



HAL
open science

Méthode de calibration d'un modèle de simulation de tempêtes côtières

Antoine Yvrai

► **To cite this version:**

Antoine Yvrai. Méthode de calibration d'un modèle de simulation de tempêtes côtières. Géographie. 2022. dumas-03857770

HAL Id: dumas-03857770

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03857770>

Submitted on 17 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Méthode de calibration d'un modèle de simulation de tempêtes côtières



©Alec Hickman

Réalisation : Antoine Yvrai

Jury : Humbert Fiorino

Dominique Baud

Réalisation : Septembre 2022

Remerciement

Je remercie grandement Sébastien Doiron, Directeur de la Commission des Services Régionaux du Sud-Est, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce stage hors du commun.

Je remercie également James Bornemann, manager des équipes de Systèmes d'Information Géographique de la commission. Il a pu m'épauler dans l'appréhension du projet et dans tous les aspects de mon stage. Malheureusement, un accident l'a rendu invalide pour une partie de mon stage.

Je remercie chaleureusement Marc-André Long, expert en SIG à la commission. Il m'a donné conseil et aidé tout au long de mon stage. Après l'accident de M. Bornemann, il a pris le relai et s'est porté garant de la bonne continuation de mon stage. Au-delà du cadre professionnel, sa connaissance et sa passion pour la culture acadienne et le Nouveau-Brunswick ont sublimé mon expérience au Canada.

Je remercie Geoffrey Lacour, expert en SIG à la commission. Sa connaissance approfondie des données et son professionnalisme ont apporté une réelle plus-value à mon travail. J'ai également pris beaucoup de plaisir à découvrir sa vie d'expatrié français au Canada.

Je remercie Stéphane O'Carroll, expert géomorphologue. Il a su m'accorder de son temps pour m'aider à la récolte de données sur le détroit de Northumberland. Ces données m'ont été d'une grande utilité.

Je remercie également Humbert Fiorino, mon enseignant référent pour ce stage. Son implication et ses commentaires ont été de précieux conseils que j'espère avoir pris en compte à leur juste mesure.

Je remercie la scolarité de l'Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine pour leur aide et soutien dans les procédures administratives préalables à mon départ au Canada. Dans ce sens, je remercie également Carole Thériault, secrétaire pour la commission.

Enfin, je remercie l'IUGA pour laisser à ses étudiants l'opportunité de vivre des expériences si particulières dans des environnements si inspirants.

Mes pensées vont également à M. Bruno Wilhelm, disparu en avril 2022. C'était un professeur remarquable de qui j'ai tiré beaucoup d'enseignements. Il était mon enseignant référent pour ce stage.

Table des matières

Remerciement.....	
Introduction	1
Méthodologie.....	4
1. Cadre théorique.....	4
2. Méthode de calibration.....	12
3. Résultats et discussion	26
Conclusion.....	28
Table des matières	30
Table des figures	31
Sitographie	32
Bibliographie	35
Annexes.....	38

Introduction

Le Canada est un pays qui présente la particularité d’avoir la plus grande façade maritime au monde avec 202 080 km de côtes réparties entre l’Océan Atlantique et l’Océan Pacifique (CIA, 2005). 4,7 millions de canadiens, soit 13,5% de la population (StatCAN, 2021), habitent à moins de 100 kilomètres des littoraux. La population connaît donc une sensibilité accrue aux risques côtiers et particulièrement aux inondations. Ces dernières sont dues aux ondes de tempêtes, un événement dont la fréquence et l’ampleur sont en constante augmentation à cause du changement climatique. Ces environnements prennent également une place importante dans les dynamiques culturelles et économiques du pays, il est donc important de les prendre en compte et de planifier ce risque.

Cette étude prend place au Nouveau-Brunswick (NB). La province est particulièrement sensible aux inondations puisque 60 % de sa population habite à moins de 50 kilomètres du littoral (Chouinard et al., 2011, p.3). La population est de 775 610 habitants et la superficie de 71 000 km² (11 habitants/km²) (StatCan, 2021). La figure 1, ci-dessous, montre la répartition de la population sur le territoire du NB.

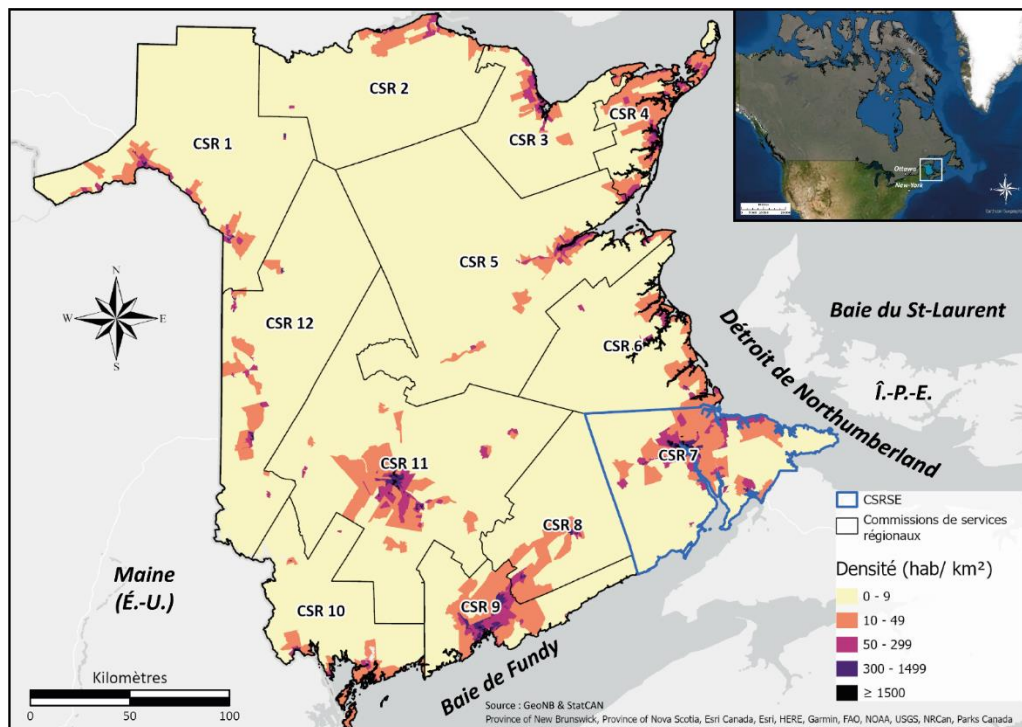


Figure 1 : Répartition de la population et découpage des commissions de services régionaux du Nouveau-Brunswick.

Cette carte montre également la répartition des 12 commissions de services régionaux. Ces commissions ont pour rôle de soutenir les communautés locales pour qu’elles puissent assurer les services obligatoires qu’elles doivent aux populations. Ces agences d’aménagements sont gérées par un conseil d’administration dont font partis les maires des municipalités (Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2022). Elles

servent donc à la médiation entre les différents acteurs et assistent à l'aménagement du territoire. Ce stage prend place à la Commission des Services Régionaux du Sud-Est (CSRSE). Cette institution donne une importance particulière aux aléas d'inondation et d'érosion attribuables aux tempêtes côtières, phénomènes accentués par le changement climatique (R.J Daigle, 2020). Dans cette optique, ce mémoire s'intéresse à un modèle de simulation des ondes de tempêtes et prend place dans la communauté de Pointe-du-Chêne.

Ce modèle permet, grâce à un certain nombre de paramètres, de prédire l'emprise et les dégâts attendue pour une inondation. Pour ce faire, l'utilisateur doit fournir au modèle un certain nombre d'entités géographiques, servant à l'atténuation des vagues, et un certain nombre de paramètres, représentant la tempête simulée. Le fonctionnement précis du modèle et de l'onde de tempête sont détaillés dans la partie méthodologie de ce mémoire.

L'organisme ayant créé ce modèle est la *Municipal Natural Assets Initiative* (MNAI). C'est une organisation dont le but est de mettre en valeur les actifs naturels¹ dans la planification et l'aménagement du territoire (Molnar et al., 2021, p.1). Les simulations du modèle serviront d'aide à la décision de planification du territoire en fonction de protections naturelles comme les dunes, les plages ou la végétation sous-marine. La figure 2, ci-dessous, présente la localisation des différentes zones d'études sujettes aux simulations du modèle.

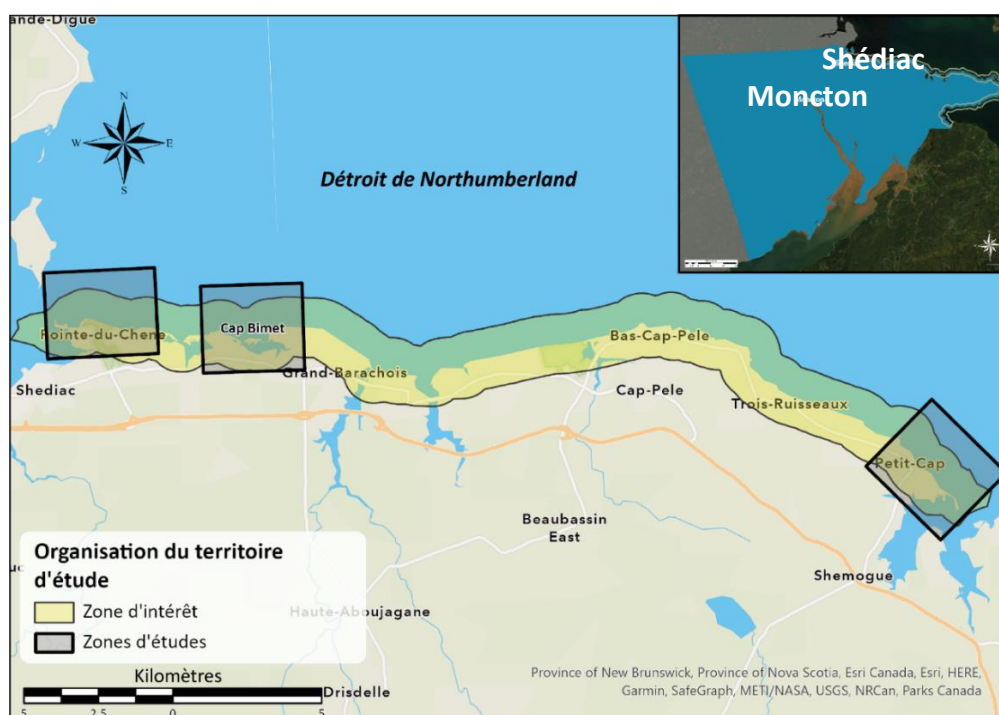


Figure 2 : Localisation des zones étudiées et leur cadre géographique.

¹ Il s'agit de tous les environnements dont les Hommes peuvent tirer des avantages (services écosystémiques). Dans ce cas spécifique, il s'agit d'avantages de protections.

Ce modèle a été créé en 2021 (*ibid.*), il n'a jamais été utilisé dans d'autres domaines que le test de validation effectué dans les communautés de Gibsons, en Colombie-Britannique, et Pointe-du-Chêne, dans le Sud-Est du Nouveau-Brunswick. La validation d'un modèle est une procédure dans laquelle il convient de tester le comportement de chaque paramètre du modèle, ainsi que leur plage d'utilisation, dans le but que le modèle réagisse de manière réaliste (*J. Minet et al., 2002*). Le modèle de simulation ne dispose également d'aucune évaluation de sa précision.

Ce mémoire a donc pour but de calibrer le modèle CPBT pour le rendre fiable et utilisable dans le plus d'environnements possibles. La calibration est une optimisation des paramètres d'un modèle dans le but que les résultats de ce dernier soient les plus précis possibles par rapport à une observation donnée (*J. Minet et al., 2002*). La figure 3, ci-dessous, présente la méthodologie communément utilisée pour la calibration d'un modèle.

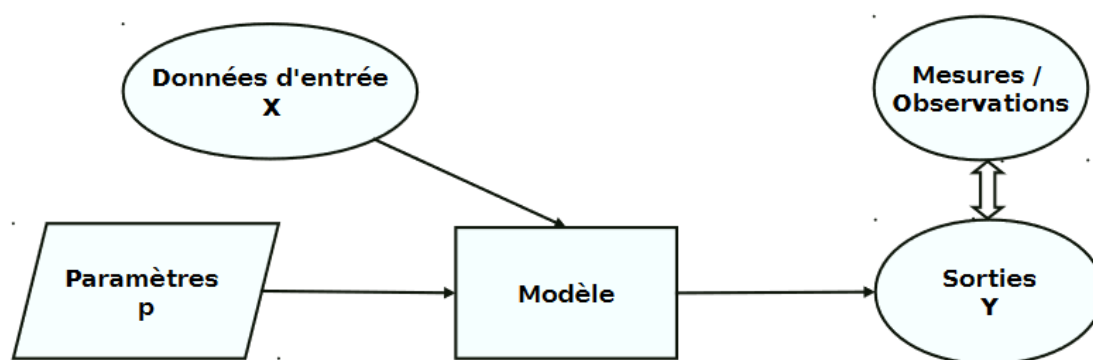


Figure 3 : Principe de calibration d'un modèle de simulation

Source : J. Minet et al., 2002, p.6

Le modèle fourni, comme résultat, une couche de profondeur de l'inondation. Cette donnée, comparée à des mesures observées, permet d'estimer la précision du modèle pour des paramètres définis. À cette fin, un modèle utilisant des indicateurs de performance sera créé pour analyser les différences d'élévation entre les valeurs simulées et mesurées. Les indicateurs de performances sont des outils statistiques servant à comparer des valeurs mesurées et simulées, leur nature est précisée dans la partie 2.3.1.3.

Ainsi, la problématique de ce rapport est de calibrer le modèle CPBT par rapport à un événement de référence, pour en tester la précision, afin de le rendre utilisable de manière fiable sur d'autres zones d'études.

Pour répondre à cette problématique, cette étude s'organisera en plusieurs parties : tout d'abord un cadre théorique visant à préciser le contexte de l'étude, la calibration du modèle CPBT sera détaillée et une présentation des résultats seront réalisés. Enfin, les apports et limites de la méthode seront mis en évidence.

Méthodologie

1. Cadre théorique

Pour procéder à la calibration du modèle, il convient de décrire le cadre théorique de cette étude. La connaissance des aléas et enjeux côtiers est importante pour comprendre le fonctionnement du modèle et procéder au paramétrage. Comme précisé précédemment, la calibration s'effectuera en fonction d'un événement de référence, il est également nécessaire de décrire son fonctionnement pour définir les paramètres optimaux pour le représenter.

1.1. Aléas

Les aléas principaux impactant les communautés le long du détroit de Northumberland sont les inondations et l'érosion côtière. L'érosion côtière est un processus issu de l'impact des vagues et des mouvements des marées sur le littoral (*A.S Ueberman et al., 1988, p.32*). C'est un aléa important puisqu'il est à l'origine de déstabilisations du terrain et peut rendre certaines parcelles inutilisables, engendrant des dégâts financiers, humains et sur l'environnement, réduisant la surface des plages et la hauteur des dunes protectrices (*I. Vouk et al., 2021*). Le gouvernement du Nouveau-Brunswick travaille activement à la lutte naturelle contre cet aléa en utilisant les solutions basées sur la nature pour lutter activement (cassage des vagues) ou passivement (stabilisation des plages et des berges) contre l'érosion (*I. Vouk et al., 2021*).

Les inondations sont le principal phénomène impactant les populations du littoral. Les ondes de tempêtes sont à l'origine des inondations lors d'une tempête. Durant ces événements, la forte vitesse du vent favorise la formation de hautes vagues et les basses pressions atmosphériques occasionnent une élévation anormale du niveau de la mer (*SK. Haslett, 2016*). L'effet de l'onde de tempête peut également être impacté par la hauteur de la marée au moment de l'événement, les paramètres cités ici sont approfondis dans la partie 1.12.1.2.2. La figure 4, ci-dessous, détaille le fonctionnement d'une onde de tempête et son impact dans les inondations côtières dans le contexte de la tempête Xynthia datant du 26 février 2010.

Ces inondations sont des événements ponctuels. Mais le réchauffement climatique peut également y contribuer en augmentant la superficie des terres inondées par l'élévation du niveau de la mer. Les événements tendent également à devenir plus fréquents (*R.J Daigle, 2020*).

L'érosion côtière peut également être aggravée pendant les épisodes de tempête puisque les mécanismes à son origine sont décuplés.

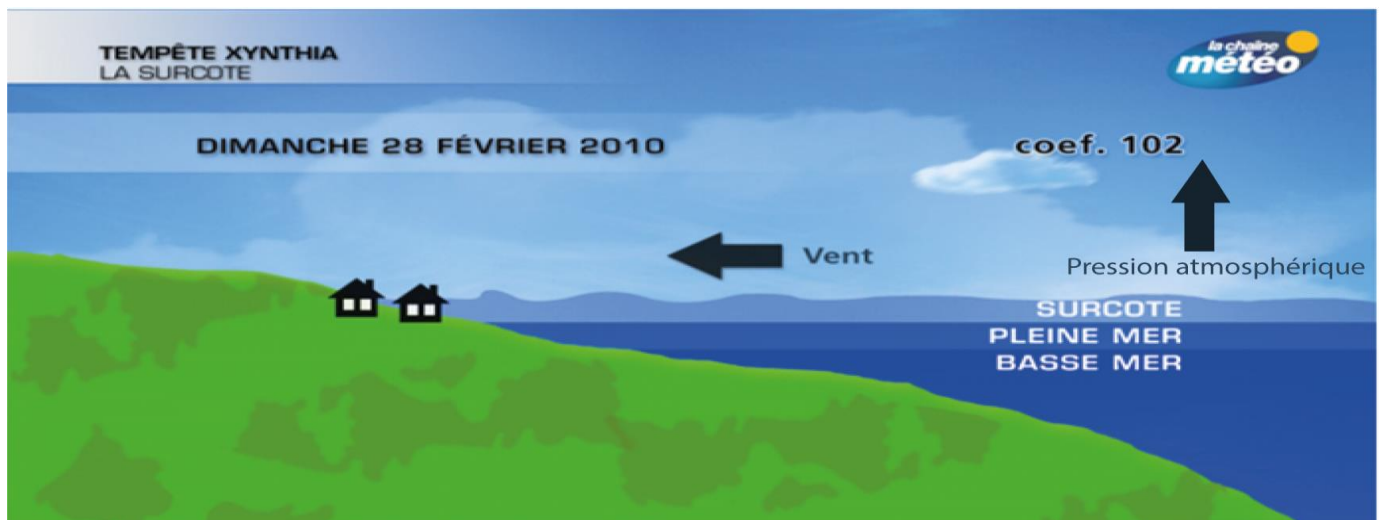


Figure 4 : Illustration du fonctionnement d'une onde de tempête.

Source : *lachainemeteo.com*

1.2. Enjeux

La vulnérabilité de la population à ces aléas est très importante puisqu'une grande partie de la population de la région du Sud-Est habite proche de la côte (CSRSE, 2021). Les recensements de 2021 montrent que la densité de la population, à moins de 1,5km de la côte du détroit de Northumberland, est de 37 habitants/ km², soit trois fois plus élevée que la densité du Nouveau-Brunswick (Statistique Canada, 2021). La figure 5, ci-dessous, montre la densité de population pour les communautés se trouvant dans les zones étudiées.

La vulnérabilité aux aléas côtiers est donc accrue sur le littoral du détroit de Northumberland, sa densité étant plus élevée et de sa population plus âgée. L'âge médian de la communauté de Pointe-du-Chêne est de 65 ans quand la médiane pour la province est de 47 ans (Statistique Canada, 2021). De plus, la prise de conscience des risques côtiers est assez récente et de nombreuses habitations sont construites dans des zones inondables (CSRSE, 2022). À titre d'exemple, l'événement de 2010 a occasionné des dégâts de 50 millions de dollars, ce qui représente 40% des fonds publics attribués à la sécurité publique cette année-là. (Département de l'environnement du gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2014).

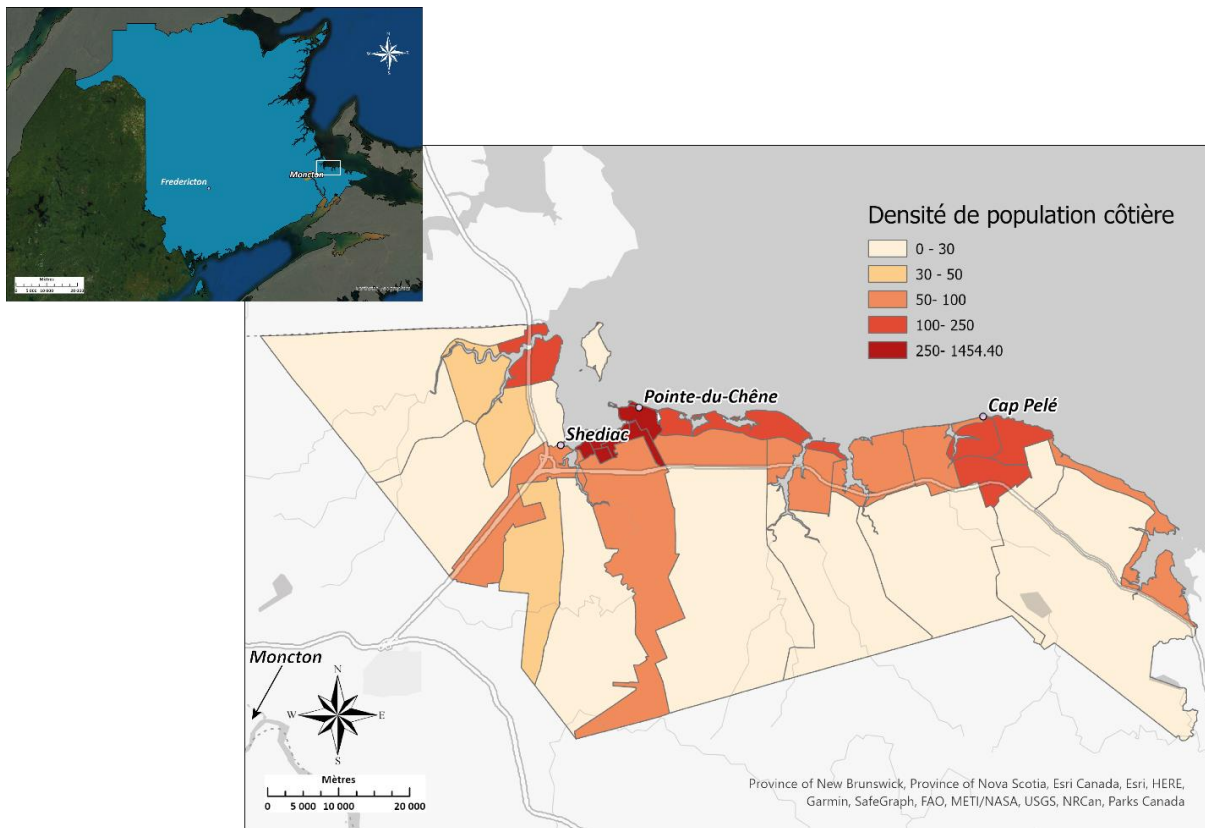


Figure 5 : Densité de population dans la zone d'intérêt le long du détroit de Northumberland.
 Source : CSRSE, Statistique Canada, 2021.

Les enjeux côtiers sont également naturels, en effet, l'augmentation de la fréquence des tempêtes côtières et l'élévation du niveau de la mer sont un des éléments qui provoquent le *Coastal squeeze* ou pression côtière. La pression côtière est le mécanisme provoquant la disparition de zones humides côtières dont la migration, contrainte par l'augmentation du niveau de la mer, est stoppée à cause de la pression anthropique (Bernatchez et al., 2016). La figure 6, ci-dessous, montre une comparaison diachronique de l'évolution du marais et du bâti dans la zone de Cap-Bimet entre 1944 et 2017.



Figure 6 : Comparaison diachronique de la pression côtière dans la communauté de Cap-Bimet.

Cette illustration montre qu'il existe une terre humide à l'Est de Cap-Bimet, elle est visible puisque la terre semble plus sombre étant chargée d'humidité. Les deux mécanismes à l'origine de la pression côtière sont apparents : le littoral semble avoir été grandement érodé et le bâti a pris une place plus importante dans la zone. Les terres humides cherchant à migrer à l'Ouest sont donc contraintes puisque les zones urbanisées sont non-propices au développement des zones humides (habitations, protections contre les inondations et l'érosion, utilisation agricole du sol). Dans ce scénario, les zones humides connaissent donc une réduction de leur superficie. L'enjeu est important compte tenu de la forte présence de ces habitats dans la région Sud-Est, de leur biodiversité importante et du rôle de protection qu'elles remplissent (*ibid.*).

1.3. Protections côtières

Les protections côtières sont un élément important d'entrée du modèle. Elles se présentent sous la forme d'entités géographiques que le modèle prend en compte dans l'atténuation des vagues. La manière dont elles sont prises en compte est décrite dans la partie 2.2.4.

En termes de lutte contre l'érosion côtière et les inondations au Nouveau-Brunswick, il existe deux types de protections, les protections humaines et les protections basées sur la nature. Le premier type comprend toutes les constructions qui brisent les vagues pour limiter l'érosion et les dégâts attribuables aux tempêtes côtières. Elles se présentent comme des digues bétonnées ou des murs de roches. Elles sont présentes sur le littoral à proximité des habitations (*J.L Eyquem, 2021*). La figure 7, ci-dessous, présente les différents types de réponses humaines identifiées à une élévation du niveau de la mer par le GIEC en 2019.

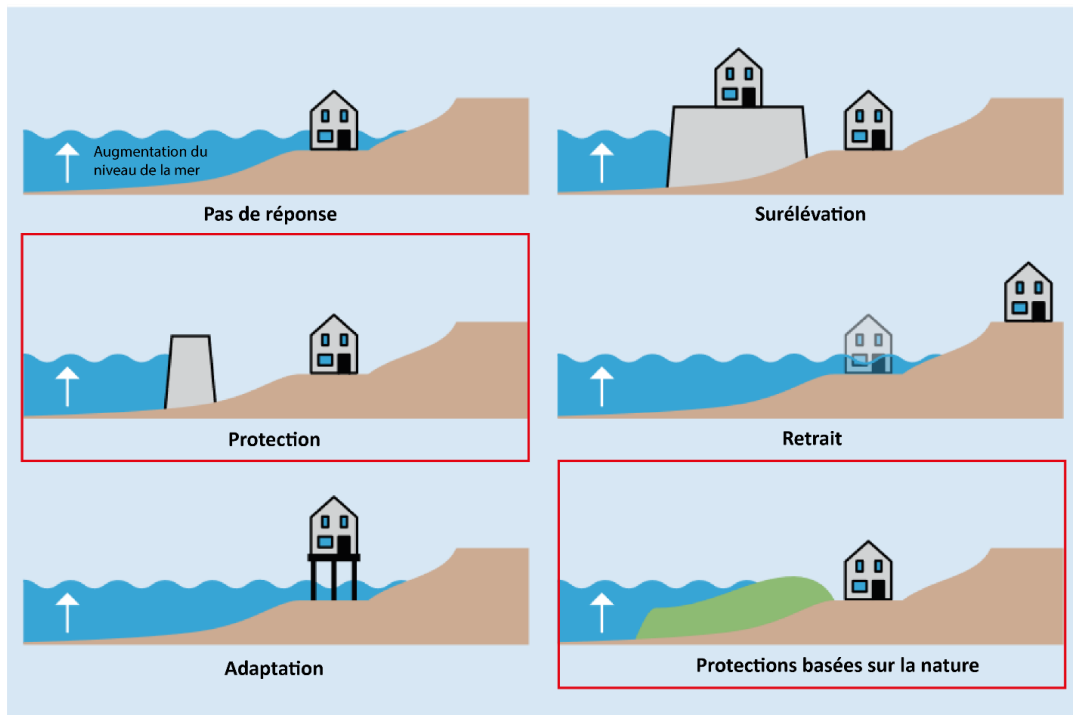


Figure 7 : Synthèse des réponses envisageables au risque côtier dû à l'élévation du niveau de la mer
 Source : Oppenheimer et al., 2019

Les solutions basées sur la nature englobent toutes les structures naturellement présentes sur le littoral. Ces fonctions de protection font parties des services écosystémiques des environnements côtiers aux communautés locales. Les principaux types d'environnements mis en valeur, sur le littoral du détroit de Northumberland, sont les plages et les dunes (JL. Eyquem et al., 2021). Ces environnements composés de sédiments fins sont particulièrement sensibles aux vents et aux vagues, ce qui les prédisposent à l'érosion côtière. En effet, à chaque événement de tempête, de grandes quantités de sables sont déplacées ou emportées dans la mer (Vouk et al., 2021). Ainsi, la perte de ces protections naturelles entraîne une plus forte vulnérabilité des habitations littorales plus exposées aux inondations (Plan d'adaptation aux changements climatiques de Shediak, 2019).

La figure 8, ci-dessous, montre la répartition des dunes et plages le long du littoral à Pointe-du-Chêne. Ces données sont celles utilisées par le groupe de validation du modèle CPBT.



Figure 8 : Cartographie de la localisation des enjeux et des protections naturelles dans la communauté de Pointe-du-Chêne.

Source : MNAI, document guide.

Telles que représentées dans le modèle, les protections naturelles sont prédominantes dans la zone d'étude. La végétation sous-marine (sous forme de zostère) est également une protection importante dans la zone.

1.4. Événement de référence

Pour calibrer le modèle CPBT, il est nécessaire de comparer ses résultats avec un événement de référence sur lequel des données mesurées existent déjà. Ainsi, les paramètres définis pour le modèle doivent représenter le plus fidèlement possible la tempête de référence. Cet événement est la tempête ayant eu lieu entre le 21 et le 23 décembre 2010. C'est un événement de référence dans la gestion des risques du Nouveau-Brunswick tant l'ampleur fut importante (CSRSE, 2022). La figure 9, ci-dessous, montre les conditions météorologiques et astronomiques au moment de l'événement.

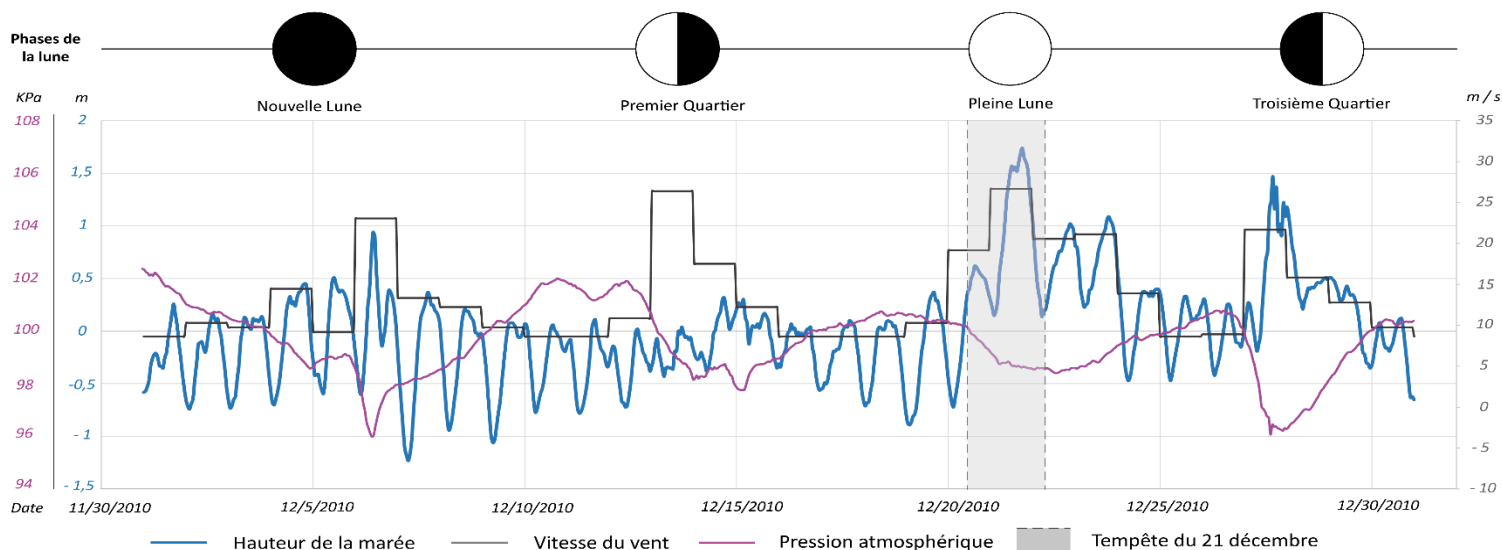


Figure 9 : Évolution des facteurs d'ondes de tempête durant le mois de décembre 2010 au marégraphe de Shediac et à la station météorologique de Moncton

Source : Environnement Canada, 2022 et National Aeronautical Charting Office, 2009.

Une combinaison de facteurs aggravants au moment de l'événement a contribué à son ampleur. Comme vu précédemment, les ondes de tempêtes sont influencées par plusieurs facteurs : la vitesse du vent, la pression atmosphérique et la hauteur de la marée. Il est observable sur le graphique que ces facteurs sont aggravants. En effet, la vitesse du vent importante couplée à une faible pression atmosphérique a favorisée la formation d'une onde de tempête. De plus, la grande marée, attribuable à la situation de pleine lune au moment de l'événement, a également été un facteur aggravant (W.D Forrester, 1983).

Ainsi, le 21 décembre présente une situation où un système dépressionnaire de grande envergure a amené des vents violents provoquant de grandes vagues couplées à une marée plus importante que la normale. Les paramètres astronomiques (en plus de la pleine lune, l'impact de l'attraction solaire était également plus important, la périhélie² de la terre se trouvant le cinq janvier de l'année 2011 (W.D Forrester, 1983 ; National Ocean Service, 2009)) favorisaient également une tempête de plus grande ampleur.

Ainsi, les coûts des dégâts estimés à l'échelle de la province sont approximativement de 50 millions de dollars et des vagues ont été estimées entre 2,6 et trois mètres de hauteur au maximum. L'érosion côtière a été particulièrement importante dans les communautés de Shediac et Bouctouche (Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2012). C'est dans la communauté de Pointe-du-Chêne, à proximité de Shediac, présentée précédemment sur la figure 8, que prend place la calibration du modèle. Dans cette commune, les dégâts estimés durant la tempête

² Moment où la Terre est la plus proche du soleil sur son orbite, cela signifie que l'action du soleil était également plus importante qu'en temps normal.

sont de 1 348 000 de dollars (*Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2011*). Le modèle CPBT fournissant une estimation des coûts engendrés pour une inondation, ces chiffres serviront de référence complémentaire à la calibration.

1.5. Système de référence altimétrique

La calibration des paramètres du modèle s'effectuera donc en fonction d'un événement de référence pour lequel des mesures GPS de l'étendue de l'inondation existent. Plusieurs données altitudinales seront utilisées, notamment la hauteur de marée et la profondeur d'inondation.

Contrairement à la France métropolitaine, qui possède un référentiel altitudinal universel, au géographe de Marseille, par rapport auquel sont mesurées toutes les altitudes sur le territoire français, le Canada possède plusieurs systèmes de référence altimétrique qui force à quelques conversions. Ainsi, le Canada possède deux référentiels : le CGVD28 qui est une altitude normale ortho métrique pour le territoire canadien adoptée en 1928, le CGVD2013 qui est une évolution de la méthode de calcul du CGVD28 appliquée sur le territoire canadien depuis 2013 et visant à remplacer l'ancienne méthode de calcul.

Il existe également un datum local, fonctionnant de la même manière qu'une borne géodésique, qui donne l'altitude d'un point relatif au zéro des cartes à chaque station (généralement en CGVD28). Les métadonnées des stations sur lesquelles sont prélevées les mesures de marées fournissent les informations nécessaires à la conversion.

Ainsi, la valeur de marée haute moyenne au marégraphe de Shediac, utilisé dans le cadre de cette étude, est la suivante :

- Datum local = 1,43 mètre
- CGVD28 = 1,43 – 0,83 = 0,60 mètre
- CGVD2013 = 0,60 – 0,60 = 0 mètre

La valeur de conversion du datum au CGVD28 est issue des métadonnées de la station concernée (*ECCC, 2022*) et la valeur de conversion du CGVD28 au CGVD2013 est issue d'un consensus au sein de la CSRSE et communément utilisée dans toute la région Sud-Est.

Ainsi, l'élévation de la marée haute moyenne à la station de Shédiac en CGVD2013 est de zéro mètre, ce qui correspond au zéro des cartes. Cette conversion (-0,83 – 0,60) est utilisée pour toutes les valeurs d'élévation présentes dans cette étude puisque les données de la station de Shédiac sont les seules utilisées pour la calibration du modèle.

2. Méthode de calibration

Les facteurs influençant les ondes de tempête, ainsi que les protections naturelles, doivent être traduites en données chiffrées pour que le modèle CPBT puisse en tenir compte.

Cette première partie de calibration du modèle CPBT porte donc sur la description du fonctionnement du modèle et sur les paramètres définis pour le calibrer.

2.1. Détermination des paramètres optimaux

2.1.1. Fonctionnement du modèle

Le CPBT est un outil de simulation et d'analyse développé pour ArcGIS Pro dans le but d'aider les administrations côtières à lutter contre les risques d'érosion et d'inondation sur les interfaces maritimes en améliorant la connaissance de leurs actifs naturels et les services écosystémiques associés utiles à la lutte contre les aléas côtiers (Molnar et al., 2017).

Le Document Guide établie par la MNAI est la source principale d'où viennent la majorité des informations de compréhension du modèle. Ce document, rédigé par l'équipe technique de la Fondation David Suzuki et la MNAI, a permis en 2021 la validation du modèle CPBT. Il présente notamment son cadre d'utilisation, une description méthodologique détaillée de l'utilisation du modèle ainsi que ses limites et avantages. La figure 10, ci-dessous, explique le fonctionnement précis du modèle.

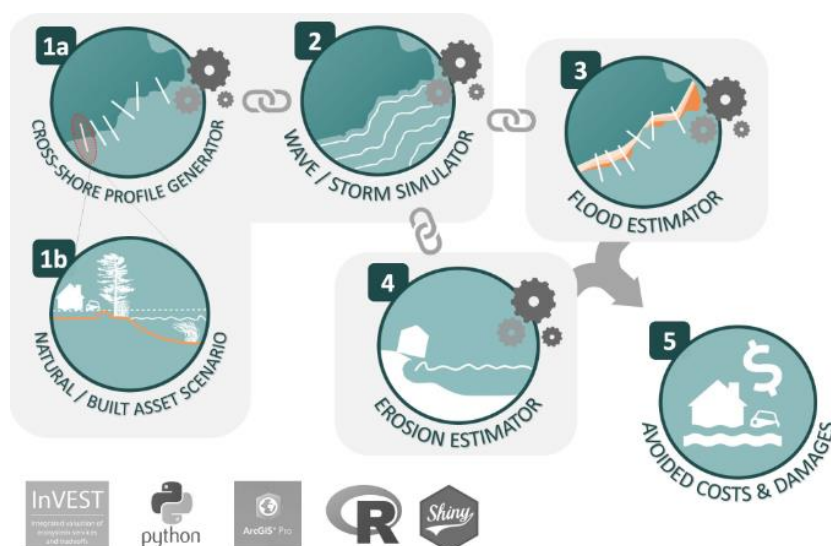


Figure 10 : Fonctionnement schématique du modèle CPBT.

Source : Document Guide du MNAI, 2021, figure 2.1, p.4

Ainsi, l'utilisateur rentre dans le modèle un certain nombre d'entités spatiales utiles à l'analyse de la zone et définit ensuite les paramètres géométriques pour la création de transects. Ces transects sont des segments rectilignes le long desquels les informations d'élévation seront prélevées. C'est à partir de ces données qu'est faite

une interpolation permettant de déterminer l'étendue d'inondation attendue. Enfin, le modèle demande les paramètres météorologiques du scénario selon lesquels la simulation est produite. La tempête est simulée sur chaque transect puis les dégâts et l'étendue de l'inondation sont interpolés entre les transects.

Les résultats se présentent alors sous 2 formes : une estimation de la profondeur et de l'emprise de l'inondation, présentée en fichier de forme raster, et une fiche récapitulative des dégâts occasionnés. Le premier résultat est comparé aux relevés mesurés sur la zone pour évaluer la précision du modèle. Le second résultat est utilisé afin complémentaire pour estimer l'exactitude des dégâts estimés par le modèle en fonction des estimations du gouvernement.

2.1.2. Paramètres déterminés pour la calibration

Cette partie s'intéresse aux paramètres qui déterminent l'ampleur de la tempête simulée et les transects le long desquels elle est simulée. Ces paramètres sont déterminés à partir de mesures recensées lors de l'événement (vitesse du vent ou hauteur de marée) ou à partir de calculs (hauteur et période des vagues). Ces derniers connaissent une certaine incertitude et ont donc une plage d'utilisation. Pour ces paramètres-ci, la valeur utilisée sera celle pour laquelle la simulation présentera le plus de précision. Le tableau 1, ci-dessous, résume l'organisation de ces paramètres.

Paramètres	Type
Ligne de recherche perpendiculaire (mètres)	Paramètres de transects
Distance radiale maximale (mètres)	
Espacement des points de rivage (mètres)	
Lissage (pourcentage)	
Distance terrestre maximale (kilomètres)	
Élévation totale de la surface de l'eau (mètres)	Paramètres de la tempête simulée
Hauteur de vague (mètres)	
Période de vague (secondes)	
Valeur de la plage (dollars)	
Élévation de la marée moyenne (mètres)	
Élévation de la marée haute (mètres)	
Taux d'actualisation annuel (pourcentage)	
Durée de la tempête (heure)	
Temps de retour (années)	
Horizon temporel pour la validation (années)	

Tableau 1 : Description des paramètres en entrée du modèle et leur organisation

- Paramètres déterminés à partir de mesures ou issus de la bibliographie
- Paramètres issus du calcul

Ce tableau renseigne donc sur l'utilité de chaque paramètre dans la calibration du modèle. En effet, une fois les paramètres fixes établis, il existe trois paramètres sur lesquels réside une incertitude, pouvant rendre le paramétrage non conforme à la réalité :

- L'élévation totale de la surface de l'eau
- La hauteur des vagues
- La période des vagues

2.1.2.1. Paramètres déterminés à partir de la bibliographie

Élévation de la marée haute et de la marée moyenne : les données sont issues d'Environnement Canada à la station de Shediac. La marée haute correspond à la moyenne d'élévation de la plus haute marée annuelle sur 19 années de prédictions (Pleine Mer Supérieure, Grande Marée (PMSGM)) et la marée moyenne à la moyenne de toutes les marées hautes sur la même période (Pleine Mer Supérieure, Marée Moyenne (PMSMM)) (*Environnement Canada, 09/06/2022*). Ces 19 années de prédictions s'expliquent par le fait que c'est la période sur laquelle, à cause de paramètres astronomiques, la hauteur de la marée sera significativement plus importante. (*Warren D. Forrester, 1983, p. 44*)

Durée de l'événement : Elle a été estimée de 36h à partir du 21 décembre à minuit dans la zone de Cap Breton, une péninsule à 250km à l'est de Pointe-du-Chêne, ce sont les données les plus précises à disposition (*R.J Daigle et al., 2011, p.21*).

Temps de retour : Ce dernier est déterminé en fonction de la plus haute marée enregistrée au marégraphe de Shediac pendant la durée définie de l'événement. L'élévation maximale de la marée est de 2,57 m (CGVD28), la période de retour attendue pour un événement tel que la tempête de décembre 2010 est de 30 ans³ (*R.J Daigle et al., 2020, p.49*).

Paramètres de transect : Ces paramètres définissent les caractéristiques des transects le long desquels l'inondation est simulée. Les valeurs choisies sont issues des recommandations faites dans le document Guide (*Molnar et al., 2021*).

³ La méthode de calcul du temps de retour exact est présentée en annexe 11

2.1.2.2. Les valeurs calculées

Élévation totale de la surface de l'eau : Cette valeur est indiquée comme étant le « niveau moyen de la mer au-dessus du zéro des cartes ou à une élévation de marée d'intérêt précise » (*Document Guide, MNAI, 2021, p.90*). Ce paramètre renseigne le modèle sur la hauteur d'eau qui n'est attribuable qu'à la marée et à la pression atmosphérique. La figure 11, ci-dessous, résume la répartition des différents paramètres dans le fonctionnement d'une onde de tempête. La hauteur de la marée est donc présentée uniquement en fonction de l'influence de la lune et du soleil (paramètres astronomiques). La pression atmosphérique n'étant pas prise en compte dans le modèle, elle est ajoutée pour obtenir l'élévation totale de la surface de l'eau.

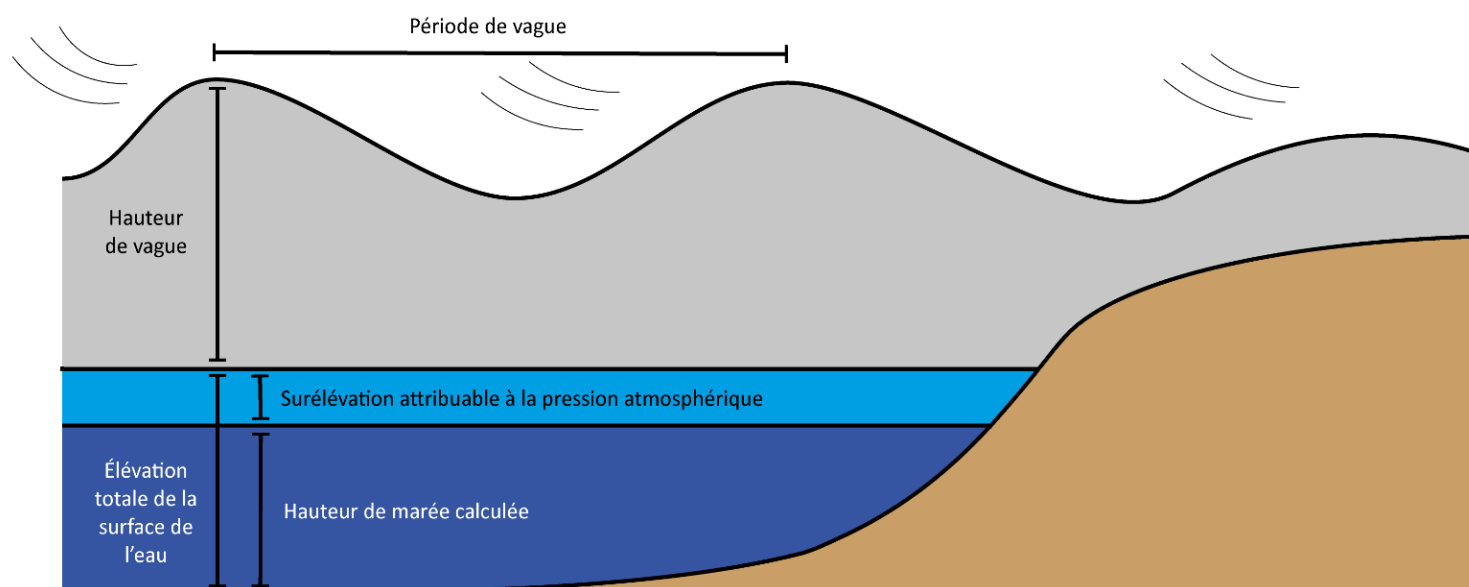


Figure 11 : Schéma de la part attribuable à chaque paramètre déterminant de l'onde de tempête dans le modèle CPBT

Dans le domaine de la navigation maritime, la règle des douzièmes permet de prédire le niveau de la marée sur une courte période (*Code de la navigation maritime*)⁴ en fonction de la différence entre la marée haute et la marée basse (marnage). Dans cette étude, le marnage est basé sur la différence entre la Pleine Mer Supérieure, Grande Marée et la Pleine Mer Inférieure, Marée Moyenne (PMIMM) qui est donc la moyenne de toutes les marées basses sur 19 années de prédictions. Ce choix se justifie par le besoin d'une marée haute importante et d'une marée basse moyenne pour retranscrire les conditions astronomiques favorables à une grande marée au moment de l'événement du 21 décembre 2010 (*Cf. figure 9, p.10*). Ainsi, la règle des douzièmes dit que la marée évolue d'un douzième du marnage toutes les heures.

⁴ Un ensemble de références bibliographiques décrivant la règle des douzièmes figure dans la bibliographie.

En outre, le niveau maximum de l'eau observé pour l'événement se produit à 17h42 le 21 décembre. Or l'heure de la marée haute prédite se produit à 14h45 soit 3,4 h plus tard. C'est sur cette échelle de temps que sera calculée la hauteur de la marée à partir de la PMIMM.

Enfin, il faut ajouter à ce résultat l'influence de la pression atmosphérique. Comme décrit précédemment, l'élévation de la mer est de un cm par millibar de pression (SK. Haslett, 2016). Ainsi, la soustraction de la pression sur la zone d'étude au moment du maximum de l'événement⁵ à la pression moyenne sur la Terre (101,3 KPa) (SK. Haslett, 2016) donne la hauteur d'eau attribuable à l'influence de la pression.

Le détail du calcul de ce paramètre est présent dans l'annexe 10.

Hauteur et période des vagues : Cette valeur peut être issue de la littérature mais c'est une donnée qui est rarement mesurée. Donc, pour que la méthodologie puisse être reproductible, il est préférable de passer par un outil de simulation fourni dans le modèle CPBT.

Le *Wind Wave Simulator* est un outil se basant sur le principe qu'il existe une corrélation entre la vitesse du vent et la longueur de mer ouverte dans la direction des vents dominants (appelée longueur fetch ou distance de fetch) (L. Grare et J.P Giovanangeli, 2007). Les composantes du simulateur sont donc :

- La vitesse du vent (en mètres par seconde) : La vitesse du vent est un paramètre très local, dans la mesure où il n'y a pas de station météorologique à Pointe-du-Chêne, ce sont les valeurs de plusieurs stations avoisinantes qui peuvent donner un aperçu de la vitesse du vent au moment de l'événement. De plus, pour un maximum de représentativité, les vitesses des rafales de vent sont prises en compte car la vitesse horaire prend une valeur à un moment donné qui n'est donc pas nécessairement le plus pertinent (*Environnement Canada, 2022*). La plage de valeur se situe donc entre 26 mètres par seconde et 30 mètres par seconde. La valeur exacte sera déterminée en fonction du meilleur résultat lors de la simulation.
- La distance de fetch (en mètres) : Les vents dominants sur la période définie était de 30 degré Nord (*Archives Windy, 2022*). En traçant un transect partant du littoral jusqu'à la terre la plus proche (Île du Prince-Édouard), cette distance est approximativement de 50 000 mètres. Il n'est pas nécessaire d'avoir une donnée précise pour cette valeur (*Document Guide, MNAI, 2021*)
- La profondeur moyenne d'eau au large : Cette valeur a été extraite le long du transect tracé dans la direction des vents dominants et est donc la moyenne de la profondeur d'eau entre le littoral de Pointe-du-Chêne et l'île du Prince-Édouard. Elle est estimée à 45 mètres de profondeur.

⁵ La mesure de la pression est issue d'une interpolation de plusieurs stations environnantes de Pointe-du-Chêne présentée en Annexe 9

Le tableau 2, ci-dessous, résume tous les paramètres rentrés dans le modèle pour simuler la tempête de décembre 2010.

Paramètres	Type	Valeurs
Ligne de recherche perpendiculaire (mètres)	Paramètres de transects	100
Distance radiale maximale (mètres)		1
Espacement des points de rivage (mètres)		106
Lissage (pourcentage)		15
Distance terrestre maximale (kilomètres)		0,01
Élévation totale de la surface de l'eau (mètres)	Paramètres de la tempête simulée	0,3
Hauteur de vague (mètres)		4,2
Période de vague (secondes)		7,9
Valeur de la plage (dollars)		50.00
Élévation de la marée moyenne (mètres)		0,01
Élévation de la marée haute (mètres)		0,33
Taux d'actualisation annuel (pourcentage)		0,05
Durée de la tempête (heure)		36
Temps de retour (années)		30
Horizon temporel pour la validation (années)	100	

Tableau 2 : Paramètres utilisés pour la simulation de la tempête de décembre 2010.

Ces paramètres assurent une représentativité maximale des mécanismes à la base de la tempête de décembre 2010. Les simulations qui en sont issues doivent donc se rapprocher au maximum des observations faites pour cet événement

2.2. Présentation des entités spatiales

Les entités spatiales sont toutes les couches en entrée du modèle qui servent à l'appréhension du terrain par le modèle. Elles déterminent le comportement de l'inondation, l'atténuation des vagues et la protection des bâtiments.

2.2.1. Modèle Numérique de Terrain

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation du terrain sous forme de raster. Ces données sont fournies par la CSRSE. Dans la zone d'étude, ces données sont issues de deux sources différentes. Les données de terrain maritime proviennent de relevés bathymétriques effectués par Pêches et Océans, une institution fédérale. Les données de terrain au-dessus du niveau de la mer sont créées à partir de relevés LiDAR disponibles sur la base de données GéoNB. La résolution recommandée est de cinq mètres maximum (*Molnar et al., 2021*).

Ces données sont issues de points interpolés, plus la densité de points est élevée, plus la représentation du terrain sera précise. La densité de points, pour la bathymétrie, est de 0,25 point par mètre carré, soit un point pour deux mètres carrés. La résolution spatiale déterminée est donc de deux mètres pour le MNT utilisé.

Dans le modèle, le MNT a trois fonctions principales : il détermine l'étendue et la profondeur de l'inondation, il sert de base à la calibration et estime la hauteur des bâtiments pour l'estimation des dommages.

2.2.2. Ligne de littoral et ligne d'arrière-plage

La ligne de littoral est une représentation de la limite entre la mer et la terre présentée comme un fichier de forme en vecteur. C'est perpendiculairement à cette ligne que sont générés les transects. La donnée émane de l'équipe de validation du modèle et est obtenue par photo-interprétation.

La ligne de découpe de l'arrière-plage se présente sous la même forme et sert à indiquer le sens de la mer au modèle. En effet, dans une situation où une étendue d'eau est présente entre la ligne de littoral et la terre, le modèle peut être incapable de déterminer dans quel sens se trouve la mer. La ligne d'arrière-plage sert donc à indiquer l'orientation des transects.

2.2.3. Le bâti

Les entités de bâtiment sont recensées et fournies par la Commission des Services Régionaux du Sud-Est. Deux informations sont nécessaires en entrée du modèle : la valeur de remplacement du bâti en cas de destruction totale et le code DDID permettant d'attribuer un code d'estimation des dégâts en fonction de la profondeur d'inondation (*C. Scawthorn et al., 2006*).

Les données de bâti servent à estimer les coûts engendrés par l'inondation ainsi que le nombre d'infrastructures impactées (*Molnar et al., 2021*). Ces données ont également été créées par l'équipe de validation du modèle.

2.2.4. Entités de protection

Enfin, les entités de protections sont les protections naturelles influençant l'atténuation des vagues, le modèle prend en compte les attributs de plage et la végétation.

Les attributs de plages comprennent la hauteur des dunes, la pente de l'estran⁶ ainsi que la largeur et la hauteur de la berme⁷. Ces données sont extraites du MNT. Des valeurs de taille des sédiments sont également demandées. Les études sédimentaires dans la région de l'Aboiteau, à proximité de Pointe-du-Chêne, donnent des tailles moyennes de sédiment autour de 15 mm (*S. Fisher et al., 2018, p. 28*).

La végétation sous-marine est caractérisée par sa densité au m², sa hauteur, sa largeur et son coefficient de trainée⁸. Cependant, la présence de zostères sur la zone d'étude est hypothétique. Les zostères influencent principalement la hauteur des vagues en apportant de la rugosité sur le parterre sous-marin. Elles auront donc moins d'impact en situation de marée haute ou si la tempête est trop puissante (*M. Molnar et al., 2021, p. 21*). De plus, durant l'hiver, les populations subissent une diminution drastique de leur population due à l'influence de la glace (*M.C. Wong et al., 2013, p. 419*). Ainsi, la densité estimée dans la zone d'étude est de quatre pousses par mètre carré. Les autres caractéristiques sont établies par l'équipe de validation susnommée.

⁶ Zone du littoral se trouvant entre les extrêmes de marée basse et de marée haute (*Larousse*)

⁷ Zone de transition entre l'estran et la dune, partie de la plage intermédiaire (*M. Molnar et al., 2021, p. 21*)

⁸ Coefficient correspondant à la résistance que la végétation va opposer à la vague.

2.3. Modèle de calibration

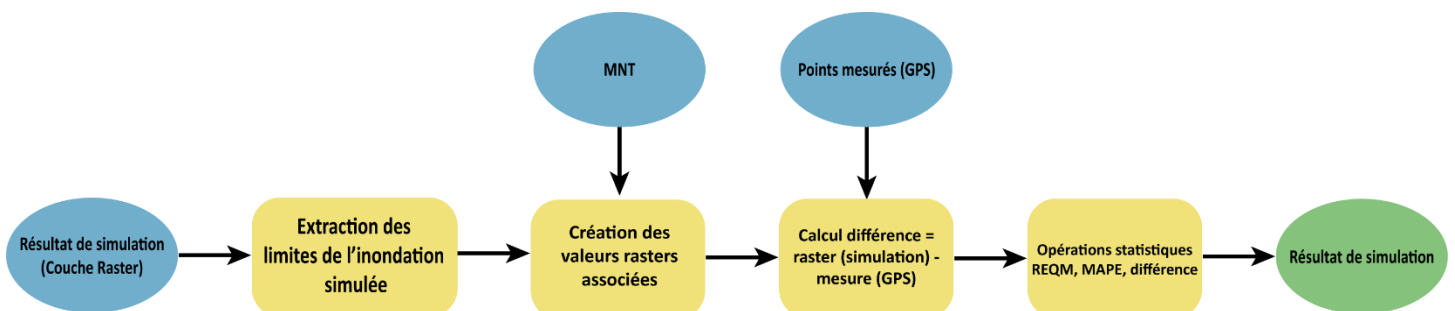
Ainsi, les paramètres établis pour la tempête permettent de représenter l'événement du 21 décembre 2010. De plus, les entités spatiales décrites assurent la représentation du terrain d'étude. Le comportement attendu de la simulation doit donc tendre à être proche des mesures observées. Pour évaluer cela, un modèle a été créé sur *Model Builder* dans le but de comparer les données simulées et mesurées grâce à des indicateurs de performance.

2.3.1. Méthode d'évaluation

Pour effectuer la calibration du modèle, les données GPS mesurées seront comparées aux données simulées par le modèle. Pour cela, la calibration manuelle sera utilisée. C'est une méthode « où l'utilisateur modifie graduellement les paramètres du modèle jusqu'à l'obtention de résultats satisfaisants » (*Simon Deslauriers, 2017, p.5*).

Cette méthode d'évaluation est la plus pertinente compte tenu que trois paramètres sont définis dans une plage d'incertitude. Pour rappel, il s'agit de la hauteur, de la période des vagues et de l'élévation totale de la surface de l'eau.

Ainsi, la figure 12 présente une version simplifiée du modèle créé pour calibrer les données d'inondation.



Figures 12 : Schéma de fonctionnement du modèle de calibration du CPBT.

Ainsi, les données simulées et mesurées sont comparées grâce à des indicateurs de performance. Les résultats de ces comparaisons sont les données utilisées pour évaluer la qualité de la calibration. Elles doivent tendre au meilleur résultat. Il convient donc de décrire ces indicateurs et définir leur domaine d'utilisation.

2.3.1.1. Données mesurées

Des points GPS délimitant l'emprise maximale observée de l'inondation ont pu être prélevés dans les zones de Parlee Beach et South Cove au moment de la tempête, ce sont les données mesurées. L'utilisation de points GPS est une pratique courante pour la calibration de modèles de simulation (*Madsen, 2000 ; Vidal et al., 2007*). La figure 13, ci-dessous, montre l'emplacement de ces points par rapport à la communauté de Pointe-du-Chêne.



Figure 13 : Localisation des points GPS utilisés pour la calibration du modèle BOC à Pointe-du-Chêne
 Source : D. Bérubé, CSRSE.

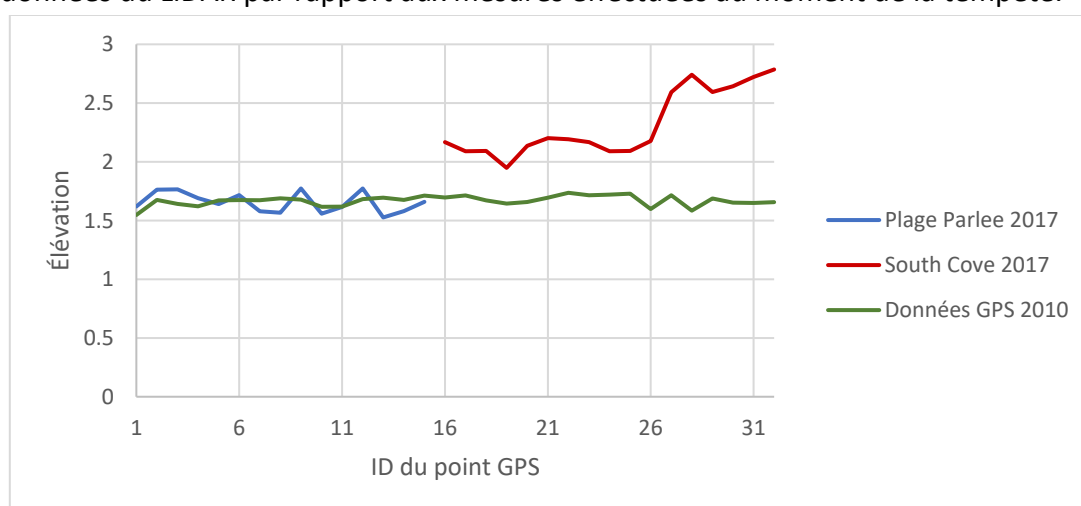
Ces points ont été prélevés entre 9 heures 37 et 9 heures 57 le 23 décembre 2010, soit au moment où l'impact de la tempête avait dépassé son intensité maximum. Pour mesurer l'emprise de l'inondation, les relevés GPS ont été effectués le long d'amas de débris transportés par la mer aux limites de son étendue maximale. L'ampleur de l'inondation au lendemain de l'événement a motivé la prise immédiate de relevés GPS. La figure 14, ci-dessous, montre la méthode de relevé des points GPS ainsi que la limite de l'inondation représentée par l'amas de débris au sol.



Figure 14 : Photographie de l'emplacement des relevés GPS effectués le 23 décembre 2010 à 9h40.

Cependant, des observations ont permis d'établir que certaines mesures étaient aberrantes sur la zone. Ainsi, des modifications ont eu lieu.

Les données aberrantes se caractérisent par une différence manifeste entre les données mesurées par le GPS et le LiDAR. Ce phénomène concerne la zone de South Cove. Le graphique 1, ci-dessous, montre la répartition de l'élévation du MNT par rapport aux données GPS. L'élévation pour la zone semble être surestimée pour les données du LiDAR par rapport aux mesures effectuées au moment de la tempête.



Graphique 1 : Différence d'élévation entre les points GPS prélevés en 2010 et les données rasters de 2017 pour les zones de South Cove et Parlee Beach.

Source : D. Bérubé.

En effet, des modifications du terrain ont été observées entre 2010 (prélèvement des points GPS) et 2017 (création des données LiDAR (MNT)). Les archives de la CSRSE montrent que des inspections, suivant un permis de construire, ont été effectuées le 19/09/2013 – 18/11/2013 - 29/10/2014 dans la parcelle d'intérêt. Cela signifie qu'une habitation a été construite et que le propriétaire a remblayé son terrain pour l'aplanir.

Ainsi, la différence moyenne entre les valeurs du GPS et du raster pour la zone de Parlee Beach est de 0,003 m alors que cette valeur est de -0,64 m pour la zone de South Cove. Autrement dit, l'erreur moyenne d'élévation entre la zone de South Cove et Parlee Beach est de 0,64 m. Cette différence impacte la calibration puisque les données issues du MNT à cet endroit ne correspondent pas aux données mesurées, la comparaison n'est donc plus pertinente.

La figure 15, ci-dessous, montre les conséquences de cette altération pour la zone de South Cove comparativement à la zone de Parlee Beach pour les mêmes paramètres en entrée du modèle.

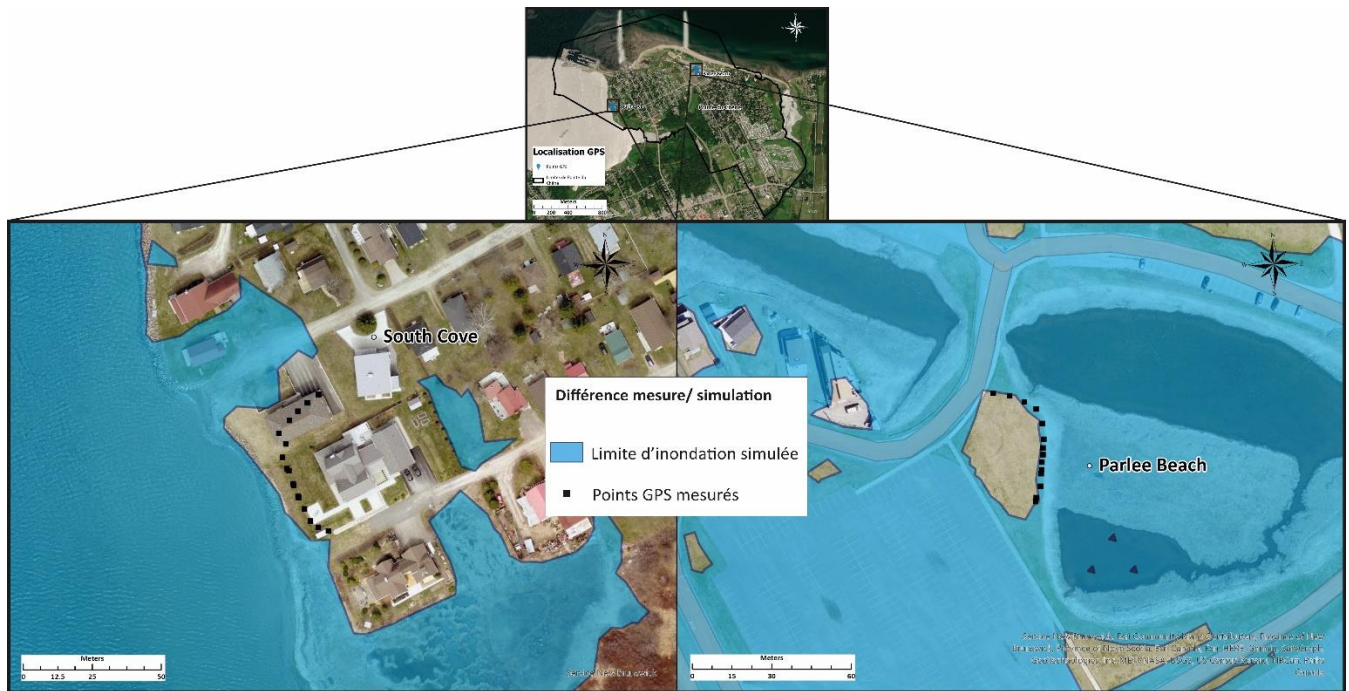


Figure 15 : Comparaison d'étendue d'inondation pour les zones de South Cove et Parlee Beach pour la même simulation.

La différence entre les 2 zones est particulièrement identifiable ici. À Parlee Beach, la simulation montre une estimation précise où les points du GPS semblent bien coïncider avec la limite simulée. Cependant, à South Cove, la simulation sous-estime clairement l'étendue de l'inondation par rapport aux mesures du GPS. En effet, la surélévation du terrain est prise en compte par le modèle de prévision alors qu'il n'y en avait pas au moment de l'événement.

Ainsi, puisque la différence entre les deux zones est trop élevée, que les données pour South Cove ont subi des modifications et que ces modifications semblent impacter les prévisions d'étendue d'inondation et donc les calculs de précision et de fiabilité du modèle, il a été décidé de supprimer complètement les points GPS pour cette zone du modèle de calibration.

2.3.1.2. Données simulées

Les données simulées sont le résultat d'étendue de l'inondation représentées par un fichier de forme raster. Les valeurs de ce raster représentent la profondeur d'inondation en mètre par rapport au niveau du sol. Or, les données GPS donnent une valeur d'élévation du terrain à l'étendue maximale de l'inondation. Ainsi, il est nécessaire d'appliquer une valeur d'élévation aux données simulées pour pouvoir les comparer aux valeurs mesurées.

Pour extraire cette valeur d'élévation, les cellules limitrophes de l'étendue de l'inondation simulée sont utilisées. Ainsi, pour chaque cellule à la limite de l'inondation, une valeur de MNT est extraite et considérée comme étant l'élévation de l'inondation à cet endroit.

C'est la différence entre ces valeurs d'élévation, issue de la simulation, et les valeurs d'élévations mesurées, issues des relevés GPS, qui servent à l'évaluation de la calibration.

Les limites de l'étendue se présentent sous la forme d'un fichier de lignes sur lesquelles sont extraites les valeurs d'élévation du MNT. Cependant, cette méthode n'assure pas la meilleure représentativité de l'élévation. En effet, il n'est pas possible de savoir si la cellule du raster utilisée, de part et d'autre de la ligne, est la plus pertinente. La résolution du raster étant de deux mètres, la différence entre deux cellules peut être importante. Ainsi, une zone tampon d'un mètre a été créée, dans le but de prendre en compte plusieurs cellules environnantes de la limite d'inondation, et la valeur la plus proche de la mesure GPS a été sélectionnée.

Ainsi, la figure 16 illustre la manière dont le modèle choisi les cellules du raster et assure ainsi la pertinence du choix. La représentativité des valeurs d'élévation est donc assurée.

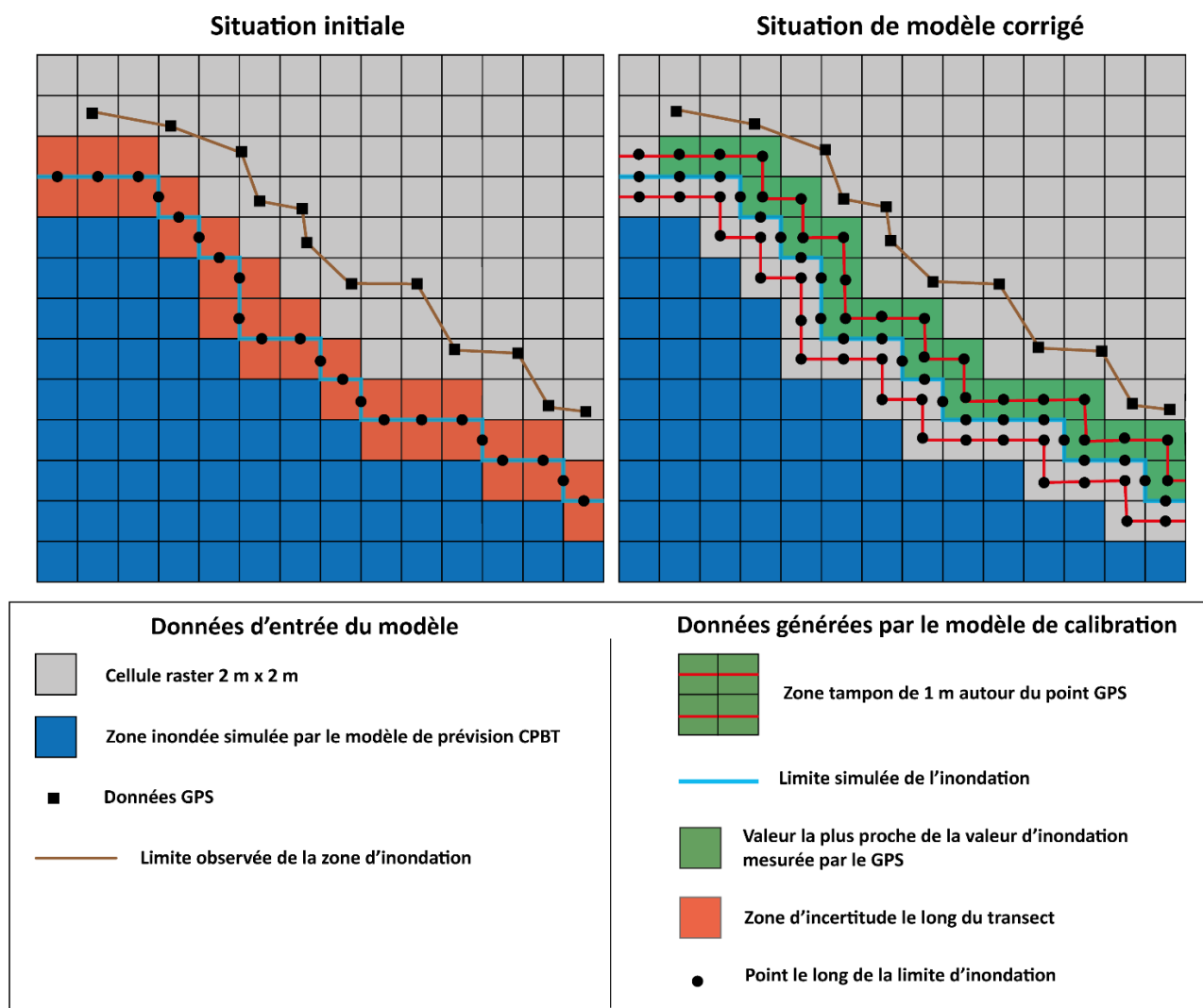


Figure 16 : Schéma du fonctionnement de discrimination des valeurs du raster dans le modèle de calibration avant et après modifications.

2.3.1.3. Indicateurs de performance

Un indicateur de performance est un outil statistique utilisant la différence entre des valeurs mesurées et simulées pour y attribuer une valeur. Cette dernière doit se trouver dans un certain intervalle définissant sa qualité. Dans cette calibration, trois indicateurs de performance ont été sélectionnés : Le REQM (*RMSE*), Le MAPE et la différence moyenne

Le REQM (Root Mean Square Error ou *RMSE*) évalue la qualité de la dispersion des valeurs prédites en fonction des valeurs observées. Son domaine d'acceptabilité est de $0.05 \leq RSME \leq 0.08$ (*K. Schermelleh-Engel et al., 2003*) pour une qualité optimale de précision. Les domaines d'utilisation sont de $n > 10$ (*T. Chai et R. R. Draxler, 2014*) ce qui correspond au cadre d'étude actuel puisque 32 relevés GPS sont disponibles.

Le MAPE (Mean Absolute Percent Error) est un pourcentage de l'erreur moyenne absolue. il fournit un pourcentage d'erreur entre les valeurs prédites et observées sur l'effectif de données, ainsi si le MAPE est de 5%, le modèle présente 5% d'erreurs (*JY. Baudot, 2019*). La limite de cet indice est que l'utilisation de valeurs absolues empêche de savoir s'il sur-estime ou sous-estime la réalité. La précision du modèle est considérée comme satisfaisante si $MAPE \leq 5\%$ (*D. Swanson, 2015*). Le domaine d'utilisation est le même que pour le REQM

Le REQM et le MAPE sont des outils particulièrement cités pour la comparaison de données mesurées et simulées (*McKeen et al., 2005; Savage et al., 2013; Chai et al., 2013*) et servent à l'évaluation de modèle climatiques et météorologiques notamment (*T. Chai et R. R. Draxler, 2014*). Leur utilisation a été généralisée dans le domaine géographique, notamment dans l'évaluation de la vulnérabilité aux inondations dans les environnements côtiers (*A. Seenath et al., 2016 ; G. Anfuso et al., 2009*).

Enfin, la différence moyenne donne une moyenne des différences entre les valeurs simulées et observées et permet d'identifier si le modèle sur-estime ou sous-estime les mesures.

Cette méthode est élaborée sous forme de *Model Builder* pour automatiser la méthode et la rendre reproductible. La table en sortie permet d'interpréter la différence entre les valeurs prédites et mesurées et de déterminer comment le modèle estime l'étendue de l'inondation.

3. Résultats et discussion

Les paramètres définis ont donc pour but de représenter le plus fidèlement possible la réalité de la tempête du 21 décembre 2010. Le modèle de calibration créé permet, grâce à des indices de performance (le REQM et le MAPE), d'évaluer la précision du modèle et ses limites. Ainsi, des données qualitatives d'étendue de l'inondation et des données quantitatives résultant du modèle de calibration créé seront analysées.

3.1. Données qualitatives

Le modèle fournit donc une simulation de l'étendue de l'inondation pour la zone de Parlee Beach, sélectionnée pour la calibration. Cette simulation est comparée avec les mesures effectuées par GPS au moment de l'événement. Les résultats sont présentés dans la figure 17, ci-dessous.



Figure 17 : Résultats de la simulation de la tempête du 21 décembre 2010 en comparaison des mesures effectuées et sur la communauté de Pointe-du-Chêne.

Il est donc visible que les limites de l'inondation, simulées par le modèle, concordent avec les mesures effectuées. Cependant, une légère tendance à la sous-estimation est visible. La différence maximale horizontale est d'environ 1,5 m sur le point GPS à l'extrémité nord de la carte ci-dessus. L'analyse statistique de la différence verticale de l'inondation donnera plus précisions.

3.2. Données quantitatives

Les tests de calibration effectués sur la simulation donnent un REQM de 0,05. Il convient de rappeler que son domaine de satisfaction est de $0.05 < \text{REQM} < 0.08$, ce qui signifie que la précision du modèle est satisfaisante. Le pourcentage d'erreur (MAPE) est de 2,67 %, ce qui correspond également à son domaine de satisfaction (MAPE < 10%). Enfin, la différence moyenne est de 0,004 mètres. Le modèle a tendance à surestimer l'inondation de quatre millimètres, cette différence négligeable peut potentiellement être attribuée à la différence de résolution entre le GPS et le MNT.

Dans un second temps, les dégâts estimés sont de 119 bâtiments touchés par l'inondation et des dégâts à hauteur de 1 548 000 de dollars. Les dégâts liés à l'érosion sont de 2 614 000 dollars pour une surface érodée de 52 000 mètres carrés. Les dégâts sur le bâti sont comparables à l'événement tel qu'il est décrit par le Gouvernement du Nouveau-Brunswick (1 340 000 de dollars estimés par le gouvernement) avec une légère surestimation. Cette surestimation est dû à la façon dont le modèle détermine la valeur du bâti. En effet, le modèle considère la valeur de remplacement d'un bâti, c'est-à-dire que chaque bâti touché par l'inondation est remplacé. En réalité, les bâtiments touchés ne sont pas tous entièrement reconstruits, les coûts de réparation sont moins importants, ce qui explique que le modèle surestime les coûts engagés.

3.3. Difficultés rencontrées

Ces résultats sont à nuancer avec les limites identifiées de cette étude. La première limite est l'exhaustivité de la méthode. En effet, les points GPS étant partiellement utilisables, l'évaluation ne peut être exhaustive. Les résultats présentent une concordance entre les valeurs simulées et mesurées à Parlee Beach mais le modèle simule toute la communauté de Pointe-du-Chêne.

Ensuite, la bathymétrie est le résultat d'une interpolation dont la précision dépend de la densité des points relevés. Or, la densité de points est faible sur la zone (0,25 point par mètre carré au maximum, un point par hectare au pire) la conséquence sera une plus faible précision des données maritimes par rapport aux données du LiDAR. Les données d'attributs de plage étant en partie déterminés par la bathymétrie, leur fiabilité s'en trouve affectée. De plus, la résolution des tuiles du raster sont limitées à deux mètres à cause du manque de précision des données, il existe donc une incertitude de deux mètres aux limites de l'inondation.

Certaines réserves sont émises sur les méthodes d'acquisition des données issues de la MNAI. En effet, les méthodes de créations des entités de protections naturelles ne sont peu documentées. Leur fiabilité et la méthode utilisée sont donc incertaines.

De plus, les données d'érosion ne peuvent être comparées compte tenu de l'absence d'estimations réalisées au moment de la tempête. Les notions de services écosystémiques et de protections naturelles sont des aspects de l'aménagement à explorer, donner une valeur monétaire à ces dégâts est difficile.

Enfin, compte tenu de la faiblesse des études géomorphologiques et botaniques sur le Détroit de Northumberland, la précision des attributs de plage est également à nuancer et ne représente pas exhaustivement la réalité.

Pour que cette évaluation ait plus de précision, il serait enviable de reprendre les simulations avec des données de tempêtes plus récentes. Le temps de retour pour une tempête de cet ordre est voué à augmenter avec l'influence du changement climatique (temps de retour de 30 ans en 2010 mais de deux ans à l'horizon 2100 (*R.J Daigle et al., 2020, p.49*). Ainsi, quand un événement se reproduira, des relevés GPS de l'emprise de l'inondation permettraient de confirmer les résultats de précision du modèle.

Enfin, il serait enviable de réaliser des études environnementales préalables sur les populations de zostères et l'échantillonnage des sédiments. Ses paramètres sont peu étudiés et leur impact est déterminant dans la réduction des inondations, la précision du modèle et la représentation de la zone d'étude seraient alors améliorée.

Conclusion

Ce mémoire s'applique à déterminer la précision des simulations produites par le modèle CPBT (Coastal Protection/ Benefit Toolbox) en fonction d'un événement de référence. Ce modèle a pour but de simuler les dégâts attendus pour une tempête côtière en fonction des protections naturelles présentes, aidant à l'atténuation des vagues. L'événement du 21 décembre 2010 est utilisé comme événement de référence pour la calibration. Les paramètres du modèle de simulation d'onde tempête sont calibrés et optimisés à l'aide d'un modèle SIG qui compare les données simulées avec les données mesurées à l'aide d'un GPS.

Les résultats montrent que les indices statistiques se situent dans les intervalles de satisfaction établis précédemment par la littérature. De plus, il a été établi que les emprises géographiques de l'inondation issue de la simulation concordent avec les archives photographiques et les relevés GPS. Enfin, les coûts estimés des dégâts de l'inondation concordent avec les estimations effectuées par le gouvernement provincial après l'événement. Ces indices donnent une certaine confiance dans les simulations du modèle et permettent d'étendre son utilisation à d'autres zones d'études.

De ce fait, le modèle de simulation d'onde de tempête utilisé dans cette étude sert d'outil à l'aménagement et à la planification pour des communautés côtières du Canada. L'avantage étant de permettre une prise en compte de la valeur des habitats

naturels pour réduire les risques d'inondation, soit un enjeu important pour les communautés côtières. La précision du modèle a pu être vérifiée à l'aide d'un événement de référence, le rendant ainsi particulièrement fiable. La continuité de ce travail sera d'étendre son utilisation aux communautés de Cap-Bimet et Petit-Cap situées sur le littoral du détroit de Northumberland. Elles présentent la particularité d'avoir sur leur territoire de grandes étendues de terres humides, de plages et de dunes. Le but sera de mettre en valeur ces zones sensibles de plus en plus soumises à l'impact de l'augmentation du niveau de la mer et de la pression anthropique. Les modèles de cette nature, servant à valoriser des actifs naturels dans l'intérêt des sociétés humaines, sont des initiatives de plus en plus importantes dans la mesure où les bouleversements de la biodiversité et le changement climatique sont des problématiques grandissantes. Dans ce contexte, il est important que les communautés côtières mettent en valeur la protection de la biodiversité dans leur processus de planification pour lutter contre le changement climatique et l'augmentation du niveau de la mer.

Table des matières

Remerciement.....	
Introduction	1
Méthodologie.....	4
1. Cadre théorique	4
1.1. Aléas.....	4
1.2. Enjeux	5
1.3. Protections côtières	7
1.4. Événement de référence.....	9
1.5. Système de référence altimétrique.....	11
2. Méthode de calibration.....	12
2.1. Détermination des paramètres optimaux.....	12
2.1.1. Fonctionnement du modèle	12
2.1.2. Paramètres déterminés pour la calibration	13
2.2. Présentation des entités spatiales	18
2.2.1. Modèle Numérique de Terrain	18
2.2.2. Ligne de littoral et ligne d'arrière-plage	18
2.2.3. Le bâti.....	18
2.2.4. Entités de protection	19
2.3. Modèle de calibration.....	20
2.3.1. Méthode d'évaluation	20
3. Résultats et discussion	26
3.1. Données qualitatives	26
3.2. Données quantitatives.....	27
3.3. Difficultés rencontrées.....	27
Conclusion.....	28
Table des matières	30
Table des figures	31
Sitographie.....	32
Bibliographie	35
Annexes.....	38

Table des figures

Figure 1 : Répartition de la population et découpage des commissions de services régionaux du Nouveau-Brunswick. [P.1](#)

Figure 2 : Localisation des zones étudiées et leur cadre géographique. [P.2](#)

Figure 3 : Principe de calibration d'un modèle de simulation. [P.3](#)

Figure 4 : Illustration du fonctionnement d'une onde de tempête. [P.5](#)

Figure 5 : Densité de population dans la zone d'intérêt le long du détroit de Northumberland. [P.6](#)

Figure 6 : Comparaison diachronique de la pression côtière dans la communauté de Cap-Bimet. [P.6](#)

Figure 7 : Synthèse des réponses envisageables au risque côtier dû à l'élévation du niveau de la mer. [P.8](#)

Figure 8 : Cartographie de la localisation des enjeux et des protections naturelles dans la communauté de Pointe-du-Chêne. [P.9](#)

Figure 9 : Évolution des facteurs d'ondes de tempête durant le mois de décembre 2010 au marégraphe de Shediac et à la station météorologique de Moncton. [P.10](#)

Figure 10 : Fonctionnement schématique du modèle CPBT. [P.11](#)

Figure 12 : Schéma de la part attribuable à chaque paramètre déterminant de l'onde de tempête dans le modèle CPBT. [P.15](#)

Figures 13 : Schéma de fonctionnement du modèle de calibration du CPBT. [P.20](#)

Figure 14 : Localisation des points GPS utilisés pour la calibration du modèle BOC à Pointe-du-Chêne. [P.21](#)

Figure 15 : Photographie de l'emplacement des relevés GPS effectués le 23 décembre 2010 à 9h40. [P.21](#)

Figure 16 : Comparaison d'étendue d'inondation pour les zones de South Cove et Parlee Beach pour la même simulation. [P.23](#)

Figure 17 : Schéma du fonctionnement de discrimination des valeurs du raster dans le modèle de calibration avant et après modifications. [P.24](#)

Figure 18 : Résultats de la simulation de la tempête du 21 décembre 2010 en comparaison des mesures effectuées et sur la communauté de Pointe-du-Chêne. [P.26](#)

Sitographie

Inondation du 21 décembre 2010

Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2012. *Détails de l'inondation du 21 décembre au 23 décembre 2010*. Disponible sur :

<https://www.elgegl.gnb.ca/0001/fr/Inondation/D%C3%A9tails/320>

Gouvernement du Nouveau-Brunswick, SD. *Inondations côtières et ondes de tempête*. Disponible sur :

https://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/ministeres/egl/environnement/content/inondations/inondations_cotieres_etondesdetempete.html

Bowyer P., Octobre 2003 (Archive), *The storm surge and Waves at Halifax with Hurricane Juan*. Disponible sur :

<https://www.ec.gc.ca/ouragans-hurricanes/default.asp?lang=en&n=BAAEAC12-1#:~:text=For%20example%2C%20Hurricane%20Juan%20had,Harbour%20was%20about%20150%20cm%20.>

Gouvernement du Nouveau-Brunswick, SD. *Inondations côtières et ondes de tempête*. Disponible sur :

https://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/ministeres/egl/environnement/content/inondations/inondations_cotieres_etondesdetempete.html

L'encyclopédie Canadienne, Juin 2021. *Inondations au Canada*. Disponible sur :

<https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/inondation>

Weather Underground, 2022. *Canada Weather History, Greater Moncton International Airport Station*. Disponible sur :

<https://www.wunderground.com/history/daily/ca/dieppe/CYQM/date/2010-12-21>

Gouvernement du Canada, Mai 2022. Rapport de données quotidiennes pour décembre 2010. Disponible sur :

https://climat.meteo.gc.ca/climate_data/daily_data_f.html?hlyRange=1953-01-01%7C2012-06-07&dlyRange=1939-12-01%7C2012-06-10&mlyRange=1939-01-01%7C2012-06-01&StationID=6207&Prov=NB&urlExtension=f.html&searchType=stnName&optLimit=specDate&StartYear=1840&EndYear=2022&selRowPerPage=25&Line=1&searchMethod=contains&Month=12&Day=1&txtStationName=moncton&timeframe=2&Year=2010#legende

Estimation de la hauteur de la marée

Aquaportail, Mai 2020. *Longueur de fetch, définition, explications*. Disponible sur :

<https://www.aquaportail.com/definition-7225-longueur-fetch.html>

Gouvernement du Canada, Septembre 2022. *Station marégraphique de Shédiac (Code 01805)*. Disponible sur :

<https://tides.gc.ca/en/stations/1805>

Boatsnews, Février 2022. *Tides, calculate the water heights and understand the rule of the twelfths*. Disponible sur :

<https://www.boatsnews.com/story/22198/tides-calculate-the-water-heights-and-understand-the-rule-of-the-twelfths>

Alloprof, SD. *Le système Terre-Lune et les marées*. Disponible sur :

<https://www.alloprof.qc.ca/fr/elevés/bv/sciences/le-systeme-terre-lune-et-les-marees-s1076>

Thomas P., Planet Terre, Décembre 2010. *Éclipse totale de Lune dans nuit du 20 au 21 décembre 2010 et éclipse partielle du Soleil le 4 janvier 2011 au matin*. Disponible sur :

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/eclipse-Lune-21-decembre-2010.xml>

Kalendrier, Ouest-France, SD. *Calendrier lunaire de décembre 2010*. Disponible sur :

<https://kalendrier.ouest-france.fr/calendrier-lunaire-decembre-2010.html>

Nautic, 2022. *Cours Permis Hauturier, la règle des douzièmes, le calcul des marées*. Disponible sur :

<https://www.loisirs-nautic.fr/cours-hauturier-regle-douziemes.php>

Indicateurs de performance

Aspexit Precision Agriculture, Août 2018. *Comment valider un modèle de prédiction*. Disponible sur :

<https://www.aspexit.com/comment-valider-un-modele-de-prediction/>

Bases de données

Gouvernement du Nouveau-Brunswick, SD. Base de données GéoNB. Disponible sur :

<http://www.snb.ca/geonb1/f/about/about-F.asp>

Gouvernement du Canada, Avril 2021. Pêches et Océans Canada. Disponible sur :

<https://www.dfo-mpo.gc.ca/about-notre-sujet/index-fra.htm>

Gouvernement du Canada, Avril 2022. Réseau de contrôle passif. Disponible sur :

<https://webapp.csrscs-scrcs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/data-donnees/passive-passif.php?network=pvc&locale=fr>

Informations administratives

Commission de services régionaux du Sud-Est, 2022. À propos du conseil d'administration. Disponible sur :

<https://www.nbse.ca/fr/about/board>

Gouvernement du Canada, Août 2022. Census Program Data Viewer. Disponible sur :

<https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/dp-pd/dv-vd/cpdv-vdpr/index-eng.cfm>

Gouvernement du Nouveau-Brunswick, SD. Rôle des nouvelles commissions de services régionaux. Disponible sur :

https://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/ministeres/egl/gouvernements_locaux/content/promos/plan_daction_gouvernance_locale/role.html

CIA, Février, 2005. The World Factbook, Field Listing Coastline. Disponible sur :

<https://user.iiasa.ac.at/~marek/fbook/04/fields/2060.html>

Bibliographie

Fonctionnement du modèle CPBT

Molnar M. (FDS/ MNAI), Morton C. (ESSA Technologies Ltd.), Olson E. (ESSA Technologies Ltd.), Bayly M. (ESSA Technologies Ltd.), Camarena A. (CBCL), Kaji A. (CBCL) et Bhalla N. (MNAI), Août 2021. *Gestion des actifs naturels pour accroître la résilience côtière, Document d'orientation à l'intention des municipalités.*

Molnar M. (FDS/ MNAI), Morton C. (ESSA Technologies Ltd.), Olson E. (ESSA Technologies Ltd.), Bayly M. (ESSA Technologies Ltd.), Camarena A. (CBCL), Kaji A. (CBCL) et Bhalla N. (MNAI), Juin 2021. *Managing Natural Assets to Increase Coastal Resilience, Pilot Study.*

Véronneau M., *GNSS et le système de référence altimétrique au Canada.* Ressources Naturelles Canada.

Pression côtière

Bernatchez P., Jolicoeur S., Quintin C., Savard J.-P., Corriveau M., O'Carroll S., Bérubé D., Garneau M., Chmura G.L., Nguyen-Quang T., Lieou C.K., Torio D., Van Ardenne L., Sammari H., St-Pierre M., Mars 2016. *Impacts des changements climatiques et des contraintes physiques sur le réajustement des écosystèmes côtiers (coastal squeeze) du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent (GESL) et évaluation des mesures d'atténuation de ces impacts.* Rapport de recherche remis à Ouranos et Ressources naturelles Canada.

Protections naturelles contre les inondations

Eyquem J. L., Décembre 2021. *Rising Tides and Shifting Sands: Combining Natural and Grey Infrastructure to Protect Canada's Coastal Communities.* Intact Centre on Climate Adaptation, University of Waterloo.

Vouk I., Picheli V., Provan M., Murphy E., Octobre 2021, *Nature-Based Solutions for Coastal and Riverine Flood and Erosion Risk Management.*

Lieberman A.S., O'Neill C.R., 1988. *Vegetation Use in Coastal Ecosystem.*

Haslett S.K., 2016. *Coastal Systems.*

Jellett M., 2017. *Planning the Blue Zone.* À l'attention de la commission de services régionaux du Sud-Est.

Impact du changement climatique sur le niveau de la mer

Daigle R.J., Janvier 2020. *Mis à jour des estimations de l'élévation du niveau de la mer et des inondations pour les secteurs côtiers du Nouveau-Brunswick.* Sur la base du cinquième rapport d'évaluation du GIEC.

Chouinard O., Gauvin J., Tartibu N., Décembre 2011, *L'adaptation au changement climatique dans les DSL (Districts de Services Locaux) de Cocagne et de Grande-Digue, Vers une planification côtière durable, Brochure d'information pour l'aménagement durable du littoral.*

Daigle R.J., 2020, *Scénario : Élévation du Niveau de la mer et Inondations.*

Conseil Municipal de Shédiac, Commission de Services Régionaux du Sud-Est, Association du Bassin Versant de la Baie de Shédiac, Shédiac, Plan d'adaptation aux changements climatiques.

Lemmen D.S., Warren F.J., James T.S. et Mercer C., 2016. *Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat,* Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario).

Daigle R.J., 2011. *Coastal Flooding Issues*

Compréhension des aléas naturels en jeu

Amec Foster Wheeler Environment and Infrastructure, Décembre 2017. *Parlee Beach and Shédiac Bay Hydrodynamic Modelling Study, New Brunswick.*

Slomp R., Kolen B., Bottema M., Terpstra T., Van Balen W., Nieuwenhuis S., Septembre 2010. *Retour d'expériences après la tempête Xynthia en France, leçons pour les Pays Bas, Les dégâts à la suite de l'inondation.*

Forrester W.D., 1983. *Manuel Canadien des marées*

National Ocean Service, 2009. *Tide Table 2010, East Coast of North and South America, including Greenland.*

Indicateurs de performance

Chai T. et Draxler R.R., Février 2014. *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature.*

Swanson D.A., Janvier 2015. *On the Relationship among Values of the same Summary Measure of Error when used across Multiple Characteristics at the same point in time: An Examination of MALPE and MAPE.*

Minet J. et Tychon B., SD. *Calibration et optimisation de modèles.*

Deslauriers S., 2017. *Développement d'un outil de calibration automatique pour tout modèle de rivière basé sur le logiciel SRH-2D.*

Khalid O., 2017. *Analyse de l'incertitude dans la modélisation du risque d'inondation : étude de cas rivière Richelieu.*

Planification du risque

Grare L., Giovanangeli J.-P., Août 2007. *Couplage vent-vagues en présence d'un groupe focalisant : Application à l'étude des Vagues Extrêmes*. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique.

Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2014. *New Brunswick's Flood Risk Reduction Strategy*.

Fisher S., Décembre 2018. *Proposed dredge area Petit-Cap DFO-SCH, Westmorland county, New-Brunswick*.

Walker J., Décembre 2017. *Marine Sediment Sampling and Analysis at Various Federal Department of Fisheries and Oceans Canada Small Craft Harbour Entrance Channels – Cap-de-Caissie, Cap-Pelé, Les Aboiteaux, New Brunswick*.

Scawthorn C., Flores P., Blais N., Seligson H., Tate E., Chang S., Mifflin E., Thomas W., Murphy J., Jones C., et Lawrence M., Mai 2006. *HAZUS-MH Flood Loss Estimation Methodology. Damage and Loss Assessment*.

Comportement de la végétation sous-marine

Wong M.C., Bravo M.A et Dowd M., 2013 *Ecological dynamics of Zostera marina (eelgrass) in three adjacent bays in Atlantic Canada*.

Environnement et Changement climatique Canada, 2020. *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Zostères marines au Canada*.

Annexes

Annexe 1 : Aperçu de la fiche de résultats fournie par le modèle CPBT pour la simulation de la tempête de 2010.

Source : MNAI, 2021.

Erosion Damage

Overview: Shoreline erosion is calculated individually for each profile and then a total erosion estimate along the full coastline is interpolated by summarizing values across all cross-shore profiles. Local erosion at each profile may vary due to beach and foreshore parameters and offshore wave attenuation. In the tables below, erosion is reported first for the entire coastline and then, in the second table, for the currently selected profile. Click on another cross-shore profile in the Overview Map below to view results for a different individual profile. Full coastline results are derived by interpolating and summarizing values across all cross-shore profiles along your coastline section.

Details: For each profile, wave runup and lateral beach retreat distances are calculated using the supplied foreshore parameters at the profile location and offshore wave conditions. Using these outputs, the area (m²) of beach lost is calculated by multiplying the lateral beach retreat distance by the longshore (see Glossary in User Guide) extent between profiles. The volume (m³) of beach lost is calculated by multiplying the berm height by the retreat distance and longshore extent. Erosion damage estimates (\$) are calculated by multiplying the area of beach lost by the beach property value (\$/m²). These estimates are coarse but provide some indication of potential beach retreat following a storm that is useful for relative comparisons with other scenarios.

Main erosion result for the entire coastline

Metric	Unit	Value
Area Lost m ² (Coastline)	(m ²)	52285
Volume Lost m ³ (Coastline)	(m ³)	88362
Single Storm Erosion Damage	(\$)	2,614,250
100-Year Erosion Damage	(\$)	1,729,585

Flooding and Structural Damage

Overview: The MNAI CPBT estimates flooding from the sum of still water level and local wave runup. The still water level is the sum of the tidal water level during the storm (0.1 m), the storm surge elevation (0.2 m) and any sea level rise (0 m). Under the simulated conditions the total still water level of this storm reached 0.3 m. In some areas the flood water level is may be further increased by local wave runup – the vertical extent of wave onto a beach or structure above the still water level. Local wave runup will vary for each profile since it is a product of the beach and foreshore parameters.

Damages to buildings, or structural damages, are calculated using depth-damage estimates to make a proportional adjustment to the building values. Building values were originally assigned by you as part of the building footprint input data (see User Guide). The flood water depth at each building is first calculated, then the value of the building is multiplied by the corresponding depth-damage proportion (%) using, for example, depth damage curves from the documentation for USACE HAZUS model. For each building, the proportionally adjusted value represents the replacement cost of flood damages, which are then added up across all affected structures in the study area. Based on the storm return period of 30 years (Tr), which you specified, the present value of damage costs is calculated over 100-years at an annual discount rate of 0.05.

Metric	Unit	Value
Flooded Structures	(#)	119
Median Flood Depth	(m)	0.16
Max Flood Depth	(m)	0.66
Flood Damage (Single Storm)	(\$)	1,548,483
Flood Damage (100-Year Summary)	(\$)	1,024,472

Annexe 2 : Données utilisés pour les attributs de dunes et de plages

Source : MNAI, 2021.

	OBJECTID *	Shape *	id	slope	W	B	D	sediment	Shape_Length	Shape_Area	type
1	13	Polygon	0	0.3	5	1	2	100	372.584904	2111.508285	Construction humaine
2	14	Polygon	0	0.2	5	1	2	100	239.348708	1514.151775	Construction humaine
3	16	Polygon	0	0.2	100	2	2	100	969.404687	13794.933365	Construction humaine
4	1	Polygon	0	0.02	15	1	0.5	0.15	436.682757	5093.149769	Solution basée sur la nature
5	2	Polygon	0	0.1	5	1	1	0.15	518.288038	4827.655125	Solution basée sur la nature
6	3	Polygon	0	0.07	10	1	1	0.15	383.460363	3878.26083	Solution basée sur la nature
7	4	Polygon	0	0.09	4	1	1.8	0.15	292.689674	2425.323063	Solution basée sur la nature
8	5	Polygon	0	0.07	1	1	2.8	0.15	458.573279	4238.342485	Solution basée sur la nature
9	6	Polygon	0	0.055	0	0	3	0.15	211.068711	1986.787086	Solution basée sur la nature
10	7	Polygon	0	0.06	5	1	2.5	0.15	499.620788	5751.338731	Solution basée sur la nature
11	8	Polygon	0	0.09	6	1	3	0.15	457.44575	5379.685208	Solution basée sur la nature
12	9	Polygon	0	0.022	5	1	2	0.15	374.594571	4548.988828	Solution basée sur la nature
13	10	Polygon	0	0.01	30	1	2.4	0.15	453.374794	6101.254057	Solution basée sur la nature
14	11	Polygon	0	0.06	9	1	1.1	0.15	269.129569	1394.407811	Solution basée sur la nature
15	12	Polygon	0	0.02	6	1	2	0.15	168.554877	1153.950613	Solution basée sur la nature
16	15	Polygon	0	0.09	13	1	3	0.15	412.963326	5431.632638	Solution basée sur la nature

Slope : Pente W : Largeur de la berme B : Hauteur de la berme

D : Hauteur de la dune Sediments : Taille des grains de sédiments

Annexe 3 : Données utilisées pour les attributs de végétation

Source : MNAI, 2021.

	OBJECTID *	Shape *	id	Type	Cd	hc	N	d	Shape_Length	Shape_Area
1	1	Polygon	1	Eelgrass	0.1	1	150	0.02	5831.423927	607248.73228

Cd : Coefficient de trainée (*Guannel et coll. 2015*) hc : Hauteur de la lame de zostère

N : Densité de pousse d : Largeur de la lame de zostère

Annexe 4 : Données utilisées pour les attributs de bâti (1 726 entités)

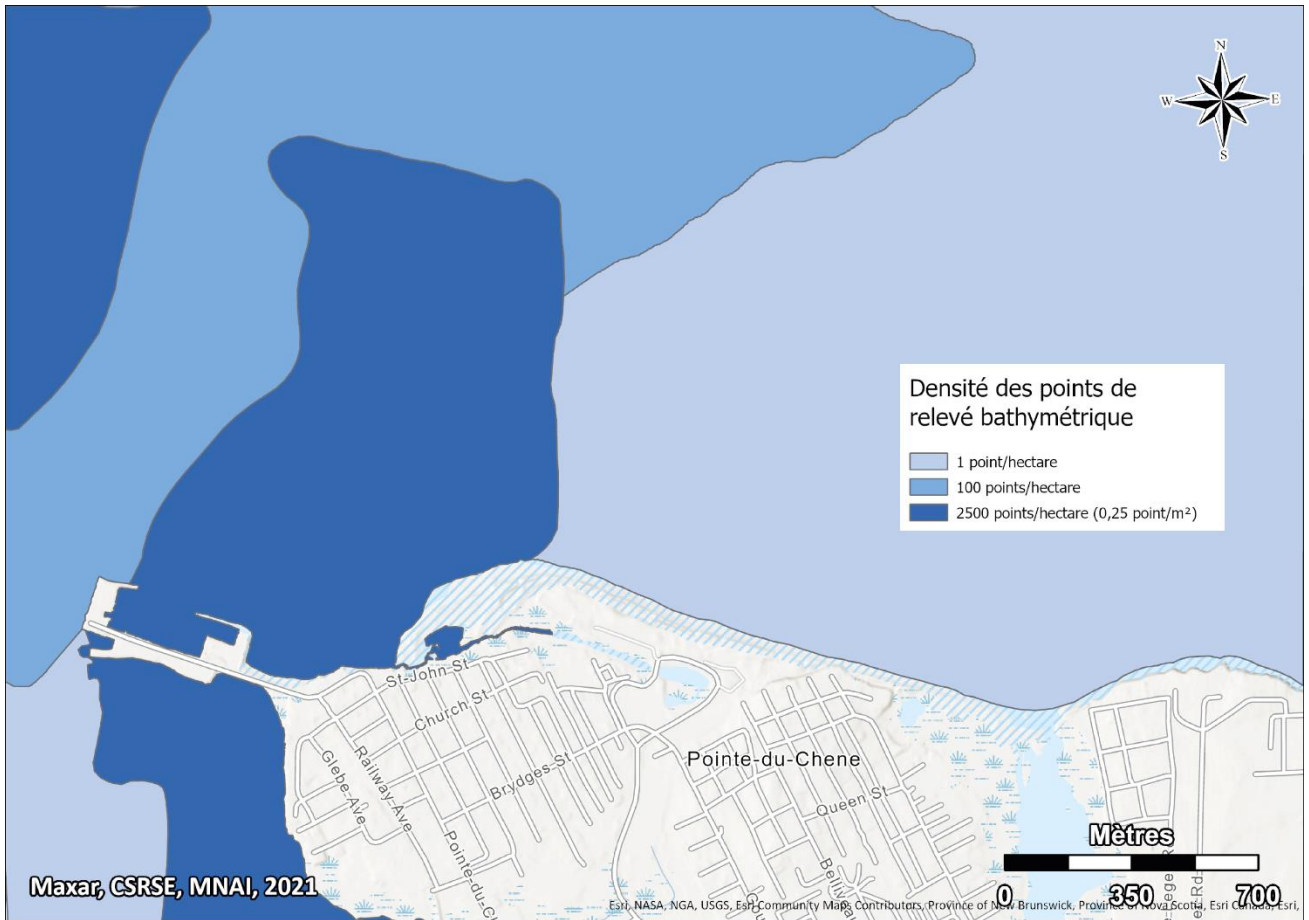
Source : MNAI, 2021.

VAL	DDID	Shape_Length	Shape_Area
0	RES1_147	15.202862	12.031497
0	RES1_147	13.434896	10.500221
0	RES1_147	13.00009	10.000138
0	RES1_147	15.714133	13.461971
0	RES1_147	19.799019	24.000149
0	RES1_147	18.384732	21.124936
0	RES1_147	24.748681	32.155776
0	RES1_147	44.936588	42.851146
0	RES1_147	24.71512	20.100053
0	RES1_147	26.28169	16.776239
0	RES1_147	35.775147	74.863223
0	RES1_147	33.668272	50.29671
4416.6	RES1_147	16.541058	6.114068
31800	RES1_147	15.556416	15.000124
2100	RES1_147	14.495408	12.74942
3019.6	RES1_147	13.081369	10.062308
31800	RES1_147	13.43486	10.499658
42800	RES1_147	18.384851	20.625121
5719.4	RES1_147	18.031196	20.312425
32100	RES1_147	21.920421	28.500244
42800	RES1_147	19.799284	23.21915
42800	RES1_147	18.738474	21.000581
40300	RES1_147	14.469181	13.002659
245400	RES1_147	50.204323	142.62389
38383.4	RES1_147	47.39279	53.135322
40000	RES1_147	20.933254	17.910947
40300	RES1_147	32.173324	35.436738
28780.4	RES1_147	41.365718	95.906873
26080.6	RES1_147	49.497441	92.625783
10873	RES1_147	18.031228	18.875267
99100	RES1_147	60.103974	128.937972
109000	RES1_147	41.365731	65.530296
45419.8	RES1_147	66.468061	165.624908
29180.2	RES1_147	48.436917	106.405895

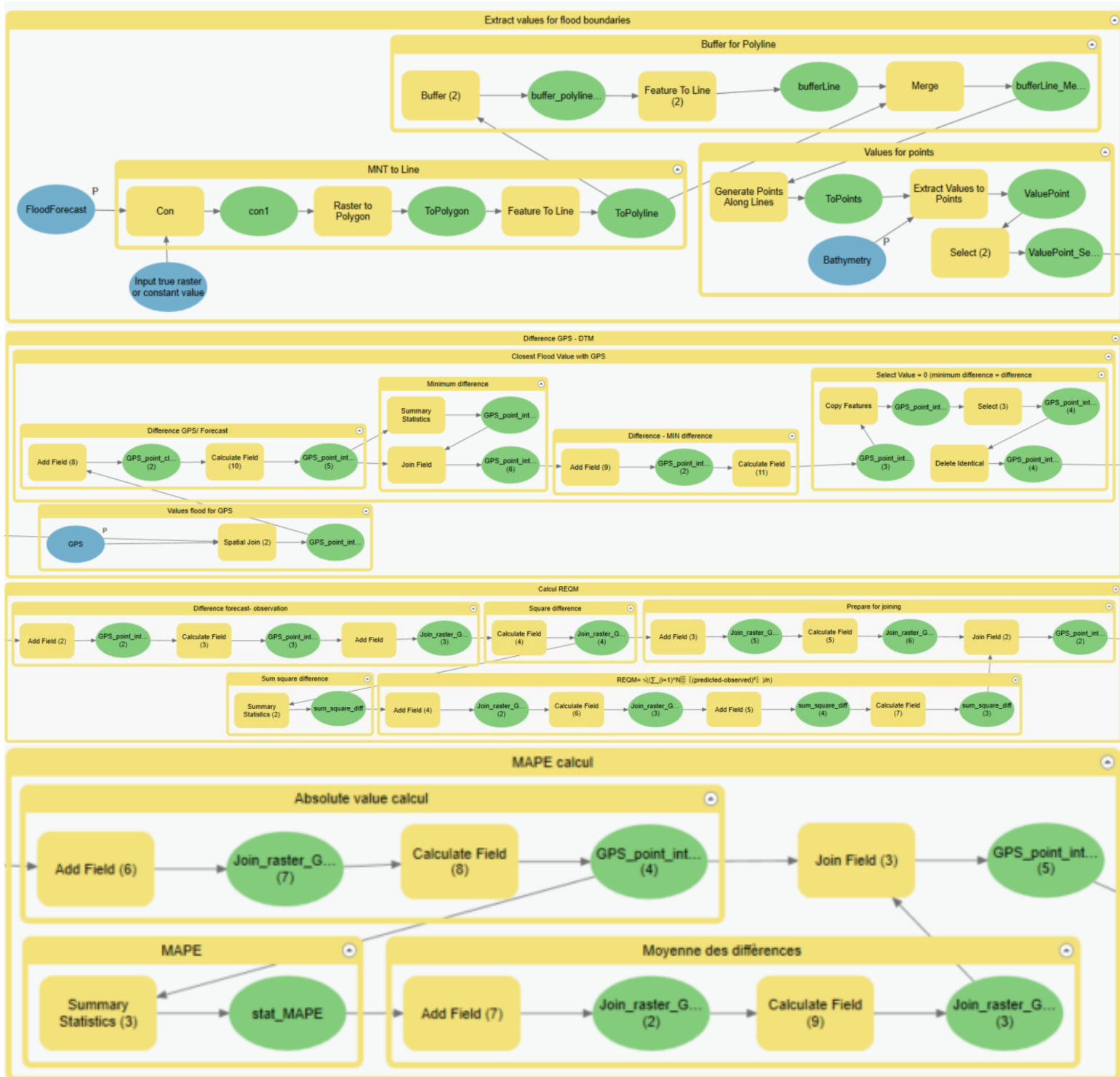
DDID : Identificateur de la courbe profondeur-dommage

VAL : Valeur numérique de remplacement de la structure

Annexe 5 : Carte de dispersion des points de relevé bathymétrique
Source : Pêches et Océans, MNAI, 2021.



Annexe 6 : Schéma du fonctionnement complet du modèle de calibration



Annexe 7 : Photographie illustrative du phénomène de pression côtière dans la communauté de Cap-Bimet

Source : Google Street View, Juin 2013

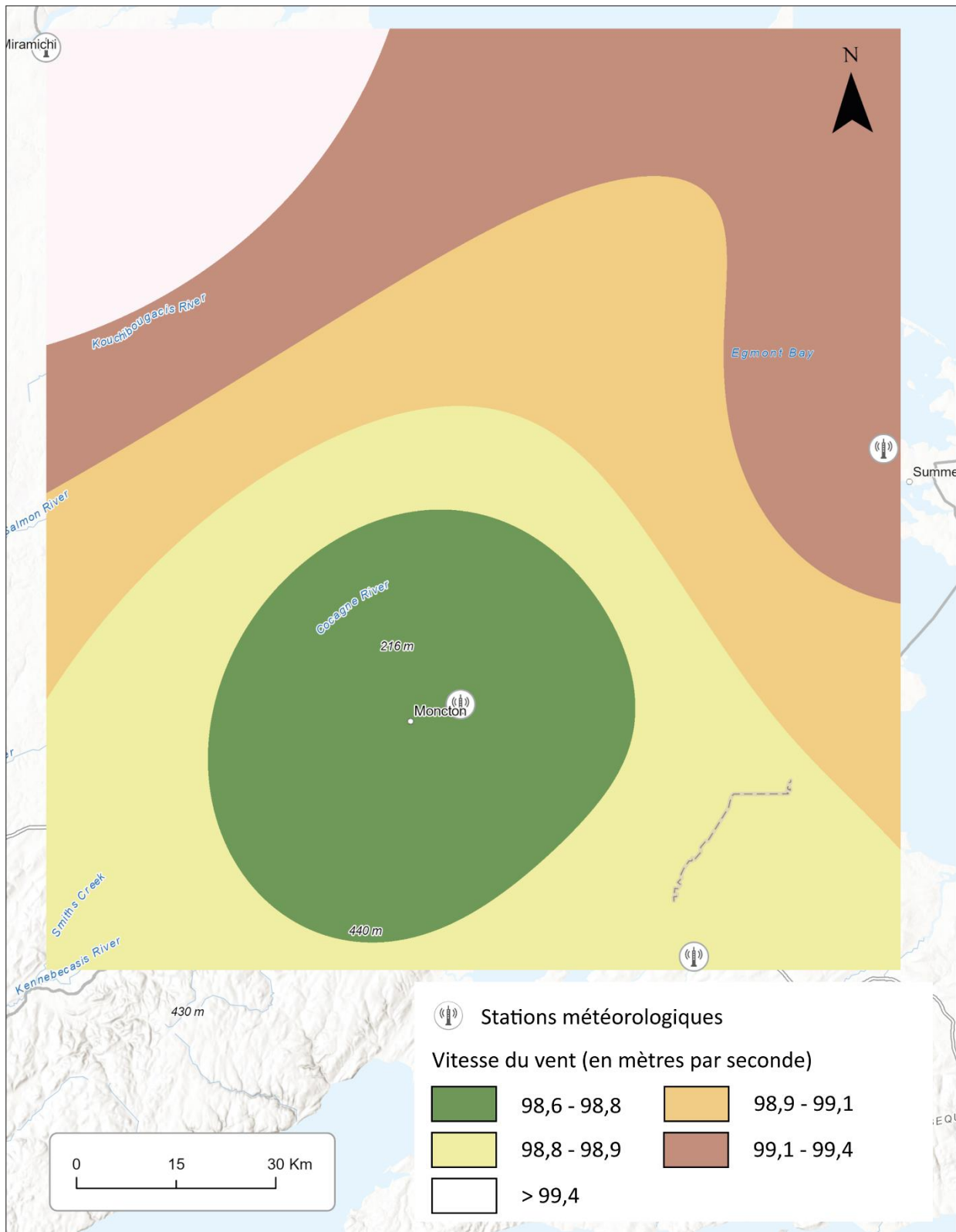


Annexe 8 : Exemple d'une situation où l'utilisation de la ligne d'arrière-plage est nécessaire



Annexe 9 : Cartographie de la vitesse du vent (en mètres par seconde) durant la tempête du 21 décembre 2010. Issue de l'interpolation des données de 4 stations météorologiques (Méthode IDW).

Source : Archives Windy, 2010.

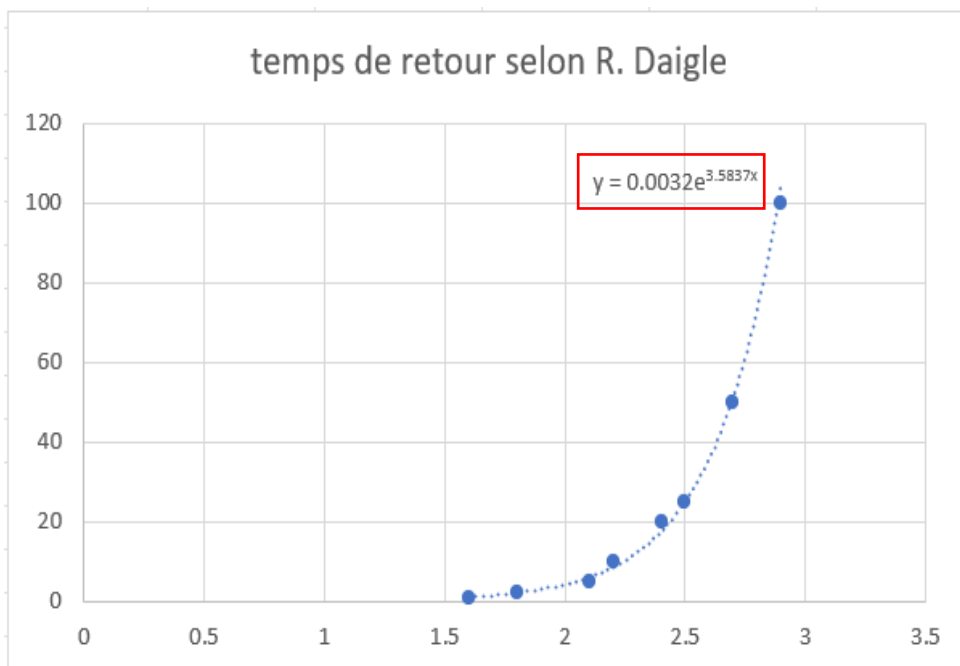


Annexe 10 : Calcul de la Total Water Surface Elévation

Total Water Surface Elevation	Données en mètres			
				Données de marnage
moyenne pleine mer marée supérieur	marée basse moyenne			Données durant l'événement
0.328	-0.702			Résultat
	marnage			
		1.03		
	douzième			
		0.08		
Durée (en minutes) entre la marée haute observée et le pic de l'événement				
204	3.4 en heure			
Hauteur de la mer au moment de l'événement				
		0.328		
hauteur 3.4h plus tard				
		0.282040268		
hauteur marée à 14h45 + 3.4				
		0.045959732		
Total Water Surface Elevation				
		0.303959732		

Annexe 11 : Calcul du temps de retour

Source : R.J Daigle et al., 2020, p.49.



Temps de retour	2010	marée
1	1.6	1
2	1.8	1.2
5	2.1	1.5
10	2.2	1.6
20	2.4	1.8
25	2.5	1.9
50	2.7	2.1
100	2.9	2.3
Temps de retour =	30.866	
$0.0032^{(3.5837*2.57)}$		