POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Évaluation de la vulnérabilité des côtes canadiennes face à la hausse des niveaux d'eau extrêmes basés sur les projections climatiques de CMIP5 et de CMIP6

FÉLIX-ARNAUD LAFLAMME DESJARDINS

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie civil

Octobre 2024

© Félix-Arnaud Laflamme Desjardins, 2024.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Évaluation de la vulnérabilité des côtes canadiennes face à la hausse des niveaux d'eau extrêmes basés sur les projections climatiques de CMIP5 et de CMIP6

présenté par **Félix-Arnaud LAFLAMME DESJARDINS**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Émilie BÉDARD, présidente

Elmira HASSANZADEH, membre et directrice de recherche

Ali NAZEMI, membre et codirecteur de recherche

Ahmad SHAKIBAEINIA, membre

DÉDICACE

Ce mémoire est dédié à ma copine, Charlotte, aux personnes de mon entourage immédiat, soit Karen, Guy, Maëlle, Marilys, Noémie & Frédéric et à mes amies et amis qui me supportent et m'encouragement continuellement.

De plus, je souhaite l'adresser à Dr Elmira Hassanzadeh, ma directrice de recherche, pour sa disponibilité, sa confiance, son dévouement et ses précieux conseils.

REMERCIEMENTS

J'aimerais débuter d'un chaleureux remerciement à Elmira, ma directrice de recherche, pour sa grande générosité tout au long de mes études aux cycles supérieurs. Elmira m'a épaulé dans l'obtention de bourses, dans les moments plus difficiles de la maitrise et dans ma volonté d'aller outre-mer afin d'acquérir davantage de connaissances dans les études portant sur la hausse du niveau de la mer. J'aimerais souligner sa disponibilité continue qui a largement dépassé mes attentes et qui m'a permis d'améliorer considérablement mon article de maitrise.

Je tiens aussi à remercier Ali, qui a significativement contribué à l'élaboration de mon premier article scientifique. Ses idées et son sens critique ont permis de remédier aux impasses rencontrées au cours de la dernière année. Aussi, sa créativité a permis d'agrémenter mon processus de rédaction en m'offrant plusieurs techniques d'écriture originales.

Je réserve aussi des remerciements bien spéciaux pour Carlos et Cristina, qui ont été d'une hospitalité remarquable tout au long de mon séjour au Portugal. Grâce à eux, j'en ai appris davantage sur la théorie encadrant la hausse du niveau de la mer, mais aussi sur la culture et la nourriture portugaise. Un grand merci à Carlos pour tout le temps consacré à mon article. Sa passion et ses connaissances inégalées m'ont permis de témoigner d'un grand équilibre de vie qui me sert maintenant de modèle. Puis, merci à Cristina pour sa joie de vivre et ses nombreux conseils concernant mes travaux avec le logiciel *ArcGIS Pro*.

Je souhaite également prendre le temps de remercier le support de mon entourage extraordinaire. Merci à Charlotte d'égayer mes journées et de m'avoir soutenu au travers de ce parcours. Aussi, merci à mes parents, Guy et Karen, et à mes sœurs, Maëlle et Marilys, pour l'appui et pour la sagesse de vos nombreux conseils. À mes amis et amies, je vous remercie pour vos encouragements et votre intérêt face à ce projet.

J'aimerais finalement remercier les différentes entités qui m'ont offert un support financier. Tout d'abord, je tiens à souligner la contribution du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) qui m'a offert la généreuse bourse de la maitrise, ainsi qu'un supplément pour études à l'étranger. Sinon, merci à Hydro-Québec pour la bourse d'excellence octroyée en 2023. Je me permets également de remercier mes parents et Elmira pour leur support financier additionnel, m'offrant ainsi une tranquillité d'esprit lors de mes études.

RÉSUMÉ

Les changements climatiques aggravent la Hausse du Niveau de la Mer (HNM), un enjeu majeur qui affecte les activités socioéconomiques et les conditions environnementales. À l'échelle planétaire, le niveau moyen de la mer a augmenté de 3.3 mm par année pendant la période de 1993 à 2018. Le Canada n'y fait pas exception alors que la moyenne de ses températures se réchauffe deux fois plus rapidement que la moyenne mondiale. Sachant que le Canada possède le plus long littoral au monde, la HNM accroît la vulnérabilité des communautés canadiennes aux inondations côtières. Ainsi, l'étude des risques reliés à la HNM est essentielle pour préparer et protéger les populations et les infrastructures qui longent la côte canadienne. Les répercussions des changements climatiques sont fréquemment évaluées avec les modèles climatiques issus des projections du *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP). Au fil des dernières années, les modèles de CMIP5 ont couramment servi à l'évaluation du niveau de l'eau au Canada. Cependant, de nouveaux modèles CMIP6 ont récemment été publiés. Il est alors pertinent de comparer et d'évaluer le niveau de la mer en utilisant ces nouveaux modèles afin de mieux saisir les différences existantes avec les projections de CMIP5.

Cette étude vise à évaluer la hausse du niveau des eaux canadiennes provoquée par les changements climatiques. Pour ce faire, ce mémoire se divise en trois objectifs : (1) Déterminer les récentes variations du niveau de l'eau pour la période historique; (2) Estimer les Niveaux d'Eau Totaux Extrêmes (NETEs) à trois villes côtières canadiennes en utilisant les modèles climatiques CMIP5 et CMIP6; et (3) Délimiter les inondations côtières des trois villes côtières à l'étude, ainsi que d'évaluer leur vulnérabilité selon plusieurs indicateurs socioéconomiques. Pour répondre au premier objectif du mémoire, nous quantifions l'évolution du niveau de la mer pour les marégraphes canadiens en utilisant des tendances paramétriques et non paramétriques, ainsi qu'en vérifiant si ces dernières sont significatives ou non. Des 1018 stations marégraphiques fonctionnelles au Canada, seulement 44 d'entre elles ont assez de données pour présenter une distribution spatiale des tendances dans le pays. Celles-ci comprennent 13 stations de l'ouest, 26 stations de l'est et 5 stations nordiques. Notre analyse confirme que la variation relative régionale des niveaux d'eau est hétérogène pour la période historique de 1993 à 2022. Effectivement, les 13 stations de l'ouest comportent 2 stations ayant une tendance positive, 10 avec une tendance

pratiquement nulle et 1 qui enregistre une baisse dans le niveau de l'eau. Dans l'est, 25 stations présentent une tendance à la hausse, alors qu'il n'y a que la station de Sept-Îles, au Québec, qui indique une tendance négative. Finalement, les stations nordiques témoignent d'une HNM pour 2 villes du Nord-ouest canadien, tandis que les 3 autres stations du Nord-est expriment un retrait significatif de l'eau.

Trois de ces stations, soit Vancouver en Colombie-Britannique, Saint John au Nouveau-Brunswick et Churchill au Manitoba, sont utilisées pour effectuer une évaluation future plus détaillée. Plus précisément, nous évaluons les futurs NETEs afin d'estimer les aires des inondations possibles, ainsi que leur vulnérabilité socioéconomique. Ces NETEs sont estimés en additionnant trois composantes, soit la variation relative régionale des niveaux d'eau, la marée astronomique extrême et la valeur d'onde de tempête extrême. Tout d'abord, la variation relative régionale du niveau de l'eau est basée sur les ensembles de projections disponibles des modèles CMIP5 et CMIP6 selon des forçages radiatifs modérés et élevés pour des périodes futures à court terme et à long terme. Sinon, la marée haute et l'onde de tempête extrêmes sont obtenues par analyse fréquentielle. Nos résultats présentent une différence considérable entre les projections de CMIP5 et CMIP6. Par exemple, CMIP6 offre une plage totale des NETEs de [2.62; 5.89], [4.59; 8.24] et [-4.73; 6.19] mètres, alors que CMIP5 présente des résultats plus modestes, soit de [2.84; 3.50], [4.64; 5.47] et [-4.11; 3.58] mètres à Vancouver, Saint John et Churchill, respectivement. Les valeurs négatives pour la station de Churchill sont expliquées par un fort soulèvement régional de la croûte terrestre à cet endroit, menant à un retrait relatif de l'eau. En utilisant la technique *bathtub*, nous étudions la différence entre les deux projets de CMIP sur l'aire totale qui serait à risque si un niveau extrême était atteint. Sous un scénario de forçage radiatif élevé de CMIP5, les inondations côtières pourraient couvrir 6.2 km^2,13.5 km^2 et 10.8 km^2 des régions de Vancouver, Saint John et Churchill. Ces aires inondées augmentent, respectivement, de 118%, 38% et 36% en utilisant les projections de CMIP6, indiquant une divergence significative entre les deux modèles.

Finalement, nous évaluons la vulnérabilité des aires qui pourraient potentiellement être inondées selon les niveaux de l'eau estimés en considérant 15 indices reliés à la population, aux endroits publics, au territoire et aux infrastructures. Les résultats indiquent que même le scénario le moins

dévastateur prévoit que des centaines de résidents pourraient être affectées. Parmi celles-ci, les minorités visibles et les personnes s'identifiant comme Autochtones pourraient être plus à risque à Vancouver et à Churchill, respectivement. Aussi, la HNM à Vancouver et à Saint John pourrait avoir de lourdes répercussions pour les services de santé de ces régions, alors que la totalité des casernes de pompiers et des postes de police à Churchill pourraient être inondés si le pire scénario étudié devait se produire. Durant un tel scénario, une grande proportion des routes et du réseau ferroviaire des trois villes pourrait être inutilisable, limitant ainsi les options de transport pour quitter la ville et réduisant considérablement les activités sociales et économiques de la région. Cependant, malgré des divergences notables dans la délimitation des étendues inondées, les projections de CMIP5/6 conduisent à une vulnérabilité de la population similaire, et ce, dépendamment des différents scénarios étudiés pour les trois villes à l'étude. Ceci témoigne du besoin d'améliorer les infrastructures canadiennes pour qu'elles soient adaptées aux conditions changeantes.

ABSTRACT

Climate change exacerbates sea level rise, a major concern affecting countries' socioeconomic activities and environmental conditions. At the global scale, the mean sea level has risen by around 3.3 mm between 1993 and 2018. Canada is not an exception as the country's temperatures are warming twice as fast as the global average. Given that Canada has the longest coastline in the world, rising sea levels can intensify the vulnerability of communities to coastal flooding events. Therefore, studying the risks of rising sea levels is essential to prepare and protect the population and infrastructure along Canadian coasts. The impact of climate change is often assessed using the outputs of climate models from Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) projections. CMIP5 models have been commonly used for assessing sea levels in the country. As CMIP6 models have recently become available, assessing sea levels using these new models is necessary to grasp their differences with CMIP5 projections.

This thesis aims to evaluate the sea level rise on Canadian coasts due to the changing climate. The specific objectives of this study are to (1) Determine the recent changes in sea level across Canada during the historical period; (2) Estimate the extreme sea levels in three coastal cities representing Canada's three coasts using CMIP5 and CMIP6 projections; and (3) Evaluate coastal flooding in the three coastal cities and their consequent vulnerability considering multiple socio-economic factors. For the first objective, we evaluate sea-level trends in Canada using parametric and non-parametric trend approaches. Out of the 1018 tide gauge stations, only 44 have enough data to perform such analysis. These include 13 western, 26 eastern and 5 northern stations. Our analysis shows the divergence in the sign and rate of sea level change during the historical period. In the east, while 25 stations show an increasing trend in sea level, only one station in Sept-Îles, Québec, presents a decreasing trend. Out of the 13 stations along the Pacific coast, 2 present positive trends, 10 exhibit nearly no trend and one station records a decrease in sea level. While stations in the northeast present significantly negative trends, those in the northwest show increasing sea levels.

Vancouver in British Columbia, Saint John in New Brunswick and Churchill in Manitoba are used to address objectives 2 and 3 for future sea level change and vulnerability assessments. Extreme Total Water Levels (ETWLs) are estimated by considering their key components: relative Regional

Sea Level Rise (RSLR), extreme astronomical tides and extreme storm surges induced by local and regional weather conditions. RSLR is found based on an ensemble of CMIP5 and CMIP6 models under moderate and high radiative scenarios for short-term and long-term future periods. Extreme astronomical tides and severe storm surge levels are estimated using frequency analysis. Our results show a considerable difference between RSLR and, thus, ETWL estimated with CMIP5 and CMIP6 projections. For instance, CMIP6 shows ranges of [2.62; 5.89], [4.59; 8.34] and [-4.73; 6.19] meters, while CMIP5 present more modest results of [2.84; 3.50], [4.64; 5.47] and [-4.11; 3.58] meters in Vancouver, Saint John and Churchill, respectively. Negative values in the northern station are due to a strong regionalized uplift in the Earth's crust, leading to a relative water retreat. Using a simple bathtub approach, we estimated coastal flooding/exposure corresponding to ETWL in these cities. Under CMIP5's high radiative forcing, coastal flooding could inundate up to 6.2, 13.5 and 10.8 km^2 of the Vancouver, Saint John and Churchill regions. These flooded areas are respectively 118%, 38% and 36% higher under CMIP6 projections, which indicates significant divergences between both models.

Finally, coastal vulnerability is assessed based on inundated areas under rising sea levels for the three cities, considering 15 factors related to population, public spaces, land and infrastructure. The results show that even under the least extreme scenario, hundreds of people could be affected. Among them, visible minorities and Indigenous people could be more at risk in Vancouver and Churchill, respectively. Furthermore, we highlight that the sea-level rise in Vancouver and Saint John could heavily affect health services, while all fire and police stations in Churchill could be flooded if the worst-case scenario happens. In that scenario, roads and railways in the three cities will likely become unavailable during the inundation, thus limiting potential ways to exit the city and reducing economic and social activities. Also, despite the difference between the extent of flooding by CMIP5/6 projections, they lead to an almost similar range of vulnerability for the population in the considered cities, illustrating the urgent need to improve infrastructure to adapt to these changing conditions.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VIII

TABLE DES MATIÈRES X

LISTE DES TABLEAUX XIII

LISTE DES FIGURES XIV

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XIX

LISTE DES ANNEXES XXI

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Contexte 1

1.2 Cas d'étude et problématique 3

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE 5

2.1 Modèles de circulation générale 5

2.1.1 Modèles climatiques – CMIP5 6

2.1.2 Modèles climatiques – CMIP6 6

2.1.3 Comparaison entre les modèles climatiques CMIP5 et CMIP6 7

2.2 Niveau de l'eau des marégraphes canadiens 8

2.2.1 Marégraphes canadiens 8

2.2.2 Estimation du niveau extrême total de l'eau au Canada 10

2.2.3 Cartes des régions à risque et évaluation de la vulnérabilité 11

CHAPITRE 3 ORGANISATION DU TRAVAIL DE RECHERCHE 13

CHAPITRE 4 ANALYSE DE TENDANCES DES MARÉGRAPHES CANADIENS 16

4.1 Stations marégraphiques pertinentes à une analyse à long terme 16

4.2 Villes à l'étude : Vancouver, Saint John et Churchill 19

4.3 Tendances linéaires à long terme du niveau des eaux canadiennes 23

CHAPITRE 5 ARTICLE 1: CANADA'S FUTURE VULNERABILITIES TO EXTREME SEA LEVEL VARIATIONS: TALES FROM COAST TO COAST TO COAST 31

Contribution of Authors 31

Key Points 31

Abstract 32

Plain Language Summary 32

5.1 Introduction 33

5.2 Case Studies 37

5.3 Materials and Methods 40

5.3.1 Projections of Regional Sea Level Rise 42

5.3.2 Extreme Astronomical Tide 42

5.3.3 Extreme Storm Surge 43

5.3.4 Coastal flooding and receding, and associated vulnerability analysis 44

5.4 Results 45

5.4.1 Future projections of Extreme Total Water Level 45

5.4.2 Impacts and vulnerabilities 50

5.5 Conclusions 56

Acknowledgements 58

Open Research 59

CHAPITRE 6 DISCUSSION 60

6.1 Validation des ondes de tempête 60

6.2 Ajustement des distributions d'ondes de tempête 62

CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 65

7.1 Sommaire des travaux 65

7.2 Conclusions du mémoire 66

7.3 Limites et contraintes 68

7.4 Perspectives de recherche 70

RÉFÉRENCES 73

ANNEXE 102

LISTE DES TABLEAUX

Table 5.1 Socioeconomic factors of urban communities in Vancouver, Saint John and Churchill – see Tables A.1, A.2 and A.3 in the Supplementary for the components and sources of each data. 40

Table 5.2 Projected Short- and long-term Extreme Total Water Levels (ETWLs), constituted by the Extreme Astronomical Tides (EATs) corrected by the chart datum, Extreme Storm Surges (ESSs) and Regional Sea Level Rise (RSLR), in Vancouver, Saint John, and Churrchill. Projections are provided based on CMIP5 and CMIP6 models under moderate and high radiative forcings. Note that for Churchill both rising and receding ETWLs are projected. Falling and receding scenarios are identified by ↗ and ↘ symbols, respectively. 50

Tableau 6.1 Meilleures distributions ajustées aux fonctions de répartition empiriques des résidus maximaux et minimaux pour les trois villes à l'étude, soit Vancouver, Saint John et Churchill 64

Table A.1 List of downloaded variables used in population's vulnerability assessment..... 102

Table A.2 List of downloaded variables used in public spaces' vulnerability assessment..... 103

Table A.3 List of downloaded variables used in land and infrastructure's vulnerability assessment 105

Table A.4 Projected median Extreme Total Water Level (ETWL) based on CMIP5 and CMIP6 models under moderate and high radiative forcings for short- and long-term futures based on CMIP5 and CMIP6 models under moderate and high radiative forcings in Vancouver, Saint John, and Churchill. Note that for Churchill both rising and receding ETWLs are projected. Falling and receding scenarios are identified by ↗ and ↘ symbols, respectively 106

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Répartition spatiale des 1018 stations marégraphiques du Service hydrographique du Canada 9

Figure 4.1 Répartition spatiale des stations sélectionnées pour l'analyse à long terme. Les stations de l'Ouest, de l'Est et du Nord canadien sont respectivement en vert, rose et bleu. Les stations non sélectionnées sont en gris. 17

Figure 4.2 Attributs des stations marégraphiques pour les 1018 stations du Service Hydrographique du Canada (panneaux a-d) et pour les 44 stations sélectionnées (panneaux e-h). Les quatre rangées sont divisées par la date de la première année enregistrée (a et e), la date de la dernière année enregistrée (b et f), la durée de la période disponible (c et g) et le ratio de données manquantes (d et h) des stations. 19

Figure 4.3 Analyse détaillée des hauteurs d'eau observées pour les villes de Vancouver (panneau a), de Saint John (panneau b) et de Churchill (panneau c). La première rangée informe des valeurs annuelles moyennes, la seconde rangée présente le ratio de données manquantes, alors que la troisième rangée indique à quel endroit les données sont manquantes dans l'année. La quatrième année présente les tendances mobiles de 30 ans pour ces régions. 20

Figure 4.4 Tendances linéaires de la hauteur d'eau observée par les marégraphes de Vancouver (panneau a), de Saint John (panneau b) et de Churchill (panneau c). Les sous-figures présentent les tendances paramétriques et non paramétriques pour la période d'étude de 1993 à 2022. 22

Figure 4.5 Tendances linéaires des hauteurs d'eau observées aux stations du nord du Canada ... 23

Figure 4.6 Tendances linéaires des hauteurs d'eau observées aux stations de l'ouest du Canada 24

Figure 4.7 Tendances linéaires des hauteurs d'eau observées aux stations de l'est du Canada.... 25

Figure 4.8 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête positives à Vancouver. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie. 26

Figure 4.9 Analyse de trois différents coefficients de corrélation (Pearson, Spearman et Kendall) pour les régions à l'étude, soit l'est (panneau a), le nord (panneau b) et l'ouest (panneau c) du Canada. L'ajout d'un *X* ou d'un *O* au sein d'une cellule représente une corrélation significative à 5% et 10%, respectivement. 29

Figure 5.1 Cities of Vancouver, Churchill, and Saint John in Canada and their associated tide gauges (red star). Credits for the Canadian map: Earthstar Geographics. 39

Figure 5.2 Schematic view of the utilized frameworks for estimating ETWL, based on RSLR projections, EAT and ESS values, as well as assessing the vulnerability to coastal floodings. 41

Figure 5.3 Decadal projections of the Regional Sea Level Rise (RSLR) based on CMIP5 and CMIP6 ensembles under moderate and high radiative forcing (left); possible ranges of RSLR in short- and long-term futures represented by 2030-2060 and 2070-2100, respectively (right). 46

Figure 5.4 Extraction of the 9-hour Extreme Astronomical Tide (EAT; panel a) and Extreme Storm Surge (ESS; panel b) for rising sea levels. Top row in panel (a) shows the annual hourly maximum tide data and the bottom row shows the ECDF of hourly tides in the year in which the annual extreme took place. Top row in panel (b) shows the ECDF of annual maximum storm surge from which the 50-year events are extracted. Middle row shows the year in which the 50-year hourly extreme took place and the bottom row shows the ECDF of hourly storm surge in which the annual extreme took place. The 9-hour event extremes are chosen based on 0.999 percentiles..... 49

Figure 5.5 Projections of Extreme Total Water Level (ETWL) rise in Vancouver and Saint John (top row) as well as rising and receding ETWL in Churchill (bottom row) considering CMIP5 and CMIP6 models under moderate and high radiative forcing for short-term and long-term futures. Bars are showing the projected ranges. The dashed line inside each bar shows the median projection. 51

Figure 5.6 Projected ranges of inundated/receded areas in the three considered cities based on estimated Extreme Total Water Level (ETWL) under high radiative forcing during the long-term future for CMIP5 (left) and CMIP6 (right) models. The top three rows show the scenario

of rising sea levels in Vancouver, Saint John and Churchill. The bottom row depicts the receded scenario in Churchill caused by the fall in the regional sea level. 52

Figure 5.7 Vulnerabilities in population (left column), public spaces (middle column), as well as land and infrastructure (right column) due to Extreme Total Water Level projections in (a) Vancouver, (b) Saint John and (c) Churchill under long-term futures..... 55

Figure 6.1 Analyse des conditions météorologiques à Saint John lors du mois de février 1976. Le panneau en haut offre les résidus, alors que les panneaux du milieu et du bas présentent la pression atmosphérique et les vents enregistrés aux stations climatiques avoisinantes..... 61

Figure 6.2 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête positives à Vancouver. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie. 63

Figure A.1 Spatial diversity in population variables in Vancouver, Saint John and Churchill, obtained from the 2021 Canadian census. 107

Figure A.2 Extraction of the 9-hour Extreme Astronomical Tide (EAT; panel a) and Extreme Storm Surge (ESS; panel b) for falling sea levels. Left column in panel (a) shows the annual hourly minimum of observed tide data and the right column shows the ECDF of hourly tides in the year in which the annual extreme took place. Left column in panel (b) shows the ECDF of annual minimum storm surge from which the 50-year event is extracted. Middle column shows the year in which the 50-year hourly extreme took place and the right column shows the ECDF of hourly storm surge in which the annual extreme took place. The 9-hour event extremes are chosen based on 0.001 percentiles 108

Figure A.3 Projected range of inundated/dried areas in the three considered cities based on estimated Extreme Total Water Level (ETWL) under moderate radiative forcings in the short-term future for CMIP5 (left) and CMIP6 (right) models. The top three rows show the scenario of rising sea levels in Vancouver, Saint John and Churchill. The bottom row depicts the receded scenario in Churchill caused by the drop in the regional sea level 109

Figure A.4 Projected range of inundated/dried areas in the three considered cities based on estimated Extreme Total Water Level (ETWL) under high radiative forcings in the short-term future for CMIP5 (left) and CMIP6 (right) models. The top three rows show the scenario of rising sea levels in Vancouver, Saint John and Churchill. The bottom row depicts the receded scenario in Churchill caused by the drop in the regional sea level 110

Figure A.5 Projected range of inundated/dried areas in the three considered cities based on estimated Extreme Total Water Level (ETWL) under moderate radiative forcings in the long-term future for CMIP5 (left) and CMIP6 (right) models. The top three rows show the scenario of rising sea levels in Vancouver, Saint John and Churchill. The bottom row depicts the receded scenario in Churchill caused by the drop in the regional sea level 111

Figure A.6 Vulnerabilities in population (left column), public spaces (middle column), as well as land and infrastructure (right column) due to Extreme Total Water Level projections in (a) Vancouver, (b) Saint John and (c) Churchill under short-term future 112

Figure B.1 Analyse des conditions météorologiques à Vancouver lors du mois de décembre 2006. Le panneau en haut offre les résidus, alors que les panneaux du milieu et du bas présentent la pression atmosphérique et les vents enregistrés aux stations climatiques avoisinantes..... 113

Figure B.2 Analyse des conditions météorologiques à Churchill lors du mois de septembre 1985. Le panneau en haut offre les résidus, alors que les panneaux du milieu et du bas présentent la pression atmosphérique et les vents enregistrés aux stations climatiques avoisinantes..... 114

Figure B.3 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête positives à Saint John. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie 115

Figure B.4 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête positives à Churchill. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie 116

Figure B.5 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête négatives à Vancouver. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie 117

Figure B.6 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête négatives à Saint John. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie 118

Figure B.7 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête négatives à Churchill. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie 119

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AR	Assessment report
CMIP	Coupled model intercomparison project
DEM	Digital elevation model
EAT	Extreme astronomical tide
ECDF	Empirical cumulative density function
ESRI	Environmental Systems Research Institute, Inc.
ESS	Extreme storm surge
ETWL	Extreme total water level
FACTS	Framework for assessing changes to sea-level
FRE	Fonction de répartition empirique
GCM	General circulation model
GEV	Generalized extreme value
GIA	Glacial isostatic adjustment
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIS	Geographic information system
GMSL	Global mean sea level
GPS·H	Global Positioning System Height
HNM	Hausse du niveau de la mer
IPCC	Intergovernmental panel on climate change
NETE	Niveau extrême total d’eau
RCP	Representative concentration pathway
RSLR	Regional sea level rise
SHC	Service hydrographique du Canada

SLR	Sea level rise
SSP	Shared socioeconomic pathway

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A Informations supplémentaires du CHAPITRE 5 102

ANNEXE B Informations supplémentaires du CHAPITRE 6..... 113

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Dans la communauté scientifique, les phénomènes météorologiques sont décrits par les conditions atmosphériques, notamment le vent, la pression et les précipitations spécifiques à un endroit et moment précis. Moore et al. (2010) différencient la météo par des variations horaires, journalières et saisonnières, tandis que le climat est caractérisé par l'étude des moyennes, des extrêmes ou de la variabilité des données météorologiques à long terme, soit généralement pour une période minimale de 30 ans. Les origines de ces changements climatiques peuvent être expliquées par des causes naturelles ou anthropogéniques. D'un côté, les modifications à long terme proviennent de phénomènes physiques tels que la variation de l'orbite de la Terre, les éruptions volcaniques, la variation de la radiation solaire, les oscillations atmosphériques (El Niño, par exemple) ainsi que le mouvement des plaques tectoniques (Climate Science Investigations. 2023). De façon générale, ces phénomènes provoquent un changement dans l'ensoleillement ou une augmentation de la température qui diminuent l'effet d'albédo des régions enneigées et qui accroît les gaz à effet de serre (Herring & Lindsey, 2020).

D'un autre côté, les changements climatiques sont aussi attribués à l'augmentation des gaz à effet de serre issus des activités humaines. Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) a indiqué qu'il est extrêmement probable que les activités humaines soit la principale raison du réchauffement planétaire observé depuis le milieu du 20e siècle (Stocker, 2014). Plus précisément, De Matteis (2019) explique que c'est, entre autres, la croissance économique, le rythme effréné de vie actuel et la rapide accélération démographique qui contribuent à l'intensification des gaz à effet de serre. Les répercussions sociales, économiques et environnementales des changements climatiques sont largement couvertes dans la littérature. En effet, la variation du climat est à l'origine d'une Hausse du Niveau de la Mer (HNM), d'une intensification des ondes de tempêtes et des précipitations extrêmes (Fowler et al., 2021), d'une fréquence plus élevée des vagues de chaleur et des sécheresses (Keller et al., 2021), ainsi que des incendies de forêt plus vastes et plus incontrôlables (Mansoor et al., 2022). Ces événements peuvent entrainer des conséquences sur la santé mentale et physique de la population (Rocha et al., 2022). Effectivement, les personnes ayant des enjeux respiratoires sont à risque lors d'événements

de feux de forêt (Mallongi et al., 2020), alors que ce sont les personnes âgées qui sont plus affectées par les vagues de chaleur (Campbell et al., 2018). De plus, les changements climatiques sont responsables d'un accroissement dans le nombre de personnes sous-alimentées en raison des sècheresses plus longues et plus intenses qui affectent l'approvisionnement en eau et la production agricole dans le monde (Bunyavanich, 2003). Il existe aussi une forte corrélation entre la variation du climat et la perte de la biodiversité suite à la dégradation d'habitats naturels et à la disparition d'espèces vivantes (Habibullah et al., 2022). Plus spécifiquement, la biodiversité marine, qui aide la sécurité alimentaire et la prospérité financière de plusieurs îles et villes côtières à travers le monde, est aussi fortement affectée par la hausse de la température de l'eau et l'acidification des océans (Harley et al., 2006; Worm & Lotze, 2021).

De manière plus significative, le réchauffement climatique actuel provoque une HNM. L'augmentation de la température accroit le volume de l'eau en raison, entre autres, de l'expansion thermique océanique et de la fonte des glaciers et des calottes glaciaires du Groenland et d'Antarctique qui s'ajoutent à la masse océanique (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023; Rocha et al., 2023). Church et White (2011) ont d'ailleurs confirmé une accélération significative du niveau global moyen de la mer (aussi référé par le terme anglais de *Global Mean Sea Level, GMSL*) depuis le début du 20e siècle. Plus précisément, ces scientifiques ont utilisé des altimètres satellitaires de haute qualité afin d'estimer une tendance moyenne de 3.2 ± 0.4 mm par année entre les années 1993 à 2009, ce qui est largement supérieur à la tendance à plus long terme de 1900 à 2009 qui était de 1.7 ± 0.2 mm par année. D'autres études (Frederikse et al., 2020; Oelsmann et al., 2024; Wang et al., 2021) confirment une telle accélération dans la HNM globale. Cependant, certains phénomènes locaux amplifient la HNM, la neutralisent ou la contrecarrent totalement, au point de diminuer le niveau de l'eau. Tout d'abord, le GIEC affirme qu'il existe des différences régionales du niveau de l'eau en raison des effets gravitationnels, rotationnels et de déformations de la croûte terrestre. Par exemple, la redistribution de l'eau de l'océan à un réservoir résulte en une augmentation de l'attraction gravitationnelle de ce dernier et d'un changement dans le moment d'inertie terrestre, ce qui peut causer un affaissement local de la croûte de la Terre (Hawley et al., 2020; Slangen et al., 2023). Justement, le mouvement vertical naturel de ce dernier constitue une autre raison principale des différences régionale dans la HNM (IPCC, 2022). Lorsque le sol s'élève à un rythme plus rapide que la HNM, alors la région expérimente une baisse du niveau

de l'eau relative. Au contraire, une baisse du sol accentue la HNM relative. Le mouvement vertical de la croûte terrestre est notamment affecté par les mouvements tectoniques et par l'ajustement isostatique glaciaire (ou rebond post-glaciaire) du sol qui reprend lentement sa position initiale après avoir été affaissé par la masse des glaciers de l'ère glaciaire.

1.2 Cas d'étude et problématique

Justement, l'intérêt premier de ce mémoire est d'établir un portrait complet et détaillé du changement du niveau de l'eau des côtes canadiennes. Le Canada requiert une attention particulière alors qu'il est le pays ayant le plus long littoral, soit d'environ 243 000 kilomètres (Yurick, 2010). Mercer Clarke et al. (2016) affirment que les côtes canadiennes représentent un atout essentiel pour l'économie canadienne alors qu'elles agissent comme porte d'entrée pour le commerce national et international et puisqu'elles sont le moteur économique d'importants secteurs tels que l'énergie, la foresterie, l'exploitation minière, le tourisme et les assurances. Les auteurs ajoutent que la valeur des infrastructures des ports pour petits bateaux, qui sont nécessaires aux secteurs de la pêche et du transport, est supérieure à 2 milliards de dollars. De plus, les côtes canadiennes sont aussi des endroits sacrés pour les communautés autochtones à travers le Canada qui utilisent le littoral pour leurs coutumes culturelles et spirituelles, ainsi que pour des pratiques traditionnelles telles que la pêche (Mercer Clarke et al., 2016).

Malheureusement, le Canada est lourdement affecté par la crise climatique alors que le pays et sa zone arctique dans le nord se réchauffent respectivement deux et trois fois plus rapidement que la moyenne mondiale (McKitrick, 2019; Rantanen et al., 2022). De plus, l'immensité du territoire engendre d'importantes divergences dans la variation relative régionale du niveau de l'eau. Cette variation est liée à l'amplitude et la direction du mouvement vertical de la croûte de la Terre présentées dans l'analyse de Robin et al. (2020). On y voit clairement que le pays subit un fort effet de soulèvement à l'ouest, au nord et à l'est de la baie d'Hudson. La forte amplitude de la poussée verticale occasionne le retrait de l'eau dans cette région. Au contraire, les Maritimes se trouvent dans une région où la croûte terrestre s'affaisse, ce qui augmente l'amplitude de la HNM dans l'est du Canada. Finalement, la côte Pacifique se trouve directement sur la ligne de soulèvement nul, ce qui peut varier considérablement le changement relatif régional du niveau de l'eau.

En bref, cette variation régionale du niveau de l'eau est hétérogène sur l'ensemble du vaste territoire canadien. Les tendances divergentes des trois régions sont fréquemment discutées, mais n'incluent pas les données les plus récentes du niveau de l'eau des stations marégraphiques canadiennes. D'un côté, certaines régions expérimentent de fortes HNM qui augmentent la fréquence, la durée et l'amplitude des inondations côtières. Celles-ci ont de lourdes conséquences financières pour les résidents canadiens. Elles modifient aussi la constitution végétale des berges, ce qui intensifie l'érosion des sols. De l'autre côté, la diminution locale du niveau de l'eau entraine des dangers de navigation pour les bateaux en périphérie de certaines villes canadiennes. Ceci provoque d'ailleurs des répercussions majeures sur l'approvisionnement en biens et en nourriture dans certaines communautés vulnérables qui dépendent d'échanges maritimes.

Certaines villes côtières canadiennes se sont alors munies de plans stratégiques pour être plus résilientes face à la variation du niveau de l'eau. Ces plans sont basés sur les études du dernier projet d'intercomparaison des modèles couplés (présent dans la littérature sous le nom anglais de *Coupled Model Intercomparison Project*, CMIP) du GIEC disponible au moment de leur rédaction, soit la cinquième version CMIP5. Récemment, de nouveaux modèles climatiques ont été publiés dans le sixième rapport du GIEC, mettant en vedette le projet CMIP6. Ce dernier offre des projections à la fine pointe de la technologie, mais n'a pas été encore comparé concernant les résultats de la variation régionale du niveau de l'eau. De plus, il n'y a pas d'études qui dressent une analyse comparative entre les projets CMIP5 et CMIP6 concernant l'estimation de futurs Niveaux Extrêmes Totaux d'Eau (NETEs), de la délimitation des aires qui pourraient être inondées par ces niveaux ainsi que de l'analyse de la vulnérabilité de la région et de sa population face à de tels scénarios. Cela empêche les villes d'avoir un portrait complet et détaillé des différences entre les deux projets, les laissant dans le doute à propos de si elles devraient, ou non, réadapter leurs plans et leurs infrastructures selon les plus récentes connaissances. Les sections qui suivent présentent une vue d'ensemble de la HNM au niveau local, national et international.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre se concentre sur la revue de la littérature des modèles climatiques projetant la HNM et sur les études de l'estimation des futurs niveaux extrêmes totaux d'eau des marégraphes canadiens.

2.1 Modèles de circulation générale

Alors que les changements climatiques représentent une importante menace pour la société, la communauté scientifique a introduit les modèles de circulation générale (connus de leur nom anglais *General Circulation Models*, GCMs) dans le but de mieux comprendre les impacts qu'ont les gaz à effet de serre et les aérosols sur le climat de la Terre. Mechoso et Arakawa (2015) expliquent que ces modèles sont apparus suite au rapide développement des théories sur la conservation de la masse et de l'énergie, la thermodynamique et la dynamique des fluides qui encadrent les connaissances sur les mouvements océaniques et atmosphériques à grande échelle. L'élaboration des premières versions des GCMs a permis le début de l'évaluation d'impacts du climat. L'engouement à ces modèles a ensuite mené au perfectionnement des processus internes mettant en relation les différents systèmes climatiques à l'échelle planétaire et à l'amélioration de la résolution offerte. De nos jours, les modèles incluent des hypothèses simplificatrices en raison de la complexité de certains phénomènes naturels et de la puissance calculatoire insuffisante des ordinateurs pour simuler les processus internes sur la Terre (World Climate Research Programme, 2024). Ainsi, le CMIP réunit plusieurs modèles afin de comparer ses résultats et d'avoir une meilleure compréhension de la variation climatique vécue dans le passé, observée présentement et projetée dans le futur (Meehl et al., 2000). Le GIEC utilise maintenant les CMIPs au sein de la structure même de ses analyses. Plus précisément, le GIEC prépare des rapports d'évaluation (ou *Assessment Report*, AR, en anglais) portant sur les connaissances à l'avant-garde de la technologie des changements climatiques, leurs causes, leurs impacts ainsi que certaines solutions envisageables (IPCC, 2024). Les rapports 5 et 6 du GIEC publiés en 2013 et 2021 sont en référence à la cinquième et la sixième phase du CMIP (dont les titres abrégés sont CMIP5 et CMIP6) et sont détaillés dans les sections 2.1.1 et 2.1.2 suivantes.

2.1.1 Modèles climatiques – CMIP5

La cinquième phase de CMIP rassemble le travail de 2008 à 2013 de 40 GCMs (Hemanandhini & Vignesh Rajkuma, 2023) qui génèrent des simulations dans la variabilité du climat et qui offrent différents scénarios de changements climatiques. Cette analyse multimodèle se concentre sur les mécanismes responsables de différences entre des boucles de rétroaction du cycle du carbone, sur la prévisibilité du climat ainsi que sur l'étude de l'origine des divergences entre certains modèles qui possèdent les mêmes paramètres initiaux (Taylor et al., 2012). CMIP5 a aussi introduit les *Representative Concentration Pathways* (RCPs) qui sont de futurs scénarios décrivant comment les changements socioéconomiques technologiques, l'utilisation du territoire, l'énergie et les émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre pourraient évoluer pendant le 21e siècle (van Vuuren et al., 2011). Les scénarios se différencient selon les forçages radiatifs correspondant au réchauffement par unité de surface de la Terre entre les niveaux préindustriels et ceux de la fin du siècle (Crévolin et al., 2023). Quatre scénarios sont possibles. Le premier, RCP 2.6, est le plus optimiste et présente un sommet de forçage radiatif de 3.0 Wm^{-2} en 2050 qui redescend ensuite à 2.6 Wm^{-2}. Puis, van Vuuren et al. (2011) présente les RCPs 4.5 et 6.0 définis par des progressions constantes, alors que le RCP 8.5 présente une accélération marquée au sein de son évolution.

2.1.2 Modèles climatiques – CMIP6

Dès la publication de CMIP5 en 2013, les scientifiques se sont concentrés sur l'élaboration de nouvelles projections climatiques. Alors que le sixième rapport d'évaluation (AR6) du GIEC a paru en 2021, l'introduction des premiers résultats de CMIP6 s'est étalée de 2019 à 2022. Cette dernière version du projet d'intercomparaison de modèles couplés met à jour les projections selon 55 GCMs à la fine pointe de la technologie (Iqbal et al., 2021). CMIP6 introduit aussi les *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), bâtis en parallèle avec le RCPs afin de mieux représenter, entre autres, les différences politiques, les projets de loi, l'accès aux ressources et l'utilisation des énergies fossiles (Bourdeau-Goulet, 2020). Ceux-ci offrent cinq trajectoires présentant différents enjeux socioéconomiques impliquant des solutions d'adaptation et d'atténuation des changements climatiques (Riahi et al., 2016). Les cinq cheminements sont reconnus selon les défis à surmonter. En premier lieu, SSP1 symbolise un degré faible d'obstacles suivant le scénario de la durabilité

(Riahi et al., 2017). Puis, les auteurs précisent que le scénario *mi-chemin* de SSP2 correspond à une problématique intermédiaire, alors que le troisième scénario représente la possibilité de rivalité régionale d'un scénario à lourdes conséquences. De plus, il existe deux trajectoires, soit SSP4 et SSP5, qui incarnent des scénarios dont les mesures d'ajustement et d'adoucissement sont déséquilibrées. D'un côté, le SSP4 est un scénario où l'inégalité est expliquée par de fortes mesures d'atténuation des changements climatiques, sans utiliser de mesures d'adaptation. À l'inverse, le SSP5 constitue un cas de figure pour le développement des énergies fossiles. Ainsi, les RCPs et les SSPs peuvent être combinés afin d'étudier des scénarios selon le futur forçage radiatif et selon les décisions socioéconomiques des différents paliers gouvernementaux. Par exemple, l'outil de projection du niveau de la mer établi par le *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) et le GIEC est nommé le *Sea Level Projection Tool*[1]. Il permet aux utilisateurs de consulter une carte interactive globale mettant en relation la variation locale du niveau de la mer selon différents scénarios climatiques ou selon différents futurs niveaux du réchauffement planétaire. Il est d'ailleurs possible d'obtenir gratuitement les projections des combinaisons de scénarios SSP 1-1.9, SSP 1-2.6, SSP 2-4.5, SSP 3-7.0 et SSP 5-8.5 depuis l'ensemble de données de Garner et al. (2021).

2.1.3 Comparaison entre les modèles climatiques CMIP5 et CMIP6

Cette sous-section aborde la comparaison entre les modèles climatiques CMIP5 et CMIP6. Lorsqu'un nouveau projet est instauré, il est de bonne pratique d'effectuer une revue et une comparaison avec l'ancienne version. Alors, les différences permettent de cibler quelles seraient les angles morts des anciennes études. Dans le domaine de la HNM, cette comparaison aiderait les paliers gouvernementaux, qui ont déjà pris des décisions en fonction des résultats de CMIP5, à identifier des mesures correctrices nécessaires pour mettre à jour les stratégies d'adaptation. De manière générale, CMIP6 est plus outillé pour reproduire des processus physiques plus représentatifs de la réalité, et ce, avec une résolution spatiale plus élevée (Hausfather, 2019).

De nombreuses études ont dévoilé qu'il n'y a pas une grande différence entre la cinquième et sixième phase de CMIP concernant l'estimation de la HNM globale. Plus en détail, les

[1] https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool

améliorations de CMIP6 ne provoquent que de modestes différences dans la plage probable (17e au 83e centile) des projections à la fin du siècle sous des forçages radiatifs faibles (CMIP5 : 0.25 à 0.58 m; CMIP6 : 0.33 à 0.62 m) et sous des forçages élevés (CMIP5 : 0.49 à 0.95 m; CMIP6 : 0.63 à 1.01 m) (Bush et al., 2022; Slangen et al., 2023). Sinon, il peut être intéressant de confirmer ces valeurs en comparant directement quelques processus physiques causant la HNM. Hermans et al. (2021) précisent que l'un de ces processus, soit l'expansion thermique, ne possède pas de projections moyennes plus élevées, ou plus basses, sous CMIP6. Sinon, d'autres études expliquent que les estimations de la fonte de la calotte polaire du Groenland par CMIP6 conduisent à des niveaux d'eau plus importants que ceux de CMIP5 pour 2100 (Hofer et al., 2020), alors que les divergences sont très minimes dans le cas de la fonte de la calotte polaire de l'Antarctique (Payne et al., 2021). Ainsi, l'un de nos objectifs est d'élucider si les projections à l'échelle locale sont bel et bien divergentes au Canada, pour ensuite quantifier l'impact de ces différences sur la délimitation des régions qui seront possiblement inondées si les eaux atteignent des niveaux extrêmes.

2.2 Niveau de l'eau des marégraphes canadiens

Cette section dresse une revue du portrait actuel des marégraphes canadiens et des défis les entourant. Aussi, deux études majeures dans l'estimation du NETE sont expliquées dans la sous-section 2.2.2. Ensuite, la section 2.2.3 décrit quelques études estimant des aires inondées suivant la HNM au Canada et évaluant la vulnérabilité associée à ces inondations côtières.

2.2.1 Marégraphes canadiens

Au Canada, les données du niveau de l'eau sont accessibles gratuitement depuis les *Archives canadiennes des données sur les marées et niveaux d'eau* (Government of Canada, 2022). Plus précisément, les marégraphes canadiens sont régis par le Service Hydrographique du Canada (SHC) qui utilise les mouvements verticaux des marées afin de prédire les niveaux d'eau de plus de mille stations. Près de 800 stations marégraphiques se situent dans des zones où les marées sont non-négligeables et possèdent, dans certains cas, une plage de données pouvant remonter jusqu'à 1948 (Government of Canada, 2022). Dépendamment du site, le SHC utilise deux types d'outils

afin d'enregistrer le niveau d'eau : des limnimètres numériques qui prennent une mesure chaque quinze minutes ou des limnimètres analogiques qui tracent en continu la hauteur d'eau pour ensuite numéraliser le résultat en données horaires. Lors de la récolte des données historiques des niveaux d'eau à l'été 2023, le SHC comptait 1018 stations distribuées uniformément à travers le Canada. La Figure 2.1 présente toutes les stations à l'étude dans ce mémoire. En regardant la répartition spatiale de celles-ci, il serait possible de conclure, à tort, que le Canada est bien représenté sur l'ensemble de ses côtes. Or, la durée moyenne de la plage d'observation n'est que de 6 ans et seulement 60 des 1018 stations ont une période s'échelonnant sur plus de 50 ans (Government of Canada, 2022). Une analyse plus approfondie du nombre et de la répartition spatiale des stations pertinentes est effectuée au chapitre 4.

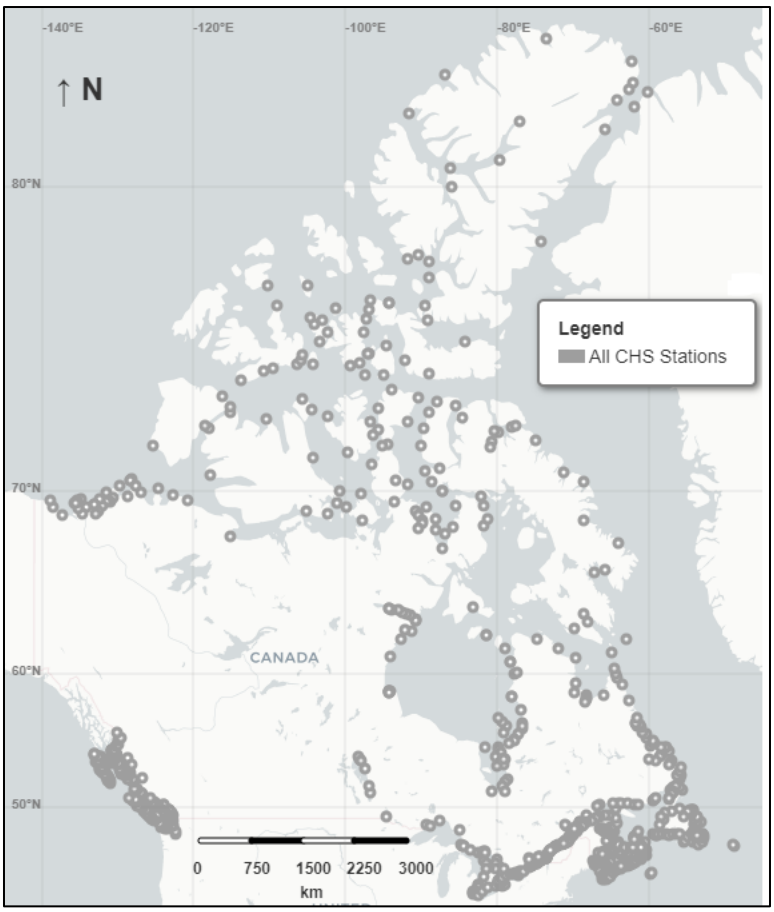

Figure 2.1 Répartition spatiale des 1018 stations marégraphiques du Service hydrographique du Canada

2.2.2 Estimation du niveau extrême total de l'eau au Canada

De 2013 à 2017, le Canada a totalisé des pertes économiques de 16.4 milliards de dollars reliées à des catastrophes naturelles (Canada's Task Force on Flood Insurance and Relocation, 2022). Les impacts économiques sont généralement plus importants lorsque les catastrophes naturelles touchent des régions côtières (Bernier et al., 2024), et ce, puisque la population et les infrastructures sont plus denses le long des côtes, mais aussi en raison de la dépendance des villes côtières aux industries telles le transport maritime, la pêche et le tourisme. La HNM vulnérabilise les côtes canadiennes, forçant ainsi les compagnies d'assurances et les municipalités à introduire des barèmes pour encadrer la présence d'infrastructures sur les côtes. Il est alors impératif d'avoir une connaissance locale des niveaux extrêmes pouvant être atteints sur l'ensemble du littoral canadien. Une méthode fréquemment utilisée dans la littérature pour définir les NETEs peut être résumée par la sommation des différentes composantes d'une colonne d'eau lors d'une tempête, soit l'onde de tempête produite par la dépression atmosphérique et les vents violents, l'effet de la marée et la variation relative régionale du niveau de la mer obtenue depuis les projections des projets CMIPs.

Au Canada, quelques études sont récemment utilisées en référence aux projections du niveau de l'eau des côtes canadiennes. Tout d'abord, James et al. (2014) est un ouvrage central qui traite de la variation relative régionale des niveaux d'eau sur l'ensemble du territoire canadien selon les projections de CMIP5. Pour ce faire, l'étude utilise les mesures du système de positionnement global ainsi que les modèles de *ICE-5G* de Peltier (2004) et du *Australian National University* de Lambeck et al. (1998) afin de prendre en compte les déplacements verticaux de la croûte terrestre. L'étude inclut différents RCPs, afin de mettre en lumière la variation relative régionale de certaines villes canadiennes en 2100. Les auteurs enrichissent leur étude d'un scénario critique qui ajoute 65 cm de HNM afin de prendre en considération un possible effondrement de la partie ouest de la calotte polaire d'Antarctique. Récemment, James et al. (2021) ont mis à jour leur étude en générant de nouvelles projections qui incorporent les champs de soulèvements terrestres du nouveau modèle national *NAD83v70G* (Robin et al., 2020). Il est mentionné dans le rapport de Zhai et al. (2023) qu'une nouvelle mise à jour sera présentée sous peu, cette fois avec les données de CMIP6.

Justement, cette dernière étude de Zhai et al. (2023) utilise les projections de CMIP6 de la HNM afin de décrire la hauteur qu'une infrastructure doit être surélevée afin de conserver la même fréquence d'inondations. Ces hauteurs, ainsi que les valeurs de moyennes du niveau de l'eau des projets CMIP5 et CMIP6 sont disponibles en ligne. En effet, les données de plusieurs ports pour petits bateaux (s*mall craft harbours*) sont représentées dans le site web de *Canadian Extreme Water Level Adaptation Tool*[2] organisé par l'institut océanographique de Bedford en Nouvelle-Écosse. Cependant, bien que l'outil offre une meilleure connaissance de la distance verticale nécessaire aux infrastructures pour s'adapter à la HNM, il n'offre qu'une seule valeur générale pour les infrastructures au sein d'une ville. En effet, l'outil ne distingue pas les infrastructures par leur élévation et leur proximité avec le littoral. Plus précisément, une infrastructure étant surélevée préalablement devrait avoir moins à s'adapter, verticalement, qu'une infrastructure plus près du niveau moyen de l'eau. Ainsi, il serait pertinent d'ajouter des cartes régionales qui permettraient de savoir quelles parties d'une ville seraient plus affectées par un NETE.

2.2.3 Cartes des régions à risque et évaluation de la vulnérabilité

L'amplitude d'une inondation côtière est fréquemment estimée avec la méthode du *Bathtub*, soit la technique la plus utilisée dans les approches basées sur les informations géographiques (DiPaola et al., 2024; Irani et al., 2024; McGrath et al., 2018; Seenath et al., 2016; Williams & Lück-Vogel, 2020). Sinon, la modélisation hydrodynamique numérique caractérise aussi l'étendue des inondations et est plus souvent employée dans la gestion de risque des villes côtières (Darlington et al., 2024; Didier et al., 2019b; Lopes et al., 2022). La littérature dresse aussi une liste de quatre méthodologies qui sont utilisées à l'échelle planétaire afin d'évaluer la fragilité de la côte. Celles-ci sont définies par l'utilisation des modèles informatiques dynamiques, des systèmes d'aide à la décision basés sur les informations géographiques, d'indicateurs ou d'une technique d'indexation (Kantamaneni, 2016; Ramieri et al., 2011).

Seulement quelques études ont établi un portrait national de la vulnérabilité côtière. Parmi elles, Chakraborty et al. (2020, 2023) identifient la vulnérabilité sociale et économique basée sur 49

[2] https://gisp.dfo-mpo.gc.ca/portal/apps/experiencebuilder/experience/?id=760c4e0033ef4023ba395127a406d3a7

variables préétablies pour l'ensemble du Canada et, plus précisément, sur les communautés des peuples des Premières Nations (Chakraborty et al., 2021). Alors que certaines études suggèrent fortement que les scientifiques devraient rencontrer les personnes décidant des lois municipales près des côtes dans l'optique d'avoir une meilleure compréhension du contexte local (Howard & Sherren, 2023; Oulahen et al., 2015), aucune étude contrastant le nombre total de l'aire affectée par un futur NETE des projets CMIP5 et CMIP6 n'a été répertoriée au Canada. Une telle analyse devrait être conduite afin d'avoir une connaissance améliorée des répercussions des différents GCMs sur les groupes vulnérables. Dans ce mémoire, ces groupes comprennent les personnes âgées, les minorités visibles, les communautés autochtones et les résidents ayant un revenu faible. Puis, Schinko et al. (2020) expliquent qu'une forte adaptation et une gestion préventive du risque des catastrophes reliées à la HNM devraient être mises en place puisqu'elles pourraient réduire les inondations côtières par un facteur de 10. Effectivement, les stratégies d'adaptation et d'atténuation des côtes diminuent la possibilité d'inondations côtières et préparent les communautés qui en sont menacées. Cependant, les auteurs ajoutent qu'en général les impacts économiques des mesures de protection sont seulement calculés selon les bénéfices qu'elles produisent, sans prendre en considération l'ensemble des conséquences qu'elles provoquent.

CHAPITRE 3 ORGANISATION DU TRAVAIL DE RECHERCHE

Les côtes canadiennes représentent aussi des pôles de développement socioéconomiques dont les ports permettent aux villes côtières l'importation et l'exportation de biens, favorisant le développement du commerce national et international. Il est aussi important de souligner que les eaux canadiennes sont essentielles au sein des communautés autochtones grâce au maintien de pratiques traditionnelles, telles que la pêche, et au respect de coutumes culturelles et spirituelles. Le réchauffement planétaire contribue à la modification du niveau de l'eau longeant les côtes canadiennes, ce qui nuit à la résilience des villes face à un climat changeant.

Les CMIPs, composés des modèles GCMs, prédisent la modification de la future hauteur de l'eau régionale selon différents forçages radiatifs. Plusieurs municipalités canadiennes se sont intéressées aux CMIPs alors que CMIP6 n'était pas encore disponible, utilisant donc les estimations de CMIP5 pour créer leur stratégie d'adaptation. Il existe un manque dans la littérature concernant la comparaison des estimations de la HNM à l'échelle locale provenant de ces deux projets. De plus, il n'y a pas d'étude qui se concentre sur la différence dans l'estimation d'étendues inondées selon les projets CMIP5/6. La comparaison de la quantification de la vulnérabilité socioéconomique entre les projections des deux modèles climatiques est aussi mise de côté dans la littérature. Ce manque laisse donc les villes dans le doute à savoir si elles devraient mettre à jour, ou non, leurs planifications et leurs stratégies de résilience côtière selon les nouvelles projections de CMIP6.

Ainsi, l'ensemble de ce mémoire se divise en trois objectifs principaux, qui permettront d'avoir une meilleure connaissance locale de l'évolution du niveau de l'eau au Canada.

1) Évaluer les tendances du niveau de l'eau à travers le Canada pendant la période historique.
2) Pour trois villes côtières, soit Vancouver en Colombie-Britannique, Saint John au Nouveau-Brunswick et Churchill au Manitoba, estimer les NETEs selon des projections à court et à long terme provenant des projets CMIP5 et CMIP6; et
3) Comparer l'étendue des inondations côtières et la vulnérabilité socioéconomique associées aux estimations des futurs NETEs obtenues par les phases 5 et 6 des CMIPs dans ces villes.

Tout d'abord, le chapitre 4 aborde le premier sous-objectif de recherche. Il témoigne du manque de données sur le territoire canadien. Les tendances du niveau de l'eau y sont étudiées pour les stations qui offrent un nombre suffisant de données. Plus précisément, les tendances linéaires paramétriques et non paramétriques sont établies pour ces stations durant la période de 1993 à 2022. Des tests utilisant la p_{value} précisent si les tendances sont statistiquement significatives ou non. Leur répartition spatiale est présentée afin de mieux saisir le problème d'hétérogénéité sur le vaste territoire canadien. Parmi ces stations, trois d'entre elles sont étudiées plus en détail, soit les marégraphes des villes de Vancouver, Saint John et Churchill. Ces trois villes côtières représentent, dans ce mémoire, les trois côtes canadiennes longeant l'océan Pacifique, Atlantique et Arctique. Ces villes sont d'ailleurs au cœur de l'analyse du chapitre 5.

Le chapitre 5 introduit l'article soumis le 30 septembre 2024 au journal *Earth's Future* ayant un facteur d'impact de 7.3. L'article répond aux objectifs 2 et 3 du mémoire, soit d'estimer les NETEs selon quelques scénarios, de délimiter les étendues des inondations côtières leur étant reliées et d'évaluer la vulnérabilité côtière des trois villes à l'étude. Tout d'abord, les futurs NETEs sont obtenus par la combinaison de trois éléments, soit l'augmentation régionale du niveau de l'eau, la marée astronomique ainsi que l'effet des ondes de tempête. D'un côté, les valeurs extrêmes estimées proviennent de l'analyse fréquentielle horaire des marées astronomiques et des ondes de tempête. D'un autre côté, les valeurs futures pour 2100 proviennent des scénarios ayant des forçages radiatifs modérés ou élevés. L'étude de l'article compare donc les projets CMIP5 avec le projet CMIP6 qui inclut des développements socioéconomiques dans ses projections. La période à court terme s'étend de 2030 à 2060, alors que la période à long terme s'étale de 2070 à 2100. Puis, les étendues inondées ou asséchées sont estimées avec la méthode du *Bathtub* en insérant les potentiels futurs NETEs. Ensuite, une analyse de vulnérabilité socioéconomique est entretenue pour les régions qui seraient touchées par de telles inondations côtières, les deux projets CMIP5 et CMIP6, les deux scénarios de forçage radiatif et les deux périodes futures.

Puis, le chapitre 6 ajoute une discussion générale qui revient sur quelques éléments importants abordés au travers de ce mémoire et fournit une validation de la synchronicité entre les résidus (les ondes de tempête) et les anomalies dans les conditions météorologiques locales. De plus, la

discussion présente une brève analyse de la distribution la mieux ajustée à la Fonction de Répartition Empirique (FRE) des résidus annuels maximaux provenant de l'analyse des ondes de tempête négatives et positives pour les trois villes à l'étude. Finalement, les limitations rencontrées ainsi que de futures avenues de recherche sont discutées dans la conclusion du chapitre 7.

CHAPITRE 4 ANALYSE DE TENDANCES DES MARÉGRAPHES CANADIENS

4.1 Stations marégraphiques pertinentes à une analyse à long terme

Tel que mentionné dans la revue de la littérature, la Figure 2.1 présente l'ensemble des 1018 stations marégraphiques sur le territoire canadien. Cependant, plusieurs d'entre elles ne peuvent être utilisées dans une étude scientifique. Afin d'assurer la crédibilité des données, les analyses sur le climat doivent s'établir, par définition, sur une période minimale de trente années (Thompson et al, 2009). Cette section met donc en surbrillance les étapes qui ont permis d'établir les stations qui sont utilisables pour une analyse à long terme.

Les données horaires de la hauteur du niveau des eaux des 1018 stations ont été obtenues pour une période s'étalant de janvier 1900 à mai 2023, soit la date que le téléchargement a été effectué. Les données ont alors été soumises à une série de quatre critères. Tout d'abord, une station doit avoir obligatoirement une plage minimum de 30 années pour pouvoir être sélectionnée. En revanche, il se peut que certaines années dans la période soient jugées inutilisables si elles comprennent plus de 25% de données manquantes. Puis, si trois années consécutives ne suffisent pas à ce dernier critère, la station est retirée. Finalement, une station marégraphique ne doit pas avoir plus de 50% de données manquantes au sein de la période d'étude afin d'être sélectionnée.

En plus de ces quatre critères, il est impératif que la période de 30 ans soit suffisamment récente pour informer de la situation actuelle du Canada. Ainsi, les périodes entre 1990-2019 et 1994-2023 ont été examinées dans le but de déterminer la période optimale afin d'inclure le plus de stations. C'est finalement la période d'étude de 1993 à 2022 qui a été choisie. Au total, seulement 40 stations respectent les critères de sélection. La Figure 4.1 reprend la répartition spatiale des stations marégraphiques de la Figure 2.1 en précisant la localisation des stations sélectionnées pour l'analyse à long terme. Ces stations sont divisées selon leur localisation. Les 13 stations de l'ouest sont représentées par les marégraphes dans la province de la Colombie-Britannique, alors que les 26 stations de l'est incluent l'Île-du-Prince-Édouard, la Nouvelle-Écosse, le Nouveau-Brunswick, le Québec ainsi que Terre-Neuve-et-Labrador. La ville de Churchill au Manitoba est la seule station

nordique qui respecte les critères établis, ce qui ne permet pas de bien représenter spatialement le nord du Canada. Afin de remédier à ce manque de données, les critères de sélection ont été modifiés pour les stations des trois territoires canadiens (les Territoires du Nord-Ouest, le Yukon et le Nunavut); des côtes de la Baie d'Hudson; du nord du Québec (Nunavik) ainsi que de la portion de Terre-Neuve-et-Labrador qui y est collée. Plus précisément, un simple filtre du nombre de données horaires (supérieur à 1000) est appliqué sur les 279 stations nordiques, puis un tri manuel a été effectué pour obtenir un total de cinq stations représentant l'ensemble du Nord canadien.

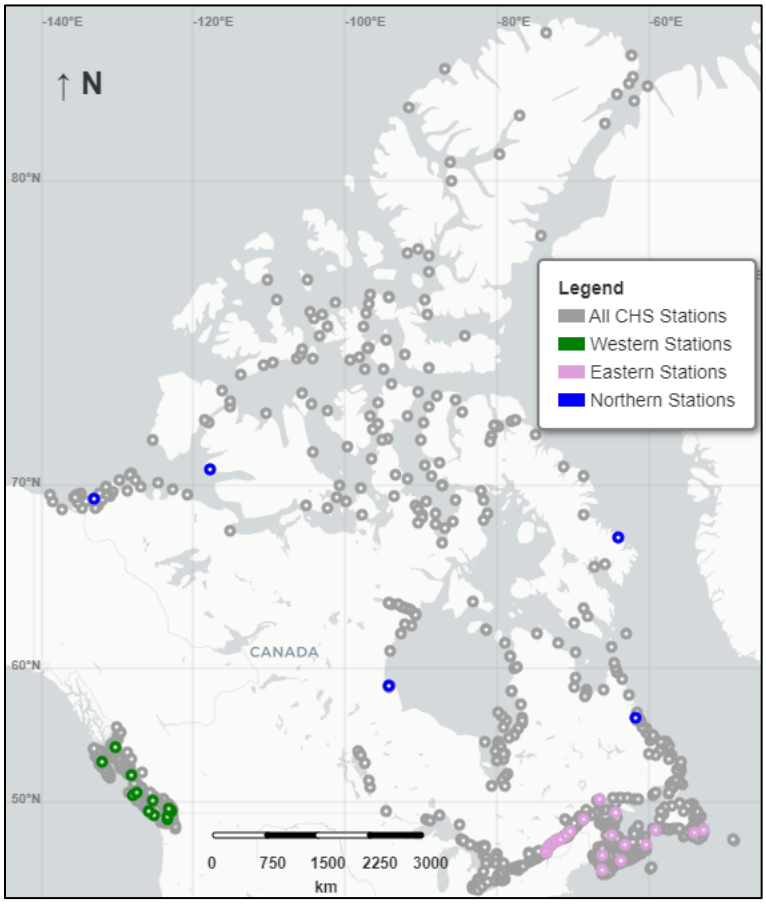

Figure 4.1 Répartition spatiale des stations sélectionnées pour l'analyse à long terme. Les stations de l'Ouest, de l'Est et du Nord canadien sont respectivement en vert, rose et bleu. Les stations non sélectionnées sont en gris.

La Figure 4.2, quant à elle, compare différents attributs entre l'ensemble des stations marégraphiques et les stations sélectionnées. Les sous-figures (a) et (e) présentent l'année de départ de l'enregistrement des stations. Une quantité importante de stations ont été installées au Canada

entre les années 1960 et 1990 et le SHC continue d'instaurer de nouveaux marégraphes de nos jours. Cependant, la sous-figure (b) indique qu'une grande quantité de ces stations n'enregistrent plus depuis bien avant les années 2000, expliquant alors la très forte quantité de marégraphes ayant moins de 20 ans de données disponibles. Les sous-figures (f) et (g) témoignent du bon respect des critères encadrant la longueur de la période d'étude et le nombre minimal d'années. Les quelques stations qui se trouvent sous la barre des 30 ans font référence aux marégraphes nordiques qui ont été soumis à des critères différents. Finalement, les sous-figures (d) et (h) de la dernière rangée présentent des histogrammes similaires ayant une large proportion (environ 60%) de marégraphes qui ne possèdent pas, ou très peu de données manquantes sur l'ensemble de leur période d'enregistrement. La sous-figure de gauche, cependant, indique qu'environ 10% des 1018 stations ont près de 100% de données manquantes. Ceci est une information importante qui témoigne du manque de constance dans les séries de données de la hauteur du niveau de l'eau des marégraphes canadiens, limitant ainsi l'analyse de la HNM au Canada.

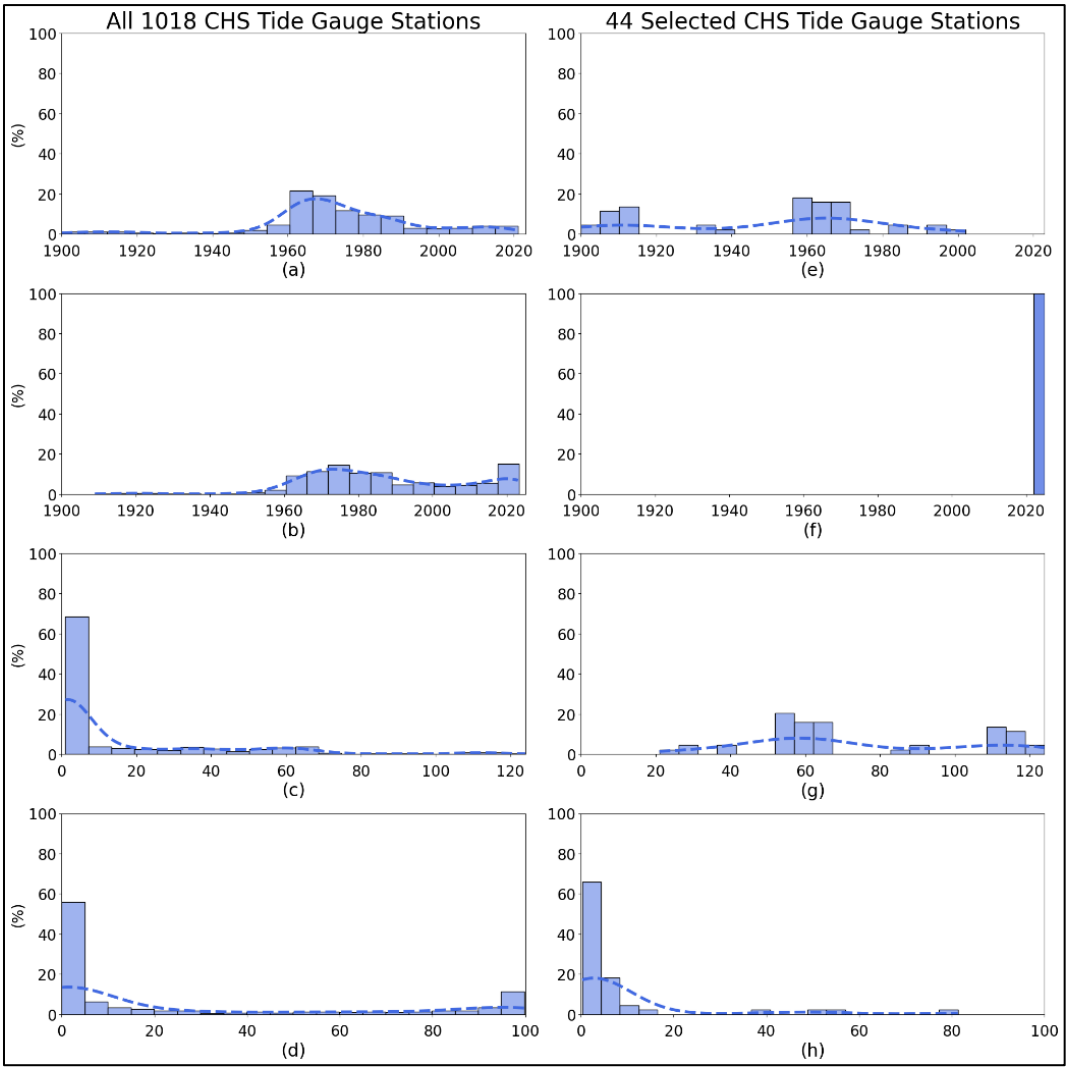

Figure 4.2 Attributs des stations marégraphiques pour les 1018 stations du Service Hydrographique du Canada (panneaux a-d) et pour les 44 stations sélectionnées (panneaux e-h). Les quatre rangées sont divisées par la date de la première année enregistrée (a et e), la date de la dernière année enregistrée (b et f), la durée de la période disponible (c et g) et le ratio de données manquantes (d et h) des stations.

4.2 Villes à l'étude : Vancouver, Saint John et Churchill

Dans cette section, trois des 44 villes sont stratégiquement sélectionnées afin d'établir un portrait représentatif de la situation pour les trois côtes canadiennes. Les villes ont été choisies pour leur emplacement, pour la facilité et la quantité du téléchargement de leurs données marégraphiques, topographiques et démographiques, ainsi que pour leur importance locale et nationale dans le

transport maritime. Ainsi, les villes de Vancouver, Saint John et Churchill représentent respectivement l'ouest, l'est et le nord du Canada. La Figure 4.3 fournit une meilleure compréhension des données disponibles pour ces trois villes. La première rangée offre les valeurs annuelles moyennes de la hauteur de l'eau. Les points manquants symbolisent que la station marégraphique n'a enregistré aucune valeur au cours de cette année-là et sont aussi représentés par une ligne en rouge dans les deux rangées suivantes. Plus précisément, la deuxième présente le pourcentage de données manquantes pour chaque année, alors que la troisième rangée renseigne sur le moment de l'année que les données manquent. D'une part, les trois premières rangées s'échelonnent sur toute la période que la station marégraphique a enregistré les hauteurs d'eau. D'autre part, la quatrième rangée se concentre seulement sur la période offrant des valeurs annuelles moyennes continues, et ce, afin de présenter l'évolution de la tendance mobile de 30 ans.

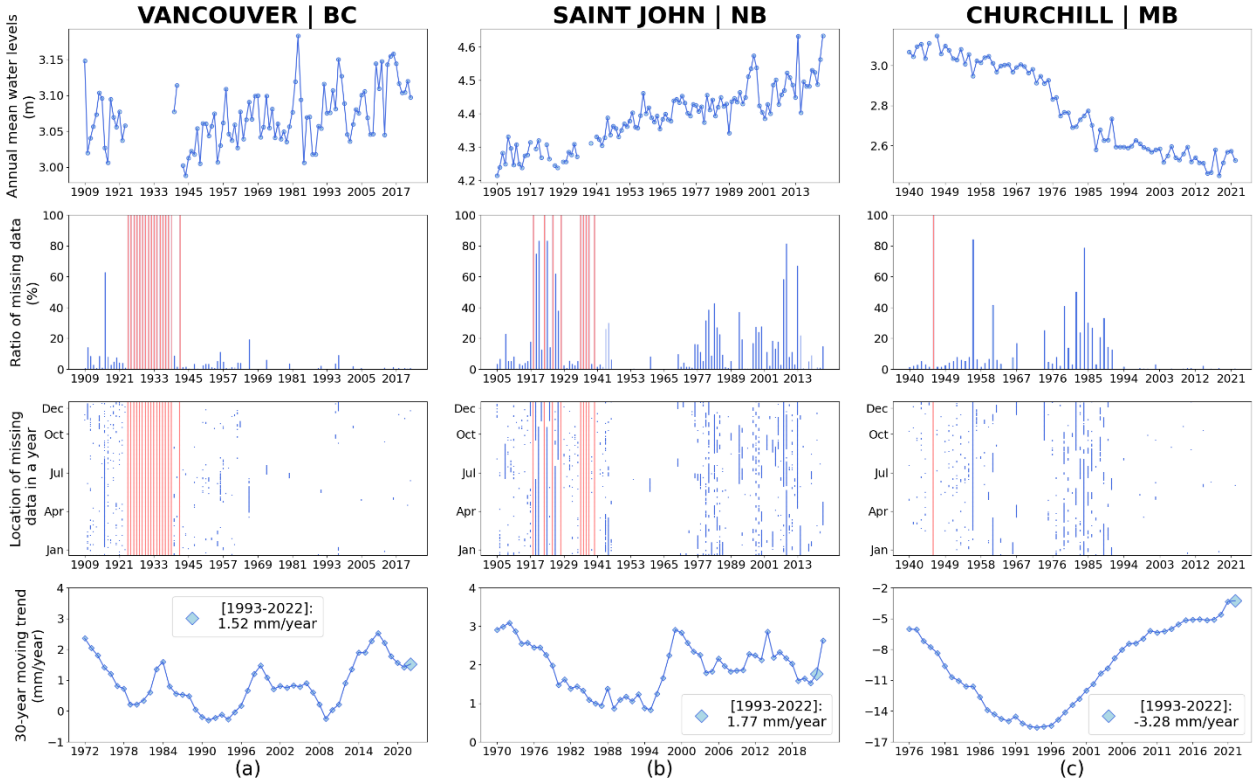

Figure 4.3 Analyse détaillée des hauteurs d'eau observées pour les villes de Vancouver (panneau a), de Saint John (panneau b) et de Churchill (panneau c). La première rangée informe des valeurs annuelles moyennes, la seconde rangée présente le ratio de données manquantes, alors que la troisième rangée indique à quel endroit les données sont manquantes dans l'année. La quatrième année présente les tendances mobiles de 30 ans pour ces régions.

La figure ci-dessus est utilisée afin d'avoir une meilleure compréhension des données horaires disponibles pour les villes étudiées. En premier lieu, la rangée du haut permet de positionner sur une échelle verticale le minimum, le maximum et l'amplitude des valeurs annuelles moyennes. Aussi, il est possible de discerner une tendance en prenant compte toute la période d'enregistrement. Vancouver et Saint John ont généralement des valeurs annuelles moyennes plus élevées de nos jours en comparaison avec leur première année d'enregistrement, soit respectivement 1909 et 1905. La ville de Churchill, quant à elle, présente clairement des valeurs inférieures après les années 2000 en comparaison avec 1940. Puis, la deuxième et la troisième rangée exposent le manque de données horaires au sein d'une année. Alors que la prise de données à Vancouver est assez constante depuis 1941 et que celle de Churchill se fait aussi bien depuis le début des années 90, Saint John connait des ennuis majeurs avec la prise de ses données horaires. La figure permet donc de prendre conscience des stations qui sont en difficulté. Dans le cadre de cette étude, Saint John demeure une station sélectionnée, puisqu'elle respecte tous les critères énoncés à la section 4.1. Finalement, la dernière rangée informe de la tendance mobile de 30 ans pour les trois stations à l'étude. Il est pertinent de noter le signe et l'amplitude de ces tendances mobiles. Les villes de Vancouver et Saint John connaissent des tendances mobiles positives, ce qui insinue qu'au fil des années, les tendances étaient toujours à la hausse. Pour la période d'étude de 1993 à 2022, la tendance était de 1.52 et 1.77 mm par année à Vancouver et à Saint John, respectivement. Au contraire, les hauteurs d'eau annuelles moyennes de Churchill sont négatives et ont un ordre de grandeur pouvant atteindre jusqu'à près de huit et cinq fois plus que celles de Vancouver et Saint John. Aussi, il est intéressant de mettre en surbrillance le fait que les tendances de 30 ans de 1947-1976 à 1965-1994 sont de plus en plus petites jusqu'à un minimum de -15.61 mm par année. Il s'agit donc d'une accélération négative qui est ensuite inversée en accélération positive jusqu'à la période d'étude de 1993-2022 qui offre un maximum de -3.28 mm par année.

De plus, cette section détermine les tendances linéaires paramétriques et non paramétriques de la hauteur de l'eau annuelle moyenne durant la période d'étude de 1993 à 2022. D'un côté, les tendances paramétriques supposent que l'évolution du niveau de l'eau peut être représenté par une simple droite avec une pente m et une ordonnée à l'origine b. L'équation 4.1 est obtenue depuis la méthode de régression linéaire de la fonction *linregress* de la bibliothèque *scipy* (Virtanen et al., 2020) dans le langage de programmation *Python*. D'un autre côté, les tendances non paramétriques

de la fonction *mk.original_test* de la bibliothèque *pyMannKendall* (Hussain & Mahmud, 2019) sont présentées par l'équation 4.2 (Mann, 1945; Kendall, 1976) ci-dessous. La valeur de S précise si la tendance est positive $(S > 0)$ ou négative $(S < 0)$. L'équation 4.3 y est complémentaire, alors qu'elle présente la pente de Sen, utilisée pour estimer la magnitude d'une tendance. Pour les équations 4.2 et 4.3, x est la série temporelle considérée de longueur n, alors qu'i, j et k sont des indices mobiles.

$$y = m \cdot x + b \tag{4.1}$$

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} signe\left(x_j - x_k\right), \tag{4.2}$$

$$a = median\left(\frac{x_k - x_i}{k - i}\right), i < k, \tag{4.3}$$

La Figure 4.4 introduit ces tendances pour les trois villes étudiées en ajoutant si la tendance est significative ou non. Plus précisément, si l'indicateur « p_{value} » est inférieur à 0.05, alors on peut affirmer avec un niveau de confiance de 95% que la tendance est statistiquement significative. Si la p_{value} est supérieure ou égale, on ne peut pas conclure qu'une tendance est significative.

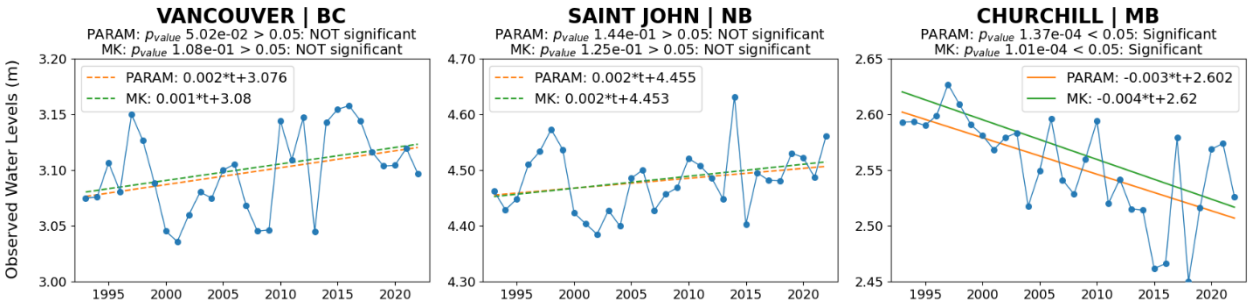

Figure 4.4 Tendances linéaires de la hauteur d'eau observée par les marégraphes de Vancouver (panneau a), de Saint John (panneau b) et de Churchill (panneau c). Les sous-figures présentent les tendances paramétriques et non paramétriques pour la période d'étude de 1993 à 2022.

Au sein de la Figure 4.4, les points bleus reliés symbolisent la hauteur d'eau annuelle moyenne pour chaque station et sont utilisés afin de déterminer les tendances linéaires paramétriques et non paramétriques. Tout d'abord, la tendance en orange est obtenue grâce à la méthode de régression linéaire de l'équation 4.1. Les pentes des villes étudiées sont affichées directement dans les sous-

figures et informent que les eaux avoisinant Vancouver et Saint John sont en hausse, alors que celles de Churchill sont en baisse. À titre de comparaison, les tendances non paramétriques en vert confirment les mêmes résultats, et ce, sans avoir à supposer d'une distribution spécifique (Hussain & Mahmud, 2019). Les tendances qui sont présentées d'une ligne pleine symbolisent qu'elles sont significatives, alors que celles pointillées ne le sont pas. Toutes les tendances linéaires ont un indicateur statistique appelé p_{value} qui permet de rejeter, ou non, l'hypothèse nulle qu'il n'y a pas de tendance. La Figure 4.4 permet alors de conclure que les tendances à la hausse des villes de Vancouver et de Saint John dans la période d'étude ne sont pas significatives, alors que la tendance à la baisse à Churchill est significative.

4.3 Tendances linéaires à long terme du niveau des eaux canadiennes

Puis, cette section offre ces mêmes tendances paramétriques et non paramétriques, ainsi que le degré de signification, pour les 41 autres stations à l'étude. Plus précisément, la Figure 4.5 introduit l'analyse de tendance pour les quatre autres stations nordiques sélectionnées, la Figure 4.6 présente les tendances linéaires pour les 12 autres stations de l'ouest du Canada, alors que la Figure 4.7 fournit ces renseignements pour les 25 autres stations de l'est du Canada.

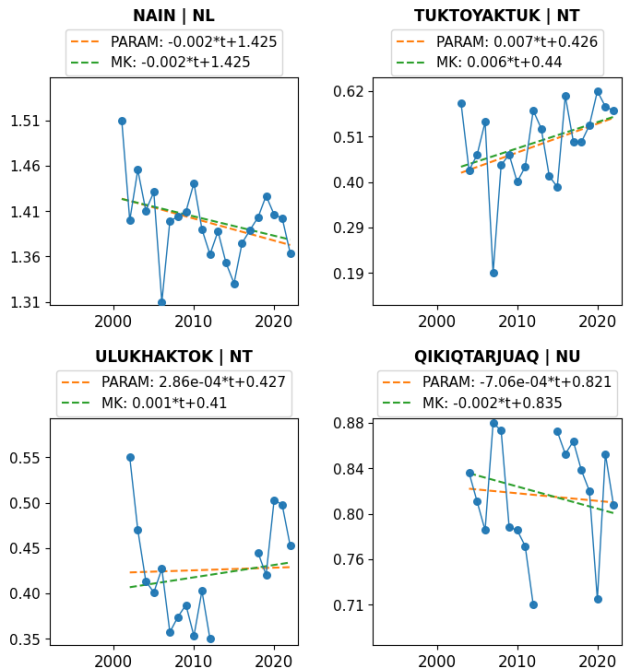

Figure 4.5 Tendances linéaires des hauteurs d'eau observées aux stations du nord du Canada

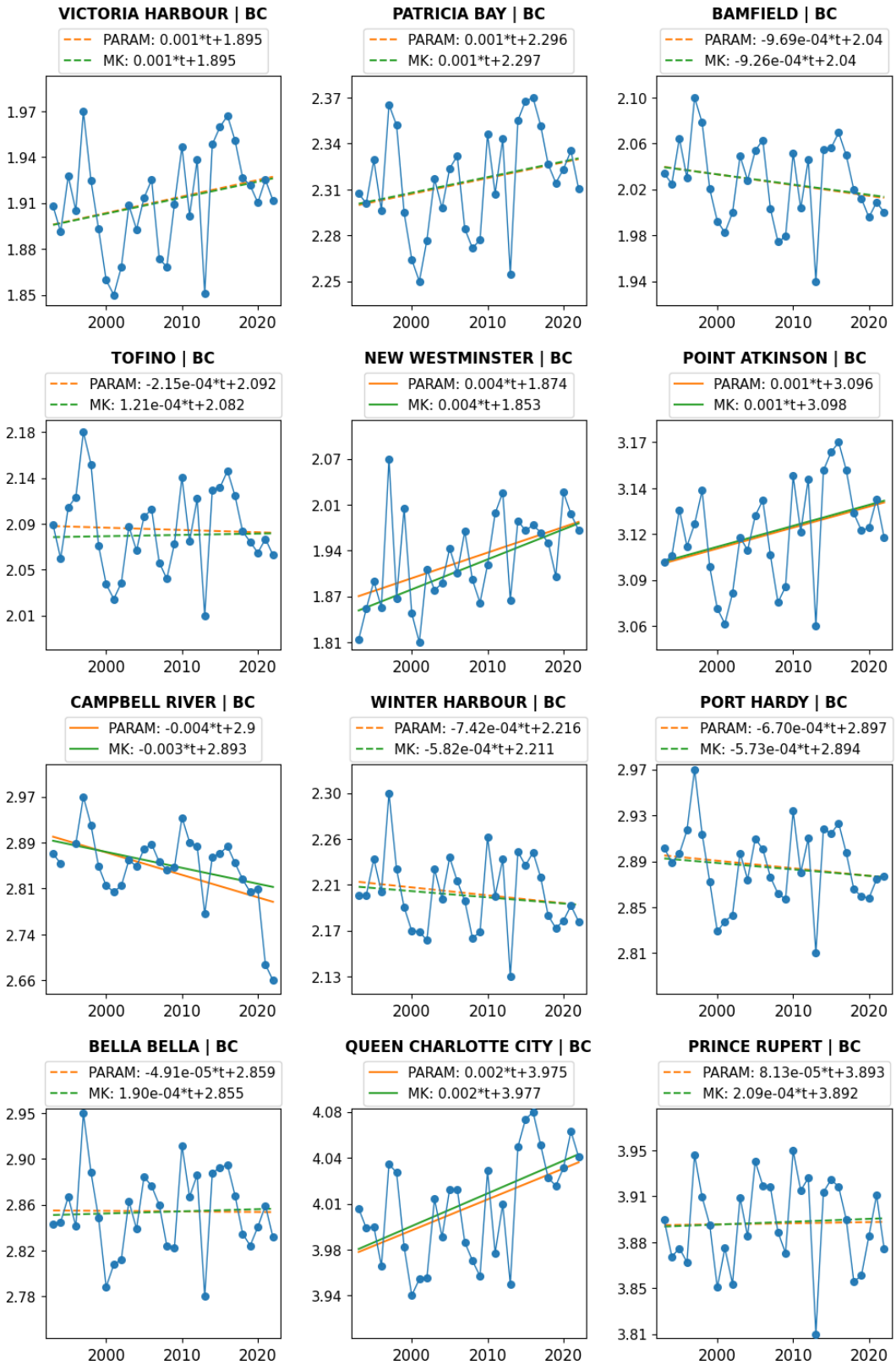

Figure 4.6 Tendances linéaires des hauteurs d'eau observées aux stations de l'ouest du Canada

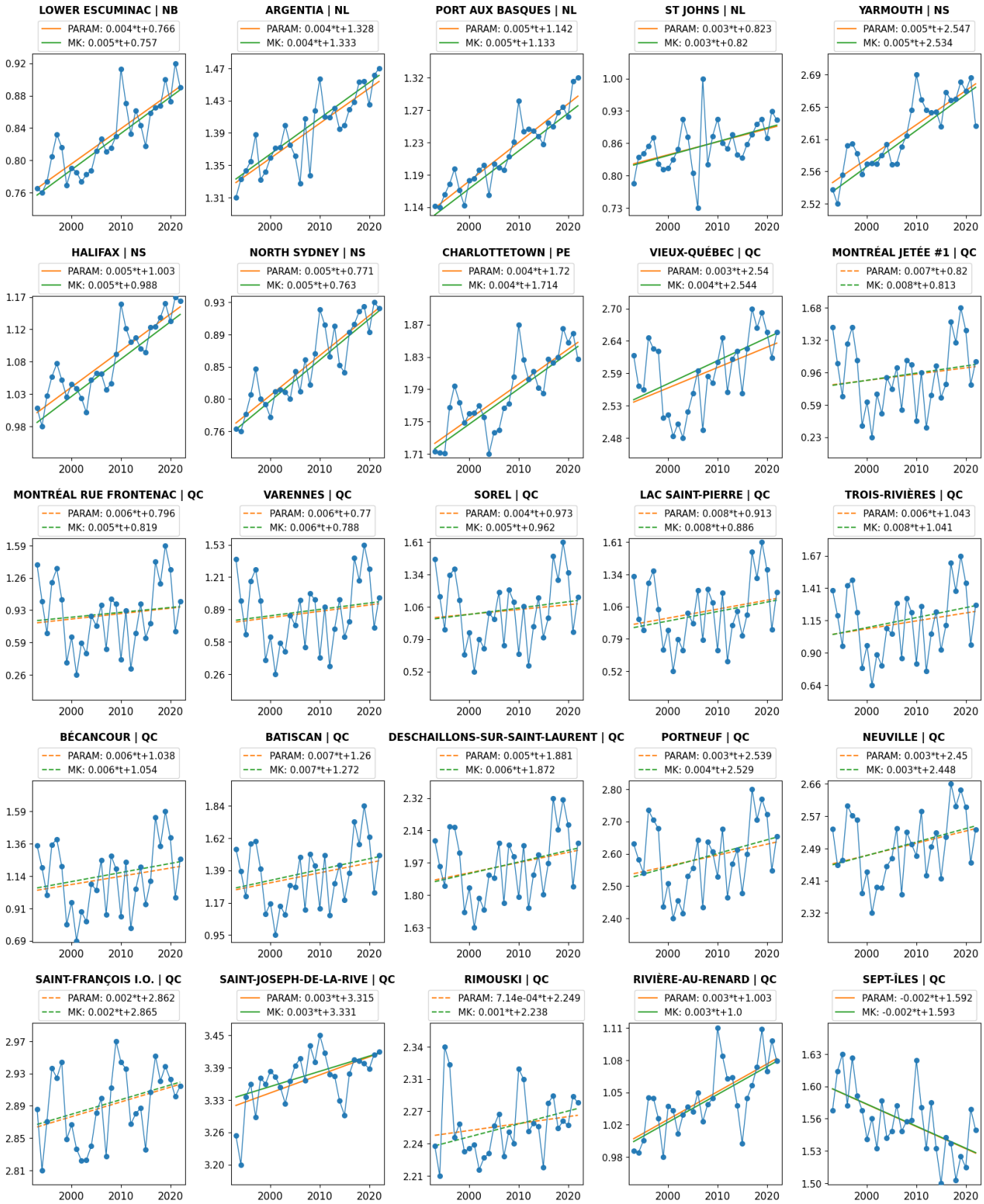

Figure 4.7 Tendances linéaires des hauteurs d'eau observées aux stations de l'est du Canada

Puis, la Figure 4.8 positionne les tendances linéaires non paramétriques des 44 stations sélectionnées sur tout le territoire canadien (sous-figure a). Les sous-figures (b) et (c), quant à elles, offrent une fenêtre agrandie des stations de l'ouest et de l'est du Canada.

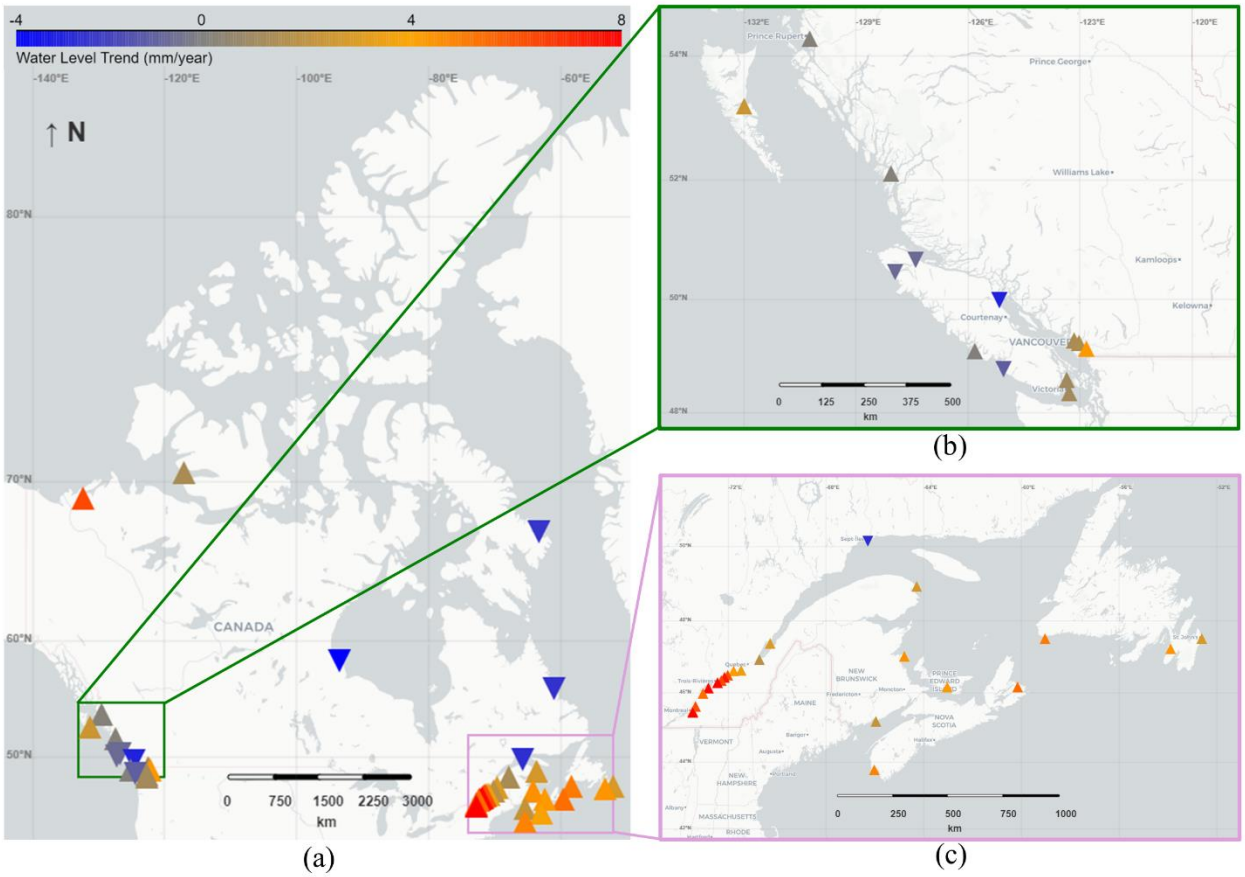

Figure 4.8 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête positives à Vancouver. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie.

Les 44 stations sélectionnées dans la section 4.1 sont positionnées par un marqueur en triangle. Si le triangle pointe vers le haut, la tendance des valeurs annuelles moyennes des hauteurs d'eau observées pour la période de 1993 à 2022 est à la hausse. Au contraire, un triangle pointant vers le bas affiche un endroit où la hauteur relative de l'eau tend vers la baisse. Sinon, les couleurs indiquent l'intensité de la tendance. Une couleur grise propose une tendance nulle, alors que la

couleur bleue introduit des stations marégraphiques qui présentent une tendance linéaire en baisse de 4 mm par année. Dans le dégradé des tendances positives, la couleur orange symbolise une hausse de 4 mm par année, tandis que la couleur rouge exprime une augmentation de la hauteur relative de l'eau de 8 mm par année.

Alors, en regardant l'ensemble de la figure ci-dessus, la comparaison entre les trois régions du Canada est possible. Dans la sous-figure (a), la répartition spatiale est convenable pour l'ouest et l'est du Canada, mais est insuffisante pour caractériser le Nord canadien. Ce dernier, avec ses cinq stations sélectionnées, présente une baisse du niveau de la mer dans les stations plus à l'est, tandis que les deux stations dans les Territoires du Nord-Ouest sont à la hausse. La figure (b), quant à elle, introduit des valeurs beaucoup plus près d'une tendance nulle. Effectivement, 10 des 13 stations sont grises ou sont représentées par une couleur brunâtre qui s'approche du gris. Deux des stations de l'Ouest canadien ont des tendances positives, alors qu'une seule est négative. Au contraire, les résultats dans l'est du Canada convergent tous vers des tendances à la hausse très prononcées, à l'exception de la station marégraphique de Sept-Îles qui est à la baisse. Ces résultats s'accordent parfaitement avec les études de la revue de la littérature du chapitre 2. En effet, l'ordre de grandeur et les différences dans l'analyse spatiale des tendances linéaires sont similaires sur la côte ouest de la Colombie-Britannique (Mazzotti et al., 2008), dans l'est du Canada (Daigle, 2020; Zhai et al., 2013, 2023) et sur l'ensemble du territoire canadien (James et al., 2014, 2021).

Sinon, en études statistiques, les corrélations sont définies comme étant la mesure de la relation entre deux variables (Privitera, 2023; Schober et al., 2018). Plus précisément, Okoye et Hosseini (2024) énumèrent trois coefficients de corrélation, soit la corrélation de Person (r), la corrélation de Spearman (ρ) et celle de Kendall (τ). D'un côté, ils identifient la première corrélation comme étant la force de l'association linéaire entre deux éléments. Celle-ci est obtenue avec l'équation 4.4, qui met en relation les variables x et y, ainsi que « N», le nombre de paires de valeurs.

$$Corrélation\ (r) = \frac{N\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[N\sum x^2 - (\sum x)^2][N\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \tag{4.4}$$

De l'autre côté, les corrélations de Spearman (ρ) et de Kendall (τ) sont non paramétriques. Tout d'abord, l'équation 4.5, dont les variables « n » et « d_i » correspondent au nombre de données et à la différence entre les rangs des deux variables. Puis, l'équation 4.6 introduit les concepts de données concordantes n_c, étudiant les paires qui sont ordonnées similairement, ainsi que leurs inverses, les données discordantes n_d.

$$Spearman\ (\rho) = 1 - \frac{6\sum(d_i^2)}{n(n^2-1)} \tag{4.5}$$

$$Kendall\ (\tau) = \frac{n_c - n_d}{\frac{1}{2}n(n-1)} \tag{4.6}$$

Dans cet ordre d'idée, la Figure 4.9 compare trois coefficients de corrélation pour les 44 stations marégraphiques. La première sous-figure (a) présente les résultats pour les 26 stations de l'est du Canada, tandis que les sous-figures (b) et (c) renseignent sur les coefficients de corrélation des 5 stations nordiques et des 13 stations de l'Ouest canadien, respectivement.

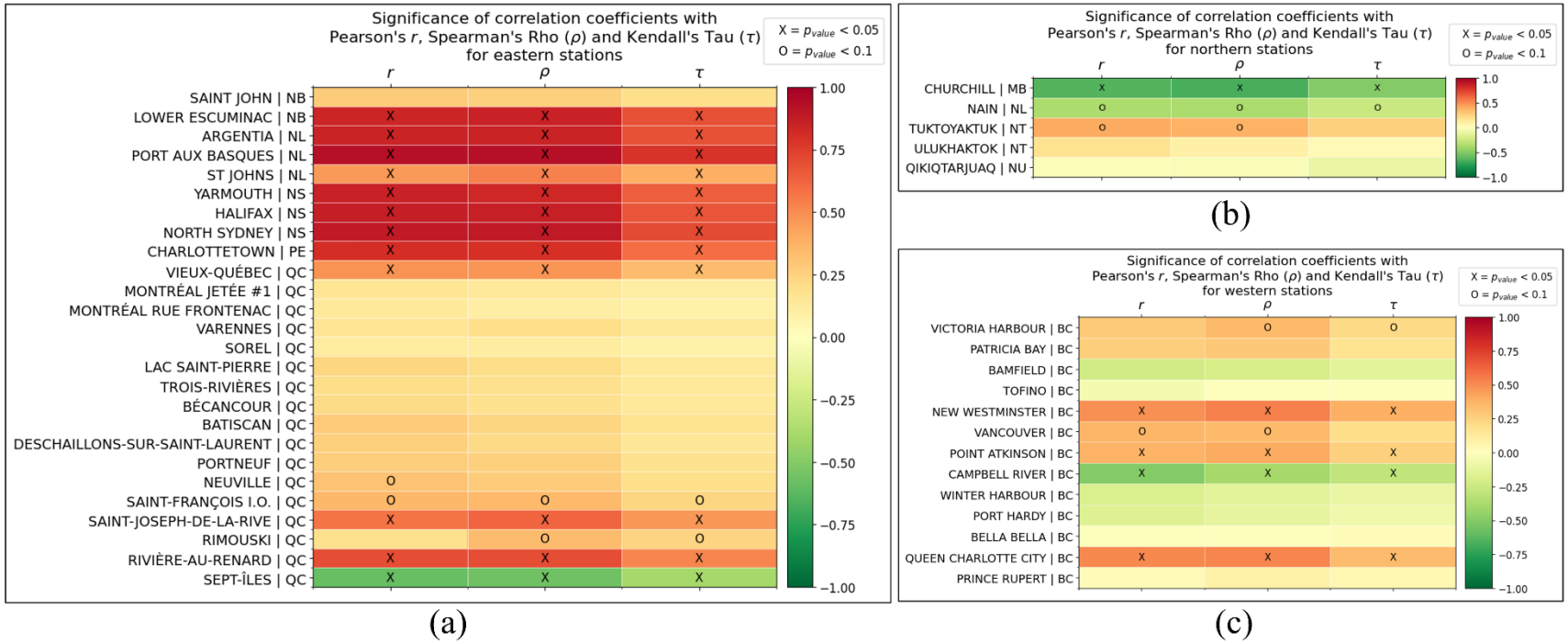

Figure 4.9 Analyse de trois différents coefficients de corrélation (Pearson, Spearman et Kendall) pour les régions à l'étude, soit l'est (panneau a), le nord (panneau b) et l'ouest (panneau c) du Canada. L'ajout d'un *X* ou d'un *O* au sein d'une cellule représente une corrélation significative à 5% et 10%, respectivement.

Dans le contexte de cette analyse, le temps (en années) et la hauteur de l'eau annuelle moyenne observée sont mis en relation. Les trois corrélations sont calculées et présentées dans les trois colonnes de la Figure 4.9. Une cellule dont la couleur est rouge indique une forte corrélation positive entre le temps et la hauteur annuelle moyenne de l'eau. Au contraire, la couleur verte au sein d'une cellule propose que la station correspondante possède une corrélation négative, soit que la hauteur de l'eau diminue lorsque le temps progresse. Puis, une cellule marquée d'un X indique un niveau de confiance de 95% que la corrélation est significative, tandis qu'un O propose un niveau de confiance de 90%. Les cellules vides ne peuvent pas être déclarées significatives, mais renseignent tout de même sur l'amplitude de la corrélation. Ainsi, la Figure 4.9 permet de valider la répartition spatiale des tendances linéaires étudiée par la Figure 4.8.

En effet, les corrélations des stations marégraphiques de l'ouest du Canada oscillent entre une hausse et une baisse du niveau de l'eau et ont une amplitude généralement plus près du zéro. À l'opposé, les stations de l'Est canadien offrent des corrélations strictement positives, sauf pour celle de Sept-Îles au Québec. Les stations de l'est qui sont hors du Québec ont une plus grande amplitude et sont toutes significativement corrélées avec un niveau de confiance de 95%, à l'exception de la station de Saint John. Aussi, tel que mentionné plus haut dans cette section, les stations nordiques qui proviennent des Territoires du Nord-Ouest sont corrélées positivement contrairement aux stations de Churchill, Nain et Qikiqtarjuaq qui sont situées plus à l'est.

CHAPITRE 5 ARTICLE 1: CANADA'S FUTURE VULNERABILITIES TO EXTREME SEA LEVEL VARIATIONS: TALES FROM COAST TO COAST TO COAST

Félix-Arnaud Laflamme Desjardins[1], Elmira Hassanzadeh[1]*, Ali Nazemi[2], Cristina Catita[3] and Carlos Antunes[3]

[1]Department of Civil, Geological, and Mining Engineering, Polytechnique Montréal, Montréal, Canada.

[2]Department of Building, Civil, and Environmental Engineering, Concordia University, Montréal, Canada.

[3]Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Instituto Dom Luiz, Lisboa, Portugal.

*Corresponding author: elmira.hassanzadeh@polymtl.ca

This chapter was submitted to the *Earth's Future* journal (7.3 impact factor) on September 30, 2024.

Contribution of Authors

Data curation (FALD), Formal Analysis (FALD, EH, AN, CA), Conceptualization (FALD, EH, AZ, CC, CA), Methodology (FALD, EH, AZ, CC, CA), Validation (FALD, EH, AZ, CC, CA), Investigation (FALD, EH, AZ, CC, CA), Resources (FALD, EH, AZ, CC, CA), Writing - Original Draft (FALD, EH), Writing - Review and Editing (FALD, EH, AZ, CC, CA), Supervision (EH, AN), Project Administration (EH) & Funding Acquisition (EH, AN, CC, CA).

Key Points

- Extreme Total Water Level (ETWL) is projected in 3 Canadian coastal cities based on CMIP 5&6 projections, extreme tides and storm surge.
- While future projections reveal increasing ETWL in both Saint John and Vancouver, both rising and falling ETWL can be seen in Churchill.
- Railway, recreation and health services as well as visible minorities, seniors and Indigenous people are most vulnerable to rising ETWL.

Abstract

Climate change-induced Sea Level Rise (SLR) poses significant threats to coastal communities worldwide. This is especially true for Canada, home to the world's longest shoreline. By projecting future Extreme Total Water Levels (ETWLs) in Vancouver, Saint John, and Churchill, representing Pacific, Atlantic, and Arctic coasts of Canada, we estimate possible fluctuations in ETWLs along with associated vulnerabilities in these three communities. We calculate ETWLs by integrating projected Regional Sea Level Rise (RSLR) with estimates of extreme astronomical tides and storm surges during the historical period. Projected RSLRs are obtained from 5th and 6th phases of Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) under moderate and high radiative forcings. We use a bathtub model to estimate flooding and receding extents, which are then used to assess vulnerabilities using multiple socio-economic factors. While uncertainties in projected RSLRs are large, particularly under CMIP6 projections, Vancouver and Saint John exhibit significant positive ETWL, whereas Churchill faces the possibility of both rising and receding levels. This uncertainty can pose a tremendous challenge for adaptation and policy making. Under rising ETWL, differences in flooding extents, and affected services can be large. However, both CMIP ensembles uncover similar vulnerabilities to population and reveal visible minorities, seniors, and Indigenous communities are the main social groups at risk. Recreation and health services, along with railways, are the key sectors vulnerable to inundation. Even under the most conservative projections, thousands of people and important critical infrastructure could be affected. Our results highlight the urgent need for strategies to mitigate these impacts.

Plain Language Summary

Climate change-induced Sea Level Rise (SLR) presents a major threat to Canada that has the world’s longest coastline. Local manifestations of SLR can vary due to differences in storm surge, astronomical tides, and Glacial Isostatic Adjustments. By considering the projections of Regional SLR (RSLR) from models in the 5th and 6th phases of Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), along with historical extreme storm surge and astronomical tides, we estimate future Extreme Total Water Level (ETWL) in Vancouver (Pacific coast), Saint John (Atlantic coast), and Churchill (Arctic coast). We note that the uncertainties in future ETWLs are significantly larger under CMIP6 projections. Projected ETWLs consistently reveal increasing levels in Vancouver

and Saint John; however, both rising and receding sea levels are projected in Churchill, which can complicate future adaptation. Considering only rising sea level, uncertainties in ETWLs translate to large uncertainties in flooding extent and vulnerabilities in public spaces and services. However, the affected populations remain similar under different estimations of ETWL. Visible minorities, seniors, and Indigenous communities are the main social groups at risk. Recreation and health services, along with railways, are key sectors vulnerable to inundation. Our findings highlight the need for increasing the resilience of Canadian coastal communities.

5.1 Introduction

Coastal regions are vital for commercial, agricultural, and industrial activities, and significantly contribute to regional and global economies (Nguyen et al., 2016; Zamrsky et al., 2024). Not only ~80% of international trade passes through coasts (Sirimanne et al., 2019), but they also play a vital role in human settlement and ecotourism (Kaemo et al., 2022; Karani & Failler, 2020; McGranahan et al., 2007). 16 out of 23 megacities with population of 10 million and more are located in coasts (Pelling & Blackburn, 2013; Neumann et al., 2015). Nowadays, 2.15 billion people live in coastal areas, with about 900 million in low-lying regions less than 10 meters above sea level (Reimann et al., 2023; Kulp & Strauss, 2019). This makes the population and infrastructure in these areas highly vulnerable to Sea Level Rise (SLR), particularly in the era of heightened climate variability and change. In fact, SLR marks the second most costly consequence of climate change after human and ecosystem health (Schinko et al., 2020).

Variations in sea level are induced by various astronomical, geophysical, or climate-related factors. Recurring changes in sea level are often driven by astronomical tides, which result from the gravitational forces of Moon and the Sun on the rotating Earth (Peng et al., 2019). The amplitude of tides varies locally and regionally depending on the size, shape and bathymetric profile in a given coastal area (Desplanque & Mossman, 2001). Furthermore, weather conditions, such as the force induced by the atmospheric pressure anomalies along with the tangential surface wind, can cause storm surges that contribute to the local increase in water levels (El-Sabh et al., 1988). Strong winds towards the coasts combined with lower-than-average atmospheric pressure push water higher into the land, while the opposite conditions force water to lower levels, causing receding

sea levels. Such effects can last from few minutes to several days (Danard et al., 2003). However, in recent decades, a continuous SLR has been observed globally due to climate changes, with an average rate of 3.25 mm increase per year from 1993 to 2018 (Oelsmann et al., 2024). According to Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), this systematic SLR is driven by oceanic thermal expansion as well as increased ocean water mass due to melting Greenland and Antarctic Ice Sheets, glacial losses, and changes in terrestrial water storage (IPCC, 2023; Rocha et al., 2023). Manifestations of global SLR at the finer regional scales, i.e., Regional Sea Level Rises (RSLRs), are also influenced by the gravitational, rotational and deformational responses to mass redistribution and vertical land motion caused by Glacial Isostatic Adjustment (GIA), tectonic and mantle dynamic topography, soft-sediment compaction and anthropogenic subsidence (IPCC, 2022; Hawley et al., 2020). It is shown that RSLR leads to more frequent and severe coastal floodings globally, resulting in interruption in services, damage to property, assets, and human livelihood with economical losses reaching up to 9% of the gross domestic product (Brown et al., 2007; Inácio et al., 2023; Hinkel et al., 2014).

Even with successful adaptation measures to confine the global temperature rise to 2.0°C, the impact of coastal flooding is expected to grow due to continuous global SLR (Nicholls et al., 2018). At this juncture, it is critical to evaluate the susceptibility to danger of coastal zones to RSLR in order to develop strategies that mitigate the impacts of extreme events and coastal flooding (Howard & Sherren, 2023; Manson et al., 2019; Oulahen et al., 2015; Šimac et al., 2023). This is particularly the case for countries with extensive coastlines, such as Canada, which has the world's longest coastline (243,000 km: Yurick, 2010) and is among the top three G20 countries facing the highest macroeconomic impacts due to RSLR (Schinko et al., 2020). Canada’s temperature is rapidly rising (McKitrick, 2019; Rantanen et al., 2022), leading to a decline in sea ice and reducing the natural buffer to coastal erosion (Daigle, 2020; Environment and Climate Change Canada, 2023). The vastness of Canada’s coastline sets the scene for significant variations in RSLR from coast to coast to coast (Han et al., 2020), which is due to the heterogeneity in vertical land motion and provoked by the postglacial rebound (Robin et al., 2020).

Future RSLRs are often estimated based on the General Circulation Models (GCMs), obtained from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). GCMs from the 5th Assessment Report (hereafter CMIP5) include intermediate complexity models from both traditional atmosphere-ocean global climate models and Earth system models (Taylor et al., 2012). These models offer sea level projections under different anthropogenic forcings, known as Representative Concentration Pathways (RCPs). However, it has been noted that some processes affecting RSLR are poorly characterized in CMIP5 models (Kopp et al., 2023). More recently, GCMs from the 6th Assessment Report (hereafter CMIP6) offer projections with improved performance, higher spatial resolution and better representations of climate sensitivities (IPCC, 2023). CMIP6 models use Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), a new set of socioeconomic assumptions to drive climate models that include the impact of societal choices on radiative forcing (Meinshausen et al., 2020). The discrepancies between CMIP5/6 projections of global mean SLR are shown by Slangen et al. (2023), with a 7% to 32% divergence under low-forcing scenarios and a 6% to 29% variation under high radiative forcing scenarios by the end of the 21st century. While an overall agreement in the patterns of change in RSLR is found between CMIP5 and CMIP6 projections, significant differences are observed in some regions, such as on the eastern coasts of North America, which might be due to the vertical land motion's components that are better captured by CMIP6 models (Slangen et al., 2023).

While RSLR stays as the most dominant factor for coastal vulnerabilities (Inácio et al., 2023), it is not the only source. In fact, abnormal SLR events that cause overtopping or breaching of maritime defense structures, and accordingly inundation of coastal lowlands, can be induced by Extreme Astronomical Tides (EATs) and Extreme Storm Surges (ESSs). The latter is particularly important in Canada with a history of severe storms, such as the 1869 Saxby Gale and the 1976 Groundhog Day Storm (Thompson et al., 2009). Consideration of RSLR with EAT and ESS results in a new compound variable, i.e., Extreme Total Water Level (ETWL; see Bernier et al., 2024; Bevacqua et al., 2020; Bush & Lemmen, 2019; Cabrita et al., 2024; Kirezci et al., 2023; Woodruff et al., 2013). One frequently-used approach for estimating the EAT is based on statistical analyses of astronomical tides, measured either by in-situ tidal gauges (Lowe et al., 2021; Serafin et al., 2017) or through satellite remote sensing (Muis et al., 2016). They can be also estimated using harmonic analyses of tide constituents (Abubakar et al., 2019; Hart-Davis et al., 2021; Godinho, 2011),

filtering methods (Slobbe et al., 2018; Thompson, 1983), and artificial intelligence models (Granata & Di Nunno, 2021). ESS can be estimated by the statistical analysis of storm surge (Bernier et al., 2024). As surge data is not directly available (Provan et al., 2022), nontidal residuals from observed water levels have been used as a proxy in some studies (Serafin et al., 2017; Yu et al., 2022). Model-based estimation of ESS using local (Joyce et al., 2019; Reffitt et al., 2020) and/or global models (Dullaart et al., 2020; Tadesse et al., 2020) are also advised.

Changes in RSLR In Canada have been analyzed by James et al. (2014, 2021) using CMIP5 models and more recently by Zhai et al. (2023) using both CMIP5 and CMIP6 models. Zhai et al. (2023) also estimated the vertical allowances, the required elevation adjustments to maintain historical inundation frequencies. They found that although the mean ensemble of RSLR projections is almost similar between CMIP5 and CMIP6 models for most coastal cities, except in the north, their range of projections differ significantly, leading to discrepancies in their estimated vertical allowances. These differences suggest contradictory and even conflicting recommendations, such as both elevating and lowering infrastructure. This underscores the need for further investigation of uncertainties in SLR projections. In addition, to the best of our knowledge, there is still no study that takes the estimates of ETWL and translates them into coastal flooding extents and resulting vulnerabilities in coastal communities and infrastructure.

Our study aims at filling these gaps. Using ensembles of CMIP5 and CMIP6 projections under moderate and high radiative forcings, we estimate future ETWLs and associated coastal flooding and vulnerability in the three cities of Vancouver, Saint John, and Churchill, representing Canada's Pacific, Atlantic, and Arctic coasts. EAT and ESS are calculated using the frequency analysis with hourly modelled astronomical tides and with residuals from the hourly observed water levels throughout the studied period, respectively. Moreover, we use the Geographic Information System (GIS) bathtub method (Antunes et al., 2019; DiPaola et al., 2024) to translate the estimated ETWLs into coastal flooding extents, which enable us to evaluate the coastal vulnerability based on multiple factors related to population, as well as public land and spaces, as well as infrastructure across the three considered cities.

5.2 Case Studies

We consider Vancouver (British Columbia), Churchill (Manitoba), and Saint John (New Brunswick) as three coastal cities representing the Pacific, the Arctic, and the Atlantic coasts of Canada. Figure 5.1 presents the delineation of these cities based on the subdivisions in the 2021 Canadian census (Statistics Canada, 2023). The stars display tide gauges and the location of the ports.

Vancouver is the third most populated city in Canada (662,248 inhabitants), with more than half of its population from visible minority groups. The city is also home to almost 13,000 Indigenous peoples identifying as Musqueam, Squamish or Tsleil-Waututh (City of Vancouver, 2024a). Vancouver experiences a moderate GIA uplift of around 0.52 mm per year (Peltier et al., 2015), which slightly masks the impact of SLR. Vancouver's tides are characterized as mixed, semi-diurnal tides, featuring two complete daily tidal oscillations with heterogeneity in height and time (Canadian Hydrographic Service, 2024c). The Port of Vancouver manages ~350 km of shoreline in British Columbia (Vancouver Fraser Port Authority, 2024); therefore, SLR and associated flood risks can pose significant socio-economic threats to the city and the province (Darlington et al., 2024; DiPaola et al., 2023; NHC, 2014; Oulahen et al., 2015).

Saint John lies on the ancestral lands of the Wolastoqiyik, Mi'kmaq, and Peskotomuhkati Nations (Walls, 2017). Saint John is the largest city (69,895 people) and the only major port city along the Bay of Fundy, which is characterized by the amplitude of its tides. The bay's length matches the oscillations from the Atlantic Ocean's tides (Desplanque & Mossman, 2001). The Bay of Fundy's configuration causes the water to move higher up the shores as its shape becomes narrower and shallower towards the head of the bay. The tides at Saint John's port are semi-diurnal, meaning two complete tidal oscillations daily with similar high and low waters (Canadian Hydrographic Service, 2024a). Unlike Vancouver, the land in Saint John is sinking around 1.47 mm per year due to local GIA, exacerbating the RSLR (Peltier et al., 2015). Similar to Vancouver, the port is crucial to socio-economic activities in Saint John, which is a popular destination for cruise ships, and handles a wide range of cargo, including containers, forest and petroleum products, as well as bulk commodities (Port Saint John, 2024).

Churchill is the only location on the Arctic coast of Canada with sufficient water level data to evaluate ETWL. This small town is home to 870 residents, 50% of which are from the Caribou Inuit, Sayisi-Dene or Swampy Cree Indigenous peoples (Town of Churchill, 2020). The variations in sea level in Churchill are significantly influenced by GIA, with the post-glacial rebound causing the land to rise 8.59 mm per year (Peltier et al., 2015). The Port of Churchill is Canada's only Arctic seaport serviced by rail and has been under local and Indigenous ownership since 2018 (Arctic Gateway Group LP, 2021). The port has semi-diurnal tides (Canadian Hydrographic Service, 2024b) and features four deep-sea berths for loading and unloading essential grains and manufactures, mining and forest commodities. Typically iced from November to July, some Arctic shipping routes are emerging as the area and mass of Arctic Sea ice diminish (van Tatenhove, 2022). As a result, the port has the opportunity to become an essential stopover with the Arctic Bridge Route, linking North-western Russia and Scandinavian countries to Canada.

To improve our comprehension of the characteristics of these cities and their vulnerabilities to RSLR, we further examine a set of socioeconomic variables related to population, public spaces, land and infrastructure. Table 5.1 presents these variables, which are obtained from the 2021 Canadian census and are determined by previous studies from Chakraborty et al. (2020, 2021, 2023). Regarding the population, we consider seniors (65 years and more), visible minorities, Indigenous peoples and people with less than $50k income – see the spatial distribution of these populations in Figure A.1. For public spaces, we consider recreational, educational, health, public and community services. Each service contains multiple sub-categories, which are detailed in Table A.2. The variables noted in Table 5.1 are obtained by matching the building footprints with point shapefiles from a publicly available geospatial data platform called Géoindex (2018). For the land and the infrastructure, we explore the total area, building footprints, roads, railways, and airports.

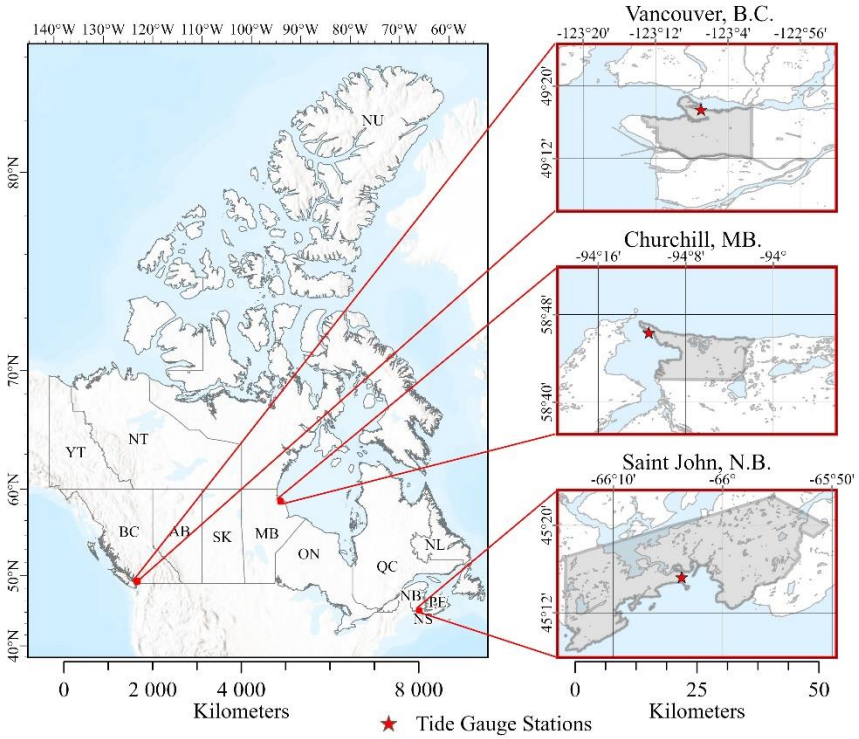

Figure 5.1 Cities of Vancouver, Churchill, and Saint John in Canada and their associated tide gauges (red star). Credits for the Canadian map: Earthstar Geographics.

The building footprints for Vancouver and Saint John are obtained from open data portals (City of Vancouver, 2024b; The City of Saint John, 2024). We create polygon shapefiles for Churchill, following the shapes of the buildings using ArcGIS Pro 3.2.2 (ESRI®). The roads, the railways, and the airports are represented by line shapefiles from Géoindex (2018). Overall, the extent of public spaces in Vancouver are larger than the two other cities; and the total land area of Saint John is 2.5 and 4 times greater than Vancouver and Churchill. Vancouver has the highest building footprints with 2,631 hectares, almost 5 times more than Saint John. The 2347 km of roads in Vancouver are twice and 31 times more than Saint John and Churchill. The railways in Vancouver, Saint John and Churchill cover up to 135, 124 and 38 km, respectively. Note that Vancouver's international airport is not located in the studied census subdivision. Churchill has the largest runways, covering 78 hectares, three times the size of those in Saint John.

Table 5.1 Socioeconomic factors of urban communities in Vancouver, Saint John and Churchill – see Tables A.1, A.2 and A.3 in the Supplementary for the components and sources of each data.

Categories	Variables	Unit	Vancouver	Saint John	Churchill
Population	Total	-	662248	69895	870
	65+ years old	-	112790	14370	85
	Visible minority	-	354650	7285	30
	Indigenous	-	12935	1625	495
	With income < $50k	-	325420	38205	360
Public spaces	Recreational	dam^2	181769	120810	93
	Educational	dam^2	3054	678	154
	Health services	dam^2	11805	2164	158
	Public services	dam^2	923	178	9
	Community services	dam^2	34074	11673	14
Land and infrastructure	Total land area	km^2	115	316	79
	Building footprints	ha	2631	552	19
	Roads	km	2347	1075	75
	Railways	km	135	124	38
	Airports	ha	0	33	78

5.3 Materials and Methods

The ETWLs are often represented by the summation of the RSLR, the EAT, and the ESS (Antunes et al., 2019; Daigle, 2020). This representation considers a concurrence in the three components (Irani et al., 2024), but does not consider the impacts of waves. Although this is indeed a conservative assumption, it is frequently implemented in SLR studies (Fandé et al. 2022; Haigh et al., 2014; Muis et al., 2020). The framework to estimate the elements of ETWLs and assess the coastal vulnerability is schematically shown in Figure 5.2. The methodological details are further explained below. Note that we use the concept of ETWL to describe both high and low extremes as land is rising in Churchill, which can potentially cause receding sea level.

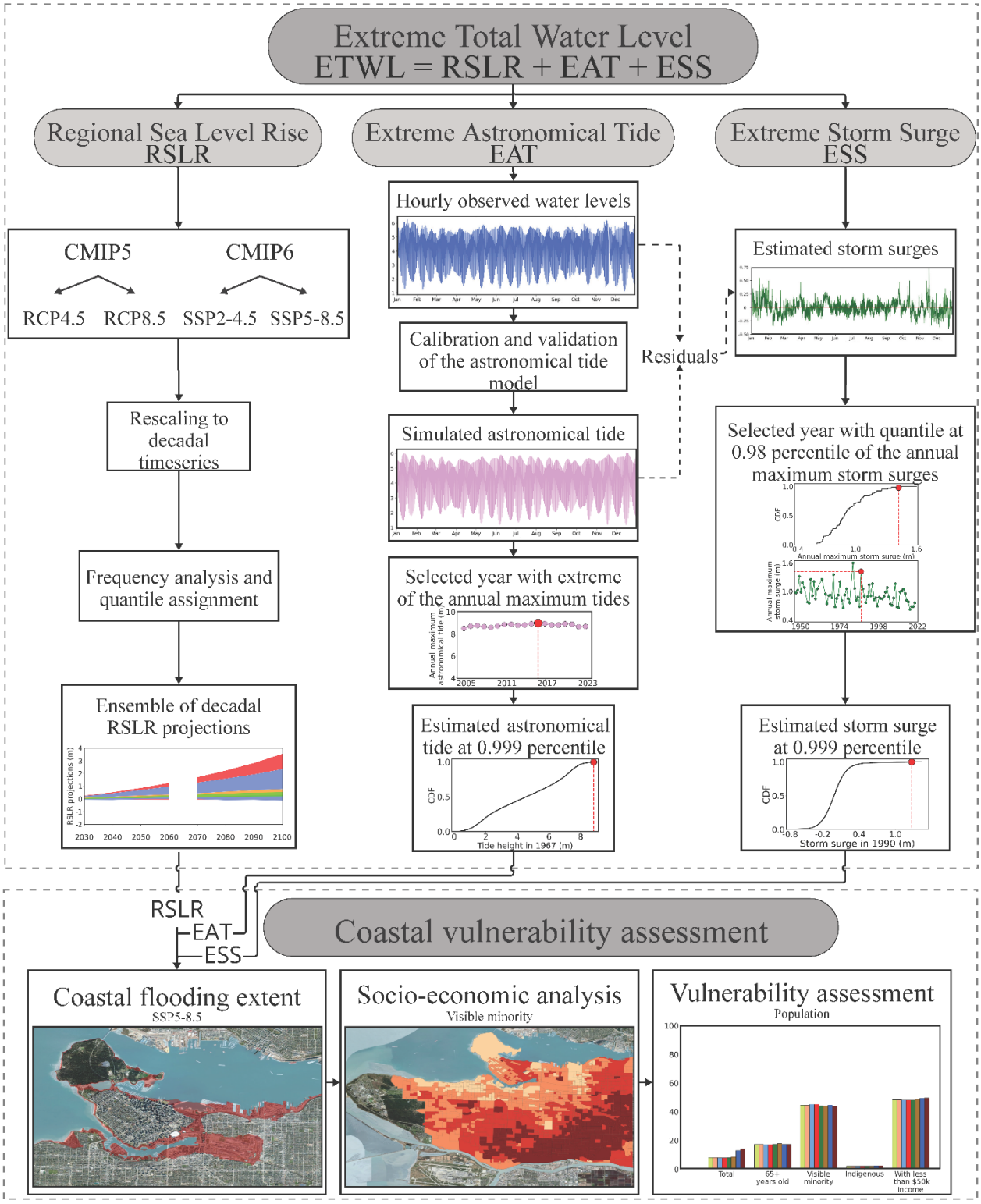

Figure 5.2 Schematic view of the utilized frameworks for estimating ETWL, based on RSLR projections, EAT and ESS values, as well as assessing the vulnerability to coastal floodings.

5.3.1 Projections of Regional Sea Level Rise

To consolidate the uncertainties in estimating the ETWL and its impacts on the flooding extent and resulted vulnerabilities, we use decadal RSLR projections from both CMIP5 and CMIP6 ensembles for 2020 to 2100 under RCPs 4.5 and 8.5 for CMIP5 and SSPs 2-4.5 and 5-8.5 for CMIP6. Despite some differences (see Hausfather, 2018, 2019), these are comparable scenarios in the two ensembles (Welch, 2024). The annual RSLR projections of CMIP5 are obtained from the Integrated Climate Data Center at the University of Hamburg (Church et al., 2013a) for 21 models at the spatial scale of 1° – see the list of models in Church et al. (2013b). CMIP6 projections are from the modular, open-source Framework for Assessing Changes to Sea-Level (FACTS; Kopp et al., 2023) and the "Zenodo IPCC AR6 Sea Level Projections" data repository (Garner et al., 2021), as presented in the National Aeronautics and Space Administration (NASA) Sea Level Projection Tool (NASA, 2021). The CMIP6 projections are available as quantiles of the distribution of the sea-level change per decade, covering the projected minimum, median, and maximum RSLRs. We consider 2020 as the benchmarking year for both CMIP5 and CMIP6 ensembles and mark it with a 0-meter change. We also harmonized CMIP5 ensembles at the decadal scale using the same methodology implemented in FACTS. For both CMIP5 and CMIP6 models, we consider two distinct periods representing short-term (2030-2060) and long-term (2070-2100) futures.

5.3.2 Extreme Astronomical Tide

While the observed water levels for each city are accessible for the historical period of 1950-2023 in the Government of Canada (2022), the data on astronomical tides are not directly available. As a result, we estimate tides using the tide analysis model developed by Antunes and Godinho (2011). The model is based on harmonic analysis and requires a complete year of hourly observed water level to obtain the specific tide harmonic constituents (Godinho, 2011). The estimated tide model is validated by comparing their values with observed levels on days without storm surges that show normal atmospheric pressure and low winds. The validation assumes that storm surge is driven by atmospheric pressure gradients and winds; and therefore, in the absence of these drivers, observed water levels are constituted by astronomical tides alone (Daigle, 2020).

To find the EAT, we first identify the year within the last 19-year period (2005-2023) that had the highest occurrence of annual maximum tide. This 19-year period is used due to the 18.61-year lunar nodal cycle, which influences tidal fluctuations (Bult et al., 2024). We assume that modelled tides follow a perfect periodicity in a self-consistent equilibrium law without any phase shifts (Frederikse et al., 2016; Proudman, 1960). For the year with the highest annual maximum tide, we analyze its hourly data using the Empirical Cumulative Density Function (ECDF), in accordance with the method detailed in Antunes et al. (2019). This is to determine the hourly tide value corresponding to the 0.999 percentile to represent a water level that is exceeded around ~9 (8.75) hours per year. Although these ~9 hours are not necessarily continuous, they represent an extreme water level that is not instantaneous, and thus leading to potentially more catastrophic events (Daigle, 2020; Mulligan et al., 2023). The same methodology is used in the case of declining ETWLs; however, it is adapted to instead obtain the extreme low tides value. In this case, a year with the lowest annual minimum tide height among the same 19-year tidal period (2005-2023) is identified for each city and the EAT corresponding to the 0.001 percentile in that year is selected. This minimum EAT represents the tide height that is not exceeded only during ~9 hours of that year. The estimated EAT in rising and falling situations are then adjusted according to the chart datum, a reference plane to which all charted depths and drying heights are related (Government of Canada, 2024a). The simulated tides are referenced to the Canadian Geodetic Vertical Datum of 1928. Since the Digital Elevation Models (DEMs) used in the GIS are referenced to the new Canadian Geodetic Vertical Datum of 2013, we use the Global Positioning System Height (GPS·H) tool to correct the vertical drift between these reference frames (Government of Canada, 2023b).

5.3.3 Extreme Storm Surge

Storm surges include all water level fluctuations that are not associated with astronomical tides. They result from the effects of atmospheric pressure and/or winds and can be represented as the residuals between the water levels and astronomical tides (Abeysirigunawardena et al., 2011; Daigle, 2020). To identify ESS, we first select a year during the historical period of 1950-2023 with high surge values based on return periods, a method commonly used in coastal infrastructure design for damage mitigation and protection (Industrial Economics Incorporated, 2020). We use the ECDF of the annual maximum storm surge series during 1950-2023 to find the year that

corresponds to surges with a 50-year return period. To maintain consistency with the estimation of EATs, we again analyze hourly surge values within the selected year and determine the ESS corresponding to 0.999 percentile, a surge level that can last ~9 hours per year. Going beyond instantaneous surge levels is crucial as they can exacerbate the pressure on both human and infrastructure (Dube et al., 2022). Similar to EATs, we consider the minimum sea level surges by the year corresponding to the 50-year occurrence of the annual minimum storm surges, and extract the 0.001 percentile from the hourly series of the storm surge in that year.

5.3.4 Coastal flooding and receding, and associated vulnerability analysis

Given the estimated ETWL, a simple bathtub model (McGrath et al., 2018; Rocha et al., 2020; Williams & Lück-Vogel, 2020) is used to simulate the affected coastal areas. The bathtub method is criticized in high-resolution flood maps considering it fails to include the influence of bed friction, flow direction and some structural barriers (Seenath et al., 2016). Having said that, it is commonly used in literature due to its computational efficiency and the fact that it can surrogate the results of detailed hydrodynamic models (Bootsma, 2022; Didier et al., 2019b; Webster et al., 2014). Hong et al. (2024) add that the bathtub method is useful for large regions that may be vulnerable to coastal flooding, while extended hydrodynamical models are limited by their spatial resolution. In addition, the bathtub approach is a tool that fits the needs of Canadian municipalities as it is less expensive and easier to create maps that reflect the local situation without the need for experts. Two-dimensional terrain models for Vancouver and Saint John are obtained on a 1-metre resolution from the Canadian High Resolution DEM (Government of Canada, 2024b). For Churchill, high resolution DEM is not available; and we are forced to use a 20-meter resolution DEM available at Government of Canada's geospatial data extraction tool (Government of Canada, 2015, 2023a). The projected ETWLs in each city are matched with the DEM to delineate coastal flooding corresponding to increased ETWL (Bootsma, 2022). We filter the identified areas that are not hydraulically connected to coasts. A modified approach is used for receding sea levels in Churchill to estimate the affected areas. In this case, the declining ETWLs are matched to the bathymetric profile, where all areas above a specific water level are treated as dried-out. For this purpose, the Canadian Hydrographic Service Non-Navigational Bathymetric Data is obtained on a 10-meter resolution (Canadian Hydrographic Service, 2018). The inverse distance weighted

interpolation is then used to fully cover the waterbed width in the Churchill River and to have continuous bathymetric information in the Hudson Bay on the north coast of Churchill.

Once the coastal flooded or receded areas are delineated, we identify the potential number of people, public spaces and buildings that would be affected in these areas. For the affected people, we consider the total number of populations affected by flooding, as well as four specific measures related to vulnerable groups, including seniors, visible minorities, Indigenous people and those with an income of less than $50k. To quantify population-related vulnerability, we sum up the statistics of each measure that overlaps the flooded/receded regions within a city. We then present results as the percentage of affected people relative to the total city population and the ratio of vulnerable groups inside the total number of affected population. For public spaces, we consider recreational and educational places, as well as health, public and community services. When evaluating the land and infrastructure, we assess the total area of the region, the building footprints and the network length of roads, railways and runways. For public spaces, as well as land and building footprints, we compile the percentage of the inundated areas relative to their total surface area. Similarly, we calculate the ratio of affected roads, railways and runways.

5.4 Results

5.4.1 Future projections of Extreme Total Water Level

Decadal RSLR projections for short- and long-term futures according to CMIP5 and CMIP6 models are shown in Figure 5.3 for Vancouver, Saint John, and Churchill – see also Table 5.2 for the ranges of RSLR under each radiative forcing and period. The left panels present the ensembles of decadal projections under moderate and high radiative forcing during short- and long-term future. The right panels display the possible RSLR ranges inside each period. As it can be seen, the RSLR significantly differs between CMIP5 and CMIP6 projections, and ranges of CMIP6 projections are considerably larger than CMIP5. In particular, the maximum values in the long-term future projections based on SSPs are around seven times larger than RCPs. Given the ranges provided, it is evident that Vancouver and Saint John are prone to rising sea levels. Among the three cities, Saint John can face the largest rise of 3.53 m under the CMIP6 high radiative forcing

and in the long-term period. Projections for Churchill are different as both positive and negative RSLR can be observed. In that regard, CMIP5 models provide strictly negative projections, while CMIP6 models provide both negative and positive RSLR. These findings match those reported by Zhai et al. (2023), which indicated a positive increase in RSLR for Vancouver and Saint John, as well as both positive and negative changes in RSLR for Churchill.

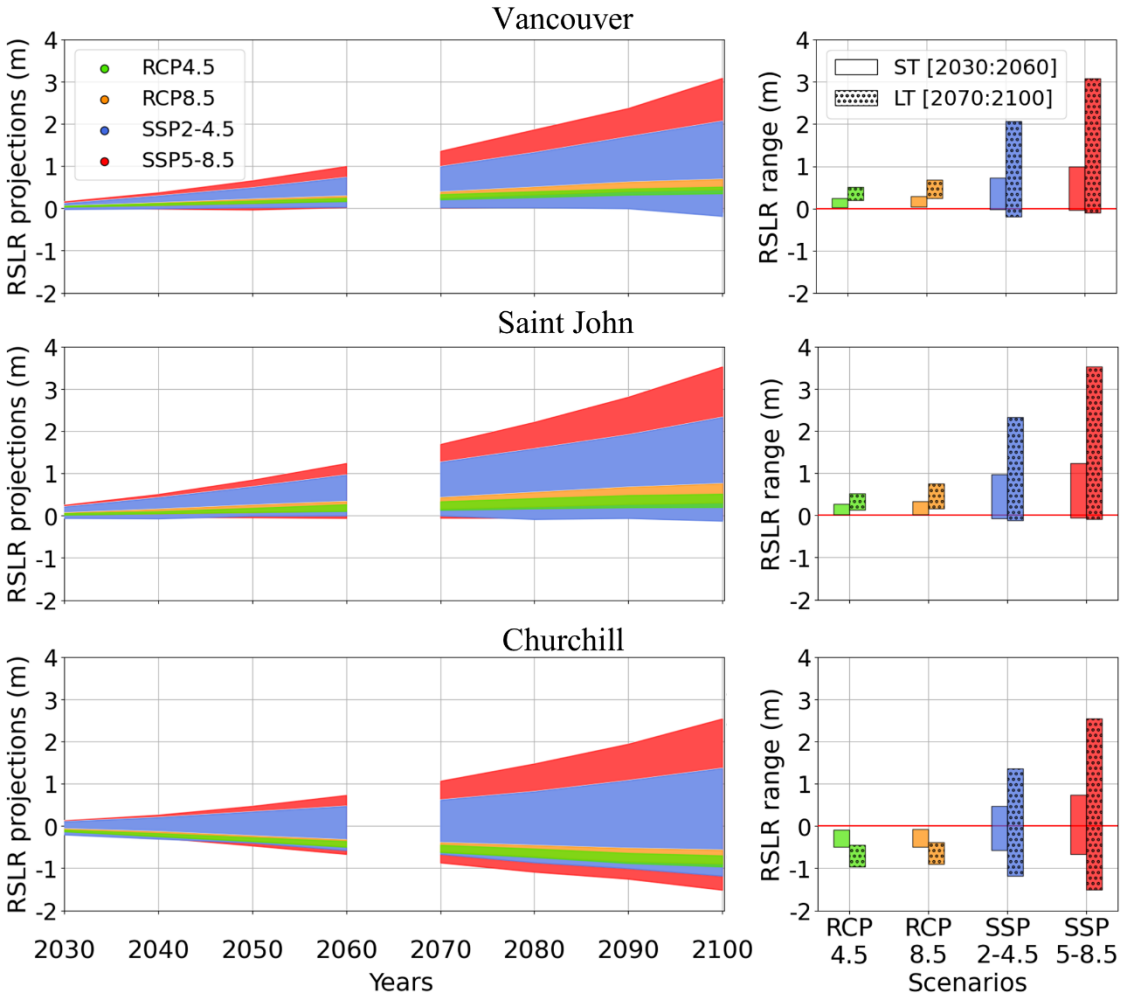

Figure 5.3 Decadal projections of the Regional Sea Level Rise (RSLR) based on CMIP5 and CMIP6 ensembles under moderate and high radiative forcing (left); possible ranges of RSLR in short- and long-term futures represented by 2030-2060 and 2070-2100, respectively (right).

Figure 5.4(a) show the procedure of estimating EAT. The top row compares the annual maximum tides in the last tidal epoch of 2005 to 2023, obtained from the hourly tide heights simulated by the tide model. Note that the maximum tides have occurred at different times inside the 19-year tidal epoch. Saint John has the highest annual maximum tide height of 8.99 m (2016), which is coherent with its location in the Bay of Fundy (Canadian Hydrographic Service, 2024a). Vancouver and Churchill have comparable annual maximums of 5.12 m (2022) and 4.98 m (2010), respectively. Panels in the bottom row of Figure 5.4(a) show the values for non-instantaneous EATs corresponding to 0.1% frequency of submergence based on ECDFs. Figure A.2(a) in the Supplementary Material presents a low-tide extreme of 0.01 m (2016) for the extreme non-instantaneous annual minimum tide simulated for Churchill. A similar method for estimating ESSs for rising sea levels is shown in Figure 5.4(b). The top and middle rows show the procedure to find the year corresponding to a 50-year storm surge and accordingly calculate the ESSs for the 0.999 percentile for the particular year when the extreme event of a 50-year occurred. Churchill is the city with the highest annual maximum storm surges, up to 1.60 m that took place in 1990 and is almost twice as large as Vancouver's and Saint John's.

Table 5.2 summarizes the result related to possible future ETWLs and their constituents in the three cities during the long- and short-term futures, revealing that EAT is the most contributing factors in rising ETWL scenarios. Regardless, the choice of CMIP influences the proportion of the contribution. Another key observation is the large uncertainty in RSLR for Churchill (e.g., 4.06 m under high radiative forcing), which translates into even a wider range in the ETWL. The total uncertainty of the ETWL, which is the difference between the maximum high-water and the minimum low-water, can reach to nearly 11 meter in Churchill (i.e., the spread between a 4.73 m drop to a 6.19 m rise). Figure 5.5 illustrates the possible range of the rising ETWL for the three cities and the receding ETWL in Churchill. The green and yellow bars represent the ETWL based on CMIP5 models, while the blue and red colors depict the results for CMIP6 models, respectively. The results for short- and long-term futures are shown with clean and dotted bars, respectively; and solid horizontal lines show the median estimates. It should be highlighted that the median ETWLs based on CMIP5 and CMIP6 models are nearly identical, and the differences in Vancouver and Saint John are less than 5% (see Table A.4 in Supplementary Materials) for median ETWL values.

However, in Churchill, the median ETWL based on CMIPs can differ by as much as 17% for rising levels and 13% for receding levels.

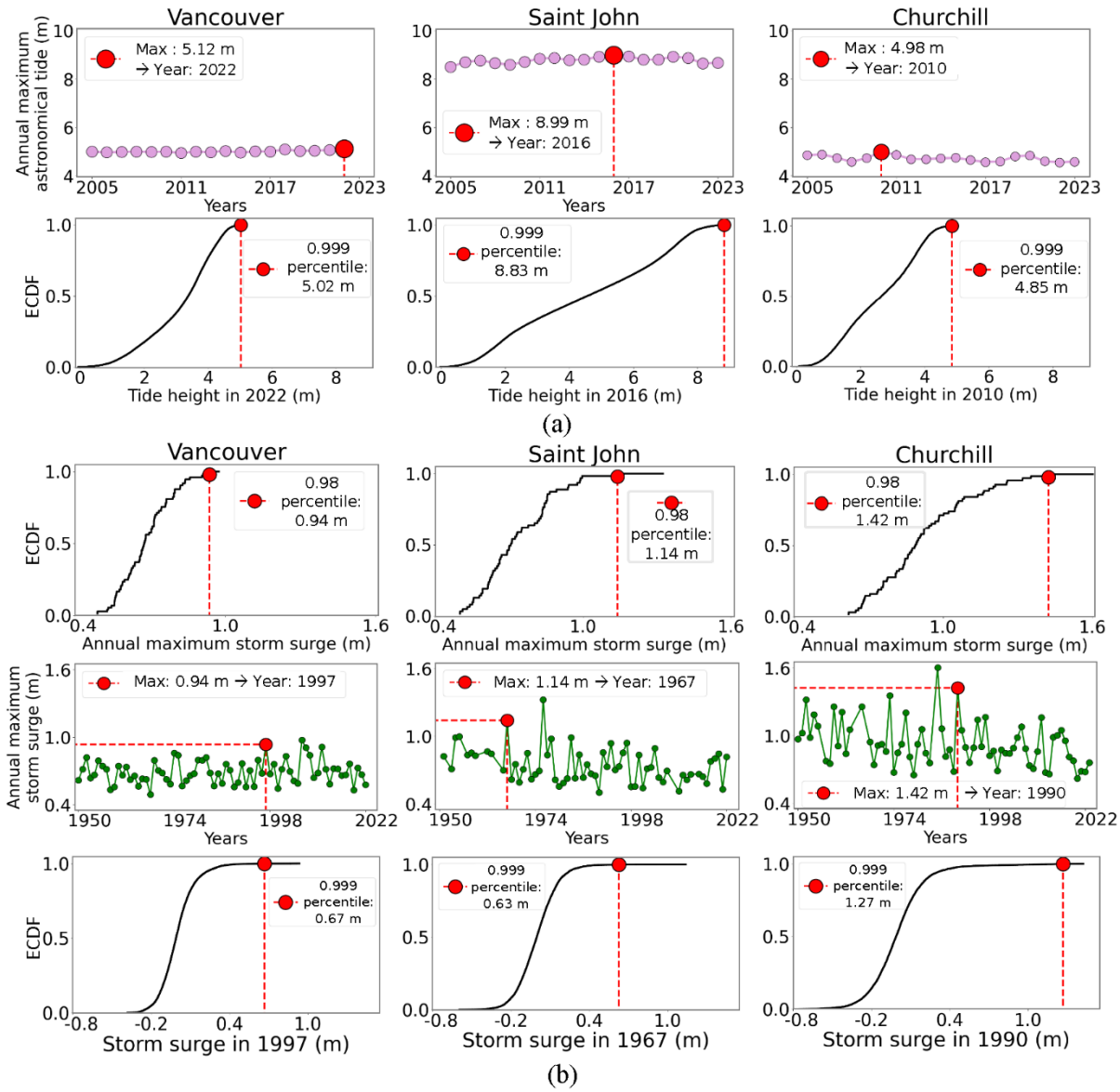

Figure 5.4 Extraction of the 9-hour Extreme Astronomical Tide (EAT; panel a) and Extreme Storm Surge (ESS; panel b) for rising sea levels. Top row in panel (a) shows the annual hourly maximum tide data and the bottom row shows the ECDF of hourly tides in the year in which the annual extreme took place. Top row in panel (b) shows the ECDF of annual maximum storm surge from which the 50-year events are extracted. Middle row shows the year in which the 50-year hourly extreme took place and the bottom row shows the ECDF of hourly storm surge in which the annual extreme took place. The 9-hour event extremes are chosen based on 0.999 percentiles.

Table 5.2 Projected Short- and long-term Extreme Total Water Levels (ETWLs), constituted by the Extreme Astronomical Tides (EATs) corrected by the chart datum, Extreme Storm Surges (ESSs) and Regional Sea Level Rise (RSLR), in Vancouver, Saint John, and Churrchill. Projections are provided based on CMIP5 and CMIP6 models under moderate and high radiative forcings. Note that for Churchill both rising and receding ETWLs are projected. Falling and receding scenarios are identified by ↗ and ↘ symbols, respectively.

				Vancouver ↗ (m)	Saint John ↗ (m)	Churchill ↗ (m)	Churchill ↘ (m)
	EAT			5.02	8.83	4.85	0.01
	Chart datum			-2.88	-4.75	-2.47	-2.47
	ESS			0.67	0.63	1.27	-0.75
RSLR	Moderate	CMIP5	Short-term	[0.03; 0.25]	[0.01; 0.27]	[-0.50; -0.09]	
	Moderate	CMIP5	Long-term	[0.21; 0.51]	[0.13; 0.51]	[-0.96; -0.45]	
	Moderate	CMIP6	Short-term	[-0.02; 0.73]	[0.02; 0.96]	[-0.58; 0.47]	
	Moderate	CMIP6	Long-term	[-0.19; 2.06]	[-0.13; 2.33]	[-1.18; 1.3]	
	High	CMIP5	Short-term	[0.04; 0.29]	[-0.07; 0.34]	[-0.49; -0.07]	
	High	CMIP5	Long-term	[0.25; 0.69]	[0.16; 0.76]	[-0.90; -0.39]	
	High	CMIP6	Short-term	[-0.04; 1.00]	[-0.06; 1.24]	[-0.67; 0.73]	
	High	CMIP6	Long-term	[-0.09; 3.08]	[-0.09; 3.53]	[-1.52; 2.54]	
ETWL	Moderate	CMIP5	Short-term	[2.84; 3.05]	[4.73; 4.98]	[3.15; 3.56]	[-3.71; -3.30]
	Moderate	CMIP5	Long-term	[3.01; 3.32]	[4.84; 5.23]	[2.68; 3.20]	[-4.17; -3.66]
	Moderate	CMIP6	Short-term	[2.78; 3.54]	[4.74; 5.68]	[3.07; 4.11]	[-3.79; -2.74]
	Moderate	CMIP6	Long-term	[2.62; 4.87]	[4.59; 7.04]	[2.46; 5.01]	[-4.39; -1.84]
	High	CMIP5	Short-term	[2.84; 3.10]	[4.64; 5.05]	[3.16; 3.58]	[-3.70; -3.28]
	High	CMIP5	Long-term	[3.05; 3.50]	[4.87; 5.47]	[2.75; 3.25]	[-4.11; -3.60]
	High	CMIP6	Short-term	[2.77; 3.81]	[4.65; 5.95]	[2.98; 4.38]	[-3.88; -2.48]
	High	CMIP6	Long-term	[2.72; 5.89]	[4.62; 8.24]	[2.13; 6.19]	[-4.73; -0.67]

5.4.2 Impacts and vulnerabilities

The affected coastal areas are delineated based on the ETWLs. The results related to high radiative forcing during the long- and short-term futures are shown in Figures 5.6 and A.4 (Supplementary Materials), respectively. The affected areas based on moderate radiative forcing for these periods are displayed in Figures A.3 and A.5 both in the Supplementary Materials, respectively. In all these figures, the top three rows lay out the extent of coastal flooding in Vancouver, Saint John, and Churchill, while the bottom rows display projected receding in Churchill. In each row, the affected areas based on CMIP5 and CMIP6 projections are shown in the left and right panels; and in each panel, the minimum and maximum of the flooded/receded area are depicted with light and dark colors, respectively.

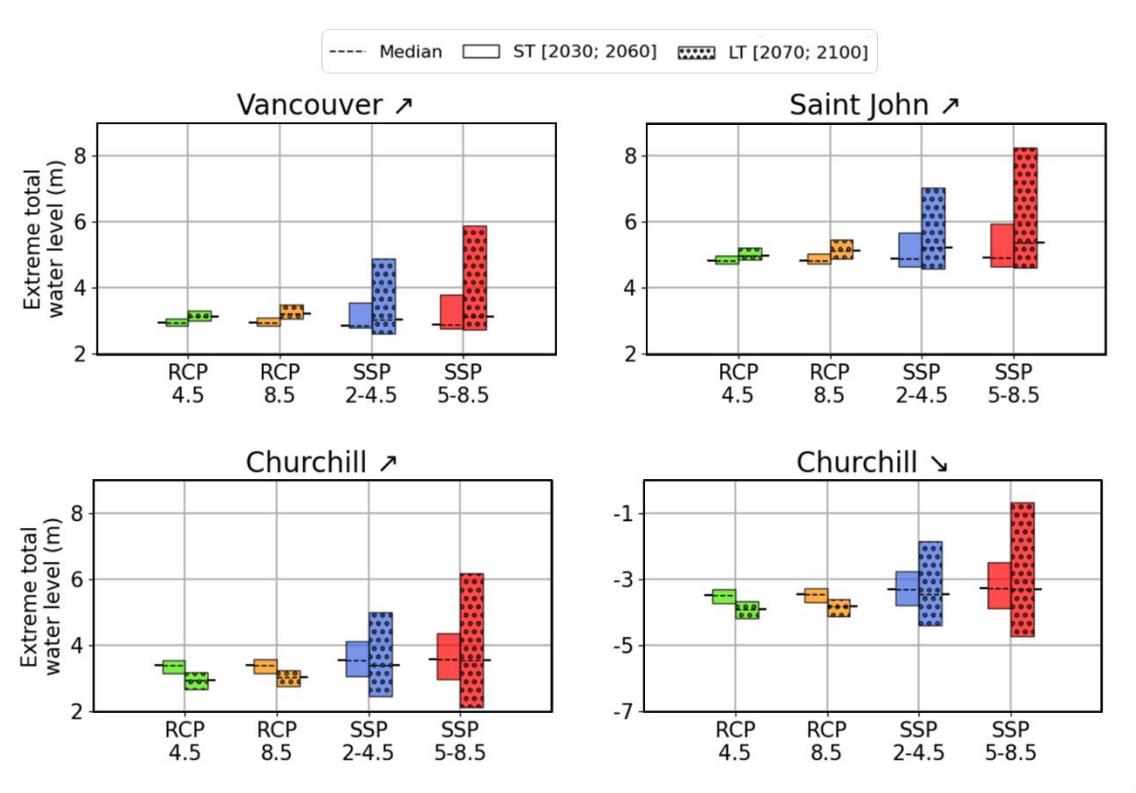

Figure 5.5 Projections of Extreme Total Water Level (ETWL) rise in Vancouver and Saint John (top row) as well as rising and receding ETWL in Churchill (bottom row) considering CMIP5 and CMIP6 models under moderate and high radiative forcing for short-term and long-term futures. Bars are showing the projected ranges. The dashed line inside each bar shows the median projection.

It is clear from Figure 5.6 that while both CMIPs present similar minimum values, their maximum affected areas diverge significantly. For instance, the maximum flooded area by CMIP6 is almost double of the one given by CMIP5 for Vancouver. In Vancouver, the entire south shore can experience flooding under both CMIPs. However, on the north shore, the extent of flooding differs between CMIP5 and CMIP6 models. The port could be entirely submerged based on CMIP6 projections, potentially leading to major floodings with a maximum ETWL of up to 5.89 m. The right panel related to Vancouver reveals that water can reach deep into the land, reuniting both sides of False Creek and Vancouver Harbor. Such a catastrophic event would enclose Downtown Vancouver, depriving inhabitants to exit the city by land transportation.

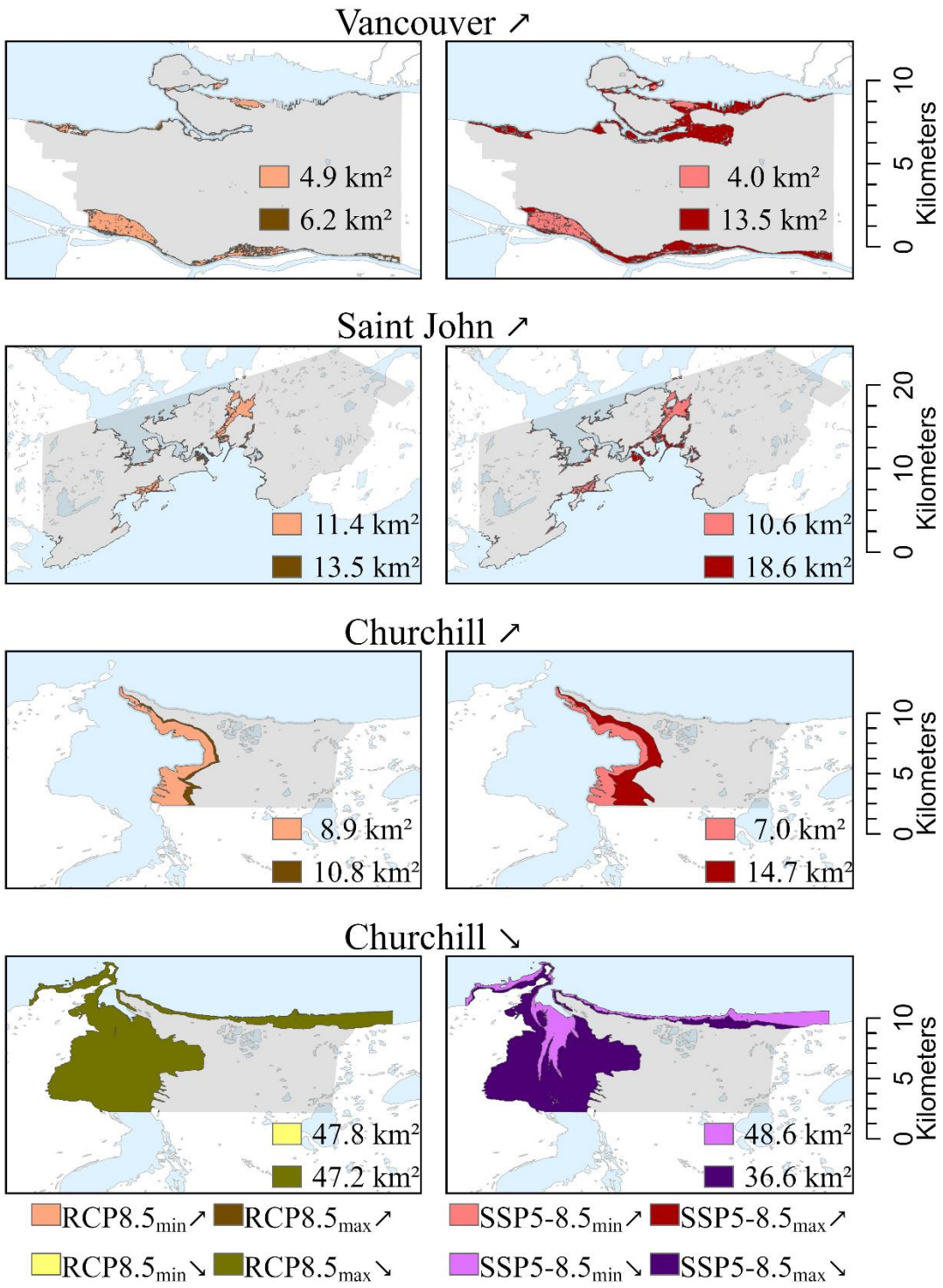

Figure 5.6 Projected ranges of inundated/receded areas in the three considered cities based on estimated Extreme Total Water Level (ETWL) under high radiative forcing during the long-term future for CMIP5 (left) and CMIP6 (right) models. The top three rows show the scenario of rising sea levels in Vancouver, Saint John and Churchill. The bottom row depicts the receded scenario in Churchill caused by the fall in the regional sea level.

Both CMIP projections estimate that the buildings on the southern and northern shores of the Saint John River could go underwater. More precisely, important facilities in the port of Saint John, such as the Long Wharf Terminal, the Marco Polo Cruise Terminal, and some of the piers could be damaged under extreme flooding. Figure 5.6 also shows that a significant amount of water reaches deep into the residential areas based on both projections. The 5.47 m increase from CMIP5 and the 8.24 m rise from CMIP6 would divide the territory into two parts, with no road remaining to link the western to the eastern parts of the city.

In Churchill, all rising scenarios envisage a vast flooded area over the west shore and the extent of this flooding can be even more than in Vancouver. While in the three cities, there is no tangible difference between the minimum and the maximum ETWL based on CMIP5 models, a divergence up to ~12 km^2 (in Vancouver) is seen between these estimates given CMIP6 models. Comparisons based on Figures 5.6, A.3, A.4 and A.5 reveal that the long-term ranges are broader, and their maximum extents are greater than those during short-term futures. Wider divergences in projections over time align with results from other research on climatic variables (Bourdeau-Goulet & Hassanzadeh, 2021; Crévolin, 2023). Based on all possible outcomes, the most conservative projection of inundated areas reveals 3.7, 10.5, and 7.0 km^2 of affected area for Vancouver, Saint John, and Churchill, respectively. We will discuss potential vulnerability to flooding further below. However, another alarming condition can be due to potential receding in Churchill, which can introduce tremendous challenges to its port. Theoretically, there is a navigational path between the Churchill River and the Hudson Bay, and there would be water in the deeper portion of the port. However, the water level in the channel and near the pier could fall by maximum 4.73 m according to the high radiative forcing under CMIP6 projections in the long-term future (see Table 5.2). In Churchill, the maximum draft allowance is 9.2 (SHIPNEXT, 2024), representing the minimum vertical distance between the water surface and the bottom-most point of the vessel. If such a receding in the water level happens, it can severely affect watercraft navigation and can lead to considerable delays, as vessels might have to wait several hours to arrive or depart from the port. Under the recession scenario, both CMIP projections reveal retreat from the Churchill River. The minimum receded area in Churchill reaches 36.6 km^2.

According to the rising scenarios of ETWL and the extent of flooded areas in the three cities, we quantify the potential vulnerabilities to the communities and socio-economic sectors. Figure 5.7 exhibits the vulnerability of population, public spaces, as well as land and infrastructure due to rising ETWL in Vancouver, Saint John and Churchill. Each panel presents the minimum and maximum values based on CMIP5 and CMIP6 projections under moderate and high radiative forcings in the long-term period. Similar assessments are shown for the short-term period in Figure A.6 in the Supplementary Materials. We note that large uncertainty in the ETWL estimation does not necessarily propagate into the vulnerability in the affected population as similar percentages for affected population can be seen under eight possible ETWL estimates. Up to 14% of the population in Vancouver, 49% in Saint John, and 100% in Churchill could be potentially affected by extreme flooding in the long-term future. Within affected communities, 45% are visible minorities in Vancouver, and up to 64% are Indigenous in Churchill. Moreover, a considerable portion of affected communities (48%-65%) in all cities have an income of less than $50K, indicating low resilience and long recovery after inundations. It is also noteworthy to point out that 9% to 20% of the people who could be affected are over 65 years old with potential health concerns that can further complicate reaction during flooding events.

We also look at the influence of coastal flooding on recreational and educational spaces, as well as on health, public, and community services. Vancouver and Saint John present similar results, as the highest impact is seen on recreational services. However, it is important to note that while the percentage of affected health services is relatively low, i.e., 10% for Vancouver and 14% in Saint John, it includes up to ~118,000 m^2 and ~30,000 m^2 of health buildings in these cities. Thus, it could disturb hospital operations, as loss of electrical power and water supplies can alter crucial medical actions (Yusoff et al., 2017). The situation in Churchill is completely different since the minimum ETWLs do not affect public spaces, but the maximums can lead to considerable outcomes as the fire stations and the police services lie in a region at risk. Overall, about 12% of the land (29000 buildings) in Vancouver, 6% of the land (3200 buildings) in Saint John and 6% of the land (300 buildings) in Churchill could be affected under the worst-case flooding scenario.

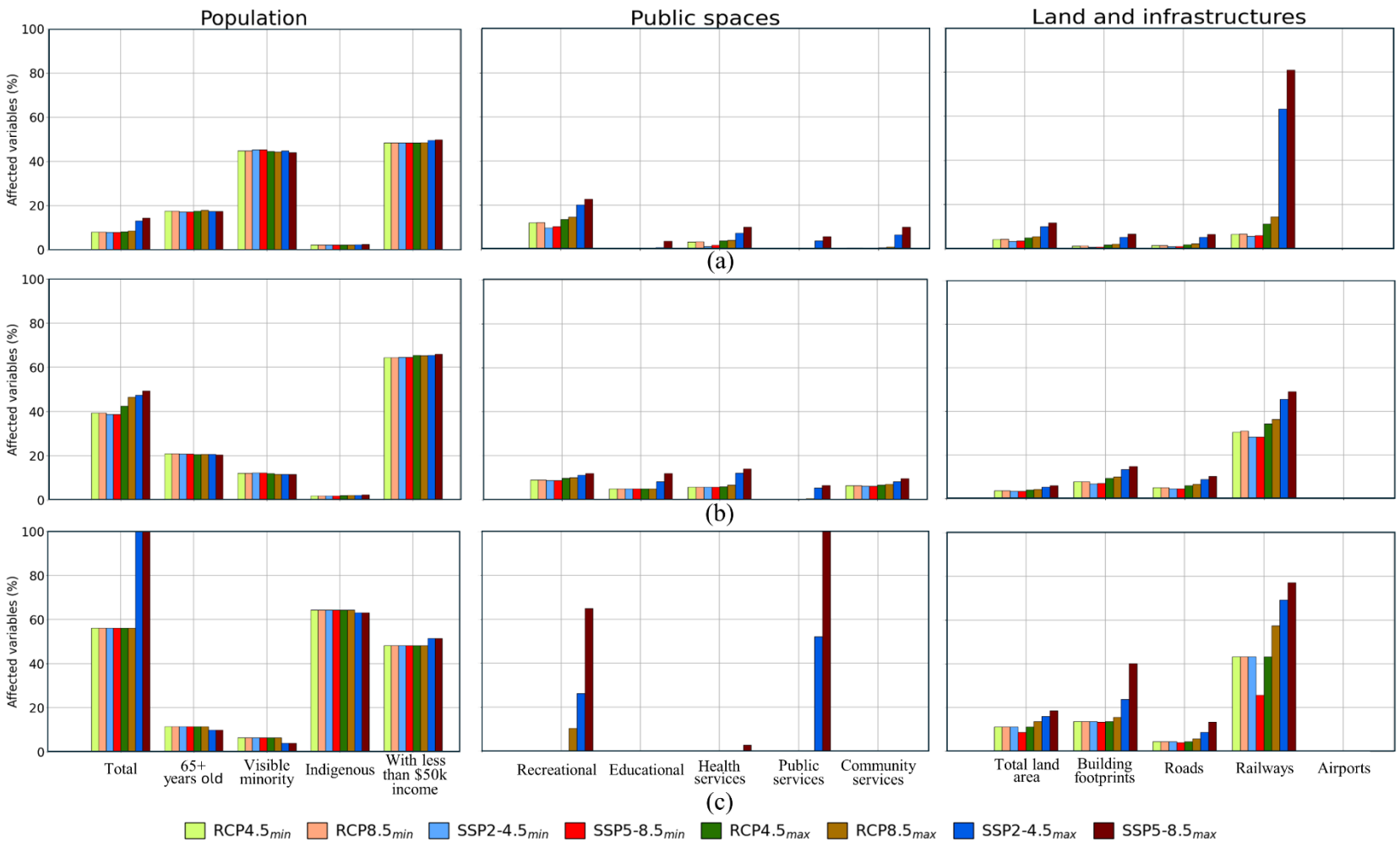

Figure 5.7 Vulnerabilities in population (left column), public spaces (middle column), as well as land and infrastructure (right column) due to Extreme Total Water Level projections in (a) Vancouver, (b) Saint John and (c) Churchill under long-term futures

As it is evident in Figure 5.7, the railways would be the most affected infrastructure in the three cities; however, this vulnerability is subject to a large uncertainty. In Vancouver 5% to 81% of railways might become unavailable for a few hours during extreme flooding. These ranges can be from 28%-49% in Saint John and 25%-77% in Churchill. This damage can impact the cities' economy as railways are essential for transporting goods to and from the port. Moreover, inundated rail lines can delay daily commute and tourism. Railways are even more vital in Churchill as they represent the only land transportation to the rest of the country and therefore, they are key to food security, as well as supplying goods and commodities (Town of Churchill, 2020). The vulnerabilities for the short-term future, shown in Figure A.6, are smaller to those in the long-term. There is a major difference in the extent of the affected railways between the two periods, and a considerably lower impact on public spaces in the short-term. Even with the minimum estimates of ETWLs and the least devastating floodings, thousands of people and hundreds of buildings can be affected in Vancouver, Saint John and Churchill.

5.5 Conclusions

Continuous climate change-induced RSLR poses a considerable threat to coastal environments, which are home to large populations and serve as vital commercial, agricultural and industrial hubs. The combination of RSLR with local extreme events such as high tides and storm surges can lead to ETWLs. Canada can be significantly impacted by SLR, although the extent and nature of these impacts vary across the country. This variability is further exacerbated by isostatic rebound, which leads to considerable differences in crustal vertical velocity. In this study, we project future ETWLs in Vancouver, Saint John, and Churchill, located in the Pacific, Atlantic and Arctic coasts of Canada, respectively. We consider RSLR projections under moderate and high radiative forcings based on CMIP5 and CMIP6 ensembles during short- and long-term futures. We use harmonic models to simulate astronomical tides and determine the EAT based on a frequency method in the historical period. Similarly, we calculate the ESS from the residuals of the observed water levels and the simulated astronomical tides. Using the estimated ETWLs and a simple bathtub model, we estimate the extent of coastal flooding, exposure and vulnerability by matching future water levels with the cities' DEM. Our results show that RSLR projections have a significantly larger range based on CMIP6 than CMIP5 projections, particularly during the long-term future. While a

considerable positive RSLR is projected for Vancouver and Saint John, Churchill shows a receding condition under CMIP5 as well as both rising and receding conditions under CMIP6 projections. Our results reveal that under high-radiative forcing and during long-term scenarios, ETWLs for Vancouver can increase in the range of 2.72 to 5.89 m. This range in Saint John can be between 4.62 and 8.24 m. As for Churchill, ETWLs can greatly differ from a 4.73 to 0.67 m receding to a 2.13 to 6.19 m rise, resulting in both flooding extents and dried-out areas in short- and long-term periods. We note that the case of Churchill is critical to policy making, as at least based on current CMIP6 projections, there is not even a certainty about the direction of change in ETWL and both rising and receding sea level can be possible futures. This uncertainty can jeopardize development in Churchill Port, which has recently gone under Indigenous ownership.

The impacts of these ETWL variations in the three cities can be substantial, especially under the high radiative forcing during the long-term future. We find that 14% of the population in Vancouver, 49% in Saint John, and up to 100% in Churchill could be potentially affected by coastal flooding in the long-term future. Seniors, visible minorities, Indigenous communities and low-income residents are the most vulnerable populations to rising ETWL. For example, 45% of the affected people in Vancouver belongs to visible minority groups, while up to 65% of affected Churchill's inhabitants are Indigenous. Our vulnerability assessments also reveal that the railways would be the most affected infrastructure in these cities. Coastal flooding can damage up to 118,000 m^2 and 30,000 m^2 of health services in Vancouver and Saint John, respectively. In Churchill, rising ETWLs could flood fire stations and police services, leaving the entire population at risk. A key conclusion of our research is that the uncertainties in ETWLs and their resulting coastal extents do not necessarily affect the vulnerability assessment as the affected proportions of the socioeconomic factors remain comparable, regardless of considered CMIP models. Based on the estimated ETWLs, even the least devastating flooding could affect thousands of people and damage hundreds of buildings in Vancouver, Saint John and Churchill.

While the employed methodology is generic, it can be enhanced in future works. For instance, storm surges might be influenced by climate change due to alterations in wind and pressure patterns (Inácio et al., 2023). Thus, future work should estimate ESS under changing climate conditions

rather than extracting it from the historical series. Moreover, in our study ETWLs are determined based on the summation of RSLR, ESS and EAT, using the strategy used by Irani et al. (2024). In Canada, Daigle (2020) applied a similar method to project ETWLs in New Brunswick. An obvious limitation of this approach is the fact that it does not consider the effect of waves. In fact, high-frequency waves can play a role during coastal floodings but are not recorded in tide gauge measurements (Li et al., 2022; Reguero et al., 2012; Vousdoukas et al., 2017) and need to be modeled (Amores et al., 2021; Chini & Stansby, 2012; Didier et al., 2019a). Inconsideration of waves makes the projected ETWLs a conservative estimation. However, on the other hand, summation of EAT and ESS assumes a perfect alignment of these two components, which has a low probability of occurrence. Therefore, a more thorough analysis is required to investigate the interdependence between these ETWL components. Moreover, our calculations of affected communities, public spaces, and infrastructure are based on 2021 Canadian census data. This analysis can be updated using future projections of these socio-economic factors to provide a more precise image of future vulnerabilities. We hope our study inspires future studies for better understanding the future vulnerabilities to sea level fluctuations in Canada, the country with the world's longest shoreline.

Acknowledgements

This research has been financially supported by the NSERC Discovery Grant (NSERC-DG RGPIN-2020–05563) held by Elmira Hassanzadeh and the New Frontiers in Research Fund grant (NFRFE-2020-01298) held by Ali Nazemi. Partial funding was also provided to Cristina Catita and Carlos Antunes by the Portuguese Fundação para Science and Technology (FCT) I.P./MCTES through national funds (PIDDAC) – UIDB/50019/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDB/50019/2020), UIDP/50019/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDP/50019/2020) and LA/P/0068/2020 (https://doi.org/10.54499/LA/P/0068/2020).

Open Research

Data Availability Statement: CMIP5 sea-level rise projections are obtained from the Integrated Climate Data Center (ICDC), CEN, University of Hamburg, Germany, available at https://www.cen.uni-hamburg.de/en/icdc/data/ocean/ar5-slr.html. For CMIP6, sea level projections are obtained from the NASA Sea Level Change Team, available at https://zenodo.org/records/6382554. Vertical allowances from the Canadian Extreme Water Level Adaptation Tool (CAN-EWLAT) are available online from the Bedford Institute of Oceanography: http://www.bio.gc.ca/science/data-donnees/index-en.php. Canadian Hydrographic Service (CHS) provides the observed water levels from tide gauges online in https://www.isdm-gdsi.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/index-eng.htm. The census data from the Computing in the Humanities and Social Sciences (CHASS) at the University of Toronto is from this site https://datacentre.chass.utoronto.ca/. Building footprints are obtained from https://opendata.vancouver.ca/pages/home/ for the city of Vancouver and https://catalogue-saintjohn.opendata.arcgis.com/ for the city of Saint John, while generic infrastructure and land territory information are obtained from Géoindex in https://geoapp.bibl.ulaval.ca/ and Geospatial Data Extraction in https://maps.canada.ca/czs/index-en.html. The latter also gives information about Churchill's digital elevation model, while Saint John and Vancouver's are available at High Resolution Digital Elevation Model (HRDEM) at https://open.canada.ca/data/en/dataset/957782bf-847c-4644-a757-e383c0057995. Churchill's bathymetric profile are obtained at the Canadian Hydrographic Service Non-Navigational (NONNA) portal: https://open.canada.ca/data/en/dataset/d3881c4c-650d-4070-bf9b-1e00aabf0a1d.

CHAPITRE 6 DISCUSSION

Les méthodes utilisées dans les chapitres 4 et 5 permettent d'approfondir les connaissances générales de la HNM au Canada, qui est différente des autres pays en raison de la présence significative du rebond post-glaciaire. L'étude s'étend sur l'ensemble du Canada en se concentrant sur trois villes, soit Vancouver, Saint John et Churchill, dans l'optique d'offrir une étude détaillée des côtes ouest, est et nord du Canada. Ce chapitre offre une validation de la synchronicité des ondes de tempête avec les conditions météorologiques historiques ainsi qu'une analyse de la meilleure distribution ajustée à la FRE des ondes de tempête positives et négatives des trois stations considérées.

6.1 Validation des ondes de tempête

Cette section fournit une validation de l'amplitude et de la synchronicité de l'onde de tempête estimée au chapitre 5. Tel que mentionné dans ce dernier, les ondes de tempête de notre analyse correspondent à la différence entre les données horaires des hauteurs d'eau observées et les prédictions horaires des marées astronomiques. Les résidus qui en découlent permettent de connaitre l'impact maximal historique qu'ont eu les ondes de tempête positives et négatives depuis 1950. Il s'agit aussi d'une méthode alternative pour savoir le moment et l'intensité d'une tempête.

En effet, les ondes de tempête sont strictement liées au gradient de la pression locale et à l'effet des vents tangentiels à la surface de l'eau (Mulia, 2023; Ramos Valle, 2018; Tadesse et al., 2020). En Amérique du Nord, les ouragans combinent ces deux facteurs, ce qui a pour effet d'élever ou de descendre le niveau régional de l'eau. Ainsi, il est intéressant d'examiner si une relation existe entre les résidus du chapitre précédent, la pression atmosphérique et les vents avoisinant la station marégraphique.

Le Canada ne fait pas exception aux tempêtes et aux ouragans dévastateurs. Danard et al. (2003) énumèrent les événements les plus marquants qui ont mené à des ondes de tempête historiques. Par exemple, Saint John dans les Maritimes a été durement ravagé par les tempêtes suivantes : *Saxby Gale* en octobre 1869, *Groundhog Day* en février 1976 et *The Storm of the Century* en octobre

1993. Ces tempêtes ont causé des conséquences financières catastrophiques sur les côtes en détruisant plusieurs quais, bâtiments et bateaux, ainsi qu'en interrompant l'électricité et les communications locales (Parkers et al., 1997). La Figure 6.1 expose la synchronicité des événements d'ondes de tempête (résidus) avec le minimum de pression atmosphérique et le maximum des vents de surface durant le mois de février 1976, soit durant la tempête du *Groundhog Day*.

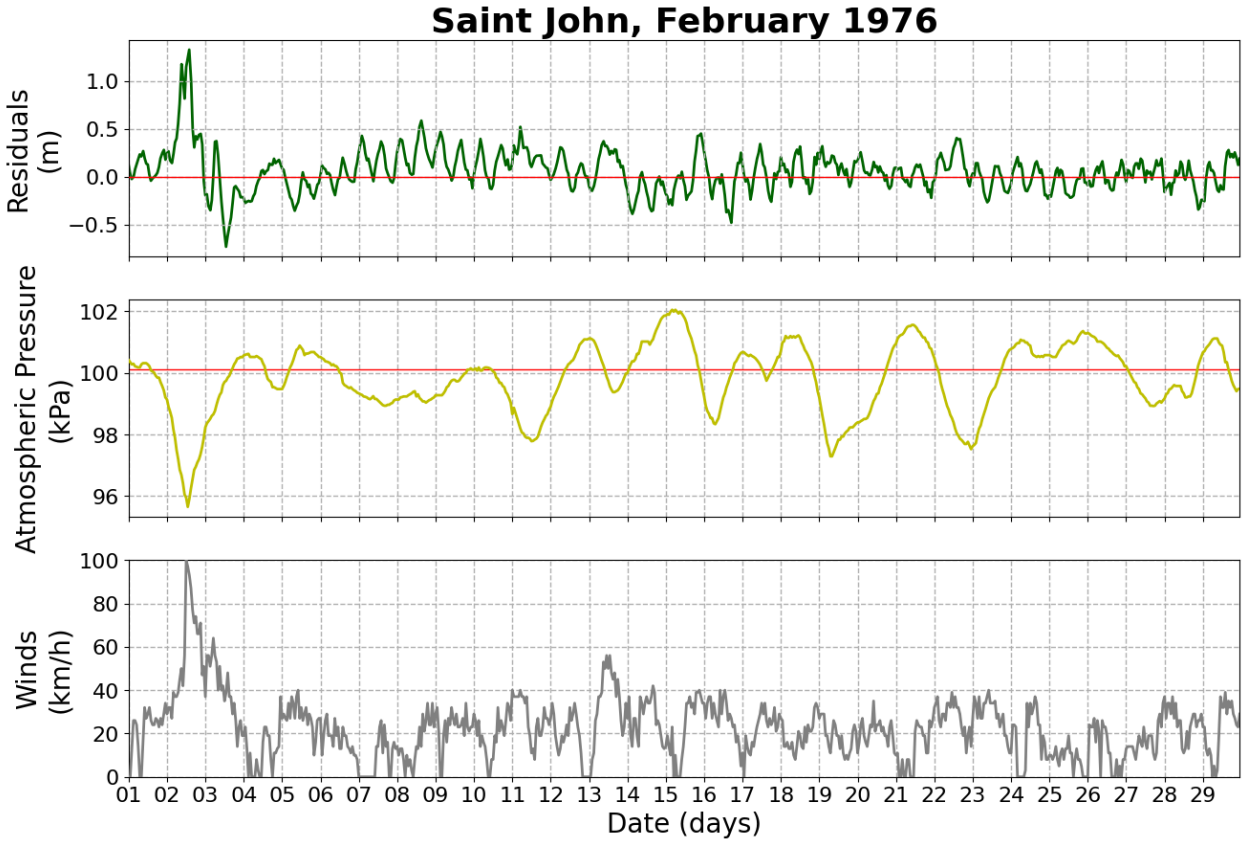

Figure 6.1 Analyse des conditions météorologiques à Saint John lors du mois de février 1976. Le panneau en haut offre les résidus, alors que les panneaux du milieu et du bas présentent la pression atmosphérique et les vents enregistrés aux stations climatiques avoisinantes.

L'événement du 2 février 1976 est sans équivoque, il est parfaitement synchronisé avec le passage d'une dépression importante dans le gradient de la pression atmosphérique et avec des vents violents. Ceci respecte précisément la revue de la littérature énoncée dans le chapitre 5. Effectivement, une faible pression atmosphérique produit un effet de succion de l'eau, ce qui

l'élève. Les vents qui se dirigent vers la côte augmentent aussi la hauteur de l'eau observée. La parfaite coïncidence entre les trois éléments de la figure ajoute à la validité d'utiliser des résidus pour estimer les ondes de tempête. La validation de cette technique a aussi été faite en annexe B.1 pour les tempêtes historiques de Vancouver et Churchill. La Figure B.1 confirme la synchronicité des trois éléments lors de la tempête hivernale *Hanukkah Eve* du 14 décembre 2006 à Vancouver (Read & Reed, 2013), alors que la Figure B.2 introduit un événement où les ondes de tempête sont maximales alors que la pression atmosphérique a chuté drastiquement et que les vents se sont considérablement intensifiés.

Sur la figure ci-dessus, la ligne rouge correspond à une onde de tempête nulle dans la sous-figure du haut, et à la pression atmosphérique moyenne de 1953, début des enregistrements, à 2023, soit l'année du téléchargement. Les valeurs de la pression atmosphérique et du vent ont été obtenues par l'outil d'extraction de données climatiques (Government of Canada, 2018) pour les stations climatiques des aéroports de Vancouver, Saint John et Churchill.

6.2 Ajustement des distributions d'ondes de tempête

La présente section se concentre sur l'acquisition de la meilleure distribution répliquant la FRE des ondes de tempête pour les trois stations à l'étude. Pour ce faire, les résidus maximaux de toutes les années de 1950 à 2023 sont regroupés afin d'établir la FRE pour les ondes de tempête positives. À l'inverse, les résidus minimaux sont utilisés pour les ondes de tempête négatives. Ensuite, une série de distributions statistiques sont ajustées afin de représenter la FRE. Les paramètres optimaux des distributions sont obtenus par la fonction statistique de la bibliothèque *Scipy* (Virtanen et al., 2020) dans le langage de programmation *Python*. Le panneau (a) de la Figure 6.2 présente la FRE en couleur bleue pour Vancouver, ainsi que les 16 distributions comparées au sein de cette analyse.

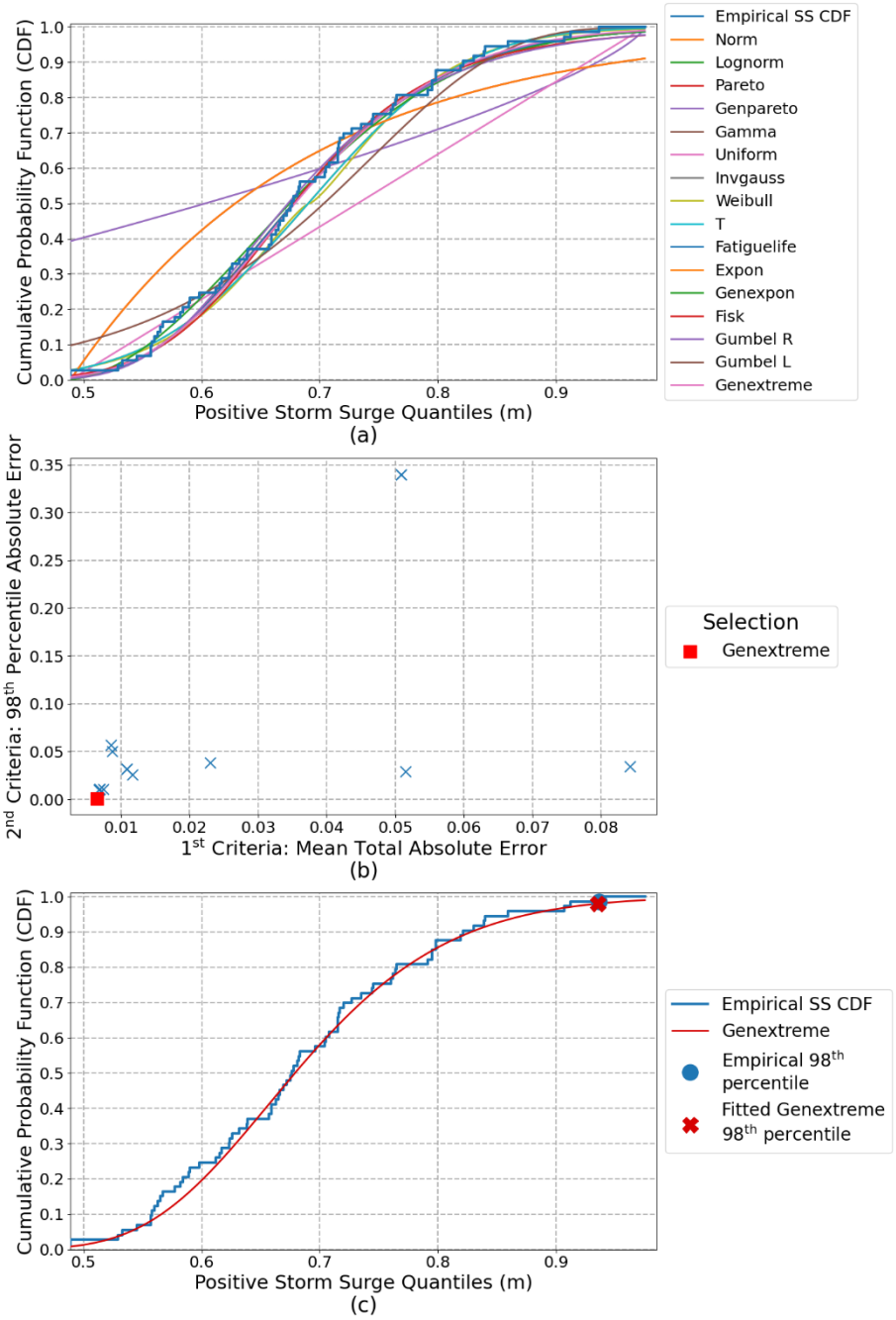

Figure 6.2 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête positives à Vancouver. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie.

La seconde sous-figure, quant à elle, introduit la frontière de Pareto comme un outil d'optimisation servant à concevoir une solution à plusieurs objectifs (Grierson, 2008; Hartikainen et al., 2011; Koski, 1993). Dans ce mémoire, nous utilisons cet outil simple afin de chercher la solution optimale

entre deux critères de sélection. Tout d'abord, l'erreur absolue moyenne est choisie comme premier critère, tandis que le second examine l'erreur absolue du 98e centile entre la FRE et la distribution ajustée. La deuxième condition est instaurée dans le but de respecter la norme de conception d'une période de retour de 50 ans (98e centile) établie au chapitre 5. Ainsi, la meilleure distribution ajustée pour les résidus maximaux des ondes de tempête positives à Vancouver est représentée par la variable aléatoire continue de valeurs extrêmes généralisées, plus connue sous son nom anglais de *Generalized Extreme Value* (GEV). La fonction de répartition GEV est ensuite comparée à la FRE dans la sous-figure (c), où une comparaison des 98e centiles y est aussi visible. L'annexe B.2 complémente cette section en offrant une analyse similaire pour les villes de Saint John et Churchill (Figure B.3 et Figure B.4), ainsi que pour les ondes de tempête négatives des trois villes à l'étude (Figure B.5, Figure B.6 et Figure B.7). Le Tableau 6.1 résume les meilleures distributions ajustées aux FRE.

Tableau 6.1 Meilleures distributions ajustées aux fonctions de répartition empiriques des résidus maximaux et minimaux pour les trois villes à l'étude, soit Vancouver, Saint John et Churchill

	Résidus maximaux	Résidus minimaux
Vancouver	Valeurs extrêmes généralisées	Fisk
Saint John	Gumbel (r)	Weibull
Churchill	Valeurs exponentielles généralisées	Gumbel (r)

À noter que l'utilisation du deuxième critère peut être modifiée dépendamment de l'analyse souhaitée. Dans le cadre de ce mémoire, seulement la période de retour de 50 ans (98e centile) est étudiée. Or, le second critère serait le 50e centile ou le 99e centile dans l'éventualité où la période de retour à l'étude était de 2 ans ou de 100 ans, par exemple. Sinon, le second critère pourrait aussi être converti en critères d'information généraux. Ces derniers sont connus sous les acronymes AIC (Akaike Information Criterion) et BIC (Bayesian Information Criterion) et sont des outils simples qui permettent de choisir parmi plusieurs modèles (Vrieze, 2012). Ces deux critères se différencient par l'importance qu'ils attribuent à l'ajustement et à la complexité du modèle. Le critère BIC pénalise davantage le nombre de paramètres, soit la complexité du modèle (Kuha, 2004).

CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le mémoire se termine par une discussion des principales conclusions et recommandations. Tout d'abord, le chapitre débute en rappelant les lignes directrices des chapitres 4 et 5, puis en réitérant les résultats répondant aux trois objectifs de la recherche. Ensuite, les contraintes et les limites sont expliquées, ce qui laisse place à des recommandations pour d'éventuelles analyses.

7.1 Sommaire des travaux

Le réchauffement planétaire influence la HNM mondiale en raison de l'expansion thermique des océans et de la fonte des glaciers et des calottes polaires d'Antarctique et du Groenland. Les eaux canadiennes ne font pas exception à cette hausse globale, mais présentent des variations régionales hétérogènes, et ce, dû aux déplacements verticaux irréguliers de la croûte terrestre. Ce mémoire se divise en trois objectifs, soit (1) déterminer la répartition spatiale des tendances du niveau de l'eau à travers le Canada; (2) comparer les projections des modèles climatiques de CMIP5 et CMIP6; et (3) évaluer l'impact des inondations côtières sur la vulnérabilité de la population, des endroits publics, du territoire et des infrastructures des côtes canadiennes.

En premier lieu, le chapitre 4 répond au premier objectif en offrant un bilan national de l'enregistrement du niveau de l'eau selon le parc de stations marégraphiques canadiennes et en ajoutant une analyse détaillée de trois villes côtières canadiennes, soit Vancouver, Saint John et Churchill. Les niveaux d'eau horaires sont obtenus, puis sont soumis à une série de quatre tests afin de sélectionner les marégraphes ayant suffisamment de données pour ensuite calculer les tendances linéaires de 1993 à 2022 sur tout le territoire canadien. Malheureusement, il y a un profond manque de données, ce qui explique que seulement 44 des 1018 stations marégraphiques permettent une analyse statistique.

Puis, le chapitre 5 dévoile la méthodologie et les résultats d'un article soumis à *Earth's Future* servant à répondre aux objectifs 2 et 3. La première réalisation de l'article concerne l'estimation de futurs NETEs obtenus par la combinaison entre les projections futures de la HNM et les valeurs extrêmes des marées astronomiques et des ondes de tempête. Les niveaux d'eau sont déterminés

pour les côtes ouest, est et nord du Canada, symbolisées par les villes de Vancouver en Colombie-Britannique, de Saint John au Nouveau-Brunswick et de Churchill au Manitoba. La seconde réalisation de l'article est d'utiliser ces futurs niveaux d'eau afin de délimiter les régions qui seront à risque d'inondations côtières ou qui expérimenteront des dangers pour la navigation. Finalement, la troisième réalisation de cette étude est d'utiliser les aires potentiellement inondées dans le but de déterminer la susceptibilité au danger de la population, des endroits publics, du territoire et des infrastructures des régions à l'étude. Tout au long de l'article, les niveaux d'eau résultants, les aires calculées et l'évaluation de la vulnérabilité découlent de la comparaison entre la cinquième et la sixième phase des projets CMIPs. Ce travail peut donc être utilisé par les différents paliers gouvernementaux des trois villes à l'étude afin de savoir si des mesures, ou non, doivent être prises pour mettre à jour les plans d'adaptation et de protection des berges et des infrastructures côtières.

Ensuite, le chapitre 6 présente une discussion adressant certains éléments clés, dont une validation des ondes de tempête qui sont acquises de la différence entre les valeurs horaires des observations des marégraphes avec les valeurs théoriques horaires de la marée astronomique. Le chapitre termine en précisant les meilleures distributions ajustées aux FREs des résidus maximaux annuels d'ondes de tempête positives et négatives des trois villes étudiées.

7.2 Conclusions du mémoire

Le chapitre 4 témoigne, d'un côté, du manque de données significatif des marégraphes canadiens. Le parc de stations marégraphiques est bien réparti sur tout le territoire du Canada avec 1018 stations. Cependant, les niveaux d'eau horaires à l'intérieur de celles-ci ne sont pas toujours continus et se font assez rares dans le nord du Canada. En effet, seulement 40 stations ont satisfait aux critères imposés. Quatre stations dans le nord du Canada ont été ajoutées manuellement, avec des critères adoucis, afin d'avoir un maximum de stations dans cette région. En revanche, ces 5 stations ne permettent pas de bien représenter la répartition spatiale de l'augmentation ou de la réduction du niveau de l'eau à une échelle locale pour l'ensemble du nord du Canada. Malgré cela, les tendances linéaires paramétriques et non paramétriques des 44 stations sélectionnées ont tout de même permis de valider l'hétérogénéité dans la HNM au Canada. Leur degré de signification est aussi évalué avec un test statistique de p_{value}. L'Est canadien connait une HNM significative,

alors que l'ouest du Canada présente des tendances plus modestes, oscillant entre une augmentation et une réduction de la hauteur relative régionale de l'eau. Sinon, les stations nordiques proposent une forte hausse dans le nord-ouest, ce qui est inverse à la forte baisse significative dans le nord-est du Canada.

Puis, l'étude du chapitre 5 se concentre sur la HNM avoisinant le port de Vancouver, ayant une augmentation du niveau de l'eau de 2.62 à 5.89 mètres, et de la ville de Saint John qui devra se préparer à un accroissement de 4.59 à 8.24 mètres. La ville de Churchill, quant à elle, pourrait expérimenter des épisodes extrêmes de retrait de l'eau suivant une diminution de la hauteur de l'eau de 0.67 à 4.73 mètres, alors que les projections s'étalent aussi à un accroissement du niveau futur de l'eau de 2.13 à 6.19 mètres. Durant la période de 2070 à 2100, les scénarios à forçages radiatifs élevés de CMIP6 prévoient des inondations côtières pouvant couvrir près de 13.5 km^2 à Vancouver, 18.6 km^2 à Saint John et 14.7 km^2 à Churchill. Sinon, la baisse extrême de l'eau pourrait complètement assécher la rivière Churchill, ce qui découvrirait plus de 48.6 km^2 des terres, créant une voie terrestre traversant la rivière et provoquant ainsi des dangers de navigation pour les bateaux. Sinon, l'article fournit une évaluation de la vulnérabilité associée aux huit niveaux d'eau estimés, soit pour les deux projets CMIP5 et CMIP6, pour les scénarios modérés (4.5 Wm^{-2}) et élevés (8.5 Wm^{-2}), ainsi que pour les périodes à court terme (2030 à 2060) et à long terme (2070 à 2100). En bref, les services de santé sont en danger à Vancouver et Saint John, alors que plus de 118 000 m^2 et 30 000 m^2 de planchers d'hôpital seraient touchés dans le pire cas possible. La ville de Churchill présente une analyse aussi négative concernant les services publics, dont les casernes de pompiers et les postes de police seraient lourdement affectés. Finalement, la vulnérabilité de la population est un élément important de l'étude du chapitre 5. Plus précisément, plus de 50 000 personnes, dont 45% font partie des minorités visibles, pourraient être touchées par la pire inondation estimée à Vancouver. Près de 30 000 personnes à Saint John pourraient être troublées par des épisodes d'inondations côtières extrêmes, ce qui représente 39% de la région, alors que plus de la moitié de la communauté de Churchill se situe dans une région à risque.

De plus, le chapitre 5 dévoile que 81%, 49% et 77% des voies ferrées dans les villes de Vancouver, Saint John et Churchill pourraient être affectées si le pire scénario présenté devait se produire. Plus

précisément, de tels NETEs prévoient que ces infrastructures pourraient être inutilisables durant quelques heures, le temps que la marée redescende ou que les conditions météorologiques se calment. Or, certaines lignes de train pourraient être inondées de façon permanente suivant les tendances de la HNM. À travers le monde, environ 27% des routes et des voies ferrées sont exposées à des risques, dont environ 2.25 millions de dollars USD par an sont attribués aux dommages reliés aux inondations côtières (Koks et al., 2019). Au Canada, c'est plus de 40,000 kilomètres (Transport Canada, 2022) de voies ferrées qui contribuent aux économies locales et nationales afin de transporter des personnes, des biens et de la nourriture. Ces voies longent fréquemment le littoral, expliquant pourquoi elles sont particulièrement affectées par les inondations côtières. Le gouvernement du Canada (Transport Canada, 2023) a, par exemple, annoncé un important investissement en juillet 2023 pour améliorer la sécurité ferroviaire dans la péninsule gaspésienne au Québec. Pour ce faire, le projet prévoit tenir compte des projections climatiques jusqu'en 2050 en installant un système de drainage sous les rails et un grand mur de soutènement qui résistera aux forces des vagues, des ondes de tempête et des marées astronomiques extrêmes.

7.3 Limites et contraintes

Les analyses de tendance du chapitre 4 mettent de l'avant deux restrictions principales. La première fait référence au manque de données horaires des marégraphes canadiens. En effet, il n'y a que 40 stations qui respectent les critères de sélection pour l'analyse à long terme des stations du SHC. Quatre stations nordiques, ne respectant pas les critères établis, ont dû être ajoutées manuellement afin de mieux représenter le nord du Canada. Les faibles 44 stations sur 1018 témoignent d'un manque flagrant de données horaires du niveau des eaux des côtes canadiennes. Alors que certaines stations n'enregistrent plus depuis bien avant les années 2000, d'autres stations sont toujours opérationnelles, mais ont un pourcentage de données manquantes par année beaucoup trop élevé pour pouvoir être utilisées. L'amélioration du parc de stations marégraphiques est nécessaire afin de pouvoir bien représenter l'entièreté du vaste territoire canadien. Plus précisément, il est impératif d'ajouter, de réparer ou de mieux entretenir les 279 stations nordiques, dont seulement la station de Churchill offre présentement des données suffisantes.

Sinon, le chapitre serait amélioré s'il examinait l'accélération au sein des données horaires dans les stations marégraphiques. Les niveaux d'eau affectés par le réchauffement climatique ne peuvent être simplement représentés par une tendance linéaire et doivent comprendre l'accélération et la non-stationnarité issue des changements climatiques (Baldan et al., 2022). L'analyse de tendance linéaire de ce mémoire se voulait rapide, facile et efficace afin d'offrir une compréhension générale de l'allure des données historiques sur l'ensemble du territoire canadien. Le choix d'y aller pour une analyse préliminaire de la sorte a permis d'introduire dans ce mémoire la visualisation de la répartition spatiale de l'amplitude et du signe de l'évolution du niveau de l'eau entre les années 1993 à 2022, et ce, au lieu de la repousser à une analyse subséquente.

Puis, il est important de rappeler les limitations et les contraintes du chapitre 5. En premier lieu, l'article 1 étudie les niveaux d'eau obtenus depuis les marégraphes canadiens. Ceux-ci n'incluent pas l'effet des vagues, dont les fluctuations de la hauteur de l'eau sont trop rapides pour être enregistrées. Ainsi, l'analyse se concentre sur le niveau de l'eau calme, aussi connu sous le terne anglais de *still water level*. L'ajout de l'effet des vagues nécessiterait une analyse locale spécialisée pour chaque station, sachant que leurs impacts dépendent grandement de comment la ville est localisée sur le littoral. Les niveaux d'eau extrêmes sont plus affectés par les vagues lorsqu'une ville se situe sur une côte directement liée à l'océan, alors qu'ils sont moins affectés si la ville est protégée par une baie ou un système de protection qui atténuerait l'effet des vagues (Li et al., 2022).

De plus, l'analyse de l'article 1 considère des NETEs provenant de la combinaison de deux événements rares, soit la marée astronomique et l'onde de tempête, d'une fréquence de 8.75 heures au sein d'une année représentant la période de retour de 50 ans des niveaux d'eau annuels maximaux. L'hypothèse de coïncidence parfaite produit un événement résultant encore plus rare. Par conséquent, la période de retour globale de chaque niveau de l'eau estimé est largement au-dessus du standard de 50 ans visé par cet article. Une analyse ultérieure devra utiliser une méthode prenant en considération la période de retour totale pour qu'elle ne dépasse pas une période de retour de 50 ou 100 ans, et ce, afin de demeurer dans les standards de conception canadiens (Canada's Task Force on Flood Insurance and Relocation, 2022).

Puis, tel qu'il a été mentionné dans le chapitre 5, la troisième limitation de l'article provient de l'utilisation des ondes de tempête historiques afin de déterminer un événement extrême futur. Or, les changements climatiques causent une variation dans les températures, les vents et les autres conditions météorologiques, ce qui a pour effet de modifier les comportements locaux des ondes de tempête (Inácio et al., 2023). De plus, la hausse de la température des océans intensifie les vents au sein des ouragans (Madge et al., 2024), ce qui aura comme impact d'amplifier les ondes de tempête durant ces événements catastrophiques. Sinon, Muis et al. (2023) présentent l'une des premières études qui traite des mesures d'adaptation reliées aux risques d'inondations futurs en tenant compte de potentiels changements dans les données extrêmes du climat et dans les ondes de tempête, et ce, selon les projections climatiques de CMIP6. Similairement, ce mémoire pourrait être amélioré s'il considérait l'évolution des facteurs socio-économiques. En effet, les analyses ont été effectuées en utilisant les données des aires de dissémination du recensement canadien de 2021 pour les variables reliées à la population, tandis que les indices présentant les endroits publics, le territoire et les infrastructures proviennent de fichiers *shapefile* (.shp) obtenus depuis la plateforme *Géoindex* (2018). En ne considérant pas les projections de l'évolution de ces indices, qui augmentent ou qui diminuent au fil du temps, la vulnérabilité calculée peut être considérablement sous/surestimée.

7.4 Perspectives de recherche

Pour terminer, différentes perspectives de recherche sont élaborées dans le but de pointer quelques avenues intéressantes possibles pour de futures études traitant sur les inondations côtières provoquées par la HNM au Canada. Évidemment, les limitations et contraintes devraient être considérées au début d'une future analyse. Sinon, il serait intéressant de recommencer cet exercice en ajoutant des scénarios ayant des forçages radiatifs différents (le forçage radiatif faible de 2.6 Wm^{-2}, par exemple) et d'estimer des inondations ayant d'autres périodes de retour, comme celle de 100 ans qui est fréquemment le maximum utilisé dans les standards canadiens (Canada's Task Force on Flood Insurance and Relocation, 2022). De plus, Oulahen et al. (2015) offrent une perspective de recherche attrayante, soit d'inclure les personnes prenantes part aux décisions au sein de l'étude. En valorisant leurs opinions et en intégrant certaines de leurs idées, les personnes responsables des infrastructures côtières et des berges auront davantage la volonté de suivre les

recommandations d'une recherche et aideront à l'élaboration de résultats qui respectent mieux les réalités locales des stations analysées.

Il est pertinent de se pencher sur les différentes possibilités d'adaptation qui sont disponibles aux villes côtières. Au Canada, plusieurs mesures pour protéger la côte ont été mises en œuvre dans les dernières années. Par exemple, la ville de Surrey dans l'agglomération du Grand Vancouver en Colombie-Britannique a élaboré un important plan d'adaptation concernant la HNM, plus connu sous le nom de *coastal flood adaptation strategy* (City of Surrey, 2024). Dans ce dernier, les autorités locales ont sondé la population à l'aide d'une série de consultations publiques afin d'harmoniser la création d'un important système de digues, de pompes et de barrages pour mieux gérer la montée de l'eau dans les environs. Ces infrastructures suivent les propositions de Mercer Clarke et al. (2016) dans le chapitre sur la résilience et les défis destinés aux côtes du guide *Canada's Marine Coasts in a Changing Climate* (Lemmen et al., 2016). Plus précisément, les auteurs distinguent les méthodes d'adaptation côtière en trois catégories, soit le développement de mesures de protection par des barrières naturelles/artificielles, le principe d'accommodation (surélèvement) des infrastructures longeant la côte et la notion de retrait en déplaçant les infrastructures dans des zones à faible risque (Canadian Climate Institute, 2024). Une autre option offerte aux municipalités est d'augmenter l'éducation de ses résidents sur les défis et les conséquences reliés à la HNM. Autant adressée aux enfants qu'aux adultes, une meilleure connaissance scientifique de la montée des eaux permettrait aux communautés de se sensibiliser, pour ensuite adhérer à des mesures de protection efficaces. De plus, les communautés seraient alors plus réceptives à l'implémentation de mesures telles que le nouveau système d'alerte en cas de submersion côtière que le gouvernement du Canada a mis en œuvre en mai 2024 (Environnement et Changement climatique Canada, 2024; Ouranos, 2024). Ce système d'alerte correspond à un outil de gestion qui donne plus de temps aux municipalités de se préparer et d'agir face à d'imminentes inondations côtières.

Puis, alors que ce mémoire présente une analyse exhaustive des inondations côtières, une future recherche aurait intérêt à ajouter l'analyse d'inondations combinées (traduit librement du terme anglais *compound floodings*). Ces inondations sont définies par la coïncidence entre différents

types d'inondations, tels que les inondations côtières, les inondations suivant des pluies extrêmes et les inondations fluviales lors des crues. L'attrait majeur de l'analyse d'inondations combinées est que la coïncidence d'événements non extrêmes peut aussi mener à des résultats dévastateurs. Abbaszadeh et al. (2022) ajoutent que l'effet simultané des différents types d'inondations serait d'ailleurs responsable de la majorité des dommages subis par la société et par l'environnement lors des dernières années. Ces risques reliés aux inondations combinées ont notamment une tendance à la hausse sur la côte Atlantique du Canada et dans certaines régions de la côte Pacifique (Jalili Pirani et al., 2020). Par ailleurs, Darlington et al. (2024) ont récemment publié une étude présentant pour la première fois une analyse de l'exposition de la ville de Vancouver à des inondations côtières, pluviales et fluviales. Afin de s'attaquer à cette problématique, l'utilisation des fonctions statistiques *copules* est populaire dans la littérature, et ce, dans le but de modéliser le comportement conjoint de plusieurs variables hydrologiques (Moftakhari et al., 2017).

En terminant, il est réaliste de souhaiter qu'avec le temps, les entités décisionnelles canadiennes aient plus de facilité à prévenir, et par le fait même, à se protéger contre la HNM au Canada. Lors de la rédaction de ce mémoire (à l'été 2024), le logiciel *ArcGIS Pro* a présenté la nouvelle version *3.3*, qui inclut des simulations d'inondations en trois dimensions sur un territoire. Le nouvel attribut permet, notamment, d'ajouter des éléments comme des canaux, des sources d'eau et des barrières (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2024). L'analyse d'inondations côtière sera alors plus simple et permettra facilement d'inclure des endroits qui utilisent des barrières, telles que les systèmes de digues utilisées dans les banlieues de Vancouver (Government of British Columbia, 2024). Un autre exemple d'outil permettant d'améliorer la protection des infrastructures face aux inondations côtières serait la gestion des informations des bâtiments, traduit librement de l'acronyme anglais *BIM* symbolisant *Building Information Modeling*. Plus spécifiquement, cet outil met en commun le travail des architectes, des ingénieurs, des promoteurs immobiliers et des entrepreneurs (Lorek, 2022) afin que les bâtiments soient maintenant munis de plans en trois dimensions au lieu de simplement être décrits par des schémas 2D. Lorsqu'un bâtiment serait atteint dans la simulation d'une inondation, alors le nombre exact de pièces touchées pourrait être connu et les parties essentielles d'un bâtiment (la salle mécanique, par exemple) pourraient être mieux protégées. Une telle avenue serait notamment utile pour calculer avec précision le pourcentage de salles et de chambres inutilisables dans un hôpital en cas d'inondations.

RÉFÉRENCES

Abbaszadeh, P., Muñoz, D. F., Moftakhari, H., Jafarzadegan, K., & Moradkhani, H. (2022). Perspective on uncertainty quantification and reduction in compound flood modeling and forecasting. *iScience*, *25*(10). https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105201

Abeysirigunawardena, D. S., Smith, D. J., & Taylor, B. (2011). Extreme Sea Surge Responses to Climate Variability in Coastal British Columbia, Canada. *Annals of the Association of American Geographers*, *101*(5), 992-1010. https://doi.org/10.1080/00045608.2011.585929

Abubakar, A. G., Mahmud, M. R., Tang, K. K. W., Hussaini, A., & Md Yusuf, N. H. (2019). *A Review of modelling approaches on tidal analysis and prediction*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W16, pp. 23–34].

Amores, A., Marcos, M., Pedreros, R., Le Cozannet, G., Lecacheux, S., Rohmer, J., . . . Khaleel, Z. (2021). Coastal Flooding in the Maldives Induced by Mean Sea-Level Rise and Wind-Waves: From Global to Local Coastal Modelling. *Frontiers in Marine Science*, *8*. Original Research. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.665672

Antunes, C., & Godinho, J. M. (2011). *Estudo da análise harmónica da maré aplicada ao marégrafo de Cascais.* Actas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia (pp. 5-6).

Antunes, C., Rocha, C., & Catita, C. (2019). Coastal Flood Assessment due to Sea Level Rise and Extreme Storm Events: A Case Study of the Atlantic Coast of Portugal's Mainland. *Geosciences*, *9*(5). https://doi.org/10.3390/geosciences9050239

Arctic Gateway Group LP. (2021). *Why Choose Churchill?* https://www.arcticgateway.com/port-of-churchill#:~:text=The%20Port%20of%20Churchill%20is,other%20port%20in%20the%20world

Baldan, D., Coraci, E., Crosato, F., Ferla, M., Bonometto, A., & Morucci, S. (2022). Importance of non-stationary analysis for assessing extreme sea levels under sea level rise. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, *22*(11), 3663-3677. https://doi.org/10.5194/nhess-22-3663-2022

Bernier, N. B., Hemer, M., Mori, N., Appendini, C. M., Breivik, O., de Camargo, R., . . . Zhang, Y. J. (2024). Storm surges and extreme sea levels: Review, establishment of model intercomparison and coordination of surge climate projection efforts (SurgeMIP). *Weather and Climate Extremes*, *45*, 100689. https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100689

Bevacqua, E., Vousdoukas, M. I., Zappa, G., Hodges, K., Shepherd, T. G., Maraun, D., . . . Feyen, L. (2020). More meteorological events that drive compound coastal flooding are projected under climate change. *Communications Earth & Environment*, *1*(1), 47. https://doi.org/10.1038/s43247-020-00044-z

Bootsma, J. (2022). Evaluating methods to assess the coastal flood hazard on a global scale : a comparative analysis between the Bathtub approach and the LISFLOOD-AC model [Mather's Thesis, University of Twente]. University of Twente Student Theses. http://essay.utwente.nl/90697/

Bourdeau-Goulet, S.-C. (2021). *Understanding the Impact of Climate change on a Series of Climate indices Related to Food Security, Infrastructure Resilience, and Human Health in Canada Using the State-of-the-Art CMIP6 Simulations.* [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/9126/

Bourdeau-Goulet, S.-C., & Hassanzadeh, E. (2021). Comparisons Between CMIP5 and CMIP6 Models: Simulations of Climate Indices Influencing Food Security, Infrastructure Resilience, and Human Health in Canada. *Earth's Future*, *9*(5), e2021EF001995. https://doi.org/10.1029/2021EF001995

Brown, J. D., Spencer, T., & Moeller, I. (2007). Modeling storm surge flooding of an urban area with particular reference to modeling uncertainties: A case study of Canvey Island, United Kingdom. *Water Resources Research*, *43*(6). https://doi.org/10.1029/2005WR004597

Bult, S. V., Le Bars, D., Haigh, I. D., & Gerkema, T. (2024). The Effect of the 18.6-Year Lunar Nodal Cycle on Steric Sea Level Changes. *Geophysical Research Letters*, *51*(8), e2023GL106563. https://doi.org/10.1029/2023GL106563

Bunyavanich, S., Landrigan, C. P., McMichael, A. J., & Epstein, P. R. (2003). The Impact of Climate Change on Child Health. *Ambulatory Pediatrics*, *3*(1), 44-52. https://doi.org/10.1367/1539-4409(2003)003<0044:TIOCCO>2.0.CO;2

Bush, E., Bonsal, B., Derksen, C., Flato, G., Fyfe, J., Gillett, N., . . . Zhang, X. (2022). *Canada's Changing Climate Report in Light of the Latest Global Science Assessment*. Government of Canada. Ottawa, ON. 37p.

.

Bush, E., & Lemmen, D. S. (2019). *Canada's Changing Climate Report*. Government of Canada, Ottawa, ON. 444p.

Cabrita, P., Montes, J., Duo, E., Brunetta, R., & Ciavola, P. (2024). The Role of Different Total Water Level Definitions in Coastal Flood Modelling on a Low-Elevation Dune System. *Journal of Marine Science and Engineering*, *12*(6), 1003. https://www.mdpi.com/2077-1312/12/6/1003

Campbell, S., Remenyi, T. A., White, C. J., & Johnston, F. H. (2018). Heatwave and health impact research: A global review. *Health & Place*, *53*, 210-218. https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2018.08.017

Canada's Task Force on Flood Insurance and Relocation. (2022). *Adapting to Rising Flood Risk - An Analysis of Insurance Solutions for Canada*. Government of Canada. https://www.publicsafety.gc.ca/cnt/rsrcs/pblctns/dptng-rsng-fld-rsk-2022/

Canadian Climate Institute. (2024). *FACT SHEET: Climate change and flooding. Governments can act to protect communities from worsening flood risk.* https://climateinstitute.ca/news/fact-sheet-climate-change-and-flooding/

Canadian Hydrographic Service. (2018). *Canadian Hydrographic Service Non-Navigational (NONNA) Bathymetric Data*. Canadian Hydrographic Service. Fisheries and Oceans Canada. https://open.canada.ca/data/en/dataset/d3881c4c-650d-4070-bf9b-1e00aabf0a1d

Canadian Hydrographic Service. (2024a). Canadian Tide and Current Tables. Volume 1, Atlantic Coast and Bay of Fundy. Fisheries and Oceans Canada. https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/mpo-dfo/Fs73-1-2024-1.pdf

Canadian Hydrographic Service. (2024b). Canadian tide and current tables. Volume 4, Arctic and Hudson Bay. Fisheries and Oceans Canada. https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/mpo-dfo/Fs73-4-2024-1.pdf

Canadian Hydrographic Service. (2024c). Canadian tide and current tables. Volume 5, Juan de Fuca Strait and Strait of Georgia. Fisheries and Oceans Canada. https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/mpo-dfo/Fs73-5-2024-1.pdf

Chakraborty, L., Rus, H., Henstra, D., Thistlethwaite, J., & Scott, D. (2020). A place-based socioeconomic status index: Measuring social vulnerability to flood hazards in the context

of environmental justice. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 43*, 101394. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101394

Chakraborty, L., Thistlethwaite, J., Minano, A., Henstra, D., & Scott, D. (2021). Leveraging Hazard, Exposure, and Social Vulnerability Data to Assess Flood Risk to Indigenous Communities in Canada. *International Journal of Disaster Risk Science, 12*(6), 821-838. https://doi.org/10.1007/s13753-021-00383-1

Chakraborty, L., Thistlethwaite, J., Scott, D., Henstra, D., Minano, A., & Rus, H. (2023). Assessing social vulnerability and identifying spatial hotspots of flood risk to inform socially just flood management policy. *Risk Analysis, 43*(5), 1058-1078. https://doi.org/10.1111/risa.13978

Chini, N., & Stansby, P. K. (2012). Extreme values of coastal wave overtopping accounting for climate change and sea level rise. *Coastal Engineering, 65*, 27-37. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.02.009

Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., . . . Unnikrishnan, A. S. (2013a). Sea Level Change. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., . . . Unnikrishnan, A. S. (2013b). Sea Level Change Supplementary Material. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of*

Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Church, J. A., & White, N. J. (2011). Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, *32*(4), 585-602. https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1

City of Surrey. (2024). *Coastal Flood Adaptation Strategy*. https://www.surrey.ca/services-payments/water-drainage-sewer/flood-control-prevention/coastal-flood-adaptation-strategy

City of Vancouver. (2024a). *Indigenous communities*. https://vancouver.ca/people-programs/indigenous-communities.aspx

City of Vancouver. (2024b). *Open Data Portal*. Retrieved on 2024-07-19 from. https://opendata.vancouver.ca/pages/home/

Climate Science Investigations. (2023). *Causes of Climate Change - Natural Causes of Climate Change*. https://www.ces.fau.edu/nasa/module-4/causes-2.php

Crévolin, V., Hassanzadeh, E., & Bourdeau-Goulet, S.-C. (2023). Updating the intensity-duration-frequency curves in major Canadian cities under changing climate using CMIP5 and CMIP6 model projections. *Sustainable Cities and Society*, *92*, 104473. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104473

Daigle, R. a. (2020). *Updated Sea-Level Rise and Flooding Estimates for New Brunswick Coastal Sections 2020 based on IPCC 5th assessment report*. Atlantic Climate Adaptation Solutions Association. https://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Flooding-Inondations/SeaLevelRiseAndFloodingEstimates2020.pdf

Danard, M., Munro, A., & Murty, T. (2003). Storm Surge Hazard in Canada. *Natural Hazards, 28*(2), 407-434. https://doi.org/10.1023/A:1022990310410

Darlington, C., Raikes, J., Henstra, D., Thistlethwaite, J., & Raven, E. K. (2024). Mapping current and future flood exposure using a 5 m flood model and climate change projections. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 24*(2), 699-714. https://doi.org/10.5194/nhess-24-699-2024

De Matteis, A. (2019). Decomposing the anthropogenic causes of climate change. *Environment, Development and Sustainability, 21*(1), 165-179. https://doi.org/10.1007/s10668-017-0028-4

Desplanque, C., & Mossman, D. J. (2001). Bay of Fundy Tides. *Geoscience Canada, 28*(1). https://journals.lib.unb.ca/index.php/GC/article/view/4065

Didier, D., Bandet, M., Bernatchez, P., & Dumont, D. (2019a). Modelling Coastal Flood Propagation under Sea Level Rise: A Case Study in Maria, Eastern Canada. *Geosciences, 9*(2), 76. https://www.mdpi.com/2076-3263/9/2/76

Didier, D., Baudry, J., Bernatchez, P., Dumont, D., Sadegh, M., Bismuth, E., . . . Sévigny, C. (2019b). Multihazard simulation for coastal flood mapping: Bathtub versus numerical modelling in an open estuary, Eastern Canada. *Journal of Flood Risk Management, 12*(S1), e12505. https://doi.org/10.1111/jfr3.12505

Dietz, T., Shwom, R. L., & Whitley, C. T. (2020). Climate Change and Society. *Annual Review of Sociology, 46*(Volume 46, 2020), 135-158. https://doi.org/10.1146/annurev-soc-121919-054614

DiPaola, F., Bhardwaj, A., & Sam, L. (2024). Methods and insights on enabling geovisualisation for coastal communities of the North Shore of Vancouver. *Coastal Studies & Society, 3*(1), 3-32. https://doi.org/10.1177/26349817231207040

Dube, K., Nhamo, G., & Chikodzi, D. (2022). Flooding trends and their impacts on coastal communities of Western Cape Province, South Africa. *GeoJournal, 87*(4), 453-468. https://doi.org/10.1007/s10708-021-10460-z

Dullaart, J. C. M., Muis, S., Bloemendaal, N., & Aerts, J. C. J. H. (2020). Advancing global storm surge modelling using the new ERA5 climate reanalysis. *Climate Dynamics, 54*(1), 1007-1021. https://doi.org/10.1007/s00382-019-05044-0

El-Sabh, M. I., Murty, T. S., & Briand, J.-M. (1988). *Negative Storm Surges on Canada's East Coast.* Dordrecht (pp. 305-316).

Environment and Climate Change Canada. (2023). *Canadian Environmental Sustainability Indicators: Sea ice in Canada*. https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/environmental-indicators/sea-ice.html

Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2024). *What's New in ArcGIS Pro 3.3*. Esri Videos: GIS, Events, ArcGIS Products & Industries. https://mediaspace.esri.com/media/t/1_xcsj5imx

Environnement et Changement climatique Canada. (2024). *Le Canada élargit et améliore son système d'alerte en cas de submersion côtière*. https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/nouvelles/2024/06/le-canada-elargit-et-ameliore-son-systeme-dalerte-en-cas-de-submersion-cotiere.html

Fandé, M. B., Ponte Lira, C., & Penha-Lopes, G. (2022). Using TanDEM-X Global DEM to Map Coastal Flooding Exposure under Sea-Level Rise: Application to Guinea-Bissau. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 11*(4), 225. https://doi.org/10.3390/ijgi11040225

Fowler, H. J., Lenderink, G., Prein, A. F., Westra, S., Allan, R. P., Ban, N., . . . Zhang, X. (2021). Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, *2*(2), 107-122. https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6

Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., . . . Yu, Y. (2021). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1211-1362). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Frederikse, T., Buchanan, M. K., Lambert, E., Kopp, R. E., Oppenheimer, M., Rasmussen, D. J., & Wal, R. S. W. v. d. (2020). Antarctic Ice Sheet and emission scenario controls on 21st-century extreme sea-level changes. *Nature Communications*, *11*(1), 390. https://doi.org/10.1038/s41467-019-14049-6

Frederikse, T., Riva, R., Kleinherenbrink, M., Wada, Y., van den Broeke, M., & Marzeion, B. (2016). Closing the sea level budget on a regional scale: Trends and variability on the Northwestern European continental shelf. *Geophysical Research Letters*, *43*(20), 10,864-810,872. https://doi.org/10.1002/2016GL070750

Garner, G. G., Hermans, T., Kopp, R. E., Slangen, A. B. A., Edwards, T. L., Levermann, A., Nowicki, S., Palmer, M. D., Smith, C., Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Golledge, N. R., Hemer, M., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., … Pearson, B. (2021). IPCC AR6 Sea Level Projections (Version 20210809) [Data set]. Zenodo. . https://doi.org/10.5281/zenodo.6382554

Géoindex. (2018). *Plateforme partagée de données géospatiales et de photographies aériennes*. Bibliothèque de l'Université Laval. Retrieved on 2024-05-14 from. https://geoapp.bibl.ulaval.ca/

Godinho, J. R. P. M. (2011). *Variação temporal das principais constituintes harmónicas da maré de Cascais* Universidade de Lisboa]. http://hdl.handle.net/10451/8992

Government of British Columbia. (2024). *Lower Mainland dike inventory maps - Province of British Columbia*. https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/air-land-water/water/drought-flooding-dikes-dams/integrated-flood-hazard-management/governance/dike-management/dike-inventory

Government of Canada. (2015). *Modèle numérique d'élévation du Canada, 1945-2011*. https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/7f245e4d-76c2-4caa-951a-45d1d2051333

Government of Canada. (2018). *Climate Data Extraction Tool*. https://climate-change.canada.ca/climate-data/#/

Government of Canada. (2022). *Canadian Tides and Water Levels Data Archive*. Fisheries and Oceans Canada (DFO). https://www.isdm-gdsi.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/index-eng.htm

Government of Canada. (2023a). *Geospatial Data Extraction*. https://maps.canada.ca/czs/index-en.html

Government of Canada. (2023b). *GPS·H*. Canadian Geodetic Survey,. https://webapp.csrs-scrs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/nad83-docs.php#3

Government of Canada. (2024a). *Definitions for content on tides and currents*. https://tides.gc.ca/en/definitions-content-tides-and-currents

Government of Canada. (2024b). High Resolution Digital Elevation Model (HRDEM) - CanElevation Series. https://open.canada.ca/data/en/dataset/957782bf-847c-4644-a757-e383c0057995

Granata, F., & Di Nunno, F. (2021). Artificial Intelligence models for prediction of the tide level in Venice. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 35*(12), 2537-2548. https://doi.org/10.1007/s00477-021-02018-9

Grierson, D. E. (2008). Pareto multi-criteria decision making. *Advanced Engineering Informatics, 22*(3), 371-384. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aei.2008.03.001

Habibullah, M. S., Din, B. H., Tan, S.-H., & Zahid, H. (2022). Impact of climate change on biodiversity loss: global evidence. *Environmental Science and Pollution Research, 29*(1), 1073-1086. https://doi.org/10.1007/s11356-021-15702-8

Haigh, I. D., Wijeratne, E. M. S., MacPherson, L. R., Pattiaratchi, C. B., Mason, M. S., Crompton, R. P., & George, S. (2014). Estimating present day extreme water level exceedance probabilities around the coastline of Australia: tides, extra-tropical storm surges and mean sea level. *Climate Dynamics, 42*(1), 121-138. https://doi.org/10.1007/s00382-012-1652-1

Han, G., Ma, Z., & Slangen, A. B. A. (2020). Scenarios of Twenty-First Century Mean Sea Level Rise at Tide-Gauge Stations Across Canada. *Atmosphere-Ocean, 58*(4), 287-301. https://doi.org/10.1080/07055900.2020.1792404

Harley, C. D., Randall Hughes, A., Hultgren, K. M., Miner, B. G., Sorte, C. J., Thornber, C. S., . . . Williams, S. L. (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology letters, 9*(2), 228-241. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00871.xC

Hart-Davis, M. G., Dettmering, D., Sulzbach, R., Thomas, M., Schwatke, C., & Seitz, F. (2021). Regional Evaluation of Minor Tidal Constituents for Improved Estimation of Ocean Tides. *Remote Sensing, 13*(16), 3310. https://www.mdpi.com/2072-4292/13/16/3310

Hartikainen, M., Miettinen, K., & Wiecek, M. M. (2011). Constructing a Pareto front approximation for decision making. *Mathematical Methods of Operations Research, 73*(2), 209-234. https://doi.org/10.1007/s00186-010-0343-0

Hausfather, Z. (2018). Explainer: How 'Shared Socioeconomic Pathways' explore future climate change. *Carbon Brief*. https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change/

Hausfather, Z. (2019). CMIP6: the next generation of climate models explained. *Carbon Brief*. https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained/

Hawley, W. B., Hay, C. C., Mitrovica, J. X., & Kopp, R. E. (2020). A Spatially Variable Time Series of Sea Level Change Due to Artificial Water Impoundment. *Earths Future, 8*(7), e2020EF001497. https://doi.org/10.1029/2020EF001497

Hemanandhini, S., & L Vignesh Rajkumar. (2023). Performance evaluation of CMIP6 climate models for selecting a suitable GCM for future precipitation at different places of Tamil Nadu. *Environmental Monitoring and Assessment, 195*(8), 928. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11454-9

Hermans, T. H. J., Gregory, J. M., Palmer, M. D., Ringer, M. A., Katsman, C. A., & Slangen, A. B. A. (2021). Projecting Global Mean Sea-Level Change Using CMIP6 Models. *Geophysical Research Letters, 48*(5), e2020GL092064. https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020GL092064

Herring, D., & Lindsey, R. (2020). *Hasn't Earth warmed and cooled naturally throughout history?* https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/hasnt-earth-warmed-and-cooled-naturally-throughout-history

Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A. T., Perrette, M., Nicholls, R. J., Tol, R. S. J., . . . Levermann, A. (2014). Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise.

Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(9), 3292-3297. https://doi.org/doi:10.1073/pnas.1222469111

Hofer, S., Lang, C., Amory, C., Kittel, C., Delhasse, A., Tedstone, A., & Fettweis, X. (2020). Greater Greenland Ice Sheet contribution to global sea level rise in CMIP6. *Nature Communications, 11*(1), 6289. https://doi.org/10.1038/s41467-020-20011-8

Hong, Y., Kessler, J., Titze, D., Yang, Q., Shen, X., & Anderson, E. J. (2024). Towards efficient coastal flood modeling: A comparative assessment of bathtub, extended hydrodynamic, and total water level approaches. *Ocean Dynamics, 74*(5), 391-405. https://doi.org/10.1007/s10236-024-01610-1

Howard, S. C., & Sherren, K. (2023). Flood risk mapping in southwestern Nova Scotia: Perceptions and concerns. *Canadian Geographies / Géographies canadiennes, 67*(4), 499-512. https://doi.org/10.1111/cag.12836

Hussain, M., & Mahmud, I. (2019). pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests. *Journal of open source software, 4*(39), 1556. https://doi.org/10.21105/joss.01556

Inácio, M., Barboza, F. R., & Villoslada, M. (2023). The protection of coastal lagoons as a nature-based solution to mitigate coastal floods. *Current Opinion in Environmental Science & Health, 34*, 100491. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100491

Industrial Economics Incorporated. (2020). *Costing Climate Change Impacts on Canada's Infrastructure: Results for "Deep Dive" Statistical and Process-based Models* https://climateinstitute.ca/wp-content/uploads/2022/06/Deep-Dive-Report.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In C. Intergovernmental Panel on Climate

(Ed.), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 321-446). Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In C. Intergovernmental Panel on Climate (Ed.), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1211-1362). Cambridge University Press.

Iqbal, Z., Shahid, S., Ahmed, K., Ismail, T., Ziarh, G. F., Chung, E.-S., & Wang, X. (2021). Evaluation of CMIP6 GCM rainfall in mainland Southeast Asia. *Atmospheric Research, 254*, 105525. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105525

Irani, M., Naderi, M. M., Massah Bavani, A. R., Hassanzadeh, E., & Moftakhari, H. (2024). A framework for coastal flood hazard assessment under sea level rise: Application to the Persian Gulf. *Journal of Environmental Management, 349*, 119502. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119502

Jalili Pirani, F., & Najafi, M. R. (2020). Recent Trends in Individual and Multivariate Compound Flood Drivers in Canada's Coasts. *Water Resources Research, 56*(8), e2020WR027785. https://doi.org/10.1029/2020WR027785

James, T. S., Henton, J. A., Leonard, L. J., Darlington, A., Forbes, D. L., & Craymer, M. R. (2014). Relative sea-level projections in Canada and the adjacent mainland United States. *Geological Survey of Canada, Open File, 7737*. https://doi.org/10.4095/295574

James, T. S., Robin, C., Henton, J. A., & Craymer, M. R. (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, 1 .zip file*. https://doi.org/10.4095/327878

Joyce, B. R., Pringle, W. J., Wirasaet, D., Westerink, J. J., Van der Westhuysen, A. J., Grumbine, R., & Feyen, J. (2019). High resolution modeling of western Alaskan tides and storm surge under varying sea ice conditions. *Ocean Modelling, 141*, 101421. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2019.101421

Kaemo, M., Hassanzadeh, E., & Nazemi, A. (2022). A locally relevant framework for assessing the risk of sea level rise under changing temperature conditions: Application in New Caledonia, Pacific Ocean. *Science of The Total Environment, 834*, 155326. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155326

Kantamaneni, K. (2016). Coastal infrastructure vulnerability: an integrated assessment model. *Natural Hazards, 84*(1), 139-154. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2413-y

Karani, P., & Failler, P. (2020). Comparative coastal and marine tourism, climate change, and the blue economy in African Large Marine Ecosystems. *Environmental Development, 36*, 100572. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100572

Keller, K., Helgeson, C., & Srikrishnan, V. (2021). Climate Risk Management. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 49*(Volume 49, 2021), 95-116. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-080320-055847

Kendall, M. (1976). *Rank Auto Correlation Methods, Griffin*. In: Oxford.

Kirezci, E., Young, I. R., Ranasinghe, R., Lincke, D., & Hinkel, J. (2023). Global-scale analysis of socioeconomic impacts of coastal flooding over the 21st century. *Frontiers in Marine Science, 9*. Original Research. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1024111

Koks, E. E., Rozenberg, J., Zorn, C., Tariverdi, M., Vousdoukas, M., Fraser, S. A., . . . Hallegatte, S. (2019). A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets. *Nature Communications, 10*(1), 2677. https://doi.org/10.1038/s41467-019-10442-3

Kopp, R. E., Garner, G. G., Hermans, T. H. J., Jha, S., Kumar, P., Reedy, A., . . . Smith, C. (2023). The Framework for Assessing Changes To Sea-level (FACTS) v1.0: a platform for characterizing parametric and structural uncertainty in future global, relative, and extreme sea-level change. *Geoscientific Model Development, 16*(24), 7461-7489. https://doi.org/10.5194/gmd-16-7461-2023

Koski, J. (1993). Multicriterion Structural Optimization. In G. I. N. Rozvany (Ed.), *Optimization of Large Structural Systems* (pp. 793-809). Springer Netherlands.

Kuha, J. (2004). AIC and BIC:Comparisons of Assumptions and Performance. *Sociological Methods & Research, 33*(2), 188-229. https://doi.org/10.1177/0049124103262065

Lambeck, K., Smither, C., & Johnston, P. (1998). Sea-level change, glacial rebound and mantle viscosity for northern Europe. *Geophysical Journal International, 134*(1), 102-144. https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00541.x

Lemos, G., Bosnic, I., Antunes, C., Vousdoukas, M., Mentaschi, L., Espírito Santo, M., . . . Soares, P. M. M. (2024). The future of the Portuguese (SW Europe) most vulnerable coastal areas under climate change – Part II: Future extreme coastal flooding from downscaled bias corrected wave climate projections. *Ocean Engineering, 310*, 118448. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118448

Li, S., Wahl, T., Barroso, A., Coats, S., Dangendorf, S., Piecuch, C., . . . Liu, L. (2022). Contributions of Different Sea-Level Processes to High-Tide Flooding Along the U.S. Coastline. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 127*(7), e2021JC018276. https://doi.org/10.1029/2021JC018276

Lopes, C. L., Sousa, M. C., Ribeiro, A., Pereira, H., Pinheiro, J. P., Vaz, L., & Dias, J. M. (2022). Evaluation of future estuarine floods in a sea level rise context. *Scientific Reports, 12*(1), 8083. https://doi.org/10.1038/s41598-022-12122-7

Lorek, S. (2022). *What is BIM (Building Information Modeling)*. Trimble Construction. https://constructible.trimble.com/construction-industry/what-is-bim-building-information-modeling

Lowe, R. J., Cuttler, M. V. W., & Hansen, J. E. (2021). Climatic Drivers of Extreme Sea Level Events Along the Coastline of Western Australia. *Earth's Future, 9*(4), e2020EF001620. https://doi.org/10.1029/2020EF001620

Madge, C., Smith, R., & Canadian Centre for Climate Services. (2024). *Hurricanes and Climate Change in Atlantic Canada*. https://climatedata.ca/hurricanes-and-climate-change-in-atlantic-canada/

Mann, H. B. (1945). *Nonparametric tests against trend*. Econometrica: Journal of the econometric society, 245-259.

Manson, G., Couture, N., & James, T. (2019). CanCoast 2.0: data and indices to describe the sensitivity of Canada's marine coasts to changing climate. *Geological Survey of Canada, Open File, 8551*(1). https://doi.org/10.4095/314669

Mansoor, S., Farooq, I., Kachroo, M. M., Mahmoud, A. E. D., Fawzy, M., Popescu, S. M., . . . Ahmad, P. (2022). Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change. *Journal of Environmental Management, 301*, 113769. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113769

Mazzotti, S., Jones, C., & Thomson, R. E. (2008). Relative and absolute sea level rise in western Canada and northwestern United States from a combined tide gauge-GPS analysis. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 113*(C11). https://doi.org/10.1029/2008jc004835

McGranahan, G., Balk, D., & Anderson, B. (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization, 19*(1), 17-37. https://doi.org/10.1177/0956247807076960

McGrath, H., Bourgon, J.-F., Proulx-Bourque, J.-S., Nastev, M., & Abo El Ezz, A. (2018). A comparison of simplified conceptual models for rapid web-based flood inundation mapping. *Natural Hazards, 93*(2), 905-920. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3331-y

McKitrick, R. (2019). *Federal 'climate' report uses natural weather events to spark scary headlines*. Fraser Institute. Canada. https://policycommons.net/artifacts/419476/federal-climate-report-uses-natural-weather-events-to-spark-scary-headlines/

Mechoso, C. R., & Arakawa, A. (2015). NUMERICAL MODELS | General Circulation Models. In G. R. North, J. Pyle, & F. Zhang (Eds.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)* (pp. 153-160). Academic Press.

Meehl, G. A., Boer, G. J., Covey, C., Latif, M., & Stouffer, R. J. (2000). The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). *Bulletin of the American Meteorological Society, 81*(2), 313-318. http://www.jstor.org/stable/26215108

Meinshausen, M., Nicholls, Z. R. J., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., . . . Wang, R. H. J. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model Dev., 13*(8), 3571-3605. https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020

Mercer Clarke, C. S. L., Manuel, P., & Warren, F. J. (2016). The coastal challenge; in Canada's Marine Coasts in a Changing Climate. In D.S. Lemmen, F.J. Warren, T.S. James, & C.S.L. Mercer Clarke (Eds.). Government of Canada, Ottawa, ON, p. 69-98.

Moftakhari, H. R., Salvadori, G., AghaKouchak, A., Sanders, B. F., & Matthew, R. A. (2017). Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding. *Proc Natl Acad Sci U S A, 114*(37), 9785-9790. https://doi.org/10.1073/pnas.1620325114

Moore, R., Spittlehouse, D., Whitfield, P., & Stahl, K. (2010). Weather and climate. *Compendium of forest hydrology and geomorphology in British Columbia, 1*, 47-84. https://www.researchgate.net/profile/Kerstin-Stahl/publication/255712273_Weather_and_Climate/links/00b4953ccffdaa05a9000000/Weather-and-Climate.pdf

Muis, S., Aerts, J. C. J. H., Á. Antolínez, J. A., Dullaart, J. C., Duong, T. M., Erikson, L., . . . Yan, K. (2023). Global Projections of Storm Surges Using High-Resolution CMIP6 Climate Models. *Earth's Future, 11*(9). https://doi.org/10.1029/2023ef003479

Muis, S., Apecechea, M. I., Dullaart, J., de Lima Rego, J., Madsen, K. S., Su, J., . . . Verlaan, M. (2020). A High-Resolution Global Dataset of Extreme Sea Levels, Tides, and Storm Surges, Including Future Projections. *Frontiers in Marine Science, 7*. Original Research. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00263

Muis, S., Verlaan, M., Winsemius, H. C., Aerts, J. C. J. H., & Ward, P. J. (2016). A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. *Nature Communications, 7*(1), 11969. https://doi.org/10.1038/ncomms11969

Mulia, I. E., Ueda, N., Miyoshi, T., Iwamoto, T., & Heidarzadeh, M. (2023). A novel deep learning approach for typhoon-induced storm surge modeling through efficient emulation of wind and pressure fields. *Scientific Reports, 13*(1), 7918. https://doi.org/10.1038/s41598-023-35093-9

Mulligan, R. P., Swatridge, L., Cantelon, J. A., Kurylyk, B. L., George, E., & Houser, C. (2023). Local and Remote Storm Surge Contributions to Total Water Levels in the Gulf of St.

Lawrence During Hurricane Fiona. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 128*(8), e2023JC019910. https://doi.org/10.1029/2023JC019910

NASA. (2021). Sea Level Projection Tool - NASA Sea Level Change Portal. Available online: https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool (accessed on 20 September 2024).

Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding--a global assessment. *PLoS One, 10*(3), e0118571. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571

Nguyen, T. T. X., Bonetti, J., Rogers, K., & Woodroffe, C. D. (2016). Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean & Coastal Management, 123*, 18-43. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.022

NHC. (2014). *City of Vancouver Coastal Flood Risk Assessment.* Prepared for City of Vancouver. https://vancouver.ca/files/cov/CFRA-Phase-1-Final_Report.pdf

Nicholls, R. J., Brown, S., Goodwin, P., Wahl, T., Lowe, J., Solan, M., . . . Merkens, J.-L. (2018). Stabilization of global temperature at 1.5°C and 2.0°C: implications for coastal areas. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 376*(2119), 20160448. https://doi.org/doi:10.1098/rsta.2016.0448

Okoye, K., & Hosseini, S. (2024). Correlation Tests in R: Pearson Cor, Kendall's Tau, and Spearman's Rho. In *R Programming: Statistical Data Analysis in Research* (pp. 247-277). Springer Nature Singapore.

Oulahen, G., Mortsch, L., Tang, K., & Harford, D. (2015). Unequal Vulnerability to Flood Hazards: "Ground Truthing" a Social Vulnerability Index of Five Municipalities in Metro

Vancouver, Canada. *Annals of the Association of American Geographers, 105*(3), 473-495. https://doi.org/10.1080/00045608.2015.1012634

Ouranos. (2024). *Winds and storms - Adaptation. Alerting and monitoring systems.* https://www.ouranos.ca/en/climate-phenomena/winds-and-storms-adaptation

Parkers, G. S., Ketch, L. A., & Reilly, C. T. (1997). *Storm surge events in the maritimes.* Proceedings of the 1997 Canadian Coastal Conference, 21–24 May 1997, Guelph, Ontario, pp. 115–129.

Payne, A. J., Nowicki, S., Abe-Ouchi, A., Agosta, C., Alexander, P., Albrecht, T., . . . Zwinger, T. (2021). Future Sea Level Change Under Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 and Phase 6 Scenarios From the Greenland and Antarctic Ice Sheets. *Geophysical Research Letters, 48*(16), e2020GL091741. https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020GL091741

Pelling, M., & Blackburn, S. (2013). Megacities and the Coast. *Rutledge, Inc. NY*.

Peltier, W. R. (2004). GLOBAL GLACIAL ISOSTASY AND THE SURFACE OF THE ICE-AGE EARTH: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 32*(Volume 32, 2004), 111-149. https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.082503.144359

Peltier, W. R., Argus, D. F., & Drummond, R. (2015). Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120*(1), 450-487. https://doi.org/10.1002/2014JB011176

Peng, D., Hill, E. M., Meltzner, A. J., & Switzer, A. D. (2019). Tide Gauge Records Show That the 18.61-Year Nodal Tidal Cycle Can Change High Water Levels by up to 30 cm. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 124*(1), 736-749. https://doi.org/10.1029/2018JC014695

Port Saint John. (2024). Welcome to Port Saint John's 2021 Annual Report https://webreports.sjport.com/2021-annual-report

Privitera, G. J. (2023). *Statistics for the behavioral sciences*. Sage publications.

Proudman, J. (1960). The Condition that a Long-Period Tide shall follow the Equilibrium-Law. *Geophysical Journal International, 3*(2), 244-249. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1960.tb00392.x

Provan, M., Ferguson, S., & Murphy, E. (2022). Storm surge contributions to flood hazards on Canada's Atlantic Coast. *Journal of Flood Risk Management, 15*(3), e12800. https://doi.org/10.1111/jfr3.12800

Ramieri, E., Hartley, A., Barbanti, A., Santos, F., Gomes, A., Hildén, M., . . . Santini, M. (2011). *Methods for assessing coastal vulnerability to climate change*.

Ramos Valle, A. N., Curchitser, E. N., Bruyere, C. L., & Fossell, K. R. (2018). Simulating Storm Surge Impacts with a Coupled Atmosphere-Inundation Model with Varying Meteorological Forcing. *Journal of Marine Science and Engineering, 6*(2), 35. https://www.mdpi.com/2077-1312/6/2/35

Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., . . . Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment, 3*(1), 168. https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3

Read, W., & Reed, D. (2013). *The 2006 Hanukkah Eve Storm and Associated Civil Infrastructure Damage in the Cascadia Region of the United States and Canada.* 12th Americas Conference on Wind Engineering 2013, ACWE 2013: Wind Effects on Structures, Communities, and Energy Generation (pp. 1296-1315).

Reffitt, M., Orescanin, M. M., Massey, C., Raubenheimer, B., Jensen, R. E., & Elgar, S. (2020). Modeling Storm Surge in a Small Tidal Two-Inlet System. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 146*(6), 04020043. https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000606

Reguero, B. G., Menéndez, M., Méndez, F. J., Mínguez, R., & Losada, I. J. (2012). A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coastal Engineering, 65*, 38-55. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.03.003

Reimann, L., Vafeidis, A. T., & Honsel, L. E. (2023). Population development as a driver of coastal risk: Current trends and future pathways. *Cambridge Prisms: Coastal Futures, 1*, e14. https://doi.org/10.1017/cft.2023.3

Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., . . . Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change, 42*, 153-168. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., O'Neill, B., & Rogelj, J. (2016). The shared socio-economic pathways (SSPs): an overview. *United Nations Framework Convention on Climate Change*. https://unfccc.int/sites/default/files/part1_iiasa_rogelj_ssp_poster.pdf

Robin, C., Craymer, M., Ferland, R., James, T., Lapelle, E., Piraszewski, M., & Zhao, Y. (2020). *NAD83v70VG: a new national crustal velocity model for Canada*. Natural Resources Canada.

Rocha, C., Antunes, C., & Catita, C. (2020). Coastal Vulnerability Assessment Due to Sea Level Rise: The Case Study of the Atlantic Coast of Mainland Portugal. *Water, 12*(2). https://doi.org/10.3390/w12020360

Rocha, C., Antunes, C., & Catita, C. (2023). Coastal indices to assess sea-level rise impacts - A brief review of the last decade. *Ocean & Coastal Management, 237*, 106536. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106536

Rocha, J., Oliveira, S., Viana, C. M., & Ribeiro, A. I. (2022). Chapter 8 - Climate change and its impacts on health, environment and economy. In J. C. Prata, A. I. Ribeiro, & T. Rocha-Santos (Eds.), *One Health* (pp. 253-279). Academic Press.

Schinko, T., Drouet, L., Vrontisi, Z., Hof, A., Hinkel, J., Mochizuki, J., . . . Lincke, D. (2020). Economy-wide effects of coastal flooding due to sea level rise: a multi-model simultaneous treatment of mitigation, adaptation, and residual impacts. *Environmental Research Communications, 2*(1), 015002. https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab6368

Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesthesia & Analgesia, 126*(5), 1763-1768. https://doi.org/10.1213/ane.0000000000002864

Seenath, A., Wilson, M., & Miller, K. (2016). Hydrodynamic versus GIS modelling for coastal flood vulnerability assessment: Which is better for guiding coastal management? *Ocean & Coastal Management, 120*, 99-109. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.019

Serafin, K. A., Ruggiero, P., & Stockdon, H. F. (2017). The relative contribution of waves, tides, and nontidal residuals to extreme total water levels on U.S. West Coast sandy beaches. *Geophysical Research Letters, 44*(4), 1839-1847. https://doi.org/10.1002/2016GL071020

SHIPNEXT. (2024). *Churchill CACHV Details: Departures, Expected Arrivals and Churchill (Canada) Calls*. https://shipnext.com/port/churchill-cachv-can

Šimac, Z., Lončar, N., & Faivre, S. (2023). Overview of Coastal Vulnerability Indices with Reference to Physical Characteristics of the Croatian Coast of Istria. *Hydrology, 10*(1), 14. https://www.mdpi.com/2306-5338/10/1/14

Sirimanne, S. N., Hoffman, J., Juan, W., Asariotis, R., Assaf, M., Ayala, G., . . . Premti, A. (2019). *Review of maritime transport 2019.* United Nations conference on trade and development, Geneva, Switzerland (Vol. 9).

Slangen, A. B. A., Palmer, M. D., Camargo, C. M. L., Church, J. A., Edwards, T. L., Hermans, T. H. J., . . . van de Wal, R. S. W. (2023). The evolution of 21st century sea-level projections from IPCC AR5 to AR6 and beyond. *Cambridge Prisms: Coastal Futures, 1*, e7. https://doi.org/10.1017/cft.2022.8

Slobbe, D. C., Sumihar, J., Frederikse, T., Verlaan, M., Klees, R., Zijl, F., . . . Broekman, R. (2018). A Kalman Filter Approach to Realize the Lowest Astronomical Tide Surface. *Marine Geodesy, 41*(1), 44-67. https://doi.org/10.1080/01490419.2017.1391900

Statistics Canada. (2023). Census Profile. 2021 Census of Population. Statistics Canada Catalogue number 98-316-X2021001. Ottawa. Released November 15, 2023.

Stocker, T. (2014). *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Tadesse, M., Wahl, T., & Cid, A. (2020). Data-Driven Modeling of Global Storm Surges. *Frontiers in Marine Science, 7*. Original Research. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00260

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society, 93*(4), 485-498. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1

The City of Saint John. (2024). *The City of Saint John Open Data Catalogue*. Retrieved on 2024-04-10 from. https://catalogue-saintjohn.opendata.arcgis.com/

Thompson, K. R., Bernier, N. B., & Chan, P. (2009). Extreme sea levels, coastal flooding and climate change with a focus on Atlantic Canada. *Natural Hazards, 51*(1), 139-150. https://doi.org/10.1007/s11069-009-9380-5

Thompson, R. O. R. Y. (1983). Low-Pass Filters to Suppress Inertial and Tidal Frequencies. *Journal of Physical Oceanography, 13*(6), 1077-1083. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1983)013<1077:LPFTSI>2.0.CO;2

Touzé-Peiffer, L., Barberousse, A., & Le Treut, H. (2020). The Coupled Model Intercomparison Project: History, uses, and structural effects on climate research. *WIREs Climate Change, 11*(4), e648. https://doi.org/10.1002/wcc.648

Town of Churchill. (2020). *Climate Change Adaptation Strategy Plan*. http://churchill.municipalwebsites.ca/Editor/images/Climate%20Change/Revised%20Churchill%20Adaptation%20Strategy%2030MB.pdf

Transport Canada. (2022). *Government of Canada launches a new initiative to address climate change impacts on rail lines*. https://www.canada.ca/en/transport-canada/news/2022/11/government-of-canada-launches-a-new-initiative-to-address-climate-change-impacts-on-rail-lines.html

Transport Canada. (2023). Government of Canada announces investment to make railways safer while reducing the impacts of climate change. https://www.canada.ca/en/transport-canada/news/2023/07/government-of-canada-announces-investment-to-make-railways-safer-while-reducing-the-impacts-of-climate-change.html

University of Toronto CHASS. (2022). 2021 Census Profiles Files / Profile of Census Disseminations Areas [Data file]. Retrieved on 2024-06-14 from https://datacentre.chass.utoronto.ca/

van Tatenhove, J. P. M. (2022). Arctic Shipping. In *Liquid Institutionalization at Sea: Reflexivity and Power Dynamics of Blue Governance Arrangements* (pp. 37-59). Springer International Publishing.

van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., . . . Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change, 109*(1), 5. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z

Vancouver Fraser Port Authority. (2024). *Port Information Guide*. Port of Vancouver. https://www.portvancouver.com/wp-content/uploads/2024/01/2024-01-15-PORT-INFORMATION-GUIDE.pdf

Virtanen, P., Gommers, R., Burovski, E., Oliphant, T. E., Weckesser, W., Cournapeau, D., . . . Feng, Y. (2020). *scipy/scipy: SciPy 1.6.0*. Zenodo.

Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., & Feyen, L. (2017). Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future, 5*(3), 304-323. https://doi.org/10.1002/2016EF000505

Vrieze, S. I. (2012). Model selection and psychological theory: A discussion of the differences between the Akaike information criterion (AIC) and the Bayesian information criterion (BIC). *Psychological Methods, 17*(2), 228-243. https://doi.org/10.1037/a0027127

Walls, M. (2017). Confederation and Maritime First Nations. *Acadiensis, 46*(2), 155-176. https://id.erudit.org/iderudit/acad46_2pp02

Wang, J., Church, J. A., Zhang, X., & Chen, X. (2021). Reconciling global mean and regional sea level change in projections and observations. *Nature Communications, 12*(1), 990. https://doi.org/10.1038/s41467-021-21265-6

Webster, T., McGuigan, K., Collins, K., & MacDonald, C. (2014). Integrated River and Coastal Hydrodynamic Flood Risk Mapping of the LaHave River Estuary and Town of

Bridgewater, Nova Scotia, Canada. *Water*, *6*(3), 517-546. https://www.mdpi.com/2073-4441/6/3/517

Welch, I. (2024). The IPCC Shared Socioeconomic Pathways (SSPs): Explained, Evaluated, Replaced. *National Bureau of Economic Research Working Paper Series, No. 32178*. https://doi.org/10.3386/w32178

Williams, L. L., & Lück-Vogel, M. (2020). Comparative assessment of the GIS based bathtub model and an enhanced bathtub model for coastal inundation. *Journal of Coastal Conservation*, *24*(2), 23. https://doi.org/10.1007/s11852-020-00735-x

Woodruff, J. D., Irish, J. L., & Camargo, S. J. (2013). Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise. *Nature*, *504*(7478), 44-52. https://doi.org/10.1038/nature12855

World Climate Research Programme. (2024). *WCRP Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)*. https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip

Worm, B., & Lotze, H. K. (2021). Marine biodiversity and climate change. In *Climate change* (pp. 445-464). Elsevier.

Yu, L., Lu, S., Zhang, J., Yang, B., & Xu, M. (2022). Effects of tide-surge interactions on the temporal distribution of the peak residual in Hangzhou Bay, China. *Ocean Engineering*, *266*, 112705. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112705

Yurick, D. (2010). National Marine Conservation Areas-Extending Parks Canada's Reach into Canada's Oceans and Great Lakes. *The George Wright Forum*, *27*(2), 170-179. http://www.jstor.org/stable/43598149

Yusoff, N. A., Shafii, H., & Omar, R. (2017). The impact of floods in hospital and mitigation measures: A literature review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *271*(1), 012026. https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012026

Zamrsky, D., Oude Essink, G. H. P., & Bierkens, M. F. P. (2024). Global Impact of Sea Level Rise on Coastal Fresh Groundwater Resources. *Earth's Future*, *12*(1), e2023EF003581. https://doi.org/10.1029/2023EF003581

Zhai, L., Greenan, B. J. W., Hunter, J., James, T., & Han, G. (2013). *Estimating sea-level allowances for Atlantic Canada under conditions of uncertain sea-level rise*. Fisheries and Oceans Canada. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean. Sci. 283: v + 40 pp.

Zhai, L., Greenan, B. J. W., & Perrie, W. (2023). *The Canadian Extreme Water Level Adaptation Tool (CAN-EWLAT)*. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean. Sci. 348: iii + 15 p.

ANNEXE A INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES DU CHAPITRE 5

A.1 List of downloaded variables

Table A.1 List of downloaded variables used in population's vulnerability assessment

Categories	Variables	Layers	Subjects	Websites
Population	Total	-	-	CHASS data centre (University of Toronto CHASS, 2022)
	65+ years old	-	-	
	Visible minority	-	-	
	Indigenous	-	-	
	With less than $50k income	-	-	

Table A.2 List of downloaded variables used in public spaces' vulnerability assessment

Categories	Variables	Layers	Subjects		Websites
Public spaces	Recreational	Accommodations	Inns	Bed and breakfast	Geoindex (2018)
			Tourist accommodation	Hotels	
			Holiday destinations	Tourist camps, hostels, etc.	
			Motels		
		Arenas	Field houses	Recreation centres	
			Hockey rinks		
		Cinemas	Drive-in theatres	Cinemas	
		Parks sports field	Cemeteries	Parks	
			Provincial parks	National parks and reserves	
			Historical parks	Swimming pools	
			Playgrounds	Natural areas	
			Athletic fields	Botanical gardens	
			Campsites	Amusement parks	
		Tourist attractions	Art galleries	Historic sites	
			Music-halls	Outfitters	
			Art museums	Tourist offices	
			Zoos		
	Educational	Education	CEGEPs	Vocational training	
			Elementary schools	High schools	
			Private universities and colleges	School boards	
			Adult general education	College technology transfer centres	
			Universities		

Table A.2 List of downloaded variables used in public spaces' vulnerability assessment (Continued)

Categories	Variables	Layers	Subjects		Websites
Public spaces	Health services	Health and emergency services	Ambulance services	Health services	Geoindex (2018)
			Police	Veterinarians	
			Fire stations		
		Healthcare	Medical centres	Hospitals	
			Medical clinics	Health services	
			Welcome centres	Community care	
			Nurse practitioner-led clinics	Rehabilitation service	
			Long-term care facilities		
	Public services	Fire stations	Fire department	Fire stations	
		Police service	Provincial police	Police	
	Community services	Financial institutions	Banks	Financial institutions	
			Financial services cooperatives	Banks - Trust companies	
		Gas stations	Gas stations	Gas	
		Enhanced points of interest	Medical facilities	Airports	
			Postal services	Industries	
			Golf courses		
		Retired enhanced points interest	Department stores	Retail stores	
			Hardware stores	Shopping centres	
			Public utilities		
		Community centres	Recreation centres	Community centres	
		Religious buildings	Monasteries	Church buildings	
			Religious facilities	Convents	
		Cemeteries	Cemeteries		

Table A.3 List of downloaded variables used in land and infrastructure's vulnerability assessment

Categories	Variables	Layers	Subjects	Websites
Land and infrastructure	Total land area	-	-	CHASS data centre (University of Toronto CHASS, 2022)
	Building footprints	-	-	- Vancouver: open data portal (City of Vancouver, 2024b) - Saint John: open data catalogue (The City of Saint John, 2024) - Churchill: handmade
	Roads	Roads	Roads	Geoindex (2018)
	Railways	Railway	Railway	
	Airports	Runway	Runway	

Table A.4 Projected median Extreme Total Water Level (ETWL) based on CMIP5 and CMIP6 models under moderate and high radiative forcings for short- and long-term futures in Vancouver, Saint John, and Churchill. Note that for Churchill both rising and receding ETWLs are projected. Falling and receding scenarios are identified by ↗ and ↘ symbols, respectively.

				Vancouver ↗ (m)	Saint John ↗ (m)	Churchill ↗ (m)	Churchill ↘ (m)
Median ETWL	Moderate	CMIP5	Short-term	2.93	4.81	3.38	-3.48
	Moderate	CMIP5	Long-term	3.13	4.98	2.94	-3.92
	Moderate	CMIP6	Short-term	2.86	4.90	3.56	-3.30
	Moderate	CMIP6	Long-term	3.02	5.21	3.41	-3.45
	High	CMIP5	Short-term	2.93	4.82	3.41	-3.45
	High	CMIP5	Long-term	3.21	5.13	3.04	-3.82
	High	CMIP6	Short-term	2.87	4.91	3.58	-3.28
	High	CMIP6	Long-term	3.12	5.37	3.55	-3.31

A.2 Spatial diversity in population variables for the considered cities

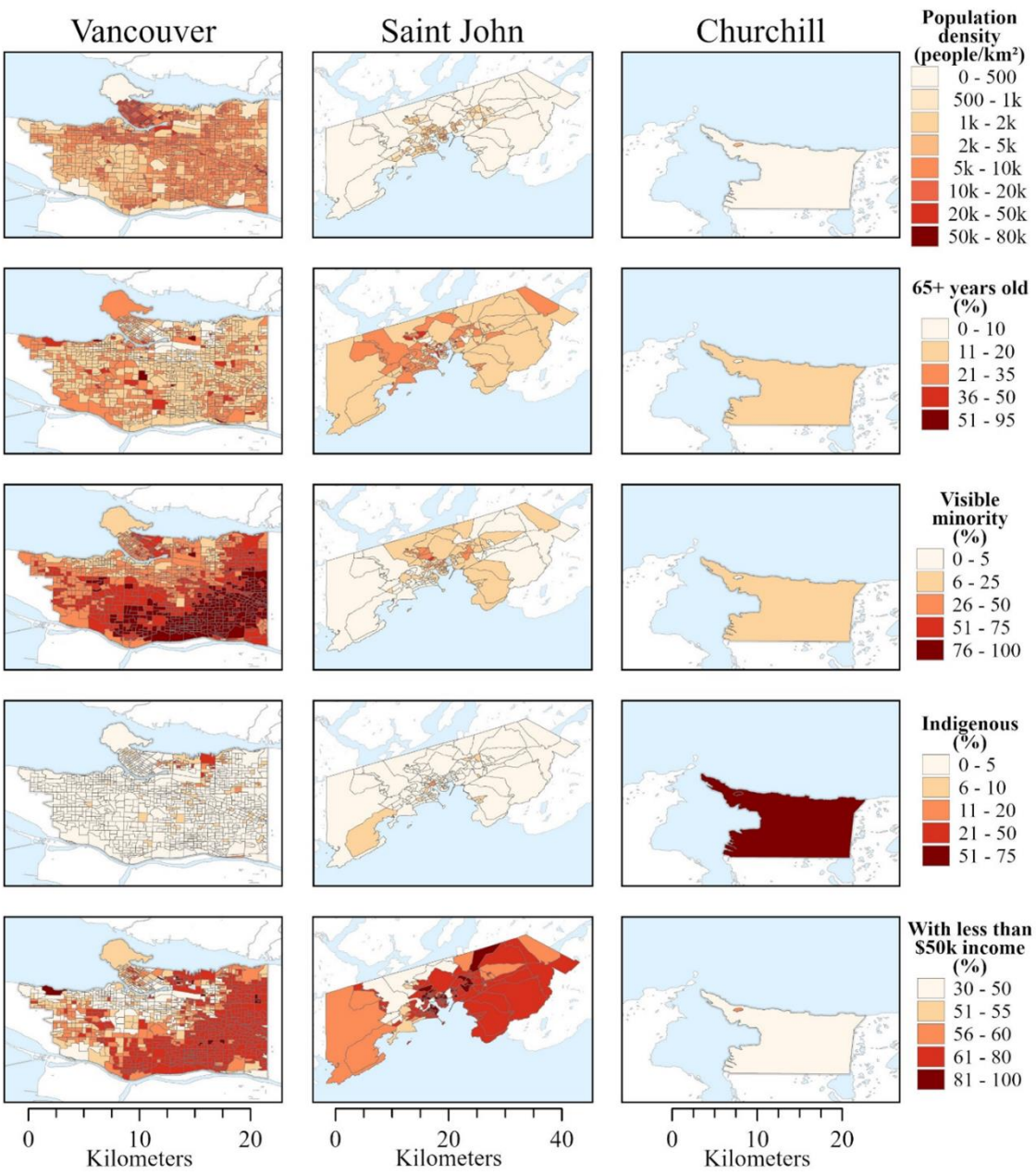

Figure A.1 Spatial diversity in population variables in Vancouver, Saint John and Churchill, obtained from the 2021 Canadian census.

A.3 Obtaining the extreme low-tide and minimal residual in Churchill

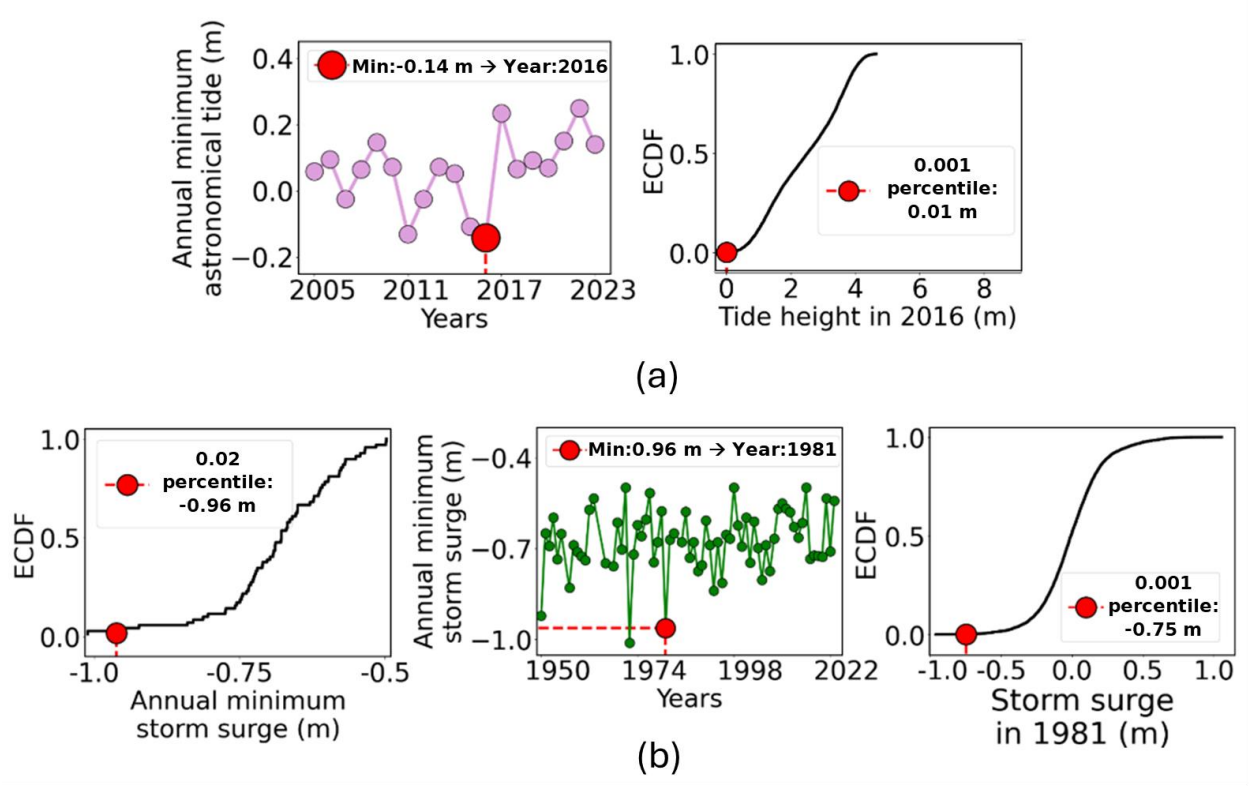

Figure A.2 Extraction of the 9-hour Extreme Astronomical Tide (EAT; panel a) and Extreme Storm Surge (ESS; panel b) for falling sea levels. Left column in panel (a) shows the annual hourly minimum of observed tide data and the right column shows the ECDF of hourly tides in the year in which the annual extreme took place. Left column in panel (b) shows the ECDF of annual minimum storm surge from which the 50-year event is extracted. Middle column shows the year in which the 50-year hourly extreme took place and the right column shows the ECDF of hourly storm surge in which the annual extreme took place. The 9-hour event extremes are chosen based on 0.001 percentiles.

A.4 Delineating the coastal flooding areas

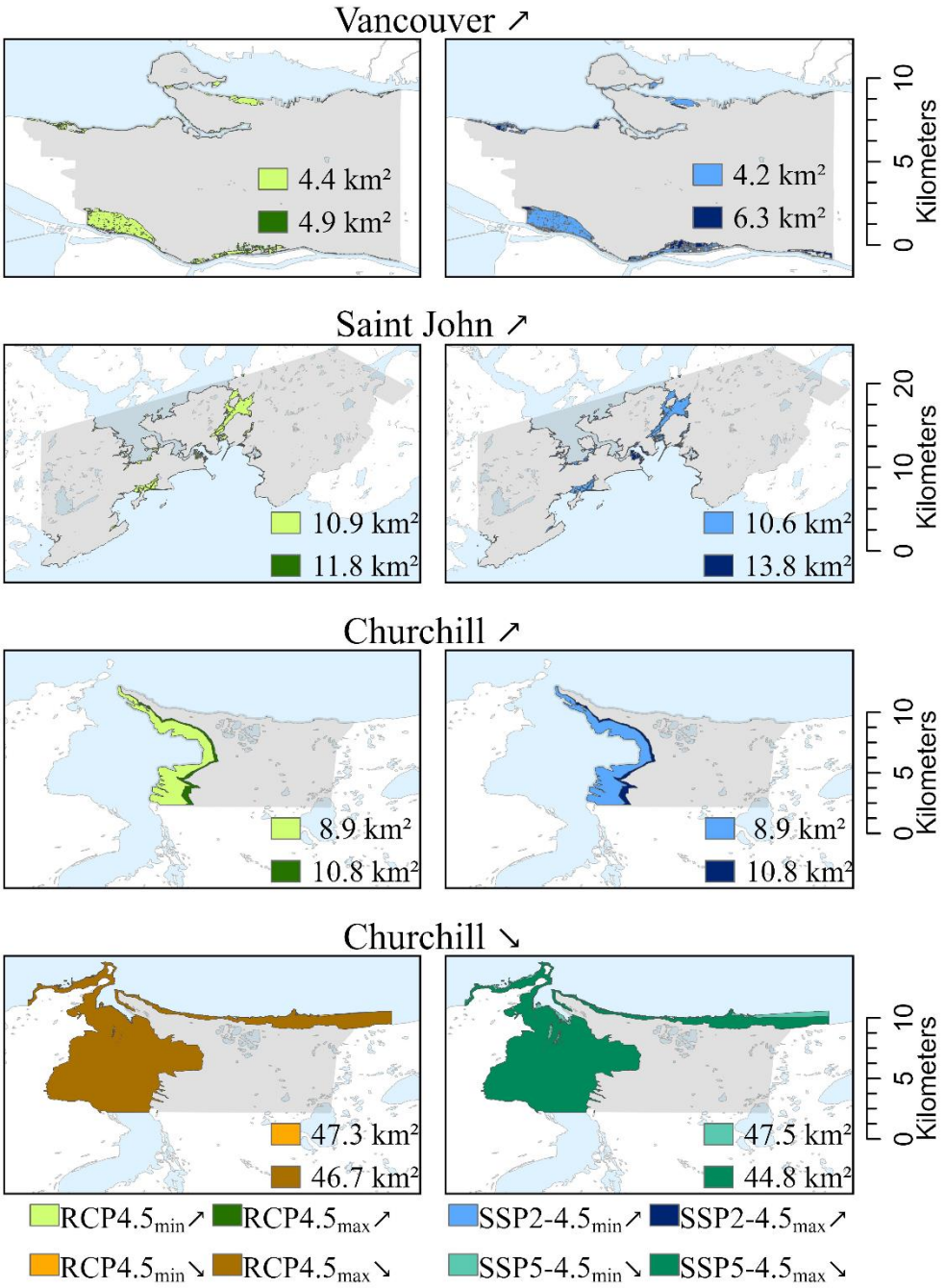

Figure A.3 Projected range of inundated/dried areas in the three considered cities based on estimated Extreme Total Water Level (ETWL) under moderate radiative forcings in the short-term future for CMIP5 (left) and CMIP6 (right) models. The top three rows show the scenario of rising sea levels in Vancouver, Saint John and Churchill. The bottom row depicts the receded scenario in Churchill caused by the drop in the regional sea level.

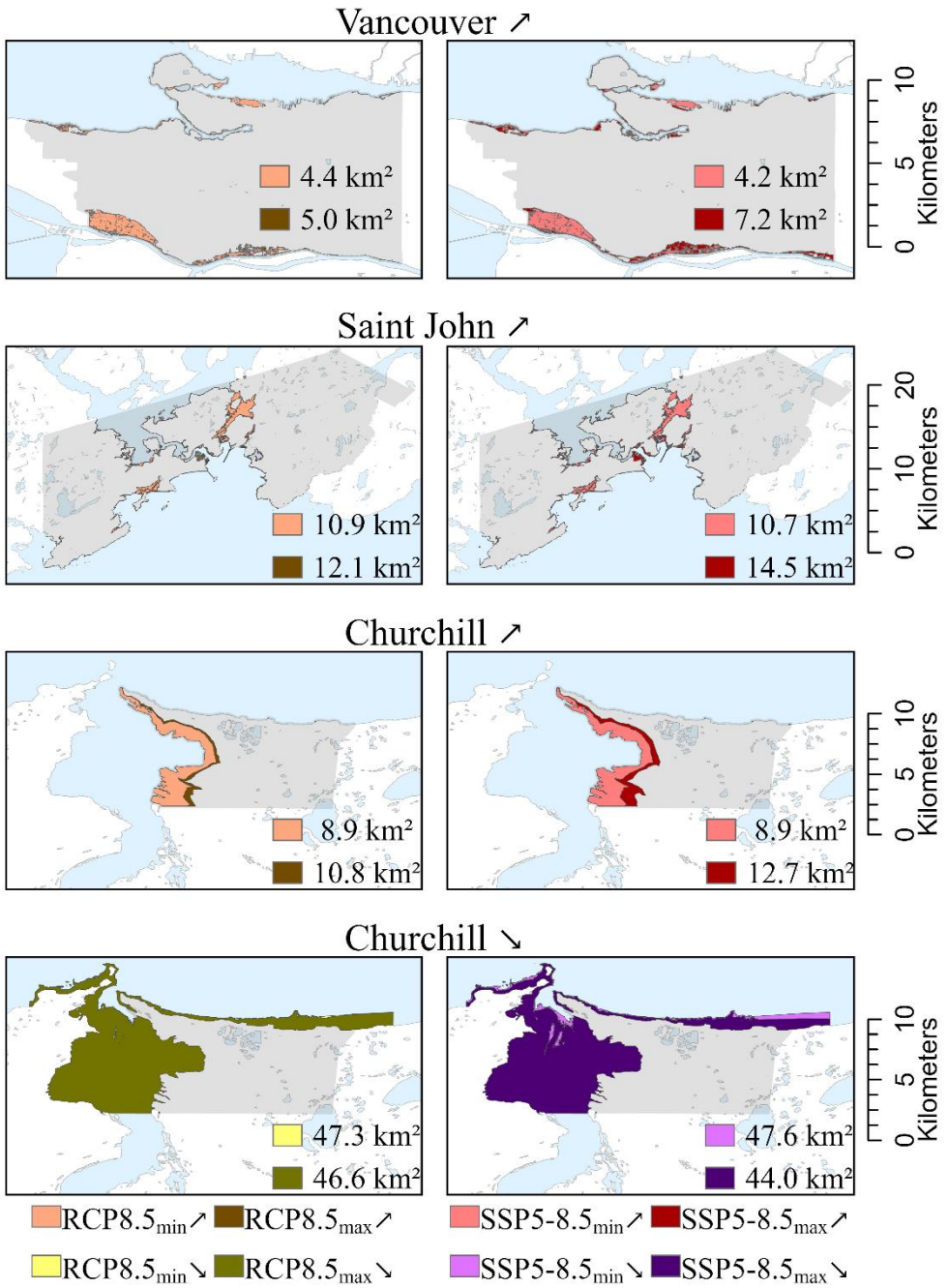

Figure A.4 Projected range of inundated/dried areas in the three considered cities based on estimated Extreme Total Water Level (ETWL) under high radiative forcings in the short-term future for CMIP5 (left) and CMIP6 (right) models. The top three rows show the scenario of rising sea levels in Vancouver, Saint John and Churchill. The bottom row depicts the receded scenario in Churchill caused by the drop in the regional sea level.

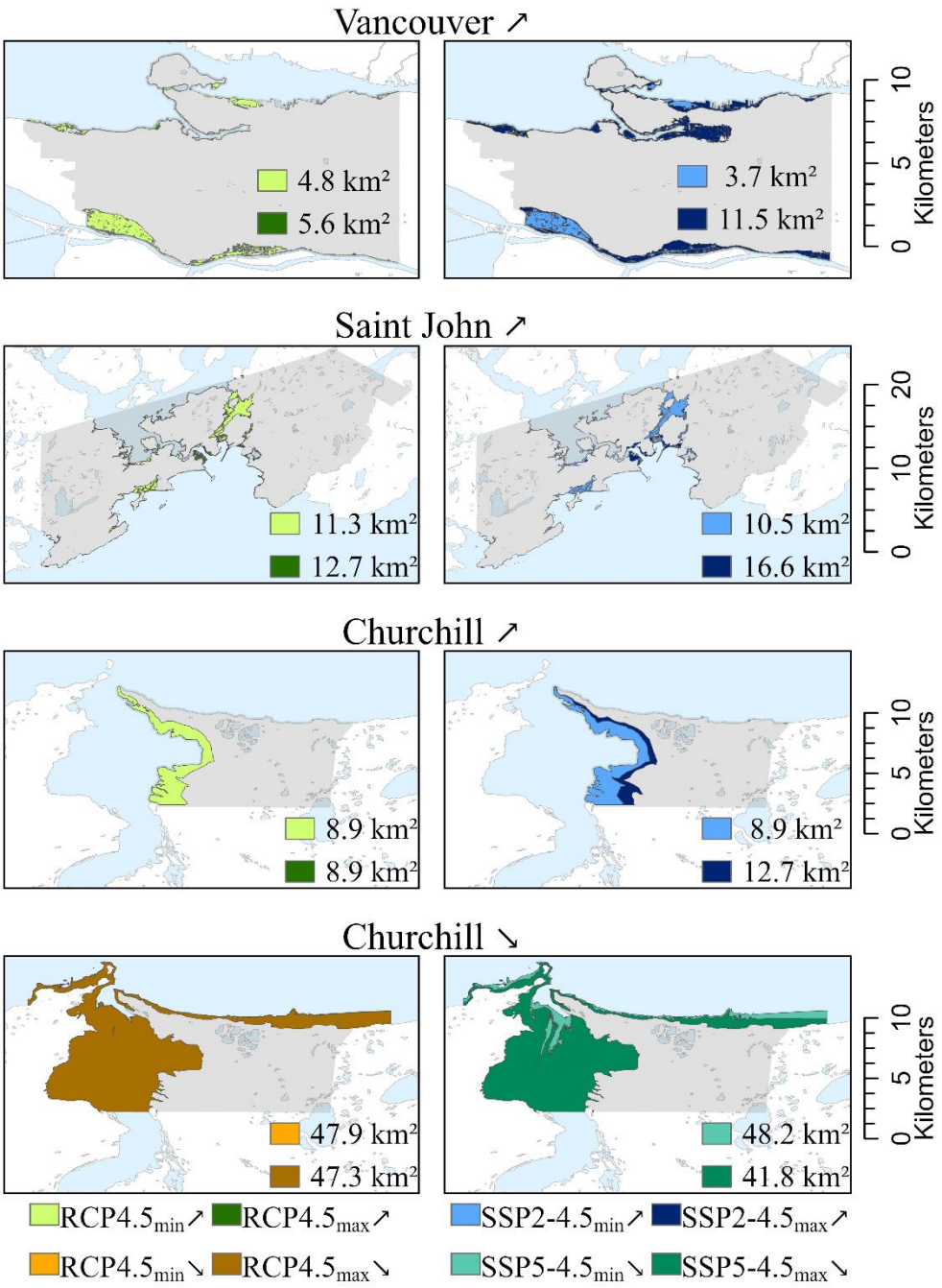

Figure A.5 Projected range of inundated/dried areas in the three considered cities based on estimated Extreme Total Water Level (ETWL) under moderate radiative forcings in the long-term future for CMIP5 (left) and CMIP6 (right) models. The top three rows show the scenario of rising sea levels in Vancouver, Saint John and Churchill. The bottom row depicts the receded scenario in Churchill caused by the drop in the regional sea level.

A.5 Short-term vulnerability

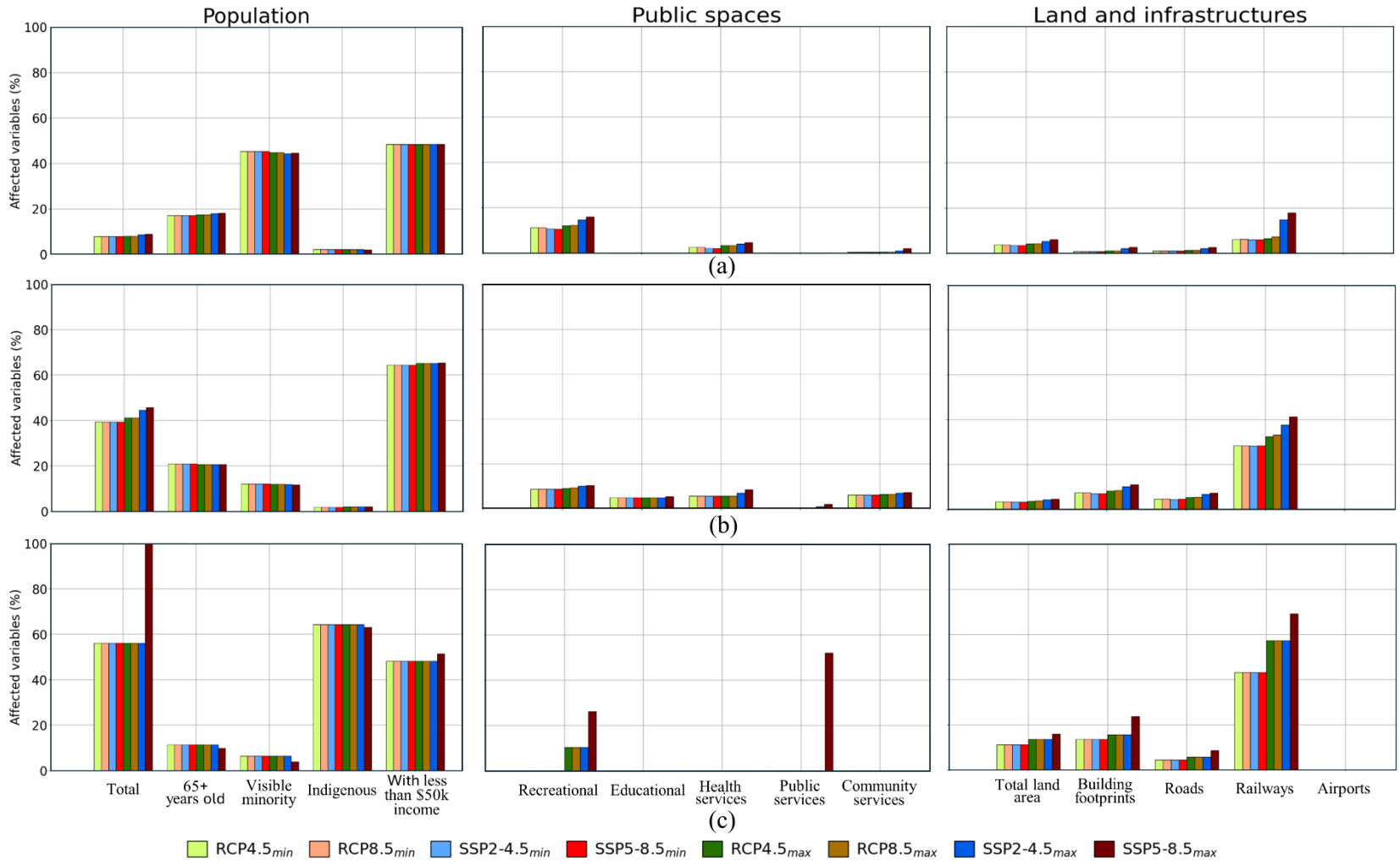

Figure A.6 Vulnerabilities in population (left column), public spaces (middle column), as well as land and infrastructure (right column) due to Extreme Total Water Level projections in (a) Vancouver, (b) Saint John and (c) Churchill under short-term future.

ANNEXE B INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES DU CHAPITRE 6

B.1 Autres exemples de la validation des ondes de tempête

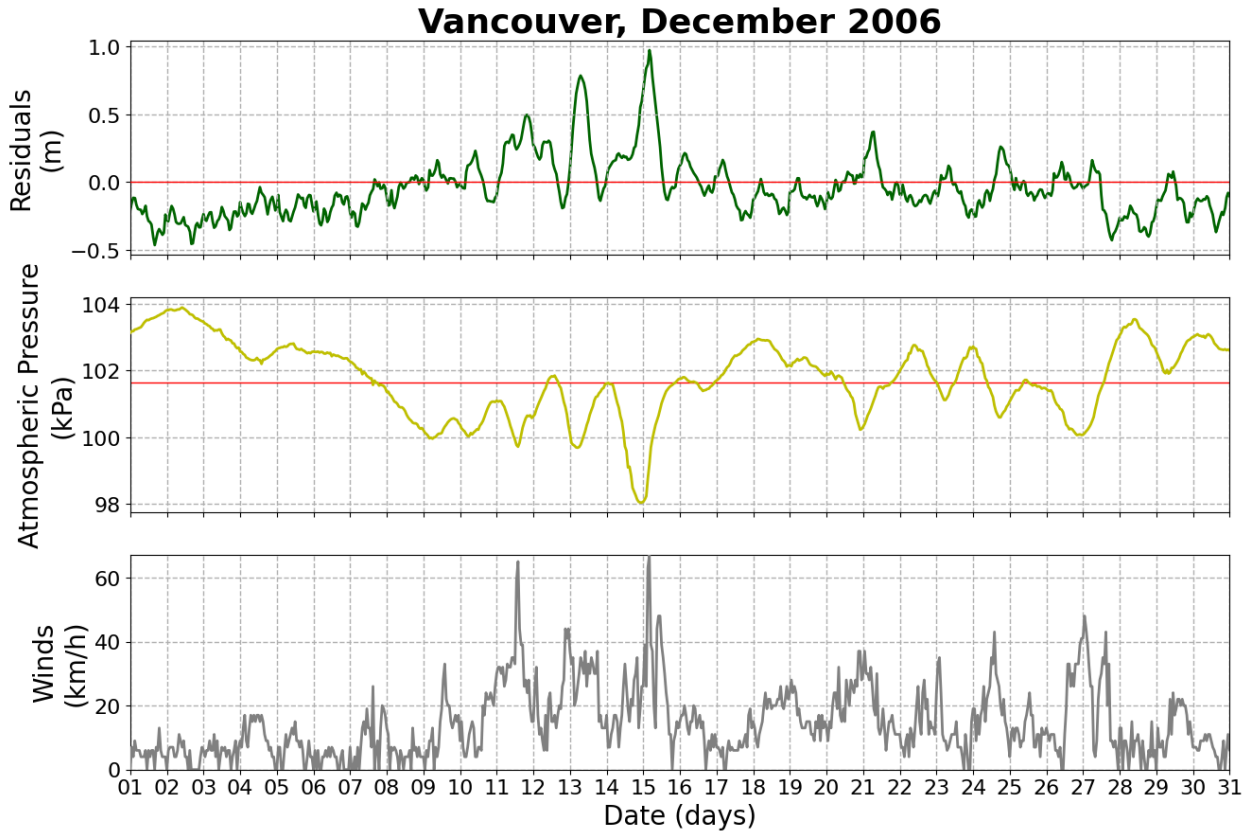

Figure B.1 Analyse des conditions météorologiques à Vancouver lors du mois de décembre 2006. Le panneau en haut offre les résidus, alors que les panneaux du milieu et du bas présentent la pression atmosphérique et les vents enregistrés aux stations climatiques avoisinantes.

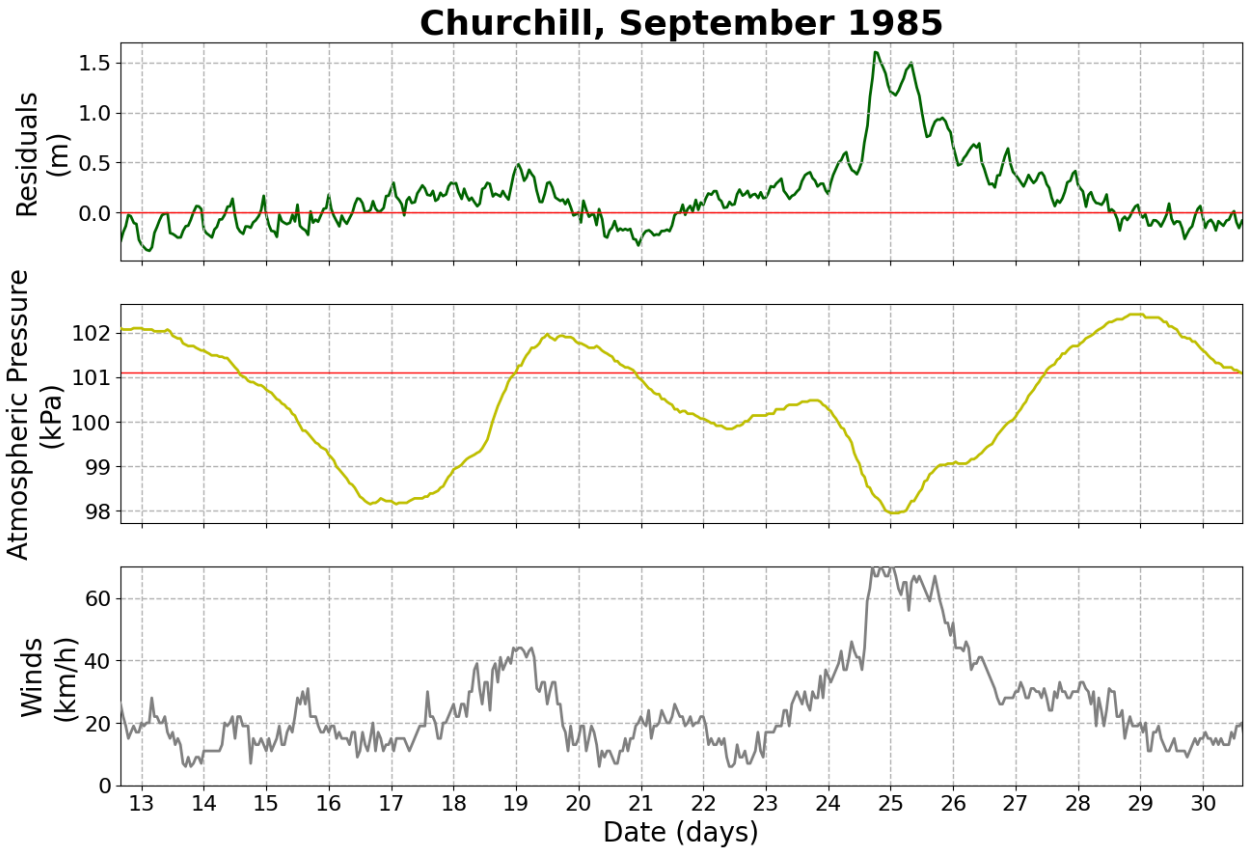

Figure B.2 Analyse des conditions météorologiques à Churchill lors du mois de septembre 1985. Le panneau en haut offre les résidus, alors que les panneaux du milieu et du bas présentent la pression atmosphérique et les vents enregistrés aux stations climatiques avoisinantes.

B.2 Choix de la meilleure distribution pour les ondes de tempête négatives et positives pour Vancouver, Saint John et Churchill

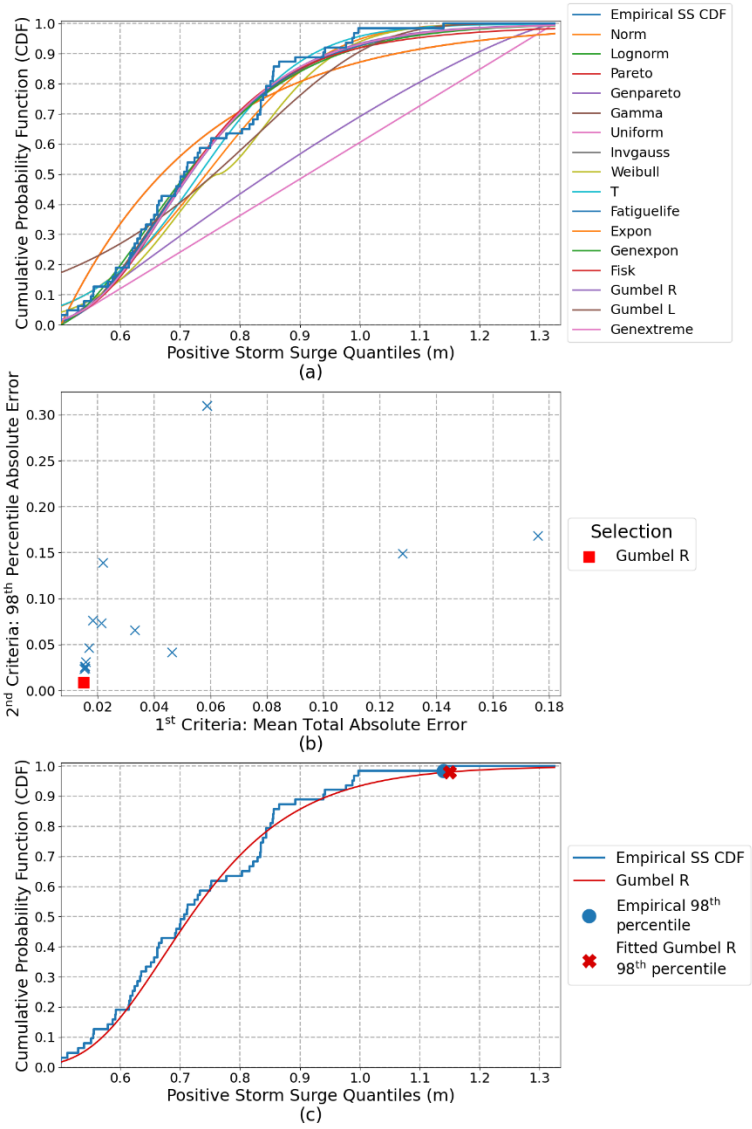

Figure B.3 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête positives à Saint John. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie.

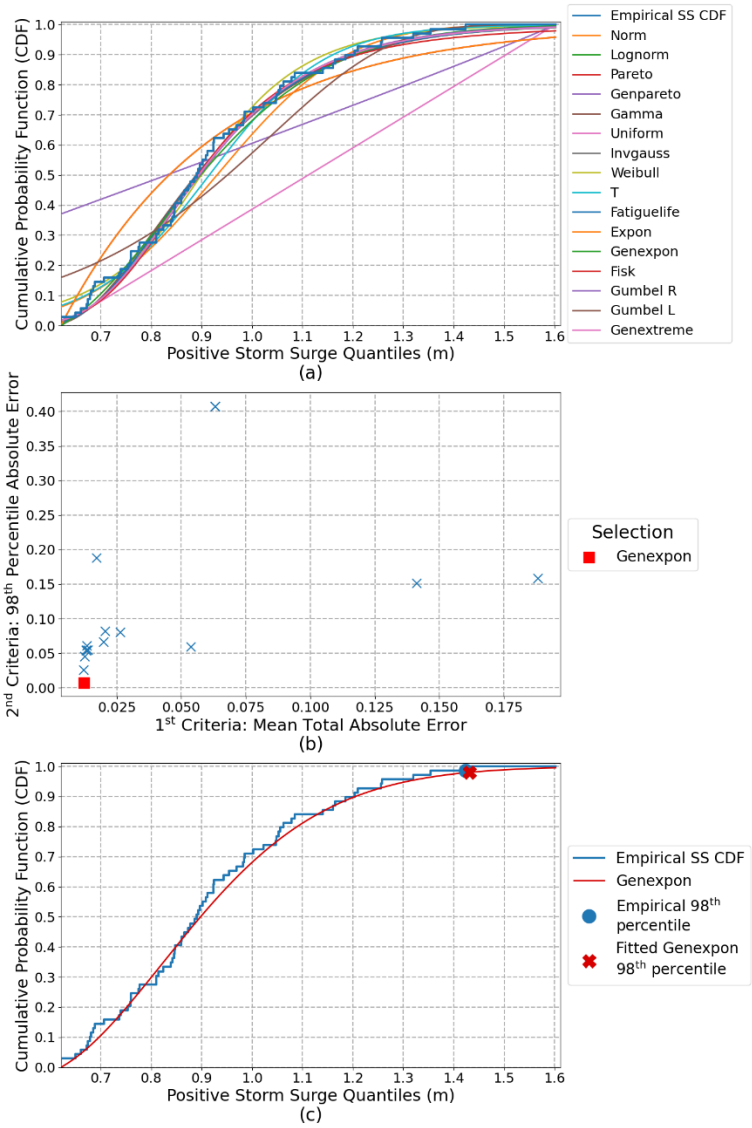

Figure B.4 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête positives à Churchill. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie.

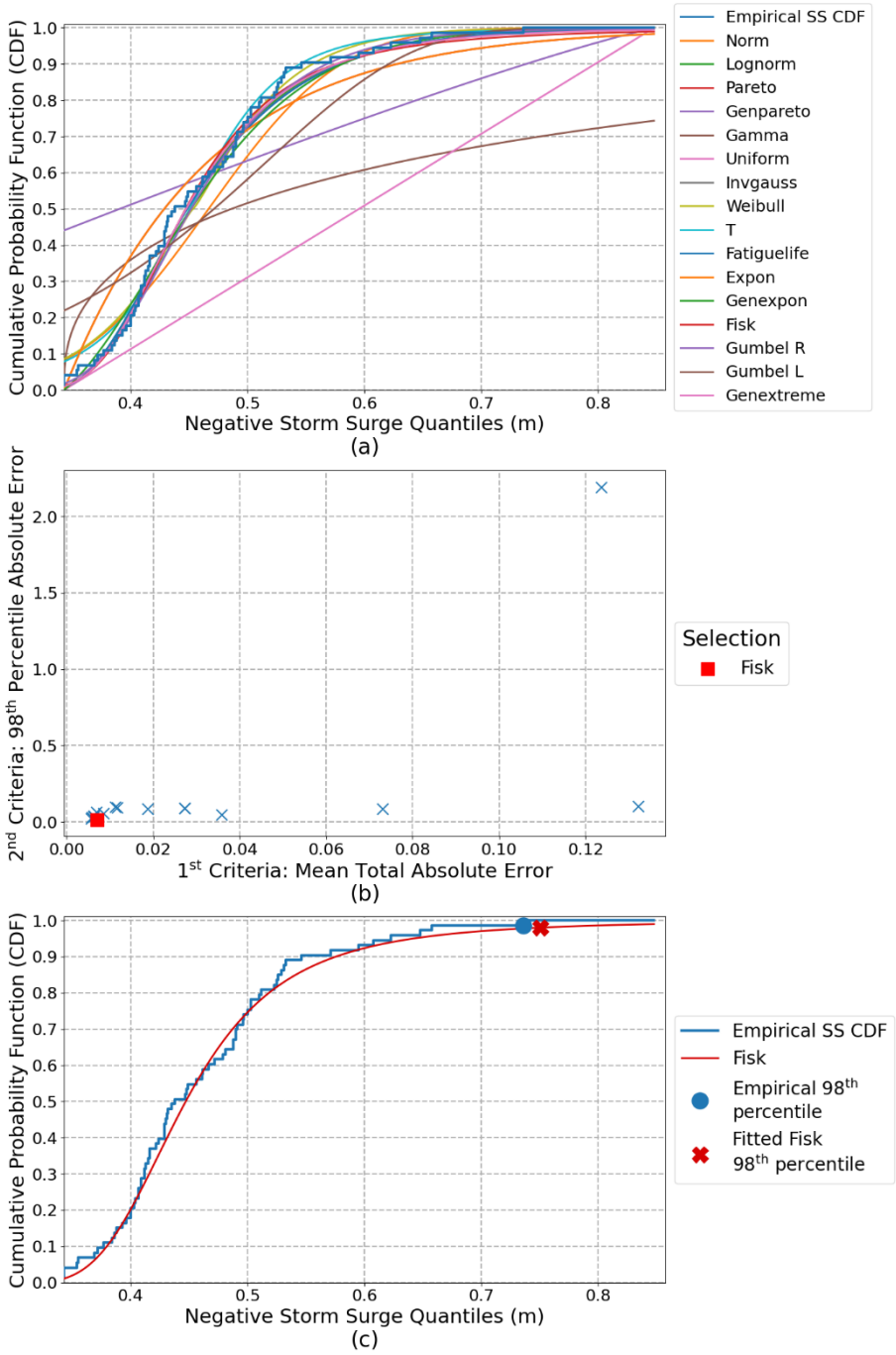

Figure B.5 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête négatives à Vancouver. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie.

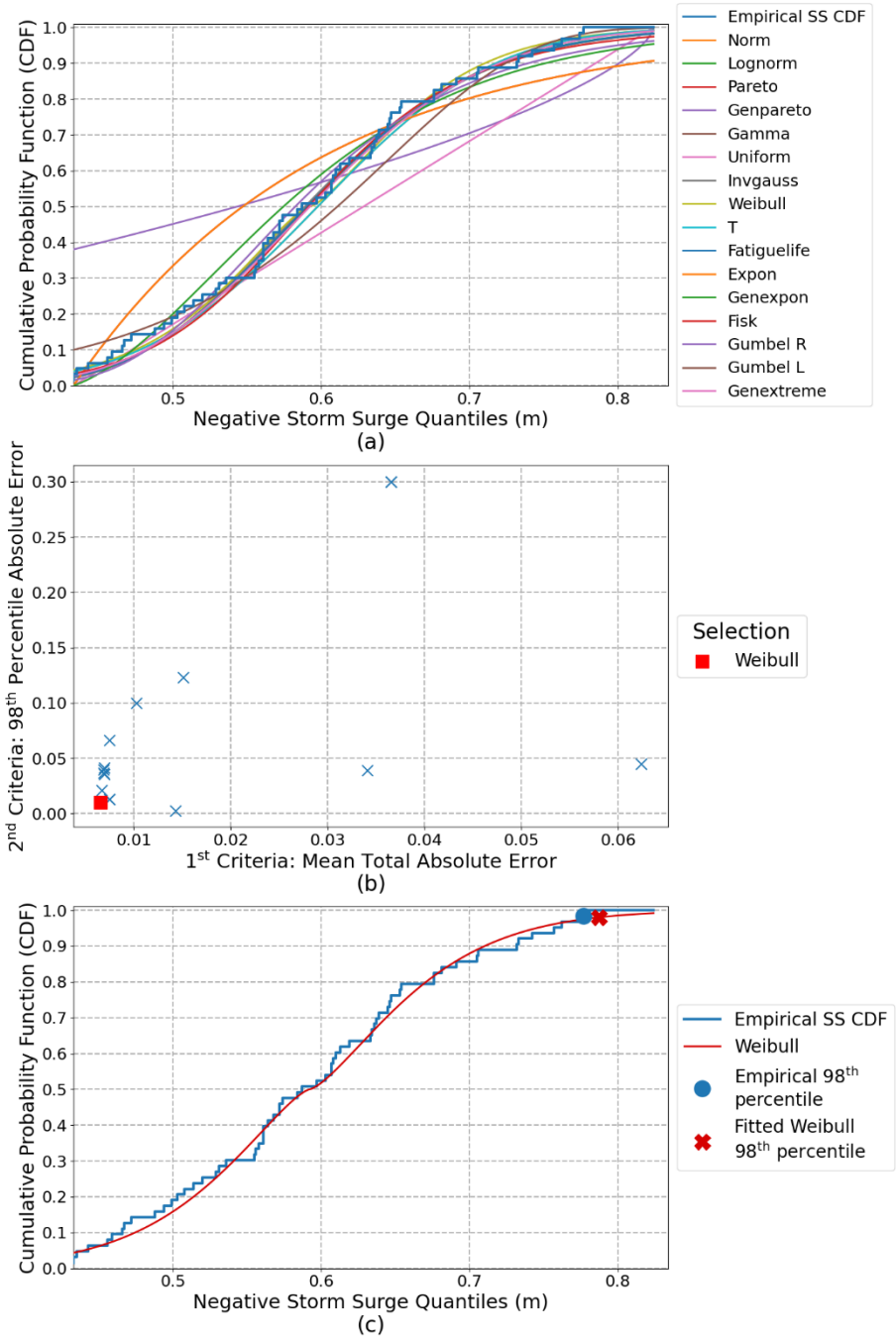

Figure B.6 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête négatives à Saint John. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie.

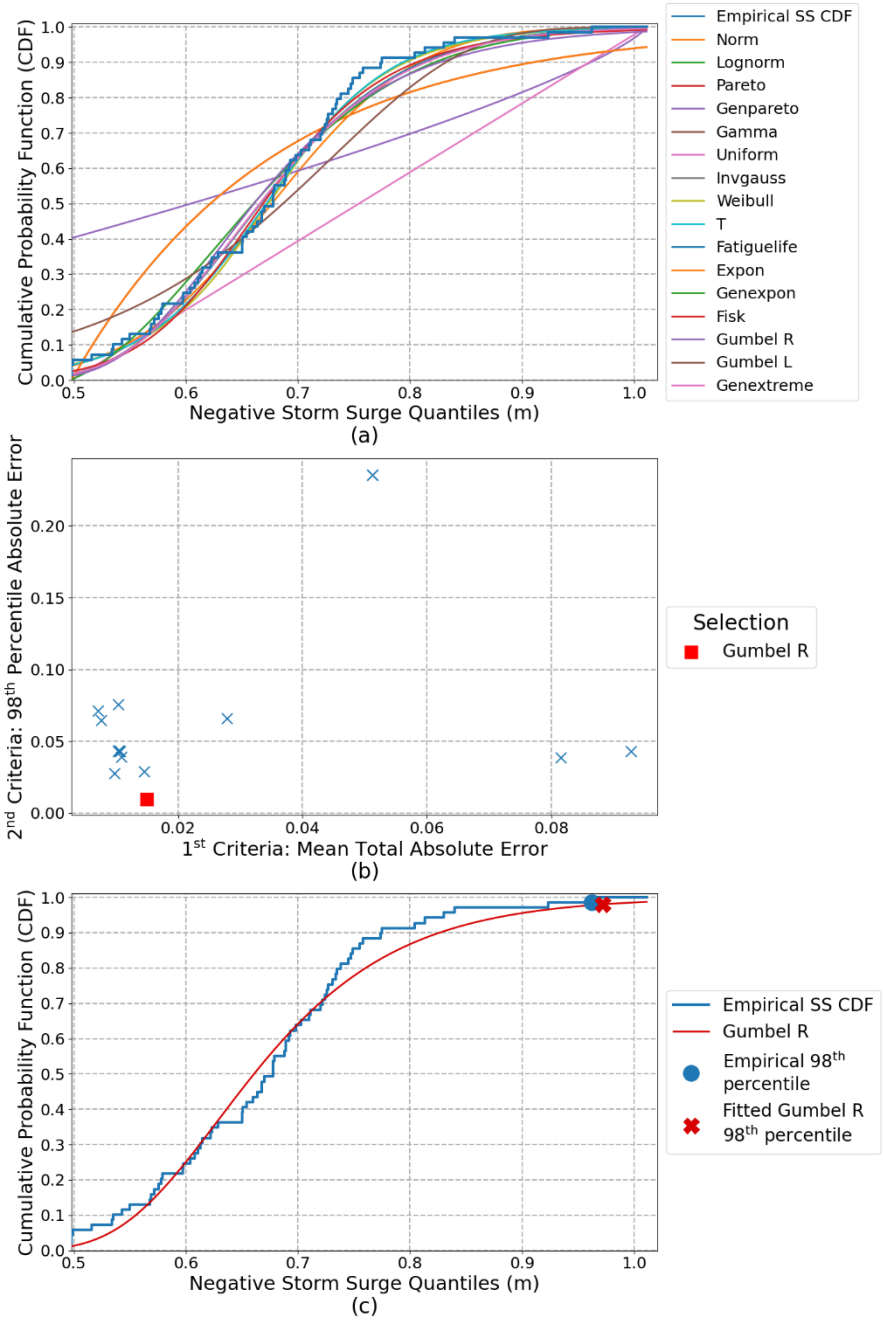

Figure B.7 Choix de la meilleure distribution représentant les ondes de tempête négatives à Churchill. La sous-figure (a) affiche l'ensemble des 16 distributions ajustées à la fonction de répartition empirique. La sous-figure (b) propose le graphique d'optimum de Pareto, alors que la sous-figure (c) compare la distribution empirique avec celle choisie.