadienne (zone du modèle à l'échelle communautaire), une résolution d'environ 1 700 m dans le golfe du Saint-Laurent et une résolution de 30 km à la limite du large. Les données bathymétriques du SHC-NONNA et de GEBCO décrites dans la section 4.1 ont été interpolées au maillage pour créer la bathymétrie du modèle.

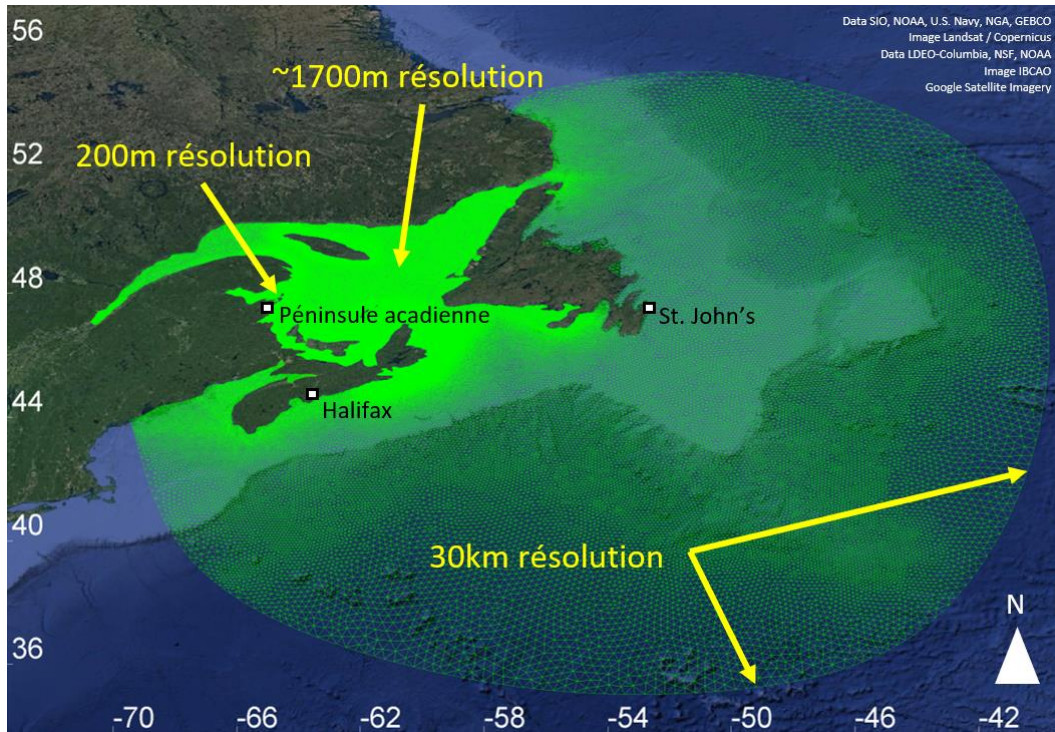


Figure 11. Maillage de calcul pour le modèle régional des ondes de tempête.

## 6.2 Conditions aux limites du modèle

Le modèle régional des ondes de tempête a été forcé en utilisant les données ERA5 sur le vent et la pression atmosphérique décrites dans la section 4.3.3. Les champs du vent et de la pression atmosphérique ont été interpolés aux nœuds du maillage du modèle pour les périodes entourant 44 des 50 plus grands événements d'ondes de tempête positives relevés dans les enregistrements du marégraphe d'Escuminac. Six des 50 principaux événements d'ondes de tempête enregistrés ont eu lieu avant 1979, soit avant les données ERA5 sur le vent et la pression atmosphérique disponibles au moment de l'analyse, et n'ont donc pas été simulés. Une condition de limite fermée était prescrite aux limites du modèle sur le littoral et au large, ce qui signifie que l'hydrodynamique du modèle a été forcée uniquement par les données sur le vent et la pression atmosphérique (c.-à-d. qu'aucun forçage de la profondeur ou du débit n'a été appliqué à la limite du modèle). Cette conception des conditions aux limites a été jugée acceptable pour le modèle régional des ondes de tempête, car la distance entre les limites du modèle au large et les principales zones d'intérêt (dans le golfe du Saint-Laurent) était suffisante pour que l'onde de tempête se développe dans le domaine du modèle. En outre, l'onde de tempête est un phénomène des eaux peu profondes, de sorte que la limite du modèle en mer a été placée intentionnellement dans les eaux profondes au large du plateau continental (profondeurs de l'eau inférieures à 4 000 m), où l'on prévoit une onde de tempête minimale.

Deux cas particuliers ont été exécutés avec un forçage de la marée à la limite du large pour les événements E15 (B37) et E48 (B9) afin de faciliter l'étalonnage et la validation du modèle à l'échelle communautaire, décrits en détail dans les sections 7.3 et 7.4. Dans les cas où un forçage de la marée astronomique était nécessaire pour l'étalonnage et la validation du modèle à l'échelle communautaire, le modèle régional a été forcé à l'aide de la base de données mondiales TPXO et ses variantes régionales et locales de l'Oregon State University (Egbert et Erofeeva, 2002). Le logiciel de modélisation TELEMAC inclut des fonctionnalités permettant d'intégrer la base de données TPXO à la simulation hydrodynamique (Ata, 2018).

## 6.3 Étalonnage du modèle

On a réalisé un exercice de sensibilité et d'étalonnage du modèle afin de vérifier qu'il est possible d'utiliser le modèle régional pour simuler les ondes de tempête avec une précision raisonnable. Pour étalonner le modèle régional des ondes de tempête, on a ajusté la formulation/les coefficients de traînée du vent et les coefficients de frottement sur le fond et comparé les ondes de tempête simulées aux résidus obtenus à partir de l'analyse des niveaux d'eau mesurés.

Plusieurs formulations et coefficients de traînée du vent peuvent être utilisés pour caractériser le transfert de la quantité de mouvement du vent à la surface de la mer dans les modèles hydrodynamiques. En prenant l'évènement E4 (B3) comme base d'étude, on a testé deux formulations de la traînée du vent avec des coefficients de traînée variant en fonction de la vitesse du vent : Wu (1980, 1982) et Flather (1976). L'évènement E4 (B3) s'est produit pendant des conditions libres de glace. On a également étudié un coefficient constant de traînée du vent (paramètre par défaut dans TELEMAC-2D). On a alors comparé les ondes de tempête simulées pendant l'évènement E4 (B3) au marégraphe d'Escuminac, résultant des différentes formulations et différents coefficients de traînée du vent. Le modèle a prédit une large plage de valeurs d'ondes de tempête, variant en fonction des différentes formulations de la traînée du vent. Les ondes de tempête maximales modélisées allaient de 1,9 m (selon Flather [1976]) à 1,2 m (selon Wu [1980, 1982]). La formulation de la traînée du vent de Flather a produit une surestimation de l'onde de tempête maximale, mais a raisonnablement bien rendu compte de l'évolution temporelle et de la durée de l'évènement d'onde de tempête. Les deux autres paramétrages de la traînée du vent ont sous-estimé à la fois le pic de l'onde de tempête et la durée de cet évènement. On a appliqué l'équation de la traînée du vent de Flather tout au long de l'exercice d'étalonnage du modèle et dans toutes les simulations du modèle.

La formulation de la traînée du vent de Flather comprend un coefficient de traînée du vent qui varie en fonction de la vitesse du vent. Pour paramétrer la traînée du vent dans le modèle, on a ajusté les coefficients de traînée dans les trois plages de seuil de vitesse du vent déterminées par Flather, et comparé les ondes de tempête simulées aux résidus des niveaux d'eau mesurés. Les prédictions du modèle concernant les ondes de tempête maximales étaient très sensibles aux ajustements du coefficient de traînée, produisant un écart d'environ 0,4 m entre l'onde la plus élevée et l'onde la plus faible prédites.

Toujours en utilisant l'évènement E4 (B3) comme base d'étude, on a examiné l'impact de la rugosité modélisée du fond sur les résultats simulés. Cinq configurations de rugosité différentes ont été appliquées, le coefficient de rugosité de Strickler ( $S$ ) variant de  $S=10$  à  $S=40$   $m^{1/3}/s$ . L'onde de tempête maximale simulée pour l'évènement E4 (B3) a varié de moins de 0,08 m (4,8 %) sur l'ensemble des configurations de rugosité étudiées et le modèle a donc été jugé insensible à la rugosité.

Pendant l'étalonnage du modèle, on a ajusté la rugosité et la traînée du vent de façon itérative et comparé les résultats du modèle aux résidus des niveaux d'eau mesurés aux marégraphes d'Escuminac et de Belledune pour deux événements de tempête : l'évènement E4 (B3) et l'évènement E23 (B38). Il y avait de la glace de mer près de la côte du Nouveau-Brunswick durant l'évènement E23 (B38); cependant, une partie du golfe du Saint-Laurent à l'ouest de l'île de Terre-Neuve était libre de glace. Dans le modèle final étalonné, on a appliqué une formulation de la traînée du vent de Flather avec un coefficient de traînée du vent ( $a_{wind}$ ) variant entre  $0,565 \times 10^{-3}$  et  $4,394 \times 10^{-3}$  (Ata 2018), et une rugosité du fond spatialement uniforme de  $S=40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  dans tout le domaine, à l'exception du plancher océanique entre l'île de Terre-Neuve et le continent, où on a utilisé une rugosité du fond de  $S=10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ .

Les ondes de tempête simulées à l'aide du modèle étalonné pour l'évènement E4 (B3) et l'évènement E23 (B38) sont représentées par rapport aux données sur les ondes de tempête mesurées par le marégraphe d'Escuminac sur la figure 12 et la figure 13, respectivement. L'onde de tempête maximale modélisée correspond assez bien aux données mesurées pour les deux événements étalonnés, avec une surestimation de l'onde maximale d'environ 2 % (évènement E4 [B3]) et 4 % (évènement E23 [B38]). Malgré les divergences entre les ondes de tempête modélisées et mesurées avant et après l'onde maximale, le modèle a pu refléter la tendance générale de l'onde de tempête pour les deux événements.

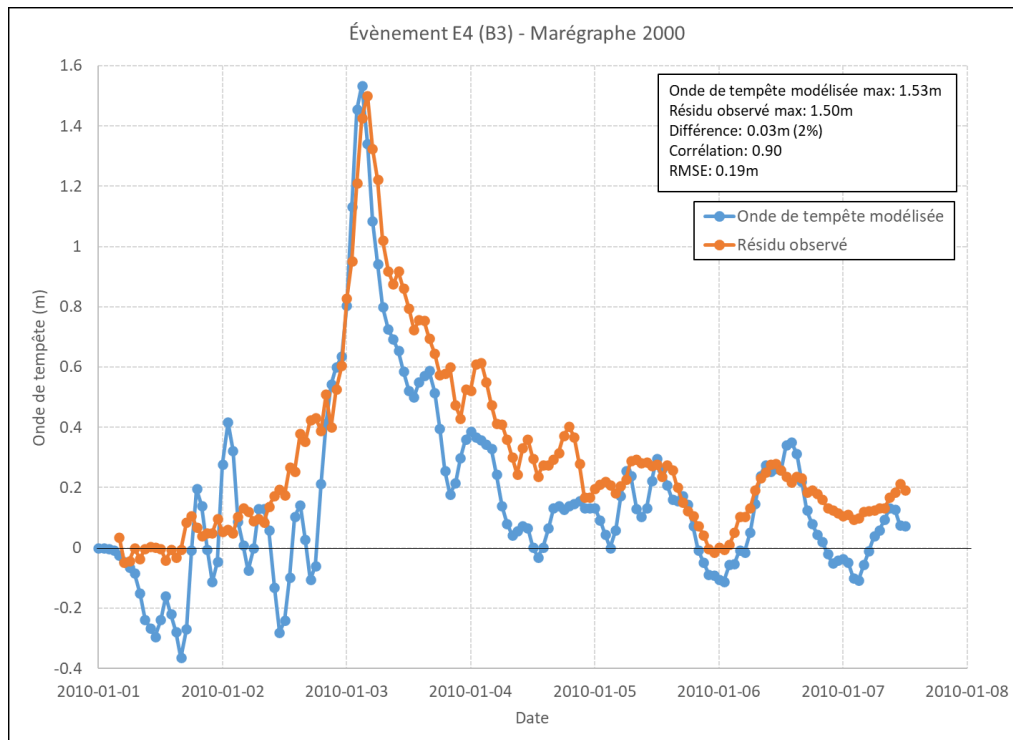


Figure 12. Résultats de l'étalonnage final pour l'évènement E4 (B3) au marégraphe d'Escuminac.

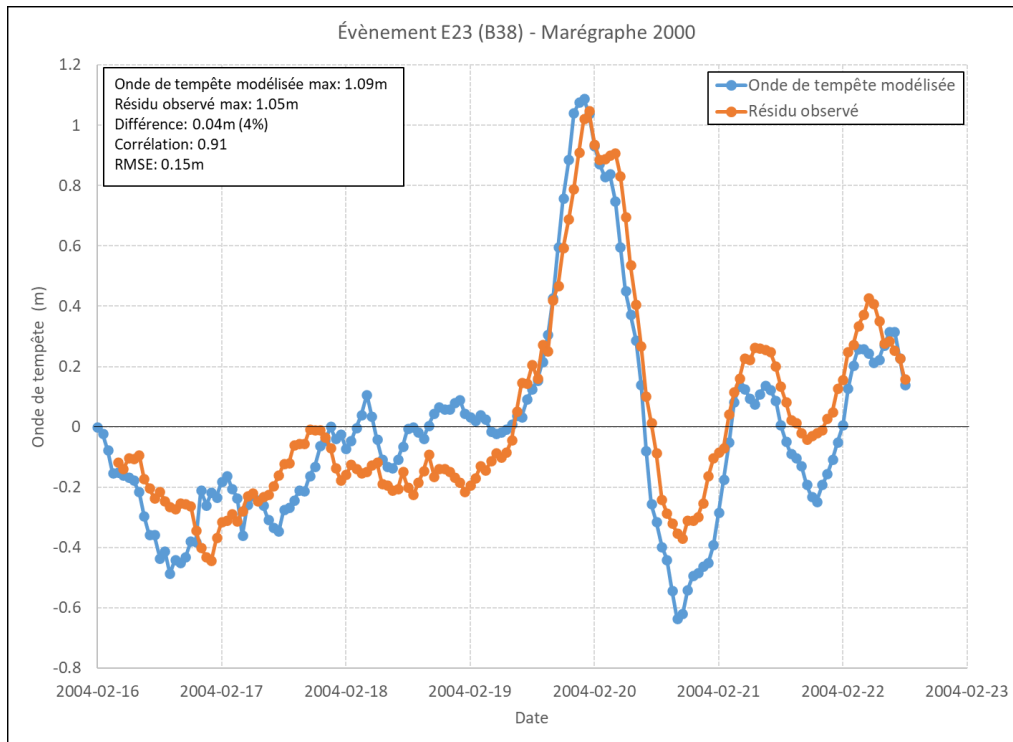


Figure 13. Résultats de l'étalonnage final pour l'évènement E23 (B38) au marégraphe d'Escuminac.

Les comparaisons entre l'onde modélisée et l'onde mesurée au marégraphe de Belledune sont présentées sur la figure 14 et la figure 15 pour l'évènement E4 (B3) et l'évènement E23 (B38), respectivement. Comme les résultats modélisés au marégraphe d'Escuminac, le modèle a pu reproduire l'onde de tempête maximale avec une précision raisonnable; on a relevé une sous-prédiction de 4 % pour l'évènement E4 (B3) et de 11 % pour l'évènement E23 (B38). Les divergences entre l'onde modélisée et l'onde mesurée avant et après l'onde de tempête maximale sont également observées au marégraphe de Belledune. Malgré ces divergences, les résultats de l'étalonnage ont été jugés satisfaisants, car le modèle est capable de simuler à la fois l'ampleur et la durée de l'onde de tempête maximale, qui sont les principaux facteurs contribuant aux aléas d'inondation due à une onde de tempête.

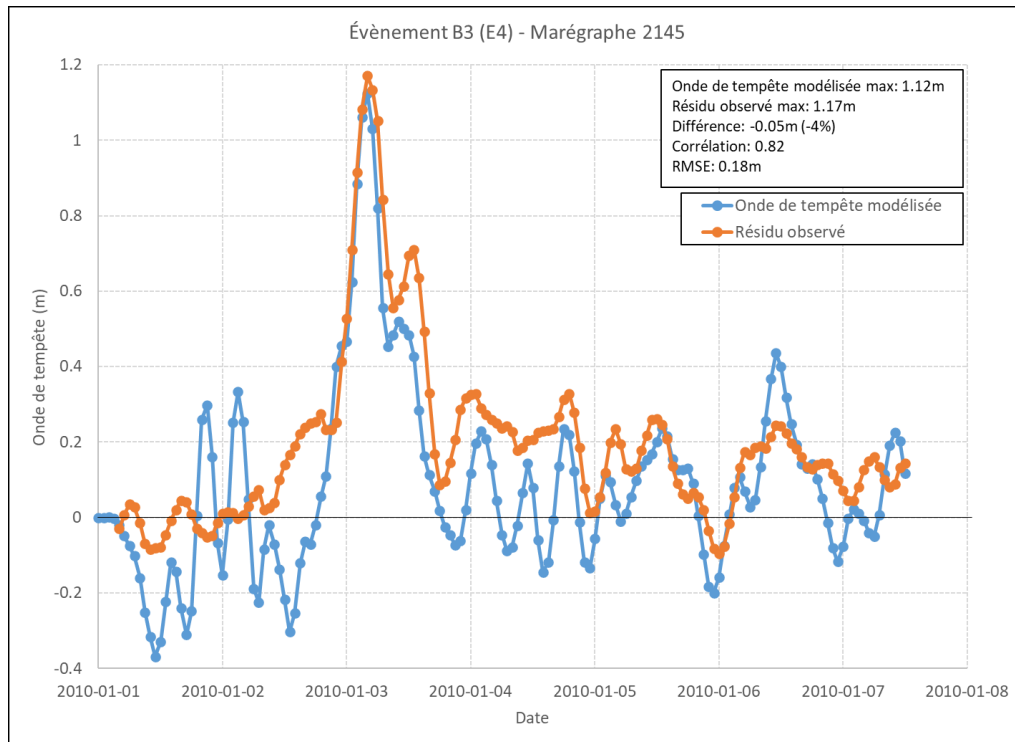


Figure 14. Résultats de l'étalonnage final pour l'évènement B3 (E4) au marégraphe de Belledune.

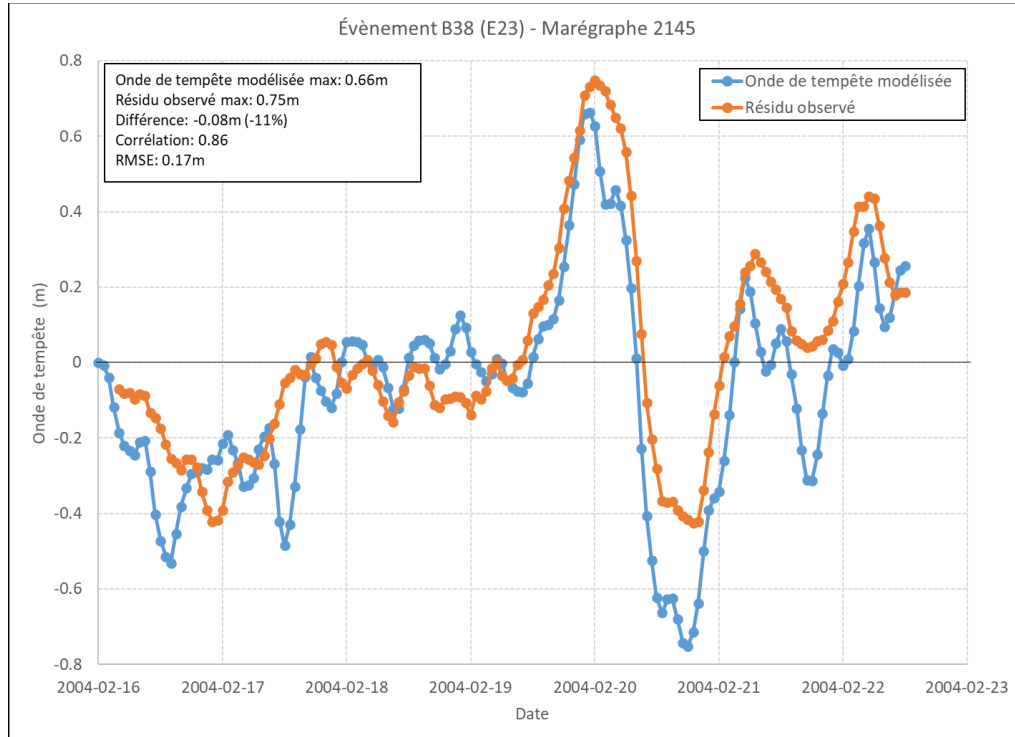


Figure 15. Résultats de l'étalonnage final pour l'évènement B38 (E23) au marégraphe de Belledune.

## 6.4 Validation des modèles

Après l'étalonnage, on a utilisé le modèle régional des ondes de tempête pour simuler 44 des 50 plus grands événements d'ondes de tempête positives déterminés à partir des enregistrements du marégraphe d'Escuminac. Six des 50 principaux événements d'ondes de tempête enregistrés ont eu lieu avant 1979, soit avant les données ERA5 sur le vent et la pression atmosphérique disponibles au moment de l'analyse, et n'ont donc pas été simulés. On a comparé les valeurs de l'onde de tempête maximale modélisée aux résidus des niveaux d'eau maximaux observés afin de valider le rendement du modèle. On a utilisé les données sur la pression atmosphérique et le vent provenant de la réanalyse ERA5 pour forcer le modèle. Chaque simulation couvrait une période de sept jours (environ trois jours avant et après l'apparition de l'onde de tempête maximale) et a nécessité environ 1,5 heure de calcul avec 10 processeurs.

Les valeurs de l'onde de tempête maximale modélisée pour chaque événement sont résumées dans le tableau 2. À titre de comparaison, le tableau 2 indique également le résidu maximal observé (présumé représenter l'onde de tempête) ainsi que la différence entre les valeurs prédites et observées, l'erreur quadratique moyenne *EQM* (calculée à l'aide de l'équation 1) et le coefficient de corrélation (calculé à l'aide de l'équation 2). Les différences entre les ondes de tempête maximales modélisées et les résidus maximaux observés dépassant  $\pm 15\%$  sont mises en évidence en jaune (sous-prédiction du modèle) et en bleu (surestimation du modèle). Le modèle étalonné a été en mesure de prédire l'onde de tempête maximale à  $15\%$  près de l'onde maximale mesurée pour plus de la moitié des événements. Cependant, la capacité du modèle à prédire les ondes de tempête maximales pour les autres événements s'est avérée extrêmement variable, donnant une valeur  $R^2$  (coefficient de détermination) de 0,403 lorsqu'on a tracé les ondes de tempête maximales modélisées pour les 44 événements par rapport aux résidus maximaux mesurés (Figure 17). Sur les 44 événements présentés dans le tableau 2, on a détecté une sous-prédiction (indiquée en jaune) ou une surestimation (indiquée en bleu) de  $15\%$  pour 20 d'entre eux.

Tableau 2. Comparaison de l'onde de tempête maximale modélisée et de l'onde de tempête maximale mesurée pour 44 des 50 événements les plus importants. La surbrillance jaune indique une sous-prédiction de 15 % de l'onde et la surbrillance bleue, une surestimation de 15 %.

Évènement	Onde de tempête maximale modélisée (m)	Onde de tempête maximale mesurée (m)	% Différence	RMSE (m)	Coefficient de corrélation
Évènement_E1	1.31	1.61	-19	0.14	0.94
Évènement_E3	1.33	1.51	-12	0.14	0.95
Évènement_E4	1.53	1.50	2	0.19	0.90
Évènement_E5	1.32	1.49	-12	0.16	0.90
Évènement_E6	1.13	1.45	-22	0.33	0.86
Évènement_E7	1.28	1.43	-10	0.14	0.94
Évènement_E9	1.55	1.28	21	0.18	0.94
Évènement_E10	1.08	1.25	-14	0.19	0.87
Évènement_E11	0.91	1.21	-24	0.24	0.90
Évènement_E12	1.13	1.20	-6	0.14	0.94
Évènement_E13	1.38	1.20	15	0.10	0.97
Évènement_E15	0.95	1.16	-18	0.29	0.84
Évènement_E16	1.07	1.13	-6	0.11	0.96
Évènement_E17	1.30	1.09	20	0.12	0.95
Évènement_E18	0.74	1.08	-31	0.20	0.88
Évènement_E19	1.16	1.07	9	0.14	0.96
Évènement_E20	0.77	1.06	-28	0.25	0.25
Évènement_E21	0.77	1.06	-27	0.15	0.93
Évènement_E22	0.97	1.06	-8	0.18	0.92
Évènement_E23	1.09	1.05	4	0.15	0.91
Évènement_E25	1.03	1.05	-1	0.16	0.88
Évènement_E26	1.35	1.03	31	0.18	0.94
Évènement_E27	1.09	1.03	6	0.14	0.92
Évènement_E28	1.01	1.01	0	0.16	0.94
Évènement_E29	1.11	1.00	11	0.19	0.88
Évènement_E30	0.95	0.99	-4	0.13	0.92
Évènement_E31	0.92	0.99	-8	0.17	0.87
Évènement_E33	0.71	0.98	-28	0.15	0.84
Évènement_E34	1.02	0.98	4	0.16	0.87
Évènement_E35	0.90	0.98	-9	0.15	0.93
Évènement_E36	0.69	0.98	-29	0.25	0.83
Évènement_E37	1.29	0.98	32	0.19	0.93
Évènement_E38	1.19	0.97	22	0.25	0.83
Évènement_E40	0.99	0.95	4	0.19	0.93
Évènement_E41	0.69	0.95	-27	0.12	0.94
Évènement_E42	0.76	0.94	-20	0.12	0.91
Évènement_E43	0.91	0.94	-3	0.10	0.96
Évènement_E44	0.91	0.94	-3	0.15	0.89
Évènement_E45	0.92	0.93	-2	0.10	0.94
Évènement_E46	0.93	0.92	0	0.21	0.81
Évènement_E47	0.62	0.92	-33	0.23	0.86
Évènement_E48	1.08	0.92	18	0.09	0.92
Évènement_E49	0.84	0.91	-8	0.16	0.91
Évènement_E50	0.72	0.90	-21	0.09	0.93

### 6.4.1 Influence des vagues et de la glace de mer

On a étudié les raisons possibles de la faible capacité du modèle régional à prédire les résidus maximaux des niveaux d'eau pour certains événements. On a ainsi constaté que le modèle avait tendance à sous-estimer les résidus maximaux des niveaux d'eau pour les événements coïncidant avec des vents forts et soutenus de l'est ou du nord-est, où l'on pourrait s'attendre à une importante surcote liée aux vagues dans la Péninsule acadienne, compte tenu de la longueur du fetch en eaux libres. En revanche, le modèle a eu tendance à surestimer les résidus maximaux des niveaux d'eau lorsque les tempêtes coïncidaient avec une couverture de glace de mer importante dans le golfe du Saint-Laurent. Une étude des contributions potentielles de la surcote liée aux vagues aux niveaux d'eau dans la Péninsule acadienne et de l'atténuation des ondes de tempête par la glace de mer dans le golfe du Saint-Laurent est décrite dans Provan et coll. (2022) et résumée ici.

L'analyse des données ERA5 sur le vent utilisées pour alimenter le modèle des ondes de tempête a révélé que tous les événements pour lesquels le modèle a sous-estimé l'onde maximale coïncidaient avec des vents forts et soutenus de l'est ou du nord-est (vers la côte en direction du marégraphe d'Escuminac – voir la figure 2). Les vents provenant de ces directions soufflent sur un fetch relativement long de 400 à 500 km dans le golfe du Saint-Laurent vers la Péninsule acadienne et le détroit de Northumberland et, par conséquent, génèrent probablement une importante surcote liée aux vagues sur les côtes du nord du Nouveau-Brunswick. Les effets des vagues ne sont pas reflétés par le modèle des ondes de tempête, qui simule uniquement les influences du vent et barométriques (de la pression atmosphérique) sur les niveaux d'eau. On a donc formulé l'hypothèse que les différences entre les ondes de tempête maximales modélisées et les résidus maximaux observés pour ces événements pourraient s'expliquer, en partie, par l'omission des effets des vagues dans le modèle. Pour vérifier cette hypothèse, on a élaboré un modèle numérique de vagues afin de simuler les conditions des vagues pour les 13 événements sous-estimés dans le golfe du Saint Laurent, et l'on a utilisé les résultats pour estimer les contributions de la surcote liée aux vagues aux niveaux totaux d'eau. Le modèle était fondé sur TOMAWAC, un modèle spectral de vagues de troisième génération, qui fait partie du système de modélisation TELEMAC (Benoit et coll., 1996). Les détails de la configuration du modèle sont décrits dans Provan et coll. (2022). Les résultats du modèle TOMAWAC pour l'évènement E1 sont présentés sur la figure 16; ils indiquent une hauteur de l'onde significative maximale d'environ 6,5 m dans le golfe du Saint-Laurent et les vagues les plus hautes dans la région littorale immédiatement adjacente à la jauge d'Escuminac. En utilisant les paramètres des vagues simulées comme données d'entrée, on a estimé la surcote liée aux vagues à l'aide de trois formules différentes : Ji et coll. (2018), Stockdon et coll. (2006) et Goda (2000). Pour l'évènement E1, les estimations de la surcote liée aux vagues étaient de 0,39 m, de 0,11 m et de 0,78 m, respectivement. Bien que la variabilité des estimations de la surcote liée aux vagues illustre une incertitude, la fourchette englobe la différence de 0,3 m entre l'onde de tempête maximale modélisée (1,31 m) et le résidu maximal du niveau d'eau mesuré (1,61 m) pour cet événement; la valeur médiane en est aussi raisonnablement proche. On a corrigé l'onde modélisée pour les 13 événements sous-estimés en simulant les conditions des vagues à l'aide du modèle TOMAWAC et en ajoutant les estimations de la surcote liée aux vagues calculées selon la formule donnée dans Ji et coll. (2018). Les résultats après correction pour la surcote liée aux vagues et les effets de la glace (examinés plus loin dans cette section) sont présentés sur la figure 17. Cette analyse montre les circonstances dans lesquelles la surcote liée aux vagues peut avoir un impact sur les niveaux d'eau dans le golfe du Saint Laurent et la Péninsule acadienne.

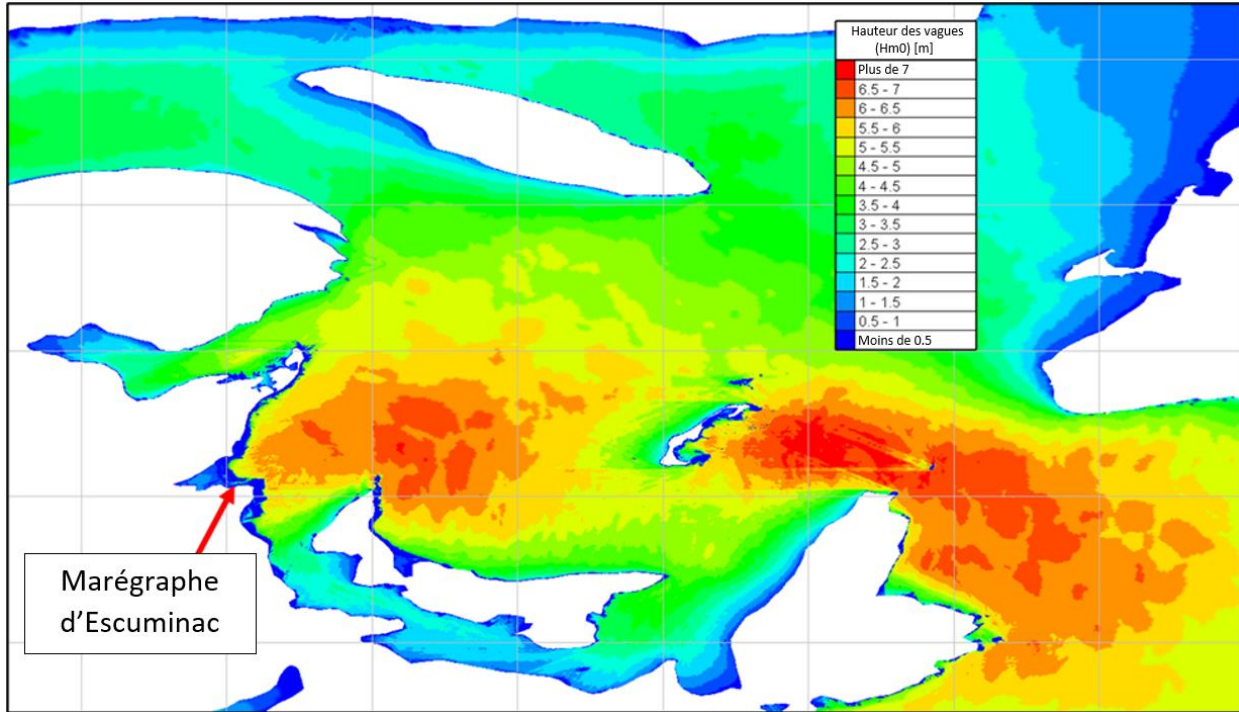


Figure 16. Hauteur des vagues modélisée dans le golfe du Saint-Laurent jusqu'à l'onde de tempête maximale de l'évènement E1.

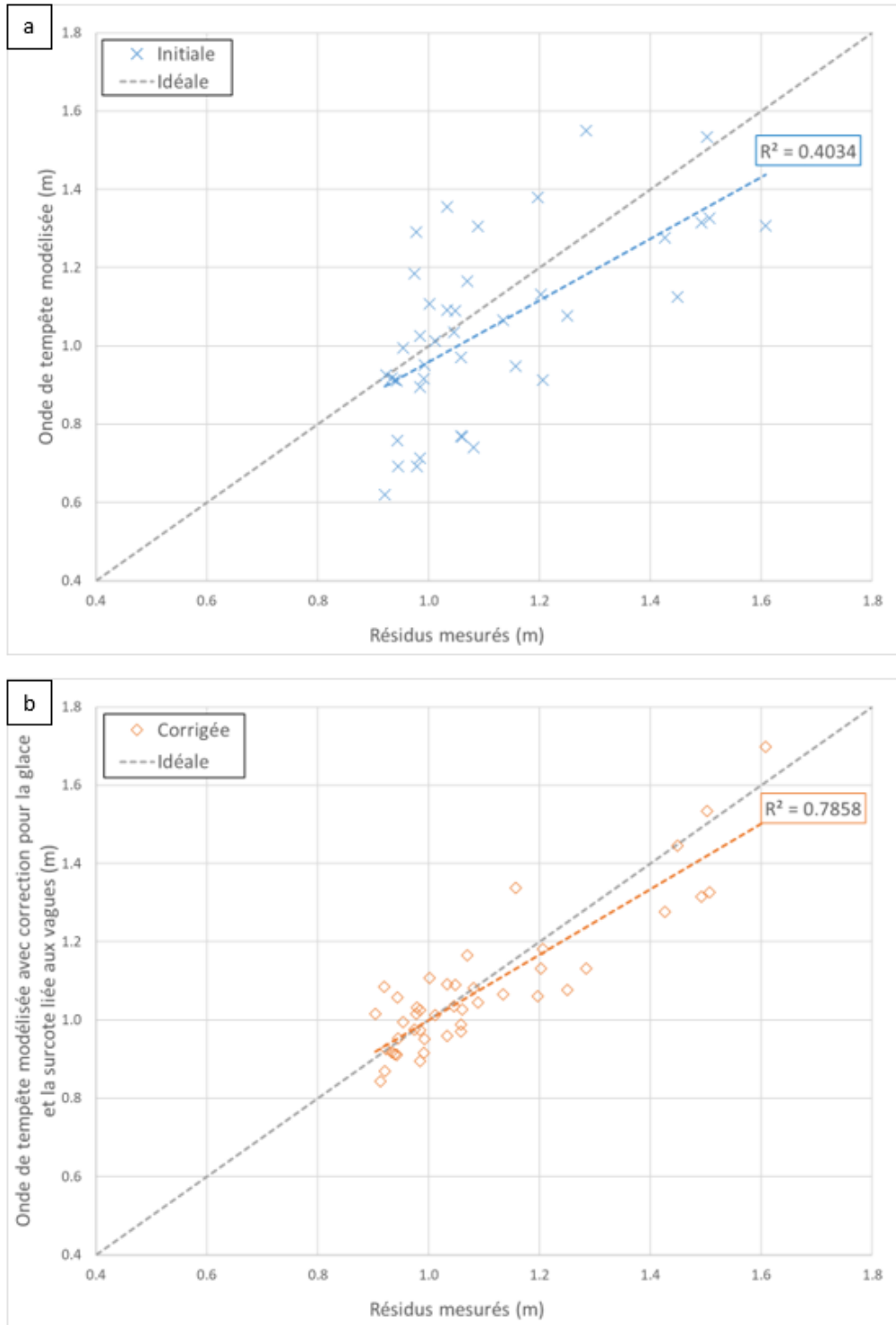


Figure 17. Résidus mesurés au marégraphe d'Escuminac comparés a) à l'onde modélisée sans correction pour la glace et la surcote liée aux vagues et b) à l'onde modélisée avec correction pour la glace et la surcote liée aux vagues.

Les sept évènements d'onde de tempête pour lesquels le modèle a surestimé le résidu maximal du niveau d'eau se sont produits pendant les mois d'hiver (décembre à mars), lorsqu'il est possible que de la glace de mer soit présente dans le golfe du Saint-Laurent. On a étudié les cartes historiques hebdomadaires de la concentration de glace (Service canadien des glaces, 2019) et constaté que six des sept évènements surestimés coïncidaient avec une couverture de glace importante dans tout le golfe (à l'exception de l'évènement E48 [B9]). Un exemple de carte des glaces coïncidant avec l'évènement E26 (B15) (27 mars 2014) est présenté sur la figure 18 et montre des concentrations de glace dépassant 90 % sur la majorité du golfe au sud de l'île d'Anticosti. Il convient de noter que sept autres évènements (E7, E20, E23, E28, E34, E35 et E44) ont coïncidé avec une couverture de glace; l'onde maximale modélisée pour tous ces évènements, à l'exception de l'évènement E20, correspondait bien aux résidus maximaux des niveaux d'eau mesurés (écart de moins de 15 %) sans aucune correction pour les impacts de la glace. Comme on peut le voir dans le tableau 2, le modèle a sous-estimé le résidu maximal du niveau d'eau pour l'évènement E20, malgré une couverture de glace importante.

Birnbaum et Lüpkes (2002) et Garbrecht et coll. (2002) ont montré que les faibles concentrations de glace amplifient la surcote due au vent en raison de l'augmentation de la rugosité de la surface et de la traînée de forme induite par les floes, accroissant le transfert de la quantité de mouvement du vent à la surface de la mer. Cependant, de fortes concentrations de glace, comme celles que l'on trouve dans le golfe du Saint-Laurent en hiver, peuvent agir comme une barrière entre le vent et l'eau. La barrière de glace réduit la traînée du vent agissant sur l'eau (Birnbaum et Lüpkes, 2002) et la surcote correspondante due au vent, atténuant efficacement les ondes de tempête. Cela correspond à une explication selon laquelle le modèle des ondes de tempête a surestimé les résidus des niveaux d'eau pendant les périodes de couverture de glace importante dans le golfe du Saint-Laurent, car les effets d'atténuation de la couverture de glace n'étaient pas inclus à l'origine dans le modèle.

Pour étudier les impacts de la glace de mer sur les ondes de tempête hivernales, on a appliqué dans le modèle régional les équations suivantes, élaborées dans Joyce et coll. (2019), qui tiennent compte des contributions des concentrations variables de la glace de mer ( $IC$ ) sur la traînée globale ( $C_D$ ) agissant sur la surface de l'eau :

$$C_D = (1 - IC)C_{D-w} + (IC)C_{D-is} + C_{D-if} \quad (3)$$

où  $C_{D-w}$  est le coefficient de traînée air-mer étaloné pour les conditions d'eaux libres ( $C_D = C_{D-w}$  pendant les conditions libres de glace),  $C_{D-is}$  est la contribution due à la traînée de frottement de la glace, qui a été fixée à une valeur constante de 0,0015 (Lüpkes et coll., 2012), et  $C_{D-if}$  est la contribution due à la traînée de forme de la glace, calculée selon la formule :

$$C_{D-if} = 4C_{D-if,max}(IC)(1 - IC) \quad (4)$$

où  $C_{D-if,max}$  est fixée à 0,0025, soit la valeur maximale de  $C_{D-if}$  qui se produit à une concentration de glace de 50 % (Joyce et coll., 2019).

On a simulé de nouveau les six tempêtes qui coïncidaient avec une glace de mer importante et pour lesquelles le modèle a surestimé le résidu maximal du niveau d'eau en utilisant la formulation modifiée de la traînée du vent. La modification de la traînée du vent en fonction de l'état de la glace de mer a amélioré la concordance entre les résidus des niveaux d'eau mesurés et les ondes de tempête hivernales simulées (voir la figure 17). Au total, l'intégration des effets de la surcote liée aux vagues et de la glace de mer dans la modélisation régionale a amélioré le coefficient de détermination, qui est ainsi passé de 0,4034 à 0,7858. D'autres détails concernant la mise en œuvre de la glace de mer dans le modèle régional et les résultats sont fournis dans Provan et coll. (2022).

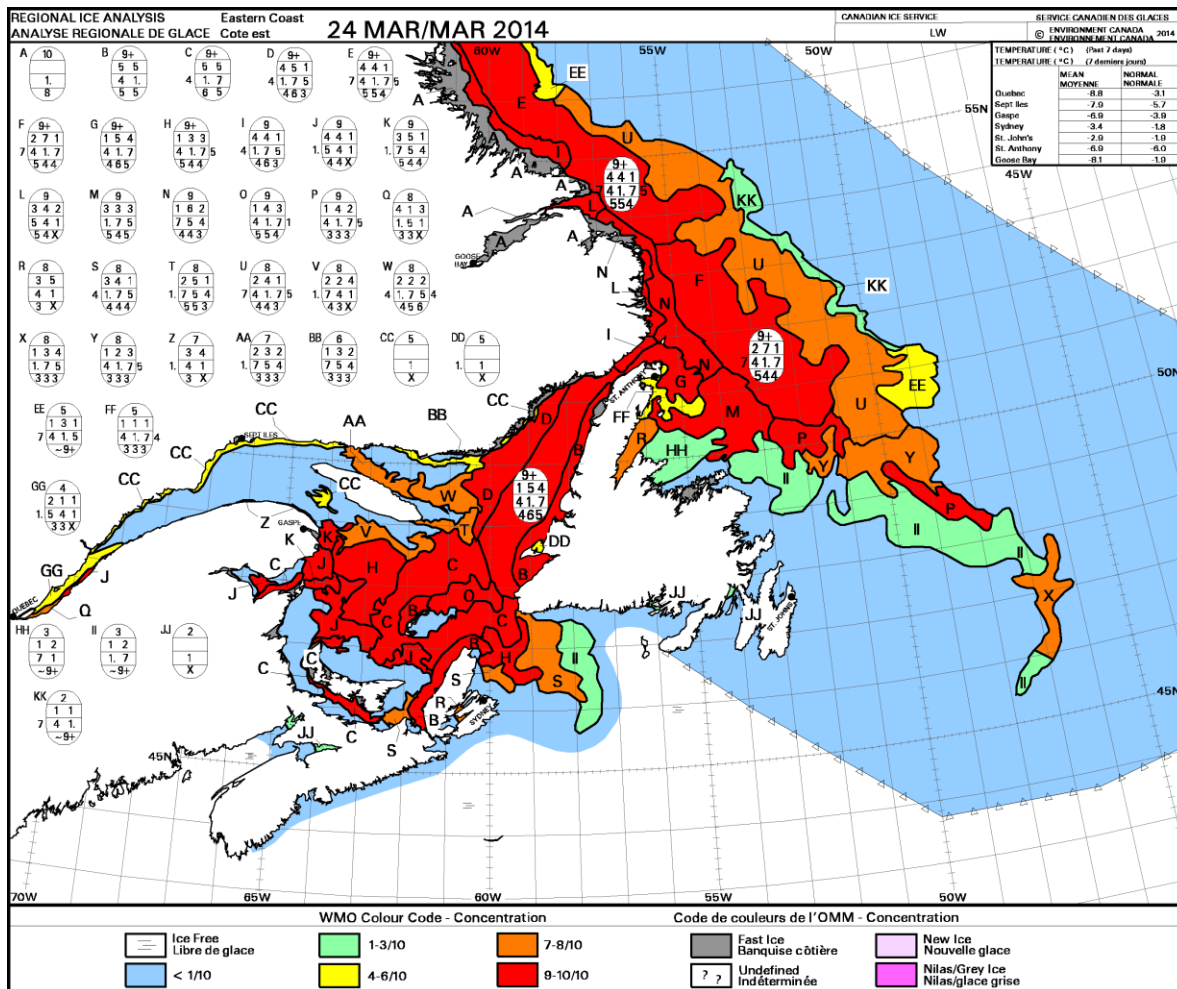


Figure 18. Carte de la concentration de glace coïncidant avec l'évènement E26 (B35) (Service canadien des glaces, 2019).

L'influence démontrée de la glace de mer dans l'atténuation des ondes de tempête dans la région pourrait constituer une préoccupation pour la gestion des risques d'inondation et d'érosion sur les côtes et la résilience des infrastructures côtières, car les projections indiquent que la couverture de glace et la durée de la saison des glaces dans le golfe du Saint-Laurent diminueront au cours du 21<sup>e</sup> siècle sous l'effet des changements climatiques (Greenan et coll., 2018).

Par conséquent, même si la fréquence et l'intensité des tempêtes devaient rester stationnaires à l'avenir, il est possible que les tempêtes hivernales futures produisent des ondes de tempête maximales plus hautes lorsque la couverture de glace est moindre (ou inexistante) pour les atténuer et lorsque les faibles concentrations de glace peuvent exacerber les ondes maximales.

## 7 Élaboration du modèle à l'échelle communautaire

Un modèle à l'échelle communautaire a été mis au point pour permettre une simulation détaillée des aléas d'inondation due à une onde de tempête et des inondations dans les sept collectivités concernées.

### 7.1 Configuration du modèle

#### 7.1.1 Maillage du modèle

Comme pour le modèle régional, les calculs du modèle hydrodynamique (aléa d'inondation) à l'échelle communautaire ont été effectués sur un maillage triangulaire non structuré. Le domaine du modèle (figure 19) englobe la région de la Péninsule acadienne, qui va de la côte nord de la paroisse de New Bandon vers l'est jusqu'à l'île Miscou et vers le sud jusqu'à Tracadie-Sheila. Il s'étend sur environ 20 à 30 km de la côte nord de la Péninsule acadienne à la baie des Chaleurs, et sur environ 30 km de la côte sud-est de la Péninsule acadienne au golfe du Saint-Laurent.

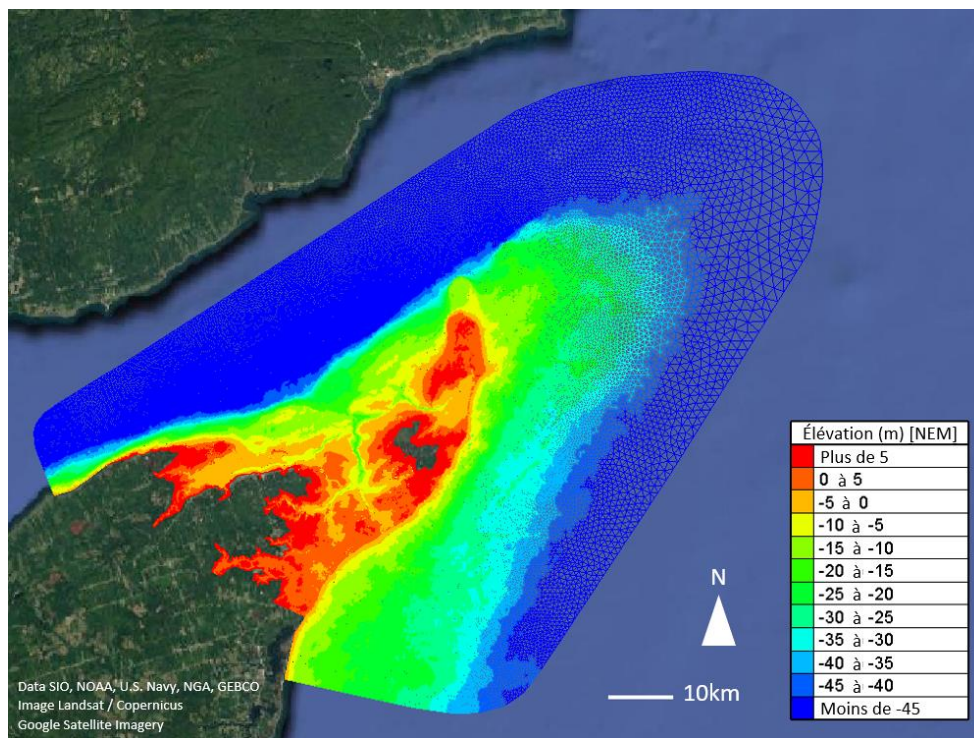


Figure 19. Maillage du modèle à l'échelle communautaire et données sur l'élévation de l'année 2018 référencées au niveau moyen d'eau.

Comme pour le modèle régional, le maillage du modèle à l'échelle communautaire a été généré à l'aide du logiciel Blue Kenue (Barton, 2019; Centre d'hydraulique canadien, 2011). La résolution du maillage à la limite du large a été conçue pour ressembler étroitement à celle du maillage du modèle régional afin de réduire l'erreur d'interpolation lors de l'application des résultats de la simulation du modèle régional comme données d'entrée des conditions aux limites au modèle à l'échelle communautaire. La résolution spatiale de la limite du large allait d'environ 250 m (côté de l'élément triangulaire caractéristique) dans la baie des Chaleurs à 2 000 m dans le golfe du Saint-Laurent. Pour résoudre les voies d'inondation des terres et les caractéristiques de la plaine d'inondation, on a adopté des longueurs de maille de 10 m à proximité des sept collectivités d'intérêt, comme on le voit sur la figure 20. Les zones terrestres dont l'élévation est supérieure à 10 m (référéncée au CGVD2013) ont été exclues du maillage pour réduire l'effort de calcul, car il n'était pas réaliste de s'attendre à ce qu'elles soient envahies par des inondations côtières, même dans des scénarios extrêmes d'élévation future du niveau de la mer. À titre de référence, Daigle (2017) suggère que même les inondations côtières les plus extrêmes, avec des projections d'élévation du niveau de la mer jusqu'en 2100, ne produiront probablement pas des niveaux d'eau dépassant 4,0 m en CGVD2013 dans la Péninsule acadienne.

Comme mentionné dans la section 4.2, un modèle numérique d'élévation hydrologiquement conforme, comprenant une modification spéciale des données sur l'élévation à proximité des ponceaux et des caractéristiques de drainage, a été fourni. Afin de s'assurer que les caractéristiques de drainage les plus fines sont reflétées dans le maillage du modèle, on a précisé une résolution de 5 m à proximité des ponceaux et des caractéristiques de drainage et le maillage a été « apposé » sur ces caractéristiques. On le voit sur la figure 21, qui montre une partie du maillage du modèle à l'échelle communautaire près de la rue Principale dans le village de Le Goulet. Au total, le maillage du modèle à l'échelle communautaire comprenait environ 940 000 nœuds de calcul.



Figure 20. Zones modélisées avec une résolution spatiale haute (résolution de 10 m).

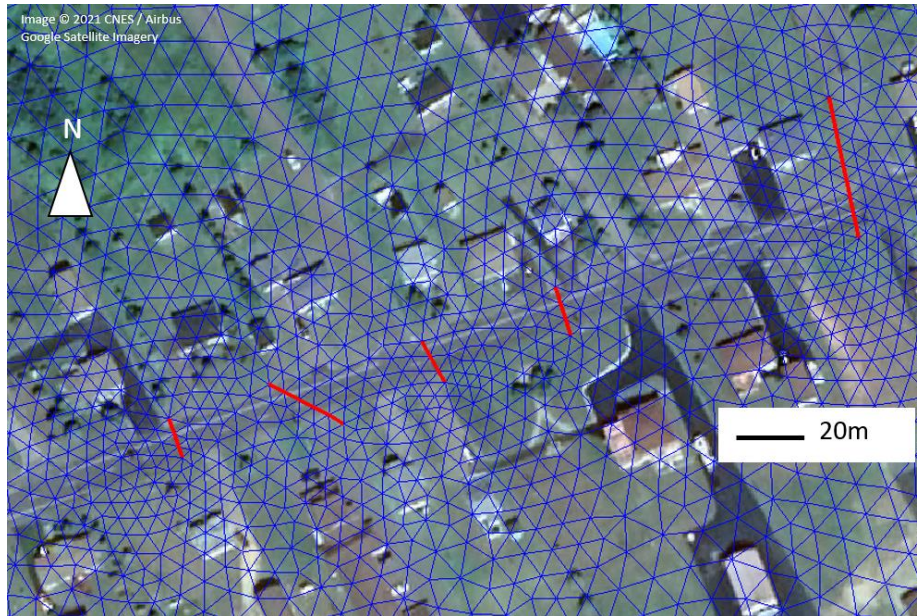


Figure 21. Maillage du modèle à l'échelle communautaire près de la rue Principale dans le village de Le Goulet. Les ponceaux sont indiqués en rouge.

### 7.1.2 Élévations du modèle

De manière générale, la topographie et la bathymétrie du modèle ont été fondées sur les ensembles de données suivants, décrits dans les sections 4.1 et 4.2 :

- Meilleure bathymétrie disponible acquise directement auprès du SHC (Service hydrographique du Canada, 2020) ou de l'ensemble de données SHC-NONNA (Service hydrographique du Canada, 2019).
- Le modèle numérique d'élévation hydrologiquement conforme, d'une résolution de 1 m, reflétant les élévations du sol de l'année 2018, lorsqu'elles sont disponibles (obtenu directement auprès du gouvernement du Nouveau-Brunswick).
- Le modèle numérique d'élévation (non hydrologiquement conforme), d'une résolution de 1 m, reflétant les élévations du sol de l'année 2018 (gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2019a).
- Les données ponctuelles LiDAR, à résolution submétrique, reflétant les élévations du sol de l'année 2018 (gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2019d).

Une exception a consisté à remplacer, dans les régions où le rivage est dynamique ou altéré, certaines données topographiques par des données historiques plus anciennes pour simuler des événements historiques dans le cadre du processus d'étalonnage et de validation du modèle décrit dans les sections 7.3 et 7.4.

Le modèle numérique d'élévation hydrologiquement conforme englobe une grande partie de la géographie côtière de la Péninsule acadienne, y compris les sept collectivités d'intérêt. On a utilisé le modèle numérique d'élévation non hydrologiquement conforme pour remplir les sections situées loin de la côte, à l'intérieur des terres, qui n'étaient pas couvertes par le modèle numérique d'élévation hydrologiquement conforme. Les données ponctuelles LiDAR ont servi à remplir les zones littorales qui n'ont pas été bien reflétées par les modèles numériques d'élévation disponibles ou la bathymétrie du SHC. La figure 22 et la figure 23 illustrent les données topographiques et bathymétriques utilisées dans le modèle à l'échelle

communautaire, respectivement. Pour le processus d'étalonnage et de validation (décrit en détail dans les sections 7.3 et 7.4), on a repris les données historiques sur l'élévation numérique reflétant les élévations du sol de 2009 à la place des données plus récentes reflétant les élévations du sol de 2018 dans les environs de Le Goulet.



Figure 22. Données topographiques utilisées dans le modèle à l'échelle communautaire.

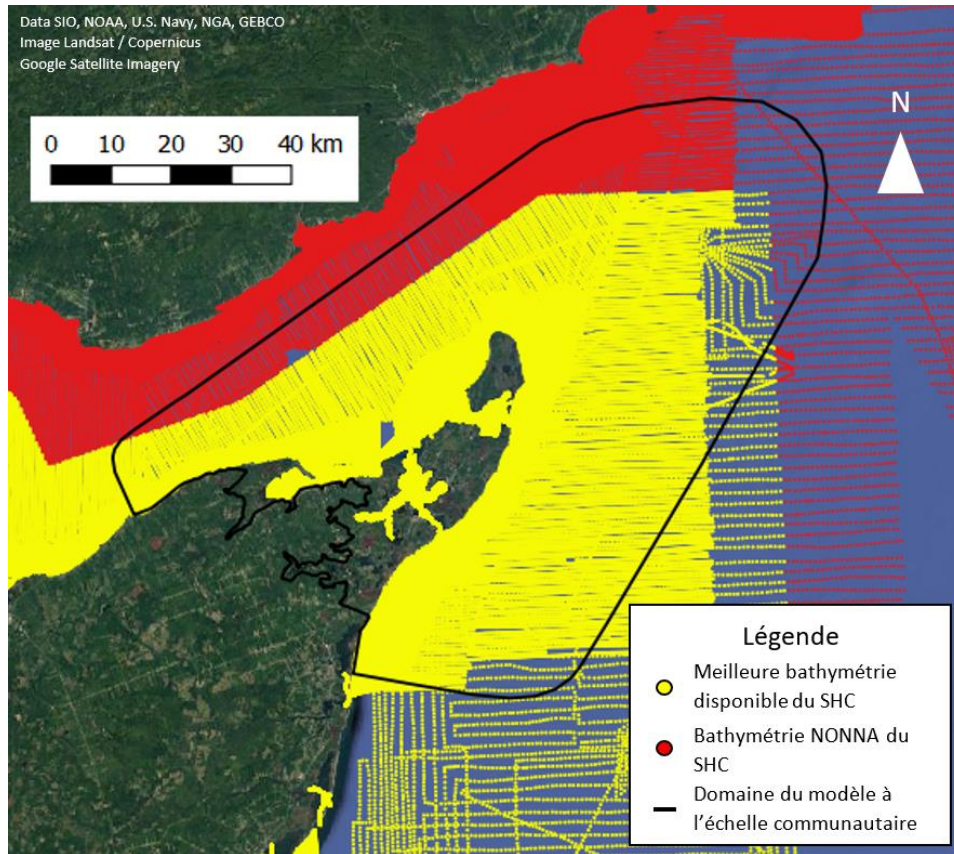


Figure 23. Données bathymétriques utilisées dans le modèle à l'échelle communautaire.

### 7.1.3 Empreintes des bâtiments

Comme il est décrit dans la section 4.7, les empreintes des bâtiments et des infrastructures ont été fournies par le gouvernement du Nouveau-Brunswick. Les bâtiments et d'autres structures peuvent avoir un impact sur l'hydrodynamique en exerçant une force de traînée sur les flux incidents. Il existe plusieurs méthodes pour intégrer les impacts des bâtiments et des structures dans les modèles hydrodynamiques numériques. Les méthodes les plus intensives et les plus exigeantes en calcul comportent souvent un ajustement du maillage de calcul à l'échelle du bâtiment, où chaque bâtiment ou structure est explicitement représenté soit comme un « trou » dans le maillage de calcul, soit comme un « bloc » surélevé (Schubert et Sanders, 2012). Pour que les méthodes à l'échelle du bâtiment soient réalisables, le maillage de calcul doit avoir une résolution suffisante pour refléter les différents bâtiments, ainsi que les espaces entre eux. Les méthodes simplifiées consistent souvent à mettre en œuvre des zones de rugosité ou de traînée supplémentaires dans le maillage du modèle pour simuler la présence d'un ensemble de bâtiments ou de structures (par exemple, un quartier résidentiel ou un ensemble de bâtiments industriels) (Schubert et Sanders, 2012).

Le modèle à l'échelle communautaire n'avait pas une résolution suffisante pour permettre la mise en œuvre des bâtiments et des infrastructures à l'échelle du bâtiment. On a plutôt appliqué une approche zonale semblable à la méthode de « porosité des bâtiments » décrite par Schubert et Sanders (2012) pour intégrer les bâtiments et les structures dans le modèle. À cette fin, on a eu recours à la fonctionnalité « structures verticales » de TELEMAC-2D qui permet aux utilisateurs de préciser des éléments de traînée à l'aide du sous-programme DRAGFO (Ata, 2018). L'utilisateur doit préciser la zone géographique contenant les éléments de traînée, le nombre d'éléments de traînée (par exemple, des bâtiments) contenus dans la zone,

la largeur frontale de chaque élément de traînée et un coefficient de traînée. On a supposé un coefficient de traînée de 2,0 pour tous les bâtiments et structures, représentatif d'une colonne carrée (White, 2003).

Tout d'abord, on a tracé à la main des polygones ou « zones » autour des ensembles de bâtiments, de types de bâtiments et de zones d'empreinte de bâtiments similaires (par exemple, un quartier résidentiel composé de maisons et de hangars ou un ensemble de bâtiments industriels). On a compté le nombre de bâtiments dans chaque zone pour déterminer le nombre d'éléments de traînée contenus dans la zone. La largeur frontale moyenne de chaque zone (représentative des bâtiments ou structures contenus dans la zone) a été calculée comme suit :

- Calcul de la superficie de chaque empreinte de bâtiment dans une zone donnée.
- Calcul d'une largeur frontale représentative pour chaque empreinte de bâtiment en prenant la racine carrée de la superficie (c.-à-d. en supposant que chaque bâtiment et structure est un carré parfait).
- Calcul d'une largeur frontale représentative pour chaque zone en calculant la largeur frontale moyenne des bâtiments et structures contenus dans la zone.

Les bâtiments et infrastructures situés en dehors des collectivités d'intérêt n'ont pas été intégrés au modèle. De même, les bâtiments et structures dont l'élévation du sol était supérieure à environ 4,0 m en CGVD2013 (comparable à l'élévation maximale extrême de la crue estimée par Daigle [2017]) n'ont pas été intégrés au modèle. Un exemple des zones de traînée précisées dans les collectivités de Shippagan et de Pointe-Brûlée est donné sur la figure 24.

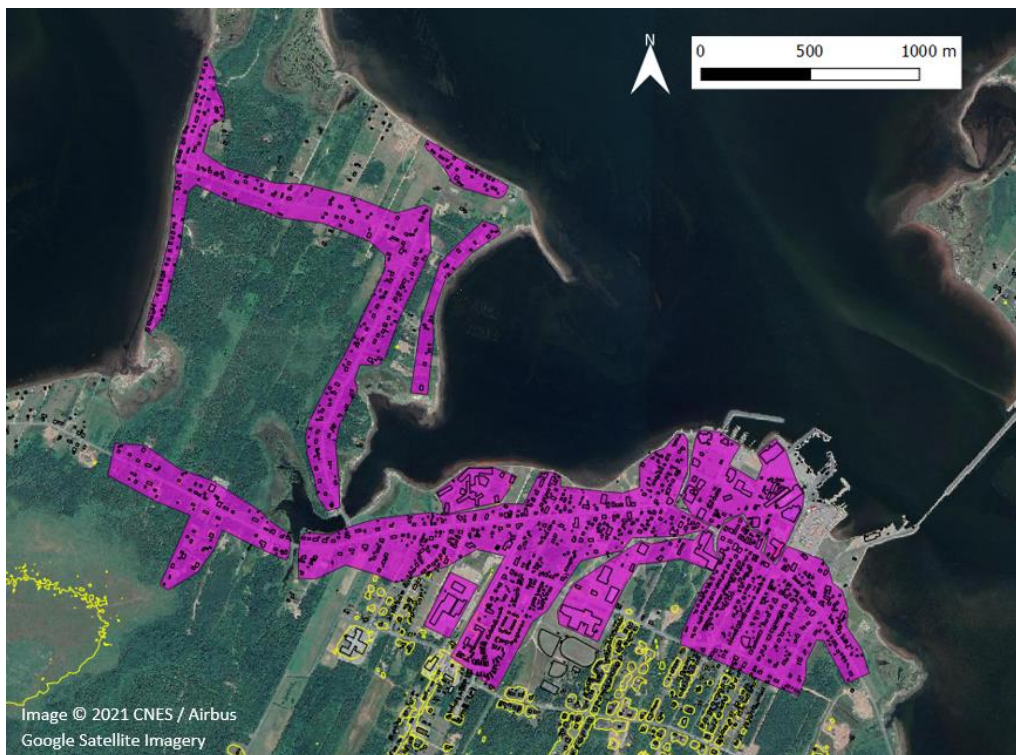


Figure 24. Exemple de zones de traînée des bâtiments appliquées dans les collectivités de Shippagan et de Pointe-Brûlée. Les empreintes des bâtiments et des infrastructures sont indiquées en noir, les polygones violets représentent les zones de traînée et la ligne jaune est le contour d'élévation coïncidant à 4 m en CGVD2013.

### 7.1.4 Considérations spéciales pour les évènements d'onde de tempête du 6 décembre 2010 et du 21 décembre 2010

En 2013, le village de Le Goulet a entrepris une initiative de restauration du système de dunes côtières dans le but de limiter l'érosion et d'atténuer les inondations côtières causées par les ondes de tempête (Hébert et Aubé, 2015). Le projet consistait à installer des structures de rétention du sable et à reconstruire artificiellement le système dunaire. De ce fait, le littoral de Le Goulet a subi d'importantes modifications depuis les deux tempêtes utilisées pour l'étalonnage, survenues en décembre 2010. Pour faciliter une comparaison réaliste entre les résultats modélisés et les données d'étalonnage (voir les sections 4.9 et 4.10), on a utilisé des données numériques sur l'élévation représentatives de l'année 2009 à la place des données de 2018 dans les environs de Le Goulet pendant l'étalonnage et la validation du modèle. Les données sur l'élévation de 2018 ont été appliquées ailleurs, car les données modernes sur l'élévation ne semblaient pas différer grandement des données historiques; les données de 2018 offrent également l'avantage supplémentaire d'un drainage hydrologiquement conforme, plus réaliste.

## 7.2 Conditions aux limites du modèle

Des niveaux d'eau variables dans l'espace et dans le temps ont été prescrits à la limite du large du modèle communautaire des aléas d'inondation côtière, d'après les résultats du modèle régional. Les niveaux d'eau horaires modélisés tirés du modèle régional ont été cartographiés sur la limite du large du modèle à l'échelle communautaire afin d'alimenter les simulations à cette échelle. Ainsi, l'élévation du niveau d'eau le long de la limite du modèle à l'échelle communautaire fluctue dans l'espace et dans le temps, selon les résultats du modèle régional à proximité de la limite du modèle à l'échelle communautaire. On a utilisé la pondération de la distance inverse pour interpoler les valeurs horaires sur les nœuds de la limite du modèle à l'échelle communautaire en fonction des valeurs acquises à partir des trois nœuds du modèle régional les plus proches; le processus est illustré sur la figure 25. Comme pour le modèle régional, les simulations à l'échelle communautaire ont également été forcées par les données ERA5 sur le vent et la pression atmosphérique décrites dans la section 4.3.3.

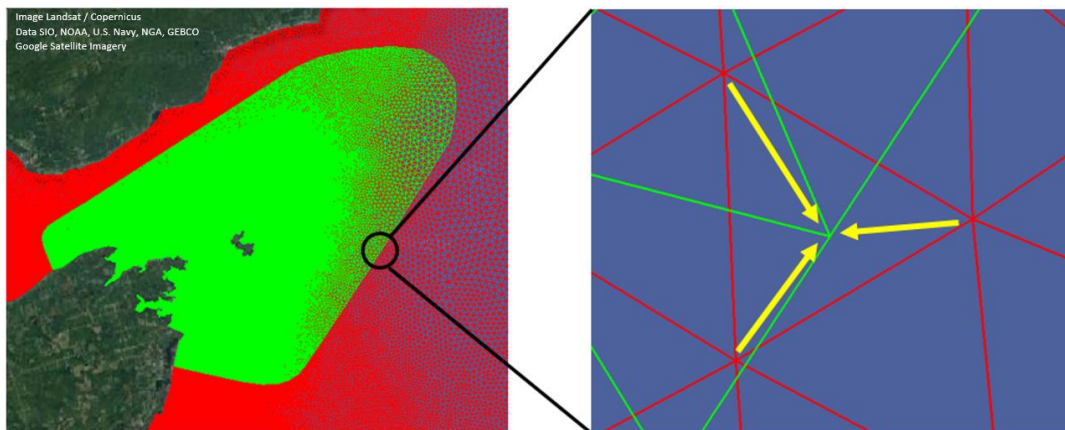


Figure 25. Définition des conditions aux limites du modèle à l'échelle communautaire. Les résultats horaires du niveau d'eau tirés du maillage du modèle régional (en rouge) sont cartographiés sur les nœuds de la limite du maillage du modèle à l'échelle communautaire (en vert) à l'aide de l'interpolation de la pondération de la distance inverse.

Les événements historiques qui ont été simulés pour soutenir l'étalonnage du modèle (voir la section 7.3) comprenaient à la fois des marées et des ondes de tempête afin de renforcer le réalisme des résultats modélisés et de faciliter la comparaison avec les observations des niveaux d'eau élevés. Pour ces événements historiques, on a intégré les fluctuations de la marée dans la modélisation à l'échelle régionale par l'entremise de la base de données TPXO et cartographié les résultats du modèle régional sur la limite du large du modèle à l'échelle communautaire.

## 7.3 Étalonnage du modèle

Les sections qui suivent (sections 7.3 et 7.3.1 à 7.3.3) décrivent en détail le travail d'étalonnage, qui est largement adapté de Ferguson et coll. (2022). Le rendement du modèle a été étalonné à l'aide des indicateurs des niveaux d'eau élevés qui ont été relevés après deux ondes de tempête majeures survenues le 6 décembre 2010 et le 21 décembre 2010 (événements E48 [B9] et E15 [B37], respectivement). Les données des relevés ont été fournies au Centre de recherche en génie océanique, côtier et fluvial du CNRC par les responsables des relevés, Dominique Bérubé et Marc Desrosiers, qui travaillent pour le gouvernement du Nouveau-Brunswick (voir la section 4.9). Les élévations relevées ont été converties en CGVD2013 à l'aide de l'outil GPS-H (gouvernement du Canada, 2021) pour faciliter la comparaison avec le modèle; les simulations du modèle ont été effectuées en utilisant les élévations référencées au niveau moyen d'eau, mais les résultats pouvaient être facilement transformés en CGVD2013. Il est intéressant de noter que d'autres chercheurs ont utilisé des observations de débris pour étayer des analyses liées aux inondations côtières (Harper et coll., 1988; Jardine et coll., 2021; Kim et coll., 2021; MacLeod et Dallimore, 2021; Melton et coll., 2010). Notamment, Didier et coll. (2015) ont utilisé des relevés de débris coïncidant avec l'évènement du 6 décembre 2010 (le même évènement que celui étudié ici) comme paramètre pour évaluer la compétence du modèle dans des emplacements situés immédiatement au nord de la Péninsule acadienne sur la côte nord de la baie des Chaleurs.

### 7.3.1 Approche d'étalonnage

Comme pour le modèle régional, on a étalonné le modèle à l'échelle communautaire en ajustant la rugosité du modèle et la formulation/les coefficients de traînée du vent jusqu'à ce que des résultats satisfaisants soient obtenus en ce qui concerne l'élévation de la surface de l'eau et l'étendue des eaux de crue. Les estimations initiales de la rugosité du sol reposaient sur les données de couverture terrestre acquises auprès de GeoNB (section 4.6) et sur les valeurs de la rugosité typiques citées dans la documentation (Chin, 2013; Houghtalen et coll., 2010). Comme dans le modèle régional, on a précisé une rugosité uniforme de  $S=40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  pour les zones du large. Le tableau 3 dresse la liste des estimations initiales de la rugosité du sol. L'estimation initiale de la formulation/des coefficients de traînée du vent était fondée sur la formulation/les coefficients optimaux de traînée du vent déterminés pour le modèle régional (section 6.3).

Tableau 3. Estimations initiales de la rugosité du sol.

Couverture terrestre	Coefficient de Manning ( $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ )	Coefficient de Strickler ( $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ )
Zone humide	0,07	14
Forêt	0,1	10
Terre non boisée – Pas de végétation	0,015	67
Terre non boisée – Graminées, cultures ou autres	0,033	30
Terre non boisée – Arbustes	0,05	20
Terre non boisée – Arbres	0,1	10

### 7.3.2 Inondations de décembre 2010

Il n'était pas certain que les relevés du 23 et du 28 juin 2011 représentaient les niveaux d'eau élevés produits par les événements du 6 décembre ou du 21 décembre 2010. Un exercice de modélisation simple a été exécuté pour étudier le lien entre les données des relevés et les deux événements de tempête.

Les deux tempêtes ont été simulées en utilisant la configuration du modèle et les estimations initiales présentées dans la section 7.3.1. D'après la comparaison des étendues des inondations modélisées à partir des deux simulations, l'évènement du 21 décembre 2010 a produit une inondation plus étendue à proximité des données des relevés à Pointe-Brûlée que l'évènement du 6 décembre 2010 (figure 26). De plus, l'évènement du 21 décembre 2010 a systématiquement produit des inondations plus importantes que celui du 6 décembre 2010 à Pointe-Brûlée pour toutes les configurations de modèle similaires décrites à la section 7.3.3. Les étendues des inondations modélisées pour les deux tempêtes à proximité des données des relevés à Bas-Caraquet étaient presque identiques (figure 26), probablement en raison de la ligne de rivage/falaise abrupte à cet endroit. Cependant, de manière générale, l'évènement modélisé du 21 décembre 2010 a produit des inondations légèrement plus importantes à Bas-Caraquet que celui du 6 décembre 2010. On peut en déduire que les données des relevés du 23 et du 28 juin 2011 représentent en fait les niveaux d'eau élevés associés à l'évènement du 21 décembre 2010, en particulier à Pointe-Brûlée.

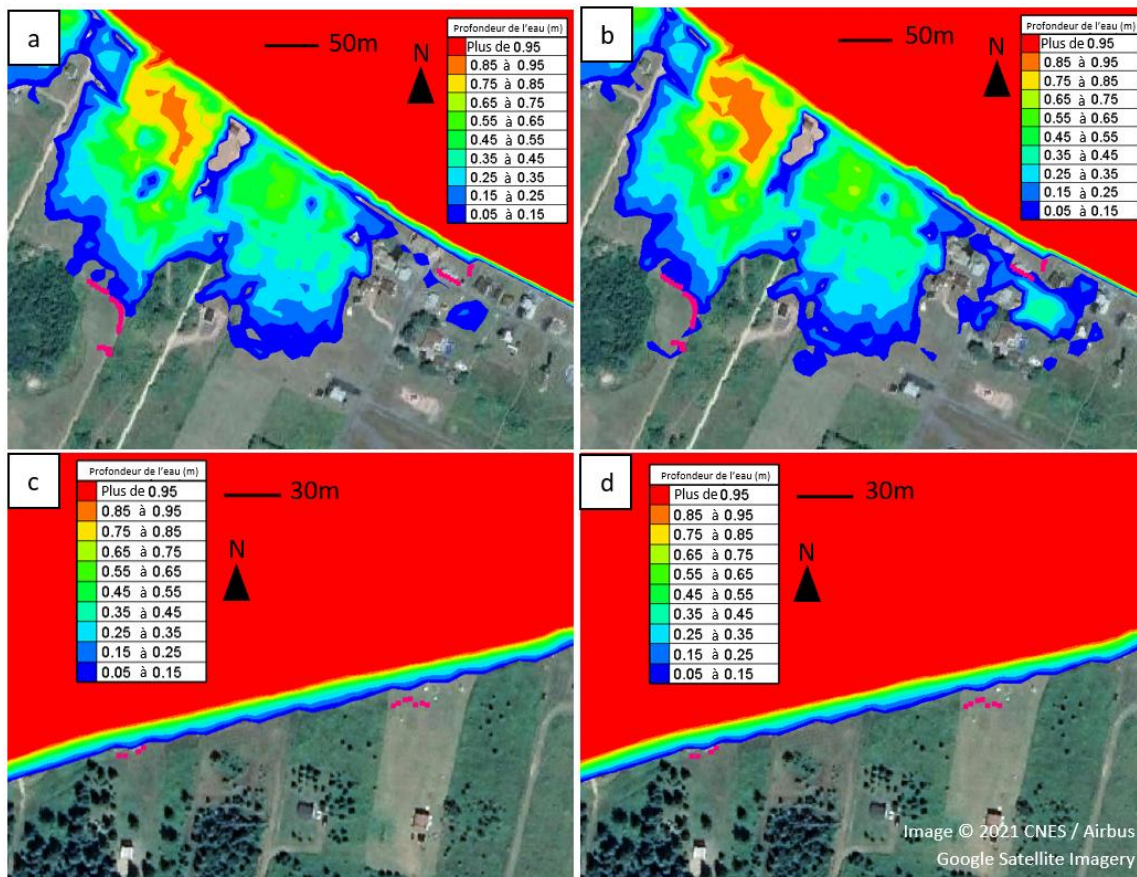


Figure 26. Étendue de l'inondation modélisée selon la configuration initiale du modèle pour l'évènement du 6 décembre 2010 (a et c) et l'évènement du 21 décembre 2010 (b et d), à Pointe-Brûlée (a et b) et à Bas-Caraquet (c et d). Les points des relevés sont indiqués en rose.

### 7.3.3 Comparaison avec les indicateurs des niveaux d'eau élevés relevés

Les données des relevés ont été recueillies à 13 emplacements dans la Péninsule acadienne (figure 27). Avant l'exercice d'étalonnage, on a comparé les élévations relevées à l'élévation du sol dans le modèle aux emplacements des points. Le tableau 4 récapitule les données des relevés et offre une comparaison avec les élévations du sol dans le modèle. Comme on le voit dans le tableau 4, les élévations du sol dans le modèle concordent assez bien avec les élévations relevées; tous les emplacements sauf deux (PB3 et BPP) présentent des écarts inférieurs à  $\pm 15$  cm.

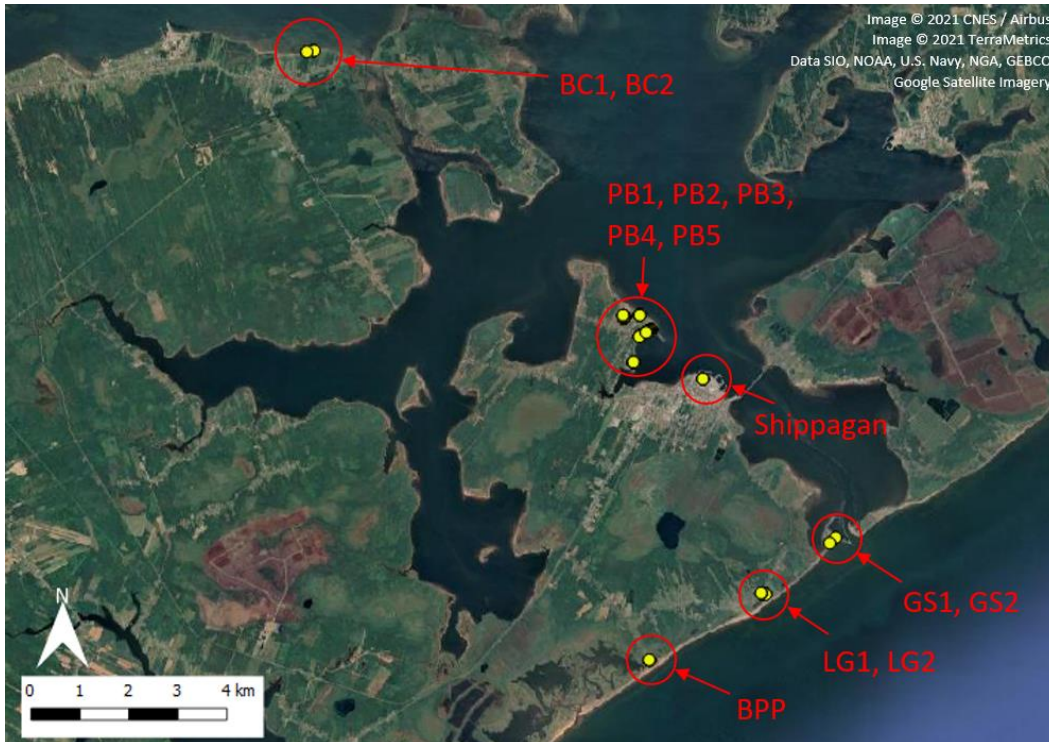


Figure 27. Emplacements des relevés. Adapté de Ferguson et coll. (2022).

Tableau 4. Sommaire des points des relevés

Emplacement	Évènement pertinent	Nombre de points du relevé	Élévation moyenne d'après le relevé (m en CGVD2013)	Élévation moyenne d'après le modèle (m en CGVD2013)	Écart (m) [Modèle – Relevé]
BPP	6 décembre 2010	9	1,17	0,64	-0,53
LG1	6 décembre 2010	6	1,14	1,17	0,03
LG2	6 décembre 2010	24	1,30	1,19	-0,11
GS1	6 décembre 2010	2	0,79	0,92	0,14
GS2	6 décembre 2010	3	1,03	0,97	-0,06
Shippagan	6 décembre 2010	7	1,09	1,18	0,09
PB1	21 décembre 2010	45	1,37	1,32	-0,06
PB2	21 décembre 2010	11	1,41	1,36	-0,06
PB3	21 décembre 2010	76	1,18	1,54	0,36
PB4	21 décembre 2010	35	1,17	1,26	0,09
PB5	21 décembre 2010	16	1,35	1,28	-0,07
BC1	21 décembre 2010	4	2,23	2,155	-0,08
BC2	21 décembre 2010	7	2,12	1,98	-0,14

\* LG = Le Goulet, GS = goulet de Shippagan, PB = Pointe-Brûlée, BC = Bas-Caraquet, BPP = Baie-de-Petit-Pokemouche.

On a évalué la compétence du modèle en comparant l'élévation modélisée des eaux de crue et l'étendue des eaux de crue pour les évènements du 6 décembre et du 21 décembre 2010 aux élévations et aux étendues relevées. Pour étayer cette analyse, il a fallu poser une hypothèse sur la hauteur de crue nécessaire pour mobiliser et déposer les débris océaniques et la zostère marine relevés. En outre, compte tenu de la résolution spatiale du modèle, ainsi que de l'erreur et de l'incertitude des élévations du sol dans le modèle et des processus de calcul, il n'est pas pratique de déterminer de manière réaliste les zones où la hauteur de crue est très faible à partir des résultats du modèle. On a supposé qu'une hauteur de crue de 5 cm était nécessaire pour mobiliser et déposer les débris et la zostère marine, et qu'elle représente également un seuil inférieur approprié à partir duquel on peut extraire les paramètres d'aléa d'inondation tels que la hauteur de crue et l'étendue de l'inondation. Ainsi, afin de vérifier la compétence du modèle, on a comparé les élévations relevées à l'élévation du sol coïncidant avec le contour de la hauteur de crue modélisée de 5 cm pour chaque essai d'étalonnage.

Pour chaque essai d'étalonnage, on a extrait le contour de la hauteur de crue de 5 cm des résultats du modèle à proximité de chacun des groupes de points des relevés (voir le tableau 4). On a ensuite déterminé l'élévation du sol coïncidant avec chaque contour de hauteur de crue de 5 cm. On a comparé l'élévation moyenne du sol le long de chaque contour à l'élévation moyenne des données des relevés pour chaque groupe de points des relevés. On a également calculé, pour chaque groupe de points des relevés, la distance horizontale moyenne entre les points des relevés et le contour extrait, ainsi que l'écart-type des distances calculées. Les valeurs de la distance horizontale moyenne indiquent la proximité de l'étendue de l'inondation modélisée par rapport aux indicateurs des niveaux d'eau élevés relevés, tandis que les valeurs de l'écart-type indiquent dans quelle mesure la forme plane de l'étendue de l'inondation modélisée correspond à la forme des indicateurs des niveaux d'eau élevés relevés. Ce processus est illustré sur la figure 28.



Figure 28. Comparaison des résultats modélisés aux données des points des relevés pour l'emplacement PB1. Le contour de la hauteur d'eau modélisée de 5 cm est indiqué en bleu. Une section du contour de la hauteur d'eau de 5 cm a été isolée (représentée en jaune). Les élévations du sol coïncidant avec le contour ont été comparées aux élévations des données des points des relevés (points roses). Les distances horizontales entre le contour de la crue modélisée et les points des relevés ont également été calculées.

On a ajusté la traînée du vent et la rugosité du sol, et comparé les résultats du modèle aux indicateurs des niveaux d'eau élevés relevés. Enfin, on a appliqué une formulation de la traînée du vent de Flather avec un coefficient de traînée du vent ( $a_{vent}$ ) variant entre  $0,565 \times 10^{-3}$  et  $2,513 \times 10^{-3}$  (Ata, 2018). Les estimations initiales de la rugosité du sol fondées sur les polygones de couverture terrestre et les valeurs tirées de la documentation (tableau 3) ont été maintenues. On a cependant observé que les polygones de la couverture terrestre ne reflétaient pas de manière adéquate la forme et l'étendue de la plage de Le Goulet. Par conséquent, on a précisé manuellement une rugosité de  $S=30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  pour la plage de Le Goulet, qui a amélioré les modélisations des élévations de la surface de l'eau et de l'étendue de l'inondation à proximité de Baie-de-Petit-Pokemouche. Les résultats finaux de l'étalonnage du modèle sont présentés dans le tableau 5 et le tableau 6.

Tableau 5. Comparaison des élévations de crue modélisées et des données des relevés.

Emplacement	Évènement pertinent	Élévation de crue modélisée (m en CGVD2013)	Élévation moyenne d'après le relevé (m en CGVD2013)	Erreur (m) [Modèle – Relevé]
BPP	6 décembre 2010	1,188	1,174	0,01
LG1	6 décembre 2010	1,513	1,136	0,38
LG2	6 décembre 2010	1,668	1,304	0,36
GS1	6 décembre 2010	1,462	0,788	0,67
GS2	6 décembre 2010	1,516	1,030	0,49
Shippagan	6 décembre 2010	1,488	1,092	0,40
PB1	21 décembre 2010	1,319	1,374	-0,06
PB2	21 décembre 2010	1,351	1,414	-0,06
PB3	21 décembre 2010	1,511	1,183	0,33
PB4	21 décembre 2010	1,456	1,167	0,29
PB5	21 décembre 2010	1,456	1,351	0,10
BC1	21 décembre 2010	1,991	2,232	-0,24
BC2	21 décembre 2010	1,839	2,123	-0,28

\* LG = Le Goulet, GS = goulet de Shippagan, PB = Pointe-Brûlée, BC = Bas-Caraquet, BPP = Baie-de-Petit-Pokemouche; \*\* Tableau adapté de Ferguson et coll. (2022).

Tableau 6. Comparaison des étendues des inondations modélisées et des données des relevés.

Emplacement	Évènement pertinent	Distance moyenne entre l'étendue de l'inondation modélisée et relevée (m)	Écart-type des distances entre les étendues des inondations modélisées et relevées (m)
BPP	6 décembre 2010	5,54	0,68
LG1	6 décembre 2010	11,33	2,30
LG2	6 décembre 2010	15,43	7,11
GS1	6 décembre 2010	6,00	1,60
GS2	6 décembre 2010	4,97	1,66
Shippagan	6 décembre 2010	6,94	1,11
PB1	21 décembre 2010	2,20	2,87
PB2	21 décembre 2010	2,85	2,58
PB3	21 décembre 2010	4,79	3,31
PB4	21 décembre 2010	5,45	2,08
PB5	21 décembre 2010	5,33	3,11
BC1	21 décembre 2010	2,73	1,19
BC2	21 décembre 2010	7,64	2,17

\* LG = Le Goulet, GS = goulet de Shippagan, PB = Pointe-Brûlée, BC = Bas-Caraquet, BPP = Baie-de-Petit-Pokemouche; \*\* Tableau adapté de Ferguson et coll. (2022).

L'erreur verticale absolue moyenne (élévation) était égale à 0,28 m et *EQM* à 0,34 m. On a observé des écarts inférieurs à 30 cm pour 7 des 13 sites, et des écarts de 10 cm ou moins pour 4 des 13 sites. Les écarts les plus importants concernaient les emplacements du goulet de Shippagan (GS). Cependant, on peut sans doute s'attendre à ce que les débits rapides et dynamiques dans le goulet, de même que la présence de structures à résolution fine, présentent des défis pour obtenir des résultats modélisés exacts. Il convient également de noter que, bien que le goulet de Shippagan ait été modélisé à haute résolution (10 m), il ne fait pas partie des zones d'intérêt de l'étude.

L'erreur horizontale moyenne (étendue de l'inondation) était égale à 6,25 m, *EQM* à 7,16 m et l'écart-type moyen était de 2,44 m. À l'exception des emplacements LG1 et LG2, le modèle a été en mesure de reproduire les étendues des inondations modélisées avec une précision inférieure à la résolution du maillage (c'est-à-dire un écart de moins de 10 m). À 9 des 13 emplacements, l'écart observé ne dépassait pas 6 m.

De manière générale, la compétence prédictive du modèle était meilleure lorsqu'on le comparait aux points des relevés coïncidant avec l'évènement du 21 décembre 2010, tant en ce qui concerne l'élévation du niveau d'eau que l'étendue de l'inondation. La meilleure compétence prédictive a été observée dans les collectivités de Pointe-Brûlée et de Bas-Caraquet. Les erreurs horizontale et verticale peuvent s'expliquer, en partie, par la contribution des vagues aux laisses de crue observées, qui n'ont pas été incluses dans la modélisation à l'échelle communautaire; l'erreur horizontale la plus importante a été constatée à Le Goulet, qui est exposé aux vagues se propageant à partir de longs fetchs du nord-est dans le golfe du Saint-Laurent. Dans l'ensemble, en tenant compte de la résolution du modèle et à la lumière des incertitudes concernant la profondeur de l'eau et le dépôt de débris, les écarts observés ont été jugés acceptables. Des images montrant l'étendue de l'inondation modélisée aux points des relevés sont présentées dans l'annexe A.

## 7.4 Validation des modèles

La section qui suit (section 7.4) décrit en détail le travail d'étalonnage, qui est largement adapté de Ferguson et coll. (2022). On a validé le modèle en comparant qualitativement les étendues des inondations simulées aux preuves photographiques et vidéo des inondations reflétées pendant et après les évènements du 6 décembre et du 21 décembre 2010. Ces informations ont été particulièrement utiles pour évaluer la compétence du modèle dans les zones où les données des relevés n'ont pas été recueillies. On a délimité plusieurs zones de la Péninsule acadienne, appelées zones d'évaluation qualitative (ou en anglais, *Qualitative Assessment Areas – QAA*), où des preuves photographiques ou vidéo pourraient être utilisées pour améliorer l'évaluation de la compétence du modèle. Cinq zones d'évaluation qualitative ont été déterminées pour l'évènement du 6 décembre 2010 à partir des preuves photographiques fournies par Dominique Bérubé (gouvernement du Nouveau-Brunswick), Marc Desrosiers (gouvernement du Nouveau-Brunswick) et André Robichaud (Université de Moncton). Huit ont été définies pour l'évènement du 21 décembre 2010 d'après, encore une fois, les preuves photographiques fournies par Dominique Bérubé, Marc Desrosiers et André Robichaud, ainsi que d'après les preuves vidéo téléchargées sur YouTube (Doucet, 2010). Les zones d'évaluation qualitative sont illustrées sur la figure 29 et des images comparant les évènements d'inondation modélisés aux observations des inondations sont fournies dans les annexes B et C.

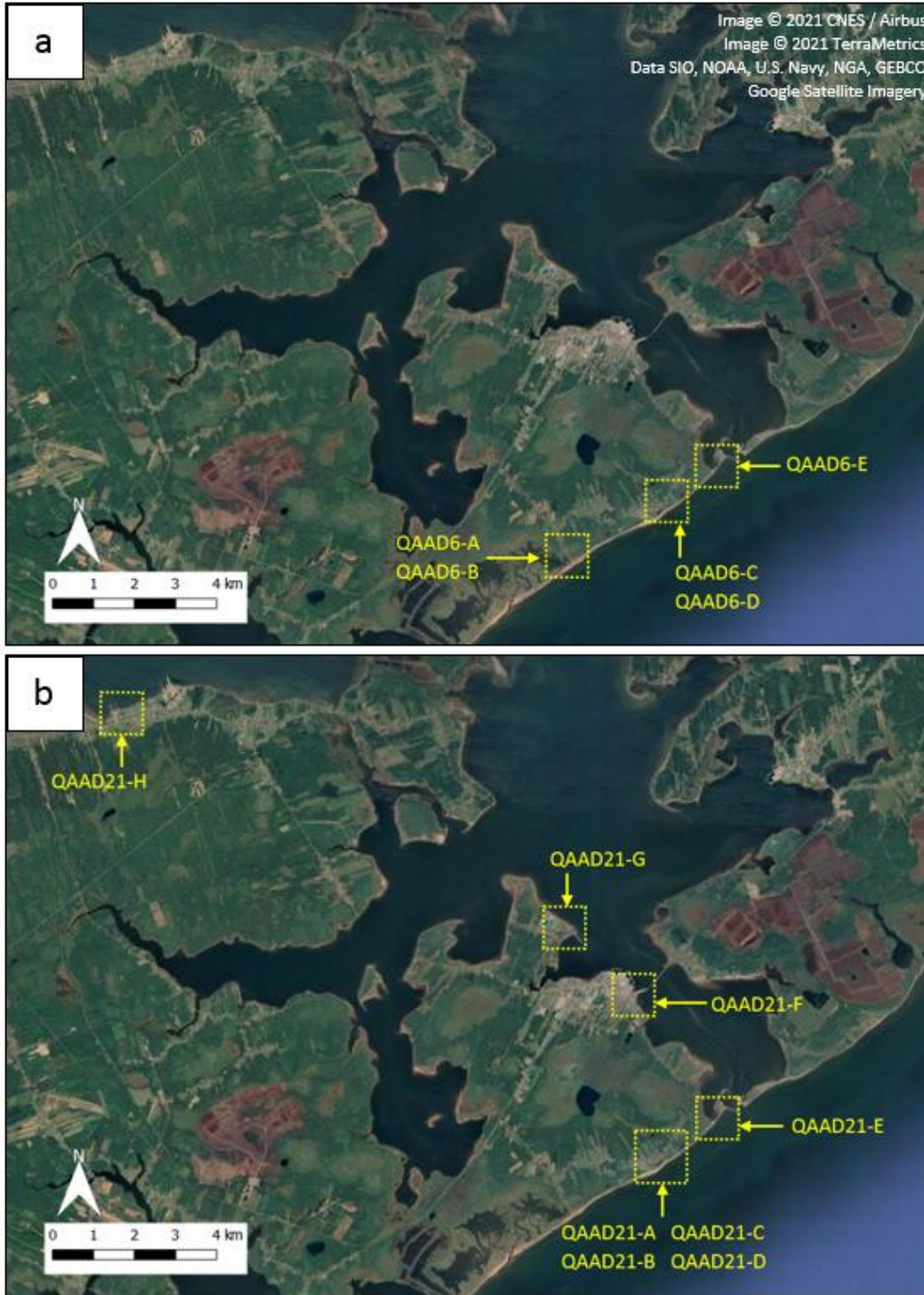


Figure 29. Emplacements approximatifs des zones d'évaluation qualitative pour (a) l'évènement du 6 décembre 2010 et (b) l'évènement du 21 décembre 2010. Adapté de Ferguson et coll. (2022).

De manière générale, les étendues des inondations modélisées correspondent bien aux preuves photographiques et vidéo, à la fois pour le degré de propagation à l'intérieur des terres et pour le « modèle » ou la « forme » du contour de l'inondation maximale. Cependant, selon les preuves disponibles, le modèle a sous-estimé l'étendue de l'inondation dans la partie nord-est de Le Goulet pour l'évènement du 21 décembre 2010; si l'on se reporte aux emplacements QAAD21-C et QAAD21-D de l'annexe C, il est évident que le modèle n'a pas prédit l'inondation dans certaines zones qui étaient, en fait, exposées à l'inondation.

## 7.5 Limites

Bien que les collectivités de Maisonnette, Caraquet et Lamèque soient modélisées à haute résolution dans le modèle à l'échelle communautaire, il est important de noter qu'aucune donnée n'était disponible pour évaluer la compétence du modèle dans ces collectivités. La compétence du modèle est plutôt déduite des processus d'étalonnage et de validation décrits dans les sections 7.2 et 7.3, axés sur Bas-Caraquet, Pointe-Brûlée, Shippagan, le goulet de Shippagan, Le Goulet et Baie-de-Petit-Pokemouche. Il convient donc de faire preuve de prudence pour interpréter les résultats modélisés à Maisonnette, à Caraquet et à Lamèque. Les personnes qui interprètent les résultats du modèle doivent également être conscientes des niveaux d'incertitude associés aux prédictions du niveau d'inondation et de l'étendue de l'inondation résumées dans le tableau 5 et le tableau 6, ainsi que de la résolution du maillage de calcul (résolution de 10 m).

La couverture des données bathymétriques était assez limitée dans les baies intérieures peu profondes de la Péninsule acadienne (figure 30), et il a souvent été nécessaire d'interpoler sur de grandes sections de la côte. En particulier, les données bathymétriques étaient plutôt rares dans les environs de Lamèque, y compris dans les deux baies situées au nord et au sud du village, coupées en deux par la rue du Ruisseau et la rue Principale, respectivement. De même, les données bathymétriques étaient assez rares dans les baies situées immédiatement à l'ouest et à l'est de Pointe-Brûlée. Il a été possible d'évaluer la compétence du modèle dans les environs de Pointe-Brûlée, mais les données n'étaient pas disponibles pour le faire à proximité de Lamèque. De ce fait, compte tenu de la rareté des données d'étalonnage et des données bathymétriques, il faut faire preuve de prudence pour interpréter les résultats du modèle à Lamèque.

Il faut préciser que les effets des vagues, l'érosion côtière et les impacts des glaces n'ont pas été intégrés dans la modélisation à l'échelle communautaire décrite dans le présent rapport.

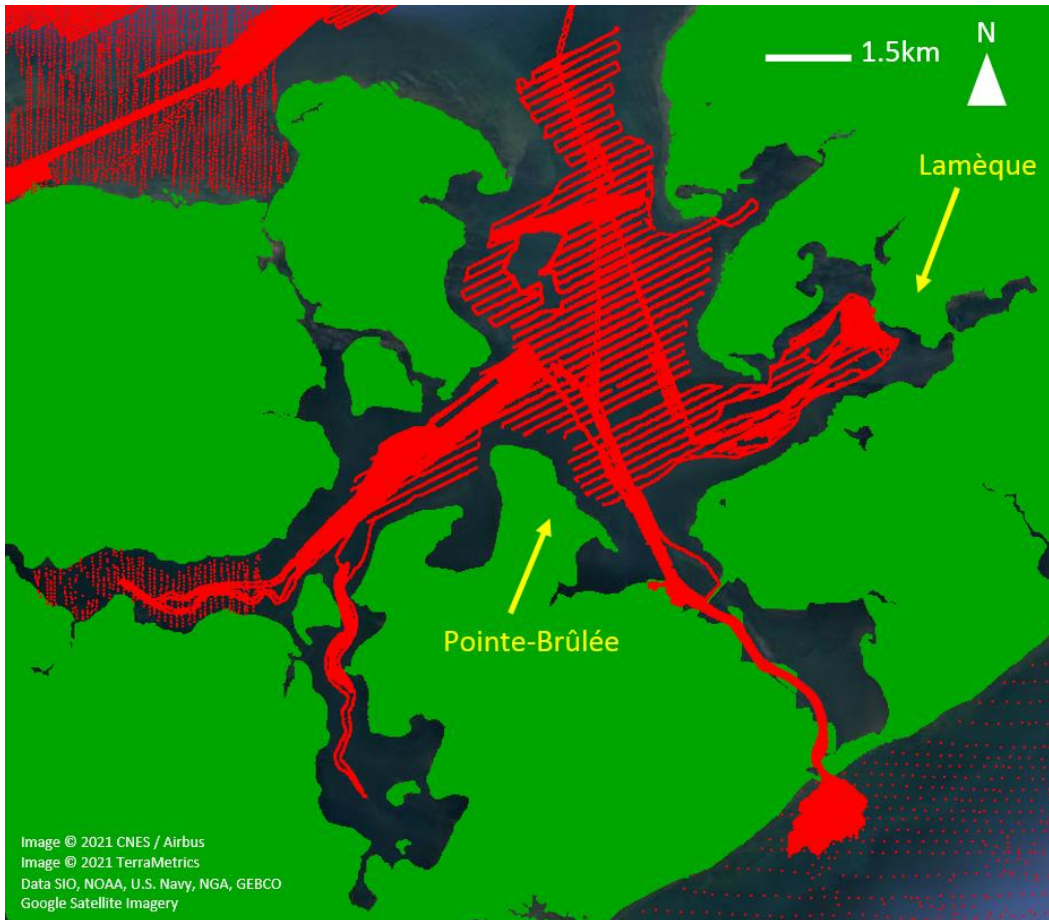


Figure 30. Données sur l'élévation disponibles pour les baies intérieures de la Péninsule acadienne. Les points de données topographiques sont représentés en vert (ils apparaissent comme une surface solide en raison de la densité des données) et les points de données bathymétriques, en rouge.

## 8 Élaboration d'évènements d'aléa

Une série d'évènements synthétiques d'onde de tempête a été élaborée pour étayer les analyses fondées sur le risque, d'après une analyse des enregistrements des marégraphes. L'analyse se composait de deux parties. Tout d'abord, on a comparé les valeurs des ondes de tempête maximales près de la Péninsule acadienne aux résidus des niveaux d'eau près des marégraphes d'Escuminac et de Belledune afin d'évaluer l'autocorrélation spatiale (section 8.1), ce qui a permis de déterminer quel marégraphe choisir comme représentatif des ondes de tempête dans la Péninsule acadienne. Ensuite, on a appliqué des méthodes statistiques pour estimer les probabilités de dépassement annuel (PDA) des niveaux d'eau extrêmes associés aux ondes de tempête (section 8.2).

### 8.1 Sélection des marégraphes

On ne dispose pas d'enregistrements de marégraphes à long terme dans les environs de la Péninsule acadienne, ce qui complique l'estimation directe des statistiques des valeurs extrêmes à partir des données sur les niveaux d'eau mesurés. Les deux marégraphes les plus proches qui ont une longue période d'enregistrement sont le marégraphe d'Escuminac et celui de Belledune. Comme décrit dans la section 4.3.1, le marégraphe d'Escuminac contient des enregistrements des niveaux d'eau de 1973 à

aujourd'hui (~47 ans) et celui de Belledune a enregistré les mesures des niveaux d'eau de 1999 à aujourd'hui (~20 ans). Les deux sont à peu près équidistants de la Péninsule acadienne. Comme mentionné dans la section 8, les enregistrements de données utilisés pour soutenir les analyses statistiques et l'élaboration des événements d'aléa ont été tronqués au 13 septembre 2019.

Environnement Canada (2006) prévient que la répartition des ondes de tempête et des marées dans le golfe du Saint-Laurent varie considérablement dans la région. On a donc procédé à une brève analyse pour déterminer si l'un des marégraphes est plus étroitement lié aux niveaux d'eau dans la Péninsule acadienne pendant les événements extrêmes. On a déterminé les 51 plus grands événements d'onde de tempête (ceux énumérés dans le tableau 1, plus l'ouragan Dorian) pour les marégraphes d'Escuminac et de Belledune. Parmi les 51 événements déterminés pour chaque marégraphe, on a simulé ceux qui sont survenus après 1979 et qui ne coïncidaient pas avec une couverture de glace importante ou un cyclone post-tropical à l'aide du modèle régional. Au total, 29 des 51 événements ont été simulés pour le marégraphe d'Escuminac et 22 des 51 pour celui de Belledune. On a comparé les ondes de tempête maximales modélisées (à partir du modèle régional) dans les environs de Le Goulet, de Shippagan et de Caraquet aux résidus maximaux enregistrés aux marégraphes d'Escuminac et de Belledune, ainsi qu'aux ondes de tempête maximales modélisées près de ces marégraphes. Les résultats sont présentés sur la figure 31 et la figure 32.

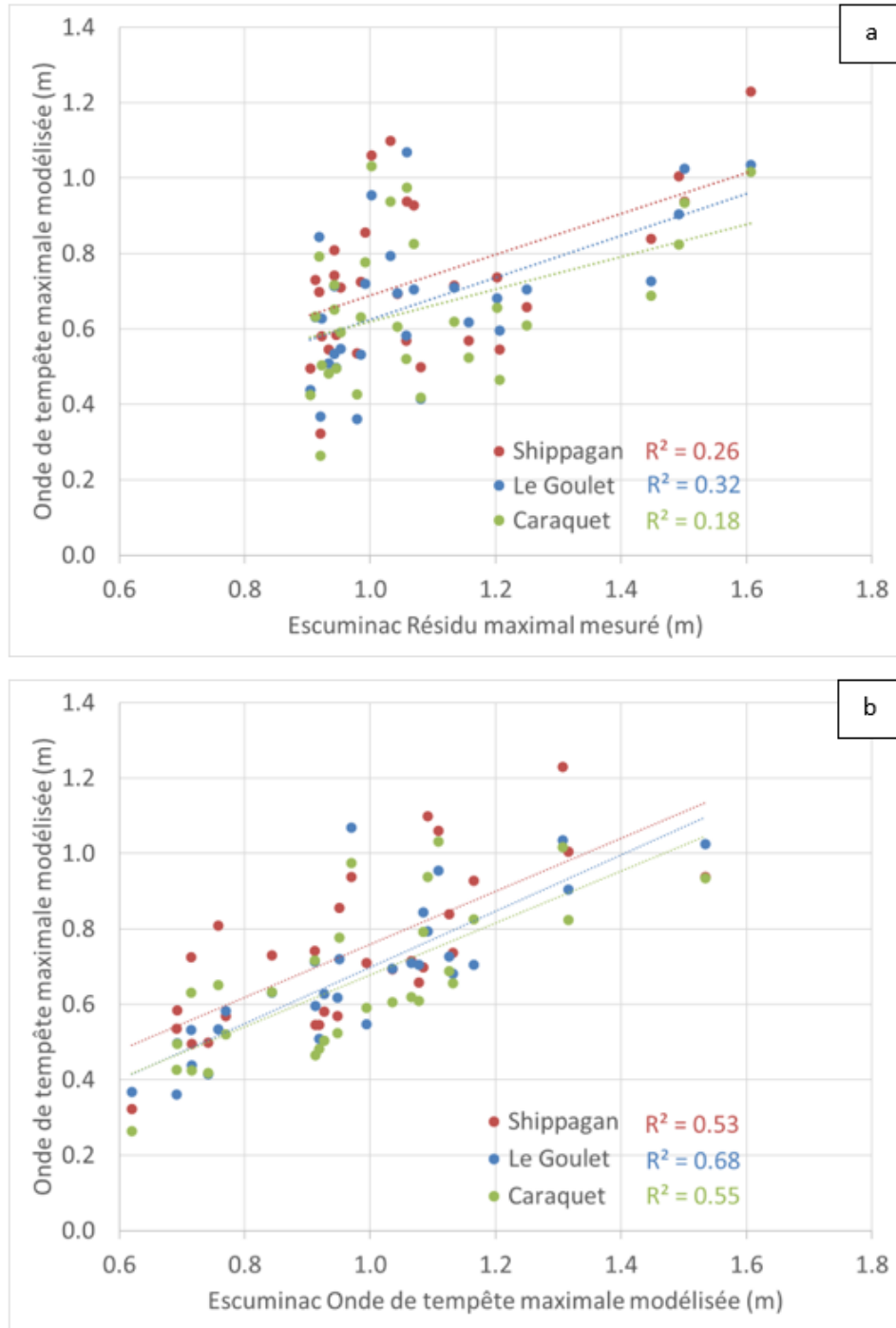


Figure 31. Relation entre l'onde de tempête maximale modélisée dans la Péninsule acadienne et le résidu maximal mesuré (a) et l'onde de tempête maximale modélisée (b) au marégraphe d'Escuminac.

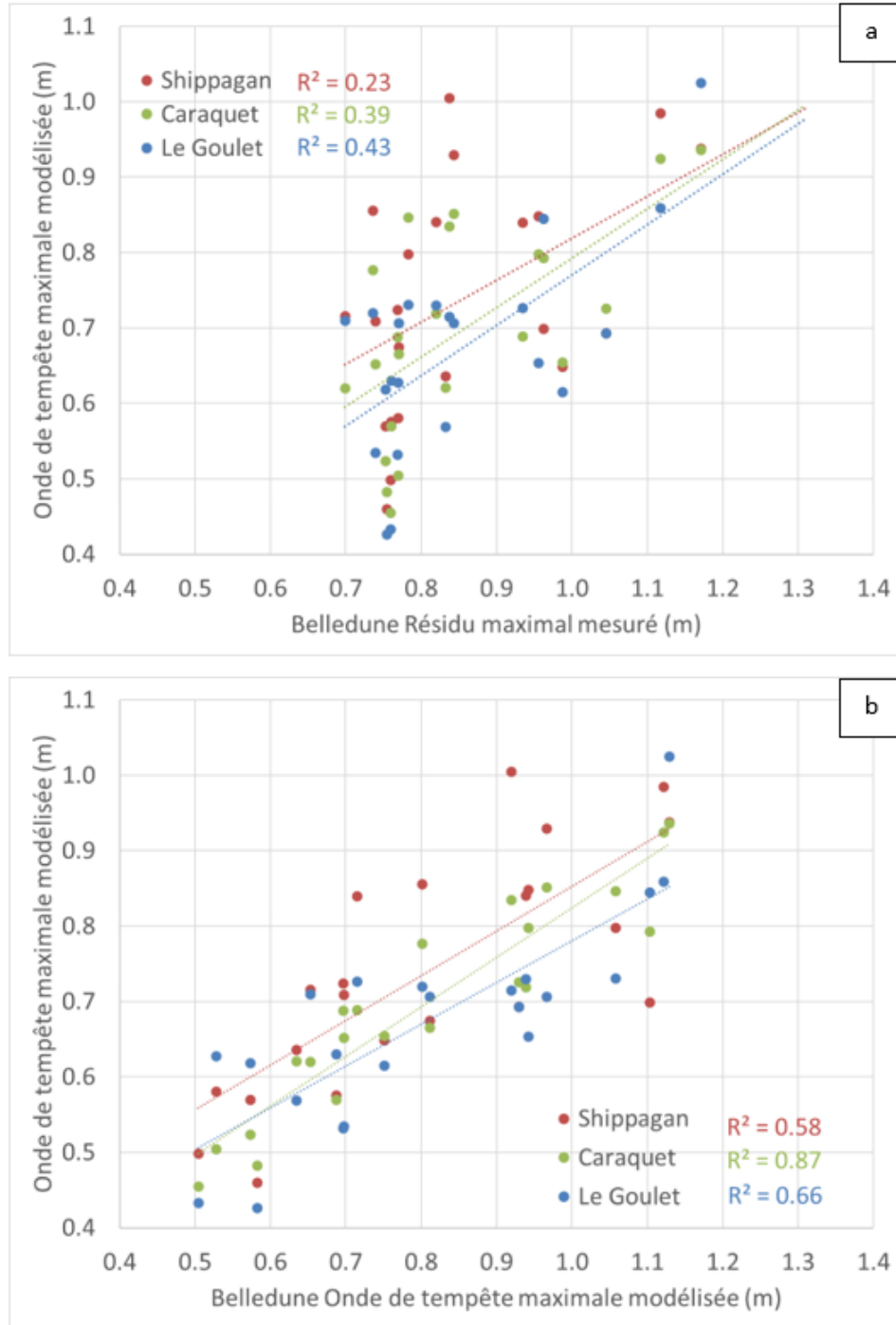


Figure 32. Relation entre l'onde de tempête maximale modélisée dans la Péninsule acadienne et le résidu maximal mesuré (a) et l'onde de tempête maximale modélisée (b) au marégraphe de Belledune.

D'après les coefficients de détermination calculés ( $R^2$ ), l'autocorrélation est plus forte entre les ondes de tempête maximales dans la Péninsule acadienne et les résidus au marégraphe de Belledune pendant les événements extrêmes. Lorsqu'on compare les résultats modélisés aux données mesurées, les magnitudes des résidus maximaux au marégraphe de Belledune expliquent de 23 à 43 % ( $R^2=0,23$  à  $0,43$ ) de la variation des magnitudes des ondes de tempête maximales dans la Péninsule acadienne, mais le marégraphe d'Escuminac n'explique que de 18 à 32 % ( $R^2=0,18$  à  $0,32$ ) de cette variation. On a donc choisi l'enregistrement du marégraphe de Belledune comme base pour les analyses des valeurs extrêmes afin de déterminer les probabilités de dépassement annuel associées à différentes magnitudes des événements d'onde de tempête. Il convient de noter que les valeurs modélisées présentées sur la figure 31 et la figure 32 ne représentent que les ondes de tempête; on n'a pas tenté d'incorporer la surcote liée aux vagues dans la modélisation ni de déterminer et de supprimer les événements qui auraient pu produire une importante surcote liée aux vagues à proximité des marégraphes. Les effets des vagues pourraient expliquer une partie de la dispersion des données illustrée sur la figure 31a et la figure 32a, en particulier pour les tempêtes qui ont produit une grande surcote liée aux vagues près du marégraphe d'Escuminac ou de Belledune. Si l'on compare les résultats modélisés dans la Péninsule acadienne aux résultats modélisés près des marégraphes, les coefficients de détermination s'améliorent, passant entre 0,58 et 0,87 et entre 0,53 et 0,68 pour Belledune et Escuminac, respectivement.

Bien que la période d'enregistrement de données soit la plus longue pour le marégraphe d'Escuminac, il faut souligner que ce dernier n'était pas opérationnel lors de l'onde de tempête du 21 janvier 2000, qui est l'événement le plus important enregistré par le marégraphe de Belledune, largement considéré comme l'un des événements majeurs dans la région et souvent choisi comme référence pour l'évaluation des aléas (Environnement Canada, 2006; Robichaud et coll., 2011). Cela renforce l'utilisation du marégraphe de Belledune pour étayer les analyses des valeurs extrêmes, car les observations de grands événements sont essentielles pour façonner la queue des ajustements de la distribution de probabilité aux données et, par conséquent, les valeurs de retour attribuées aux événements à faible probabilité de dépassement annuel.

## 8.2 Analyse statistique des données des marégraphes

Étant donné les nombreuses combinaisons de marées, d'ondes de tempête et d'autres facteurs qui influent sur les niveaux d'eau côtiers, il est souvent difficile d'établir des événements de tempête représentatifs (Murphy et coll., 2020). Certains praticiens choisissent d'adopter une approche prudente dans laquelle on modélise des ondes de tempête représentatives en les combinant à un niveau de référence typique de la marée haute, comme la pleine mer supérieure, grande marée (PMSGM) ou la pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) (Daigle, 2017; Fine et Thomson, 2021). D'autres méthodes visent à traiter, de manière plus explicite, la probabilité conjointe des multiples facteurs contributifs (Pugh et Vassie, 1980).

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour estimer les probabilités de dépassement annuel pour les niveaux d'eau extrêmes causés par les ondes de tempête. On a comparé et évalué les résultats pour produire des estimations finales de la probabilité de dépassement annuel afin d'étayer l'évaluation fondée sur les risques des dangers dus aux ondes de tempête dans la Péninsule acadienne.

L'hypothèse que l'ensemble des valeurs observées, ou l'échantillon de population, utilisé pour calculer les paramètres statistiques est dérivé de l'échantillonnage à partir d'une distribution mère homogène, de sorte que les valeurs sont indépendantes et identiquement distribuées, est fondamentale pour les statistiques des valeurs extrêmes (FEMA, 2016; Mazas et Hamm, 2011). Une grande majorité des plus grandes ondes de tempête que l'on trouve dans les enregistrements des marégraphes d'Escuminac et de Belledune sont associées à des tempêtes extratropicales hivernales (section 4.3.3). Bien que les cyclones post-tropicaux

(par exemple, les restes d'ouragans) puissent traverser le golfe du Saint-Laurent avec suffisamment d'énergie pour provoquer de grandes ondes de tempête, ils ne sont responsables que d'une faible proportion des plus grandes ondes de tempête. On peut soutenir que les tempêtes hivernales extratropicales et les cyclones post-tropicaux qui touchent l'Atlantique canadien n'appartiennent pas à la même distribution mère, en raison de leurs différences d'origine et de saisonnalité. Il y a également relativement peu d'ondes de tempête générées par des tempêtes post-tropicales dans les archives historiques, ce qui complique l'élaboration des distributions de probabilité de valeurs extrêmes fiables pour de tels événements. Dans la présente étude, on a retiré les ouragans post-tropicaux des enregistrements des marégraphes pour se concentrer uniquement sur les tempêtes hivernales extratropicales, les principaux facteurs des ondes de tempête dans la zone d'intérêt. C'est pourquoi les événements liés aux cyclones post-tropicaux n'ont pas été intégrés dans les analyses statistiques présentées dans les chapitres qui suivent, sauf indication contraire.

## 8.2.1 Statistiques des valeurs extrêmes des pointes dépassant un seuil

### 8.2.1.1 Ondes de tempête

Une analyse des valeurs extrêmes stationnaires a été appliquée afin d'élucider les probabilités de dépassement annuel pour les ondes de tempête au marégraphe de Belledune en fonction des résidus mesurés (les niveaux d'eau mesurés moins la marée théorique). Conformément aux procédures décrites dans Groupe WAFO (2011) et Mazas et Hamm (2011), on a analysé les résidus en utilisant une approche de pointes dépassant un seuil (PDS). Les résidus ont été linéairement redressés pour éliminer la contribution non stationnaire de l'élévation du niveau relatif de la mer. On a ensuite désagrégé les résidus redressés en utilisant une durée minimale de 48 heures entre les événements pour isoler les maxima des événements. On a recouru à un processus itératif pour définir un seuil pour lequel les dépassements désagrégés étaient bien décrits par la distribution de Pareto généralisée (DPG). Un seuil de 0,68 m a été sélectionné et 58 événements d'onde de tempête ont été déterminés. Compte tenu de la période d'enregistrement du marégraphe de Belledune, cela équivaut à environ trois ondes de tempête par année d'enregistrement, un résultat qui se situe dans la fourchette recommandée par Mazus et Hamm (2011). Une distribution de Pareto généralisée a été ajustée aux 58 ondes de tempête selon les méthodes du groupe WAFO (2011) pour estimer les magnitudes des ondes de tempête associées aux principales probabilités de dépassement annuel. Les résultats de cette analyse sont illustrés sur la figure 33.

Analyse des valeurs extrêmes — Onde de tempête — ID de la station (2145)

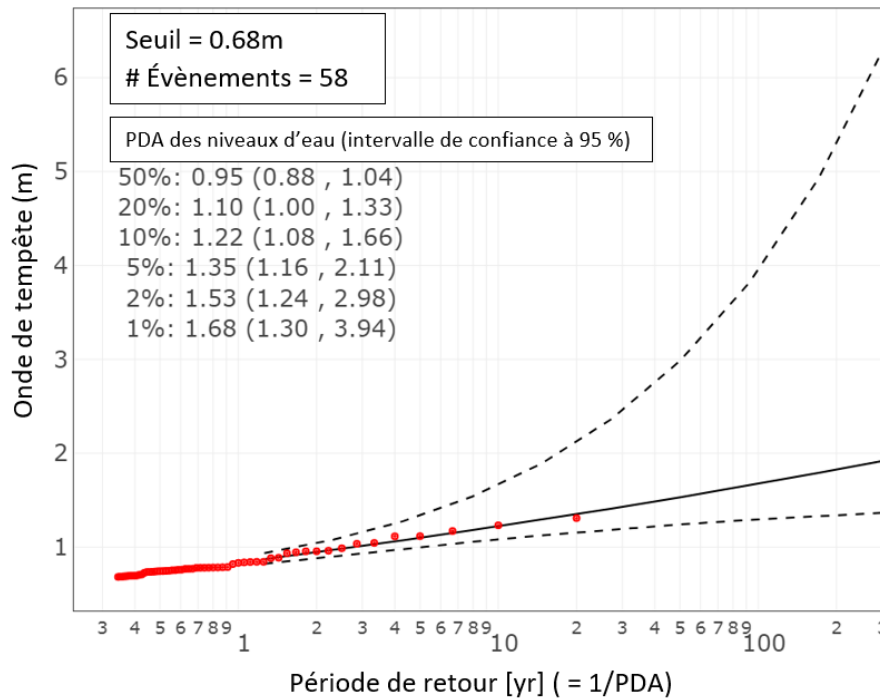


Figure 33. Ajustement de la distribution de Pareto généralisée aux valeurs maximales des ondes de tempête enregistrées au marégraphe de Belledune et estimations des ondes de tempête ainsi obtenues pour les principales probabilités de dépassement annuel.

Comme indiqué dans la section 8.2, les ondes de tempête associées aux cyclones/ouragans post-tropicaux ont été exclues de l'analyse statistique (figure 33). Trente-trois cyclones post-tropicaux sont survenus pendant la période d'enregistrement du marégraphe de Belledune; trois évènements n'ont pas été enregistrés par le marégraphe et les trente autres ont été retirés manuellement de l'enregistrement. Afin d'examiner la sensibilité de l'analyse des valeurs extrêmes à l'exclusion de ces évènements de l'ensemble de données de l'échantillon, on a répété l'analyse en incluant cette fois les cyclones/ouragans post-tropicaux. L'inclusion des cyclones/ouragans post-tropicaux n'a pas modifié (à 2 décimales près) les valeurs de retour du meilleur ajustement pour les probabilités de dépassement annuel supérieures à 10 % (les évènements plus petits et plus fréquents). Les estimations de la valeur de retour la mieux ajustée pour la probabilité de dépassement annuel de 1 % ont augmenté de moins de 2 %. Ainsi, l'inclusion ou l'omission des cyclones/ouragans post-tropicaux a un effet négligeable sur les probabilités de dépassement annuel des ondes de tempête ou sur les estimations des valeurs de retour pour les probabilités de dépassement annuel inférieures à 1 %. Les résultats de cette analyse sont illustrés sur la figure 34.

Analyse des valeurs extrêmes — Onde de tempête — ID de la station (2145)

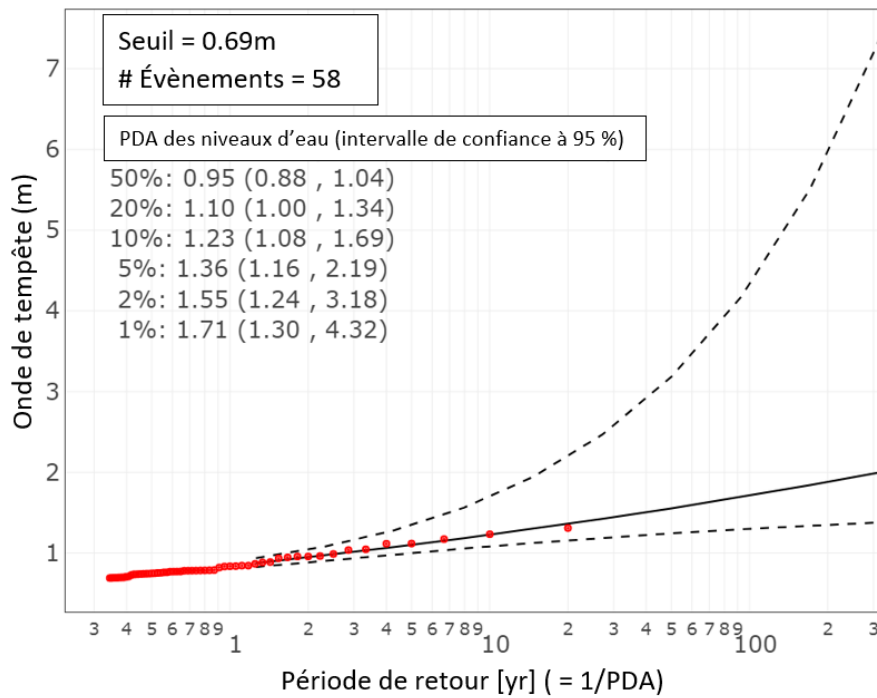


Figure 34. Ajustement de la distribution de Pareto généralisée aux valeurs maximales des ondes de tempête enregistrées au marégraphe de Belledune, y compris les événements de cyclone/ouragan post-tropical, et estimations des ondes de tempête ainsi obtenues pour les événements présentant les principales probabilités de dépassement annuel.

### 8.2.1.2 Niveaux d'eau

On a répété l'analyse statistique des pointes dépassant un seuil, qui est décrite à la section 8.2.1.1 pour les niveaux d'eau totaux enregistrés au marégraphe de Belledune, par opposition aux résidus non tidaux. Cette analyse tient donc compte des contributions des marées astronomiques ainsi que des résidus causés par les ondes de tempête et d'autres facteurs contributifs. Encore une fois, les cyclones/ouragans tropicaux n'ont pas été inclus dans l'analyse. Les résultats sont présentés sur la figure 35 et les niveaux d'eau sont référencés au niveau moyen d'eau.

Analyse des valeurs extrêmes — Niveau d'eau — ID de la station (2145)

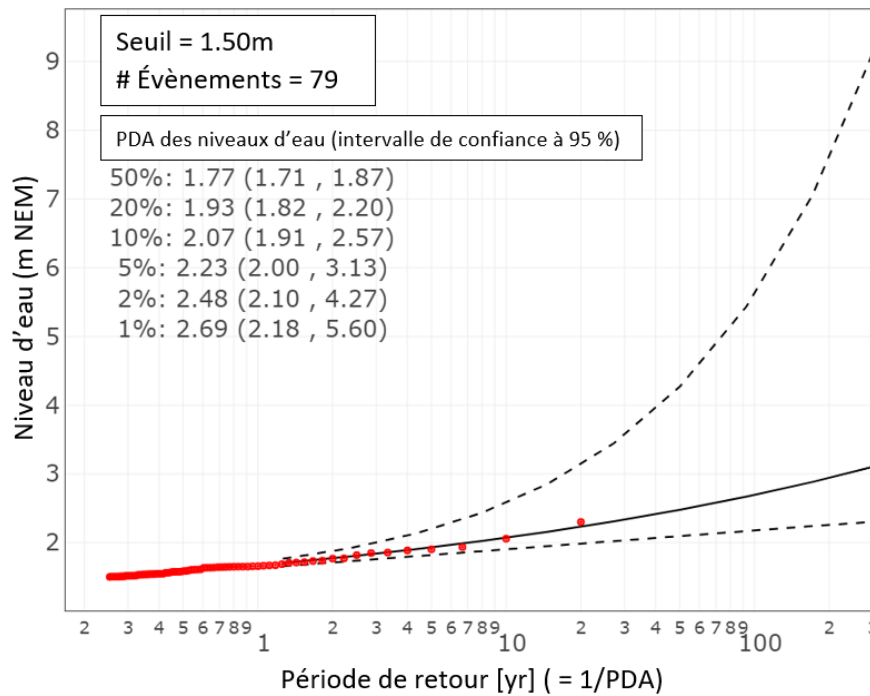


Figure 35. Ajustement de la distribution de Pareto généralisée aux niveaux d'eau maximaux enregistrés au marégraphe de Belledune et estimations ainsi obtenues pour les événements présentant les principales probabilités de dépassement annuel. Les niveaux d'eau sont référencés au niveau d'eau moyen.

### 8.2.2 Probabilité conjointe des marées et des ondes de tempête

On a étudié la probabilité conjointe des marées et des ondes de tempête selon les méthodes présentées dans Pugh et Vassie (1980). En résumé, ces méthodes supposent que la phase de la marée et l'onde de tempête sont statistiquement indépendantes l'une de l'autre. On dérive des fonctions de distribution de probabilité indépendantes pour la phase de la marée et l'onde de tempête, puis on multiplie les deux fonctions pour établir les probabilités associées à divers niveaux d'eau.

En suivant les méthodes présentées dans Pugh et Vassie (1980), on a étudié la dépendance entre l'onde de tempête et la phase de la marée au marégraphe de Belledune en traçant l'écart-type des résidus observés au marégraphe par rapport à la phase théorique de la marée calculée par analyse harmonique (figure 36). Chaque point représente l'écart-type des résidus observés à une phase donnée de la marée. Seule une faible dépendance a été observée entre l'onde de tempête et la phase de la marée au marégraphe de Belledune, les résidus étant légèrement plus importants aux phases inférieures de la marée. Les deux points les plus à droite sur la figure 36 sont considérés comme des valeurs aberrantes et peuvent être expliqués par le très petit échantillon de résidus coïncidant avec des phases de la marée entre 1,4 m et 1,5 m du niveau d'eau moyen; les valeurs de l'écart-type associées à ces deux points représentent 201 et 15 observations, respectivement, sur un total de 164 209. À titre de référence, la plus haute marée astronomique au marégraphe de Belledune est égale à 1,48 m du niveau d'eau moyen. D'après cette analyse, on a supposé que l'onde de tempête et la phase de la marée étaient pratiquement indépendantes l'une de l'autre à ce marégraphe.

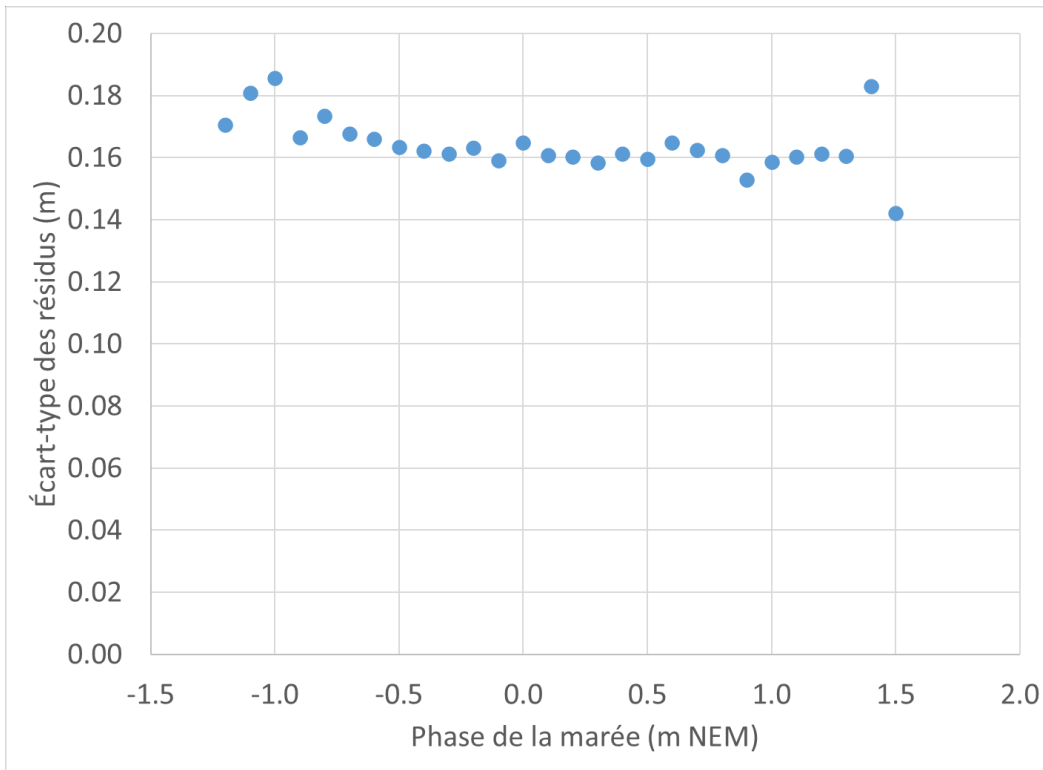


Figure 36. Relation entre l'écart-type des résidus et la phase de la marée au marégraphe de Belledune.

Les méthodes de probabilité conjointe proposées par Pugh et Vassie (1980) exigent du praticien qu'il trie les valeurs de la phase de la marée et les résidus en utilisant une taille de « tranche » précise. Les tests de sensibilité ont montré que des tranches de 0,1 m offraient un bon compromis entre la taille de l'échantillon et la précision de l'estimation. Des tranches plus petites n'ont pas modifié de manière significative les estimations obtenues. La figure 37 illustre la distribution de probabilité des résidus et des valeurs de la phase de la marée, répartis respectivement en tranches de 0,1 m. Les valeurs des probabilités de dépassement annuel obtenues pour les niveaux d'eau extrêmes sont présentées dans le tableau 7 et sur la figure 38.

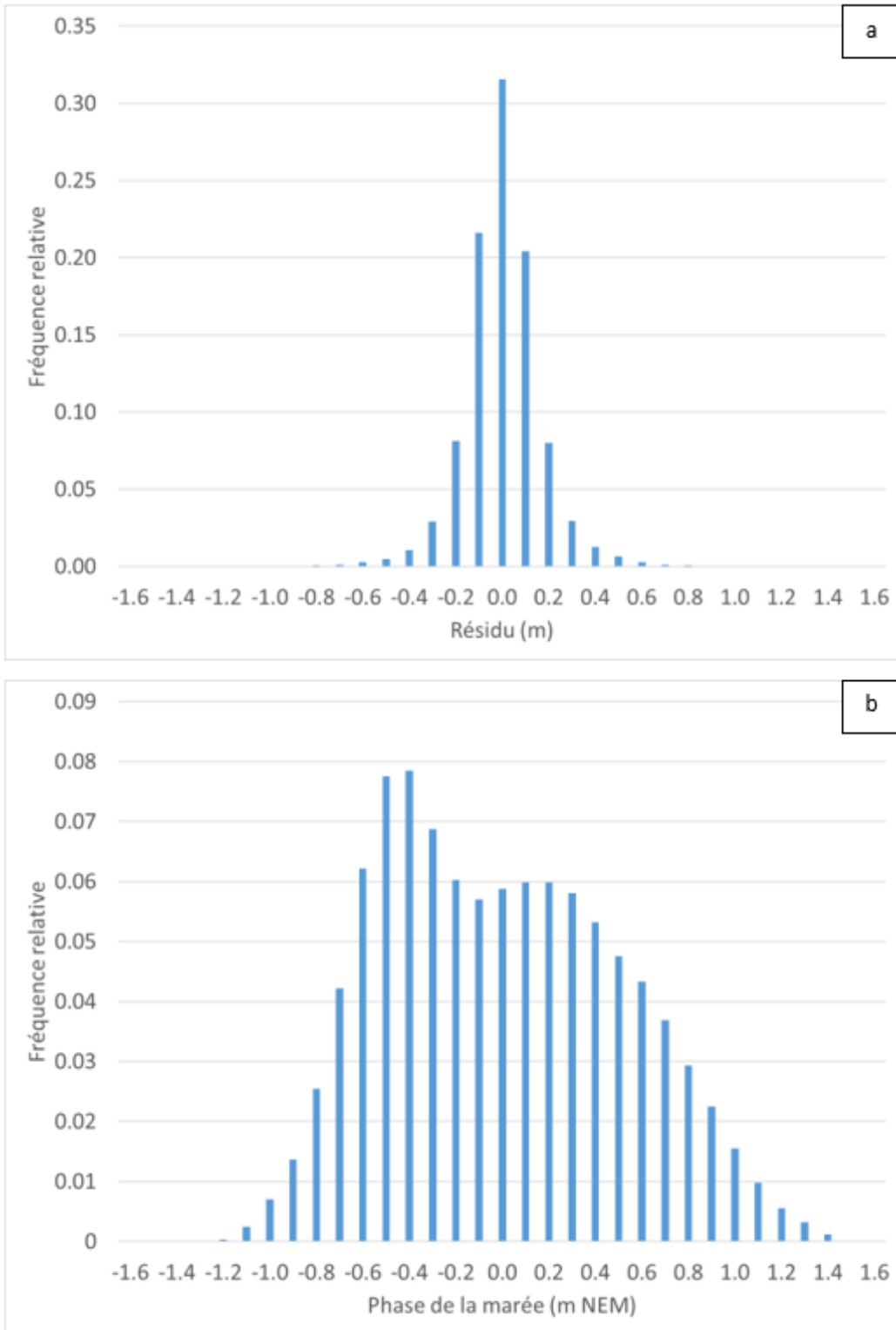


Figure 37. Distribution de probabilité des résidus (a) et de la phase de la marée (b) au marégraphe de Belledune.

Tableau 7. Probabilités de dépassement annuel des niveaux d'eau d'après la probabilité conjointe des ondes de tempête et des marées.

PDA	Niveau d'eau (m du niveau d'eau moyen)
50 %	1,77
20 %	1,91
10 %	2,01
5 %	2,10
2 %	2,20
1 %	2,27

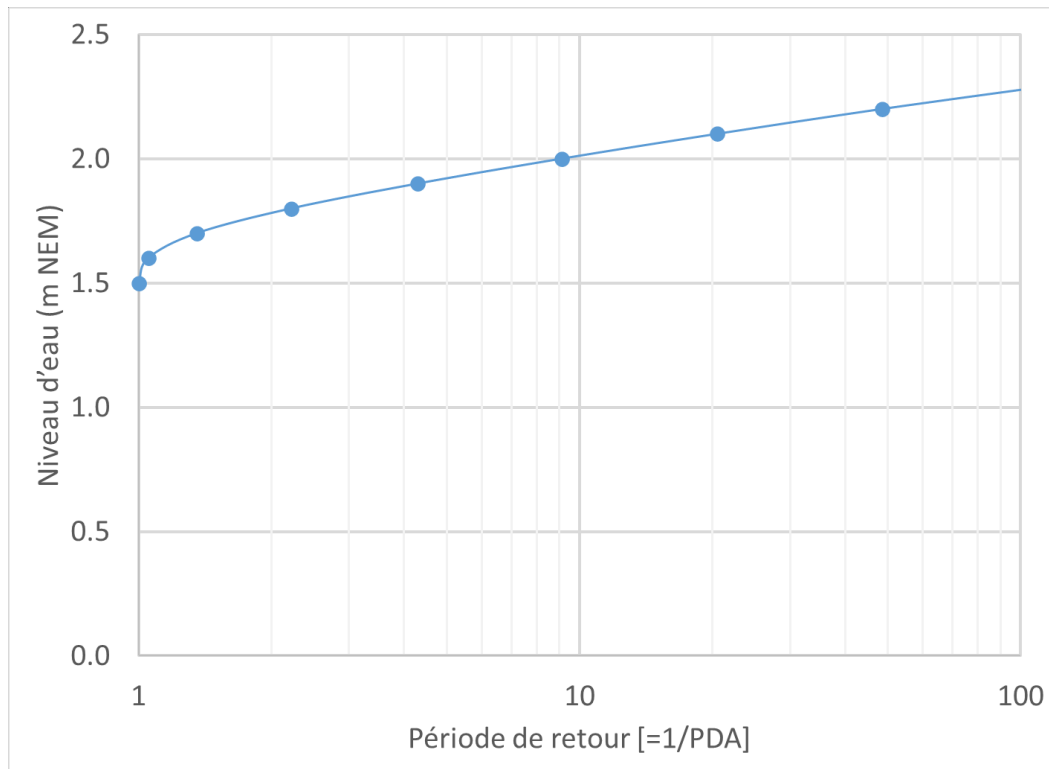


Figure 38. Graphique des probabilités de dépassement annuel des niveaux d'eau en fonction de la probabilité conjointe des ondes de tempête et des marées.

On a répété le processus de probabilité conjointe en utilisant les méthodes présentées dans Pugh et Vassie (1980) pour désagréger les résidus afin d'éviter de « compter deux fois » la même onde de tempête. Fondamentalement, la méthode suppose que les séries temporelles horaires de résidus sont dépendantes de 1, de sorte que chaque résidu dépend de la valeur qui le précède. Pour les événements dont la probabilité de dépassement annuel est supérieure à 2 % (les événements plus petits et plus fréquents que l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 2 %), les valeurs calculées étaient plus basses que celles calculées sans l'hypothèse de la dépendance de 1, mais n'en différaient pas beaucoup. Sans tenir compte de la dépendance de 1, les estimations des niveaux d'eau extrêmes pour les événements ayant une probabilité de dépassement annuel de 50 %, 20 %, 10 % et 5 % étaient supérieures à celles calculées en supposant une dépendance de 1 de 0,04, 0,08, 0,11 et 0,12 m, respectivement.

### 8.3 Comparaison avec les études antérieures

On a comparé les valeurs de retour estimées des ondes de tempête au marégraphe de Belledune pour diverses probabilités de dépassement annuel (discutées dans la section 8.2) aux valeurs estimées par Daigle (2017) pour des régions adjacentes au marégraphe de Belledune. Daigle (2017) a estimé les niveaux de mer extrêmes et les ondes de tempête pour diverses zones de la province du Nouveau-Brunswick d'après les valeurs dérivées d'une prévision rétrospective sur 40 ans des ondes de tempête dans l'Atlantique Nord-Ouest (Bernier, 2005; Environnement Canada, 2006). Le tableau 8 présente une comparaison entre les estimations de la probabilité de dépassement annuel des ondes de tempête d'après l'analyse statistique des pointes dépassant un seuil des résidus du marégraphe de Belledune et les estimations de Daigle (2017) pour les zones 1 et 2 (le marégraphe de Belledune est situé près de la limite entre la zone 1 et la zone 2).

Tableau 8. Comparaison des estimations de la probabilité de dépassement annuel des ondes de tempête.

PDA	A. Estimations des ondes de tempête d'après l'analyse des résidus du marégraphe de Belledune (m)	B. Estimations des ondes de tempête par Daigle (2017) pour la zone 1 et la zone 2 – du comté de Restigouche à Grande-Anse (N.-B.) (m)	Différence [A - B] (m)
50 %	0,95	0,70	0,25
20 %	1,10	0,85	0,25
10 %	1,22	0,97	0,25
5 %	1,35	1,06*	0,29
4 %	1,38*	1,11	0,27
2 %	1,53	1,23	0,30
1 %	1,68	1,34	0,34

\* Interpolation linéaire entre les valeurs de retour des probabilités de dépassement annuel adjacentes.

Comme on le voit dans le tableau 8, les estimations calculées de la probabilité de dépassement annuel des ondes de tempête fondées sur l'analyse des enregistrements du marégraphe de Belledune sont plus élevées que celles de Daigle (2017) pour la zone 1 et la zone 2. Un bref examen du modèle de prévision rétrospective, utilisé par Daigle (2017) comme base pour estimer les ondes de tempête, a été effectué pour étudier plus en détail cette divergence. Les valeurs de retour des ondes de tempête estimées à partir de l'analyse des résidus du marégraphe de Belledune sont supérieures d'environ 30 cm aux valeurs estimées par Daigle (2017) pour les régions adjacentes. La documentation disponible sur ce modèle de prévision rétrospective ne traite pas explicitement du rendement du modèle près du marégraphe de Belledune. Cependant, les auteurs évaluent la compétence du modèle de prévision rétrospective au marégraphe d'Escuminac. La différence observée est cohérente avec la sous-prédiction d'environ 30 cm des élévations de l'onde de tempête par le modèle de prévision rétrospective (signalée près du marégraphe d'Escuminac) sur laquelle reposent les estimations de Daigle (2017).

La pleine mer supérieure, grande marée (PMSGM) estimée à partir des marées prédites au marégraphe de Belledune (1,44 m du niveau d'eau moyen / 1,18 m en CGVD2013) est conforme aux estimations de Daigle (2017) pour la zone 1 (1,4 m en CGVD2013) et la zone 2 (0,9 m en CGVD2013). On a estimé une pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) de 0,89 m du niveau d'eau moyen (0,63 m en CGVD2013) à partir des marées prédites au marégraphe de Belledune. Le tableau 9 présente une comparaison entre les estimations des niveaux d'eau dans cette étude et les valeurs proposées par Daigle

(2017) d'après une analyse statistique des ondes de tempête. Le tableau 10 montre les estimations des niveaux d'eau fondées sur une analyse statistique des mesures des niveaux d'eau et de la probabilité conjointe des ondes de tempête et des marées.

Tableau 9. Estimations de la probabilité de dépassement annuel de l'onde de tempête plus niveau de référence typique de la marée

PDA	Analyse du marégraphe de Belledune		Daigle (2017) pour la zone 1 [Onde + PMSGM] (m)	Daigle (2017) pour la zone 2 [Onde + PMSGM] (m)
	Niveau d'eau [Onde de tempête + PMSMM] (m)	Niveau d'eau [Onde de tempête + PMSGM] (m)		
50 %	1,84	2,39	2,36	1,86
20 %	1,99	2,54	2,51	2,01
10 %	2,11	2,66	2,63	2,13
5 %	2,24	2,79	2,72*	2,22*
4 %	2,27*	2,82*	2,77	2,27
2 %	2,42	2,97	2,89	2,39
1 %	2,57	3,12	3,00	2,50

\* Les valeurs sont interpolées linéairement entre les valeurs de retour adjacentes.

Tableau 10. Estimations de la probabilité de dépassement annuel du niveau d'eau (toutes les valeurs sont référencées au niveau moyen d'eau)

PDA	Niveau d'eau (d'après l'analyse des valeurs extrêmes des enregistrements)	Niveau d'eau (d'après l'analyse de probabilité conjointe des marées et de l'onde)
50 %	1,77	1,77
20 %	1,93	1,91
10 %	2,07	2,01
5 %	2,23	2,10
4 %	2,27*	2,12*
2 %	2,48	2,20
1 %	2,69	2,27

\* Les valeurs sont interpolées linéairement entre les valeurs de retour adjacentes.

Comme l'illustrent le tableau 9 et le tableau 10, les estimations des niveaux d'eau calculées en ajoutant l'onde de tempête à la pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) et les estimations dérivées de l'analyse statistique des pointes dépassant un seuil des niveaux d'eau sont assez proches (écart moyen absolu et en pourcentage de 0,05 m et 2,33 %, respectivement). Bien entendu, les valeurs calculées à partir de la pleine mer supérieure, grande marée (PMSGM) sont supérieures de 0,55 m à celles fondées sur la pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) (la différence entre les deux plans horizontaux de référence caractéristiques de la marée). Lorsqu'on les compare aux valeurs proposées par Daigle (2017), les valeurs calculées basées sur l'onde de tempête plus la pleine mer supérieure, grande marée (PMSGM), l'onde de tempête plus la pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) et l'analyse des pointes dépassant un seuil des niveaux d'eau ont produit des écarts absolus moyens de 0,24 m, 0,30 m et 0,24 m, respectivement, et des écarts moyens en pourcentage de 10,10 %, 12,38 % et 10,24 %, respectivement.

Les valeurs proposées par Daigle (2017) se situent entre les valeurs calculées en se fondant sur la pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) et la pleine mer supérieure, grande marée (PMSGM).

La pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) représente la moyenne des marées de pleine mer supérieure observées chaque jour lunaire sur une période de 19 ans (Forrester, 1983). Inversement, la pleine mer supérieure, grande marée (PMSGM) est un paramètre plus extrême représentant la moyenne des pleines mers supérieures rencontrées chaque année sur une période de 19 ans (Forrester, 1983). Les niveaux d'eau estimés à partir de l'analyse statistique de l'onde de tempête plus la pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) étaient similaires à ceux estimés à partir de l'analyse statistique des enregistrements du niveau d'eau total ( $EQM=0,06$  m). À l'inverse, les niveaux d'eau estimés à partir de l'analyse statistique de l'onde de tempête plus la pleine mer supérieure, grande marée (PMSGM) étaient supérieurs à ceux calculés à partir de l'analyse statistique des niveaux d'eau totaux ( $EQM=0,55$  m). On peut en déduire que la pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) est une hauteur caractéristique des marées plus représentative que la pleine mer supérieure, grande marée (PMSGM) lorsqu'on utilise des approches simplifiées (additives) pour déterminer les valeurs de retour des niveaux d'eau pour cette région.

Les estimations des niveaux d'eau dérivées de l'analyse de probabilité conjointe ont produit des estimations similaires à celles calculées en ajoutant l'onde de tempête à la pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) et à celles dérivées de l'analyse des pointes dépassant un seuil des niveaux d'eau pour les événements ayant une probabilité de dépassement annuel moindre. Comparées à la méthode de probabilité conjointe, les valeurs calculées fondées sur l'onde de tempête plus la pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) et l'analyse des pointes dépassant un seuil des niveaux d'eau ont produit des différences absolues moyennes de 0,15 m et 0,15 m, respectivement, et des différences moyennes en pourcentage de 7,12 % et 6,97 %, respectivement. En éliminant les événements dont la probabilité de dépassement annuel est inférieure à 5 % (c'est-à-dire les événements qui sont plus importants et moins fréquents que l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 5 %), on obtient de meilleures différences moyennes, de 0,10 m et 0,05 m (4,88 % et 2,56 %), respectivement.

## 8.4 Évènements d'aléa

On a sélectionné six valeurs de retour estimées pour le niveau d'eau, ayant chacune une probabilité de dépassement annuel unique couvrant une plage de 50 % à 1 %, pour la modélisation ultérieure des aléas. Cela a permis de s'assurer de prendre en compte une gamme de magnitudes et de probabilités d'évènements dans l'évaluation des aléas, de manière à pouvoir utiliser les résultats pour orienter l'évaluation future des risques. Afin de fournir des estimations réalistes, mais encore prudentes, des niveaux d'eau extrêmes, on a adopté les estimations dérivées de l'addition de l'onde de tempête et de la pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) et les estimations tirées de l'analyse statistique des pointes dépassant un seuil des niveaux d'eau. On a utilisé la plus grande des deux estimations pour chaque probabilité de dépassement annuel comme base pour la modélisation des aléas. Le tableau 11 présente les estimations définitives des ondes de tempête extrêmes et des niveaux d'eau à proximité du marégraphe de Belledune pour cette étude.

Tableau 11. Estimation des ondes de tempête extrêmes et des niveaux d'eau au marégraphe de Belledune.

PDA	Onde de tempête (m)	Niveau d'eau (m du niveau d'eau moyen)
50 %	0,95	1,84
20 %	1,10	1,99
10 %	1,22	2,11
5 %	1,35	2,24
2 %	1,53	2,48
1 %	1,68	2,69

Les événements d'aléa actuels élaborés dans cette étude sont représentatifs d'un cadre temporel allant de 1999 à 2019 (la gamme des données du marégraphe dont les estimations ont été dérivées). En tant que médiane approximative, on peut supposer que les estimations des événements d'aléa actuels dans cette étude représentent une condition de l'année 2010 approximativement.

## 9 Simulations d'ondes de tempête synthétiques

Au total, on a simulé 24 événements synthétiques d'ondes de tempête à l'aide du modèle à l'échelle communautaire étalonné et validé décrit dans la section 7, afin de représenter des événements ayant des probabilités de dépassement annuel définies. Six des événements d'aléa reflètent l'aléa dû à l'onde de tempête dans les conditions actuelles, chacun ayant une probabilité unique (ou probabilité de dépassement annuel) conforme à celles indiquées dans le tableau 11. Les 18 autres événements d'aléa reflètent les aléas d'onde de tempête à des horizons temporels futurs, en intégrant les effets de l'élévation du niveau relatif de la mer. Les 24 simulations ont été réalisées à l'aide de données numériques sur l'élévation (bathymétrie et topographie) représentatives de l'année 2018.

### 9.1 Mise à l'échelle des événements de tempête

Les six simulations pour les événements actuels ont été effectuées en supposant une phase de base de la marée de 0,9 m du niveau d'eau moyen, représentatif de la pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) au marégraphe de Belledune.

On a retenu l'évènement du 21 janvier 2000 comme base pour générer des champs synthétiques de vent et de pression atmosphérique parce que c'est celui qui a produit le plus grand résidu de niveau d'eau observé au marégraphe de Belledune. De plus, l'évènement du 21 janvier 2000 est largement considéré comme étant l'un des plus importants dans la région et est souvent choisi comme référence pour l'évaluation des aléas (Environnement Canada, 2006; Robichaud et coll., 2011). Il convient toutefois de noter que l'évènement du 21 janvier 2000 a coïncidé avec des conditions de glace de mer qui ne sont pas intégrées dans les simulations d'ondes de tempête synthétiques à l'échelle régionale ou communautaire.

En utilisant l'évènement du 21 janvier 2000 comme base, on a ajusté les vitesses du vent de façon itérative jusqu'à ce que le modèle régional produise des niveaux d'eau maximaux à proximité du marégraphe de Belledune coïncidant avec ceux indiqués dans le tableau 11. Après avoir obtenu des simulations régionales appropriées pour les six événements d'aléa d'onde de tempête, on a réalisé la modélisation à l'échelle communautaire pour simuler les inondations côtières dans la Péninsule acadienne.

## 9.2 Modélisation de l'élévation du niveau relatif de la mer

Chaque événement synthétique d'onde de tempête, dont les probabilités de dépassement annuel sont énumérées dans le tableau 11, a été simulé pour trois scénarios d'élévation du niveau relatif de la mer, comme décrit à la section 4.8. On a intégré l'élévation du niveau relatif de la mer dans le modèle en ajustant la bathymétrie et la topographie du modèle. Pour les événements futurs d'élévation du niveau de la mer, les forçages du vent et de la pression atmosphérique appliqués pour les ondes de tempête synthétiques étaient identiques à ceux des événements actuels de niveau de la mer décrits dans la section 9.1. Cette approche suppose qu'il n'y a aucun changement dans les distributions de probabilité des valeurs extrêmes du vent et de la pression atmosphérique sur les horizons temporels associés aux scénarios d'élévation du niveau de la mer. Comme indiqué dans Greenan et coll. (2018), on n'a pas trouvé de tendances importantes dans les vents et l'activité des tempêtes pour la plupart des zones marines du Canada en raison, notamment, des données limitées et de la variabilité naturelle. Les éléments de preuve indiquent une modeste diminution prévue des futures vitesses des vents dans le Canada atlantique; toutefois, les résultats sont présentés avec un faible degré de confiance.

## 9.3 Résultats

Les résultats de la modélisation hydrodynamique renseignent sur l'étendue des inondations, les hauteurs des crues et les vitesses du débit. Ils fournissent aussi des informations sur les variations spatiales et temporelles (le mouvement des eaux de crue sur la terre ferme pendant l'onde de tempête et la durée de l'inondation). Les annexes D à F présentent des figures résumant les résultats du modèle :

- Aléa d'inondation dans les conditions actuelles (annexe D);
- Aléa d'inondation dans des conditions futures tenant compte de l'élévation potentielle du niveau de la mer (annexe E);
- Aléas liés au débit dans les conditions actuelles et les conditions futures tenant compte de l'élévation potentielle du niveau de la mer (annexe F).

Les valeurs maximales indiquées dans les annexes D, E et F sont les valeurs maximales rencontrées pendant la durée des simulations, à l'exclusion des 24 premières heures de la simulation, qui ont été écartées (le rodage du modèle). Toutes les simulations d'événements synthétiques ont été lancées environ trois jours avant l'onde maximale. Comme pour le processus d'étalonnage décrit dans la section 7.3, on a supposé qu'une hauteur de crue de 5 cm représentait un seuil inférieur approprié à partir duquel on pouvait extraire les paramètres d'aléa d'inondation tels que la hauteur de crue et l'étendue de l'inondation. Les hauteurs maximales de crues inférieures à 5 cm n'ont donc pas été prises en compte pour évaluer l'aléa d'inondation.

### 9.3.1 Aléa d'inondation actuel

#### 9.3.1.1 Maisonnette

Les résultats montrent que certains bâtiments et infrastructures sont exposés à des aléas d'inondation lors d'ondes de tempête courantes ayant des probabilités de dépassement annuel de 50 % et 20 %. Cependant, l'exposition aux aléas d'inondation est limitée aux bâtiments jouxtant la côte. Pour des événements plus importants et plus rares (probabilité de dépassement annuel < 10 %), les résultats du modèle indiquent une inondation de la route 303, à l'ouest (et à proximité) de l'intersection avec la route 320 (figure 39), ainsi qu'une inondation plus étendue des infrastructures côtières. De plus, les résultats du modèle pour l'onde

de tempête à la probabilité de dépassement annuel de 1 % indiquent une inondation de la route 303 à l'est de l'intersection avec le chemin Olivier.

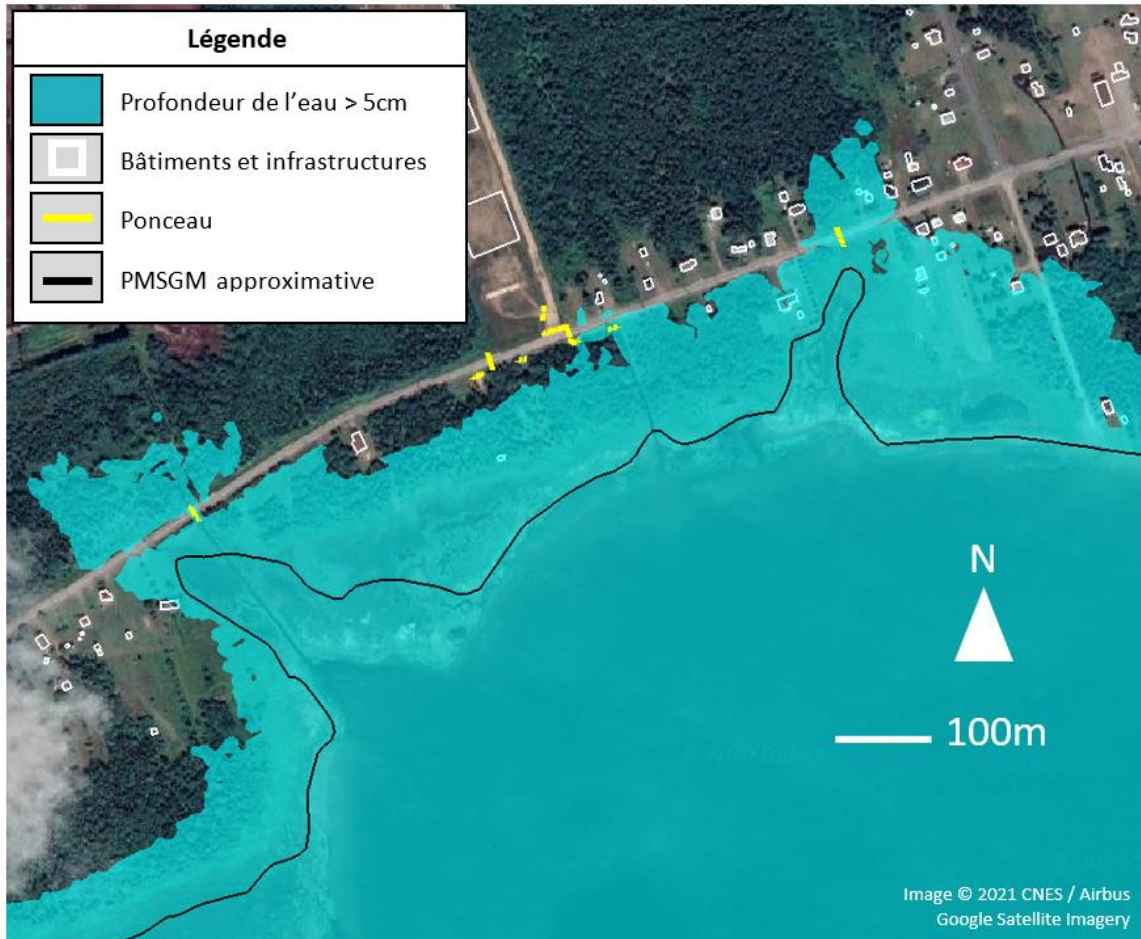


Figure 39. Aléa d'inondation causé par l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 10 % à Maisonnette, près de la route 303 à l'ouest de l'intersection avec la route 320.

### 9.3.1.2 Caraquet

Les résultats du modèle indiquent que l'infrastructure côtière de Caraquet n'est généralement pas exposée aux aléas d'inondation due à une onde de tempête pour des évènements plus petits, et plus fréquents, que celui dont la probabilité de dépassement annuel est de 10 %. D'après les résultats du modèle, les bâtiments et les infrastructures sont exposés à des aléas d'inondation pour les évènements dont la probabilité de dépassement annuel est inférieure ou égale à 10 %. Cependant, l'exposition aux aléas d'inondation est localisée dans la partie est du port de Caraquet, ainsi que sur la route 145 à l'est de l'intersection avec la rue de la Saline.

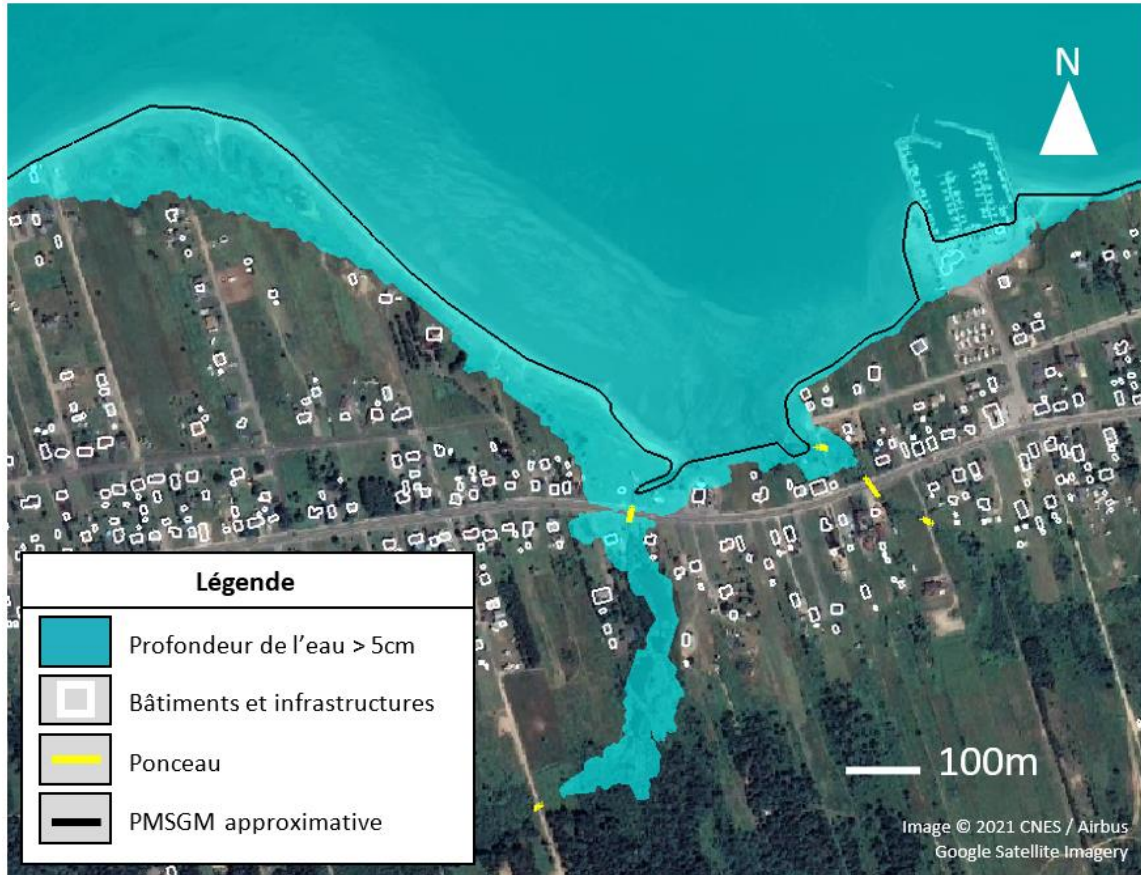


Figure 40. Aléa d'inondation causé par l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % à Caraquet, près de la route 145 à l'est de l'intersection avec la rue de la Saline.

### 9.3.1.3 Bas-Caraquet

Les résultats du modèle indiquent que les évènements courants, tels que l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 50 %, provoquent des inondations sur la route 145 à l'est de Bas-Caraquet, près du pont-jetée/de la traversée de pont (Figure 41). Pour l'évènement à la probabilité de dépassement annuel de 50 %, les résultats montrent également que les infrastructures sont exposées aux aléas d'inondation près du pont-jetée/de la traversée de pont de la route 145 ainsi que de la marina de Bas-Caraquet. D'après les résultats pour les évènements plus importants et plus rares, les infrastructures jouxtant la côte sont exposées aux aléas d'inondation. Les résultats pour les évènements ayant une probabilité de dépassement annuel de 2 % et 1 % révèlent une inondation à proximité de la basse terre humide au milieu de la collectivité.

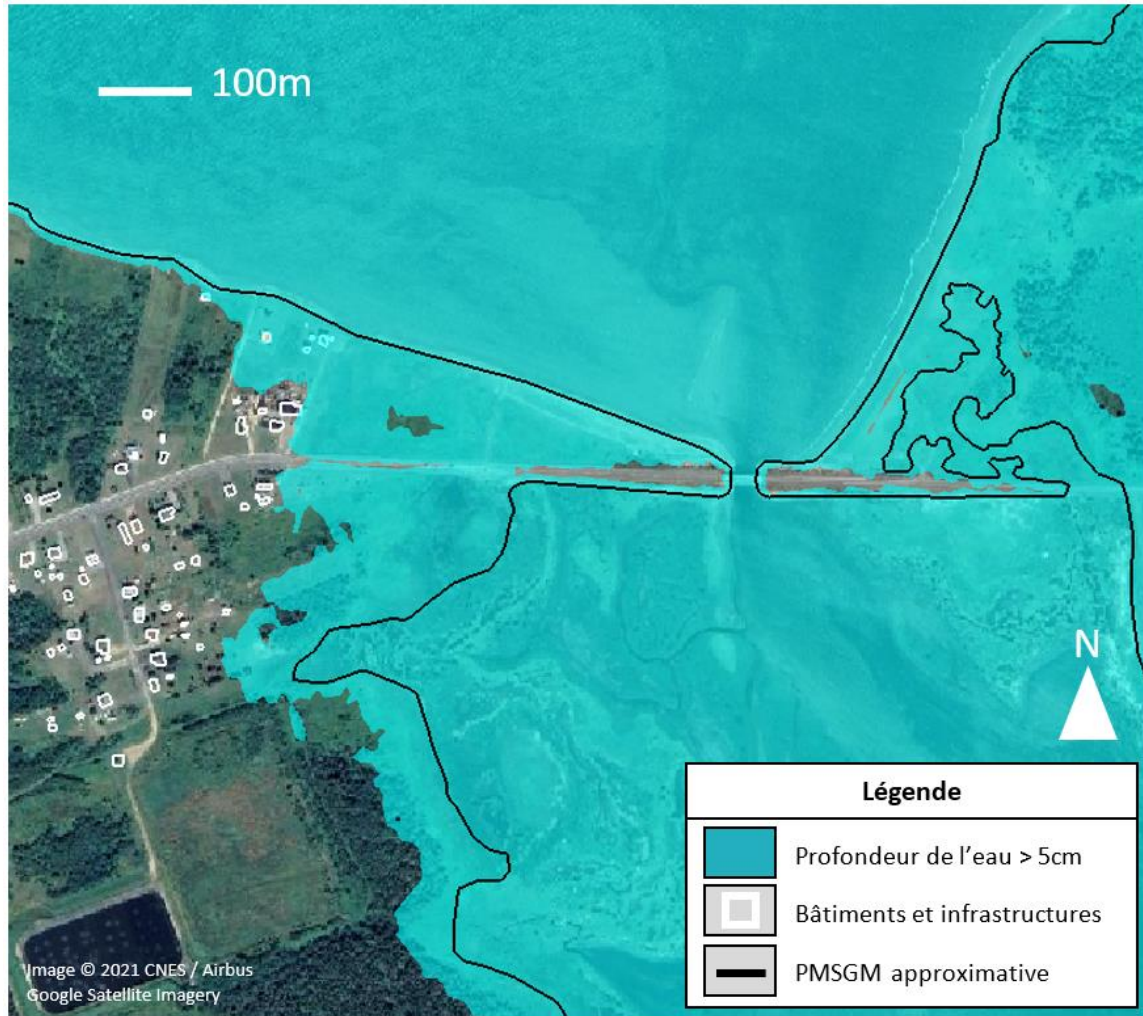


Figure 41. Aléa d'inondation causé par un évènement dont la probabilité de dépassement annuel est de 50 % près du pont-jetée/de la traversée de pont de la route 145 du côté est de Bas-Caraquet.

### 9.3.1.4 Shippagan et Pointe-Brûlée

Les résultats du modèle pour un évènement à la probabilité de dépassement annuel de 50 % indiquent une inondation dans la partie sud-est de Shippagan, y compris de la chaussée reliant Shippagan à Savoy Landing, ainsi que du boulevard J. D. Gauthier au sud-est de l'intersection avec la rue 17. Le même évènement semble produire des inondations importantes à Pointe-Brûlée, exposant les infrastructures des côtes ouest, nord et est de la péninsule à un aléa d'inondation. Pour les évènements plus importants et plus rares (probabilité de dépassement annuel < 50 %), les résultats du modèle indiquent l'inondation de certaines parties du nord-ouest de Shippagan qui jouxtent la côte, des zones situées au sud du boulevard J. D. Gauthier entre les intersections avec la rue Mallet et la rue Audet, ainsi que de la rue Pointe-Brûlée, près de l'intersection avec le boulevard J. D. Gauthier. D'après les résultats du modèle, le boulevard J. D. Gauthier est exposé à un aléa d'inondation entre les intersections avec la rue Mallet et la rue Audet pour des évènements ayant une probabilité de dépassement annuel égale ou supérieure à 10 % (figure 42). Le boulevard J. D. Gauthier est inondé dans le centre de Shippagan pour des évènements modélisés ayant une probabilité de dépassement annuel égale ou supérieure à 2 %.

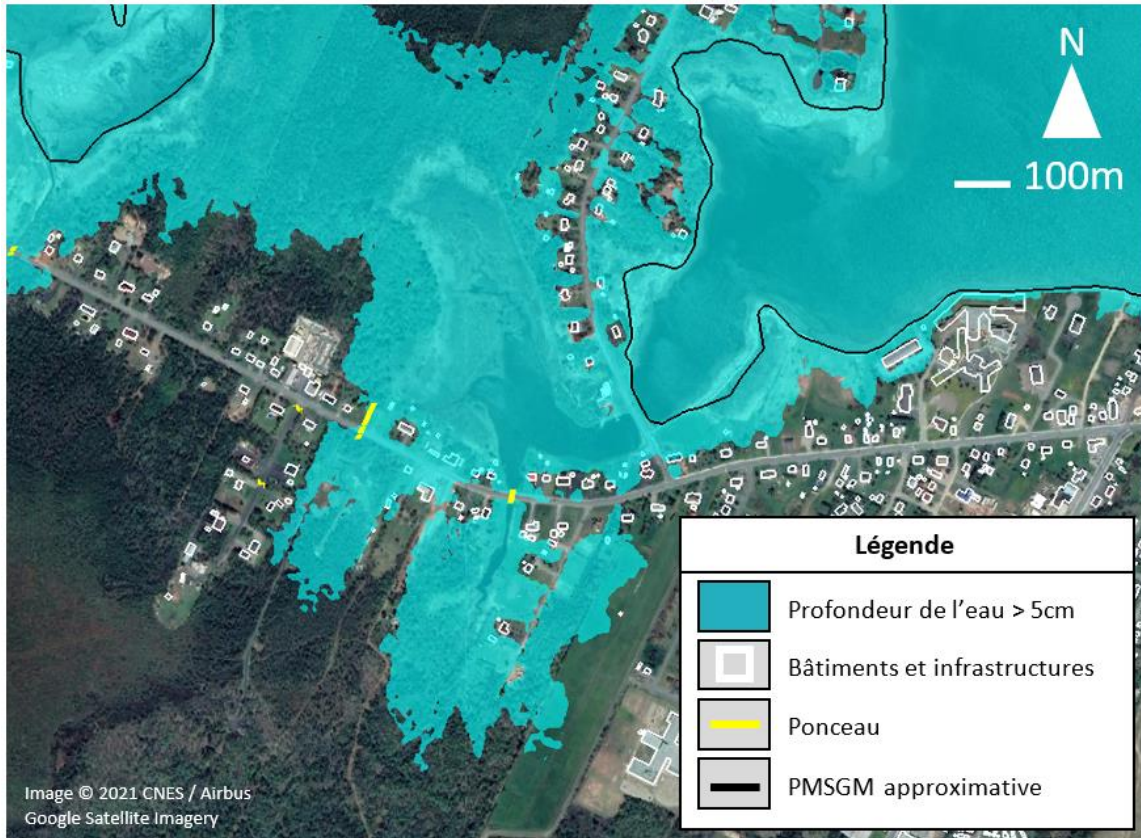


Figure 42. Aléa d'inondation causé par un évènement à la probabilité de dépassement annuel de 10 %, près de l'intersection de la rue Pointe-Brûlée et du boulevard J. D. Gauthier. Des inondations sont observées sur le boulevard J. D. Gauthier, entre les intersections avec la rue Mallet et la rue Audet.

### 9.3.1.5 Le Goulet

Les résultats du modèle pour un évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 50 % indiquent une inondation à Le Goulet, en particulier dans les zones les plus proches de la côte (les zones situées du côté de la mer de la rue Principale et de l'avenue du Portage). Pour les évènements plus importants et plus rares (probabilité de dépassement annuel < 50 %), les résultats du modèle montrent une inondation plus étendue; les bâtiments et les infrastructures situés du côté terre de la rue Principale et de l'avenue du Portage deviennent exposés aux eaux de crue. Pour l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 20 %, les résultats du modèle révèlent une inondation de la rue Principale dans la partie est de la collectivité, à l'est de l'intersection avec la rue Acadie. Pour un évènement à la probabilité de dépassement annuel de 10 %, le modèle donne une inondation de l'avenue du Portage, dans la partie ouest de la collectivité. Pour les évènements d'une probabilité de dépassement annuel de 2 % ou de 1 %, le modèle prédit une inondation importante de la rue Principale et de l'avenue du Portage (figure 43).

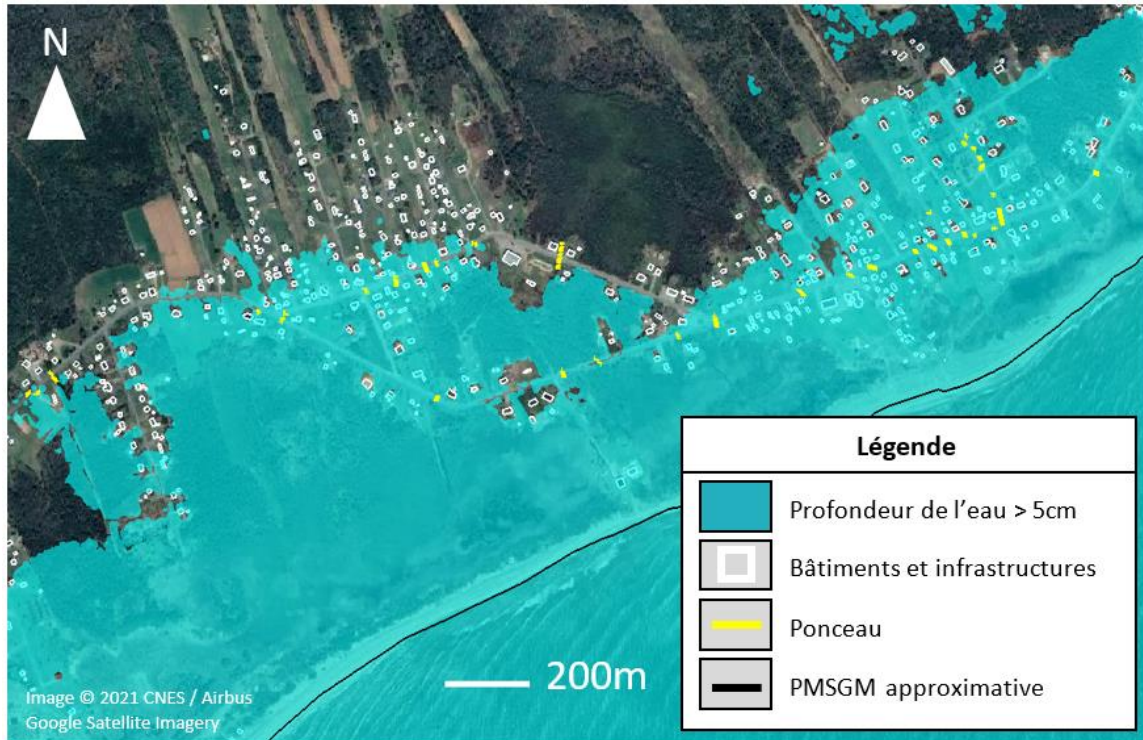


Figure 43. Aléa d'inondation causé par un évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % à Le Goulet.

### 9.3.1.6 Lamèque

Les résultats du modèle pour un évènement à la probabilité de dépassement annuel de 50 % indiquent un aléa d'inondation généralement faible à Lamèque, à l'exception de quelques inondations localisées près du port et de la partie sud de la rue du Pêcheur, là où elle arrive à la côte. Pour un évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 10 %, les résultats indiquent une inondation plus étendue près du port et de la rue du Pêcheur, ainsi qu'une certaine exposition aux aléas d'inondation pour les bâtiments adjacents à la route 313 dans la partie nord-ouest de la communauté. Les résultats du modèle pour les évènements aux probabilités de dépassement annuel de 2 % et 1 % révèlent une exposition aux aléas d'inondation pour les bâtiments adjacents à la route 113 dans la partie est de la collectivité et une inondation du pont-jetée de la route 313 reliant Lamèque à Pointe-Alexandre.

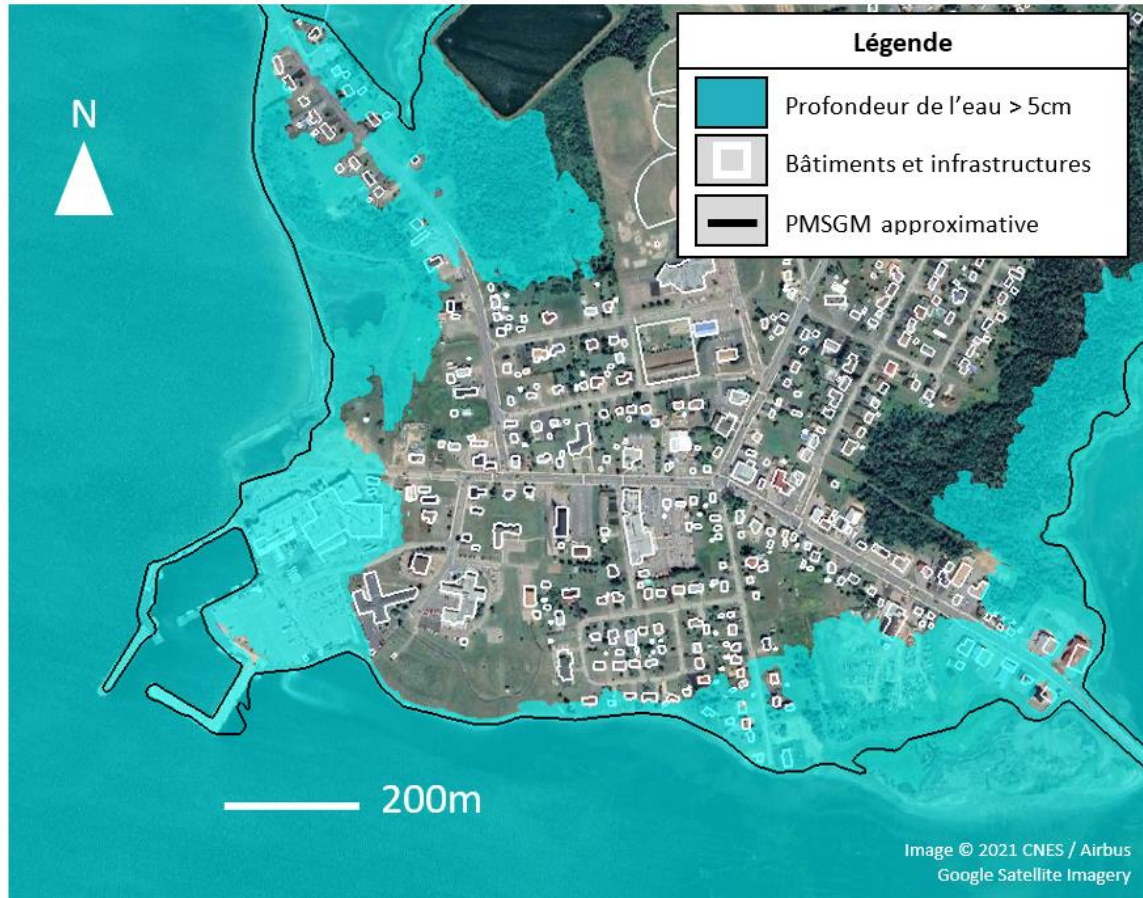


Figure 44. Aléa d'inondation causé par un évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % à Lamèque.

### 9.3.2 Prise en compte des aléas d'inondation futurs pour l'élévation du niveau de la mer

La gravité des aléas d'inondation simulés (représentés par l'étendue des inondations, les profondeurs d'eau maximales et les vitesses du débit) pour les futurs évènements liés au niveau de la mer dépassait la gravité observée pour les évènements actuels correspondants. On a comparé les étendues maximales des inondations produites par des évènements futurs et des évènements actuels (examen dans la section 9.3.1) à partir d'une observation qualitative et visuelle des résultats du modèle. Le tableau 12 présente les évènements futurs et actuels qui ont produit des étendues des inondations similaires.

Tableau 12. Évènements d'aléa d'inondation actuels et futurs qui ont produit des inondations similaires.

Collectivité	Probabilité de dépassement annuel du niveau d'eau (événement actuel)	Probabilité de dépassement annuel du niveau d'eau provoquant une étendue d'inondation maximale comparable dans les scénarios futurs du niveau de la mer		
		ENMM de 0,5 m	ENMM de 1,0 m	ENMM de 2,0 m
Maisonnette	50 %	-	-	-
	20 %	-	-	-
	10 %	-	-	-
	5 %	50 %	-	-
	2 %	20 %	-	-
	1 %	10 %	-	-
Caraquet	50 %	-	-	-
	20 %	-	-	-
	10 %	-	-	-
	5 %	50 %	-	-
	2 %	20 %	-	-
	1 %	10 %	50 %	-
Bas-Caraquet	50 %	-	-	-
	20 %	-	-	-
	10 %	-	-	-
	5 %	50 %	-	-
	2 %	20 %	-	-
	1 %	10 %	50 %	-
Shippagan et Pointe-Brûlée	50 %	-	-	-
	20 %	-	-	-
	10 %	-	-	-
	5 %	-	-	-
	2 %	20 %	-	-
	1 %	10 %	50 %	-
Le Goulet	50 %	-	-	-
	20 %	-	-	-
	10 %	-	-	-
	5 %	-	-	-
	2 %	50 %	-	-
	1 %	10 %	-	-
Lamèque	50 %	-	-	-
	20 %	-	-	-
	10 %	-	-	-
	5 %	-	-	-
	2 %	50 %	-	-
	1 %	10 %	50 %	-

\* Les tirets (-) indiquent les conditions dans lesquelles l'inondation associée à l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 50 % (et plus) pour une condition donnée de l'élévation du niveau mondial de la mer a dépassé l'inondation observée pour l'évènement actuel correspondant.

Comme on le voit dans le tableau 12, l'évènement d'aléa d'inondation à la probabilité de dépassement annuel la plus élevée examiné dans cette étude pour le futur scénario d'élévation de 0,5 m du niveau mondial de la mer (probabilité de dépassement annuel de 50 % – élévation du niveau mondial de la mer de 0,5 m) a produit plus d'inondations que l'évènement actuel présentant une probabilité de dépassement annuel de 10 % dans tous les emplacements. Les étendues maximales des inondations modélisées pour l'évènement actuel ayant une probabilité de dépassement annuel de 5 % étaient comparables à un futur évènement à la probabilité de dépassement annuel de 50 % représentant une élévation de 0,5 m du niveau mondial de la mer à Maisonnette, Caraquet et Bas-Caraquet. Les étendues maximales des inondations modélisées pour l'évènement actuel avec une probabilité de dépassement annuel de 2 % étaient comparables à un évènement futur à la probabilité de dépassement annuel de 20 % représentant une élévation de 0,5 m du niveau mondial de la mer à Maisonnette, Caraquet, Bas-Caraquet, Shippagan et Pointe-Brûlée. À Le Goulet et à Lamèque, les étendues maximales des inondations modélisées pour l'évènement actuel ayant une probabilité de dépassement annuel de 2 % étaient comparables à un évènement futur à la probabilité de dépassement annuel de 50 % représentant une élévation de 0,5 m du niveau mondial de la mer. Dans toutes les collectivités incluses dans cette étude, les étendues maximales des inondations modélisées pour l'évènement actuel avec une probabilité de dépassement annuel de 1 % étaient comparables à un évènement futur à la probabilité de dépassement annuel de 10 % représentant une élévation de 0,5 m du niveau mondial de la mer. À Caraquet, Bas-Caraquet, Shippagan, Pointe-Brûlée et Lamèque, les étendues maximales des inondations modélisées pour l'évènement actuel ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % étaient également comparables à un évènement futur à la probabilité de dépassement annuel de 50 % représentant une élévation de 1,0 m du niveau mondial de la mer.

### 9.3.3 Aléa de débit

On a comparé les résultats du modèle à des paramètres de l'aléa de débit concernant la sécurité des piétons et les dommages aux bâtiments. Cox et coll. (2010) présentent les critères de sécurité des piétons (c.-à-d. les seuils de stabilité) en fonction du produit profondeur-vitesse (PV). Dans leur rapport, ils décrivent les critères de la sécurité pour trois groupes : les nourrissons, les jeunes enfants et les personnes fragiles/âgées; les enfants; les adultes. La FEMA (2021) présente des critères pour les dommages structuraux en tant que fonction du flux de quantité de mouvement (profondeur multipliée par la vitesse au carré, ou  $PV^2$ ) pour divers types de construction de bâtiments. Il est important de noter que les critères présentés par la FEMA (2021) sont destinés à faciliter les analyses du débit généré par les tsunamis. Cependant, les critères ont été adoptés pour étayer les analyses dans cette étude, où les flux sont générés par les ondes de tempête. Il faut également souligner que les effets des vagues n'ont pas été pris en compte dans la modélisation des aléas, ce qui pourrait induire des aléas supplémentaires.

### 9.3.3.1 Sécurité des piétons

La liste suivante récapitule les critères de sécurité décrits dans Cox et coll. (2010) :

- Nourrissons, jeunes enfants et personnes fragiles/âgées :
  - $PV > 0 \text{ m}^2/\text{s}$  : Aléa extrême
- Enfants :
  - $0 \text{ m}^2/\text{s} < PV < 0,4 \text{ m}^2/\text{s}$  : Aléa faible
  - $0,4 \text{ m}^2/\text{s} < PV < 0,6 \text{ m}^2/\text{s}$  : Aléa important
  - $PV > 0,6 \text{ m}^2/\text{s}$  : Aléa extrême
- Adultes :
  - $0 \text{ m}^2/\text{s} < PV < 0,6 \text{ m}^2/\text{s}$  : Aléa faible
  - $0,6 \text{ m}^2/\text{s} < PV < 0,8 \text{ m}^2/\text{s}$  : Aléa modéré
  - $0,8 \text{ m}^2/\text{s} < PV < 1,2 \text{ m}^2/\text{s}$  : Aléa important
  - $PV > 1,2 \text{ m}^2/\text{s}$  : Aléa extrême

Les valeurs maximales du produit profondeur-vitesse ont été extraites des résultats du modèle pour l'évènement actuel ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % et on les a comparées aux critères énumérés ci-dessus pour interpréter l'aléa potentiel induit par le débit. De manière générale, les résultats du modèle indiquent que l'aléa induit par le débit pour les adultes valides et les enfants plus âgés est assez faible dans les collectivités incluses dans cette étude. Dans la plupart des endroits, le produit profondeur-vitesse ne dépassait pas  $0,4 \text{ m}^2/\text{s}$ , ce qui représente un faible aléa pour les enfants et les adultes, mais un aléa extrême pour les nourrissons, les jeunes enfants et les personnes fragiles/âgées. Il convient de noter que tout produit profondeur-vitesse dépassant  $0 \text{ m}^2/\text{s}$  représente un aléa extrême pour les nourrissons, les jeunes enfants et les personnes fragiles/âgées. Il faut préciser que les effets des vagues n'ont pas été pris en compte dans la modélisation des aléas, ce qui pourrait induire un aléa supplémentaire pour la stabilité.

Les résultats du modèle indiquent trois endroits où les débits peuvent dépasser un « aléa faible » pour la stabilité des adultes dans le cadre des évènements actuels testés : le pont-jetée/la traversée de pont de la route 145 du côté est de Bas-Caraquet (Figure 45), le pont-jetée de la route 113 reliant Shippagan à Savoy Landing et le pont-jetée de la route 313 reliant Lamèque à Pointe-Alexandre. Les valeurs maximales du produit profondeur-vitesse pour ces trois emplacements sont présentées en détail dans l'annexe F pour chaque évènement actuel. Pour interpréter les résultats présentés à l'annexe F, il est important de noter que les valeurs du produit profondeur-vitesse indiquées à proximité des traversées de pont ou des ponceaux indiquent le produit profondeur-vitesse du débit sous le pont ou dans le ponceau, et non sur la route.

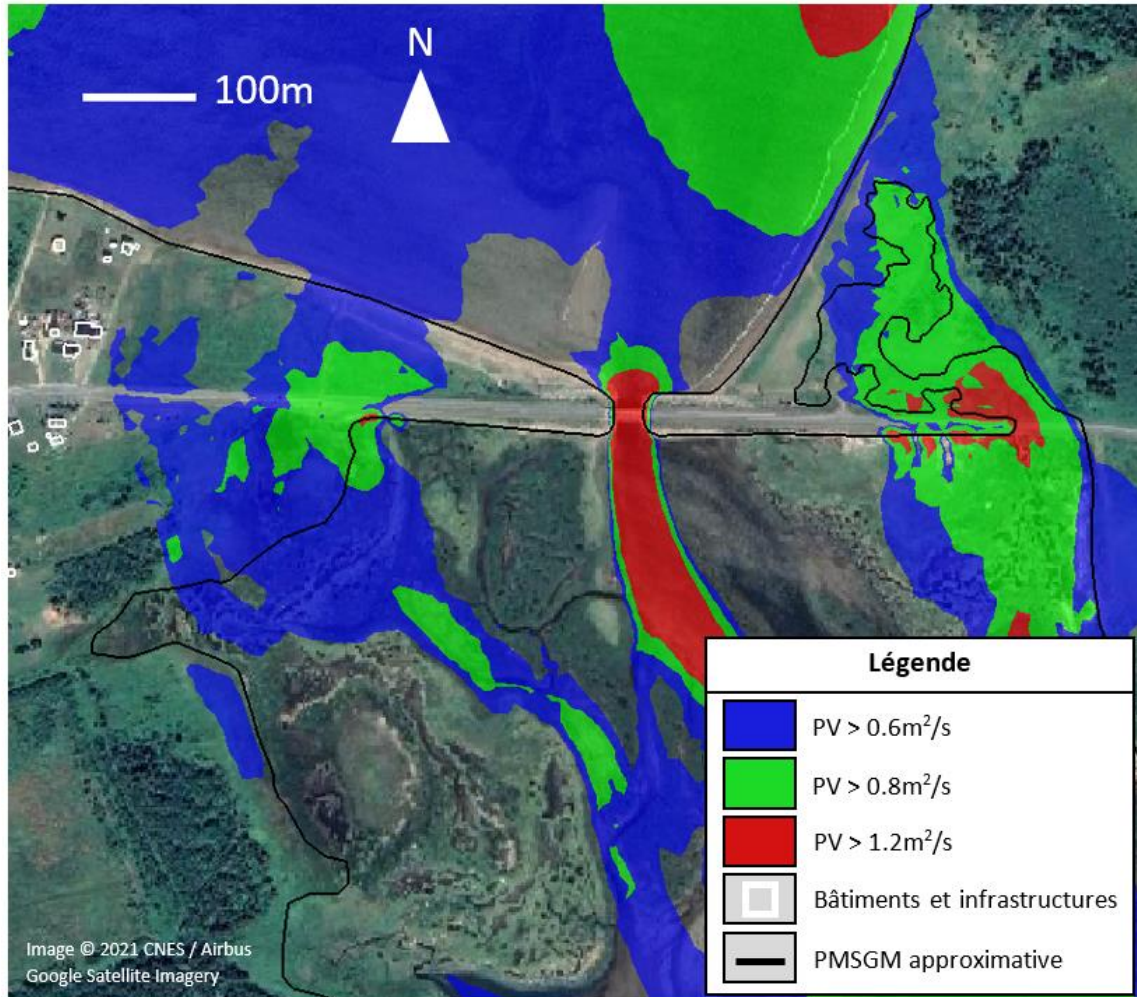


Figure 45. Produit profondeur-vitesse pour l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % près du pont-jetée/de la traversée de pont de la route 145 du côté est de Bas-Caraquet.

### 9.3.3.2 Dommages structuraux

Si l'on adopte les critères de conception sismique pré-code (c.-à-d. les critères de conception les plus prudents) de la FEMA (2021), les flux qui génèrent un flux de quantité de mouvement de plus de 7,0 m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup> et 0,45 m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup> peuvent causer des dommages structuraux aux bâtiments à ossature de bois et aux maisons mobiles, respectivement.

Les valeurs maximales du flux de quantité de mouvement ont été extraites des résultats modélisés pour l'évènement actuel ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % et pour l'évènement futur ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % représentant une élévation de 2,0 m du niveau mondial de la mer. L'évènement actuel à la probabilité de dépassement annuel de 1 % n'a pas produit de flux de quantité de mouvement dépassant 7,0 m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>, dans aucune des collectivités à l'étude. L'évènement futur ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % représentant une élévation de 2,0 m du niveau mondial de la mer a produit un flux de quantité de mouvement dépassant 7,0 m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup> à un seul endroit, au-dessus du pont-jetée reliant Shippagan à Savoy Landing. Les résultats du modèle permettent donc de penser que les évènements actuels et futurs d'onde de tempête ne produisent probablement pas de débits

capables de causer des dommages structuraux aux bâtiments à ossature de bois. Bien entendu, il ne faut pas confondre ces dommages avec ceux liés à la hauteur de crue, à l'exposition aux eaux de crue ou à l'exposition aux vagues (non inclus dans la modélisation des aléas).

L'évènement actuel ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % a produit un flux de quantité de mouvement dépassant  $0,45 \text{ m}^3/\text{s}^2$  à trois endroits : le pont-jetée/la traversée de pont de la route 145 du côté est de Bas-Caraquet (figure 46), le pont-jetée de la route 113 reliant Shippagan à Savoy Landing et le pont-jetée de la route 313 reliant Lamèque à Pointe-Alexandre. L'évènement futur ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % représentant une élévation de 2,0 m du niveau mondial de la mer a produit un flux de quantité de mouvement dépassant  $0,45 \text{ m}^3/\text{s}^2$  dans des parties de Pointe-Brûlée, Shippagan, Le Goulet, et Lamèque. Ces résultats sont présentés à l'annexe F. D'après les résultats du modèle, dans les conditions actuelles du niveau de la mer, la simulation de l'inondation des terres due à une onde de tempête ne produit pas de débits capables de causer des dommages structuraux aux maisons mobiles (sauf dans certaines zones localisées mentionnées ci-dessus). Cependant, le débit pourrait endommager les maisons mobiles dans des conditions futures.

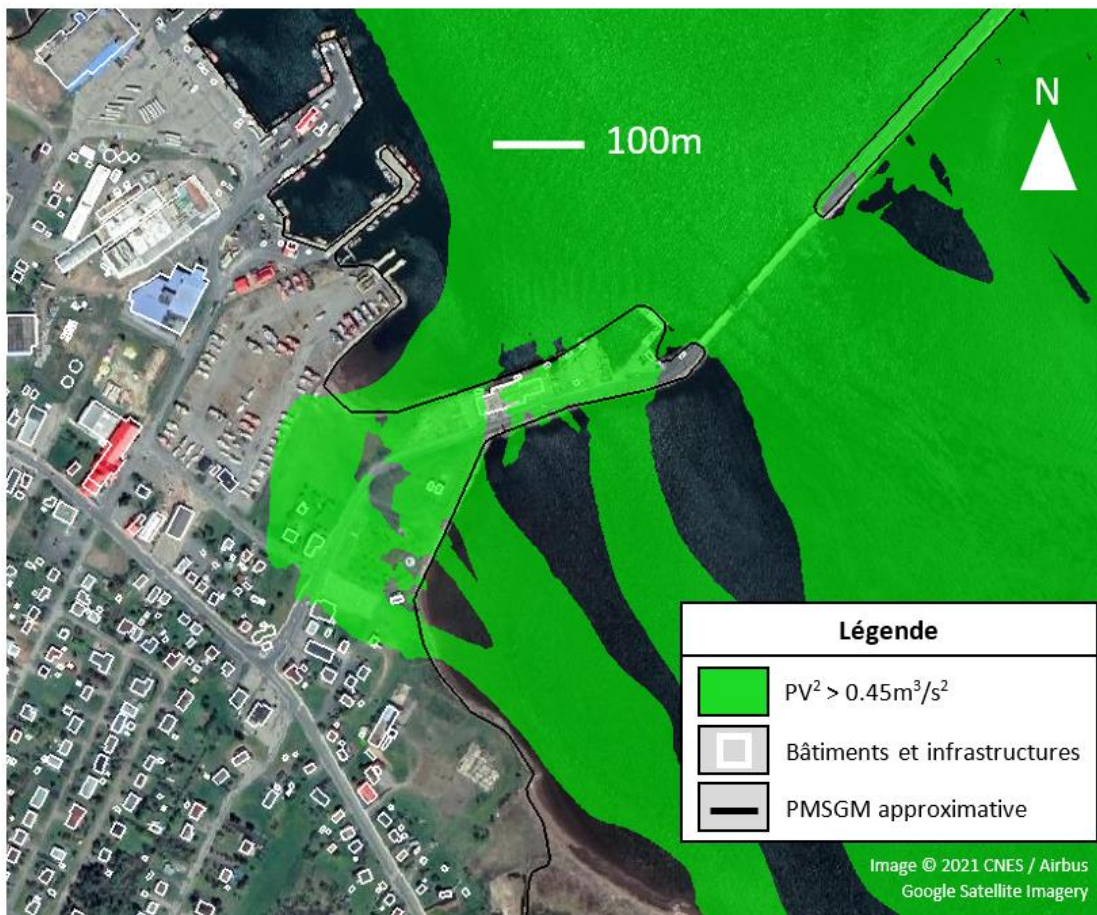


Figure 46. Flux de quantité de mouvement dépassant  $0,45 \text{ m}^3/\text{s}^2$  pour l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % près du pont-jetée de la route 113 reliant Shippagan à Savoy Landing.

## 10 Discussion

### 10.1 Comparaison avec la modélisation en baignoire

On a comparé les pics de crue estimés par la modélisation hydrodynamique numérique aux résultats de la modélisation en baignoire (voir la section 3) présentés dans Robichaud et coll. (2011) et Aubé et coll. (2016).

#### 10.1.1 Le Goulet

Robichaud et coll. (2011) montrent une carte indiquant l'étendue de l'inondation coïncidant avec une élévation de la surface de l'eau de 2,4 m (CGVD28). Ils estiment que le niveau de crue est représentatif d'une onde de tempête qui se produit une fois tous les 100 ans (probabilité de dépassement annuel de 1 %) en 2000 ou d'une onde de tempête qui se produit une fois tous les 50 ans (probabilité de dépassement annuel 2 %) en 2025. On a donc comparé la carte des inondations élaborée par Robichaud et coll. (2011) aux événements d'aléas actuels ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % et de 2 % modélisés dans cette étude. La figure 47 représente une comparaison entre la carte des inondations produite par Robichaud et coll. (2011) et les pics de crue estimés par le modèle à l'échelle communautaire. Il est important de noter que l'étendue de l'inondation montrée dans Robichaud et coll. (2011) utilise une topographie représentative d'une condition de l'année 2009, alors que les simulations d'événements synthétiques dans cette étude utilisent une topographie représentative de l'année 2018.

Comme l'illustre la figure 47, l'étendue de l'inondation estimée dans Robichaud et coll. (2011) correspond étroitement à l'étendue de l'inondation modélisée pour l'événement ayant une probabilité de dépassement annuel de 2 %. L'étendue de l'inondation modélisée pour l'événement ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % dépasse celle qui est proposée dans Robichaud et coll. (2011); cela est cependant prévisible compte tenu des différences dans les années représentatives.

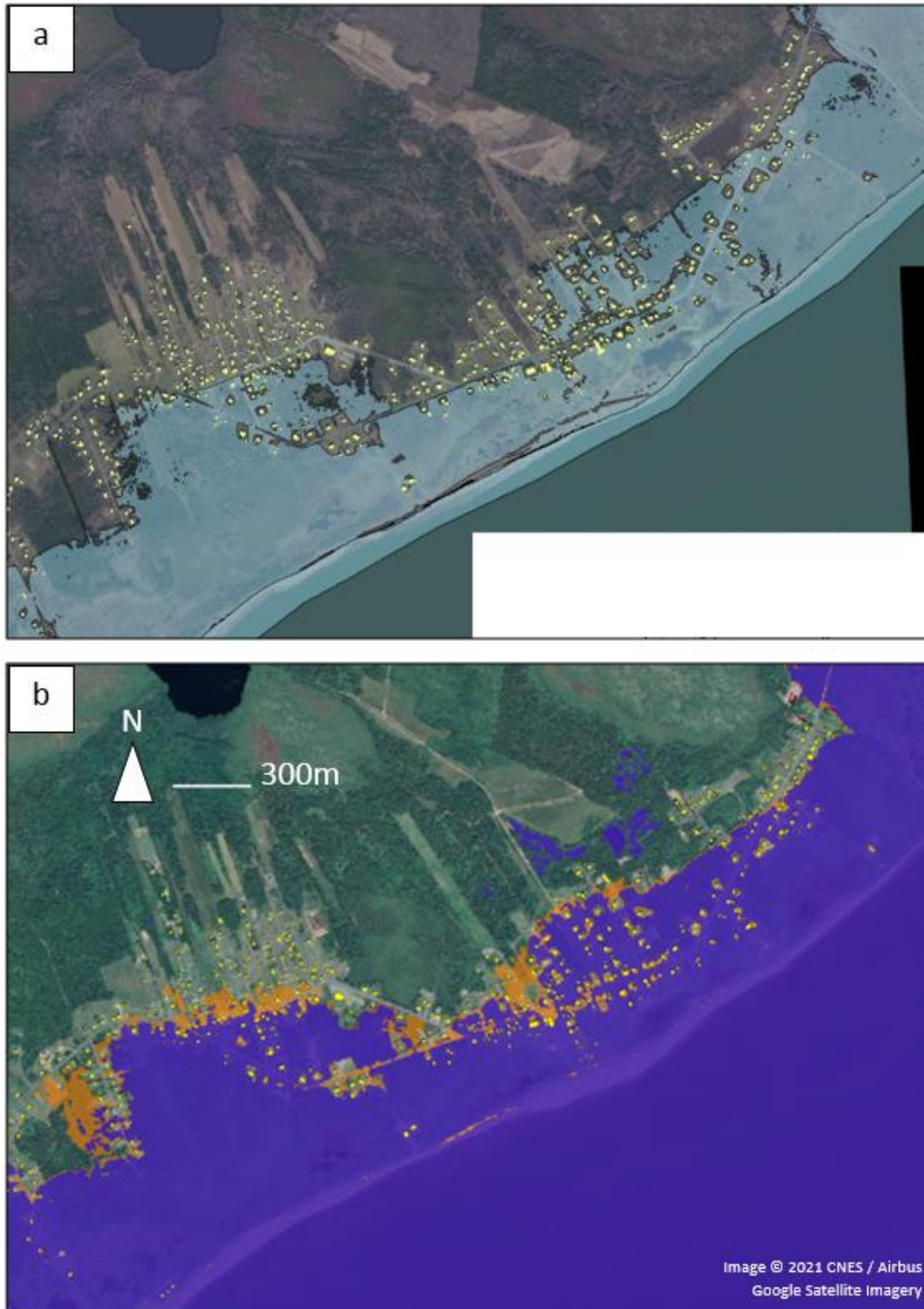


Figure 47. Comparaison des étendues des inondations estimées à partir a) de la modélisation en baignoire réalisée par Robichaud et coll. (2011) et b) de la modélisation hydrodynamique numérique pour Le Goulet. La zone ombrée en bleu dans a) indique l'étendue de l'inondation estimée pour un évènement qui se produit tous les 100 ans (probabilité de dépassement annuel de 1 %) en 2000 ou tous les 50 ans (probabilité de dépassement annuel de 2 %) en 2025. La zone ombrée en violet dans b) indique l'étendue de l'inondation d'un évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 2 % dans des conditions approximativement actuelles, et la zone ombrée en orange, celle d'un évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % dans des conditions approximativement actuelles.

## 10.1.2 Shippagan

Robichaud et coll. (2011) montrent une carte des inondations indiquant l'étendue de l'inondation coïncidant avec une élévation de la surface de l'eau de 2,4 m (CGVD28) pour Shippagan. Ils estiment que le niveau de crue est représentatif d'une onde de tempête qui se produit une fois tous les 10 ans (probabilité de dépassement annuel de 10 %) en 2000 ou tous les 5 ans (probabilité de dépassement annuel de 20 %) en 2025. On a donc comparé la carte des inondations élaborée par Robichaud et coll. (2011) aux événements d'aléas actuels ayant une probabilité de dépassement annuel de 10 % et de 20 % modélisés dans cette étude. La figure 48 représente une comparaison entre la carte des inondations produite par Robichaud et coll. (2011) et les pics de crue estimés par le modèle à l'échelle communautaire.

L'étendue de l'inondation ayant une probabilité de dépassement annuel de 10 % estimée par Robichaud et coll. (2011) selon l'approche de modélisation en baignoire se situe quelque part entre les étendues des inondations modélisées hydrodynamiquement pour les événements ayant une probabilité de dépassement annuel de 10 % et de 20 % dans la partie est de Shippagan. Le long de la rue Pointe-Brûlée (dans la partie ouest de Shippagan), l'étendue de l'inondation estimée par Robichaud et coll. (2011) ressemble de près à l'étendue de l'inondation modélisée hydrodynamiquement pour l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 20 % et est dépassée par l'étendue de l'inondation modélisée dynamiquement pour l'évènement à la probabilité de dépassement annuel de 10 %. Cependant, l'étendue de l'inondation estimée par Robichaud et coll. (2011) correspond mieux à l'étendue de l'inondation modélisée dynamiquement pour l'évènement présentant une probabilité de dépassement annuel de 10 % pour les zones de la partie ouest de Shippagan qui se trouvent au sud du boulevard J. D. Gauthier.

Les étendues des inondations modélisées de manière hydrodynamique pour les événements ayant une probabilité de dépassement annuel de 10 % et de 20 % sont toutes deux plus vastes que celle proposée par Robichaud et coll. (2011) dans une petite zone à l'ouest de la marina. Cela pourrait s'expliquer par les différences de résolution entre la modélisation en baignoire et la modélisation hydrodynamique. La modélisation en baignoire est moins exigeante en calcul que la modélisation hydrodynamique et se prête donc mieux à l'étude à résolution fine des hauteurs des crues et des étendues des inondations. Il est assez simple d'inclure des éléments à résolution fine, tels que des ouvrages longitudinaux et d'autres structures, dans la modélisation en baignoire, mais cette inclusion peut être très exigeante en puissance de calcul pour la modélisation hydrodynamique. Robichaud et coll. (2011) ont pu modéliser l'inondation tout en conservant des détails d'élévation à résolution fine. Cependant, la modélisation hydrodynamique de cette étude a été réalisée à l'aide d'un maillage de calcul de 10 m de résolution, ce qui a eu pour effet de « lisser » artificiellement certaines caractéristiques très détaillées dans le domaine du modèle. On trouve une promenade et un certain renforcement structural le long du littoral à l'emplacement en question. On suppose que la surestimation de la crue produite par le modèle hydrodynamique est causée par un « lissage » artificiel de ces caractéristiques structurales dans le domaine du modèle. De ce fait, pour cet emplacement et cette situation, l'approche de modélisation en baignoire fournit probablement une meilleure estimation de l'étendue de l'inondation que l'approche de modélisation hydrodynamique. Cependant, la modélisation en baignoire ne permet pas d'évaluer la propagation spatiale et temporelle des inondations, la vitesse du débit (et les paramètres des aléas de débit) et la durée des inondations.

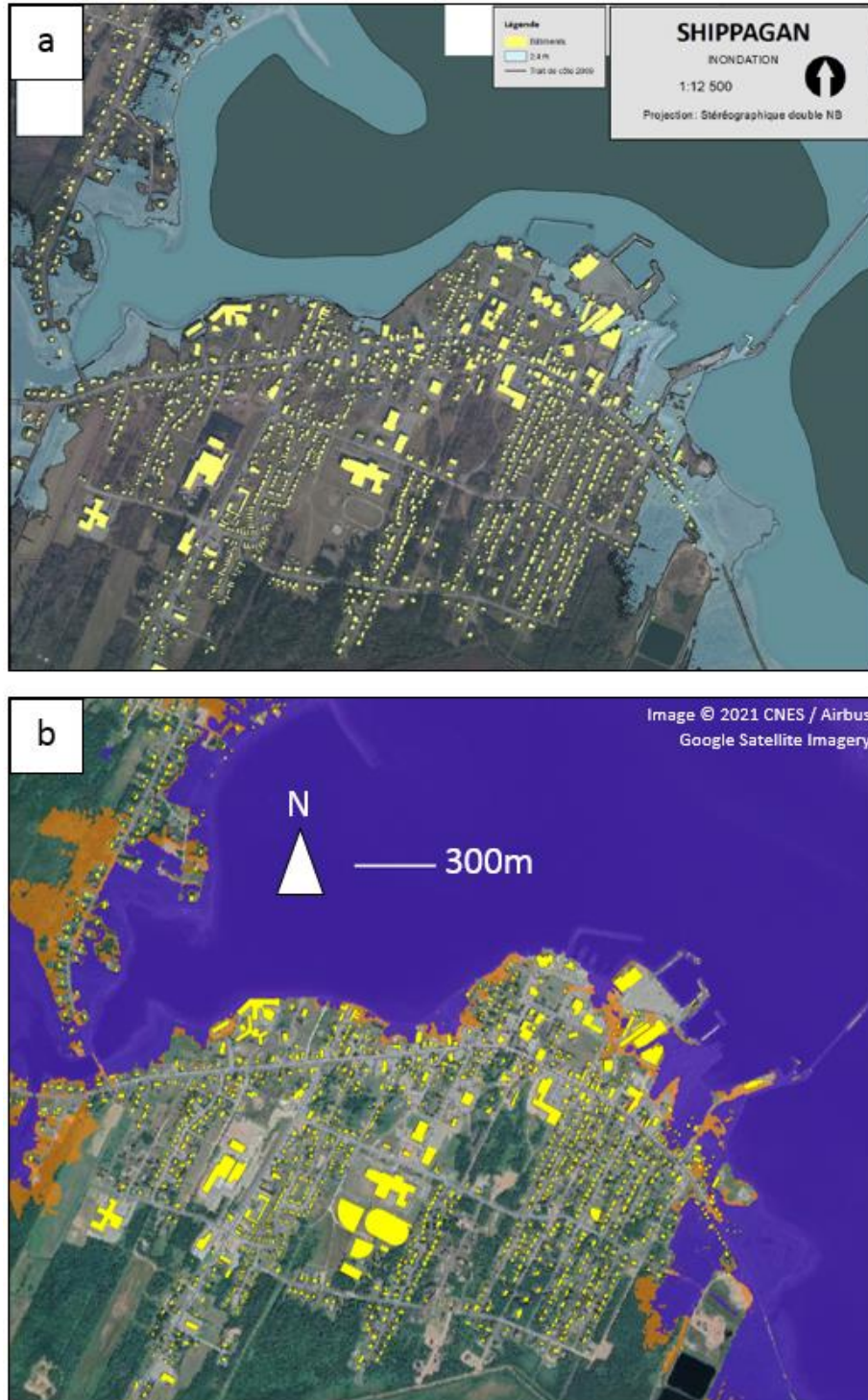


Figure 48. Comparaison des étendues des inondations estimées à partir a) de la modélisation en baignoire réalisée par Robichaud et coll. (2011) et b) de la modélisation hydrodynamique numérique de Shippagan. La zone ombrée en bleu dans a) indique l'étendue de l'inondation estimée pour un évènement qui se produit tous les 10 ans (probabilité de dépassement annuel de 10 %) en 2000 ou un évènement qui se produit tous les 5 ans (probabilité de dépassement annuel de 20 %) en 2025. La zone ombrée en violet dans b) indique l'étendue de l'inondation d'un évènement à la probabilité de dépassement annuel de 20 % dans des conditions approximativement actuelles, et la zone ombrée en orange, celle d'un évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 10 % dans des conditions approximativement actuelles.

### 10.1.3 Bas-Caraquet

Robichaud et coll. (2011) montrent une carte des inondations indiquant l'étendue de l'inondation coïncidant avec une élévation de la surface de l'eau de 2,4 m (CGVD28) pour Bas-Caraquet. Ils estiment que le niveau de crue est représentatif d'une onde de tempête qui se produit une fois tous les 10 ans (probabilité de dépassement annuel de 10 %) en 2000 ou tous les 5 ans (probabilité de dépassement annuel de 20 %) en 2025. On a donc comparé la carte des inondations élaborée par Robichaud et coll. (2011) aux événements d'aléas actuels ayant une probabilité de dépassement annuel de 10 % et de 20 % modélisés dans cette étude (figure 49). Robichaud et coll. (2011) montrent également que l'étendue de l'inondation coïncide avec un niveau de crue de 3,3 m (CGVD28). Ils indiquent que ce niveau de crue est représentatif d'une onde de tempête qui se produit tous les 50 ans (probabilité de dépassement annuel de 2 %) en 2085 ou tous les 10 ans (probabilité de dépassement annuel de 10 %) en 2100. Cependant, l'origine des estimations de l'élévation du niveau relatif de la mer utilisées dans Robichaud et coll. (2011) diffèrait de celles utilisées dans cette étude, de sorte qu'on n'a pas tenté de comparer les résultats du modèle hydrodynamique au niveau de crue de 3,3 m. Les estimations de l'élévation du niveau relatif de la mer utilisées dans Robichaud et coll. (2011) étaient fondées sur le quatrième rapport d'évaluation (RE4) du GIEC (Daigle, 2011; GIEC, 2007) et les estimations de l'élévation du niveau relatif de la mer qui ont été utilisées dans cette étude, sur le RE5 du GIEC. De manière générale, les résultats de la modélisation en baignoire concordent bien avec ceux de la modélisation hydrodynamique à Bas-Caraquet. Par conséquent, les approches de modélisation hydrodynamique et de modélisation en baignoire semblent convenir aussi bien pour estimer l'étendue de l'inondation. Cependant, là encore, la modélisation en baignoire ne permet pas d'évaluer la propagation spatiale et temporelle des inondations, la vitesse du débit (et les paramètres des aléas de débit) et la durée des inondations.

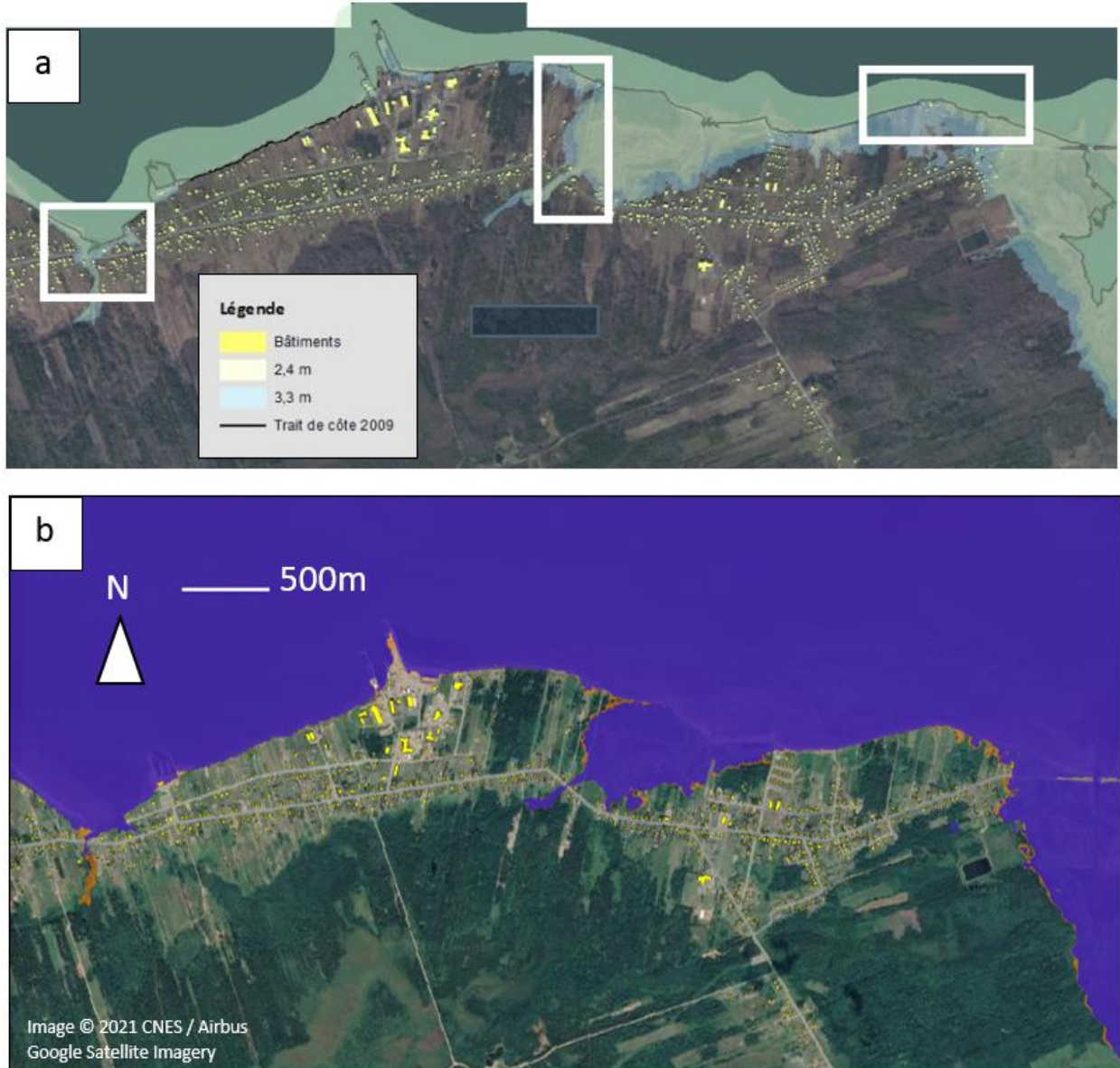


Figure 49. Comparaison des étendues des inondations estimées à partir a) de la modélisation en baignoire réalisée par Robichaud et coll. (2011) et b) de la modélisation hydrodynamique numérique de Bas-Caraquet. La zone ombrée en beige dans a) indique l'étendue de l'inondation estimée pour un évènement qui se produit tous les 10 ans (probabilité de dépassement annuel de 10 %) en 2000 ou tous les 5 ans (probabilité de dépassement annuel de 20 %) en 2025. La zone ombrée en violet dans b) indique l'étendue de l'inondation d'un évènement à la probabilité de dépassement annuel de 20 % dans des conditions approximativement actuelles, et la zone ombrée en orange, celle d'un évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 10 % dans des conditions approximativement actuelles.

#### 10.1.4 Maisonnette

Aubé et coll. (2016) montrent une carte des inondations indiquant l'étendue de l'inondation coïncidant avec une élévation de la surface de l'eau de 3,0 m, de 3,3 m et de 3,5 m (CGVD28) pour Maisonnette. Ils indiquent que le niveau de crue de 3,0 m est représentatif d'une onde de tempête qui se produit tous les 50 ans (probabilité de dépassement annuel de 2 %) en 2030 et est également similaire à une onde de tempête qui se produit tous les 100 ans (probabilité de dépassement annuel de 1 %) en 2010. Le niveau de crue de 3,5 m est représentatif d'une onde de tempête qui se produit tous les 50 ans (probabilité de dépassement annuel de 2 %) en 2100. Les estimations de l'élévation du niveau relatif de la mer dans Aubé et coll. (2016) étaient fondées sur le rapport RE5 du GIEC. On a donc comparé la carte des inondations élaborée par Aubé et coll. (2016) aux événements d'aléas actuels ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % et de 2 % représentant une élévation de 1,0 m du niveau mondial de la mer (représentative de l'estimation du 95<sup>e</sup> centile supérieur de l'élévation du niveau de la mer en 2100, dans l'hypothèse d'un scénario à fortes émissions). La figure 50 représente une comparaison entre la carte des inondations produite par Aubé et coll. (2016) et les pics de crue estimés par le modèle à l'échelle communautaire.

De manière générale, les résultats de la modélisation en baignoire pour l'évènement qui se produit tous les 100 ans (probabilité de dépassement annuel de 1 %) en 2010 concordent bien avec ceux de la modélisation hydrodynamique pour l'évènement actuel ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 %. Les résultats de la modélisation hydrodynamique pour l'évènement avec une probabilité de dépassement annuel de 2 % correspondant à une élévation de 1,0 m du niveau mondial de la mer étaient semblables à ceux de la modélisation en baignoire représentant l'évènement qui se produit tous les 50 ans (probabilité de dépassement annuel de 2 %) en 2100 dans la partie est de Maisonnette, le long de la route 303. Ailleurs, les résultats de la modélisation hydrodynamique pour l'évènement ayant une probabilité de dépassement annuel de 2 % représentant une élévation du niveau mondial de la mer de 1,0 m ont produit des inondations plus étendues par rapport aux résultats de la modélisation en baignoire représentant l'évènement qui se produit tous les 50 ans (probabilité de dépassement annuel de 2 %) en 2100.

Lorsqu'on compare des évènements indicatifs de la situation actuelle, les approches de modélisation hydrodynamique et de modélisation en baignoire semblent convenir aussi bien pour estimer l'étendue de l'inondation. La modélisation en baignoire et hydrodynamique des évènements dans des scénarios de niveau de la mer futurs a donné des résultats plus divergents, ce qui peut s'expliquer par les différences dans les projections de l'élévation du niveau de la mer qui ont été utilisées dans les analyses. Comme indiqué, les approches de modélisation en baignoire et hydrodynamique utilisaient toutes deux des estimations de l'élévation du niveau de la mer, fondées sur le RE5 du GIEC (Church et coll., 2013). Plus précisément, l'évènement de niveau de la mer futur illustré sur la Figure 50b (modélisé dans cette étude) correspond à une élévation du niveau mondial de la mer de 1,0 m, représentative de l'estimation du 95<sup>e</sup> centile supérieur de l'élévation du niveau de la mer en 2100, dans l'hypothèse d'un scénario à fortes émissions. Les détails des estimations de l'élévation du niveau de la mer en 2100 dans Aubé et coll. (2016; d'après Daigle [2014]) ne sont pas décrits. Il est donc possible que les estimations de l'élévation du niveau de la mer, incorporées dans la modélisation hydrodynamique et dans la modélisation en baignoire, soient différentes.

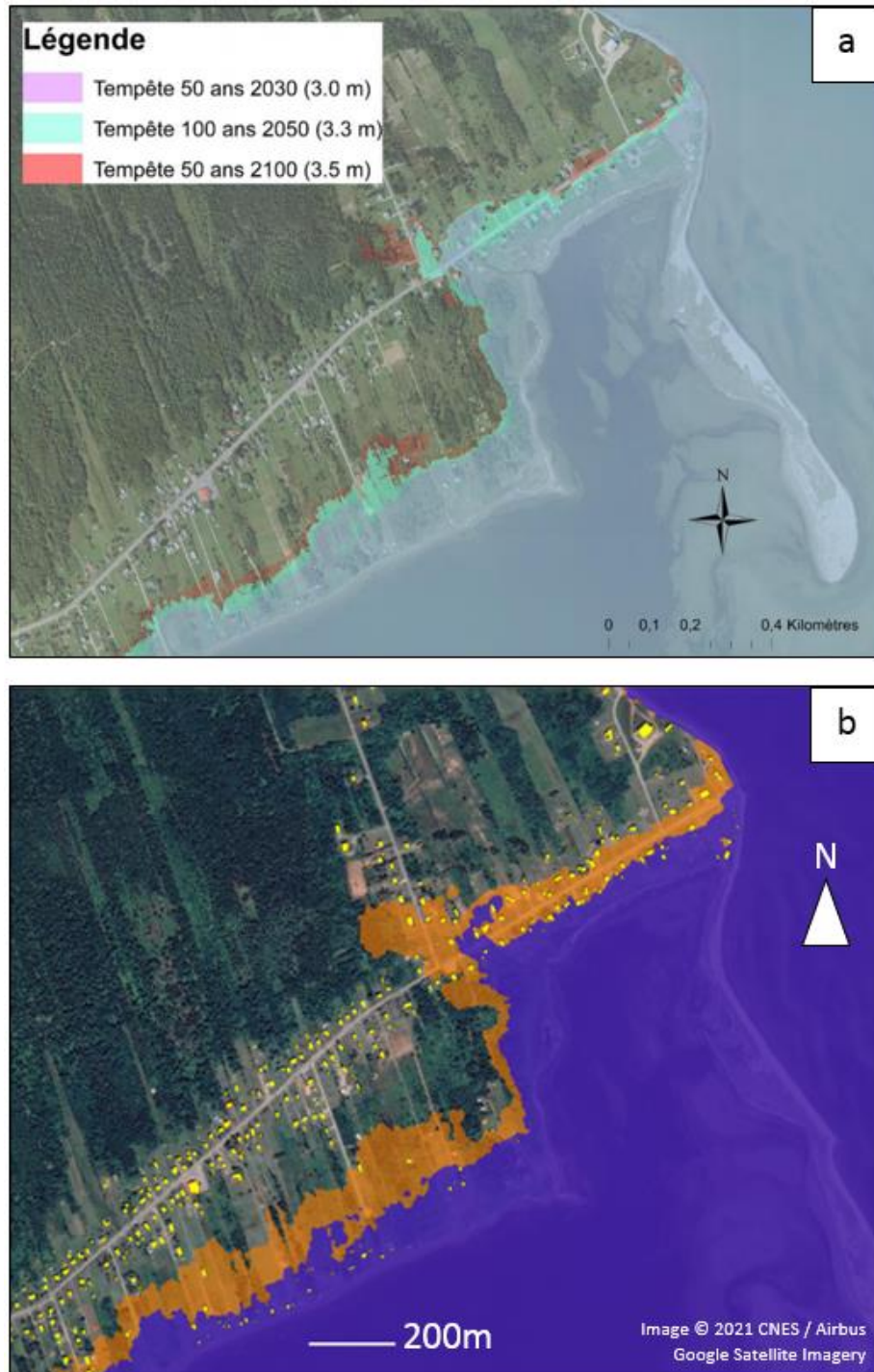


Figure 50. Comparaison des étendues des inondations estimées à partir a) de la modélisation en baignoire réalisée par Aubé et coll. (2016) et b) de la modélisation hydrodynamique numérique de Maisonnette. La zone ombrée en violet dans a) indique l'étendue de l'inondation estimée pour un événement qui se produit tous les 50 ans (probabilité de dépassement annuel de 2 %) en 2030 ou tous les 100 ans (probabilité de dépassement annuel de 1 %) en 2010. La zone ombrée en rouge indique l'étendue de l'inondation estimée pour un événement qui se produit tous les 50 ans (probabilité de dépassement annuel de 2 %) en 2100. La zone ombrée en violet dans b) indique l'étendue de l'inondation d'un événement ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % dans des conditions approximativement actuelles, et la zone ombrée en orange, celle d'un événement avec une probabilité de dépassement annuel de 2 % correspondant à une élévation de 1,0 m du niveau mondial de la mer.

### 10.1.5 Synthèse

De manière générale, les étendues des inondations modélisées de façon hydrodynamique pour les événements d'onde de tempête dans cette étude concordaient bien avec la modélisation en baignoire réalisée dans d'autres études pour des probabilités d'évènements comparables. Les événements synthétiques élaborés et modélisés hydrodynamiquement dans cette étude ont été conçus selon des critères d'élévation précis (tableau 11). De même, les événements modélisés en baignoire ont été conçus d'après des critères d'élévation. La différence, bien sûr, est que les élévations de la surface de l'eau dans les événements modélisés en baignoire reposent sur une valeur statique attribuée par le modélisateur, alors que les élévations de la surface de l'eau dans les événements modélisés de manière hydrodynamique sont tirées de la surcote due au vent et de la surcote barométrique. L'étendue de l'inondation étant une fonction de l'élévation de la surface de l'eau et de l'élévation du sol, il n'est peut-être pas surprenant que les deux approches de modélisation aient produit des étendues des inondations similaires pour des événements comparables. Il convient de noter que les différences entre les étendues des inondations modélisées en baignoire et hydrodynamiquement (bien que généralement faibles) peuvent également être causées, en partie, par des différences d'élaboration de l'évènement d'aléa (les analyses statistiques et du niveau d'eau utilisées pour guider le forçage du modèle).

Les comparaisons effectuées dans cette étude donnent à penser que la modélisation en baignoire et la modélisation hydrodynamique conviennent aussi bien pour estimer les étendues maximales des inondations et, par extension, les hauteurs maximales des crues. En fait, la modélisation en baignoire peut être mieux adaptée pour estimer l'étendue maximale des inondations et les hauteurs maximales des crues à proximité d'éléments à résolution fine et de changements d'élévation soudains, comme le montre la comparaison présentée pour Shippagan dans la section 10.1.2, ou lorsque les interactions dynamiques des eaux de crue avec des caractéristiques de la plaine d'inondation ne sont pas importantes pour contrôler les étendues maximales des inondations. Il convient également de noter que la modélisation en baignoire est moins exigeante en calcul que la modélisation hydrodynamique. Cependant, contrairement à la modélisation hydrodynamique, elle ne permet pas d'évaluer la propagation spatiale et temporelle des inondations, la vitesse du débit (et les paramètres des aléas de débit) et la durée des inondations. Ces informations peuvent être importantes pour étayer les futures évaluations des risques, la planification de l'utilisation des terres, les stratégies d'atténuation et d'adaptation, ainsi que la prise de décisions.

## 10.2 Considérations sur les données pour la Péninsule acadienne

La rareté des ressources de données pertinentes s'est avérée l'un des défis primordiaux de l'évaluation des aléas d'inondation dans la Péninsule acadienne. Plus précisément, la rareté des enregistrements proches à long terme des niveaux d'eau et d'observations historiques des inondations a entravé l'évaluation de la compétence du modèle et a introduit une incertitude dans l'estimation des événements d'aléa.

Les marégraphes les plus proches ayant des périodes d'enregistrement suffisamment longues pour permettre des analyses statistiques des valeurs extrêmes et l'évaluation de la compétence des modèles étaient situés assez loin de la Péninsule acadienne. Les marégraphes d'Escuminac et de Belledune se trouvaient à environ 75 km et 85 km de Shippagan, respectivement. Environnement Canada (2006) prévient que la répartition des ondes de tempête et des marées dans le golfe du Saint-Laurent varie considérablement dans la région. On a donc analysé les résidus des niveaux d'eau pour évaluer les autocorrélations spatiales entre la Péninsule acadienne et les deux marégraphes (section 8.1) et, en fin de compte, pour déterminer celui qui convenait le mieux pour guider l'élaboration des événements d'aléa. La

conception des événements d'aléa partait de l'hypothèse que la probabilité d'un événement au marégraphe de Belledune reflète celle d'un événement dans la Péninsule acadienne (c.-à-d. qu'une tempête qui produit des niveaux d'eau avec une probabilité de dépassement annuel de 1 % au marégraphe de Belledune produit également des niveaux d'eau avec une probabilité de dépassement annuel de 1 % dans la Péninsule acadienne). Une évaluation plus solide utiliserait les enregistrements locaux des niveaux d'eau pour étayer les analyses statistiques et orienter l'élaboration des événements d'aléa; cependant, les enregistrements locaux à long terme des niveaux d'eau n'étaient pas disponibles.

Le manque d'enregistrements locaux à long terme des niveaux d'eau a également entravé l'évaluation de la compétence des modèles, tant pour le modèle régional que pour le modèle communautaire. Le modèle régional a été étalonné et validé d'après les observations aux marégraphes d'Escuminac et de Belledune. Cependant, il n'a pas été possible d'évaluer les ondes de tempête modélisées dans le modèle régional pour les environs de la Péninsule acadienne en raison du manque de données. De même, les données des marégraphes n'étaient pas disponibles pour soutenir l'étalonnage du modèle à l'échelle communautaire; le domaine de ce modèle n'englobait pas les marégraphes d'Escuminac ou de Belledune. Le modèle à l'échelle communautaire a plutôt été étalonné et validé en fonction des indicateurs des niveaux d'eau élevés et des preuves photographiques et vidéo d'inondations liées aux inondations côtières du 6 décembre et du 21 décembre 2010 (sections 7.3 et 7.4). Des observations supplémentaires associées à d'autres crues historiques pourraient permettre une évaluation plus fiable de la compétence du modèle à l'échelle communautaire.

### 10.3 Aléa actuel et futur d'inondation due à une onde de tempête

La section 9.3 et les annexes D, E et F fournissent un résumé détaillé des aléas d'inondation due à une onde de tempête en fonction des niveaux de la mer actuels et des niveaux de la mer futurs, compte tenu de l'élévation potentielle du niveau de la mer. Comme on l'a vu dans la section 9.3.2, les résultats indiquent que l'élévation potentielle du niveau de la mer exacerbera les aléas d'inondation causée par une onde de tempête dans la Péninsule acadienne. Les données résumées dans le tableau 12 montrent que l'élévation du niveau de la mer augmentera la probabilité de niveaux d'eau extrêmes. Dans toutes les collectivités incluses dans cette étude, les étendues maximales des inondations modélisées pour l'évènement actuel avec une probabilité de dépassement annuel de 1 % étaient comparables à un évènement futur à la probabilité de dépassement annuel de 10 % représentant une élévation de 0,5 m du niveau mondial de la mer. En outre, d'après les résultats de l'analyse de validation du modèle régional (section 6.4), la glace de mer est capable d'atténuer les ondes de tempête dans la région. Selon les projections, la couverture de glace et la durée de la saison de glace dans le golfe du Saint-Laurent diminueront au cours du 21<sup>e</sup> siècle en raison des changements climatiques (Greenan et coll., 2018). Combinés, les effets de l'élévation du niveau de la mer et de la diminution de la glace de mer constituent une préoccupation potentielle pour la Péninsule acadienne. Même si la fréquence et l'intensité des tempêtes devaient demeurer stationnaires à l'avenir, les résultats montrent que les futurs événements de tempête produiront des ondes de tempête plus importantes et un plus grand risque d'inondation dans la Péninsule acadienne.

## 11 Conclusions et prochains travaux

Le présent rapport résume l'élaboration de modèles hydrodynamiques numériques pour appuyer l'évaluation des aléas d'inondation due à une onde de tempête dans la Péninsule acadienne. Le modèle régional d'onde de tempête couvre une grande partie de la côte atlantique et du plateau continental du Canada et est suffisamment grand pour refléter les ondes de tempête générées par le forçage météorologique synoptique. La compétence du modèle régional a été évaluée à l'aide des données fournies par les enregistrements des marégraphes. Les effets de la surcote liée aux vagues et de la glace de mer ont été étudiés à l'échelle régionale. Les résultats indiquent que la surcote liée aux vagues peut contribuer à l'élévation des niveaux d'eau près du marégraphe d'Escuminac pour les événements coïncidant avec des vents forts et soutenus de l'est et du nord-est, et que la couverture de glace de mer peut atténuer les ondes de tempête dans la région. Des méthodes permettant d'incorporer les effets de la glace de mer dans la modélisation hydrodynamique des ondes de tempête ont été explorées et appliquées avec un certain succès, permettant d'améliorer la compétence du modèle; ces résultats constituent le fondement d'éventuelles recherches futures axées sur l'évolution des aléas d'inondation côtière dans le golfe du Saint-Laurent dans le contexte de la diminution de la glace de mer pour de futurs scénarios de changements climatiques.

Le modèle communautaire des aléas d'inondation, axé sur la Péninsule acadienne, est imbriqué dans le modèle régional et offre une résolution et des détails suffisants pour simuler les aléas d'inondation dans plusieurs collectivités de la Péninsule acadienne, notamment Maisonnette, Caraquet, Bas-Caraquet, Pointe-Brûlée, Shippagan, Le Goulet et Lamèque. En raison de la rareté des enregistrements des marégraphes dans les environs de la Péninsule acadienne, des méthodes non conventionnelles ont été explorées pour faciliter l'évaluation de la compétence et de l'étalonnage du modèle. Le modèle à l'échelle communautaire a été étalonné à l'aide d'indicateurs de niveaux d'eau élevés ayant fait l'objet de relevés et fournis par le gouvernement du Nouveau-Brunswick. La compétence du modèle a été validée d'après des preuves photographiques et vidéo des inondations.

On a examiné un certain nombre de méthodes statistiques pour étudier la probabilité et l'ampleur des aléas dus aux ondes de tempête dans la Péninsule acadienne, notamment des analyses univariées des valeurs extrêmes des ondes de tempête et des niveaux d'eau, ainsi que des méthodes multivariées qui intègrent la probabilité conjointe des marées et des ondes de tempête. Six événements d'aléa d'onde de tempête actuels ont été élaborés à partir des données disponibles du marégraphe de Belledune. Dix-huit autres événements d'aléa d'onde de tempête ont été conçus, représentant les conditions futures selon trois scénarios différents d'élévation du niveau relatif de la mer.

Chacun des 24 événements d'aléa liés aux ondes de tempête a été modélisé aux échelles régionale et communautaire. On a ainsi produit des images illustrant les hauteurs maximales des crues, les étendues des inondations et les aléas liés au débit dans chacune des sept collectivités de la Péninsule acadienne.

La modélisation hydrodynamique présentée dans le présent rapport guidera l'évaluation fondée sur les risques dans les sept collectivités d'intérêt de la Péninsule acadienne. Les résultats serviront à déterminer les infrastructures et les autres biens exposés et touchés par les inondations côtières. Des analyses futures qui seront réalisées par des partenaires du projet chercheront à évaluer les dommages et les impacts sur les collectivités afin de guider l'atténuation des aléas d'inondation côtière.

## 12 Remerciements

Ces travaux ont été financés dans le cadre du projet d'atténuation des inondations côtières au Canada mené par Recherche et développement pour la défense Canada par le biais du Programme canadien pour la sûreté et la sécurité, avec le soutien du Conseil national de recherches du Canada. Les auteurs remercient les personnes énumérées ci-dessous pour leurs contributions utiles à la recherche :

- **Orientation et coordination du projet** : Nicky Hastings, Julie Van de Valk et Jackie Yip.
- **Communication de connaissances et données locales** : André Robichaud, Dominique Bérubé, Marc Desrosiers, Robert Capozzi, Reid McLean, Cindie Hébert et Maxime Doucet.
- **Accueil et coordination de l'atelier communautaire** : Valorès.
- **Traduction et présentation des documents de l'atelier communautaire** : David Didier.
- **Soutien du CNRC et du Programme Océan** : Marie-Chantal Ross, Andrew Cornett et Maryse Proulx.

La présente étude s'est appuyée sur les données fournies par le Service hydrographique du Canada (SHC), conformément au protocole d'entente du SHC n° 2020-0206-1260-CNRC et du protocole d'entente du SHC n° 2021-0805-1260-CNRC. L'inclusion de données provenant du SHC dans cette étude ne doit pas être interprétée comme une acceptation par le SHC de la présente étude. Les produits de l'étude ne répondent pas aux exigences du *Règlement sur les cartes marines et les publications nautiques (1995)* ou du *Règlement sur la sécurité de la navigation (2020)* de la *Loi sur la marine marchande du Canada (2001)*. Les cartes marines et les publications, corrigées et mises à jour, doivent être utilisées pour respecter les exigences du Règlement.

## Références

- Anderson, T. R., C. H. Fletcher, M. M. Barbee, B. M. Romine, S. Lemmo et J. M. S. Delevaux (2018). « Modeling Multiple Sea Level Rise Stresses Reveals up to Twice the Land at Risk Compared to Strictly Passive Flooding Methods », *Scientific Reports*, vol. 8, article 14484. Sur Internet : <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32658-x>
- Ata, R. (2018). *Telemac2d User Manual Version v8p0*.
- Aubé, M., C. Hébert et I. Simard (2016). *Analyse des risques d'inondation et d'érosion dans les régions de Grande-Anse, Maisonnette, Bertrand et Caraquet*, Institut de recherche sur les zones côtières Inc. et Geomediatix innovations Inc.
- Aucelli, P. P. C., G. Di Paola, P. Incontri, A. Rizzo, G. Vilaro, G. Benassai, B. Buonocore et G. Pappone (2017). « Coastal Inundation Risk Assessment due to Subsidence and Sea Level Rise in a Mediterranean Alluvial Plain (Volturno Coastal Plain – Southern Italy) », *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 198, p. 597-609. Sur Internet : <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.06.017>
- Barnard, P. L., M. van Ormondt, L. H. Erikson, J. Eshleman, J., Hapke, C., Ruggiero, P., Adams, P. N., et A. C. Foxgrover (2014). « Development of the Coastal Storm Modeling System (CoSMoS) for Predicting the Impact of Storms on High-Energy, Active-Margin Coasts », *Natural Hazards*, vol. 74, p. 1095-1125.
- Barton, A. J. (2019). « Blue Kenue Enhancements from 2014 to 2019 », *26th Annual Telemac-Mascaret Users Conference*.
- Benoit, M., F. Marcos et F. Becq (1996). « Development of a Third Generation Shallow-Water Wave Model with Unstructured Spatial Meshing », *Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering*, p. 465-478.
- Bernier, N. (2005). *Annual and Seasonal Extreme Sea Levels in the Northwest Atlantic: Hindcasts Over the Last 40 Years and Projections for the Next Century*, Dalhousie University.
- Birnbaum, G., et C. Lüpkes (2002). « A new Parameterization of Surface Drag in the Marginal Sea Ice Zone », *Tellus*, vol. 54, p. 107-123.
- Centre d'hydraulique canadien (2011). *Blue Kenue Reference Manual*, Conseil national de recherches Canada.

- Chin, D. A. (2013). *Water Resources Engineering*, 3<sup>e</sup> éd., Pearson Education Inc.
- Church, J. A., P. U. Clark, A. Cazenave, J. M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M. A. Merrifield, G. A. Milne, R. S. Nerem, P. D. Nunn, A. J. Payne, W. T. Pfeffer, D. Stammer et A. S. Unnikrishnan (2013). « Sea Level Change » dans T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P. M. Midgley éd., *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, contribution du Groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press.
- Cox, R. J., T. D. Shand et M. J. Blacka (2010). *Australian Rainfall and Runoff Revision Project 10: Appropriate Safety Criteria for People*, (P10/S1/006), Engineers Australia.
- Creach, A., E. Chevillot-Miot, D. Mercier et L. Pourinet (2016). « Vulnerability to Coastal Flood Hazard of Residential Buildings on Noirmoutier Island (France) », *Journal of Maps*, vol. 12, p. 371-381. Sur Internet : <https://doi.org/10.1080/17445647.2015.1027041>
- Daigle, R. (2011). *Sea-Level Rise Estimates for New Brunswick Municipalities*, R.J. Daigle Enviro.
- Daigle, R. (2014). *Updated Sea-Level Rise and Flooding Estimates for New Brunswick Coastal Sections Based on IPCC 5th Assessment Report*, R.J. Daigle Enviro.
- Daigle, R. (2017). *Sea-Level Rise and Flooding Estimates for New Brunswick Coastal Sections Based on IPCC 5th Assessment Report*, R.J. Daigle Enviro.
- Didier, D., J. Baudry, P. Bernatchez, D. Dumont, M. Sadegh, E. Bismuth, M. Bandet, S. Dugas et C. Sévigny (2019). « Multihazard Simulation for Coastal Flood Mapping: Bathtub Versus Numerical Modelling in an Open Estuary, Eastern Canada », *Journal of Flood Risk Management*, vol. 12. Sur Internet : <https://doi.org/10.1111/jfr3.12505>
- Didier, D., P. Bernatchez, G. Boucher-Brossard, A. Lambert, C. Fraser, R. Barnett et S. Van-Wierds (2015). « Coastal Flood Assessment Based on Field Debris Measurements and Wave Runup Empirical Model », *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 3, p. 560-590. Sur Internet : <https://doi.org/10.3390/jmse3030560>
- Doucet, M. (2010). *Inondation du 21 décembre 2010 (Le Goulet) (Haut-Shippagan)*, YouTube. Sur Internet : [https://www.youtube.com/watch?v=GaL\\_tjc6sbM](https://www.youtube.com/watch?v=GaL_tjc6sbM)

- Egbert, G. D., et S. Y. Erofeeva (2002). « Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides », *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, vol. 19, p. 183-204. Sur Internet : [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2)
- Environnement Canada (2006). *Impacts de l'élévation du niveau de la mer et du changement climatique sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick – Sommaire*, Environnement Canada.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2016). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping: Coastal Flood Frequency and Extreme Value Analysis (Guidance Document 76)*, Federal Emergency Management Agency.
- FEMA (2021). *Hazus Tsunami Model Technical Manual: Hazus 4.2 Service Pack 3*.
- Ferguson, S., M. Provan, E. Murphy, D. Bérubé, M. Desrosiers, A. Robichaud et J. Kim (2022). « Assessing Numerical Model Skill at Simulating Coastal Flooding Using Field Observations of Deposited Debris and Photographic Evidence », *Water*, vol. 14, n° 4, article 589. Sur Internet : <https://doi.org/10.3390/w14040589>
- Fine, I., et R. Thomson (2021). *Storm Surge Simulations for the Southern Strait of Georgia and Boundary Bay for Selected Future Sea Level Rise Predictions*, Pêches et Océans Canada.
- Flather, R. A. (1976). *Results from a Storm Surge Prediction Model of the North-West European Continental Shelf for April, November and December 1973*, rapport n° 24, Institute of Oceanographic Sciences.
- Foreman, M. G. G. (1977). *Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction*, ministère des Pêches et des Océans, Institute of Ocean Sciences.
- Forrester, W. D. (1983). *Manuel canadien des marées*, ministère des Pêches et des Océans, Service hydrographique du Canada.
- Garbrecht, T., C. Lupkes, J. Hartmann et M. Wolff (2002). « Atmospheric Drag Coefficients Over Sea Ice—Validation of a Parameterisation Concept », *Tellus*, vol. 54, p. 205-219.
- GEBCO Compilation Group (2019). *GEBCO 2019 Grid*. Sur Internet : <https://doi.org/10.5285/836f016a-33be-6ddc-e053-6c86abc0788e>
- GIEC (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques : rapport de synthèse*, R. K. Pachauri et A. Reisinger, éd., Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC.

Goda, Y. (2000). *Random Seas and Design of Maritime Structures*, 2<sup>e</sup> éd., World Scientific Publishing Co.

Gouvernement du Canada (2021). *GPS·H*. Sur Internet : <https://webapp.csrsc-scrs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/gpsh.php?locale=fr>

Gouvernement du Nouveau-Brunswick (2019a). *2018 Digital Elevation Model*, NB DEM LIDAR Derived Digital Elevation Models. Sur Internet : <https://geonb.snb.ca/nbdem/>

Gouvernement du Nouveau-Brunswick (2019b). *Forêt*. Sur Internet : <http://www.snb.ca/geonb1/f/DC/forest.asp>

Gouvernement du Nouveau-Brunswick (2019c). *Non forestière*. Sur Internet : <http://www.snb.ca/geonb1/f/DC/non-forest.asp>

Gouvernement du Nouveau-Brunswick (2019d). *SNB 2018 LiDAR AOI 2*, LiDAR Download. Sur Internet : <https://geonb.snb.ca/li/>

Gouvernement du Nouveau-Brunswick (2019e). *Terres humides*. Sur Internet : <http://www.snb.ca/geonb1/f/DC/RW.asp>

Gouvernement du Nouveau-Brunswick (2021). *Catalogue de données*, GeoNB. Sur Internet : <http://www.snb.ca/geonb1/f/DC/catalogue-F.asp>

Greenan, B. J. W., T. S. James, J. W. Loder, P. Pepin, K. Azetsu-Scott, D. Ianson, R. C. Hamme, D. Gilbert, J.-E. Tremblay, X. L. Wang et W. Perrie (2018). « Changements touchant les océans qui bordent le Canada; Chapitre 7 » dans Bush et Lemmen, éd., *Rapport sur le climat changeant du Canada*, p. 343-423, Gouvernement du Canada.

Harper, J. R., R. F. Henry et G. G. Stewart (1988). « Maximum Storm Surge Elevations in the Tuktoyaktuk Region of the Canadian Beaufort Sea », vol. 41, n° 1, p. 48-52. Sur Internet : <https://www.jstor.org/stable/40510662>

Hébert, C., et M. Aubé (2015). *Évaluation d'options d'adaptation aux changements climatiques : Restauration des dunes à Le Goulet*, Institut de recherche sur les zones côtières I.

Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, G. Biavati, A. Horányi, J. Muñoz Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, I. Rozum, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, D. Dee et J.-N. Thépaut (2018). *ERA5 Hourly Data on Single Levels From 1979 to Present*, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). Sur Internet : <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>

- Houghtalen, R. J., A. O. Akan et N. H. C. Hwang (2010). *Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems*, 4<sup>e</sup> éd., Prentice Hall.
- James, T. S., C. Robin, J. A. Henton et M. Craymer (2021). *Relative Sea-Level Projections for Canada Based on the IPCC Fifth Assessment Report and the NAD83v70VG National Crustal Velocity Model*, Geological Survey of Canada (Open File 8764).
- Jardine, D. E., X. Wang et A. L. Fenech (2021). « Highwater Mark Collection after Post Tropical Storm Dorian and Implications for Prince Edward Island, Canada », *Water*, vol. 13, n° 22. Sur Internet : <https://doi.org/10.3390/w13223201>
- Ji, C., Q. Zhang et Y. Wu (2018). « An Empirical Formula for Maximum Wave Setup Based on a Coupled Wave-Current Model », *Ocean Engineering*, vol. 147, p. 215-226. Sur Internet : <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.10.021>
- Joyce, B. R., W. J. Pringle, D. Wirasaet, J. J. Westerink, A. J. Van der Westhuysen, R. Grumbine et J. Feyen (2019). « High Resolution Modeling of Western Alaskan Tides and Storm Surge Under Varying Sea Ice Conditions », *Ocean Modelling*, vol. 141. Sur Internet : <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2019.101421>
- Kim, J., E. Murphy, I. Nistor, S. Ferguson et M. Provan (2021). « Numerical Analysis of Storm Surges on Canada's Western Arctic Coastline », *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, n° 3, article 326. Sur Internet : <https://doi.org/10.3390/jmse9030326>
- Lüpkes, C., V. M. Gryanik, J. Hartmann et E. L. Andreas (2012). « A Parametrization, Based on Sea Ice Morphology, of the Neutral Atmospheric Drag Coefficients for Weather Prediction and Climate Models », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 117. Sur Internet : <https://doi.org/10.1029/2012JD017630>
- MacLeod, R. F., et S. R. Dallimore (2021). « Assessment of Storm Surge History as Recorded by Driftwood in the Mackenzie Delta and Tuktoyaktuk Coastlands, Arctic Canada », *Frontiers in Earth Science*, vol. 9, article 698660. Sur Internet : <https://doi.org/10.3389/feart.2021.698660>
- Mazas, F., et L. Hamm (2011). « A Multi-Distribution Approach to POT Methods for Determining Extreme Wave Heights », *Coastal Engineering*, vol. 58, p. 385-394. Sur Internet : <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.12.003>

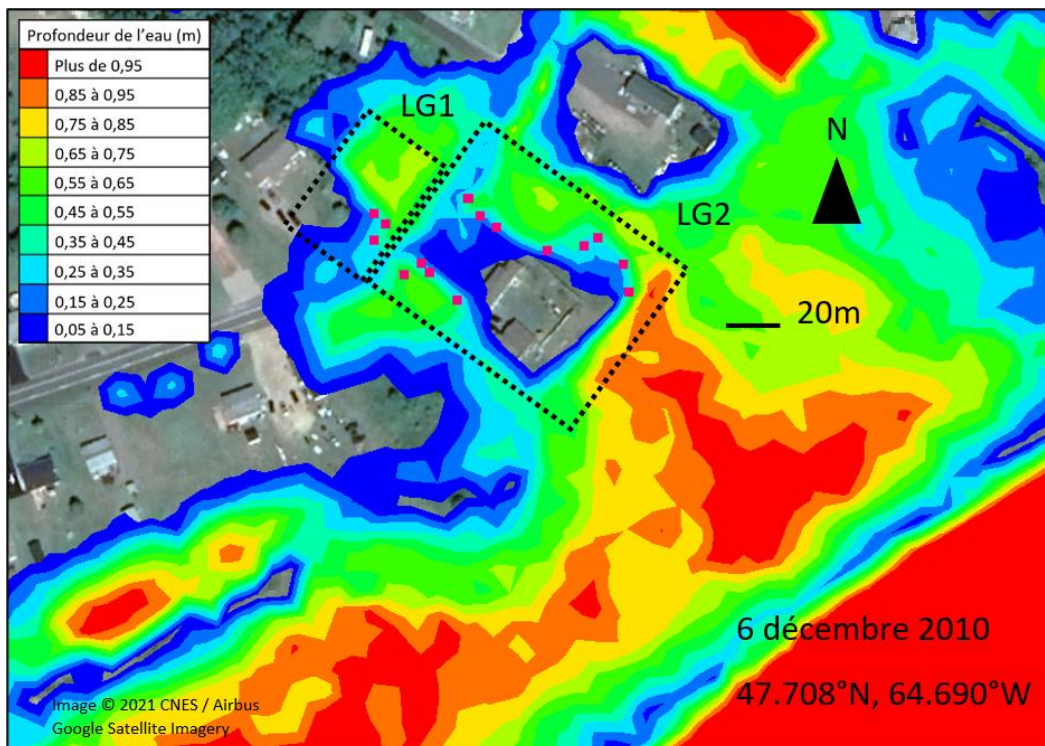
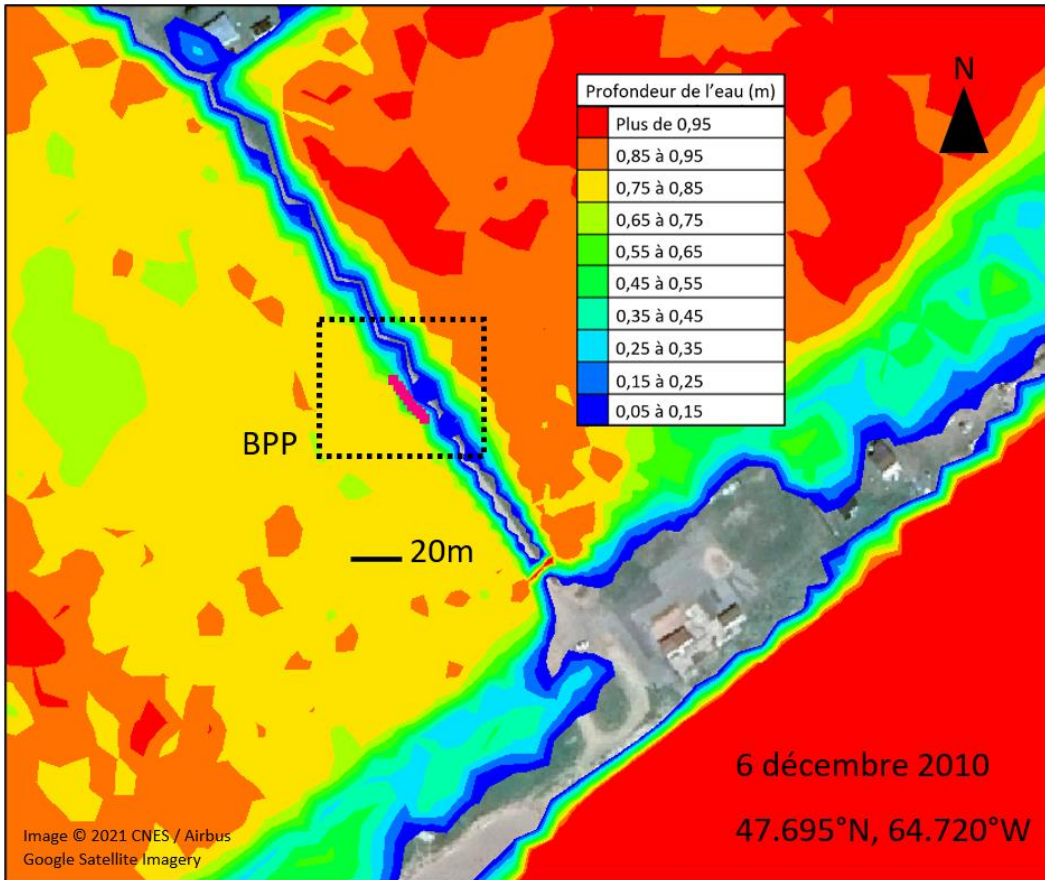
- Melton, G., M. Gall, J. T. Mitchell et S. L. Cutter (2010). « Hurricane Katrina Storm Surge Delineation: Implications for Future Storm Surge Forecasts and Warnings », *Natural Hazards*, vol. 54, p. 519-536. Sur Internet : <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9483-z>
- Murphy, E., T. Lyle, J. Wiebe, S. V. Hund, M. Davies et D. Williamson (2020). *Coastal Flood Risk Assessment Guidelines for Building and Infrastructure Design*, Conseil national de recherches du Canada.
- Nations Unies (2004). *Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives*.
- Nations Unies (2015). *Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015-2030*.
- NOAA (2021). *Historical Hurricane Tracks*. Sur Internet : <https://coast.noaa.gov/hurricanes/#map=4/32/-80>
- Pêches et Océans Canada (2019a). *Archives canadiennes des données sur les marées et niveaux d'eau*. Sur Internet : <https://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/index-fra.htm#>
- Pêches et Océans Canada (2019b). *Données sur les vagues disponibles en ligne*. Sur Internet : <https://www.isdm.gc.ca/isdm-gdsi/waves-vagues/data-donnees/index-fra.asp>
- Provan, M., S. Ferguson et E. Murphy (2022). « (Accepted) Storm Surge Contributions to Flood Hazards on Canada's Atlantic Coast », *Journal of Flood Risk Management*.
- Pugh, D. T., et J. M. Vassie (1980). « Applications of the Joint Probability Method for Extreme Sea Level Computations », *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 69, p. 959-975.
- RNCan (2020). *Rapport de synthèse de l'atelier — Atelier d'introduction sur l'atténuation des inondations côtières au Canada*.
- Robichaud, A., I. Simard, A. Doiron et M. Chelbi (2011). *Infrastructures à risque dans trois municipalités de la Péninsule Acadienne*, Atlantic Climate Adaptation Solutions Association.
- Robin, C., S. Nudds, P. MacAulay, A. Godin, B. De Lange Boom et J. Bartlett (2016). « Hydrographic Vertical Separation Surfaces (HyVSEPs) for the Tidal Waters of Canada », *Marine Geodesy*, vol. 39, p. 195-222. Sur Internet : <https://doi.org/10.1080/01490419.2016.1160011>
- Schubert, J. E., et B. F. Sanders (2012). « Building Treatments for Urban Flood Inundation Models and Implications for Predictive Skill and Modeling Efficiency », *Advances in Water Resources*, vol. 41, p. 49-64. Sur Internet : <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.02.012>

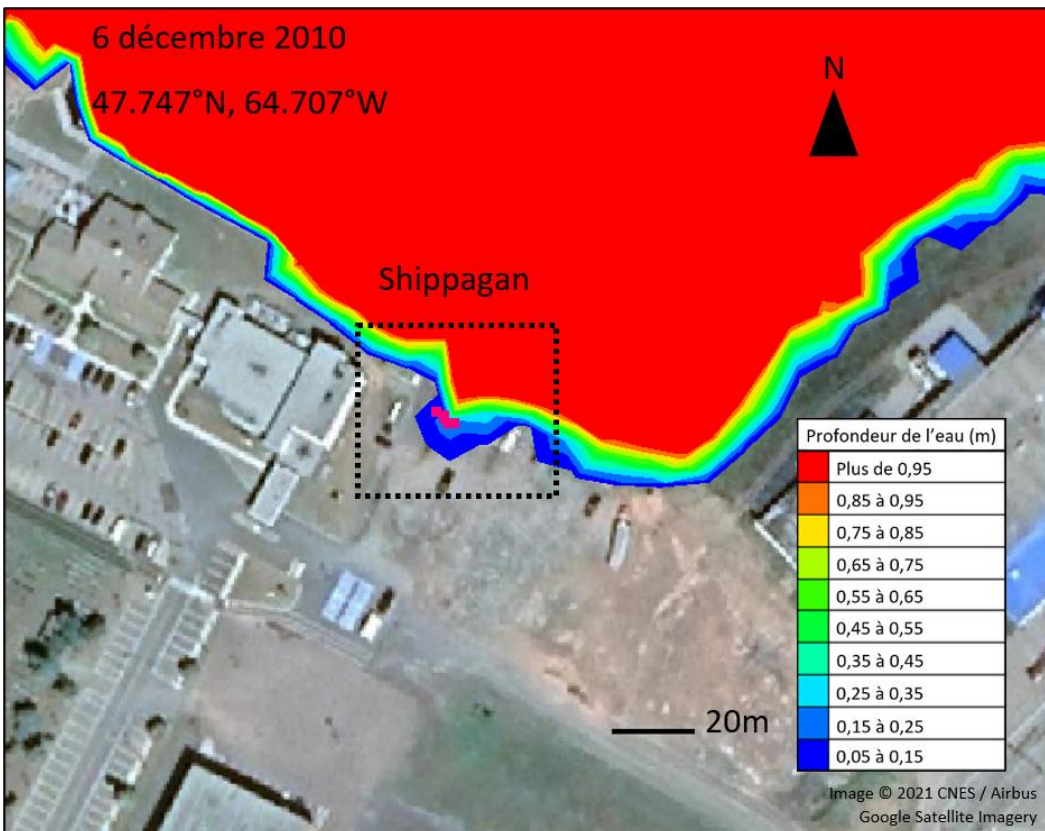
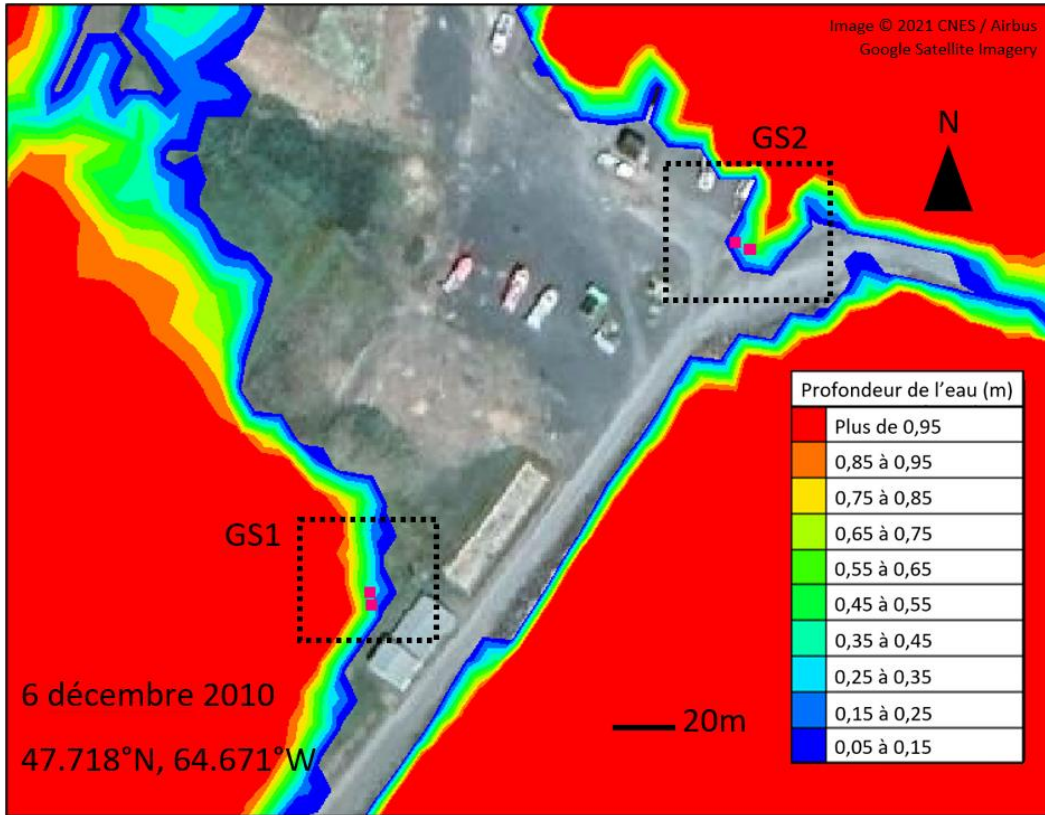
- Service canadien des glaces (2019). *Archive des glaces*. Sur Internet : <https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/Archive/page1.xhtml?lang=fr>
- Service hydrographique du Canada (2019). *Données bathymétriques non navigationnelles (NONNA)*. Sur Internet : <https://open.canada.ca/data/fr/dataset/d3881c4c-650d-4070-bf9b-1e00aabf0a1d>
- Service hydrographique du Canada (2020). *Cartes marines*. Sur Internet : <https://www.charts.gc.ca/charts-cartes/index-fra.html>
- Stockdon, H. F., R. A. Holman, P. A. Howd et A. H. Sallenger (2006). « Empirical Parameterization of Setup, Swash, and Runup », *Coastal Engineering*, vol. 53, p. 573-588. Sur Internet : <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>
- WAFO group (2011). *WAFO – A Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads: Tutorial for WAFO*, version 2.5, Lund University.
- White, F. M. (2003). *Fluid Mechanics*, 5<sup>e</sup> éd., McGraw-Hill.
- Wu, J. (1980). « Wind-Stress Coefficients Over Sea Surface Near Neutralconditions—A Revisit », *Journal of Physical Oceanography*, vol. 10, p. 727-740.
- Wu, J. (1982). « Wind-Stress Coefficients Over Sea Surface from Breeze to Hurricane », *Journal of Geophysical Research Oceans*, vol. 87, p. 9704-9706.

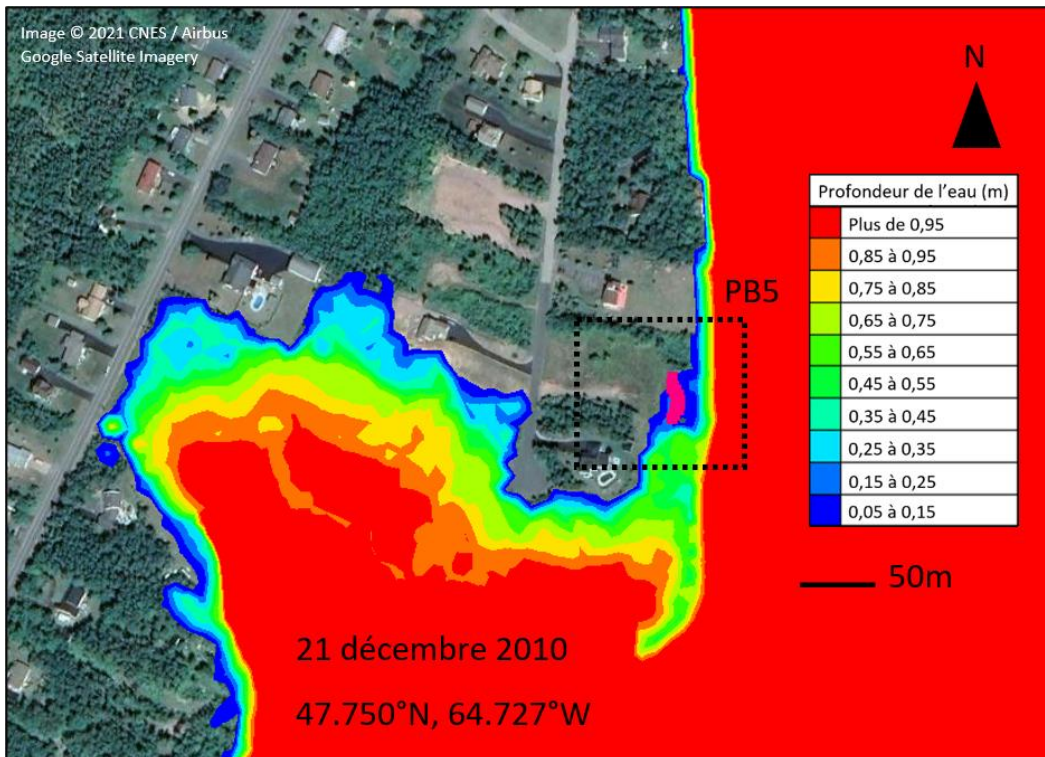
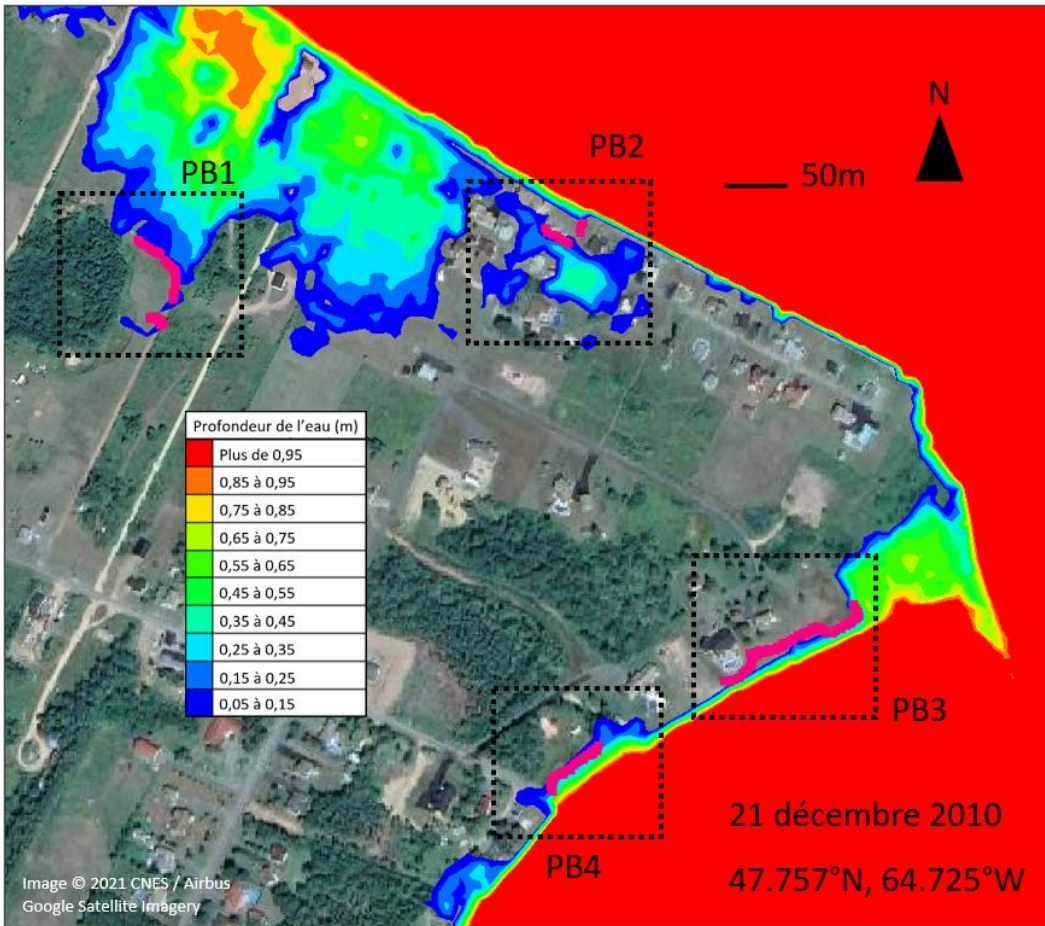
## Annexe A – Étendues des inondations modélisées par rapport aux indicateurs des niveaux d'eau élevés relevés

### Remarques

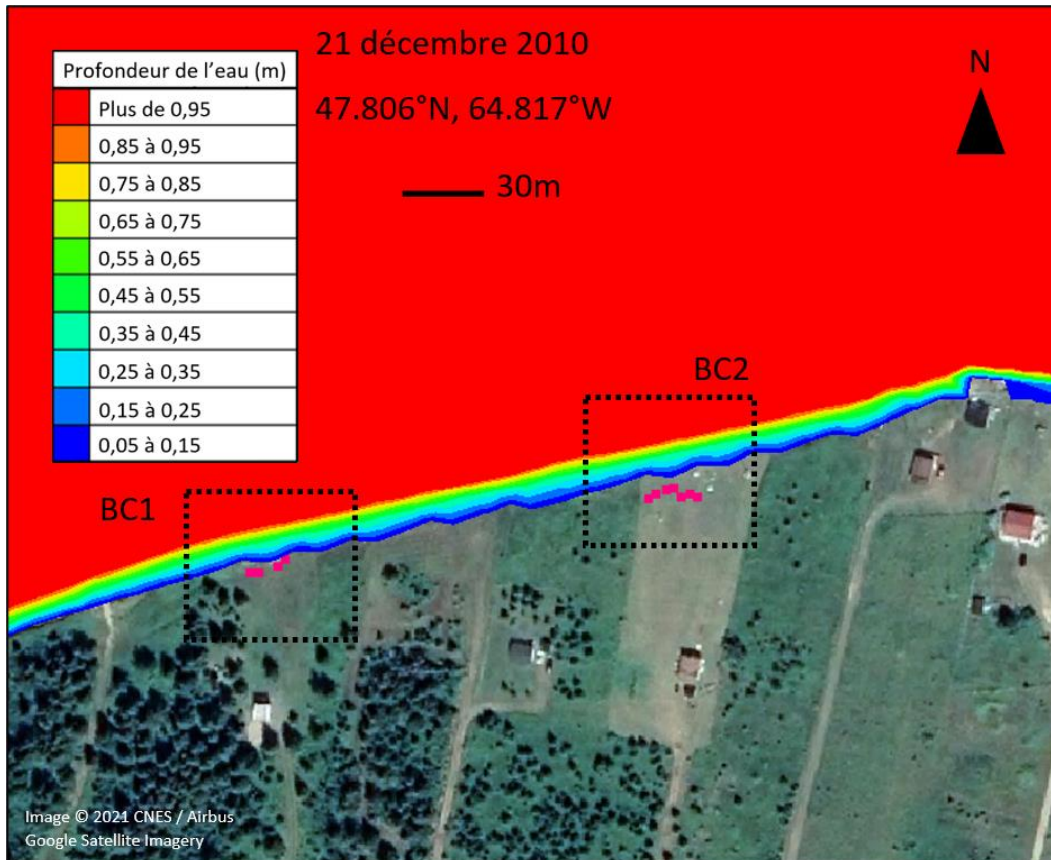
- Les points des relevés sont indiqués en rose.
- Les contours sont tracés autour des emplacements des relevés indiqués dans le tableau 5 et le tableau 6.







Simulation numérique de l'aléa d'inondation côtière dans la région de la Péninsule acadienne au Nouveau-Brunswick

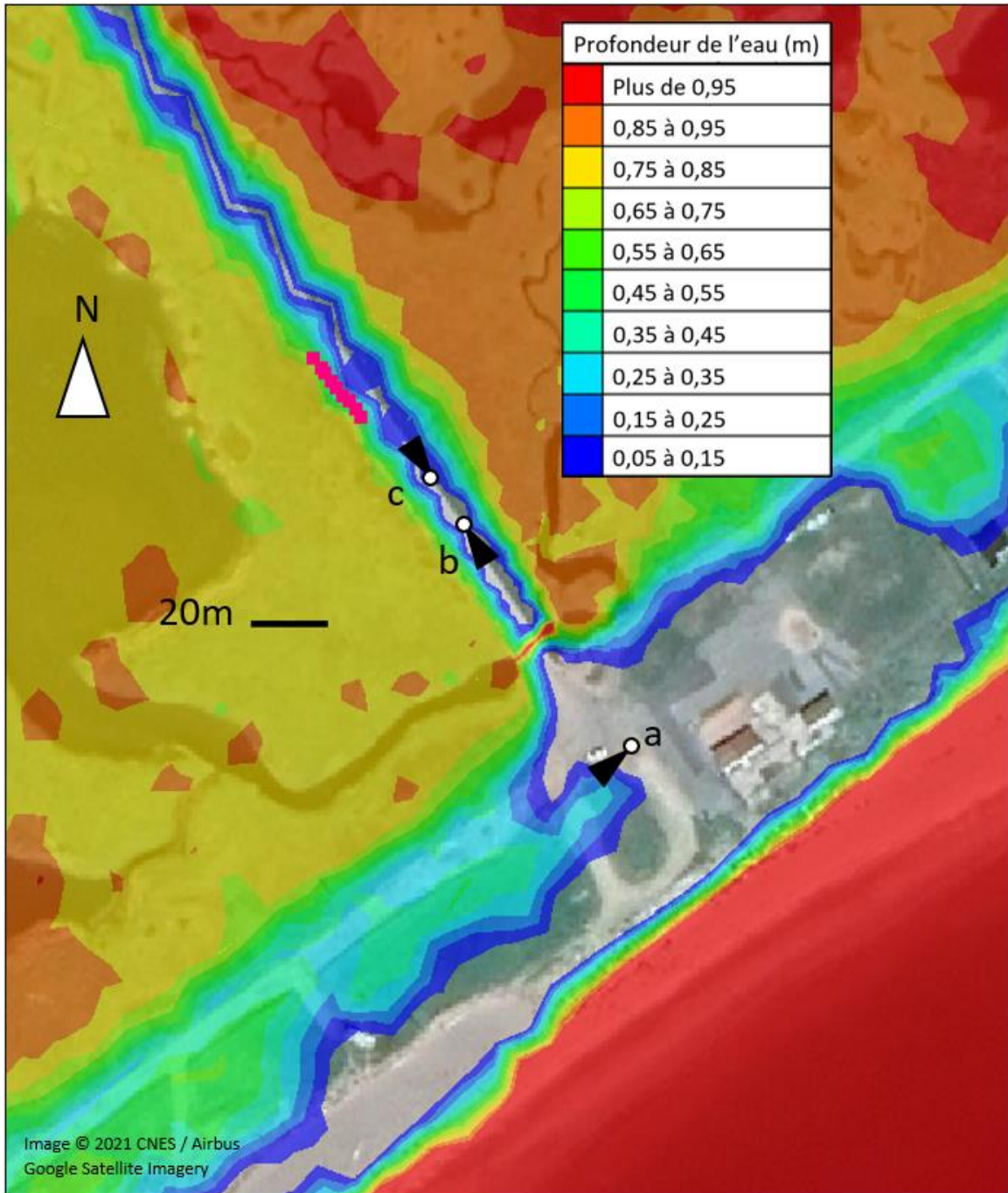


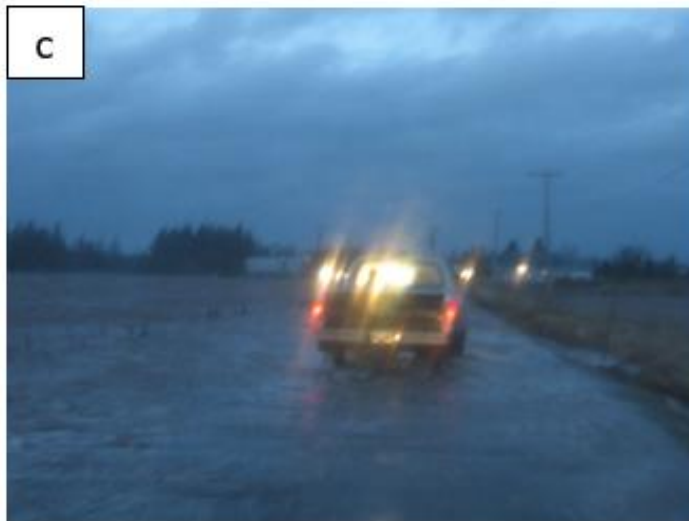
## Annexe B – Comparaison de l'étendue de l'inondation modélisée aux preuves photographiques de l'évènement du 6 décembre 2010

### Remarques

- Les cercles blancs illustrent la position de l'observateur, et les cônes noirs, le sens de l'observation.
- Lorsqu'ils sont présents, les points des relevés sont indiqués en rose.
- Les lettres indiquent les photographies ou les clips vidéo correspondants.

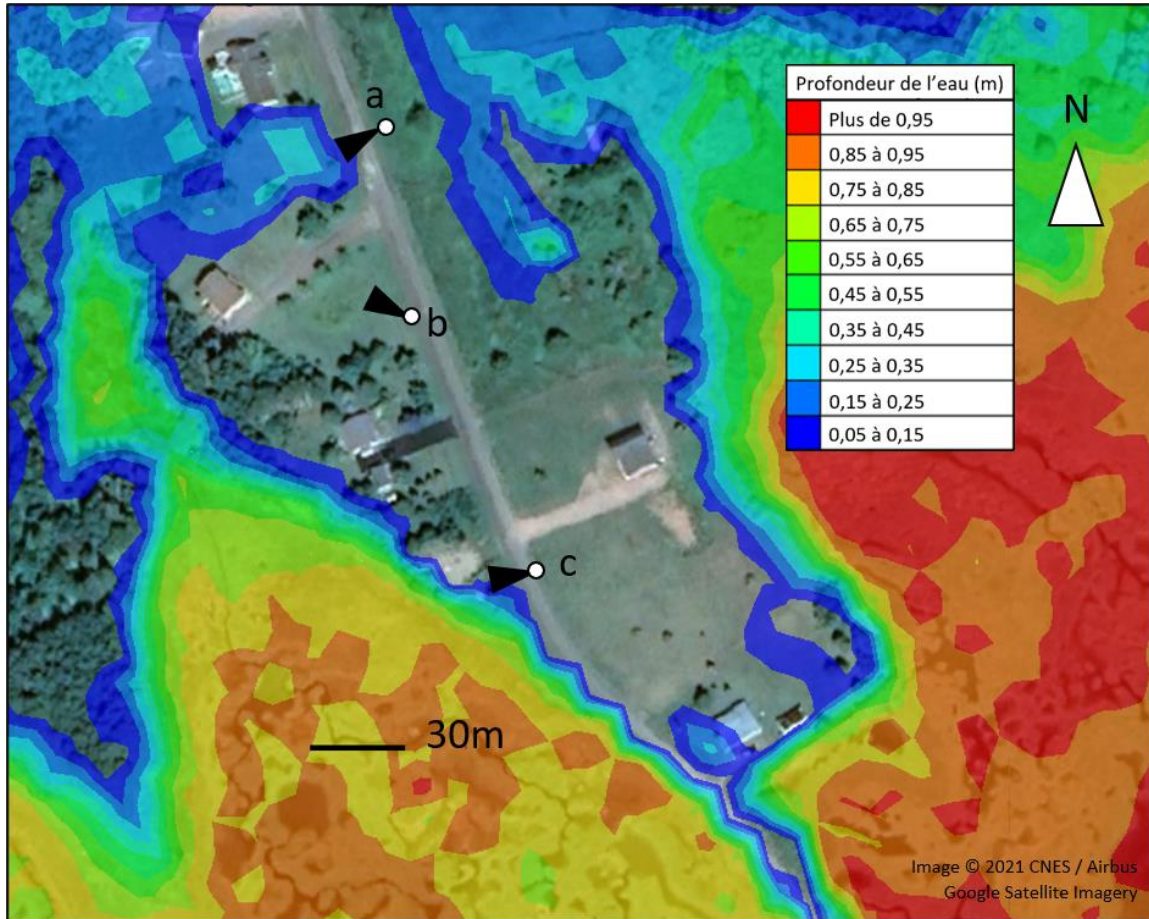
QAAD6-A (47.695°N, 64.720°W)





Date: 6 décembre 2010  
Dominique Bérubé & Marc Desrosiers

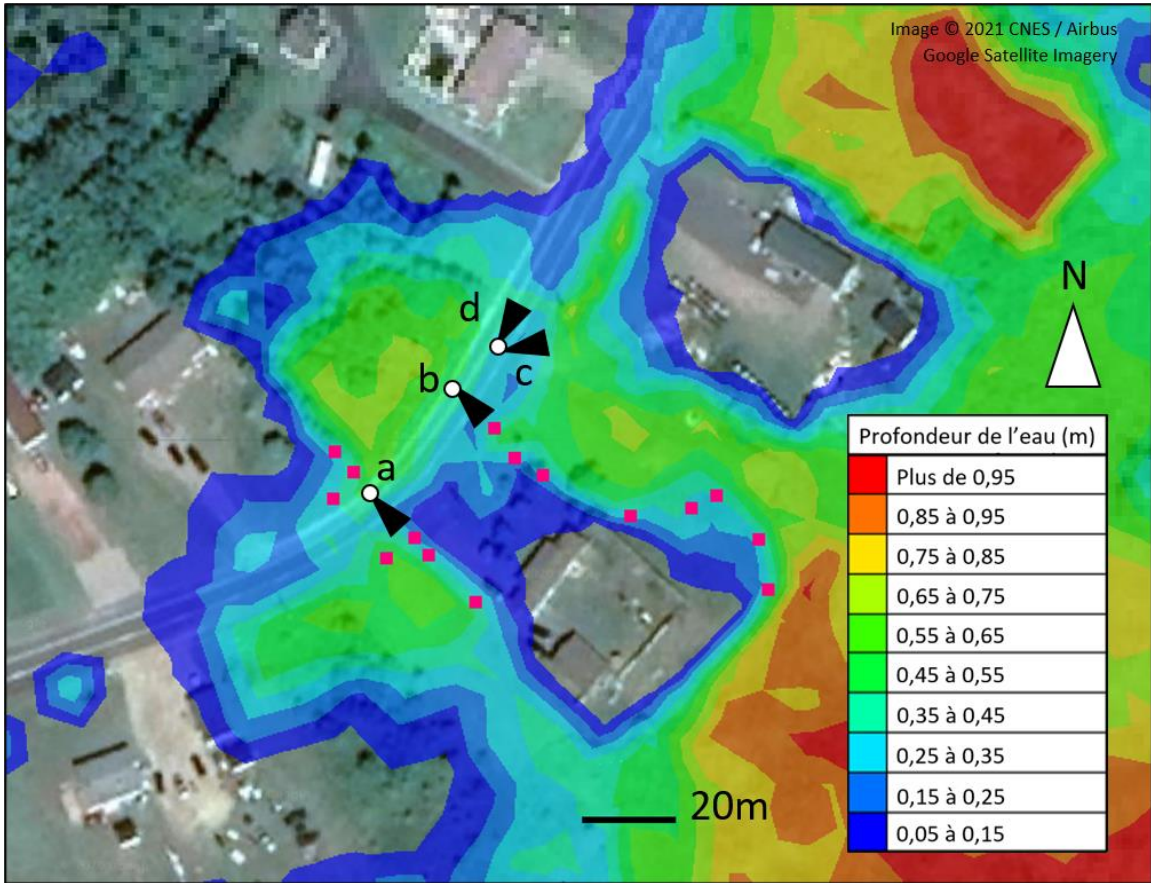
QAAD6-B (47.698°N, 64.723°W)





Date: 6 décembre 2010  
Dominique Bérubé & Marc Desrosiers

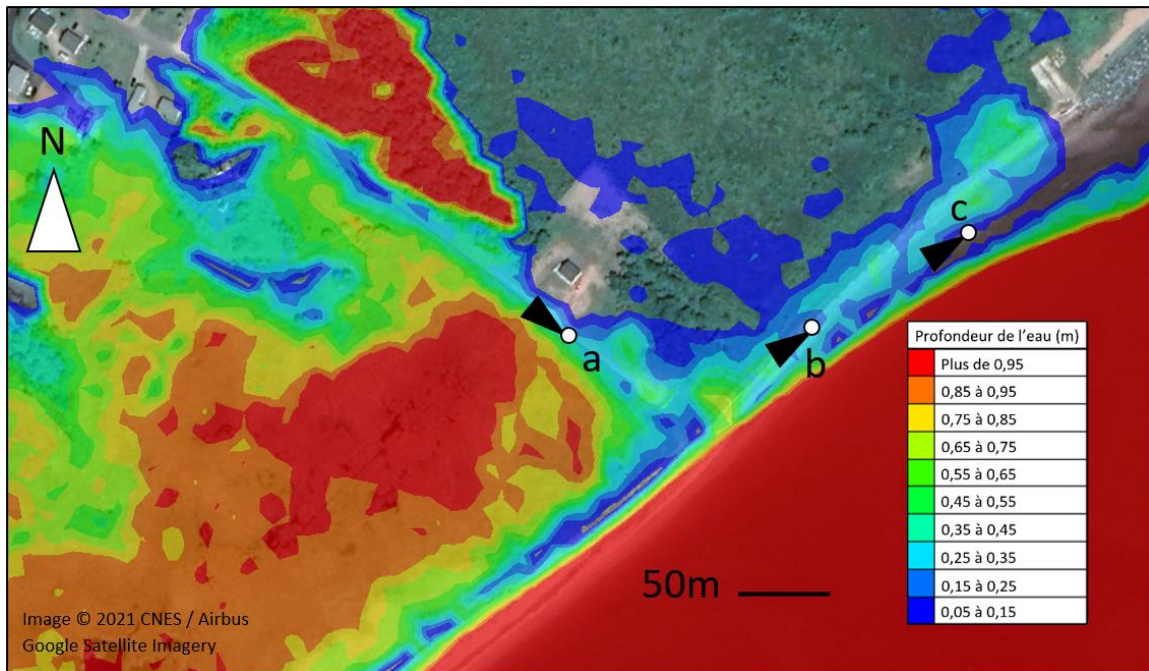
QAAD6-C (47.708°N, 64.690°W)





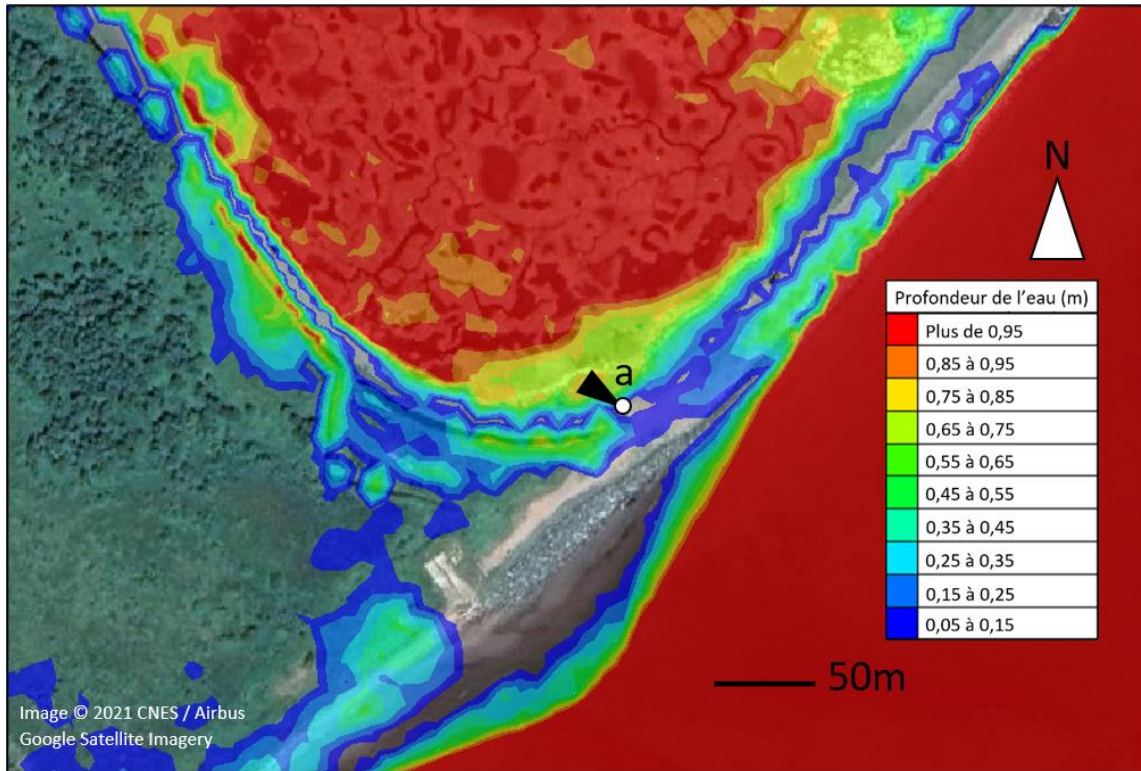
Date: 6 décembre 2010  
Dominique Bérubé & Marc Desrosiers

QAAD6-D (47.711°N, 64.680°W)





QAAD6-E (47.714°N, 64.677°W)



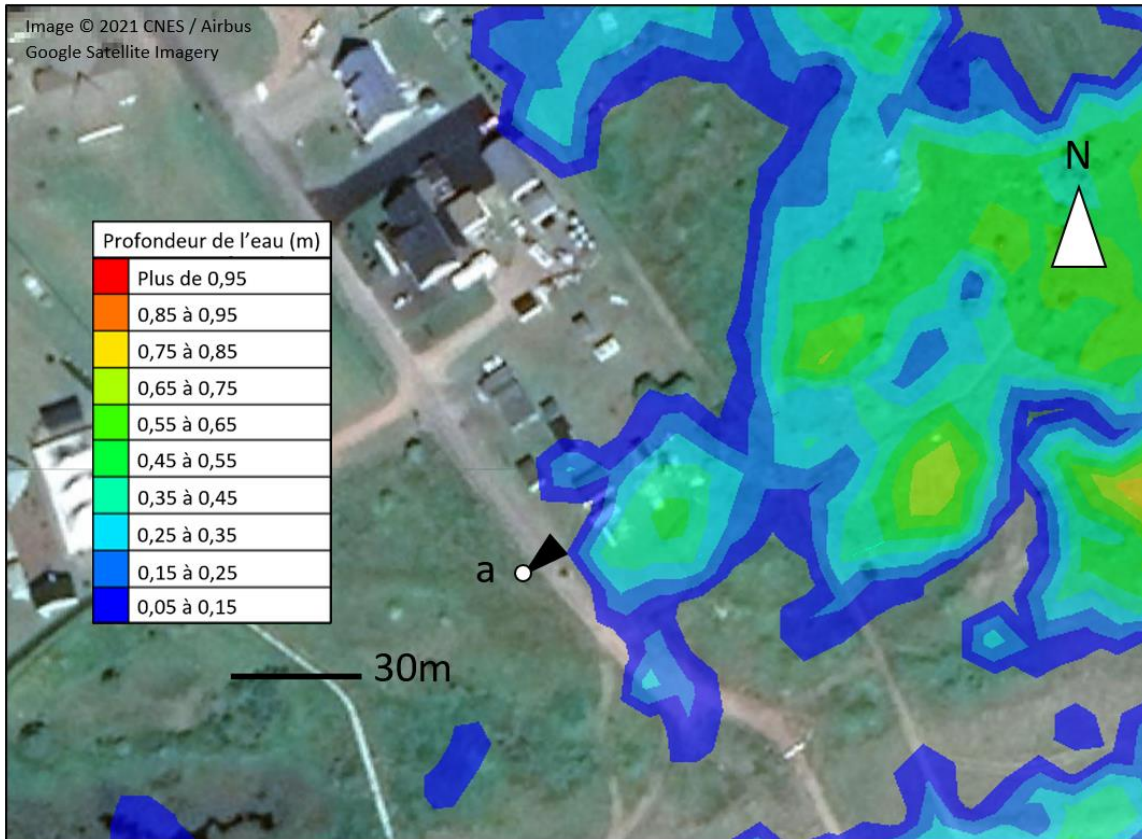


## Annexe C – Comparaison de l'étendue de l'inondation modélisée aux preuves photographiques et vidéo de l'évènement du 21 décembre 2010

### Remarques

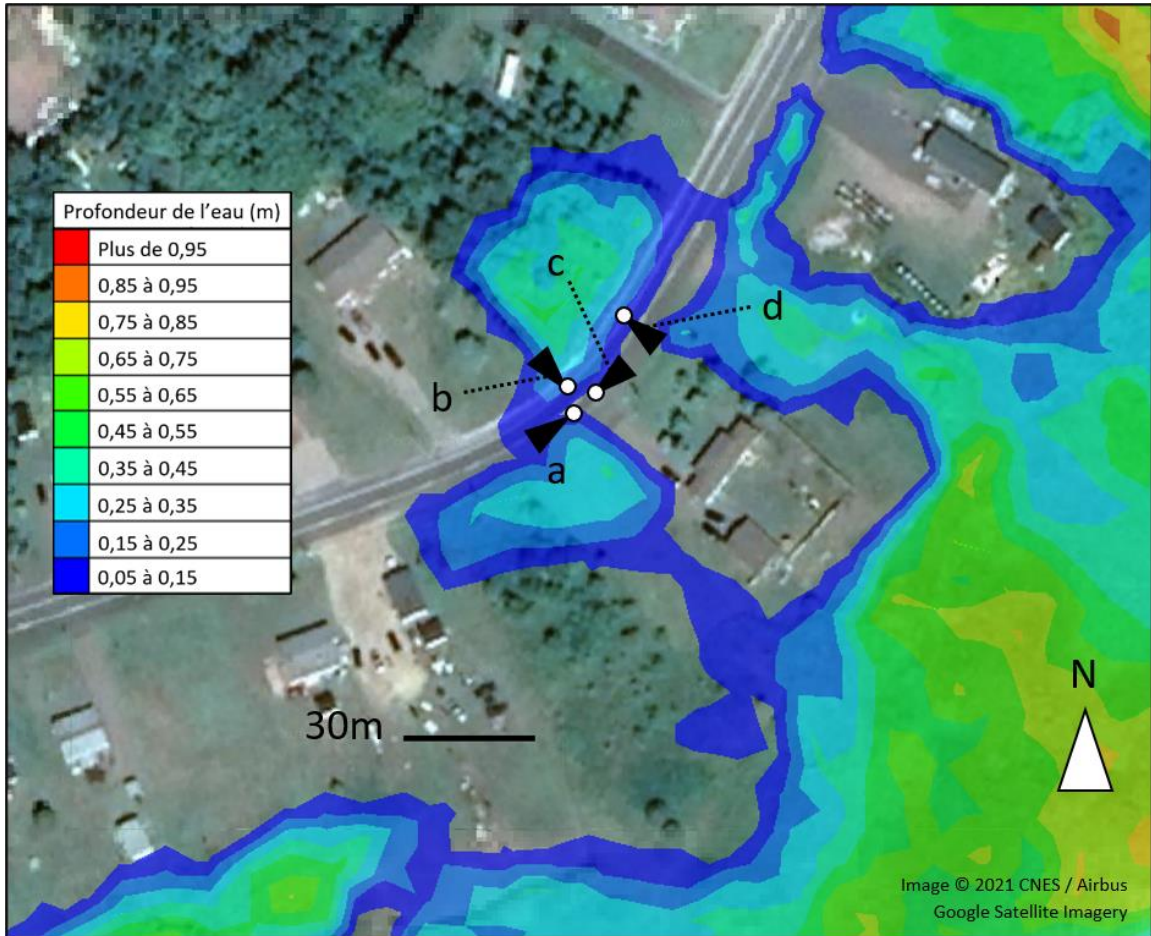
- Les cercles blancs illustrent la position de l'observateur, et les cônes noirs, le sens de l'observation.
- Lorsqu'ils sont présents, les points des relevés sont indiqués en rose.
- Les lettres indiquent les photographies ou les clips vidéo correspondants.

QAAD21-A (47.705°N, 64.696°W)





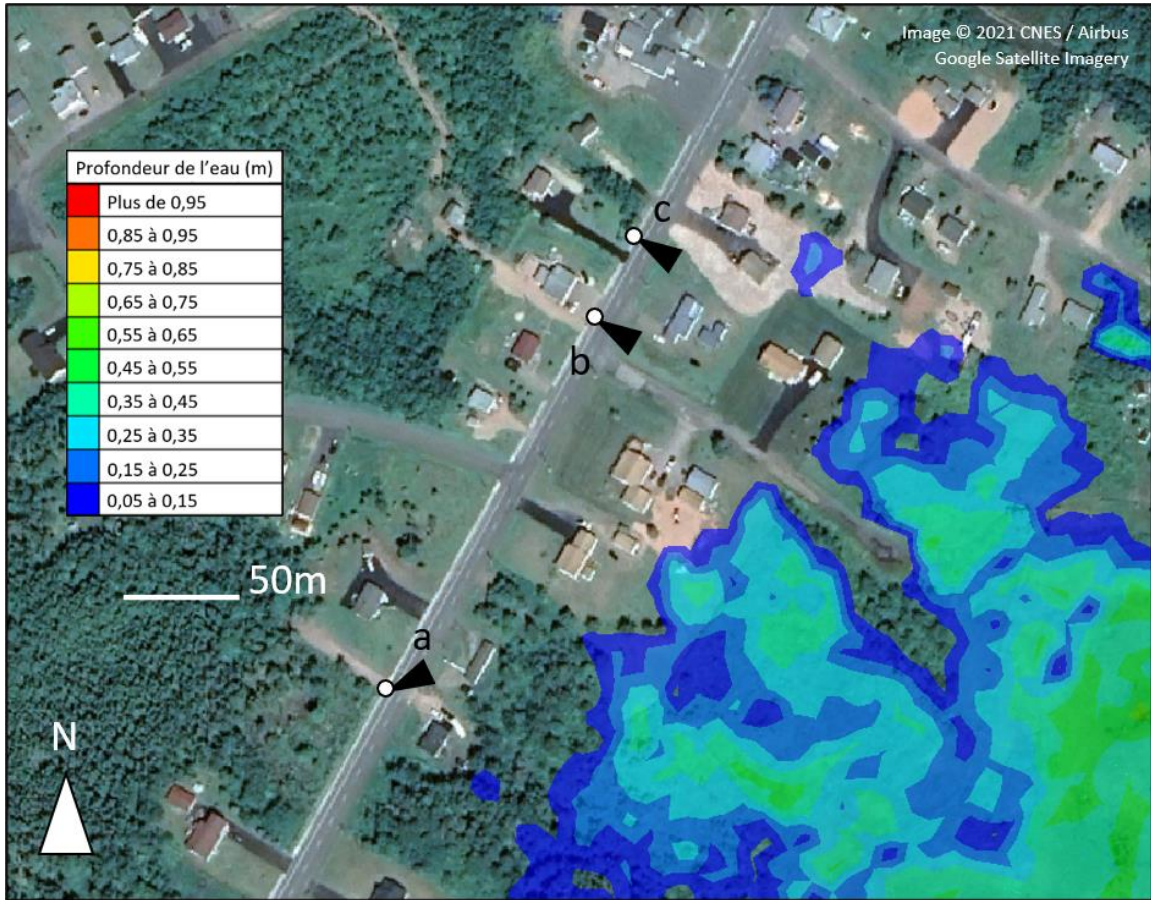
QAAD21-B (47.708°N, 64.690°W)





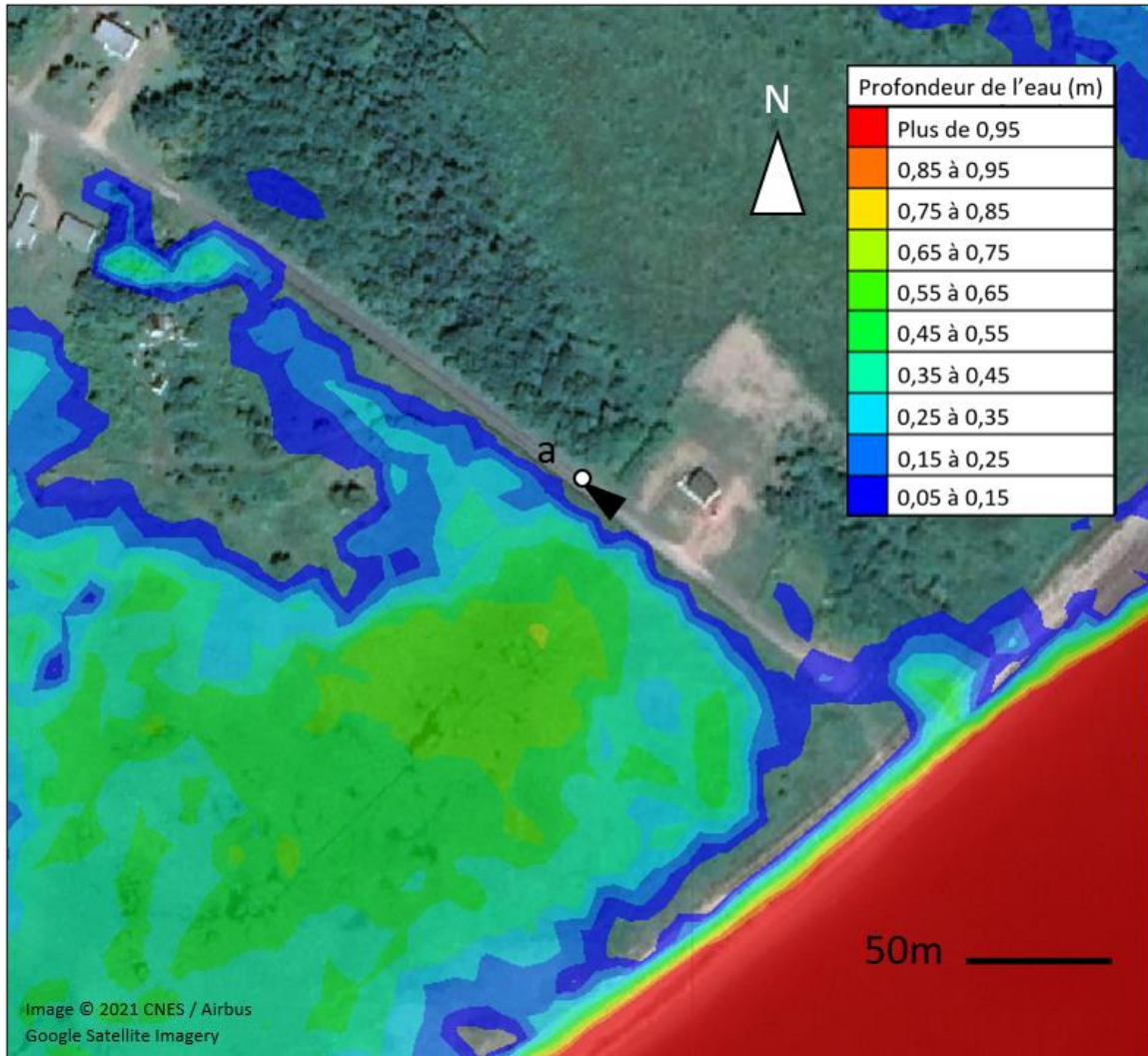
Date: 21 décembre 2010  
Dominique Bérubé & Marc Desrosiers

# QAAD21-C (47.712°N, 64.687°W)



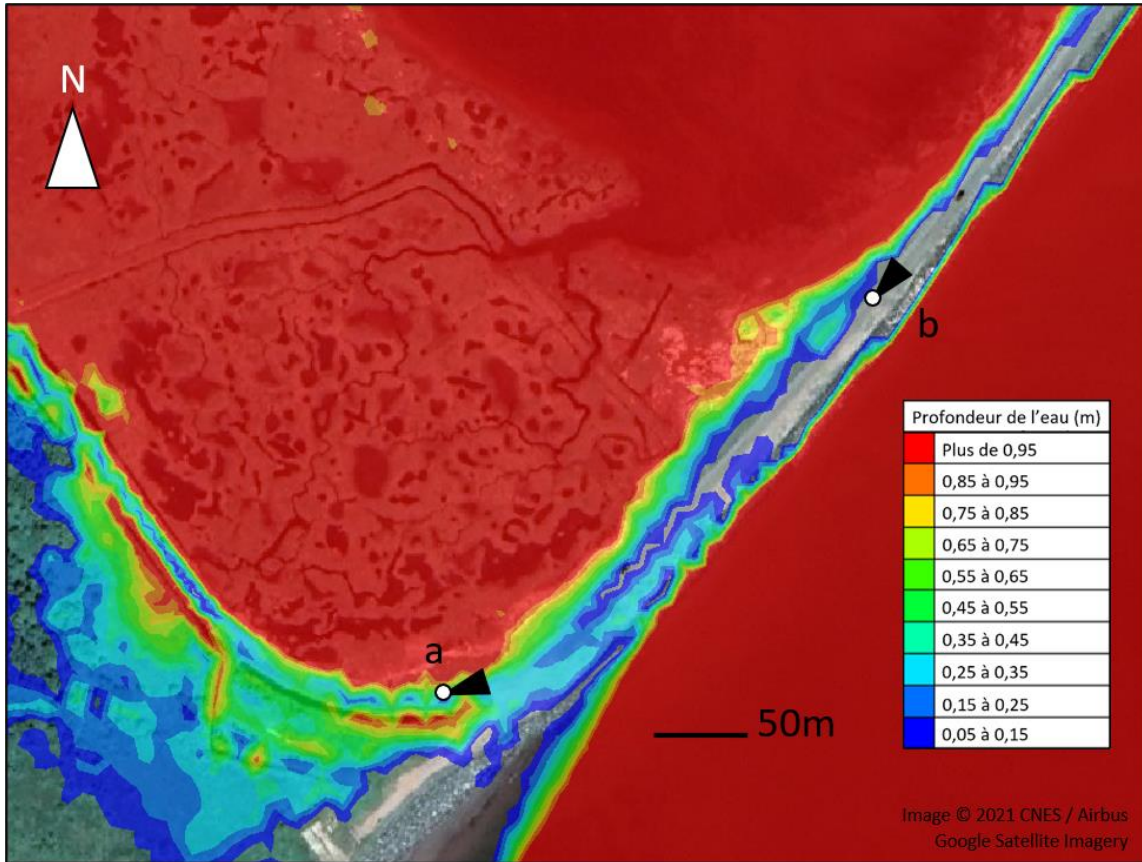


QAAD21-D (47.711°N, 64.680°W)





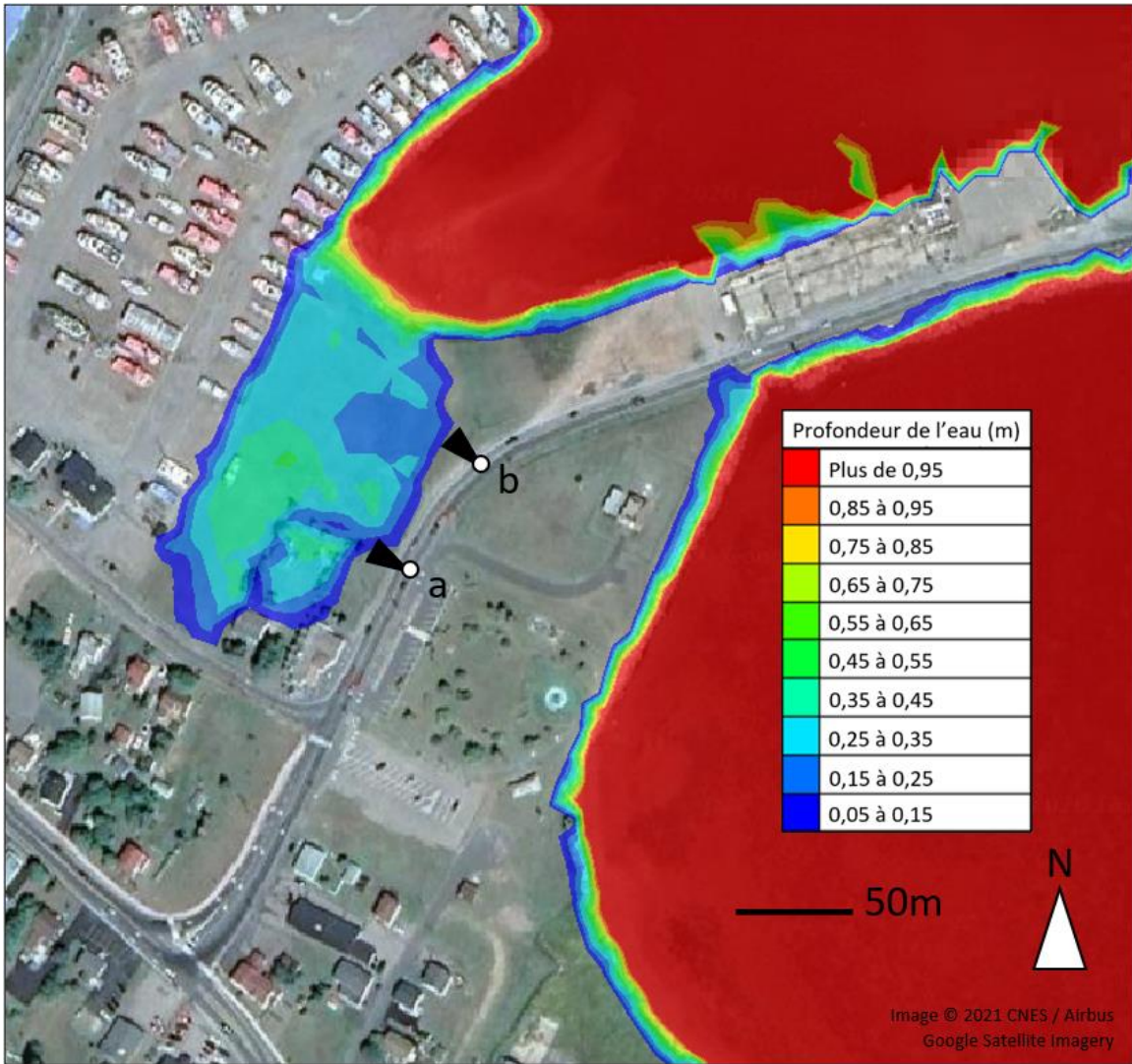
QAAD21-E (47.714°N, 64.677°W)





Date: 21 décembre 2010  
Dominique Bérubé & Marc Desrosiers

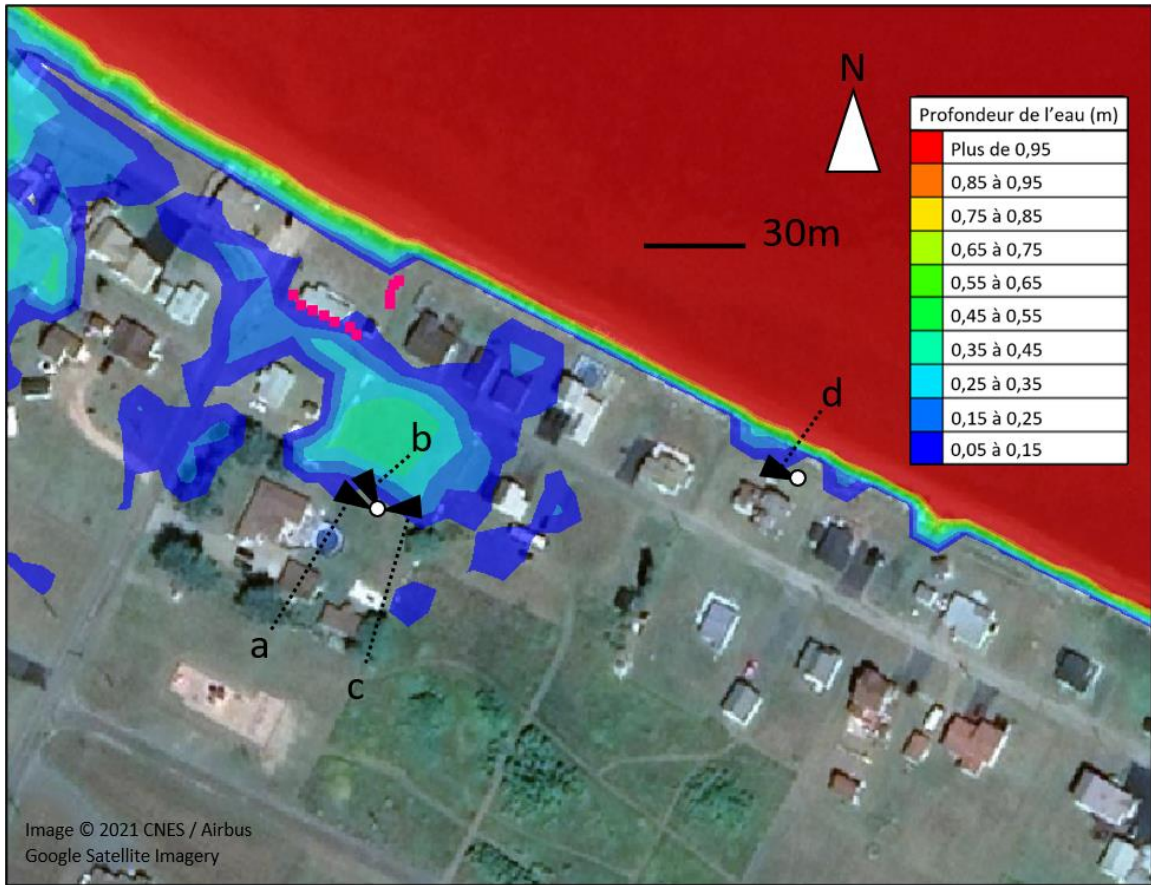
QAAD21-F (47.743°N, 64.702°W)

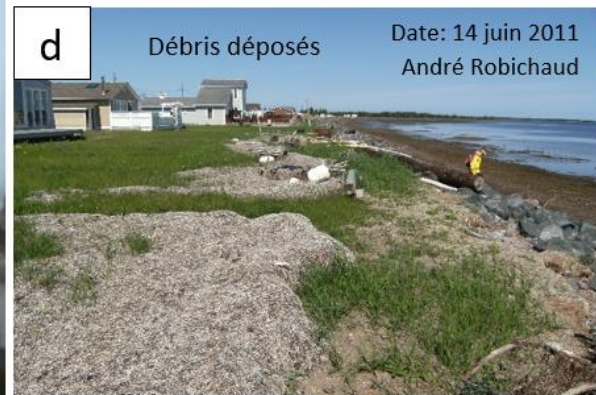




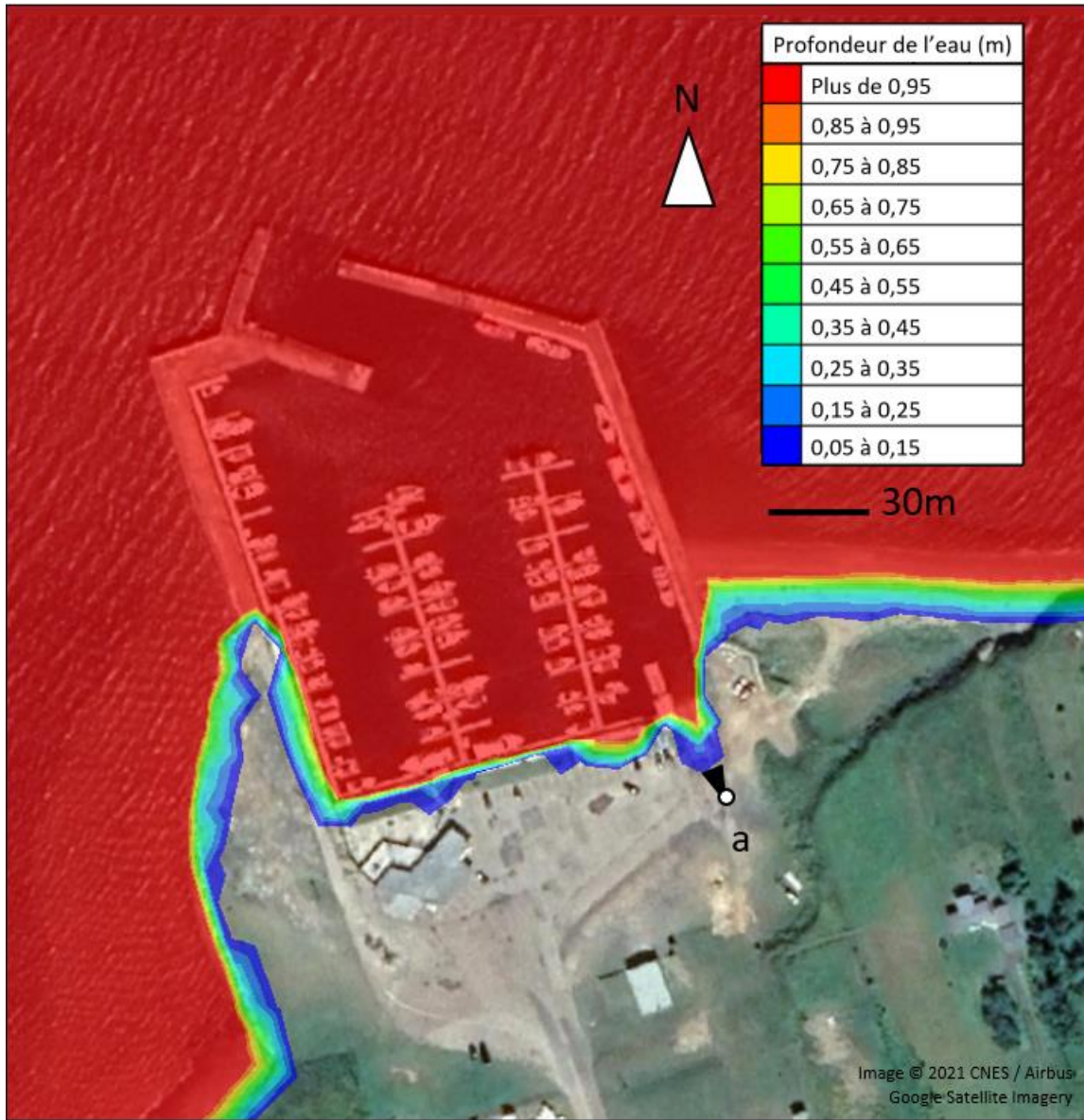
Date: 21 décembre 2010  
Maxime Doucet

QAAD21-G (47.759°N, 64.725°W)





QAAD21-H (47.803°N, 64.872°W)





## Annexe D – Aléa d'inondation dans les conditions actuelles

### Étendue maximale de crue pour tous les événements des aléas actuels

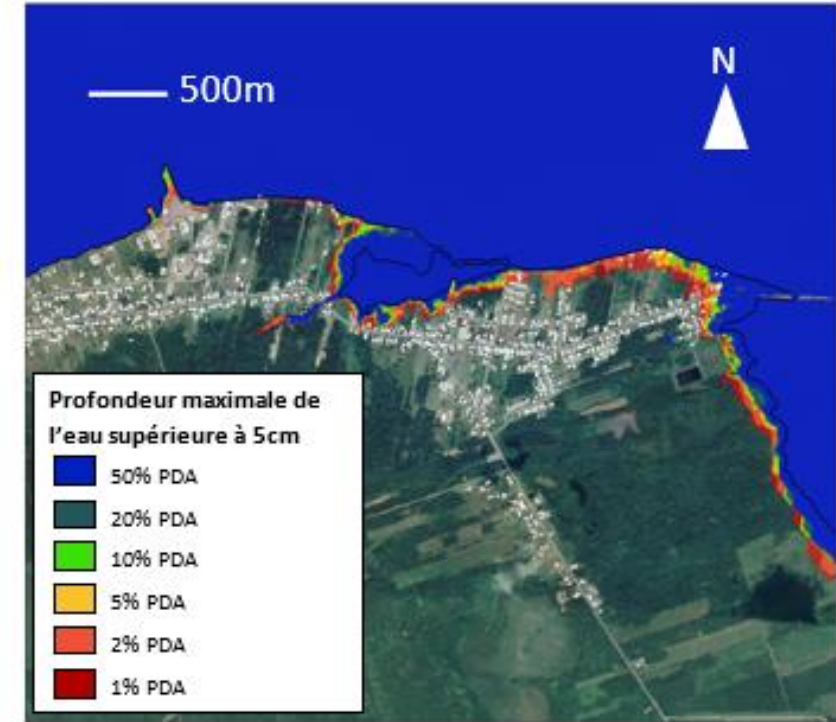
Maisonnette



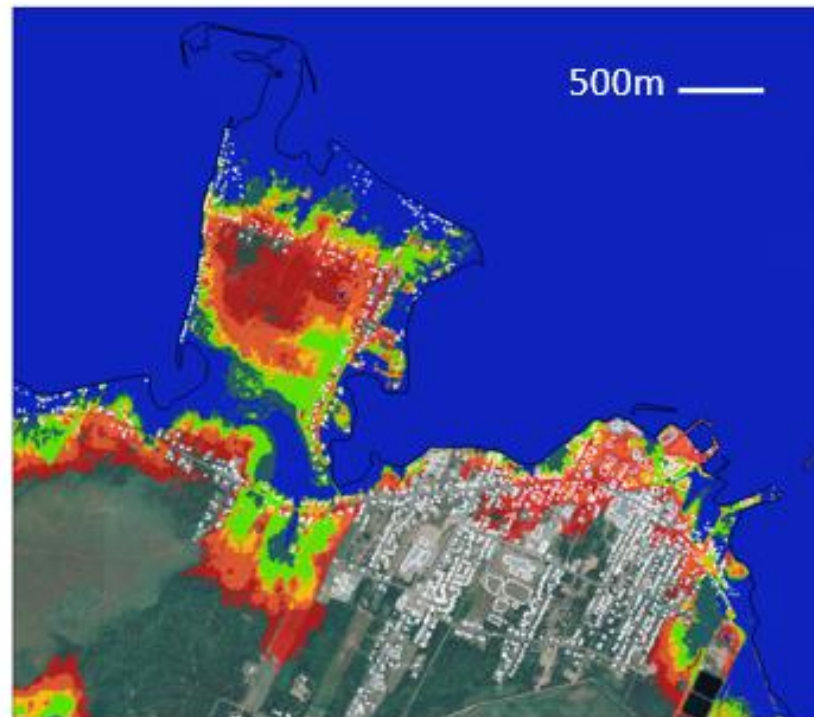
Caraquet



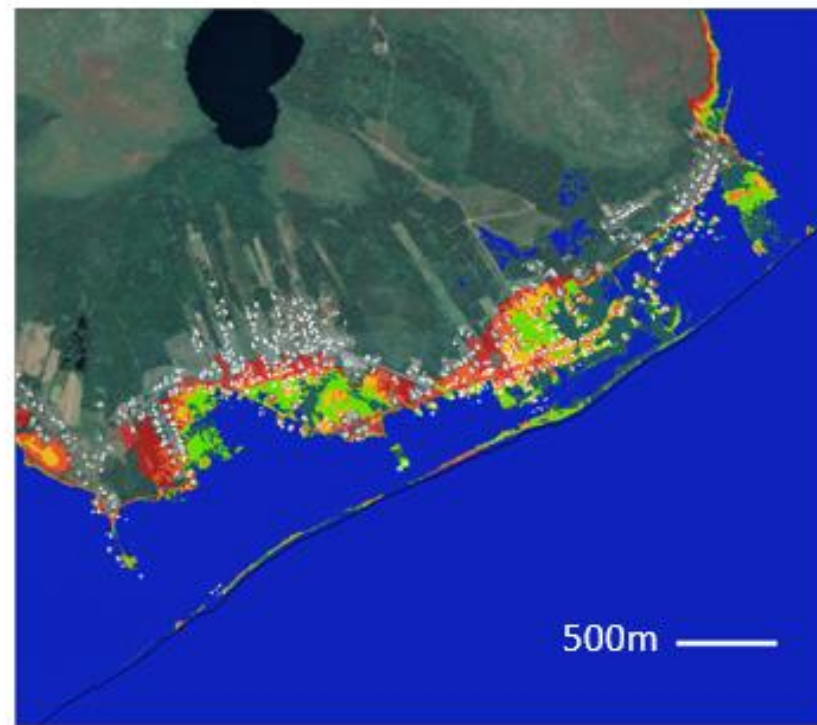
Bas-Caraquet



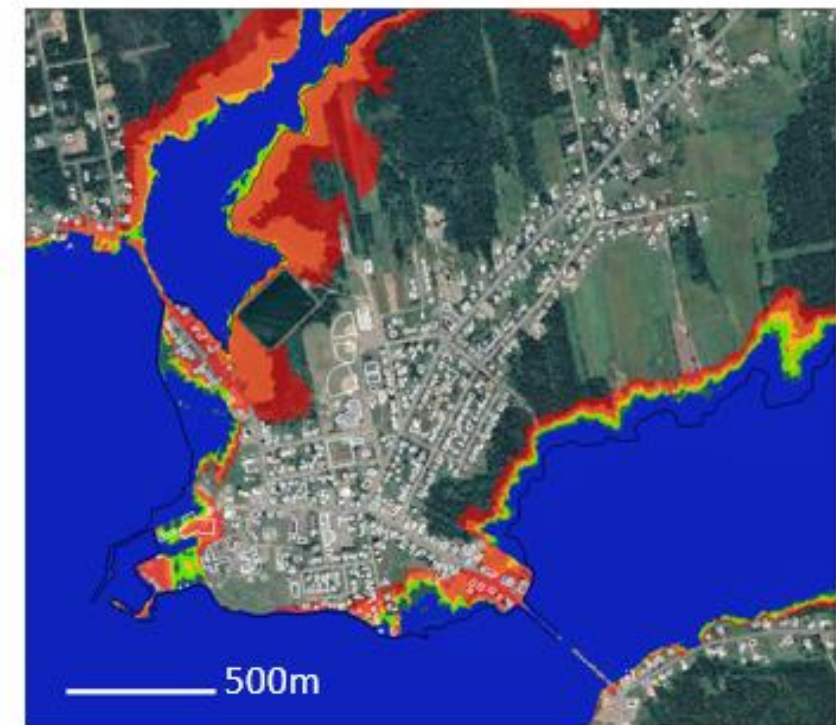
Shippagan et Pointe-Brûlée



Le Goulet



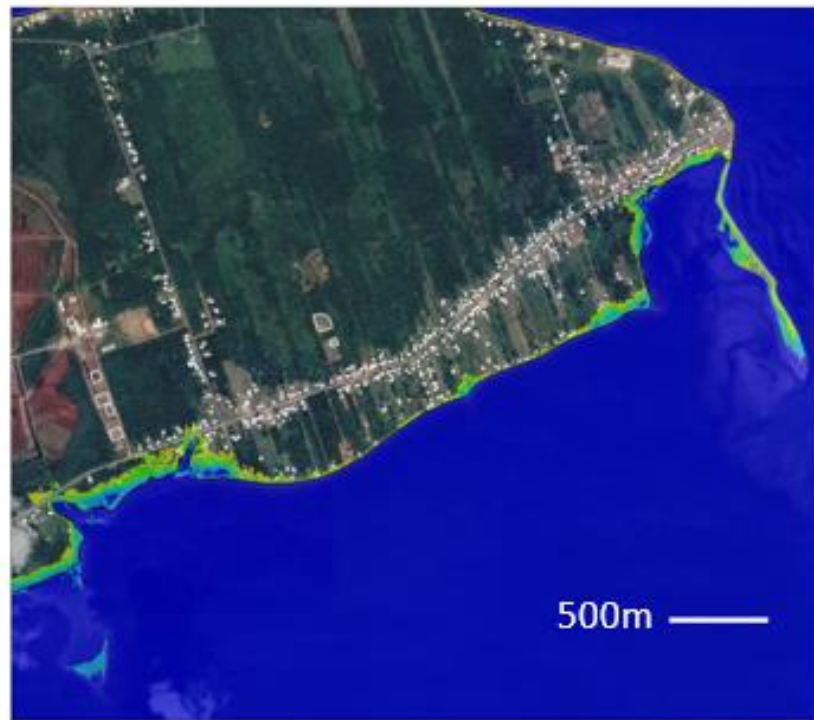
Lamèque



Carte de référence: Image © 2021 CNES / Airbus; Google Satellite Imagery

**Profondeur maximale de l'eau pour l'évènement d'aléa actuel ayant une probabilité de dépassement annuel de 50 %**

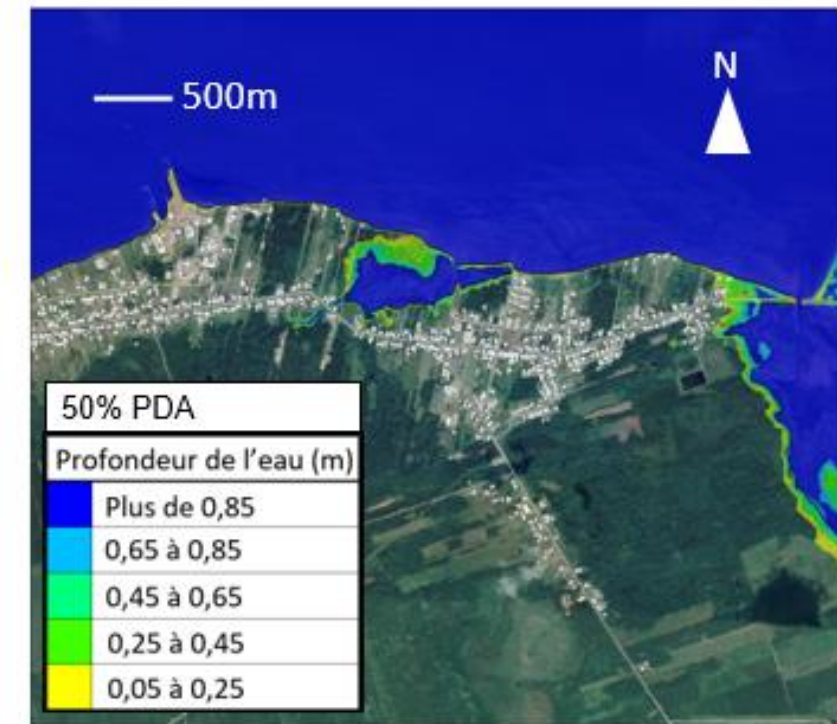
Maisonnette



Caraquet



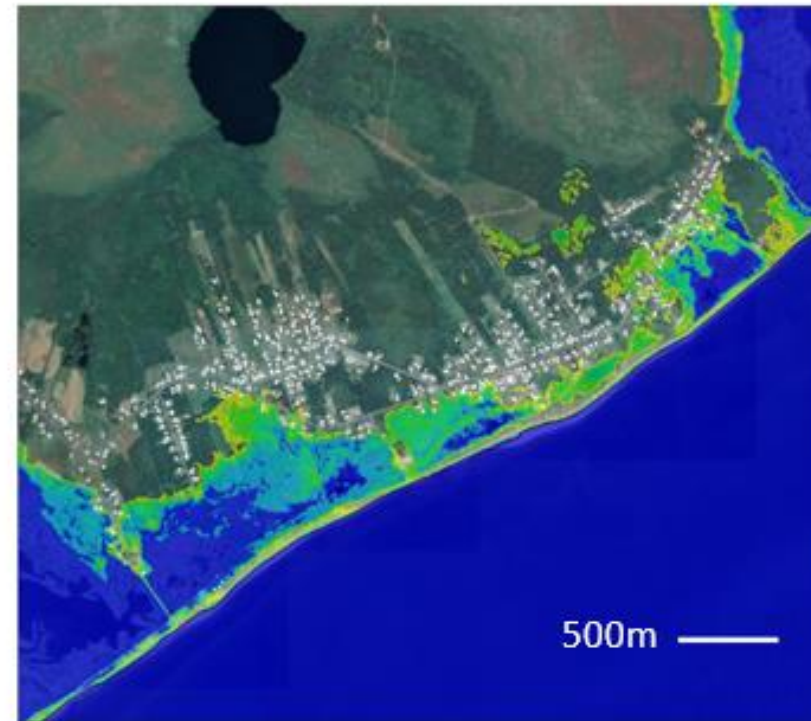
Bas-Caraquet



Shippagan et Pointe-Brûlée



Le Goulet



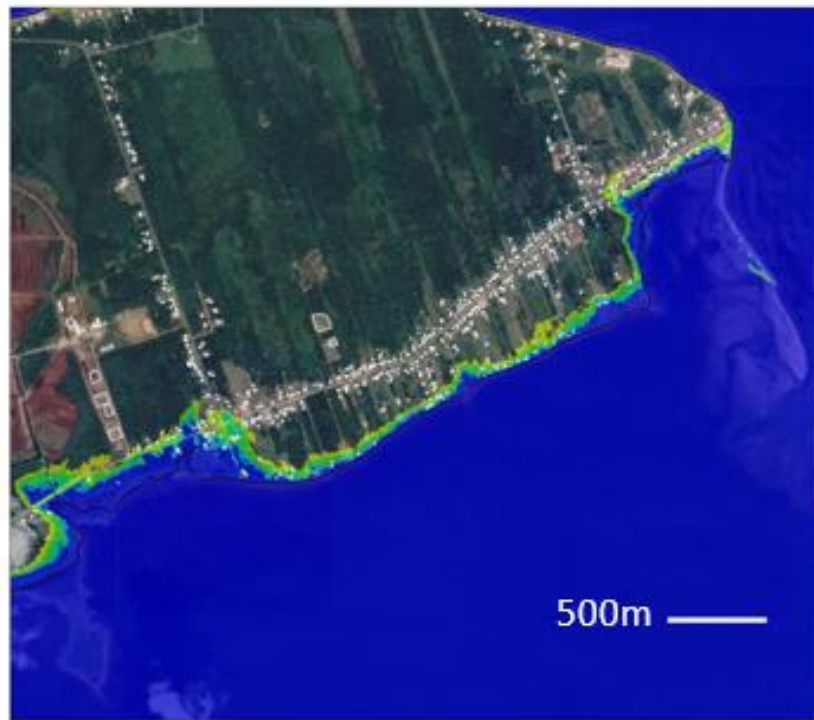
Lamèque



Carte de référence: Image © 2021 CNES / Airbus; Google Satellite Imagery

Profondeur maximale de l'eau pour l'évènement d'aléa actuel ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 %

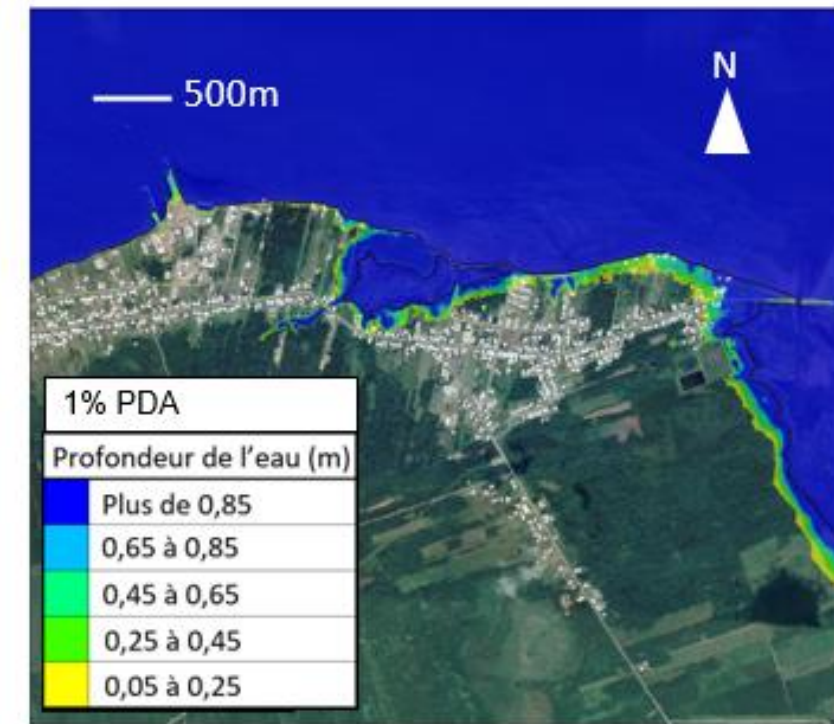
Maisonnette



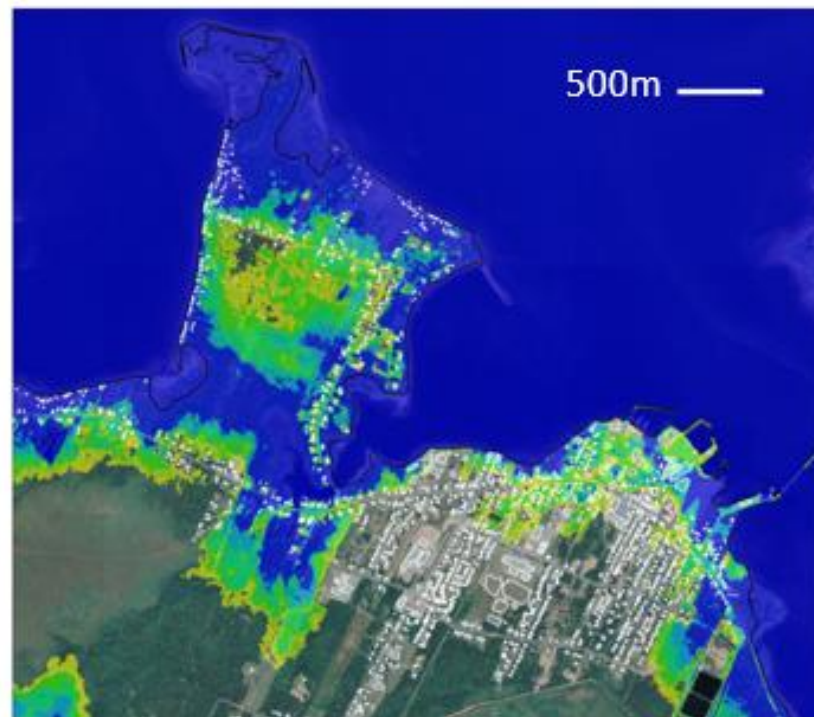
Caraquet



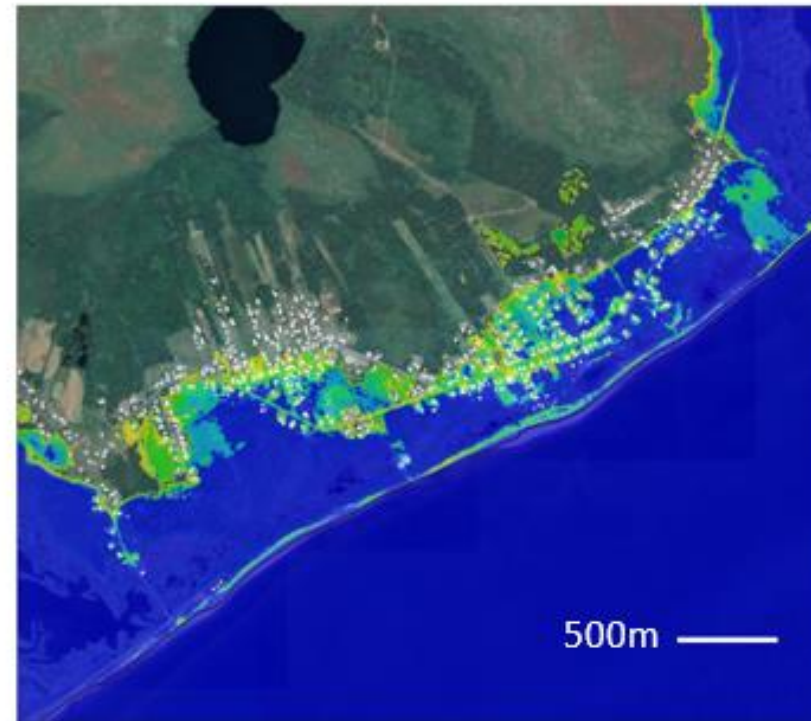
Bas-Caraquet



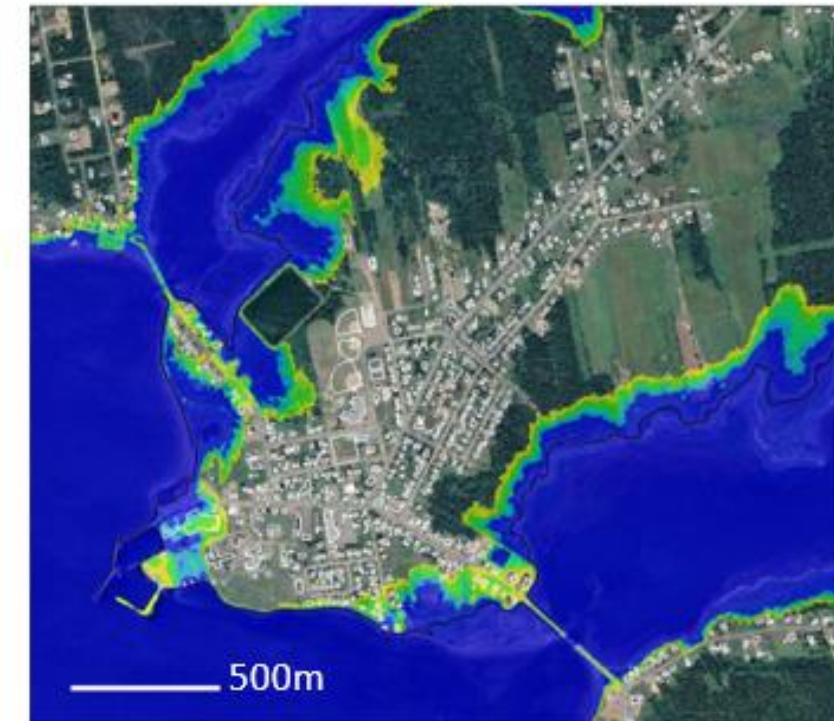
Shippagan et Pointe-Brûlée



Le Goulet



Lamèque

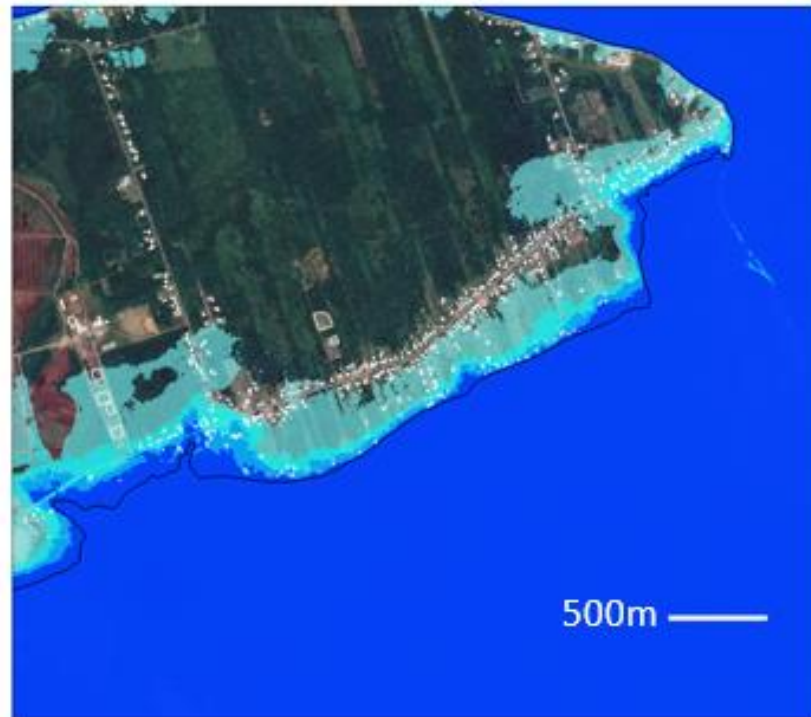


Carte de référence: Image © 2021 CNES / Airbus; Google Satellite Imagery

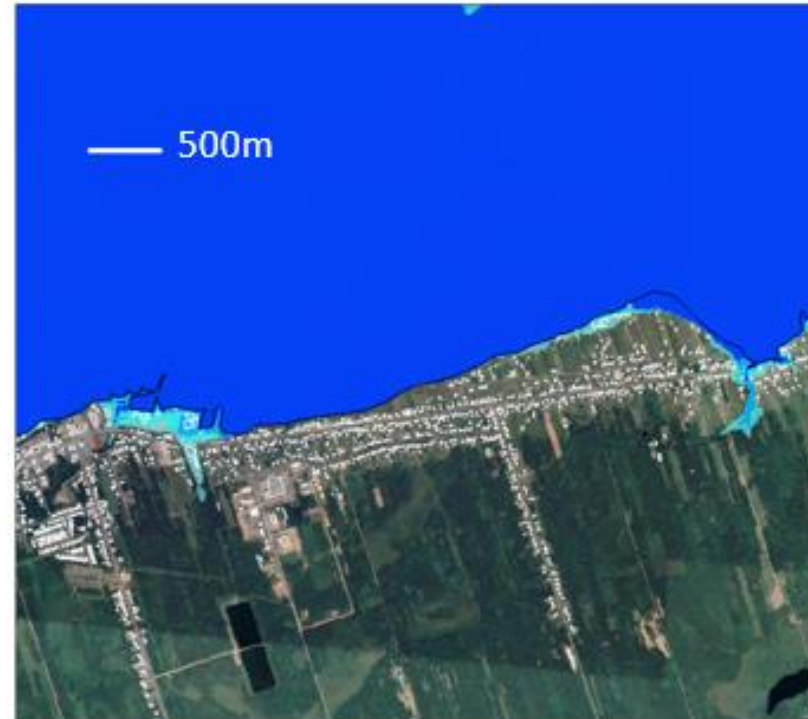
## **Annexe E – Aléa d’inondation dans des conditions futures tenant compte de l’élévation potentielle du niveau de la mer**

Étendue maximale de crue pour l'évènement d'aléa ayant une probabilité de dépassement annuel de 50 % pour les niveaux actuels et futurs de la mer représentant une élévation du niveau mondial de la mer

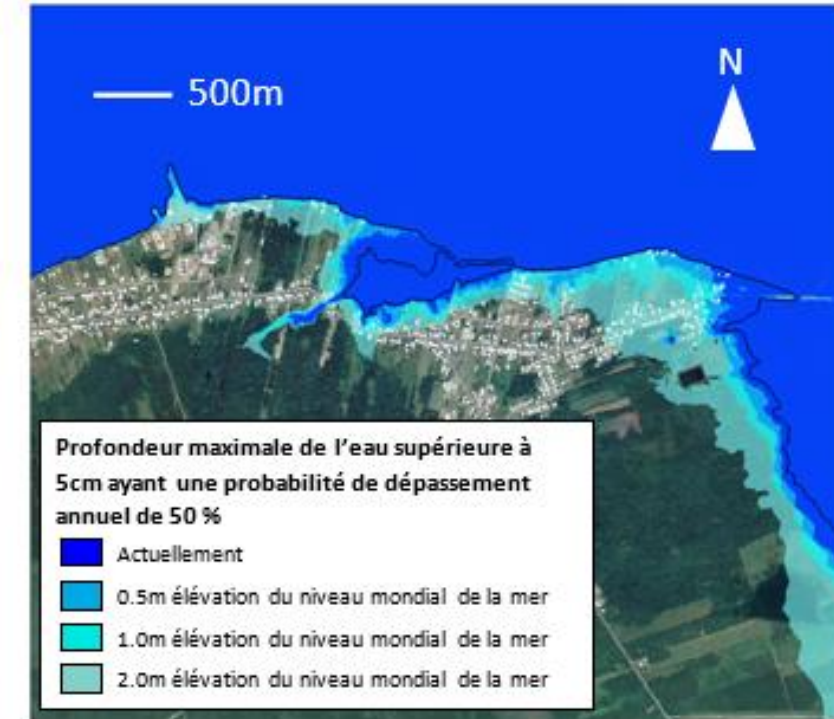
Maisonnette



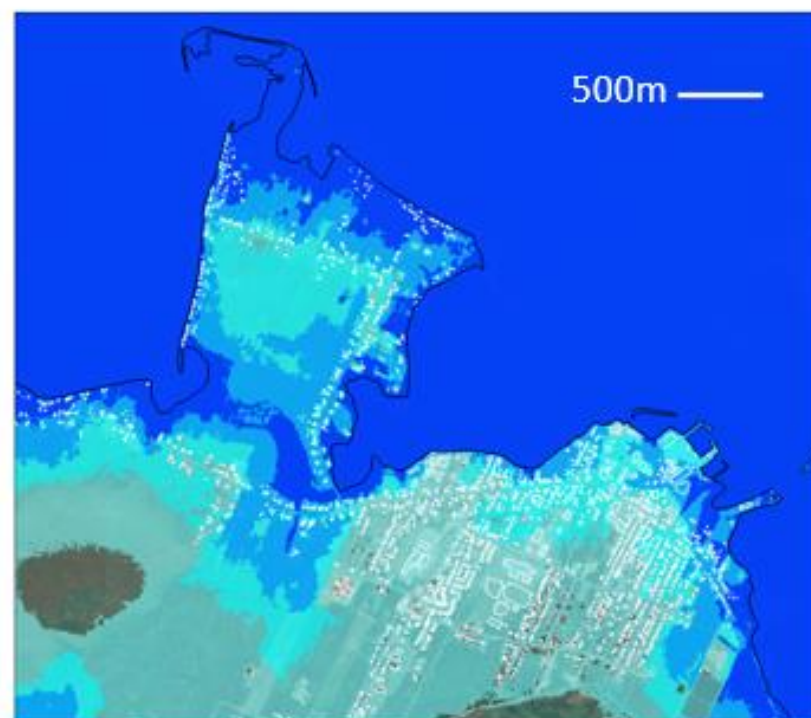
Caraquet



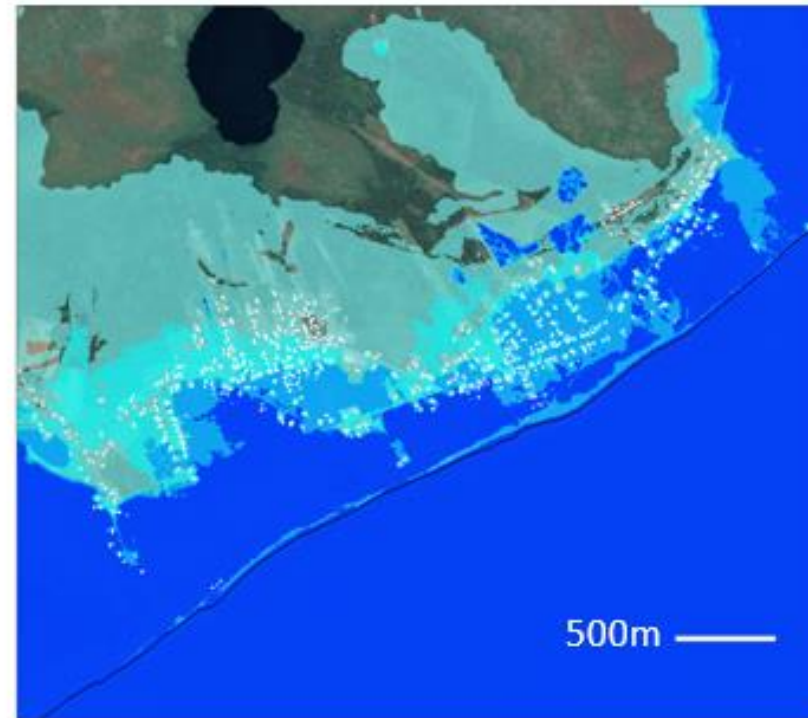
Bas-Caraquet



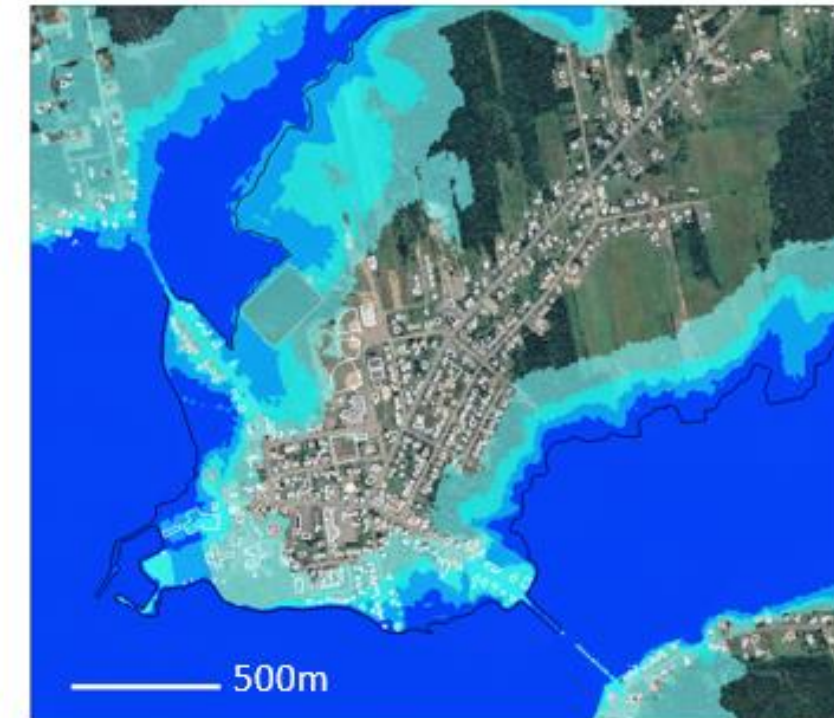
Shippagan et Pointe-Brûlée



Le Goulet



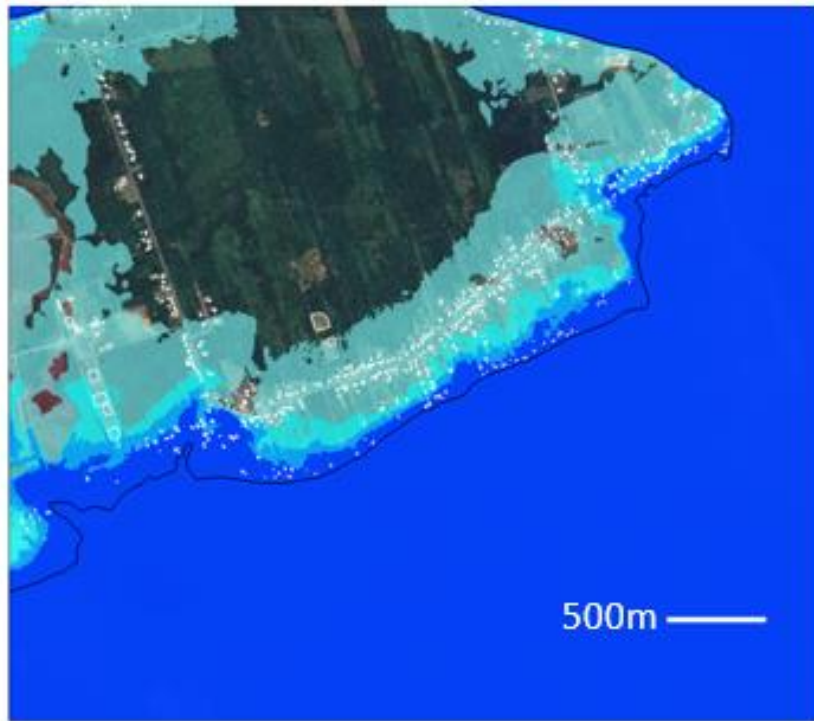
Lamèque



Carte de référence: Image © 2021 CNES / Airbus; Google Satellite Imagery

Étendue maximale de crue pour l'évènement d'aléa ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % pour les niveaux actuels et futurs de la mer représentant une élévation du niveau mondial de la mer

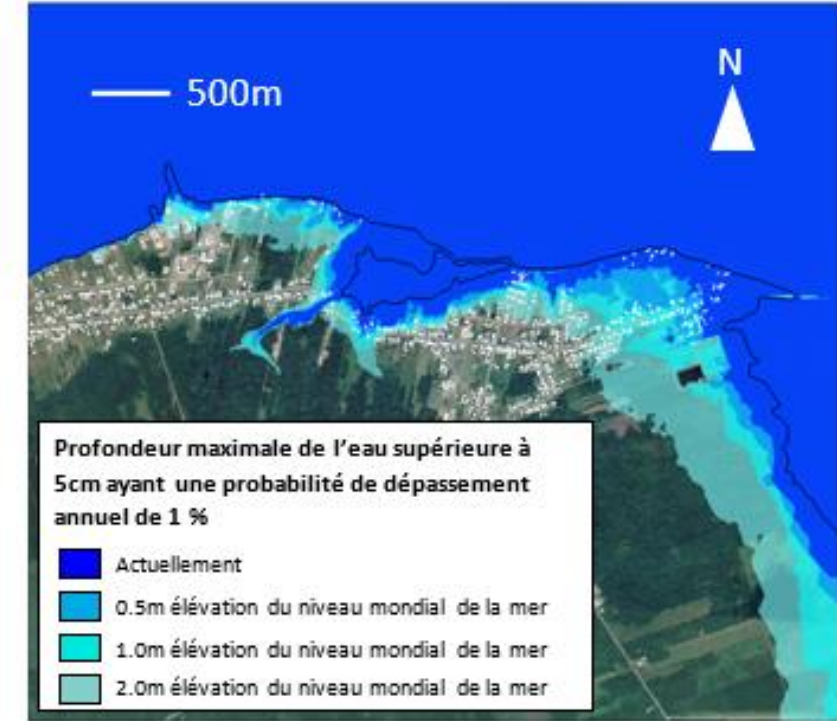
Maisonnette



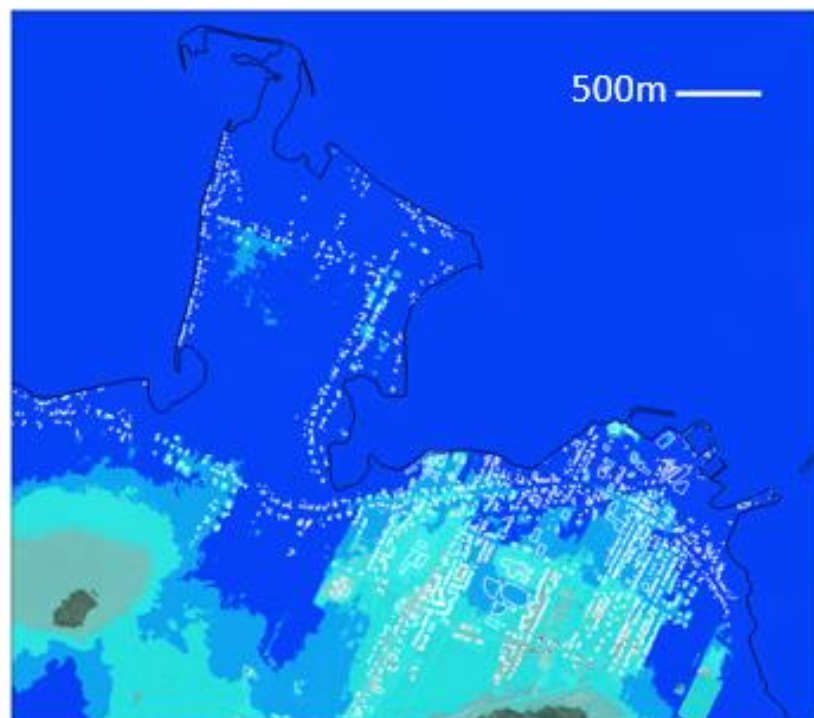
Caraquet



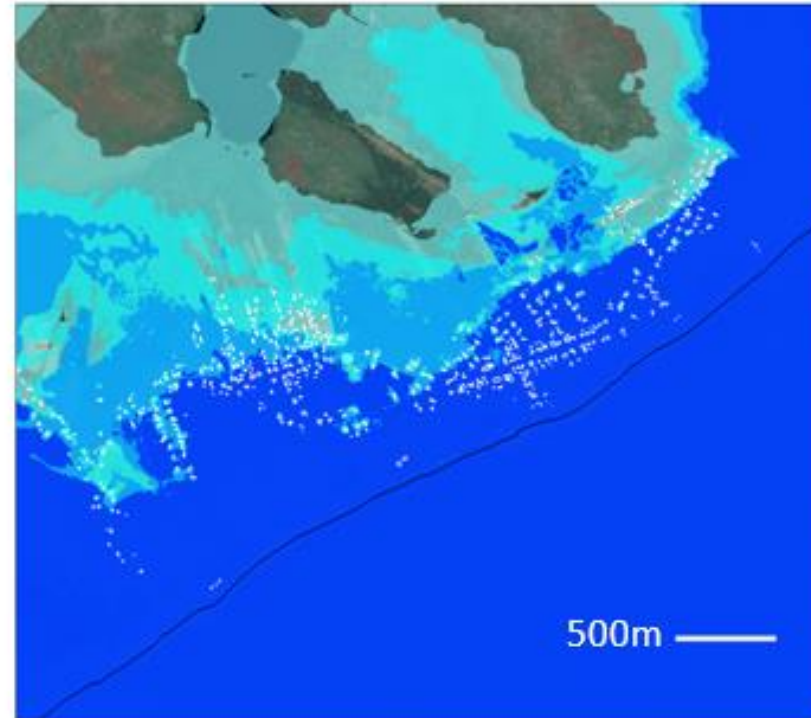
Bas-Caraquet



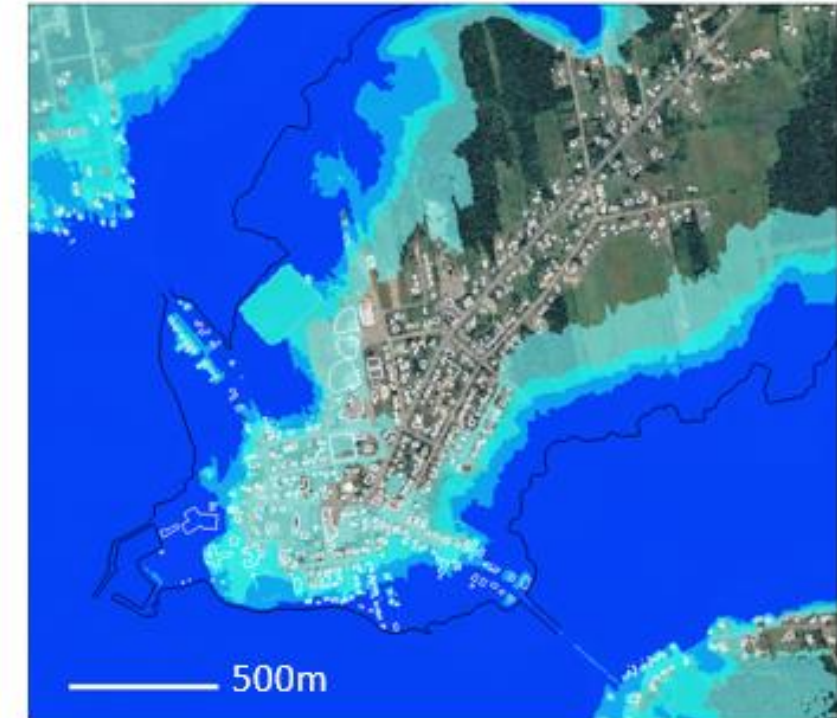
Shippagan et Pointe-Brûlée



Le Goulet



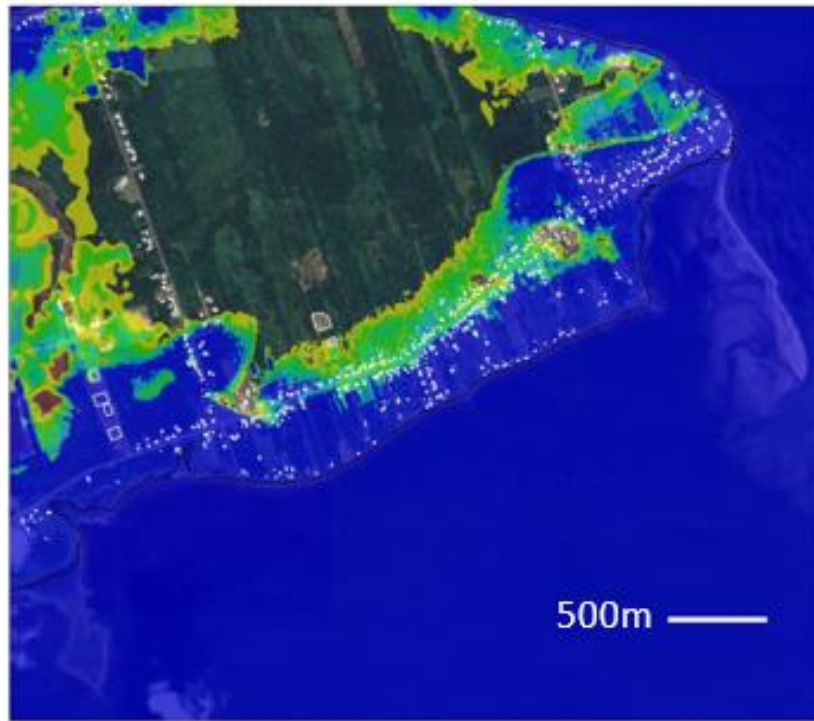
Lamèque



Carte de référence: Image © 2021 CNES / Airbus; Google Satellite Imagery

Profondeur maximale de l'eau pour l'évènement d'aléa ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % représentant une élévation du niveau mondial de la mer de 2,0 m

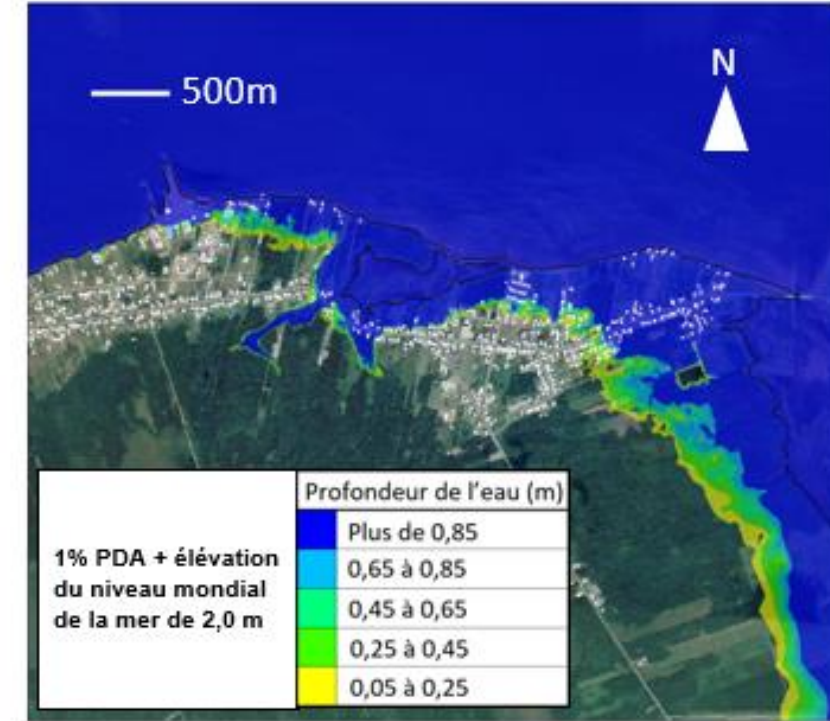
Maisonnette



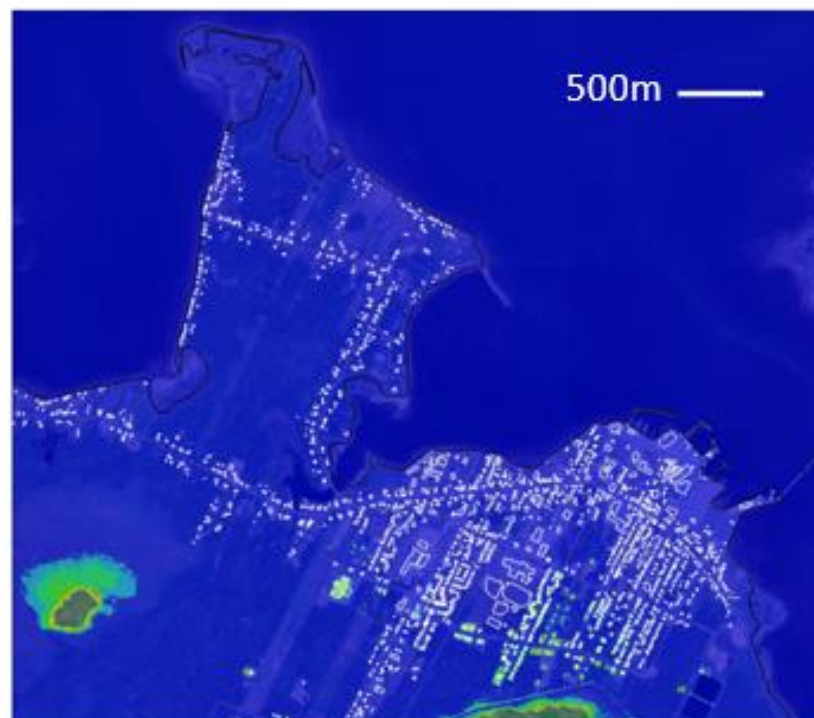
Caraquet



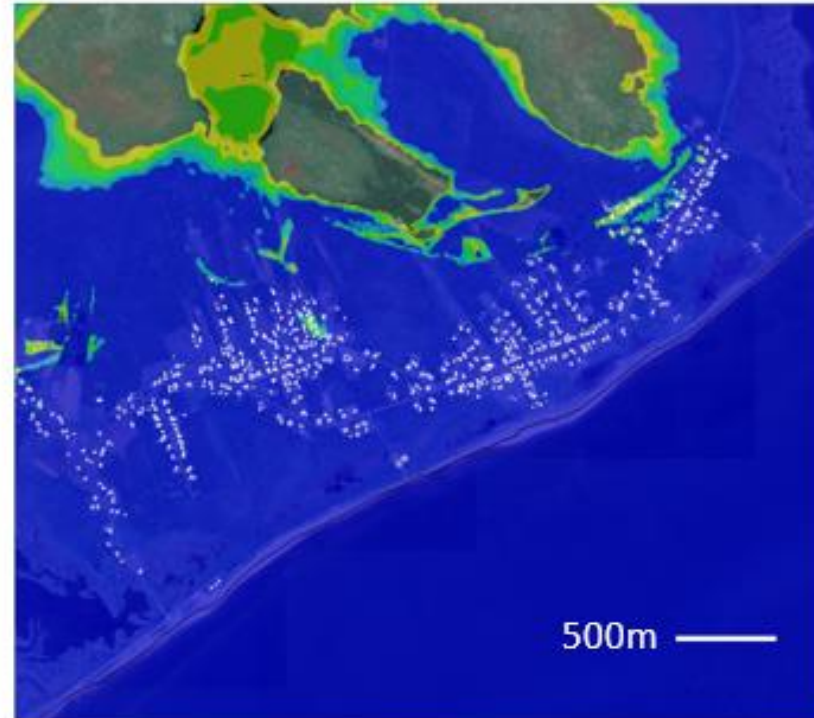
Bas-Caraquet



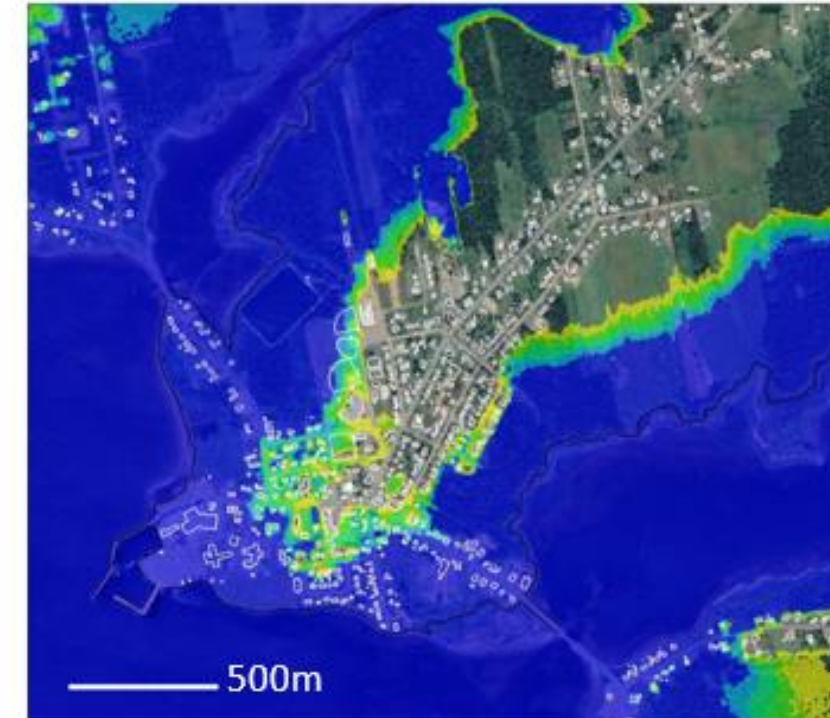
Shippagan et Pointe-Brûlée



Le Goulet



Lamèque



Carte de référence: Image © 2021 CNES / Airbus; Google Satellite Imagery

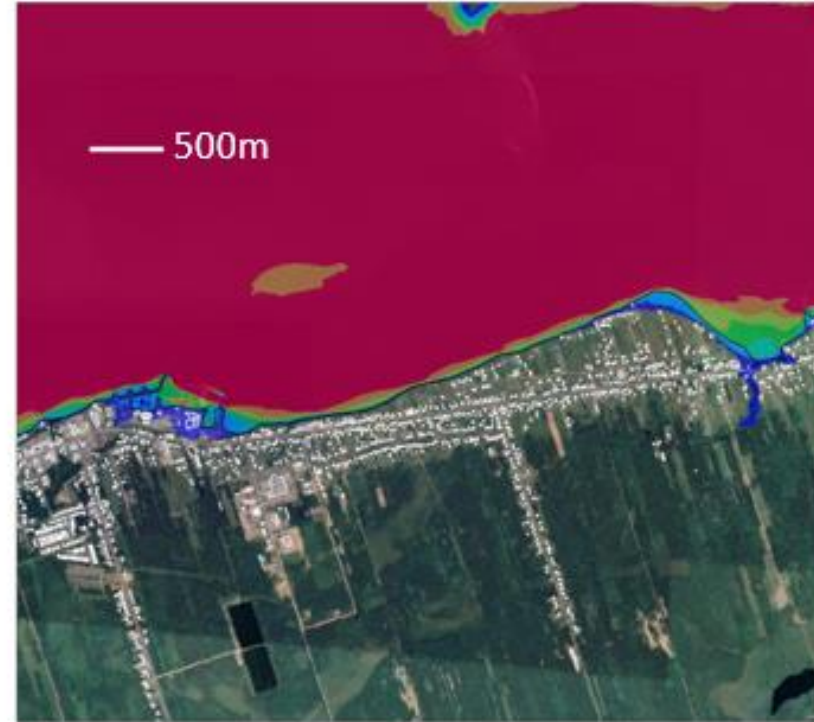
## **Annexe F – Aléa lié au débit dans les conditions actuelles et les conditions futures tenant compte de l'élévation potentielle du niveau de la mer**

Produit profondeur-vitesse pour l'évènement d'aléa actuel ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 %

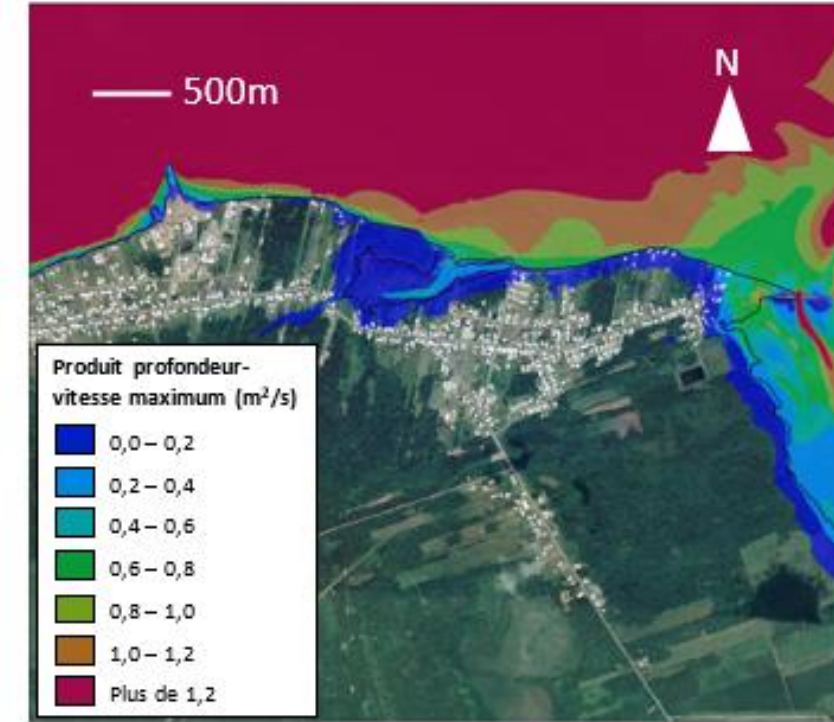
Maisonnette



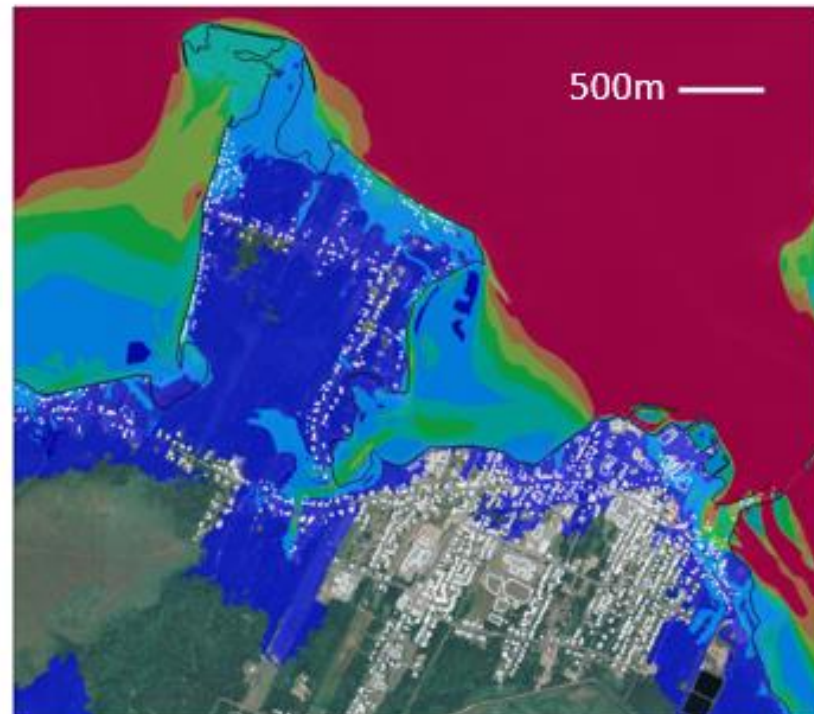
Caraquet



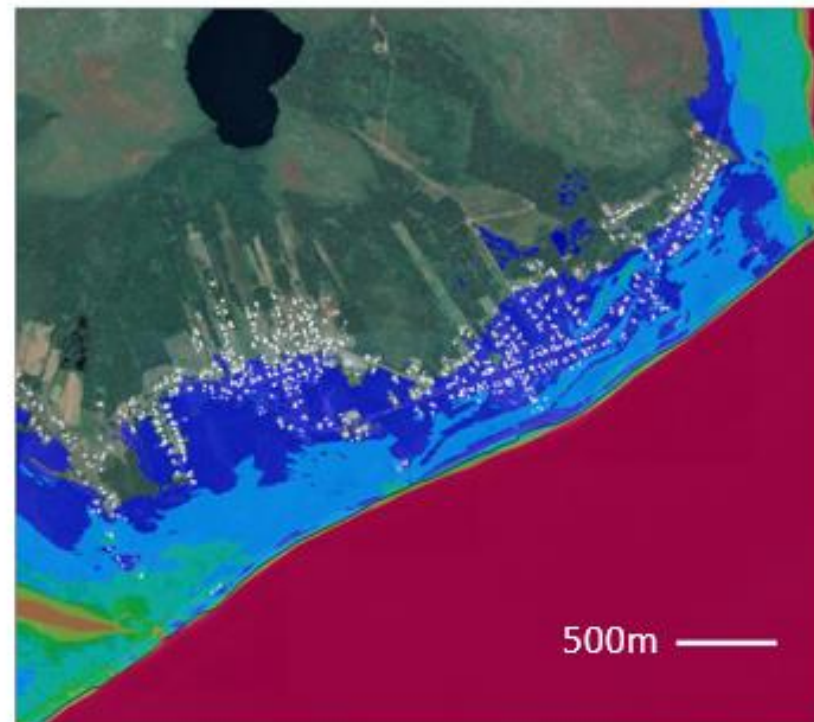
Bas-Caraquet



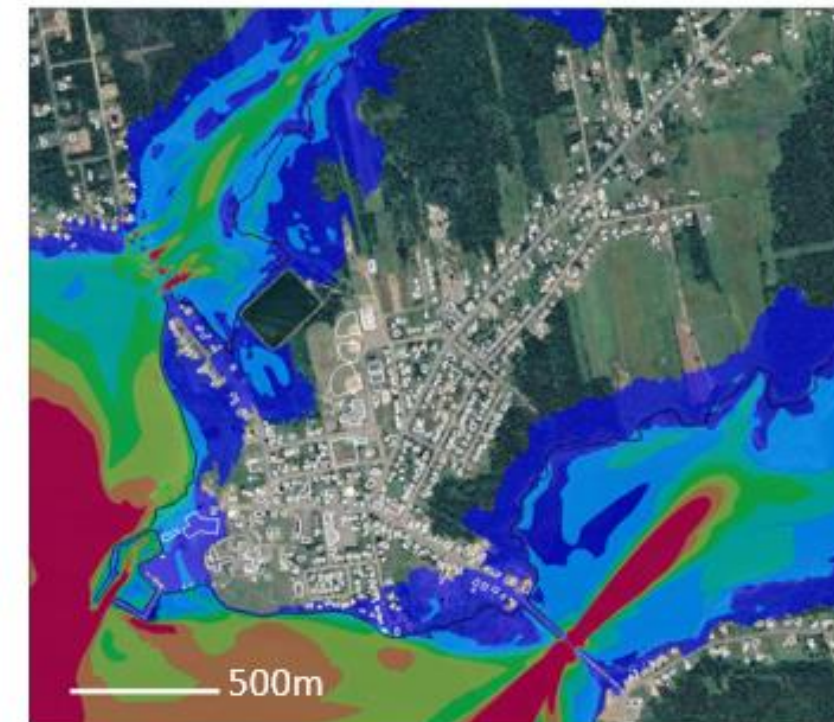
Shippagan et Pointe-Brûlée



Le Goulet

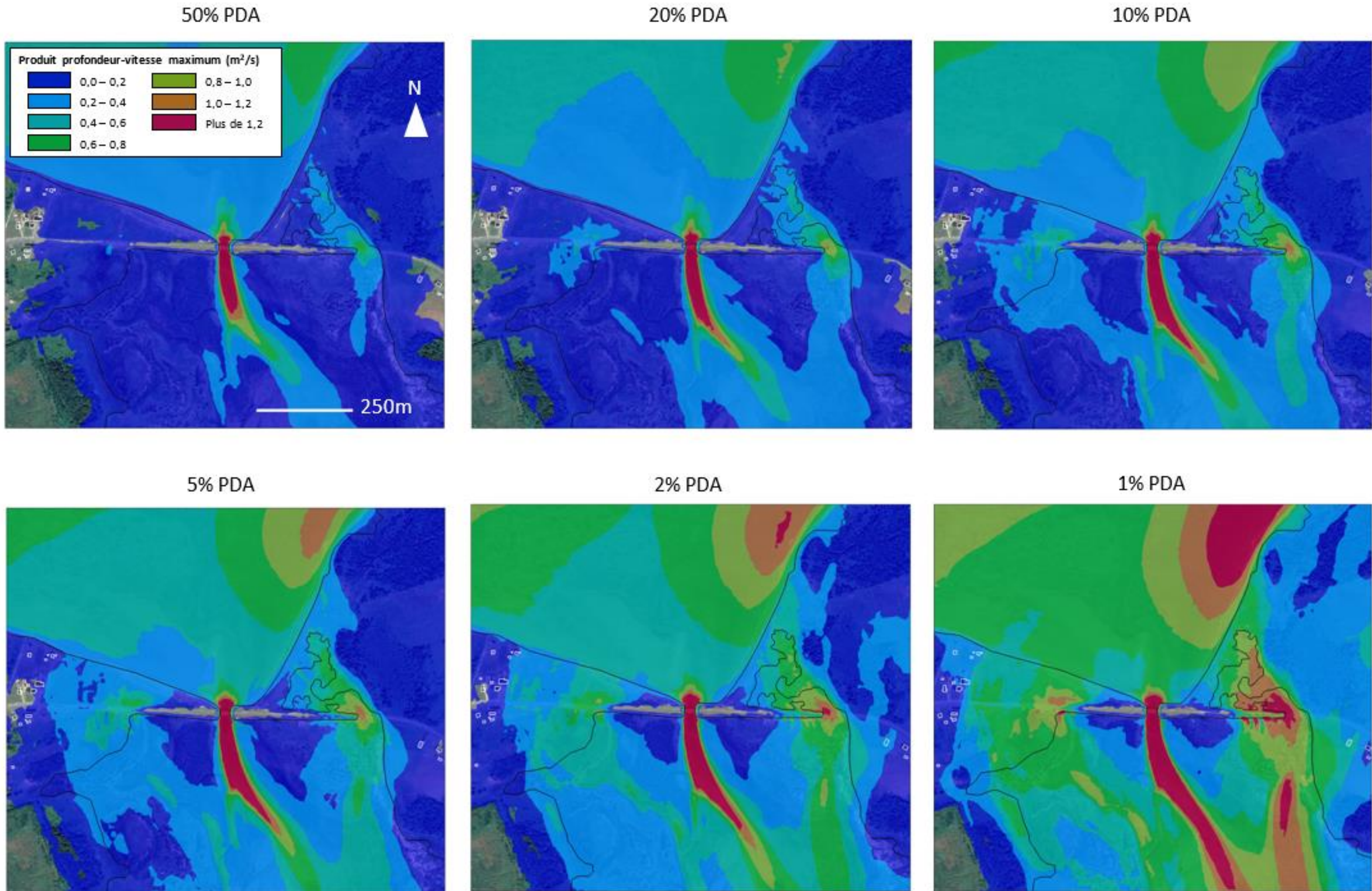


Lamèque



Carte de référence: Image © 2021 CNES / Airbus; Google Satellite Imagery

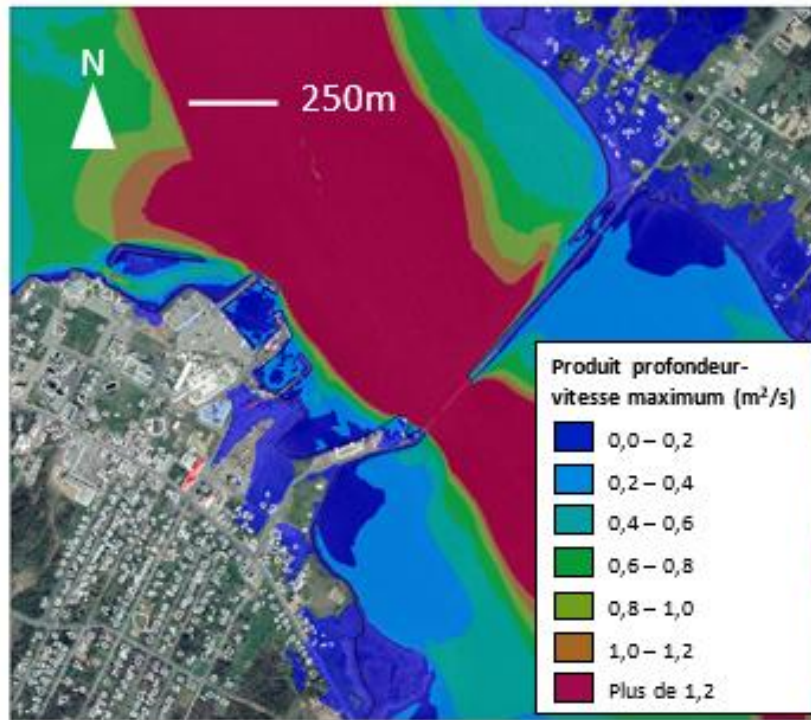
Produit profondeur-vitesse pour les événements d'aléa actuels à Bas-Caraquet



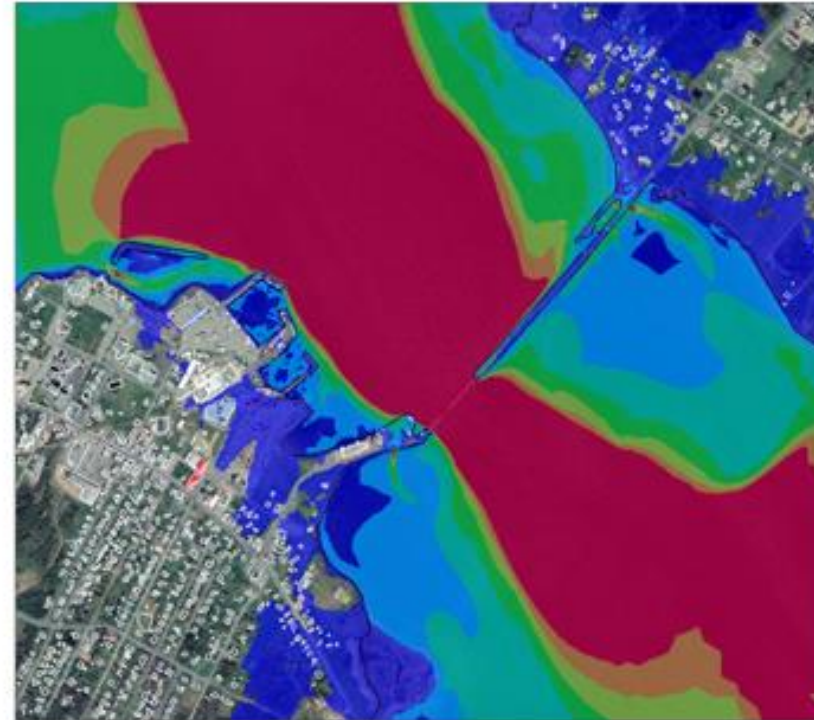
Carte de référence: Image © 2021 CNES / Airbus; Google Satellite Imagery

### Produit profondeur-vitesse pour les évènements d'aléa actuels à Shippagan

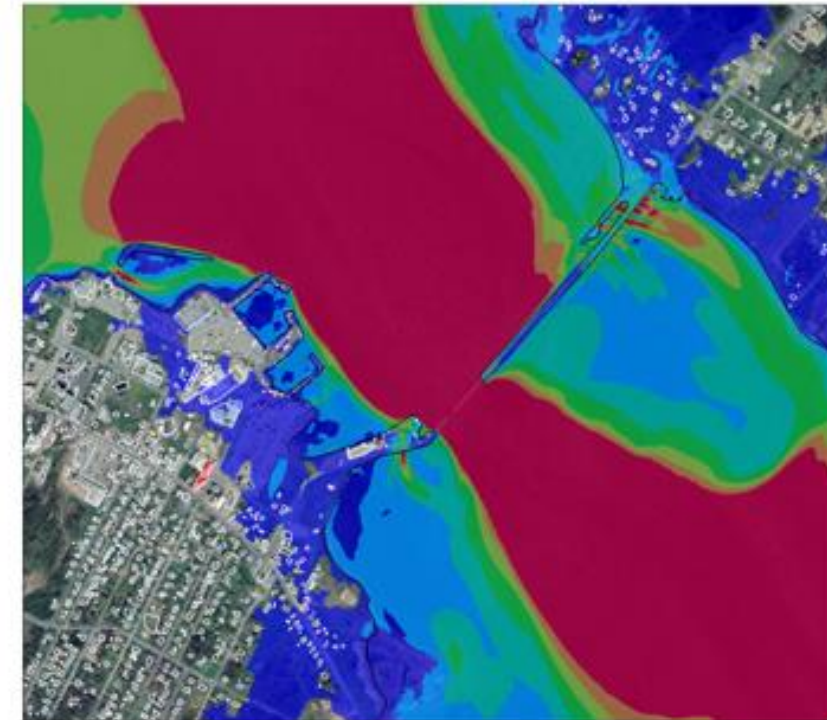
50% PDA



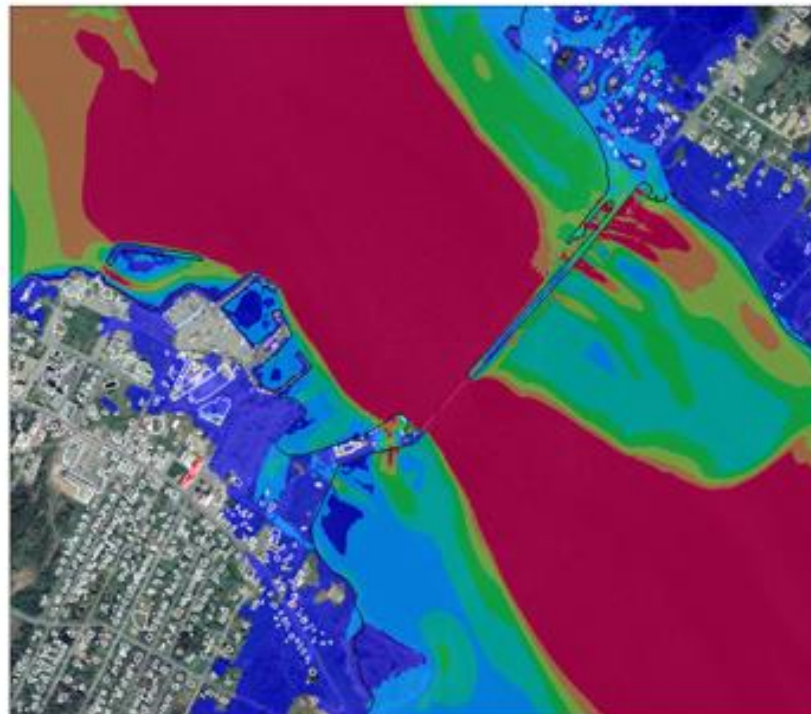
20% PDA



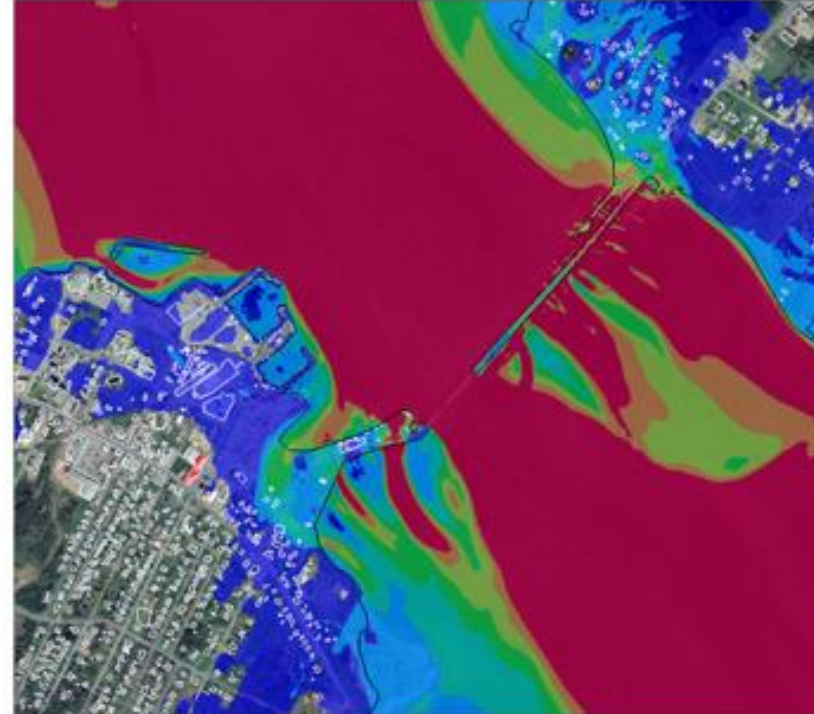
10% PDA



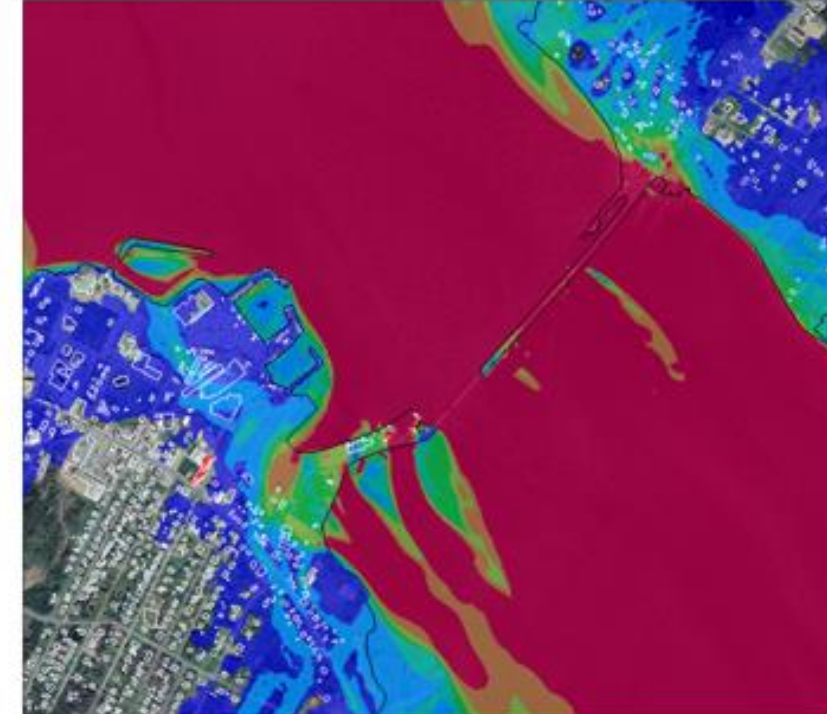
5% PDA



2% PDA



1% PDA



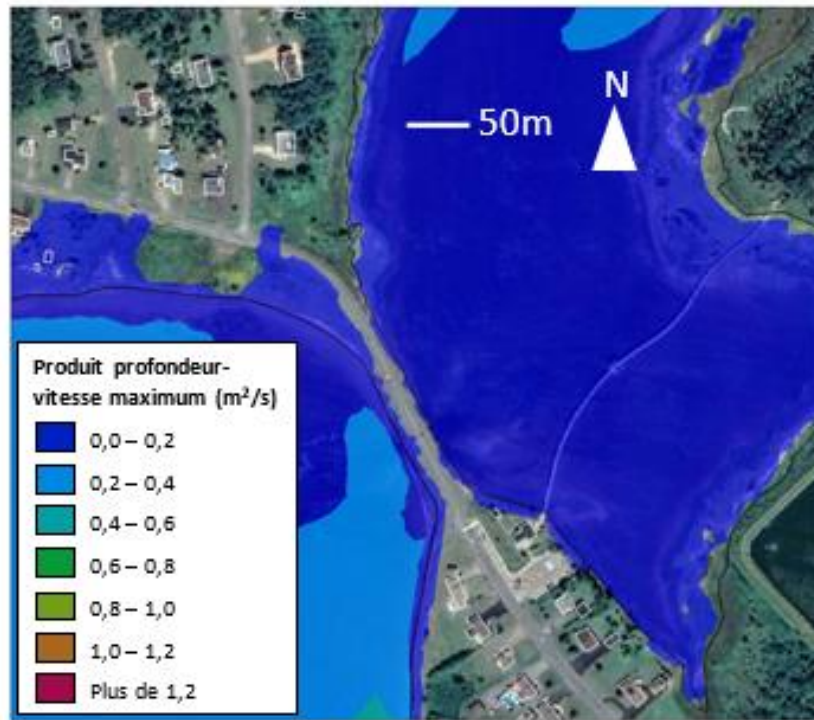
Carte de référence: Image © 2021 CNES / Airbus; Google Satellite Imagery

Produit profondeur-vitesse pour les évènements d'aléa actuels à Lamèque

50% PDA

20% PDA

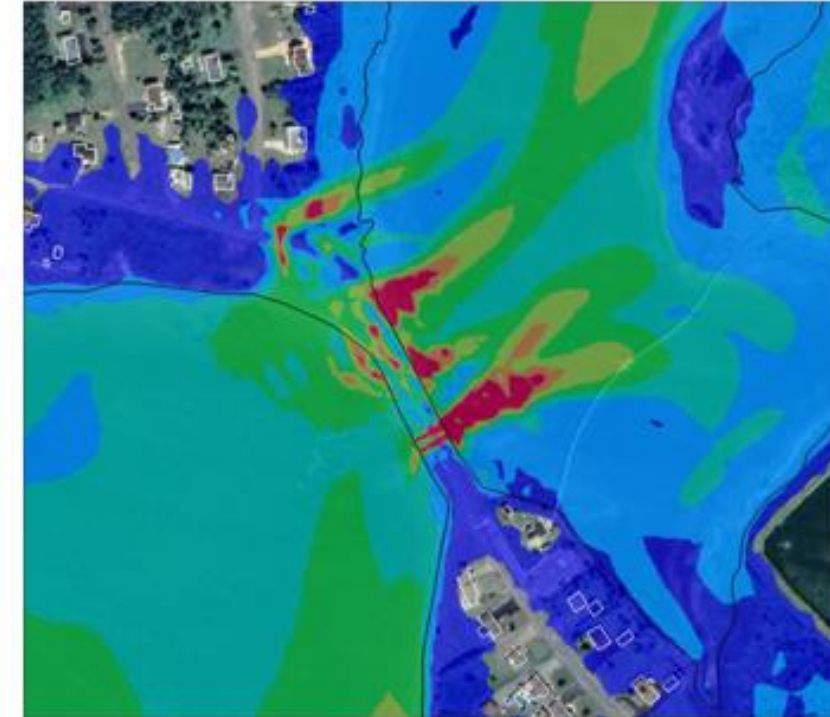
10% PDA



5% PDA

2% PDA

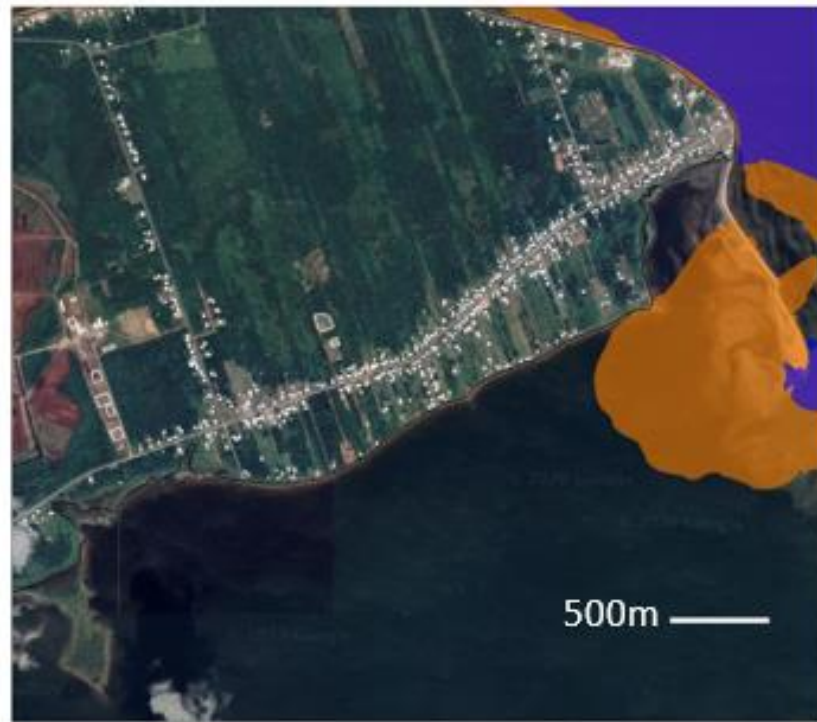
1% PDA



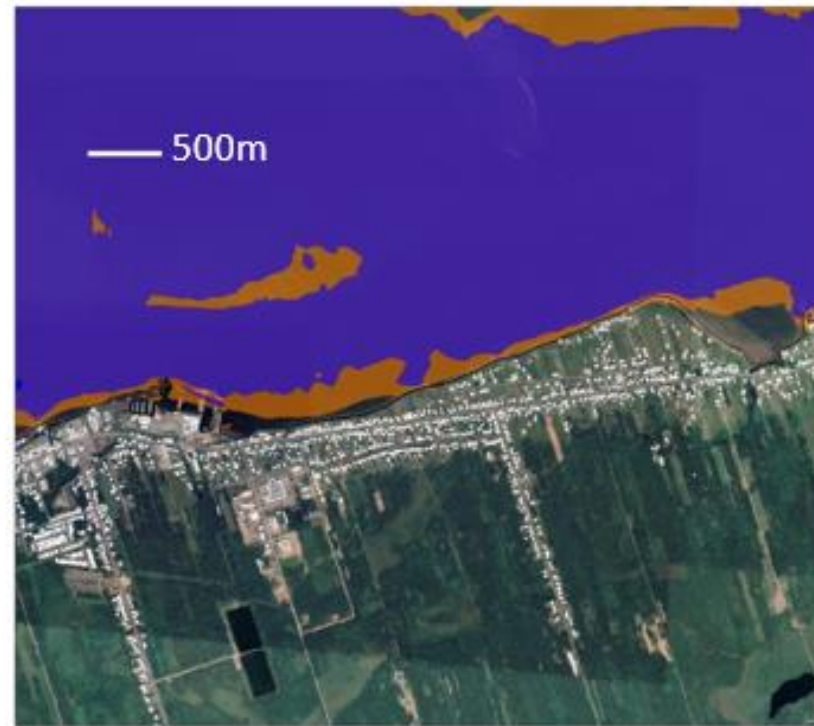
Carte de référence: Image © 2021 CNES / Airbus; Google Satellite Imagery

Flux de quantité de mouvement pour l'évènement d'aléa ayant une probabilité de dépassement annuel de 1 % pour les niveaux de la mer actuels et représentant une élévation du niveau mondial de la mer de 2,0 m

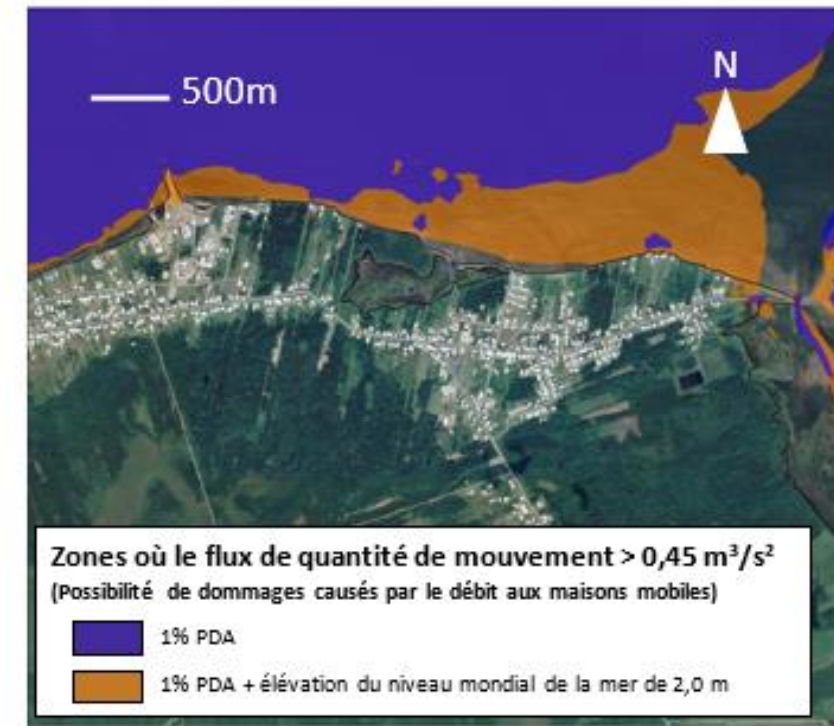
Maisonnette



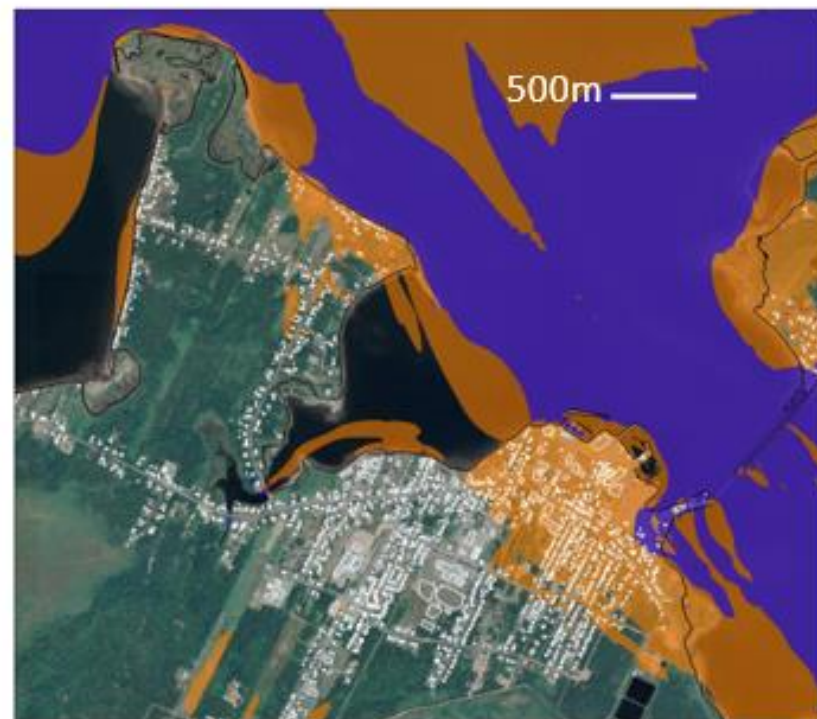
Caraquet



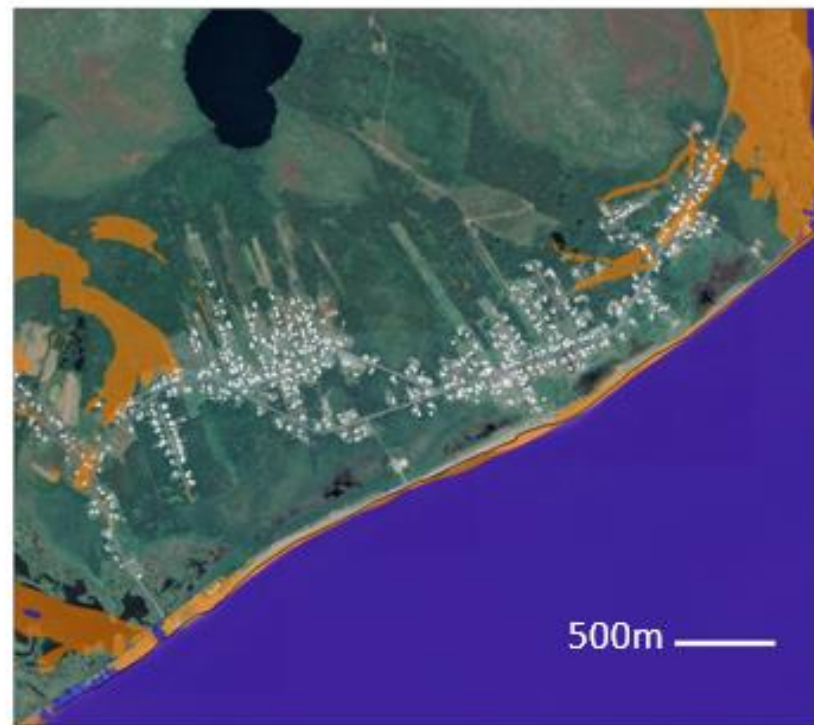
Bas-Caraquet



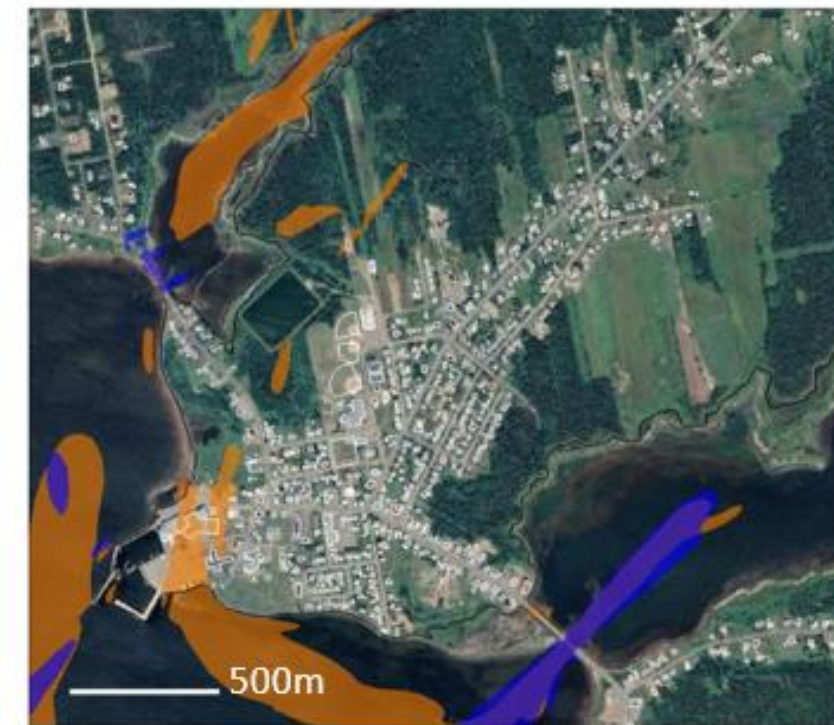
Shippagan et Pointe-Brûlée



Le Goulet



Lamèque



Carte de référence: Image © 2021 CNES / Airbus; Google Satellite Imagery