



Études de cas sur les changements climatiques dans la cartographie des plaines inondables

Volume 1

2018

Ressources naturelles Canada

Produit d'information générale 118f

Ressources naturelles Canada

Sécurité publique Canada

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada,
représentée par le ministre
des Ressources naturelles, 2018

Lien permanent : <https://doi.org/10.4095/306437>

Pour obtenir des renseignements sur les droits de reproduction,
veuillez communiquer avec Ressources naturelles Canada à
l'adresse nrcan.copyrightdroitdauteur.nrcan@canada.ca.



Table des matières

REMERCIEMENTS	1
AVIS	1
CONTEXTE	2
CADRE DE LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES.....	3
SÉRIE « GUIDES D'ORIENTATION FÉDÉRAUX SUR LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES»	3
RÉSUMÉ DES GUIDES D'ORIENTATIONS	4
PRÉSENTATION.....	5
RÉFÉRENCES.....	10
ANNEXE A : CARTOGRAPHIE DES PLAINES INONDABLES ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES – ÉTUDE DE CAS DE LA VILLE DE SURREY	
ANNEXE B : ÉTUDE DE CAS DE LA CARTOGRAPHIE DES PLAINES INONDABLES ET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES INTÉGRATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES À LA CARTOGRAPHIE DES PLAINES INONDABLES DANS LES BASSES TERRES CONTINENTALES DE LA COLOMBIE-BRITANNIQUE	
ANNEXE C : CARTOGRAPHIE DES PLAINES INONDABLES ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES – ANALYSE DE L'ÉTUDE DE CAS DE LA RIVIÈRE WATERFORD	
ANNEXE D : RESSOURCES SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	
PARTIE 1 : EXEMPLES DE SOURCES DE RENSEIGNEMENTS SUR LES SCÉNARIOS CLIMATIQUES	
PARTIE 2 : EXEMPLES DE CARTOGRAPHIE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DES PLAINES INONDABLES	

REMERCIEMENTS

La Série : « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » a été conçue sous la direction du Comité de la cartographie des inondations, un partenariat entre Sécurité publique Canada, Ressources naturelles Canada, Environnement et Changement climatique Canada, le Conseil national de recherches du Canada, Recherche et développement pour la défense Canada, Relations Couronne-Autochtones et des Affaires du Nord, Infrastructure Canada, et Emplois dans les Forces armées canadiennes . Un groupe de travail technique sur la cartographie des zones inondables mis sur pied en 2015 et composé d'intervenants provenant des administrations fédérales et provinciales, ainsi que du secteur privé et du milieu universitaire, a également offert de précieux commentaires sur la rédaction des documents de la Série : « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables ». Ressources naturelles Canada tient aussi à remercier les auteurs des études de cas : Northwest Hydraulic Consultants, le Conseil du bassin du Fraser et CBCL Limited, ainsi que les communautés mises en évidence dans les études de cas : la Ville de Surrey, la région de la rivière Waterford, dont les municipalités de St. John's, de Mount Pearl et de Paradise à Terre-Neuve-et-Labrador, et le Lower Mainland de la Colombie-Britannique.

AVIS

Dénégation de responsabilité

Le présent document technique a été publié par Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par Ressources naturelles Canada (RNCa). RNCa n'offre aucune garantie et ne fait aucune représentation, expresse ou implicite, légale ou autre en ce qui concerne le document, son efficacité, son exactitude ou son intégralité. RNCa n'assume aucune responsabilité quant aux pertes ou dommages, directs ou indirects, engagés ou subis, en raison de l'utilisation faite du document, y compris la perte de profits, la perte de revenus ou de bénéfices, ou des réclamations par des tiers. En aucun cas RNCa ne sera tenu responsable de pertes de quelque nature que ce soit découlant d'erreurs, d'imprécisions ou d'omissions dans ce document. RNCa n'est tenu par aucune obligation, aucun devoir et aucune responsabilité de nature contractuelle, délictuelle ou autre, y compris en cas de négligence.

Renseignements additionnels

Pour obtenir de plus amples renseignements au sujet de ce document, veuillez communiquer avec le Centre canadien de cartographie et d'observation de la Terre de Ressources naturelles Canada à l'adresse : NRCa.Geoinfo.RNCa@Canada.ca.

CONTEXTE

Une collectivité atteint un niveau élevé de résilience lorsque les risques auxquels elle est exposée sont gérés de façon proactive; elle est adéquatement préparée aux catastrophes connues et possibles et, lorsqu'un événement de ce genre se produit, elle est en mesure de s'en remettre. Pour qu'une collectivité devienne résiliente, ses planificateurs responsables des mesures d'atténuation doivent d'abord connaître la nature des risques et s'assurer qu'ils sont capables de les gérer.

Les inondations consistent en un recouvrement temporaire par l'eau de terres normalement sèches. Elles peuvent survenir dans des zones côtières, près d'un lac ou le long de rivières, et être causées par des embâcles, par le mauvais fonctionnement d'ouvrages de génie civil y compris des barrages, par des précipitations extrêmes ou une capacité de drainage insuffisante, etc. La cartographie des inondations qui délimite avec précision les zones inondables constitue la condition préalable à l'élaboration d'activités d'atténuation et elle est donc la première étape pour accroître la résilience communautaire en ce qui concerne les inondations.

Au Canada, les inondations sont la catastrophe naturelle qui se produit le plus fréquemment; elles représentent annuellement la plus grande part des coûts de rétablissement après un sinistre. L'atténuation des risques d'inondation est donc essentielle à une résilience accrue des collectivités concernées. En investissant de manière proactive dans des activités d'atténuation des inondations, une collectivité assure des investissements utiles à sa croissance et à sa prospérité à venir, en diminuant le risque de coûts importants pour le rétablissement après sinistre, les pertes de productivité, les pertes économiques, la destruction des biens culturels non monétaires, les dommages environnementaux, les blessures et les décès.

L'établissement d'une approche nationale quant à la cartographie des inondations permettra l'adoption d'une pratique exemplaire nationale commune et augmentera la communication et l'utilisation de renseignements sur les inondations, améliorant ainsi les fondations sur lesquelles appuyer d'autres efforts d'atténuation.

CADRE DE LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES

Le Cadre de la cartographie des zones inondables est composé de tous les éléments du processus d'atténuation des inondations, depuis le recensement des risques d'inondation jusqu'à la mise en œuvre d'interventions visant à atténuer les inondations. Le diagramme de flux qui suit illustre la relation entre ces différentes composantes et établit le lien de chacune d'elles avec le document pertinent de la série « *Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables* » :

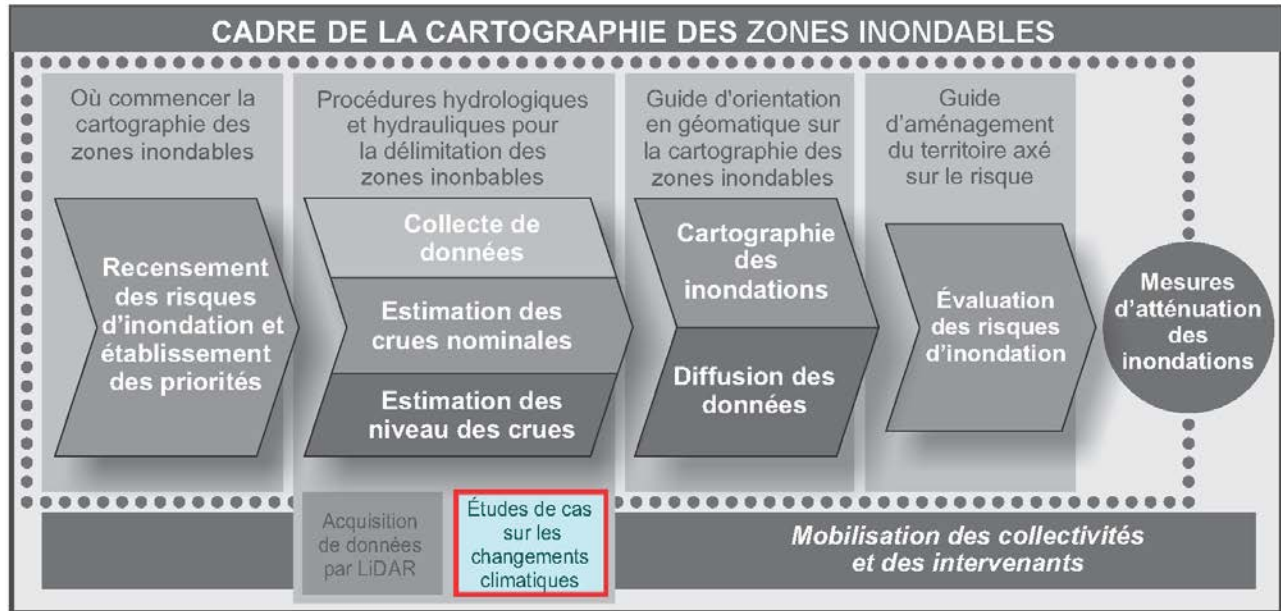


Figure 1 : Cadre de la cartographie des zones inondables

SÉRIE « GUIDES D'ORIENTATION FÉDÉRAUX SUR LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES »

Les documents qui suivent ont pour but d'informer toute personne ou organisation participant à la gestion des inondations au Canada :

1. Cadre fédéral de la cartographie des zones inondables
2. Recensement des risques d'inondation et établissement des priorités
3. Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables
4. Guide d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par lidar aéroporté
5. **Études de cas sur les changements climatiques en cartographie des plaines inondables**
6. Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables
7. Évaluation du risque d'inondation

8. Guide d'aménagement du territoire axé sur le risque : utilisation sécuritaire du territoire fondé sur l'évaluation des risques de dangers
9. Bibliographie des meilleures pratiques et des références concernant l'atténuation des inondations

RÉSUMÉ DES GUIDES D'ORIENTATION

1. Cadre fédéral de la cartographie des zones inondables

Ce document met en contexte la cartographie des zones inondables au Canada, décrit la vision et les principes de l'orientation quant aux inondations, et présente la série « *Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables* » du gouvernement fédéral. Il fournit un résumé de chacun des documents de la série et explique comment chaque document s'inscrit dans le cadre en général, y compris sa place dans le cycle de la cartographie des zones inondables.

2. Recensement des risques d'inondation et établissement des priorités

Ce document reste à rédiger. Il indiquera les méthodes permettant de déterminer où établir une cartographie des inondations et d'établir la façon de prioriser les projets de cartographie des inondations.

3. Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables

Ce document fournit une orientation technique sur les procédures hydrauliques et hydrologiques pour la préparation de cartes des zones inondables au sein d'une administration canadienne, y compris la norme de diligence, les différents types d'inondations, les orientations pour les analyses hydrauliques et hydrologiques et l'intégration de processus non stationnaires y compris les changements climatiques.

4. Guide d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par lidar aéroporté

Ce document se veut une ressource à utiliser pour l'obtention de données d'élévation de base à partir de données Lidar captées depuis les airs dans l'ensemble du Canada. Il vise à fournir des conseils aux ministères fédéraux, provinciaux et territoriaux, de même qu'aux personnes et aux organisations au Canada qui doivent comprendre et planifier la collecte de données Lidar captées depuis les airs.

5. Études des cas sur les changements climatiques en cartographie des plaines inondables

Cet ensemble de documents décrit les projets dans l'ensemble du Canada, où les changements climatiques ont été incorporés au processus de cartographie des plaines inondables. Il donnera des exemples pour que les parties intéressées se fondent sur les expériences des autres et il viendra compléter les renseignements liés aux changements climatiques, ainsi que les ressources, inclus dans le document « Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables ».

6. Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables

Ce document traite des composantes de cartographie des zones inondables et de la diffusion du Cadre fédéral de cartographie des zones inondables. Il renferme des renseignements sur les différents types de cartes des inondations et décrit les méthodes d'acquisition, de gestion et de diffusion de ces cartes et des données géospatiales qui leur sont associées.

7. Évaluation des risques d'inondation

Ce document est en cours de rédaction. Il comprendra une orientation technique sur le déroulement des évaluations des risques d'inondation au Canada.

8. Guide d'aménagement du territoire axé sur le risque : utilisation sécuritaire du territoire fondé sur l'évaluation des risques ou des aléas

Ce document offre aux collectivités des conseils sur l'application de méthodologies axées sur le risque à des fins d'aménagement du territoire.

9. Bibliographie des meilleures pratiques et des références concernant l'atténuation des inondations

Ce document renferme des listes d'ouvrages de référence et d'études de cas canadiens et internationales concernant l'hydrologie et l'hydraulique, y compris les changements climatiques et la cartographie des zones inondables. Ce document vise à fournir une liste de documents de référence additionnels que peuvent consulter les personnes qui participent à la cartographie des zones inondables.

PRÉSENTATION

Ce document fait partie de la Série : « Guides d'orientation sur la cartographie des zones inondables » et a pour objectif de faire progresser les considérations liées aux changements climatiques dans l'élaboration des cartes de plaines inondables au moyen d'exemples de méthodes utilisées par des pionniers dans le domaine. Il s'agit d'une science émergente et en raison de la complexité de ce type d'analyse, des experts qualifiés devraient être consultés lors de l'intégration du changement climatique dans la cartographie des zones inondables. Les sources de données, les méthodes utilisées et les conclusions des études de cas sont données à titre d'exemple par des experts et ne sont ni validées ni approuvées par Ressources naturelles Canada.

Ce document vient compléter la section Changement climatique du *Cadre fédéral de la cartographie des inondations* et n'est pas de nature normative ni destiné à donner une orientation définitive. Il sert plutôt à souligner des possibilités d'apprentissage à l'appui des projets et des activités de cartographie des plaines inondables partout au Canada. Les exemples sont documentés sous la forme d'études de cas et ont été sélectionnés en fonction des méthodes de cartographie des plaines inondables des collectivités de l'ensemble du Canada et répertorient celles qui intègrent activement les changements climatiques et qui étaient disposées à participer à la rédaction de la série de guides d'orientation. La série de guides d'orientation sera mise à jour périodiquement au fur et à mesure de la publication des nouvelles études de cas.

Au Canada, on prévoit que les changements climatiques entraîneront une augmentation de l'intensité des conditions météorologiques extrêmes d'humidité et de sécheresse et des dangers connexes tels que les inondations et les sécheresses (Bush et coll., 2014). Les impacts prévus varieront selon les régions du Canada et dépendront de la température, des précipitations et d'autres facteurs dont la condition de la surface terrestre (BC MFLNRO, 2012) et le niveau de développement. Au Canada, de récentes études révèlent une augmentation moyenne des chutes de pluie annuelles de 13 % de 1950 à 2009 (Bush et coll., 2014; voir aussi Environnement et Changement climatique Canada, 2016) ainsi que d'importantes variations selon la région et la saison. Par exemple, la Colombie-Britannique et le Canada atlantique connaissent une augmentation plus marquée des précipitations totales ainsi que d'importants changements dans les chutes de pluie printanières et automnales. Plusieurs régions connaissent une diminution des chutes de neige et une augmentation des chutes de pluie (Bush et coll., 2014). En outre, les inondations le long des littoraux maritimes du Canada sont touchées par le changement du niveau de la mer et les taux de changement observés varient partout au Canada en raison du mouvement de terrain vertical (Atkinson et coll., 2016). Par exemple, même si de 1901 à 2010 le niveau de la mer à l'échelle internationale a augmenté d'environ 1,7 mm par année, au cours de la même période, le niveau de la mer mesuré a augmenté de 3,3 mm par année à Halifax (N.-É.) et a diminué de 9,3 mm par année à Churchill, au Manitoba (Atkinson et coll., 2016).

Les tendances des phénomènes météorologiques extrêmes sont plus difficiles à quantifier que celles des tendances annuelles moyennes ou totales. Par définition, ces phénomènes sont moins fréquents, c'est pourquoi il y a moins de données disponibles pour les analyses (Seneviratne et coll., 2012). Pour le moment, aucun changement uniforme n'a été observé dans les précipitations extrêmes dans l'ensemble du Canada, et ce, malgré les changements dans les précipitations annuelles (Bush et coll., 2014). L'une des tendances observées concerne l'augmentation des coûts des inondations (BAC, 2015). La croissance démographique, l'augmentation des activités économiques dans les zones sujettes aux inondations et l'aggravation des conditions météorologiques extrêmes déclenchées par les changements climatiques contribuent à l'augmentation de ces coûts (Visser et coll., 2014; Field et coll., 2012). Les paiements versés par le gouvernement fédéral en vertu des Accords d'aide financière en cas de catastrophe (AAFCC) aux provinces et aux territoires pour des inondations survenues sur des périodes de dix ans ont passé de 399 millions de dollars entre 1975 et 1984 à 3,8 milliards entre 2005 et 2014, ajustés en dollars de 2014 (BDPB, 2016). Les paiements moyens annuels prévus liés aux AAFCC sont estimés à 673 millions de dollars entre 2016 et 2020, ajustés en dollars de 2014 (BDPB, 2016). Bien que les tendances actuelles des précipitations extrêmes au Canada ne soient pas uniformes, les précipitations maximales sur 24 heures (avec la période de retour actuelle de 20 ans) devraient connaître une hausse au cours des 50 prochaines années (Environnement et Changement climatique Canada, 2016). En outre, les augmentations des niveaux de la mer prévus d'ici 2100 pourraient dépasser 1 m dans certaines régions du Canada (Atkinson et coll., 2016). Nous sommes de plus en plus conscients que les considérations liées aux changements climatiques sont essentielles à l'intégration des projections hydrologiques et du niveau de la mer dans les cartes des plaines inondables (ASFPM, 2016; APEGBC, 2012; Khaliq et coll., 2016). Cependant, l'intégration des projections en matière de changements climatiques est complexe, car la modélisation des projections en matière de changements climatiques engendre de l'incertitude (Khaliq et coll., 2016) et que la nature précise de ces changements est incertaine. (ASFPM, 2016). Par conséquent, il n'existe actuellement aucune méthode ni pratique exemplaire reconnue permettant d'intégrer les projections en matière de changements climatiques dans la cartographie des plaines inondables.

Il est important de souligner que l'intégration des considérations liées aux changements climatiques dans la cartographie des plaines inondables n'élimine pas pour autant la nécessité future de faire les mises à jour de la cartographie qui seront rendues nécessaires par l'aménagement du territoire et les changements des chenaux des rivières (p. ex., avulsions, érosion, dégradation et alluvionnement).

Les études de cas qui intègrent les changements climatiques dans la cartographie des plaines inondables figurent dans les annexes, et les méthodes utilisées sont décrites brièvement ci-dessous :

Cartographie des plaines inondables et changements climatiques – Étude de cas la ville de Surrey

En 2013, la ville de Surrey a adopté une stratégie sur l'adaptation au climat comprenant une initiative visant à augmenter la résilience des collectivités aux risques d'inondations futures. Dans le cadre de cette initiative, la ville a dressé des cartes des plaines inondables en vue des conditions futures, et elle a intégré des projections en matière de changements climatiques et des changements d'affectation des terres pour les horizons temporels de 2040, de 2070, de 2100 et de 2200. Cette zone est sujette aux inondations côtières puisque les rivières Serpentine et Nicomekl traversent la ville de Surrey.

Une simulation continue a été élaborée afin de combiner les effets des conditions de l'océan et des précipitations. Le modèle hydrologique continu « HSPF » du US EPA a servi à estimer les débits entrants, lesquels ont été utilisés avec le modèle hydrologique du système d'analyse des rivières du Hydrologic Engineering Center (HEC-RAS). Les estimations des niveaux de l'océan futurs ont été effectuées en ajoutant 10 cm/décennie et sont fondées sur les guides d'orientation sur le niveau de la mer de la C.-B. Quant aux précipitations, le Pacific Climate Impacts Consortium¹ a réduit la portée des projections de précipitations du modèle climatique global. Les projections établies au moyen du modèle climatique global (MCG) CanESM2 ont été sélectionnées : une représentant un scénario « modérément élevé » et une autre représentant un « scénario grave ». Un « scénario extrême » dégagé au moyen d'un autre modèle (GCM MPI-WSM-LR) a été rejeté, les auteurs l'ayant jugé irréaliste. La planification de l'affectation des terres a été évaluée à l'aide du plan communautaire officiel de la ville de Surrey. Une carte des plaines inondables illustrant l'étendue des plaines inondables sur une période de retour de 200 ans dans les conditions actuelles et des conditions futures pour les années 2040, 2070, 2100 et 2200 a été dressée. L'analyse a révélé que dans le cas des zones de plaines inondables à faible élévation, les inondations côtières causées par l'augmentation du niveau de la mer étaient plus importantes et a ramené la période de retour des inondations de 200 ans à moins de 2 ans d'ici 2100, et ce, sans égard aux modifications des précipitations. Dans les zones de plaines inondables hautes, le niveau bicentenaire des crues actuel pourrait être atteint en moyenne tous les 5 à 10 ans d'ici 2100. Bien que l'étude de cas ait révélé que ces projections sont réalistes et qu'elles peuvent être utilisées pour la planification, les auteurs recommandent de surveiller fréquemment les conditions actuelles et, au besoin, de modifier les décisions et les stratégies de gestion.

¹ Pour obtenir de plus amples renseignements au sujet du Pacific Climate Impacts Consortium, visitez le site Web à l'adresse <https://www.pacificclimate.org/>

Étude de cas de la cartographie des plaines inondables et des changements climatiques

Intégration des changements climatiques à la cartographie des plaines inondables dans les basses terres continentales de la Colombie-Britannique

Cette étude de cas a examiné les inondations le long du fleuve Fraser et au sud de la côte du Lower Mainland de la Colombie-Britannique. Le fleuve Fraser est le plus grand cours d'eau de la côte ouest du Canada, et les projections en matière de changements climatiques comprennent des débits de pointe accrus en raison de la fonte des neiges plus hâtive et plus intense pendant la crue printanière et de pluies plus fortes. Cette zone est également vulnérable aux inondations côtières en raison de l'augmentation du niveau de la mer à l'échelle mondiale et de l'effet des ondes de tempête. On prévoit que les crues printanières influenceront sur une zone beaucoup plus grande que les inondations côtières.

L'étude fournit des renseignements à la Lower Mainland Flood Management Strategy destinée à réduire et à gérer les risques d'inondations dans les collectivités du Lower Mainland. La présente cartographie des plaines inondables a été dressée à l'appui de l'évaluation régionale des zones vulnérables aux inondations et n'a pas été utilisée pour la désignation officielle des plaines inondables, les profils de conception des digues et les constructions au-dessus du niveau de la mer.

L'étude de cas a examiné deux types de risques d'inondations : les inondations dans le bas Fraser et les inondations côtières. Les projections climatiques tirées d'une gamme de scénarios futurs d'émission de gaz à effet de serre à l'égard de la température et des précipitations dans la région ont été obtenues auprès du Pacific Climate Impacts Consortium² et un éventail de modèles hydrologiques ont été examinés. Les deux scénarios climatiques ont été choisis en fonction des recommandations formulées par le PCIC, il s'agit d'un scénario de « changement climatique intense » obtenu avec le modèle HadGEM A1B (série 1) et d'un scénario de « changement climatique modéré » obtenu avec le modèle HadCM3 BI (série 1). La crue nominale du fleuve Fraser est celle de 1984 et la période de retour approximative est de 500 ans. Conformément aux lignes directrices adoptées à l'échelle provinciale, une prédiction de l'augmentation du niveau de la mer de 1 m par année d'ici 2100 a été utilisée. L'étude a permis de dresser deux cartes : une indiquant les inondations côtières actuelles et futures et l'autre indiquant les crues printanières actuelles et futures du fleuve Fraser. Les conditions futures (2100) représentaient le « scénario climatique modéré ». L'étendue des zones inondables ne connaîtra pas d'important changement en raison de la topographie de la vallée fluviale, mais on prévoit une augmentation de la fréquence et de la profondeur des inondations. Par exemple, la période de retour des inondations de 50 ans du fleuve Fraser de 2100 pourrait avoir la même ampleur que la crue nominale actuelle avec une période de retour de 500 ans. Des recommandations ont été formulées afin d'intégrer les projections en matière de changements climatiques dans les cartes des plaines inondables, et notamment, de souligner la nécessité d'effectuer des mises à jour régulières en raison de l'amélioration des outils de la nature changeante des conditions météorologiques et physiques.

Cartographie des plaines inondables et changements climatiques – Analyse de l'étude de cas de la rivière Waterford

En 2011, dans le cadre de l'initiative intitulée Climate Change Adaptation initiative, le gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador a mis à jour et a mené des études de cartographie des risques d'inondations. Cette initiative a permis de dresser des cartes des risques d'inondations pour la rivière Waterfront et ses affluents qui traversent les municipalités de St. John's, de Mount Pearl et de Paradise. Les cartes des risques d'inondations comprenaient des courbes intensité-durée-

fréquence (IDF), des estimations des débits de crue, une modélisation hydraulique, des analyses de sensibilité et une transposition des résultats de la modélisation hydraulique dans des cartes topographiques. Les courbes IDF utilisées ont été élaborées et publiées en 2015 par Conestoga-Rovers et Associés et ont été intégrées aux projections en matière de changements climatiques au moyen d'un outil conçu par l'University of Western Ontario. Les courbes IDF de 2071-2100 ont été sélectionnées pour cette étude de cas, car leurs projections étaient les plus conservatrices et faisaient état d'une augmentation de 26 % des chutes de pluie. La modélisation hydraulique a été effectuée au moyen du système de modélisation hydraulique (HEC-HMS), conçu par le US Army Corp of Engineers, et de l'extension de modélisation géospatiale (HEC-GeoHMS) du Hydrologic Engineering Center afin d'estimer le débit de crue pour des périodes de retour de 20 ans et de 100 ans. Les débits de crue des cartes des inondations ont été traduits en profils de la surface de l'eau au moyen du système d'analyses des rivières (HEC-RAS) et de l'extension de modélisation géospatiale (HEC-GeoHMS) du Hydrologic Engineering Center. Les cartes qui ont été élaborées comprenaient des comparaisons du climat actuel et des conditions du développement ainsi que des conditions climatiques et des conditions de développement futures pour des périodes de retour de 20 ans et de 100 ans. Cette étude de cas recommande l'intégration de considérations liées aux changements climatiques dans la cartographie des plaines inondables y compris les courbes IDF et les données au fur et à mesure de leur publication.

Les prochaines éditions du document renfermeront d'autres études de cas ainsi qu'une introduction actualisée où les changements climatiques sont pris en compte dans la cartographie des plaines inondables.

RÉFÉRENCES

(APEGBC) Association of Professional Engineers and Geoscientists of BC (2017) Flood mapping in BC: Lignes directrices sur les pratiques professionnelles de l'APEGBC.

Lignes directrices sur les pratiques professionnelles de l'Association of Professional Engineers and Geoscientists of BC (APEGBC) (2012) – Legislated Flood Assessments in a Changing Climate in BC.

Atkinson, D.E., Forbes, D.L. et James, T.S. (2016) : Dynamic coasts in a changing climate; in Canada's Marine Coasts in a Changing Climate, (éd.) D.S. Lemmen, F.J. Warren, T.S. James et C.S.L. Mercer Clarke; Gouvernement du Canada, Ottawa, ON, p. 27-68.

(ASFPM) Association of State Floodplain Managers Foundation (2016) Meeting the Challenge of Change: Implementing the Federal Flood Risk Management Standard and a Climate-Informed Science Approach.

(BC MFLNRO) British Columbia Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations (2012) Professional Practice Guidelines – legislated Flood Assessments in a Changing Climate in BC.

Bush, E.J., Loder, J.W., James, T.S., Mortsch, L.D. et Cohen, S.J. (2014) : Un aperçu des changements climatiques au Canada; Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation, 2014 Warren et D.S. Lemmen; Gouvernement du Canada, Ottawa, ON, p. 23-64.

Environnement et Changement climatique Canada. (2016). Données et scénarios climatiques : Synthèse des observations et des résultats récents de modélisation.

Field, C. B. Barros, V., Stocker, T. F., et Dahe, Q., (eds.) (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: rapport spécial du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press

Bureau d'assurance du Canada (2015). La gestion financière du risque d'inondation Bureau d'assurance du Canada

Khaliq, M.N., et Attar, A. (2017) Assessment of Canadian Floodplain Mapping and Supporting Datasets for Codes and Standards. Rapport technique du Conseil national de recherches du Canada OCRE-TR-2017-026

(BDPD) Bureau du directeur parlementaire du budget (2016), Estimation du coût annuel moyen des Accords d'aide financière en cas de catastrophe causée par un événement météorologique

Seneviratne, S.I., Nicholls, D. Easterling, C.M. Goodess, S. Kanae, J. Kossin, Y. Luo, J. Marengo, K. McInnes, M. Rahimi, M. Reichstein, A. Sorteberg, C. Vera, et X. Zhang, 2012 : Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. Dans : La gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, et P.M. Midgley (éditeurs.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, É.-U., pp. 109-230.

Thistlethwaite, J., Henstra, D., Peddle, S., Scott, D., (2017) Canadian Voices on Changing Flood Risk Findings from a National Survey.

Visser, H., Petersen, A. C., et Ligtoet, W. (2014). On the relation between weather-related disasters impacts, vulnerability and climate change. Climatic Change, volume 125, numéro (3-4), pp. 461-477

**ANNEXE A : CARTOGRAPHIE DES PLAINES INONDABLES ET CHANGEMENTS
CLIMATIQUES – ÉTUDE DE CAS DE LA VILLE DE SURREY**



CARTOGRAPHIE DES PLAINES INONDABLES ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES ÉTUDE DE CAS POUR LA VILLE DE SURREY

RAPPORT FINAL



Préparé pour



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada



Mars 2017

Réf. NHC 3002515

Photos de couverture

Photo du haut : *Inondations des basses terres des rivières Serpentine et Nikomekl*
Photo du centre : *Cours inférieur de la rivière Serpentine*
Photo du bas : *Plage Crescent à marée basse*

**CARTOGRAPHIE DES PLAINES INONDABLES ET CHANGEMENTS
CLIMATIQUES
ÉTUDE DE CAS POUR LA VILLE DE SURREY**

RAPPORT FINAL

Préparé pour

Ressources naturelles Canada

Ottawa, Ontario

Mars 2017

Réf. NHC 3002515

Rapport préparé par



31 March 2017



Monica Mannerström, P. Eng.
Directrice
Northwest Hydraulic Consultants Ltd.





31




Vanessa O'Connor, P. Eng.
Ingénieure sénior en hydraulique
Northwest Hydraulic Consultants Ltd.

Rapport révisé par :




1/03/17

Carrie Baron, P. Eng.
Gestionnaire du drainage – **Ville de Surrey**



April 3/17



Matt Osler, P. Eng.
Ingénieur de projet – **Ville de Surrey**

AVERTISSEMENT

Le présent rapport, **CARTOGRAPHIE DES PLAINES INONDABLES ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES – ÉTUDE DE CAS POUR LA VILLE DE SURREY**, a été préparé par **Northwest Hydraulic Consultants Ltd.** pour le compte de Ressources naturelles Canada. Les informations et les données contenues dans ce document représentent le meilleur jugement professionnel de **Northwest Hydraulic Consultants Ltd.** à la lumière des connaissances et des informations dont elle disposait au moment de la préparation du rapport et ce dernier a été préparé conformément aux pratiques de génie généralement reconnues.

Northwest Hydraulic Consultants Ltd. décline toute responsabilité envers d'autres parties qui pourraient utiliser les méthodes décrites ici pour toute blessure, perte ou dommage subis par ces parties issus de l'utilisation ou de toute décision prise ou action entreprise relative à ce rapport ou à son contenu.

REMERCIEMENTS

Nous remercions chaleureusement Ressources naturelles Canada pour le soutien fourni dans la préparation de cette étude de cas. Des directives spécifiques pour ce travail ont été fournies par la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada.

Nous tenons à remercier la Ville de Surrey d'avoir initié les études sur la révision des plaines inondables en fonction des changements climatiques (*Climate Change Floodplain Review (CCFR)*) et sur la stratégie de protection contre les inondations côtières (*Coast Flood Protection Strategy (CFPS)*), qui sont les travaux initiaux à la base de la présente étude de cas. Les principaux représentants de la ville qui ont également contribué à ce travail sont Carrie Baron, P. Eng. et Matthew Osler, P. Eng.

Le travail initial du CCFR n'aurait pas été possible sans l'apport important de données de la ville de Surrey et d'autres sources, dont la Garde côtière canadienne, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, Environnement Canada, Relevés hydrologiques du Canada (RHC), le ministère des Transports et des Infrastructures de la Colombie-Britannique, le Pacific Climate Impact Consortium, le canton de Langley, la ville de Langley, le district de Delta et autres.

Monica Mannerström, P. Eng., Vanessa O'Connor, P. Eng., Neil Peters, P. Eng. et Sarah North, PSIG de Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (NHC) ont préparé ce rapport. Le personnel de NHC qui a participé aux études du CCFR :

- | | |
|------------------------------------|---|
| ▪ Bruce Walsh, P. Eng. | Gestionnaire de projet (Phase 1) |
| ▪ Monica Mannerström, P. Eng. | Gestionnaire de projet (Phase 2, Ingénieur principal Phase 1) |
| ▪ Vanessa O'Connor, P. Eng. | Ingénieure de projet – Modélisation hydraulique |
| ▪ Sarah North, PSIG | Spécialiste SIG – Cartographie |
| ▪ Malcolm Leytham, Ph. D., P. Eng. | Ingénieure sénior – Hydrologie et révision |
| ▪ Patty Dillon, P. Eng. | Ingénieure sénior – Modélisation hydrologique |
| ▪ Vaughn Collins, P. Eng. | Ingénieure sénior – Modélisation hydraulique |
| ▪ Mariza Costa-Cabral, Ph. D. | Spécialiste scientifique du climat |
| ▪ David McLean, Ph. D., P. Eng. | Contribution à titre de spécialiste |
| ▪ Clayton Hiles, P. Eng. | Ingénieure de projet – Modélisation océanique |

David Smith, P. Eng., ingénieur en géotechnique sénior (décédé) de Thurber Engineering Ltd (TEL), a fourni des services de consultant secondaire en géotechnique au sujet de la subsidence.

Le projet d'élaboration de la stratégie de protection contre les inondations côtières de la ville de Surrey en cours est dirigé par NHC (en grande partie par le même personnel que ci-dessus plus Charlene Menezes, P. Geo.). Le travail est soutenu par EcoPlan International Inc. (EPI) et nous souhaitons remercier particulièrement les principaux contributeurs : Julian Gonzalez, Ph.D. et John Ingram, RPP, MCIP.

SOMMAIRE

La Ville de Surrey est située en Colombie-Britannique, sur la côte Ouest du Canada, juste au sud de Vancouver et au nord de la frontière canado-américaine. C'est la deuxième plus grande ville de la Colombie-Britannique, avec une population de plus de 0,5 million d'habitants. Incorporée en 1879, c'est actuellement l'une des communautés ayant la plus forte croissance au Canada et de fortes pressions de développement sont exercées sur les terres agricoles restantes.

Les rivières Serpentine et Nicomekl traversent la ville et se déversent dans la baie Mud en bordure de l'océan Pacifique. Historiquement, les zones côtières de faible altitude et les plaines inondables ont été exposées à de nombreuses inondations. La ville de Surrey a investi des efforts considérables pour que les basses terres, principalement constituées de terres agricoles, se conforment à des normes acceptables de protection contre les inondations. À leurs exutoires, les rivières s'écoulent à travers des structures de contrôle ou des « barrages côtiers », couplés à des digues côtières qui protègent les plaines inondables des inondations causées par l'océan.

Des études récentes commandées par le gouvernement de la Colombie-Britannique sur le rehaussement du niveau de la mer due aux changements climatiques suggèrent qu'il y a des répercussions considérables sur les bassins des rivières Serpentine et Nicomekl. Les taux de subsidence du sol prévus devraient amplifier ces effets. En outre, les changements climatiques entraîneront des précipitations régionales plus intenses et, par conséquent, des débits en rivière plus élevés. Les changements d'utilisation des terres associés à la densification et au développement urbain réduiront l'infiltration, ce qui augmentera davantage le ruissellement.

En 2013, la ville de Surrey a adopté une stratégie d'adaptation au climat. Une de ses principales initiatives est l'élaboration d'une stratégie complète d'adaptation aux inondations afin d'accroître la résilience de la communauté face aux répercussions prévues des changements climatiques sur les niveaux d'inondation. Étant donné que la zone des plaines inondables est également un important corridor routier et ferroviaire, la Ville doit jouer un rôle dans la gestion de risques d'envergure. Parmi les municipalités du Canada, la ville de Surrey est à l'avant-garde de l'élaboration d'un plan d'adaptation aux changements climatiques multidimensionnel qui comprendra des mesures structurelles et non structurelles d'atténuation des inondations. Plusieurs études d'ingénierie ont été effectuées jusqu'à ce jour et constituent la base des travaux futurs. Cette étude de cas résume les analyses techniques effectuées et décrit :

- Une approche de simulation en continu afin d'élaborer une méthode statistiquement valable pour combiner les niveaux élevés de l'océan et les débits des rivières afin de simuler les niveaux d'inondation actuelle pour une récurrence de 200 ans.
- Les estimations du rehaussement futur du niveau de la mer en fonction des projections provinciales.
- La possibilité de subsidence du sol.
- Les estimations des précipitations futures conformes aux projections du modèle climatique mondial.

- Une méthode pour modéliser le ruissellement et les niveaux d'inondation futurs.

L'objectif de cette étude de cas est de décrire une méthodologie pour intégrer les effets des changements climatiques aux projets de cartographie des plaines inondables qui pourraient être appliqués, avec certaines modifications, à d'autres communautés à travers le pays. La projection des niveaux d'inondation futurs est possible jusqu'à un certain degré, mais les conditions actuelles doivent être surveillées et les cartes des plaines inondables doivent être mises à jour au fil du temps. Étant donné que le système rivière/océan de la ville de Surrey comprend un certain nombre de structures de contrôle des inondations, des modifications de ces structures modifieront considérablement les niveaux d'inondation. Cette étude de cas fait partie du cadre fédéral sur la cartographie des plaines inondables qui permet d'examiner et d'élaborer de nouvelles normes de cartographie.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	Ville de Surrey – Contexte géographique.....	1
1.2	Historique des inondations.....	3
1.3	Prochaine étape.....	5
2	ÉVALUATION DES RISQUES ACTUELS D’INONDATION.....	6
2.1	Analyse de l’aspect océanique.....	7
2.2	Modélisation hydrologique.....	9
2.3	Modélisation hydraulique.....	10
3	ÉVALUATION DES RISQUES FUTURS D’INONDATION EN FONCTION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	11
3.3	Estimation des précipitations futures.....	14
3.3.1	Établissement de séries chronologiques de précipitations futures.....	15
3.3.2	Incertitudes relatives aux projections des précipitations futures.....	16
3.4	Simulations hydrologiques à long terme.....	17
3.5	Simulations hydrauliques à long terme.....	17
4	CONCLUSIONS RELATIVES AU RISQUE D’INONDATION ET LEÇONS RETENUES.....	19
4.1	Conclusions.....	19
4.1.1	Inondation côtière.....	20
4.1.2	Inondation riveraine.....	20
4.1.3	Cartographie des plaines inondables.....	21
4.2	Leçons retenues.....	21
4.3	Défis et possibilités.....	22
5	RECOMMANDATIONS ET STRATÉGIE.....	23
5.1	Recommandations.....	23
5.2	Élaboration d’une stratégie d’adaptation aux inondations.....	23

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Comparaison des fréquences de dépassement des niveaux de précipitations (2070-2100) ... 16

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Bassins versants des rivières Serpentine et Nicomekl	2
Figure 2 Photo aérienne oblique (Google Earth) des tronçons du cours inférieur des rivières (vue vers le Nord)	3
Figure 3 Photo d'un barrage côtier et schéma d'opération (par EPI)	5
Figure 4 Schéma du processus d'analyse de la méthode adoptée	7
Figure 5 Niveaux des marées observés, prédits et résiduels à Point Atkinson, mars 2012	9
Figure 6 Hausse du niveau global de la mer recommandé pour la planification et la conception en C.-B. (Ausenco Sandwell, 2011)	13
Figure 7 La communauté côtière de Crescent Beach est vulnérable au rehaussement du niveau de la mer	14
Figure 8 Profils des niveaux d'eau de la rivière Serpentine de récurrence de 200 ans pour les conditions actuelles et futures (année 2100) avec augmentation du niveau de la mer seule et avec augmentation du niveau de la mer plus augmentation modérée des précipitations	18
Figure 9 Augmentation de l'étendue de la plaine inondable due aux changements climatiques, de la période actuelle jusqu'à l'an 2200 (selon EPI)	19
Figure 10 Approche d'élaboration d'une stratégie en cinq étapes (par EPI)	24

1 INTRODUCTION

Cette étude de cas fait partie de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des plaines inondables » et elle a été préparée pour informer les individus et/ou les organisations impliquées dans la gestion des plaines inondables au Canada. Elle s'appuie sur les trois études d'ingénierie suivantes commandées par la ville de Surrey et dirigées par Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (NHC) :

- Rivières Serpentine, Nicomekl et Campbell – Révision des plaines inondables en fonction des changements climatiques (*Serpentine, Nicomekl and Campbell Rivers – Climate Change Floodplain Review*) (2012).
- Rivières Serpentine et Nicomekl – Révision des plaines inondables en fonction des changements climatiques, Phase 2 (*Serpentine and Nicomekl River – Climate Change Floodplain Review, Phase 2*) (2015).
- Stratégie d'adaptation aux inondations côtières de la ville de Surrey (*Surrey Coastal Flood Adaptation Strategy*) (2016-2018).

Cette étude porte sur la façon dont les effets des changements climatiques ont été abordés dans les évaluations des risques futurs d'inondation. La cartographie officielle des plaines inondables intégrant les effets des changements climatiques n'a pas encore été préparée, mais elle sera développée conjointement aux travaux d'atténuation structureux et non structureux faisant partie d'une stratégie d'adaptation intégrée. L'objectif de ce rapport est de décrire une méthodologie qui, avec certaines modifications, pourrait être appliquée à d'autres communautés à travers le pays dans divers contextes.

1.1 Ville de Surrey – Contexte géographique

La ville de Surrey est située sur la côte Sud de la Colombie-Britannique, juste au sud de Vancouver et au nord de la frontière canado-américaine. C'est la deuxième plus grande ville de la Colombie-Britannique, avec une population de plus de 0,5 million d'habitants. La colonisation européenne a commencé dans les années 1860, les membres des Premières nations Semiahmoo et Kwantlen ont vécu dans la région pendant plus de 6 000 ans avant cette période. Incorporée en 1879, c'est maintenant l'une des communautés présentant le plus fort taux de croissance au Canada, alors que des gens du monde entier se déplacent dans cette ville diversifiée culturellement.

Une grande partie de la ville est drainée par les rivières Serpentine et Nicomekl (Figure 1). Ces rivières, dont les bassins versants ont une superficie de drainage combinée d'environ 330 km², proviennent de hautes terres vallonnées qui ont été fortement aménagées à des fins résidentielles et commerciales. Les rivières traversent ensuite des terres agricoles planes, situées à faible altitude, pour finalement se déverser dans la baie Mud en bordure de l'océan Pacifique. Les basses terres entourant les deux rivières sont largement endiguées et leurs systèmes de protection contre les inondations et leurs systèmes de drainage incluent une trentaine de stations de pompage, 200 ponceaux munis de vannes et d'un réseau complexe composés de bassins de rétention, de canaux, de fossés et de déversoirs. À leurs exutoires, les rivières s'écoulent à travers des structures de contrôle ou « barrages côtiers » couplés à des digues côtières protégeant les plaines inondables des inondations causées par l'océan. Les améliorations du

drainage et la construction de digues ont été initiées par la communauté agricole avec la construction des deux barrages côtiers en 1913. Les plaines inondables des rivières Serpentine et Nicomekl (événement de récurrence de 200 ans) ont une superficie combinée de 59 km², avec de grandes surfaces se trouvant sous le niveau de la mer, même à plusieurs kilomètres à l’intérieur des terres en amont des barrages côtiers. L’utilisation des terres de la plaine inondable est principalement agricole, mais elle s’est intensifiée au cours des années, exigeant que l’on apporte des améliorations considérables au système de protection contre les inondations (Figure 2).

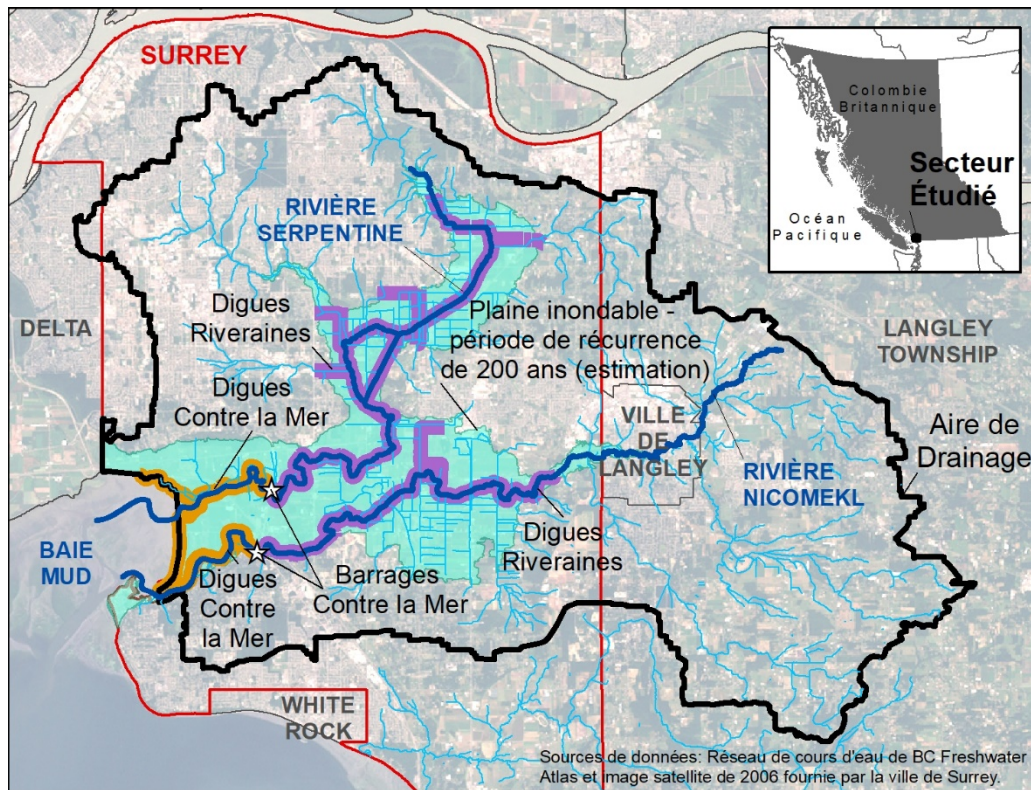


Figure 1 Bassins versants des rivières Serpentine et Nicomekl

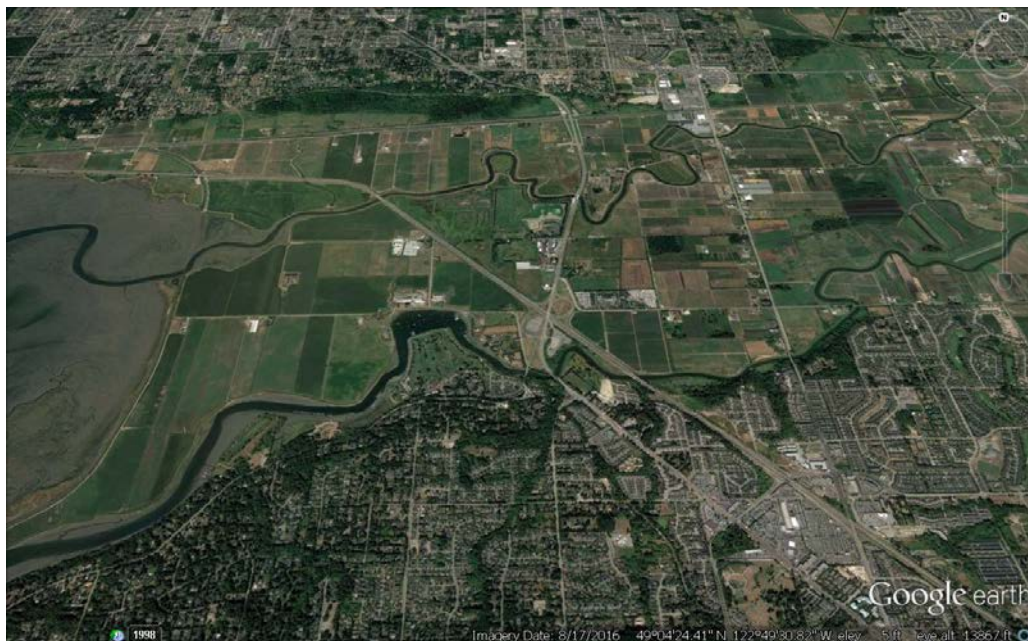


Figure 2 Photo aérienne oblique (Google Earth) des tronçons du cours inférieur des rivières (vue vers le Nord)

1.2 Historique des inondations

Avant la construction des digues côtières et des barrages côtiers, la plaine inondable des tronçons en aval des rivières Serpentine et Nicomekl était un vaste marais salin, avec des zones intertidales ayant une grande valeur environnementale. Les deux rivières ont régulièrement débordé de leurs berges, fournissant des sédiments riches en éléments nutritifs à la plaine inondable. Les marées hautes quotidiennes inondaient les terres jusqu'à plus de 15 km en amont des exutoires des rivières et le saumon disposait ainsi d'un libre accès au lit de gravier situé en amont des rivières pour la fraie. Avec la construction des barrages côtiers et des digues côtières, l'accès du poisson s'est limité aux périodes où les vannes étaient ouvertes, c'est-à-dire lorsque les niveaux de l'océan sont inférieurs aux niveaux des rivières. Les digues côtières ont considérablement réduit l'habitat intertidal, mais ils ont rendu les terres cultivables et l'intrusion d'eau salée n'était plus un problème, sauf pendant les inondations côtières provoquant la rupture de certaines digues. Les données sur les inondations remontent au moment de la construction des barrages côtiers et montrent que les inondations sont typiquement causées par de fortes pluies, de la pluie sur la neige, des marées hautes avec une onde de tempête océanique ou une combinaison de ces événements.

Pendant les périodes de haut niveau de la mer, les vannes des barrages côtiers sont fermées et les précipitations et les eaux de ruissellement doivent être stockées temporairement, soit dans les lits endigués des rivières Serpentine et Nicomekl, soit dans les plaines inondables (Figure 3). Lorsque les niveaux des rivières sont élevés, la seule façon de drainer les zones endiguées est de pomper l'eau par-dessus les digues vers les lits de la rivière. Cependant, lorsque les niveaux d'eau dans les rivières

principales continuent à augmenter et dépassent les niveaux des périodes de récurrence de 10 à 15 ans, les stations de pompage sont arrêtées et on laisse les terrains derrière les digues s'inonder. Afin de ne pas compromettre l'intégrité des digues de rivière, des déversoirs y ont été intégrés à plusieurs endroits pour permettre aux débits des lits des rivières de se déverser vers les terres de la plaine inondable, majoritairement composées de champs agricoles, afin d'assurer un certain degré « d'équité » en matière d'inondation. Les champs fonctionnent essentiellement comme des cellules de stockage pour les inondations jusqu'à ce que les niveaux de l'océan baissent, que les vannes des barrages côtiers s'ouvrent et que l'eau puisse s'écouler. Les inondations se produisent généralement de novembre à février lorsque les champs sont en dormance et, par conséquent, les pertes agricoles sont relativement limitées. Certaines maisons et routes peuvent également être affectées par ces inondations « nuisible ».

Surrey a consacré beaucoup de temps et d'efforts pour que le niveau de service des plaines inondables des bassins versants des rivières Serpentine et Nicomekl répondent d'aux normes de l'Entente auxiliaire Canada-Colombie-Britannique sur le développement agricole et rural. Ces normes permettent l'inondation des champs agricoles pendant 5 jours pendant les mois d'hiver et 2 jours pendant les mois d'été, pour un événement de récurrence de 10 ans. Il s'agit d'un degré de protection différent de celui conçu pour un événement d'inondation extrême.

Le système de digues a été considérablement amélioré par Surrey entre 1998 et aujourd'hui. Plus de 40 millions de dollars ont été investis pour relever les digues, installer des stations de pompage et améliorer le transport par les chenaux. Cependant, le système actuel ne respecte pas les normes typiques applicables pour une inondation de récurrence de 200 ans et les inondations peu fréquentes et catastrophiques qui surchargent et endommagent les digues côtières et/ou les digues de rivière sont un sujet de grandes préoccupations. Les cartes provinciales des plaines inondables montrant l'étendue des plaines inondables de récurrence de 200 ans ont été préparées pour la première fois en 1993 en utilisant le logiciel ONE-D d'Environnement Canada (KPA 1993). Surrey les a ensuite importées dans le logiciel MIKE11 qui a servi de base à l'amélioration du système de digues et qui, depuis, a été mises à jour pour tenir compte des changements apportés au système. La modélisation n'a pas tenu compte de la probabilité conjointe d'événements côtiers et riverains et une approche plus fiable statistiquement était requise.

En 2010-2012, la province de la Colombie-Britannique a publié diverses publications portant sur le rehaussement du niveau de la mer, la conception de digues côtières et les changements climatiques. Surrey voulait examiner ces rapports et les impacts potentiels des changements climatiques sur les futurs niveaux d'inondation et leurs impacts sur ses systèmes côtiers et riverains, ce qui a mené au travail décrit dans la présente étude de cas.



BARRAGES CONTRE LA MER

Les barrages contre la mer sont construits sur les rivières sensibles aux marées, comme les rivières Nicomekl et Serpentine, afin d'empêcher l'eau salée de l'océan de se déplacer en amont, là où elle serait nuisible à l'irrigation agricole. Les barrages contre la mer subissent les marées et sont alimentés par gravité, les marées montantes repoussant leurs battants en position fermée (B) et la rivière les ouvrant lorsque la marée se retire (A). Les barrages contre la mer des rivières Nicomekl et Serpentine ont d'abord été construits en 1912 et 1913.

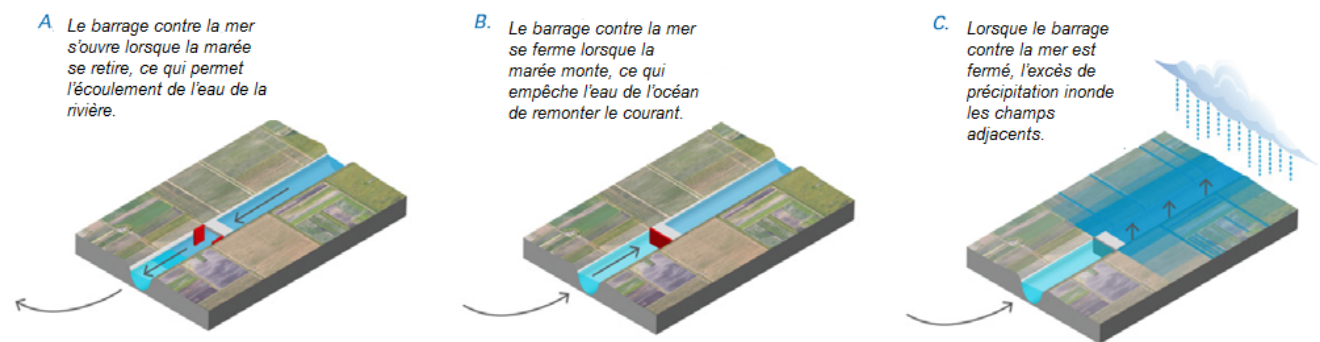


Figure 3 Photo d'un barrage côtier et schéma d'opération (par EPI)

1.3 Prochaine étape

En 2013, la Ville a adopté une stratégie d'adaptation au climat (*Climate Adaptation Strategy*). L'une des principales initiatives est fondée sur la nécessité d'élaborer une stratégie globale d'adaptation aux inondations pour accroître la résilience de la communauté par rapport aux effets prévus des changements climatiques sur les niveaux d'inondation. Étant donné que la zone des plaines inondables est également un important corridor routier et ferroviaire, la Ville doit jouer un rôle dans la gestion des risques d'envergure. Parmi les municipalités au Canada, Surrey est à l'avant-garde de l'élaboration d'un plan d'adaptation aux changements climatiques multidimensionnel, qui comprendra des mesures structurelles et non structurelles d'atténuation des inondations. Ceci est examiné en détail dans la stratégie d'adaptation aux inondations côtières de la ville (*Coastal Flood Adaptation Strategy*). Cette stratégie combine tous les travaux techniques effectués précédemment avec les intervenants de la communauté et de l'industrie afin de mieux comprendre les problèmes et les moyens d'élaborer une stratégie à long terme.

2 ÉVALUATION DES RISQUES ACTUELS D'INONDATION

Dans les plaines inondables des rivières Serpentine et Nicomekl, les inondations dépendent des éléments suivants :

- Le volume et la distribution temporelle des précipitations et la réponse hydrologique du bassin versant.
- La simultanéité des variations temporelles du niveau de l'océan dans la baie Mud et des événements orageux.
- La réponse hydraulique du réseau (comprenant le stockage et les diverses infrastructures hydrauliques) aux apports hydrologiques et à la condition limite du niveau de l'océan,

Pour contourner les difficultés liées à la sélection d'une combinaison du niveau de l'océan et des conditions de précipitation, une approche de simulation en continu a été adoptée. Pour cette approche, des séries chronologiques de données historiques de longue durée portant sur les conditions océaniques et les conditions de précipitations ont été préparées. Elles ont ensuite été intégrées à des modèles numériques de simulation en continu dans le but de simuler une série chronologique de longue durée relative aux niveaux d'eau dans les plaines inondables des rivières Serpentine et Nicomekl. Cette approche intègre intrinsèquement le lien naturel entre les conditions océaniques et les précipitations.

Pour l'estimation des inondations de Surrey, une probabilité de dépassement annuel (PDA) de 0,5 % a été adoptée, ce qui équivaut à une période de récurrence de 200 ans. Statistiquement, environ 50 années de données sont nécessaires pour fournir une estimation fiable d'un événement de 200 ans. Heureusement, les données historiques sur les marées, le vent (pour déterminer les ondes de tempête et les conditions des vagues) et les précipitations sont disponibles depuis le milieu des années 60, ce qui a permis d'élaborer les séries chronologiques suivantes :

- Un assemblage historique de 50 ans de données sur les précipitations horaires locales a été réalisé et importé dans un modèle hydrologique de simulation en continu pour simuler les débits horaires historiques des rivières et des canaux de la plaine inondable pour les conditions actuelles. Le modèle a été configuré pour les conditions actuelles en fonction des plans officiels d'aménagement de la communauté.
- Les niveaux horaires historiques de l'océan dans la baie Mud ont été calculés pour la même période. En utilisant les données disponibles, la modélisation numérique côtière a été entreprise pour élaborer une série chronologique qui représente les ondes de tempête et la dénivellation due au vent. Cependant, alors que l'on prévoit une augmentation du niveau de la mer, il faut se rappeler qu'elle s'est déjà produite dans le passé, de sorte que la série de données des 50 années enregistrées a été ajustée pour créer une série chronologique qui a été jugée « fixe » pour les conditions actuelles.

Les deux séries chronologiques horaires de 50 ans (débits entrants et niveaux océaniques) représentatives des conditions actuelles ont ensuite été utilisées comme conditions limites d'un modèle de simulation hydraulique numérique en continu du réseau hydrographique et des plaines inondables (divisés en « cellules » de stockage), comprenant les barrages côtiers et les digues de rivière, les stations de pompage, les barrages côtiers, les ponts, les bassins d'inondation et les déversoirs. Le modèle hydraulique a simulé les niveaux d'eau horaire dans les lits des rivières et les « cellules » de la plaine

inondable au cours de la période de 50 ans, qui ont ensuite été analysés statistiquement pour déterminer l'ampleur et la fréquence des niveaux d'eau aux endroits choisis du réseau.

Cette section décrit chaque étape de la méthodologie employée pour les conditions actuelles : l'analyse de l'océan, la modélisation hydrologique et la modélisation hydraulique. Un schéma de l'ensemble du processus d'analyse est présenté à la Figure 4.

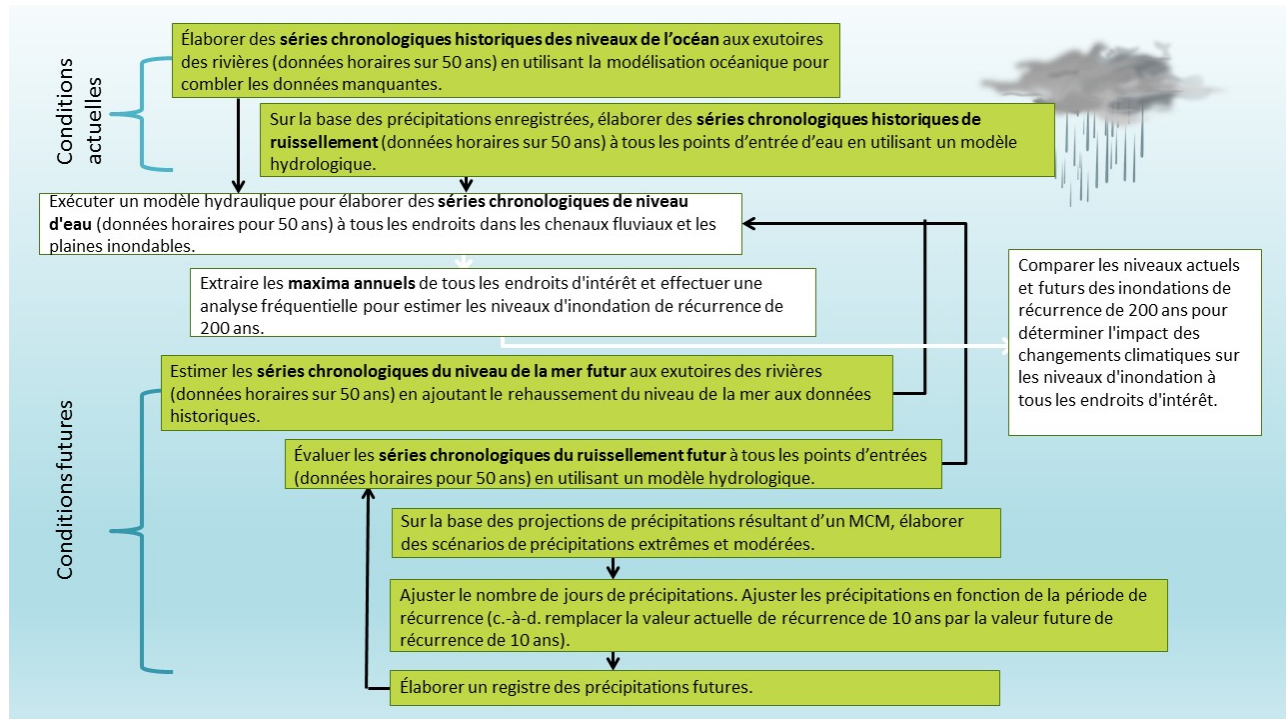


Figure 4 Schéma du processus d'analyse de la méthode adoptée

2.1 Analyse de l'aspect océanique

Les marées de la baie Mud sont classées comme « mixtes, principalement semi-diurnes », ce qui signifie qu'elles subissent quotidiennement deux oscillations de marée complètes, mais avec des inégalités touchant autant les marées hautes que les marées basses. La plage maximale quotidienne de hauteur de marées, allant de la plus basse marée basse à la plus haute marée haute, est légèrement supérieure à 5 m. Les niveaux des eaux côtières ont des composantes « déterministe » et « probabiliste ». Le niveau de marée prédit constitue la composante « déterministe » alors que tout écart par rapport à la marée prédite résultant des changements de la pression barométrique, de la contrainte éolienne et de la contrainte des vagues constitue la composante « probabiliste » (également appelée composante résiduelle). Sur la côte de la Colombie-Britannique, une onde de tempête peut rehausser temporairement le niveau de l'océan à plus de 1 m au-dessus du niveau prévu de la marée. La figure 5 illustre la différence entre le niveau prédit de la marée, le niveau océanique observé et les niveaux résiduels calculés lors du passage d'un système orageux de basse pression en mars 2012 à la station marégraphique à long terme de Point Atkinson à West Vancouver, à 40 km au nord-ouest de la Baie Mud.

Étant donné qu'aucun registre complet de niveau combiné de l'océan n'était disponible aux exutoires des rivières dans la baie Mud, une série chronologique combinant des valeurs mesurées et modélisées de chaque composante a dû être générée, formant un jeu de données composites pour la période de simulation en continu sélectionnée de 50 ans (NHC 2012). Cette période de simulation rétroactive a été considérée comme statistiquement assez longue pour estimer les niveaux d'eau de la période de récurrence de 200 ans et a pris en compte la probabilité conjointe de marées hautes, de tempête et de dénivellation due au vent. (La méthode a abouti à un niveau océanique de récurrence de 200 ans qui était d'environ 0,5 m inférieur à ce qui avait été obtenu en ajoutant simplement l'onde de tempête de récurrence de 200 ans et la dénivellation due au vent à la basse mer inférieure, marée moyenne (BMIMM) – une méthode simplifiée souvent utilisée dans le passé.)

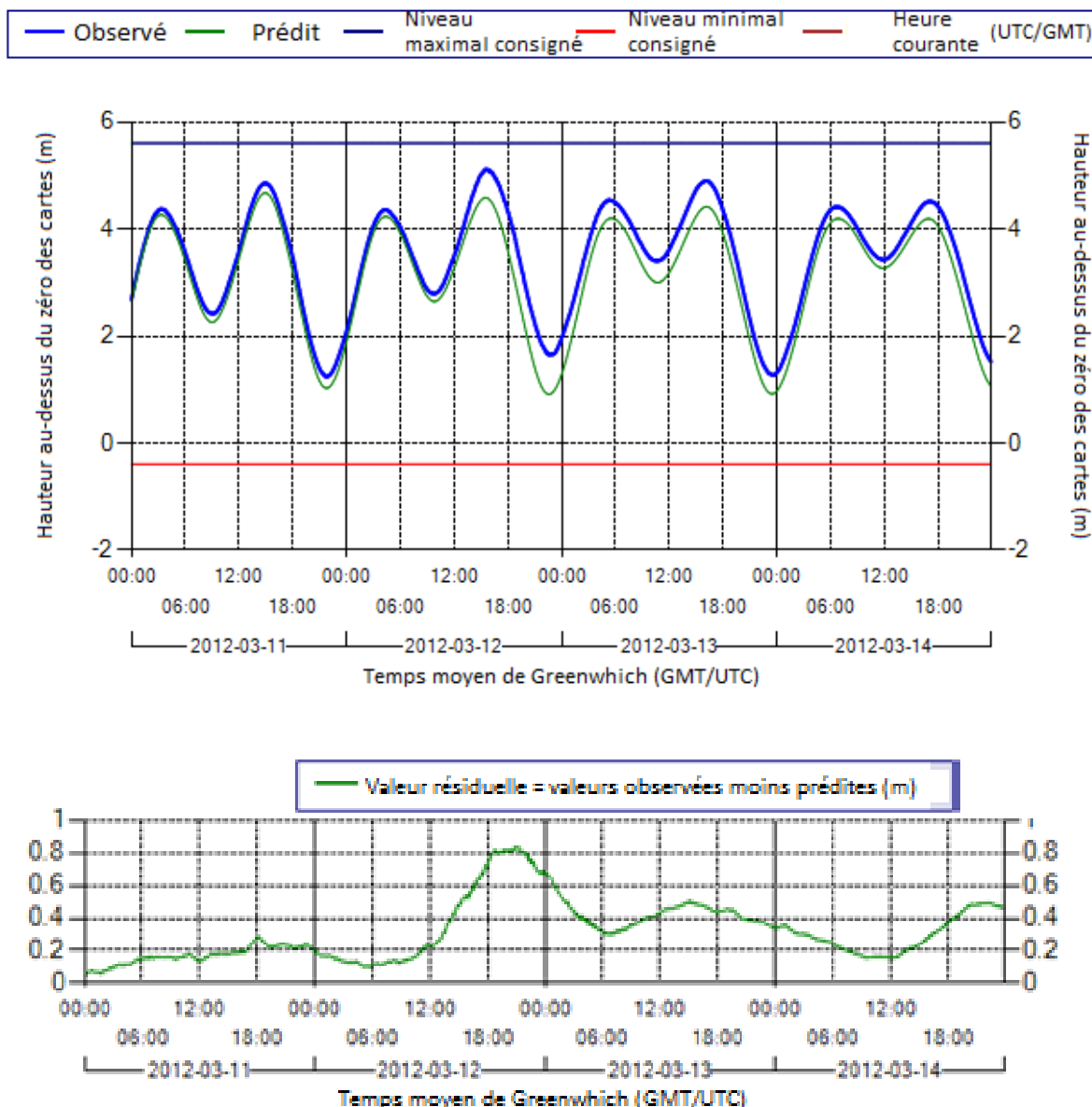


Figure 5 Niveaux des marées observés, prédits et résiduels à Point Atkinson, mars 2012

2.2 Modélisation hydrologique

L'information sur le débit dans les bassins des rivières Serpentine et Nicomekl est rare et le régime hydrologique des deux bassins a changé avec le temps en raison de l'aménagement du territoire. La modélisation hydrologique était donc nécessaire pour générer les débits entrants à intégrer au modèle hydraulique de simulation en continu. De la même façon que l'analyse du niveau océanique a été réalisée, une série chronologique de débits horaires simulés sur environ 50 ans a été produite pour les points d'entrée d'eau requis en utilisant des données météorologiques.

Le logiciel de modélisation hydrologique continue 'HSPF' (US EPA) a été utilisé car il offre un certain nombre d'avantages par rapport à d'autres modèles similaires. Le modèle hydrologique exigeait des séries chronologiques de données de précipitation et d'évaporation et la délimitation du bassin versant en fonction de la couverture perméable et imperméables des sols, lesquels caractérisent la réponse de la surface du sol à la pluviométrie et au ruissellement. Les données de la station de mesure des précipitations à l'hôtel de ville de Old Surrey ont été sélectionnées pour la modélisation et la variation spatiale des précipitations dans la zone d'étude a été intégrée par la mise à l'échelle des données de cette station. La cartographie existante de l'aménagement du territoire a été fournie par la Ville de Surrey.

Deux jauges de débit, sur la rivière Nicomekl, à hauteur de la 203^e Rue et sur le ruisseau Mahood-Bear, un affluent de la rivière Serpentine, ont fourni des données pour le calage des hautes terres. Comme l'étude portait sur les inondations, neuf grandes tempêtes ont été sélectionnées pour le calage du modèle.

En exécutant le modèle HSPF calé, les débits entrants horaires à long terme du modèle hydraulique ont été générées à l'aide des 50 ans de données météorologiques.

2.3 Modélisation hydraulique

L'objectif de la modélisation hydraulique était de générer une série chronologique de niveaux d'inondation de 50 ans le long des rivières Serpentine et Nicomekl et dans la plaine inondable. Une analyse fréquentielle des niveaux maximaux annuels pourrait ensuite être effectuée pour estimer les niveaux d'inondation de récurrence de 200 ans aux lieux d'intérêt pour les conditions actuelles. Les niveaux d'inondation calculés de cette manière reflètent la probabilité conjointe réelle qu'il y ait des niveaux élevés de l'océan et des précipitations importantes.

Étant donné que le comportement des eaux de ruissellement provenant des parties fortement développées des bassins versants est très rapide et que les réseaux hydrographiques sont influencés par les marées, un modèle hydrodynamique comportant des intervalles de calcul relativement courts était requis. Compte tenu de la longueur des périodes à simuler, le modèle devait avoir un temps d'exécution raisonnable. L'utilisation d'un modèle MIKE11 existant a d'abord été envisagé, mais les exécutions du modèle auraient duré trop longtemps et un nouveau modèle HEC-RAS a été développé.

Les niveaux d'inondation, en particulier dans la plaine inondable, dépendent des capacités de stockage, de pompage et de déversement plutôt que de la rugosité des lits d'écoulement et, par conséquent, nous n'avons pas effectué un calage classique du modèle. Au lieu de cela, le modèle a été validé en utilisant deux inondations majeures récentes.

Lorsque le modèle s'est comporté de manière satisfaisante, il a été utilisé pour générer des séries chronologiques de 50 ans des niveaux d'eau simulés dans les deux bassins versants. Un pas de temps de calcul de 30 secondes était requis pour la modélisation. En divisant les séries chronologiques de près de 50 ans en décennies et en exécutant le modèle de chaque décennie sur des ordinateurs distincts, les exécutions du modèle ont pu être effectuées en deux jours.

Sur la base des résultats obtenus, on a constaté que les niveaux d'inondation maximale annuelle à divers endroits dans les bassins versants étaient souvent générés par différents événements orageux historiques. Tel que prévu, dans les tronçons aval (en aval des barrages côtiers), les niveaux d'inondation les plus élevés ont été causés par des niveaux élevés de l'océan et dans les tronçons amont, par de fortes précipitations. Dans la section intermédiaire des bassins versants (dans la zone plane en amont des barrages côtiers), les inondations étaient causées par des combinaisons d'événements. En raison du fonctionnement des barrages côtiers, les niveaux maximaux d'inondation dans les bassins inférieurs et intermédiaires étaient dus à des périodes prolongées de niveaux océaniques relativement élevés qui limitaient l'écoulement, plutôt que par des niveaux océaniques de pointe exceptionnellement élevés de plus courte durée.

Les niveaux d'inondation ont été calculés à environ 100 endroits pour la simulation de 50 ans et les niveaux de pointe annuels ont été calculés pour cette période. Comme dernière étape, des analyses fréquentielles des niveaux annuels maximaux d'inondation ont été réalisés pour estimer les niveaux d'inondation de récurrence de 200 ans pour tous les emplacements clés.

3 ÉVALUATION DES RISQUES FUTURS D'INONDATION EN FONCTION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Pour pouvoir déterminer les phases de mises à niveau des protections contre les inondations et introduire de nouvelles infrastructures coûteuses, Surrey s'intéresse aux futurs niveaux d'inondation pour les horizons 2040, 2070, 2100 et 2200. En d'autres termes, il est nécessaire de prédire comment les effets futurs des changements climatiques et les modifications au niveau de l'aménagement du territoire au fil du temps se répercuteront sur les niveaux d'inondation. Cela peut être effectué en relançant la simulation du modèle hydraulique, en utilisant comme conditions limites la série chronologique des niveaux océaniques sur 50 ans ajustée pour tenir compte du rehaussement du niveau de la mer et d'une série chronologique de débits entrants ajustée pour tenir compte des changements relatifs aux précipitations et à l'aménagement du territoire pour chaque horizon temporel, comme le montre la figure 4. Par exemple, pour estimer les futurs niveaux d'inondation en l'an 2100, on a ajouté un mètre au niveau de la mer à la série chronologique historique du niveau de l'océan pour obtenir une série chronologique de niveaux océaniques sur 50 ans représentatifs de l'an 2100.

L'ajustement des séries chronologiques des conditions limites de l'océan sur le plan de la hausse du niveau de la mer était relativement simple comme on peut le voir ci-dessous. Les conditions limites du débit entrant équivalent a été obtenu en relançant la simulation du modèle hydrologique en fonction de l'aménagement futur du territoire et des prévisions de précipitations et de températures, comme indiqué dans la section 3.3. En comparant les niveaux d'inondation actuels et futurs simulés pour la récurrence de 200 ans à un endroit choisi, on pouvait déterminer les effets projetés des changements climatiques. Les changements qui en résultent ont été particulièrement intéressants pour l'étendue de la plaine inondable, l'adéquation des digues existantes au fil du temps et la fonctionnalité future des déversoirs, des barrages côtiers et d'autres infrastructures. La procédure prend un peu de temps, mais elle constitue une méthode techniquement valable pour intégrer les effets des changements climatiques

sur les niveaux d'inondation des réseaux fluviaux affectés à la fois par les niveaux croissants de l'océan et les changements relatifs au ruissellement. La procédure appliquée pour intégrer les effets futurs des changements climatiques est décrite plus en détail dans les sections suivantes.

3.1 Rehaussement du niveau de la mer

Le consensus des organisations telles que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est que le système climatique mondial se réchauffe et que la température moyenne annuelle mondiale devrait augmenter de plus de 3 °C au cours du siècle actuel. Le réchauffement continu et la modification des configurations des précipitations auront un effet important sur les processus hydrologiques, avec des répercussions importantes pour l'économie, les infrastructures et les écosystèmes de la Colombie-Britannique (Rodenhuis et al, 2009). Les lignes directrices liées à la hausse du niveau de la mer pour la Colombie-Britannique (Ausenco Sandwell 2011) recommandent d'utiliser une augmentation de 1 m du niveau moyen global de la mer entre l'an 2000 et 2100 (Figure 6). Bien que ces lignes directrices impliquent une hausse linéaire hypothétique de 10 mm/an, il est clair que cette hypothèse surestime le rehaussement réel du niveau de la mer au début de cette période. Les analyses basées sur les mesures altimétriques par satellite montrent un rehaussement du niveau moyen mondial de la mer plus ou moins stable de $3,1 \pm 0,4$ mm par an de 1993 à 2011 (www.cmar.csiro.au).

Alors que certaines études sur les changements climatiques envisageaient des augmentations futures potentielles de la fréquence et de l'intensité des orages, ce qui implique des augmentations possibles de la gravité du régime des vagues et des ondes de tempête, il n'y a actuellement aucun consensus au sujet de ces répercussions. En conséquence, les augmentations futures potentielles de la fréquence et de l'intensité des orages n'ont pas été prises en compte dans cette étude.

La série chronologique des niveaux océaniques sur 50 ans pour 2040, 2070, 2100 et 2200 a été calculée en ajoutant 10 cm/décennie à la série chronologique océanique.

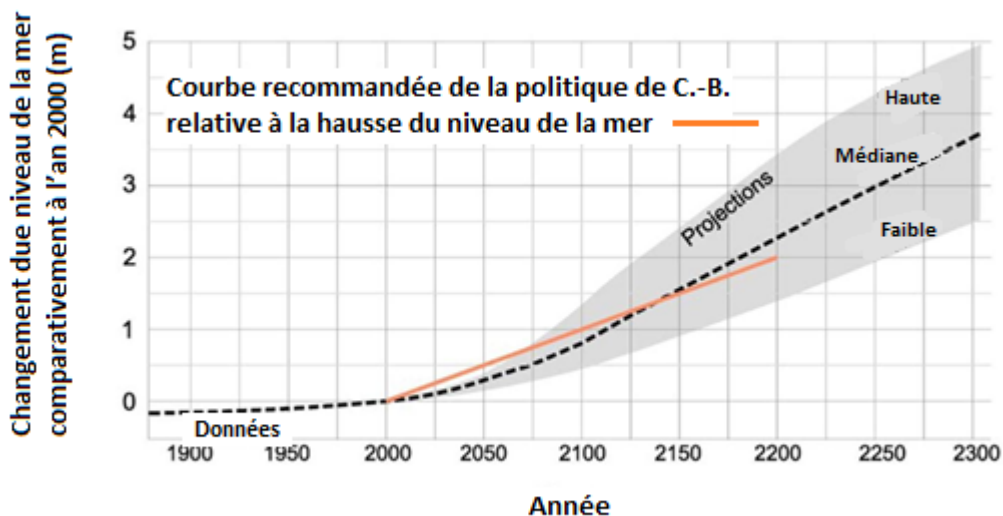


Figure 6 Rehaussement du niveau de la mer à l'échelle planétaire recommandé pour la planification et la conception en C.-B. (Ausenco Sandwell, 2011)

3.2 Subsidence du sol et rehaussement du niveau de la mer relatif

On sait que des parties des basses terres de Surrey s'affaissent, ce qui amplifie le rehaussement du niveau de la mer. Les études géotechniques rapportent des taux de subsidence moyens de l'ordre de 1 mm/an ou environ 0,1 m sur 100 ans. La majeure partie de la compaction en cours des sédiments et de subsidence connexe se produit dans les 10 à 20 m supérieurs des sédiments de l'Holocène composés principalement de limon et de tourbe. La progression future de subsidence aura une incidence sur les profondeurs des inondations en amont des digues et sur la hausse des ouvrages de protection contre les inondations. Certaines structures, par exemple des stations de pompage, se sont déjà affaissées de manière plus significative. Afin d'estimer le rehaussement relatif du niveau de la mer, les projections imées de la hausse mondiale et l'effet du déplacement du sol ont simplement été ajoutées. Une zone très vulnérable à la hausse du niveau de la mer est illustrée à la Figure 7.



Figure 7 La communauté côtière de Crescent Beach est vulnérable au rehaussement du niveau de la mer

3.3 Estimation des précipitations futures

Initialement, l'estimation des précipitations futures selon les tendances observées a été suggérée. Les tendances relatives aux précipitations analysées par d'autres ont montré une augmentation significative des précipitations extrêmes pour le mois de janvier. Cependant, il n'est pas possible de projeter ces tendances dans le futur, car ces tendances peuvent s'expliquer de plusieurs façons. Les précipitations ont un haut degré de variabilité naturelle en l'absence de forçages externes. En d'autres termes, les tendances peuvent se produire sans qu'il y ait de modifications des concentrations de gaz à effet de serre ou de l'intensité solaire. L'identification d'une tendance dans les précipitations au fil du temps n'est pas facilement attribuable aux changements climatiques anthropiques.

Une deuxième approche, qui utilise les courbes de précipitation d'intensité-durée-fréquence (IDF), a été brièvement envisagée. Étant donné que le projet utilisait une approche de simulation hydrologique en continu, il n'y avait aucune façon d'intégrer un changement de la courbe IDF relatives aux climats futurs en une variation de la série chronologique de précipitations qui a servi à effectuer les simulations. En outre, les courbes IDF ne permettent pas de modifier l'intensité des précipitations pendant les événements de plus longue durée ou d'événements orageux successif. En d'autres termes, les courbes IDF sont les plus appropriées pour les analyses événementielles, où une durée critique peut être définie et qui serait suffisamment courte pour que l'hypothèse de l'application d'une intensité constante soit plausible. Toutefois, l'analyse des bassins versants des rivières Serpentine et Nicomekl requiert une évaluation de forçages et de réponses indépendants sur une échelle de temps variée et une approche événementielle ne reflète pas la variabilité du système.

Au lieu de cela, une troisième approche, bien qu'elle soit associée à un degré élevé d'incertitude, a été adoptée pour ce travail, comme il est décrit ci-dessous.

3.3.1 Établissement de séries chronologiques de précipitations futures

L'approche choisie exigeait d'élaborer des scénarios climatiques futurs sous forme de séries chronologiques de précipitations horaires qui pourraient être utilisées comme intrants au modèle hydrologique HSPF. Les séries chronologiques de précipitations ont été créées de manière cohérente aux projections des modèles climatiques mondiaux (MCM). Deux autres séries chronologiques de précipitations synthétiques horaires ont été élaborées et couvrent le 21^e siècle. Cette approche (NHC 2015) comprenait les étapes suivantes :

1. Les projections de précipitations du MCM dont l'échelle a été réduite par le Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC) ont été obtenues et analysées. Les données de douze MCM, qui ont servi de base au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (CMIP5), étaient disponibles auprès du PCIC. Les futures émissions de gaz à effet de serre ont été représentées par le profil représentatif de l'évolution de concentration (RCP) contenant les émissions les plus élevées, soit le RCP8.5. Ce RCP a été considéré comme le plus réaliste, compte tenu du manque de progrès dans la réduction des émissions au cours des deux dernières décennies ou de l'obtention d'engagements internationaux importants envers des réductions futures. La majorité des douze exécutions de MCM prédisent des augmentations futures de l'intensité quotidienne des précipitations accompagnées d'une diminution du nombre moyen de jours de précipitations en une année.
2. On a déterminé que deux exécutions de MCM représentaient, parmi toutes les projections du PCIC, un « scénario extrême » et un « scénario modérément élevé » en termes de risque d'inondation. Le MCM CanESM2 a été sélectionné pour le « scénario modérément élevé », car il projette une augmentation modérée de l'intensité des précipitations pendant les jours pluvieux (classée 8^e pour 2040-2069 et 10^e pour 2070-2100) et une diminution modérée du nombre de jours pluvieux (classée 5^e pour 2040-2069 et 6^e pour 2070-2100). Le MCM MPI-WSM-LR a produit les valeurs les plus élevées en ce qui concerne l'augmentation projetée des précipitations moyennes pendant les jours pluvieux et il a donc été initialement choisi pour représenter un « scénario extrême ». Après une analyse détaillée, la projection produite par ce MCM a semblé irréaliste en raison d'une augmentation soudaine et importante (250 %) de l'intensité des précipitations commençant peu après la période historique. Pour cette raison, ce MCM n'a finalement pas été utilisé. Au lieu de cela, un « scénario intense » amplifiant les changements projetés par CanESM2 a été élaboré.
3. Les séries chronologiques historiques de précipitations horaires enregistrées à la jauge de l'hôtel de ville de Surrey ont été modifiées afin de créer deux nouvelles séries chronologiques horaires représentatives des régimes de précipitations projetés vers la fin du 21^e siècle, dont l'une est statistiquement compatible avec l'exécution du MCM « modérément élevée », et l'autre représentant un scénario « intense » situé entre le MCM « modérément élevé » et « extrême ».

Pour élaborer chaque série chronologique de précipitations futures, les séries chronologiques historiques enregistrées ont d’abord été modifiées pour réduire le nombre de jours de précipitations. À partir des séries chronologiques enregistrées, des jours de pluie ont été supprimés de façon aléatoire jusqu’à ce que le nombre de jours de pluie soit conforme aux prévisions du MCM. Les précipitations journalières totales pendant les jours pluvieux restants ont ensuite été ajustées de façon à ce que la répartition des précipitations quotidiennes pendant les jours pluvieux soit compatible avec les augmentations projetées du MCM. À cette fin, la période de récurrence de chaque valeur de précipitation quotidienne enregistrée a été estimée et cette valeur a ensuite été remplacée par une valeur supérieure ayant la même période de récurrence dans la distribution future (c.-à-d. qu’on a remplacé la valeur actuelle de récurrence de 10 ans par la valeur future de récurrence de 10 ans).

Le Tableau 1 résume le nombre de jours pluvieux et les intensités quotidiennes pour les intervalles de récurrence sélectionnés pour le scénario historique et les deux scénarios de changements climatiques. Une fois que les séries chronologiques quotidiennes futures ont été élaborées, les valeurs quotidiennes des précipitations ont été désagrégées selon les valeurs horaires en utilisant la même distribution chronologique que celle des données enregistrées historiquement.

Tableau 1 Comparaison des fréquences de dépassement des niveaux de précipitations (2070-2100)

Scénario de précipitations	Nombre moyen de jours pluvieux par année	Précipitations quotidiennes (mm/jour) pour la période de récurrence choisie		
		10 ans	100 ans	200 ans
Historique (1963-2009)	171	81	159	200
Modéré	162	105	213	267
Intense	162	106	294	402

3.3.2 Incertitudes relatives aux projections des précipitations futures

Bien qu’il soit nécessaire de fournir des informations quantitatives pour la planification de la gestion des risques d’inondation, les projections sous-jacentes des changements climatiques sont sujettes à une incertitude importante et non quantifiable. Les principales sources d’incertitude sont les émissions futures de gaz à effet de serre, la réponse incertaine du système climatique mondial à l’augmentation des concentrations anthropiques de gaz à effet de serre et une compréhension incomplète des manifestations régionales qui résulteront des changements mondiaux. En outre, les processus de précipitation sont très complexes et difficiles à simuler avec précision dans des modèles. La réduction, dans l’espace et le temps, des variables climatiques projetées par un MCM, l’extrapolation des analyses fréquentielles aux périodes de récurrence extrêmes et la désagrégation des précipitations quotidiennes futures en précipitations horaires représentent d’autres sources d’incertitude.

Les projections de précipitations élaborées dans le cadre de ce travail devraient être considérées comme des représentations plausibles du futur, compte tenu de la meilleure information scientifique actuelle,

mais ne représentent pas des prédictions spécifiques. Les précipitations qui auront réellement lieu à Surrey différeront de tous les scénarios élaborés, et leur différence par rapport aux précipitations historiques peut être supérieure ou inférieure aux différences prévues dans ce travail. Bien que les sources et le degré d'incertitude puissent sembler excessifs, il faut redire que presque tous les MCM prédisent des augmentations futures de l'intensité quotidienne des précipitations, accompagnées d'une diminution du nombre moyen de jours de précipitations par an et, par conséquent, les projections utilisées dans la présente étude de cas sont crédibles pour la planification de la gestion des inondations.

3.4 Simulations hydrologiques à long terme

Le modèle hydrologique HSPF a permis de générer des intrants hydrologiques à long terme à intégrer au modèle hydraulique HEC-RAS. La modélisation hydrologique a été réalisée en considérant l'aménagement futur du territoire, tel que prévu par la Ville de Surrey dans son plan communautaire officiel et les valeurs de précipitations alternatives qui représentent les deux scénarios de changements climatiques pour générer des scénarios de changements climatiques « modérés » et « sévère ».

3.5 Simulations hydrauliques à long terme

La modélisation hydraulique pouvait ensuite être relancée en utilisant les deux jeux d'intrants hydrologiques futurs et les niveaux océaniques ajustés en tant que conditions limites pour générer des séries chronologiques futures de niveaux d'inondations pour l'ensemble du bassin versant. En extrayant les maximas annuels aux emplacements sélectionnés et en réalisant des analyses fréquentielles, les estimations des niveaux d'inondation futurs pour la récurrence de 200 ans ont pu être obtenus pour les horizons temporels sélectionnés.

Les données de géométrie actuelles ont été utilisées dans le modèle hydraulique pour simuler les conditions futures, ce qui fournit une indication de la manière dont le système, s'il ne changeait pas, réagirait dans les conditions futures de changements climatiques. La Figure 8 montre les profils longitudinaux de la rivière Serpentine et compare les niveaux d'eau de la récurrence de 200 ans pour les scénarios actuel et futurs. En raison de la faible pente, les niveaux d'eau sont influencés par les effets de l'océan jusqu'à environ 18 km en amont du barrage côtier.

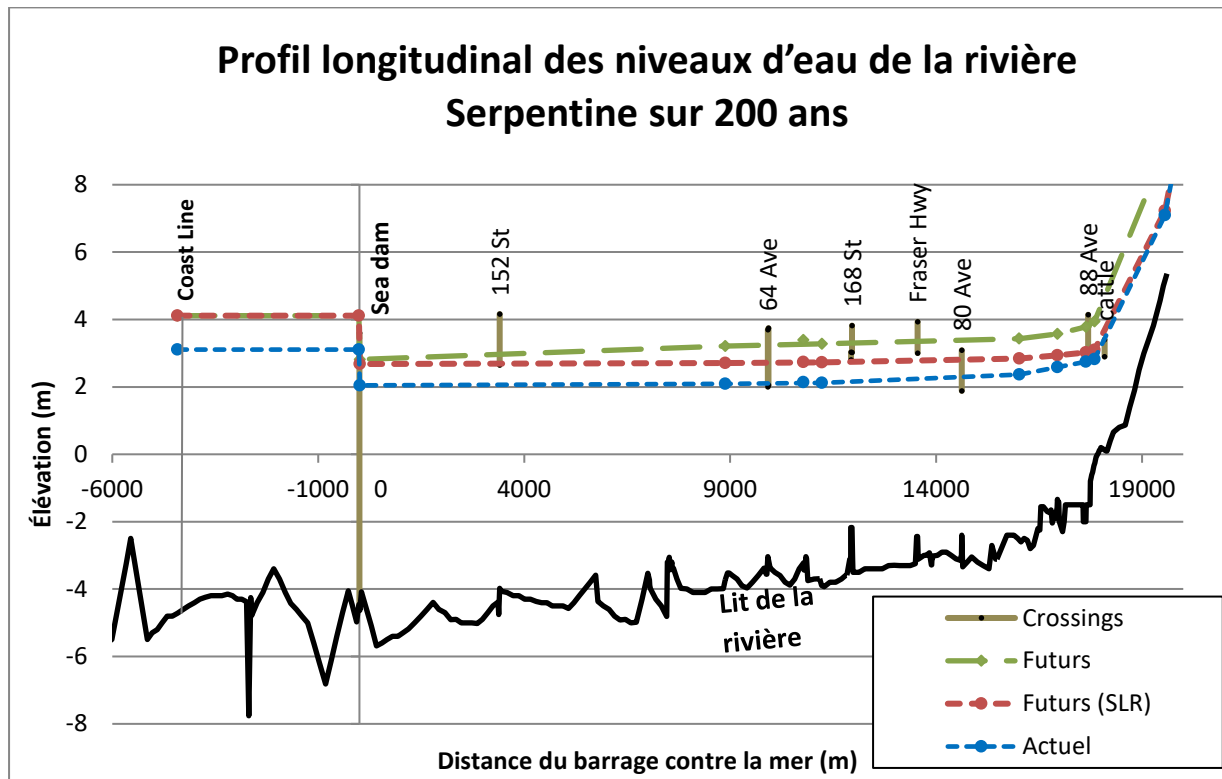


Figure 8 Profils des niveaux d'eau de la rivière Serpentine de récurrence de 200 ans pour les conditions actuelles et futures (année 2100) avec augmentation du niveau de la mer seule et avec augmentation du niveau de la mer plus augmentation modérée des précipitations

La Figure 9 montre les étendues potentielles de plaine inondable de récurrence de 200 ans pour les conditions actuelles et pour les années 2040, 2070, 2100 et 2200, en supposant qu'il n'y ait aucune amélioration ou modification au réseau actuel de protection contre les inondations. L'augmentation des étendues de la plaine inondable est relativement limitée en raison de la topographie plane de la plaine inondable et de la pente accentuée des parois de la vallée. L'augmentation des profondeurs des inondations sont comparativement plus importantes.

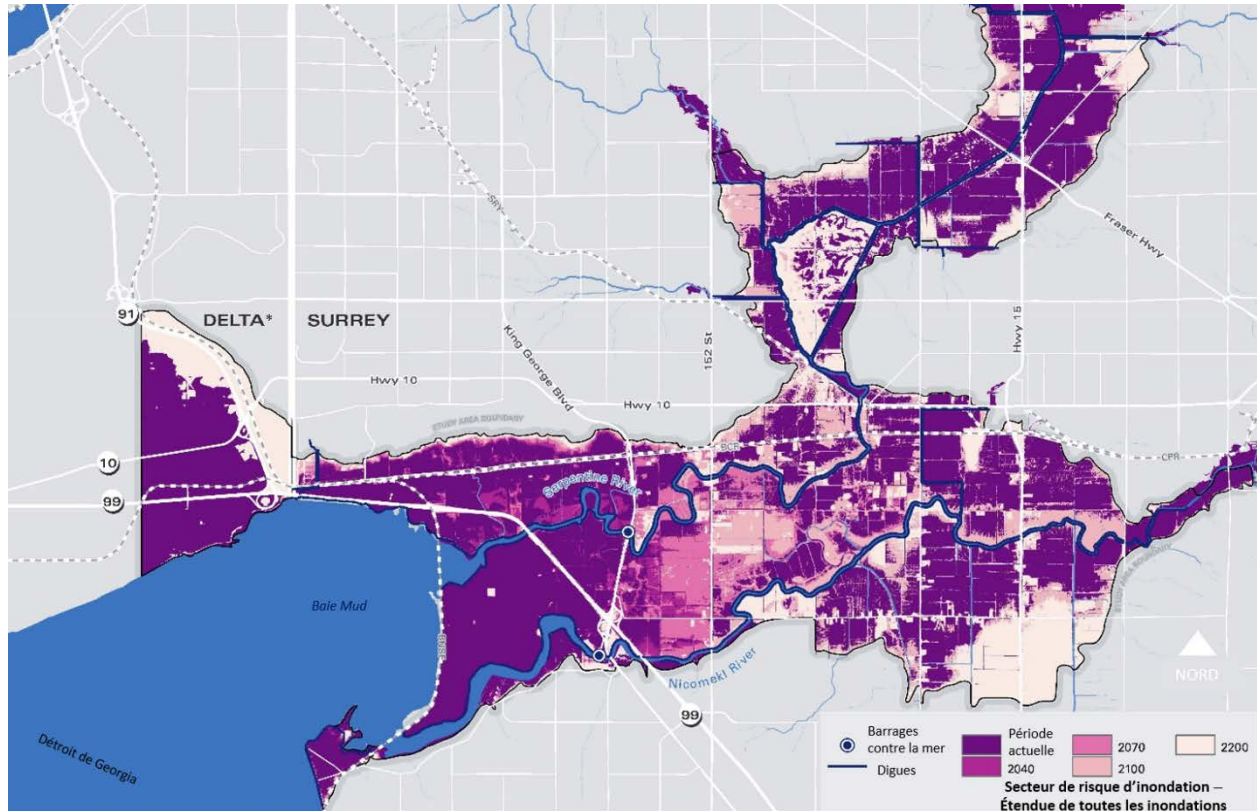


Figure 9 Augmentation de l'étendue de la plaine inondable due aux changements climatiques, de la période actuelle jusqu'à l'an 2200 (selon EPI)

4 CONCLUSIONS RELATIVES AU RISQUE D'INONDATION ET LEÇONS RETENUES

4.1 Conclusions

Traditionnellement, les villes étaient souvent établies aux exutoires des rivières, car ces endroits offraient un certain nombre d'avantages, y compris la facilité de transport. Les méthodes utilisées dans cette étude de cas peuvent être applicables à un certain nombre d'autres communautés situées dans les zones deltaïques de rivière touchées par des interactions complexes d'inondations fluviales et côtières. L'approche de simulation en continu décrite constitue une méthode statistiquement valable pour estimer l'ampleur et la fréquence des inondations résultant de la présence conjointe de niveaux élevés de l'océan et d'importants débits fluviaux, sans avoir à coupler les niveaux et les débits d'une période de récurrence particulière.

Pour estimer les futurs niveaux d'inondation à Surrey, en tenant compte des effets des changements climatiques et des modifications de l'aménagement du territoire, certaines simplifications ont été appliquées à la modélisation océanique, hydrologique et hydraulique. Néanmoins, les résultats sont

censés fournir une représentation réaliste du rehaussement relatif des niveaux d'inondation dans les bassins des rivières Serpentine et Nicomekl, en supposant que le niveau de la mer adopté et les augmentations de précipitations soient raisonnablement précis.

4.1.1 Inondation côtière

En analysant les séries chronologiques continues à long terme des niveaux de l'océan, la probabilité conjointe de marées hautes, d'ondes de tempête et de la dénivellation due aux vagues a été implicitement comptabilisée. Cette approche fournit une méthode statistiquement fiable de l'estimation du niveau d'inondation pour une probabilité de dépassement annuelle donnée (PDA). Une autre méthode plus simple (Ausenco Sandwell 2011) exigeant l'addition directe de ces trois composantes du niveau de l'océan peut être utile pour les estimations préliminaires du niveau d'inondation, mais est considérée comme conservatrice.

Les niveaux modélisés des océans ont été comparés à la hauteur maximale des digues côtières existantes. Les résultats ont montré que, dans les conditions actuelles, la plupart des digues côtières de Surrey offrent une protection inadéquate contre les inondations côtières et une attention immédiate est requise pour réduire les risques de débordement et de rupture. Dans les conditions actuelles, la période de récurrence du niveau de protection varie de 2 à 350 ans, avec seulement deux digues répondant aux normes de récurrence de 200 ans du niveau océanique.

Avec le rehaussement du niveau de la mer, les conditions devraient empirer continuellement. Plus précisément, le niveau de service relatif au niveau de l'océan estimé pour chaque digue diminue avec le temps en raison du rehaussement du niveau de la mer. En supposant l'augmentation linéaire du niveau de la mer recommandée par les lignes directrices provinciales, d'ici 2020, aucune des digues ne répondra à la norme de récurrence de 200 ans. D'ici 2040, la période de récurrence de l'événement auquel les digues pourraient résister sans débordement sera de moins de 10 ans; et d'ici 2070, on s'attend à ce que toutes les digues débordent plusieurs fois par an. Les digues ne sont pas conçues pour résister aux débordements et elles se rompraient vraisemblablement s'il y avait débordement des eaux océaniques ou, potentiellement, si leur revanche était dépassée.

4.1.2 Inondation riveraine

Les projections de précipitations reflètent des représentations plausibles du futur, compte tenu de la meilleure information scientifique actuelle, mais ne représentent pas des prédictions spécifiques. Les analyses suggèrent que, d'ici l'an 2100, pour la récurrence de 200 ans, le scénario climatique modéré pourra engendrer une augmentation des précipitations quotidiennes d'environ 33 % et le scénario sévère de 50 %. Au fur et à mesure que la science du climat s'améliore, les estimations devront être raffinées. Des précipitations plus élevées conduiront à un ruissellement plus intense, qui devrait également augmenter en raison du changement de l'aménagement du territoire qui réduira les taux d'infiltration.

Les niveaux d'inondation modélisés de la rivière ont été comparés avec la hauteur des crêtes des digues actuelles des rivières. Les digues intérieures possèdent généralement un certain niveau de revanche pour les conditions actuelles d'inondation de récurrence de 200 ans. Cependant, d'ici l'an 2100, les

barrages côtiers, les digues, les ponts, les routes et les chemins de fer de la région seront largement vulnérables aux inondations par les rivières.

Dans la plaine inondable du tronçon aval (juste en amont des barrages côtiers), le niveau actuel d'inondation de récurrence de 200 ans aura une période de récurrence de moins de 2 ans d'ici l'an 2100, indépendamment de l'augmentation des précipitations. Dans les secteurs plus en amont des rivières Nicomekl et Serpentine, en supposant que les précipitations ne changent pas, le niveau actuel d'inondation de récurrence de 200 ans aura une période de récurrence d'environ 75 ans en 2100. Avec les augmentations de précipitations estimées correspondant à un scénario sévère ou modéré de changements climatiques, le niveau actuel de récurrence de 200 ans pourrait être atteint en moyenne tous les 5 à 10 ans.

4.1.3 Cartographie des plaines inondables

La cartographie officielle des plaines inondables pour les conditions actuelles ou futures qui intégrerait les effets des changements climatiques n'a pas encore été préparée. Une comparaison des nouveaux niveaux d'inondation modélisés avec les niveaux d'inondation élaborés pour la cartographie des plaines inondables des années 1990 indique qu'il faut mettre à jour les niveaux de construction désignés contre les inondations (NCDCl) dans toute la plaine d'inondation. Compte tenu de la topographie relativement abrupte près de la plupart des limites de la plaine inondable, des augmentations relativement mineures de la zone inondable sont prévues d'ici l'an 2100.

Des cartes des plaines inondables ont été préparées pour les conditions actuelles, l'an 2100 et l'an 2200. Les cartes illustrant les conditions futures étaient basées sur les séries chronologiques prédites du niveau de l'océan et du ruissellement (en supposant l'aménagement futur du territoire et les quantités de précipitations). Ces cartes ne constituent pas des cartes officielles des plaines inondables et ne doivent pas être utilisées pour établir des niveaux de construction désignés contre les inondations avant qu'elles ne soient précisées. Cependant, elles fournissent des informations précieuses que Surrey peut utiliser pour évaluer les risques d'inondation actuels et futurs et la vulnérabilité correspondant à l'aménagement du territoire actuel et futur. Cette information est un outil important pour élaborer des stratégies d'adaptation aux inondations qui soient valables.

4.2 Leçons retenues

Surrey est l'une des villes dont la croissance est la plus rapide au Canada et il y a une forte pression pour l'aménagement des terres de la plaine inondable. La politique prospective de réglementation de l'utilisation des terres de Surrey s'est assurée que les zones de plaines inondables soient principalement occupées par des terres agricoles plutôt que par des aménagements à haute densité. Cela réduit de manière significative les pertes potentielles futures dues aux inondations et les risques connexes associés aux inondations. L'élaboration d'une stratégie d'adaptation aux inondations offre une plus grande souplesse qu'autrement.

Les réseaux fluviaux ne sont plus naturels et ils intègrent déjà d'importantes mesures de protection contre les inondations. Malheureusement, les barrages côtiers ont atteint essentiellement la fin de leur

durée de vie, les digues côtières ne répondent pas aux normes et déborderont souvent dans le futur. Les digues de rivière comportent des déversoirs pour contrôler le débordement et faciliter l'utilisation des terres inondables pour le stockage des eaux de crue. L'élaboration d'une stratégie d'adaptation pour l'avenir est un défi, compte tenu de l'infrastructure actuelle et de la faisabilité limitée de sa mise à niveau.

Il est possible de projeter les conditions d'inondation futures dans une certaine mesure, mais, avec le temps, les conditions réelles doivent être surveillées et les stratégies ajustées. Malgré la recherche approfondie et la modélisation effectuées à ce jour, les répercussions complètes d'une inondation catastrophique ne sont pas connues avec précision. Il est difficile de prévoir la manière dont les opinions des intervenants pourraient changer et la manière dont la priorisation des futures mesures de protection serait influencée. À une échelle macro, l'adaptation aux inondations en fonction des changements climatiques représente un problème beaucoup plus vaste qu'un strict problème d'ingénierie et il nécessite l'implication de multiples paliers gouvernementaux et un large éventail d'intervenants.

4.3 Défis et possibilités

Compte tenu des structures de contrôle des inondations sur la côte et le long des rivières, les modifications futures apportées aux mesures de protection auront un impact majeur sur les niveaux d'inondation. Surrey est en train d'élaborer une stratégie d'adaptation aux inondations qui est susceptible d'impliquer une protection structurelle supplémentaire, mais peut-être aussi l'adaptation aux eaux d'inondation et le retrait des inondations. Ces mesures sont susceptibles de modifier de manière significative les niveaux d'inondation estimés, rendant la cartographie des plaines inondables obsolète. Les mesures d'adaptation seront probablement introduites progressivement au fil du temps et, dans une certaine mesure, en réponse aux inondations vécues et à l'accumulation des pertes. La préparation de cartes de plaines inondables pour un réseau aussi complexe est difficile et il faut reconnaître que la cartographie devra être mise à jour à mesure au fur et à mesure que des changements se produiront.

En Colombie-Britannique, l'inondation de récurrence de 200 ans intégrant une revanche de 0,6 m a traditionnellement été utilisée pour la cartographie des plaines inondables. Pour les basses terres de Surrey, principalement constituées de terres agricoles, une norme d'inondation moindre pourrait être envisagée. Les structures de contrôle des inondations, les infrastructures de transport et les services publics nécessitent généralement une norme plus élevée. L'établissement de normes de conception appropriées axées sur le risque est loin d'être simple et devrait varier d'une province à l'autre. La revanche devrait dépendre du degré d'incertitude et du risque global plutôt que d'être fixée. Le cadre fédéral sur la cartographie des plaines inondables offre une occasion d'examiner et d'élaborer de nouvelles normes de cartographie.

5 RECOMMANDATIONS ET STRATÉGIE

5.1 Recommandations

Un certain nombre de recommandations spécifiques résulte des travaux décrits dans ce document, tant pour améliorer les intrants et les procédures de modélisation que pour l'élaboration d'une stratégie de gestion/adaptation aux inondations. Les améliorations de la modélisation sont très techniques (NHC 2015) et ne sont pas décrites ici. Les principales recommandations de gestion qui constituent les prochaines étapes comprennent ce qui suit :

- Élaborer un plan d'intervention d'urgence et décrire : 1) les mesures de protection temporaire; 2) l'évacuation des personnes et du bétail; 3) les procédures de réparation des digues.
- Évaluer la faisabilité et les ratios coût/avantage de : 1) l'amélioration des digues côtières et fluviales; 2) la protection côtière, comme les jetées, les brise-lames, la recharge des plages et les différents traitements des rives tels que l'enrochement et les rideaux de palplanches; 3) l'introduction de mesures d'adaptation pour accroître la résilience des zones touchées; 4) l'introduction de modifications à l'aménagement du territoire; 5) d'autres solutions. Prioriser les projets d'amélioration par secteur. Déterminer dans quel ordre et à quel moment les mesures privilégiées de protection contre les inondations devraient être mises en œuvre. Il est probable que des dommages graves seraient associés à une approche de laisser-aller.
- Élaborer des cartes détaillées des plaines inondables et réviser les NCDCl. Préciser comment les risques d'inondation changeront avec le temps (en supposant que l'infrastructure actuelle demeure en place). Préparer des cartes des plaines inondables qui illustrent comment l'étendue et la profondeur des inondations pourraient changer avec le temps afin d'informer les planificateurs et le public sur les changements potentiels pouvant survenir en raison des changements climatiques.
- Effectuer des évaluations de risques qui incluent les pertes sociales, culturelles ou environnementales et les pertes de vie suite à une rupture soudaine d'une digue côtière ou d'un barrage côtier.

5.2 Élaboration d'une stratégie d'adaptation aux inondations

Une stratégie d'adaptation aux inondations à long terme que Surrey pourra progressivement mettre en œuvre est nécessaire. Cette stratégie doit être flexible et permettre un ajustement en fonction des changements réels du niveau de la mer, du ruissellement, de la subsidence et de l'utilisation du territoire. Il s'agit d'évaluer l'état de la protection contre les inondations et de planifier la protection, l'adaptation ou le retrait par rapport aux futurs niveaux d'inondation. La stratégie doit prioriser les mises à niveau en fonction du ratio coût/avantage, de la durabilité et des perspectives socioéconomiques, et engager la participation d'un vaste éventail d'intervenants.

Surrey a récemment lancé un projet de trois ans (2016-2018) pour élaborer cette stratégie, organisée autour d'un processus de décision participatif des intervenants, et exigeant l'élaboration, l'évaluation et la hiérarchisation des scénarios d'inondation et des stratégies d'adaptation. En intégrant les valeurs et les intérêts des intervenants dès le début, on espère que ces derniers soutiendront la stratégie finale et que la collectivité et les industries de Surrey l'adopteront. Compte tenu de la complexité des problèmes abordés par ce travail, le processus de planification doit être adaptable et flexible, et il doit pouvoir intégrer de nouveaux acteurs et de nouveaux renseignements à mesure qu'il progressera (Ville de Surrey, 2017). Les principaux groupes d'intervenants comprennent les organismes de réglementation et de soutien et les ministères de tous les paliers gouvernements (fédéral, provincial, municipal, Premières Nations), les entreprises de services publics, les entreprises de transport, les entreprises commerciales, les propriétaires fonciers et les organisations non gouvernementales ayant des intérêts dans l'agriculture, l'environnement et les loisirs.

La Figure 10 illustre comment le processus de décision se déroulera, en commençant par l'éducation et la sensibilisation, en s'appuyant sur les risques d'inondation et les solutions d'adaptation et en réduisant itérativement la stratégie privilégiée grâce à un processus guidé par les valeurs des intervenants, informé par l'expertise technique et tenant compte des contraintes pratiques.

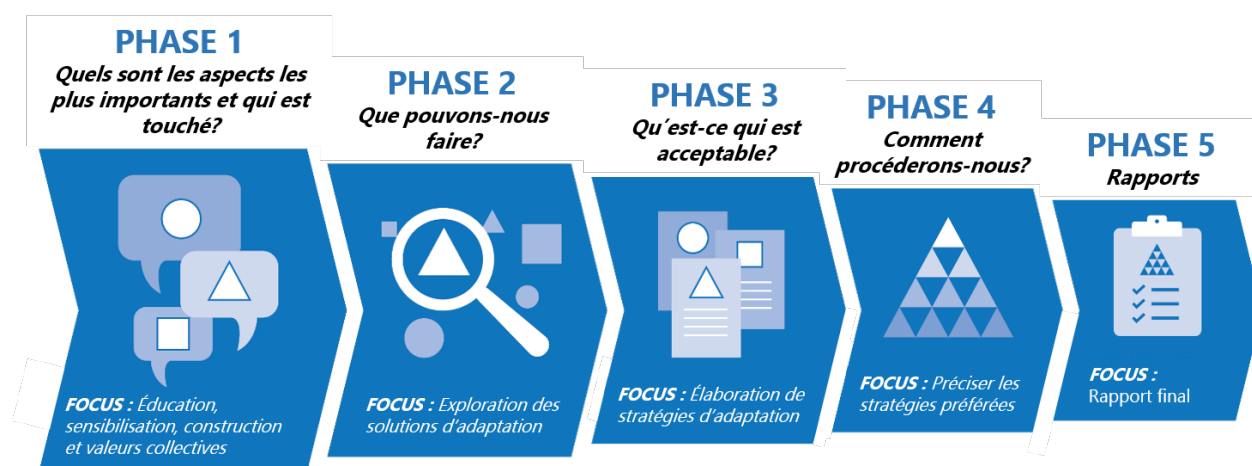


Figure 10 Approche d'élaboration d'une stratégie en cinq étapes (par EPI)

Au cours de la phase 1, les questions de risque d'inondation seront examinées et Surrey commencera à explorer ce qui compte pour les intervenants (c.-à-d., leurs valeurs et leurs objectifs). À ce stade, l'équipe du projet travaillera avec les intervenants pour créer des scénarios de manière collaborative (c'est-à-dire des résultats plausibles pour l'avenir). Ces scénarios clarifieront la façon dont les changements climatiques peuvent avoir un impact sur Surrey, contribueront à identifier les valeurs privilégiées par les intervenants à risque et permettront d'explorer comment ces incidences pourraient être gérées au moyen de diverses options d'adaptation.

Dans la phase 2, les options identifiées dans la première phase du travail seront élaborées, modélisées et testées, et tous les compromis pertinents seront identifiés. Cela comprendra une composante technique considérable impliquant des analyses détaillées et de la modélisation.

L'analyse et l'évaluation des intervenants se poursuivront au cours de la phase 3, alors que Surrey passera de l'élaboration de solution d'adaptation à l'établissement de stratégies d'adaptation. La modélisation et la visualisation des données (en 2D et 3D) supporteront le processus de raffinement, de codéveloppement et de consolidation d'une stratégie à la fois soutenue par les intervenants et techniquement réalisable.

Dans la phase 4, un petit nombre de stratégies d'adaptation robustes et largement soutenues seront précisées dans des stratégies privilégiées basées sur le coût, le financement et les partenariats. Enfin, au cours de la phase 5, les rapports finaux et les documents graphiques de la stratégie privilégiée seront élaborés et fournis par le biais de vastes activités de sensibilisation et de communication.

RÉFÉRENCES

- Ausenco Sandwell, 2011. Sea Dike Guidelines. Rapport technique préparé pour le ministère de l'Environnement de C.-B.
- Ville de Surrey, 2017. Surrey Coastal Flood Adaptation Strategy (SAICV) – Primer. 15 p. [en ligne] Disponible à <http://www.surrey.ca/files/SAICVWorkbookPrimer.pdf> (dernier accès le 24 février 2017).
- KPA Engineering Ltd. (1993) 1994. Floodplain Mapping Program Serpentine and Nicomekl Rivers. Design Brief. Rapport préparé pour la division de la Gestion des eaux et de l'environnement de C.-B.
- NHC, 2015. Serpentine & Nicomekl River Climate Change Floodplain Review Phase 2. Final Draft Report. Rapport préparé pour la ville de Surrey, 6 mars 2015. 128 p. avec annexes.
- NHC, 2012. Serpentine, Nicomekl & Campbell Rivers – Climate Change Floodplain Review. Final Report. Rapport préparé pour la ville de Surrey. Décembre 2012. 150 p. avec annexes.
- Rodenhuis, D, Bennett, K.E., Werner, A., Murdock, T.Q., Bronaugh, D. 2007. Hydroclimatology and future climate incidences in British Columbia. Pacific Climate Impacts Consortium.

**ANNEXE B : ÉTUDE DE CAS DE LA CARTOGRAPHIE DES PLAINES INONDABLES
ET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES INTÉGRATION DES CHANGEMENTS
CLIMATIQUES À LA CARTOGRAPHIE DES PLAINES INONDABLES DANS LES
BASSES TERRES CONTINENTALES DE LA COLOMBIE-BRITANNIQUE**



Étude de cas de la cartographie des plaines inondables et des changements climatiques

Intégration des changements climatiques à la cartographie des plaines inondables dans les basses terres continentales de la Colombie-Britannique

Mars 2017

Préparé par :

Conseil du bassin versant du Fleuve Fraser et
Northwest Hydraulic Consultants Ltd.



Fraser Basin Council

À L'INTÉRIEUR

1. Sommaire exécutif	4
2. Introduction	6
3. Fleuve Fraser Risques actuels d'inondations du Fleuve Fraser et des côtes des basses terres continentales	8
4. Fleuve Fraser Risques d'inondation du Bas Fraser et des basses terres continentales selon une projection de changements climatiques pour l'année 2100	9
5. Cartographie des plaines inondables pour l'évaluation de la vulnérabilité des basses terres continentales	13
6. Conclusions, leçons retenues et recommandations	20
7. Références	22

REMERCIEMENTS

Le Conseil du bassin du Fraser tient à remercier Ressources naturelles Canada pour l'appui financier pour la réalisation et la publication de cette étude de cas.

Cette étude de cas a été élaborée avec la contribution des organisations et des individus suivantst :

- Northwest Hydraulic Consultants Ltd. : Monica Mannerström, Malcolm Leytham, Neil Peters, Mariza Costa Cabral, Vanessa O'Connor, Sarah North et Charlene Menezes
- Conseil du bassin du Fraser : Jessica Shoubridge, Steve Litke et Denise Palmer Hoskins
- Tracey Hooper (rédactrice).

Conception par Roxy Design





Rapports et cartes des plaines inondables disponibles en ligne :

Les rapports et les cartes liées à cette étude de cas sont disponibles dans la section Ressources de la page internet de la stratégie de gestion des inondations des basses terres continentales (Lower Mainland Flood Management Strategy).

Visitez le floodstrategy.ca

Pour nous joindre

Pour plus de renseignements sur cette étude de cas, communiquez avec :

Steve Litke, gestionnaire principal de programme, bassins versants et ressources hydriques

Tél. : 604 488-5358

Courriel : slitke@fraserbasin.bc.ca

www.fraserbasin.bc.ca



Sommaire exécutif

Cette étude de cas a été élaborée dans le cadre de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des plaines inondables » pour informer les personnes et les organisations impliquées dans la cartographie et la gestion des inondations au Canada.

Cette étude de cas couvre la zone connue sous le nom de basses terres continentales de la Colombie-Britannique (C.-B.). Deux risques d'inondation sont décrits : l'inondation du Bas Fraser (associée à la crue printanière découlant de la fonte des neiges et des précipitations printanières dans le bassin versant du Fleuve Fraser) et l'inondation côtière (associée à un événement d'onde de tempête hivernale). La modélisation et la cartographie des plaines inondables ont été effectuées pour des scénarios actuels et pour des projections de « changements climatiques modérés » pour l'année 2100. Le rehaussement à l'échelle planétaire du niveau de la mer est intégré dans les scénarios d'inondations fluviales et côtières pour l'année 2100.

La modélisation et la cartographie des plaines inondables décrites dans cette étude de cas ont été entreprises pour mieux comprendre les effets des changements climatiques sur les inondations du Bas Fraser et sur les inondations côtières ainsi que pour fournir des informations servant à l'évaluation de la vulnérabilité à l'échelle régionale. La cartographie de l'étendue et de la profondeur des inondations associées aux scénarios d'inondations actuels et futurs était un élément clé de l'évaluation de la vulnérabilité des personnes, des bâtiments, de l'infrastructure et de l'économie reliée aux inondations. Cela fait partie de l'initiative plus vaste de la stratégie de gestion des inondations des basses terres continentales, qui vise à mieux gérer les risques d'inondation dans les collectivités le long du Fleuve Fraser et de la côte sud de la C. B. Le Conseil du bassin du Fraser sert de facilitateur et de coordinateur de cette initiative.

Le Fleuve Fraser est le plus grand fleuve de la côte ouest du Canada et, avec un bassin de plus de 230 000 km², il draine environ le quart de la Colombie-Britannique.

La modélisation et la cartographie des plaines inondables présentées dans cette étude de cas ont été entreprises pour mieux comprendre les effets des changements climatiques sur les inondations du Bas Fraser et sur les inondations côtières ainsi que pour fournir les informations servant à l'évaluation de la vulnérabilité à l'échelle régionale, laquelle fait partie de la stratégie de gestion des inondations des basses terres continentales.

La crue record enregistrée du Fleuve Fraser s'est produite en 1894 et elle a donné lieu à un débit de pointe d'environ 17 000 mètres³/seconde (m³/s) à Hope. On estime qu'une telle inondation a une période de retour d'environ 500 ans (ou une probabilité de dépassement annuelle de 0,002) et elle a été choisie comme crue de conception pour le fleuve.

Pour la cartographie des plaines inondables présentée dans cette étude de cas et réalisée pour l'évaluation de la vulnérabilité liée aux inondations, une approche simplifiée d'estimation des niveaux d'inondations côtières a été employée. Sur la base de l'analyse fréquentielle des valeurs enregistrées (marée + onde de tempête à Point Atkinson), on a établi le niveau d'inondation de 500 ans. Une revanche de 0,6 m a été ajoutée pour tenir compte des incertitudes liées aux vagues, aux ajustements du système de référence géodésique, au soulèvement et à la subsidence du sol. Ce niveau d'inondation a été appliqué uniformément à toutes les régions côtières des basses terres continentales et a été projeté horizontalement à l'intérieur des terres en supposant l'absence de digues.

Les changements climatiques peuvent modifier les risques d'inondation de différentes façons : altération du synchronisme, de la fréquence et de l'ampleur du débit de pointe par l'augmentation de l'intensité et de la durée des précipitations, par les modifications des taux d'évapotranspiration, d'absorption par le sol, de fonte des neiges ainsi que par l'augmentation des risques côtiers (rehaussement du niveau de la mer, augmentation de la fréquence ou de

la gravité des ondes de tempête et des conditions orageuses). Dans le futur (année 2100), indépendamment de la diminution potentielle du stock de neige total, les débits de pointe à Hope devraient augmenter au printemps en raison de la fonte des neiges plus hâtive et plus intense combinée à des pluies printanières plus intenses. Les niveaux des océans devraient également augmenter en raison du rehaussement du niveau de la mer. Ces deux conditions conduiront à des niveaux d'inondation plus élevés dans les basses terres continentales. La section 3 du présent rapport décrit les mesures prises pour estimer l'influence des changements climatiques sur les niveaux d'inondation du Bas Fraser et sur ceux de l'inondation côtière.

La cartographie des plaines inondables décrite dans cette étude de cas n'était pas une cartographie détaillée de plaines inondables et n'a pas été utilisée pour la délimitation officielle des plaines inondables, les nouveaux profils de conception de digues ou les niveaux d'inondation pour les constructions. L'objectif était de soutenir l'évaluation régionale des vulnérabilités aux inondations et en support à l'élaboration d'une stratégie régionale de gestion des inondations. La section 4 du présent rapport décrit brièvement les données d'entrée, certaines lacunes touchant ces dernières et d'autres aspects de la méthodologie associée à la cartographie de l'étendue et de la profondeur des inondations.

Voici quelques constatations clés de la cartographie des plaines inondables :

- En raison de la topographie des basses terres continentales, les deux scénarios d'inondation future (an 2100) qui intègrent les effets des changements climatiques montrent des augmentations relativement mineures de l'étendue des plaines inondables par rapport aux conditions actuelles. Cependant, les changements climatiques augmenteront de manière significative la fréquence des inondations et leur profondeur.
- L'inondation par une crue du Fleuve Fraser touche une superficie trois fois supérieure à celle des scénarios d'inondation côtière équivalents.
- L'étendue actuelle des inondations du Fleuve Fraser et des inondations côtières met en évidence le besoin de mettre en place des mesures d'atténuation des inondations dans toute la région dès que possible.
- La cartographie a facilité l'estimation des pertes économiques totales associées aux bâtiments, à l'agriculture, au transport maritime de marchandises à l'infrastructure et aux installations essentielles pour les quatre scénarios d'inondation, telle que résumée dans l'évaluation de la vulnérabilité.

Les cartes des plaines inondables fournissent généralement le portrait d'une rivière et de sa plaine inondable au moment où les cartes ont été préparées. Il est difficile de prédire comment le canal et la plaine inondable du Bas Fraser changeront avec le temps. La précision des cartes dépend également des outils (c'est-à-dire des méthodes de relevé, et de modélisation numérique) disponibles au moment de la cartographie. Les cartes des plaines inondables doivent être mises à jour au fur et à mesure que les outils s'améliorent et que les conditions physiques et météorologiques changent. Dans un climat changeant, cela devient encore plus critique dans la mesure où les cartes doivent être régulièrement mises à jour selon l'actualisation des scénarios d'émissions, des résultats du modèle climatique mondial et des nouvelles informations.

Cette étude de cas illustre une méthode qui intègre les effets des changements climatiques sur les débits de pointe des cours d'eau et les niveaux des océans. Les résultats fournissent une image plausible des plaines inondables actuelle et future et permettent d'estimer les pertes économiques qui leur sont associées afin d'illustrer l'importance d'élaborer une stratégie de gestion des inondations pour les basses terres continentales de la Colombie-Britannique.

L'effet le plus important des changements climatiques sur les inondations dans les basses terres continentales est la fréquence accrue des événements importants d'inondations fluviale et côtière, ce qui exacerbe les risques d'inondation déjà importants. La réévaluation de la crue de conception, compte tenu des effets des changements climatiques, est nécessaire. Cette étude de cas (ainsi que les projets qui l'étayent et les études de référence) conclut que les débits de pointe extrêmes du Fleuve Fraser augmenteront vraisemblablement en raison des changements climatiques d'ici l'an 2100.



Il est recommandé de préparer des cartes officielles plus précises de la plaine inondable pour le Bas Fraser et la côte sud en utilisant les informations à jour et les dernières technologies, en intégrant les effets des changements climatiques.

Pour élaborer et appliquer des cartes des plaines inondables officielles plus précises qui tiennent compte des effets des changements climatiques, les trois principales activités suivantes sont recommandées :

- 1. Examiner et hiérarchiser les limites et les incertitudes des données**
- 2. Entreprendre des recherches en continu pour tenir compte des limites et incertitudes des données essentielles**
- 3. Envisager l'élaboration et l'adoption de profils provisoires de la crue de conception pour les risques d'inondation dans le Bas Fraser et les secteurs côtiers, en tenant compte des effets des changements climatiques, pour la cartographie officielle des plaines inondables, l'aménagement du territoire et l'amélioration de la protection contre les inondations**

1. Introduction

1.1 Contexte et objectif de l'étude de cas

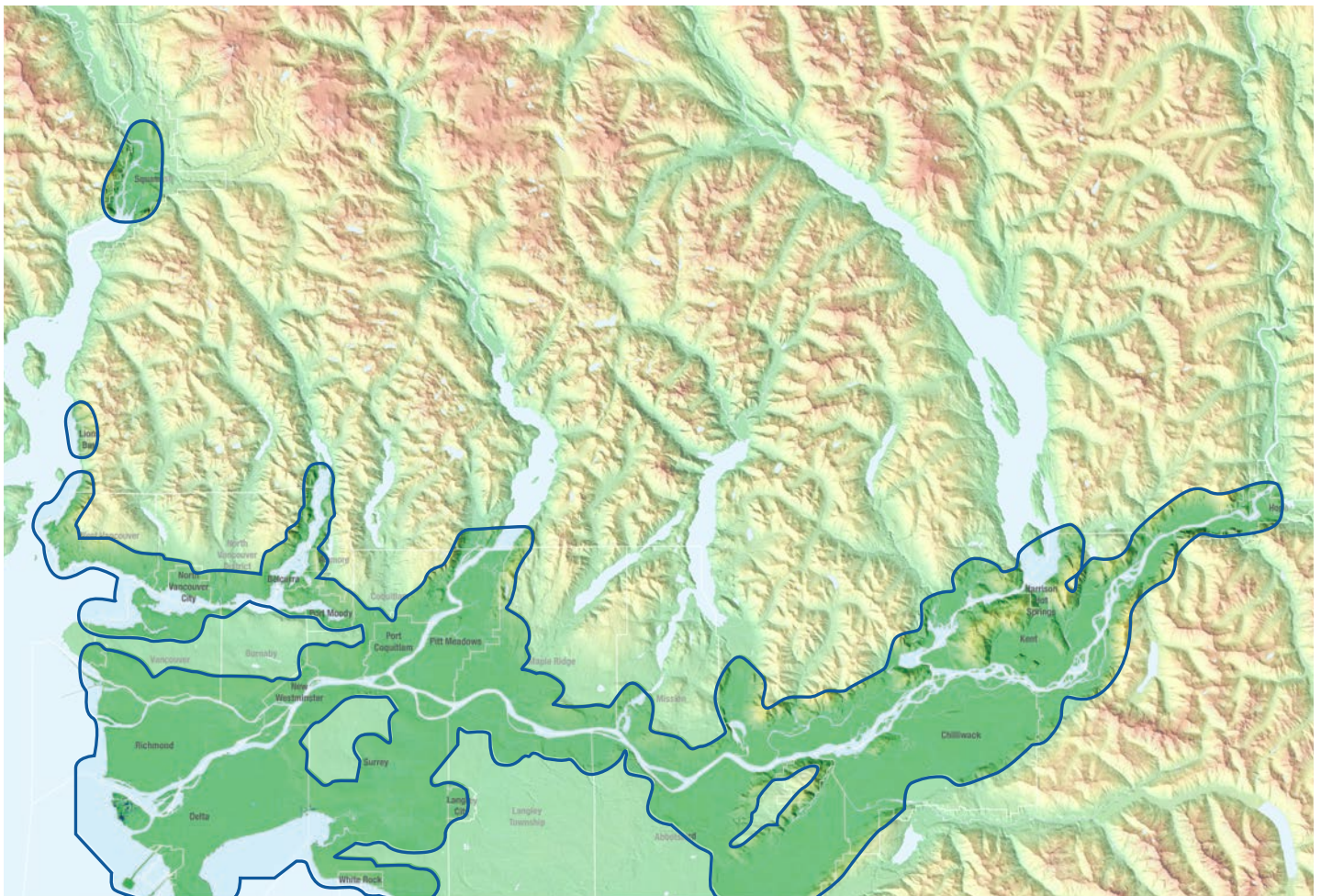
Cette étude de cas a été élaborée dans le cadre de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des plaines inondables » pour informer les personnes et les organisations impliquées dans la cartographie et la gestion des inondations au Canada.

1.2 Étendue géographique – les basses terres continentales de Colombie-Britannique

Cette étude de cas couvre la zone connue sous le nom de basses terres continentales de la Colombie-Britannique (C.-B.), qui comprend spécifiquement les collectivités de la région s'étendant de Hope (étendue est) à Richmond et Vancouver (étendue ouest) et de White Rock (étendue sud) à Squamish (étendue nord). Les deux risques d'inondation qui ont été établis incluent les inondations fluviales du Bas Fraser (associées à la crue printanière découlant de la fonte des neiges et des précipitations printanières dans le bassin versant du Fleuve Fraser) et les inondations côtières (associées à un événement d'onde de tempête hivernale). Au total, quatre scénarios d'inondation sont pris en compte : deux scénarios de référence (scénarios actuels) et deux selon les projections actuelles pour l'an 2100, comme il est résumé ci-dessous. Le rehaussement à l'échelle planétaire du niveau de la mer (ou augmentation du niveau moyen de la mer) est intégré dans les deux scénarios d'inondation futurs.

- **Scénarios d'inondation côtière** (niveau d'eaux calmes)
 - Scénario A - Actuel (niveau de référence géodésique à 3,4 mètres)
 - Scénario B - An 2100 (niveau de référence géodésique à 4,4 mètres)
- **Scénarios d'inondation du Bas Fraser**
 - Scénario C - Actuel (débit de pointe de 17 000 mètres³/seconde à Hope, C.-B.)
 - Scénario D - An 2100 (débit de pointe de 19 900 mètres³/seconde à Hope, C.-B.)

Figure 1: Région à l'étude



1.3 Stratégie de gestion des inondations des basses terres continentales

La stratégie de gestion des inondations des basses terres continentales (la stratégie) est une initiative qui a débuté en 2014 pour mieux gérer le risque d'inondation dans les municipalités situées le long du Bas Fraser et sur la côte sud, de Hope à Richmond et Vancouver et de Squamish à White Rock. Les partenaires de cette initiative intergouvernementale ont des responsabilités ou des intérêts liés à la gestion des inondations et incluent le gouvernement du Canada, la province de la Colombie-Britannique, près de 30 gouvernements locaux et plusieurs autres entités de la région, y compris celles axées sur les systèmes de transport, l'agriculture et les affaires. Le Conseil du bassin du Fraser (CBF) agit à titre de facilitateur et de coordinateur de cette initiative. Le CBF est une organisation non gouvernementale à but non lucratif qui a pour mandat de promouvoir la durabilité dans toute la Colombie-Britannique, en mettant l'accent sur le bassin versant du Fleuve Fraser. Le Conseil n'a pas d'autorité législative ou de rôle réglementaire dans la gestion des inondations, il est ainsi bien placé pour servir de tiers impartial pour faciliter le dialogue et la collaboration entre les nombreuses administrations et les intervenants qui ont des intérêts dans la gestion des inondations.

La stratégie vise à identifier les possibilités de renforcement des politiques et les pratiques de gestion des inondations, ainsi que les infrastructures de protection contre les inondations dans les basses terres continentales. Une approche intégrée et collaborative de protection contre les inondations est d'une importance cruciale compte tenu de l'évolution des risques d'inondation auxquels sont confrontées les collectivités des basses terres continentales et étant donné qu'une inondation majeure aurait de graves conséquences sociales, économiques et environnementales pour toute la région et l'économie nationale. Les politiques et les pratiques de gestion des inondations sont importantes pour protéger la sécurité publique, réduire les pertes potentielles de vie, minimiser les dommages causés par les inondations aux bâtiments, aux infrastructures et à d'autres biens, minimiser les pertes financières connexes et éviter les difficultés sociales et les dommages environnementaux incommensurables associés aux inondations. Une approche coordonnée à l'échelle régionale serait plus efficace et plus profitable que si toutes les municipalités et les autres organisations travaillaient de manière indépendante à l'atténuation des inondations et à l'adaptation aux changements climatiques. Bien que la stratégie n'empêche pas ou ne remplace pas les actions indépendantes entreprises par les autorités locales, une approche à l'échelle régionale offre la possibilité d'éliminer les redondances, d'identifier et de combler les lacunes en matière de données et d'examiner les effets des mesures d'atténuation des inondations dans un secteur à d'autres secteurs. Par exemple, la construction ou la mise à niveau d'une digue dans une zone augmenterait-elle le risque d'inondation pour les collectivités voisines en amont, en aval ou de l'autre côté de la rivière?

L'élaboration de la stratégie compte deux phases. La phase 1 (2014-2016) a permis de mieux comprendre les risques d'inondation dans les basses terres continentales, d'identifier les vulnérabilités liées aux inondations dans la région et d'évaluer les pratiques et les politiques de gestion des inondations d'un point de vue régional. Au cours de la phase 2 (débutée en juin 2016), un plan d'action sera élaboré en fonction du travail de la phase 1 et des travaux ultérieurs de la phase 2. La phase 2 est axée sur l'identification des priorités, l'évaluation des options de gestion et l'élaboration d'un modèle de partage des coûts pour la mise en œuvre de la stratégie. Deux projets de la phase 1 forment la base de cette étude de cas : 1) une simulation des effets des changements climatiques sur les scénarios des inondations du Fleuve Fraser et des inondations côtières et 2) une évaluation de la vulnérabilité des collectivités et de l'infrastructure aux scénarios d'inondation actuels et futurs. La cartographie de l'étendue et de la profondeur des inondations dans les scénarios d'inondation était un élément clé de l'évaluation de la vulnérabilité liée aux inondations des personnes, des bâtiments, des infrastructures et de l'économie.



2. Risques actuels d'inondation du Fleuve Fraser et d'inondation côtière dans les basses terres continentales

2.1 Scénarios de la crue de conception du Fleuve Fraser

Le Fleuve Fraser est le plus grand fleuve sur la côte ouest du Canada et, avec un bassin de plus de 230 000 km², il draine environ le quart de la Colombie-Britannique. Ce fleuve prend sa source dans les Rocheuses et coule sur une distance de 1100 km vers l'océan Pacifique. À Hope, à environ 165 km de la côte, le fleuve sort d'un canyon abrupt et entre dans la vallée du Fraser, traversant d'abord un lit de gravier juste en amont de Mission, puis transite vers un lit de sable. Avant de se déverser dans l'océan Pacifique, le fleuve se divise en quatre émissaires : North Arm, Middle Arm, South Arm et Canoe Pass.

Le Fleuve Fraser a inondé les basses terres continentales au passé et il est maintenant largement endigué, bien que la plupart des digues ne respectent pas les normes de conception actuelles. La plus importante inondation enregistrée du Fleuve Fraser s'est produite en 1894 et a donné lieu à un débit de pointe d'environ 17 000 mètres³/seconde (m³/s) à Hope. On estime qu'une telle inondation a une période de retour d'environ 500 ans (ou une probabilité de dépassement annuelle de 0,002) et elle a été adoptée comme crue de conception pour le fleuve. En raison des contributions des rivières Harrison et Chilliwack et d'autres petits affluents, le débit de pointe augmente en aval et, pour la ville de Mission, un débit de 18 900 m³/s a généralement été adopté comme débit de conception.

Les inondations majeures du Fleuve Fraser se sont historiquement produites au printemps (typiquement en mai et juin), principalement en raison de la fonte des neiges. Plusieurs facteurs contribuent aux inondations majeures sur ce fleuve, y compris :

- d'épais manteaux neigeux saturés dans tout le bassin versant du Fleuve Fraser, en particulier dans les sous-bassins versants du haut Fraser et de la rivière Nechako;
- une teneur élevée en humidité du sol, qui limite l'absorption;
- du temps frais suivi d'une période de chaleur importante et prolongée qui provoque une fonte rapide et continue;
- des précipitations qui coïncident avec la période de fonte des neiges, ce qui ajoute de l'eau au débit du fleuve et augmente la vitesse de fonte des neiges.

Les aménagements de la vallée du Fraser sont très denses et ce secteur contient de grands corridors de transport. La vulnérabilité liée aux inondations est élevée et un nouvel événement de crue record entraînerait des pertes économiques considérables (NHC 2016). Au cours de la dernière décennie, un certain nombre d'études importantes ont été menées pour évaluer les risques d'inondation dans le Bas

Fraser. En 2005-2006, le Conseil du bassin du Fraser, le ministère de l'Environnement de la C.-B. (et plus tard le ministère des Forêts, des Terres et des Ressources naturelles) et d'autres partenaires ont retenu les services de Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (NHC) pour élaborer un modèle hydraulique du Fleuve Fraser en aval de Hope pour 1) estimer le profil de la crue de conception du Fleuve Fraser et 2) prévoir les niveaux d'inondation en temps réel pendant la saison de fonte des neiges pour les années où le risque d'inondation est élevé (NHC 2006, 2008a, 2008b, 2014a). Le modèle simule les niveaux d'eau le long du fleuve pour les débits entrants sélectionnés à Hope et les principaux affluents, et pour les niveaux de l'océan aux exutoires. Le modèle hydraulique du Bas Fraser, recalé en 2008 et actualisé pour tenir compte des changements de niveau du gravier en 2014, constitue un outil clé pour estimer les niveaux d'inondation dans les conditions actuelles et projeter les effets des changements climatiques sur les niveaux d'inondation futurs.

Pour estimer le profil de la crue de conception du Fleuve Fraser, deux conditions ont été modélisées : 1) le débit estimé pendant l'inondation de 1894, combiné à une marée haute printanière (condition de débordement associée à une crue printanière), et 2) la tempête hivernale de 200 ans avec marée haute combinée au débit hivernal du Fleuve Fraser (condition hivernale). Les deux profils (c'est-à-dire les niveaux d'eau) ont ensuite été superposés et la plus haute des deux valeurs ont été utilisées pour élaborer le profil général de la crue de conception pour le fleuve. Pour presque l'entièreté du tronçon de 165 km du modèle, le profil de la crue de conception est déterminé par la condition de crue printanière et ce n'est qu'à proximité de la côte, sur une distance de moins de 30 km des exutoires, que le profil de la condition hivernale est plus élevé. Pour la modélisation de la condition hivernale, une analyse statistique des ondes de tempête et des niveaux de marée astronomique a originalement été effectuée en utilisant la technique de simulation empirique mise au point par le U.S. Army Corps of Engineers (NHC 2006). Pour les travaux ultérieurs (NHC 2014a), les niveaux côtiers ont été mis à jour en fonction des travaux réalisés pour la Ville de Vancouver (NHC 2014b).

Aussi loin en amont que Mission, à environ 85 km de l'océan, les niveaux d'eau sont influencés par la marée, et un petit mouvement d'oscillation diurne peut être détecté même à des débits élevés. Cependant, les niveaux maximaux d'inondation dépendent des débits de pointe pendant la crue printanière plutôt que des niveaux de l'océan. Pour la conception de digues et d'autres structures le long du fleuve, il est important de faire la distinction entre les conditions de crue printanière et les conditions hivernales.

2.2 Scénarios d'inondation par une onde de tempête côtière

Pour la cartographie des plaines inondables décrite dans cette étude de cas et réalisée pour l'évaluation de la vulnérabilité liée aux inondations, une approche simplifiée d'estimation des niveaux côtiers de conception a été adoptée. Le niveau d'inondation de 500 ans a été établi sur la base de l'analyse fréquentielle des données enregistrées (marée + onde de tempête à Point Atkinson). Une revanche de 0,6 m a été ajoutée pour tenir compte des incertitudes liées aux vagues, aux ajustements du système de référence géodésique, et au soulèvement et à la subsidence du sol. Ce niveau d'inondation a été appliqué uniformément à toutes les régions côtières des basses terres continentales et a été projeté horizontalement à l'intérieur des terres en supposant l'absence de digues.

Il est reconnu que, en plus des niveaux de la marée haute combinés aux ondes de tempête, les niveaux d'inondation côtières sont influencés par :

- les vents forts, entraînant une dénivellation de l'eau due au vent,
- une grande amplitude des vagues, qui accentuent les niveaux d'eau de l'océan.

Les conditions locales peuvent influencer de manière significative les niveaux d'eau pendant un événement de tempête côtière spécifique. Par exemple, l'exposition du littoral aux vents forts et aux effets des ondes de tempête peut entraîner un rehaussement des niveaux d'eau plus importante par rapport à des zones moins exposées. La géométrie du littoral influencera également les niveaux d'eau. Pour une évaluation plus détaillée, des analyses locales sont nécessaires. La subsidence et le soulèvement du sol influenceront également le niveau relatif de la mer.

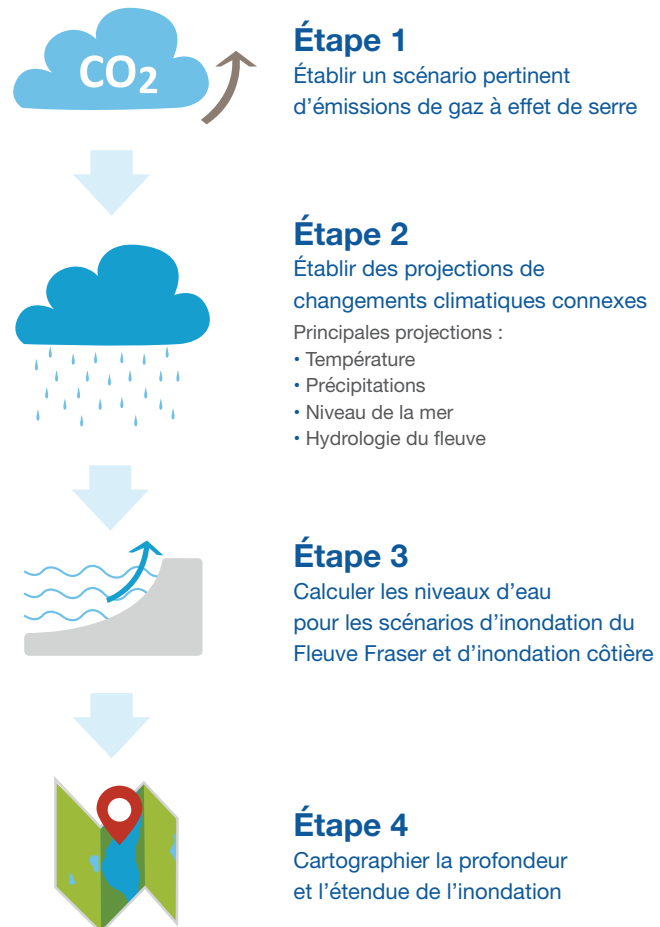
3. Risques d'inondation du Bas Fraser et des basses terres continentales selon une projection de changements climatiques pour l'année 2100

Les changements climatiques peuvent modifier les risques d'inondation de différentes façons : altération du synchronisme, de la fréquence et de l'ampleur du débit de pointe par l'augmentation de l'intensité et de la durée des précipitations, par les modifications des taux d'évapotranspiration, d'absorption par le sol, de fonte des neiges ainsi que par l'augmentation des risques côtiers (rehaussement du niveau de la mer, augmentation de la fréquence ou de la gravité des ondes de tempête et des conditions orageuses).

Afin de simuler l'impact des changements climatiques sur les niveaux d'inondation le long du Fleuve Fraser pour l'année 2100, les premières étapes consistaient à estimer les débits entrants futurs à Hope et aux affluents, à estimer les niveaux futurs de l'océan et à réaliser la simulation du modèle hydraulique du Bas Fraser en utilisant les débits et les conditions limites révisées de l'océan.

D'ici l'an 2100, indépendamment de la diminution potentielle du stock total de neige, les débits de pointe à Hope devraient augmenter au printemps en raison de la fonte plus hâtive et plus intense des neiges, en combinaison avec des pluies estivales plus intenses. Les niveaux des océans devraient également augmenter en raison du rehaussement du niveau de la mer. Ces deux conditions conduiront à des niveaux d'inondation plus importantes le long du fleuve. Les sections suivantes décrivent les procédures employées pour estimer les conditions futures d'inondation.

Figure 2: Étapes pour l'estimation des impacts des changements climatiques sur l'étendue et la profondeur des inondations futures



3.1 Débits futurs de la crue printanière du Fleuve Fraser

Le rapport en 2014 sur la simulation des impacts des changements climatiques sur le rehaussement du niveau de la mer sur les scénarios d'inondation du Fleuve Fraser (*Simulating the Effects of Sea Level Rise and Climate Change on Fraser River Flood Scenarios*) (NHC 2014a) décrit les étapes suivies pour estimer les conditions limites des inondations majeures, d'abord pour les conditions actuelles, puis pour les conditions futures projetées selon différents scénarios de changements climatiques. Les valeurs pour les conditions actuelles étaient basées sur l'analyse des mesures historiques, alors que les valeurs futures ont été estimées en fonction des étapes suivantes :

a) Pour une série de scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre, les projections de températures et de précipitations régionales sont disponibles auprès du Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC). Des modèles hydrologiques qui utilisent les données atmosphériques et les caractéristiques des bassins versants projetés, permettent de simuler les débits de crue futurs tenant compte de l'impact des changements climatiques. Différents résultats des modèles hydrologiques ont été examinés et il a été constaté que les débits quotidiens futurs générés par Shrestha et coll. (2012) étaient les plus appropriés. Le modèle de taux d'infiltration hydrologique variable qui a été utilisé et l'échelle réduite des intrants climatiques offre une haute résolution temporelle et spatiale. Bien que ces travaux présentent certaines lacunes, telles que décrites dans NHC (2014a), cette approche a été retenue.

b) Parmi les nombreuses simulations réalisées par Shrestha et coll. (2012), deux scénarios climatiques futurs ont été sélectionnés en fonction des recommandations du PCIC (Murdoch et Spittlehouse 2011 : un scénario de changements climatiques modérés et un scénario de changements climatiques intenses. HadGEM A1B (exécution 1) représente un exemple approprié de changements climatiques « intenses ». Il a produit des augmentations dans les quantiles du débit de pointe à proximité de l'extrémité supérieure, bien qu'elles ne soient pas très élevées. HadCM3 B1 (exécution 1) a produit des augmentations des quantiles du débit de pointe qui sont proches de la médiane. Il représente un exemple approprié de changements climatiques « modérés ». Ces deux exécutions du modèle sont issues de la phase 3 du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP3)¹.

c) Pour estimer les débits de conception futurs (année 2100) avec des périodes de récurrence de 50, 100, 200, 500, 1 000, 5 000 et 10 000 ans, des analyses fréquentielles correspondant à une distribution log-Pearson III de la série des maxima annuels projetés ont été menées pour les deux scénarios climatiques choisis (c.-à-d. modéré et intense). Cela a permis de comparer les débits de conception présents et futurs et d'estimer le pourcentage d'augmentation des débits.^{2,3}

3.2 Niveaux futurs de l'océan

Il existe une grande incertitude quant aux projections mondiales du rehaussement du niveau de la mer et le degré d'incertitude augmente plus la projection est éloignée dans le temps. Une étude commandée par la province de la C.-B. (Ausenco Sandwell 2011) a prévu un rehaussement du niveau de la mer de 0,5 m en 2050, de 1,0 m en l'an 2100 et de 2,0 m d'ici à l'an 2200. Ces projections sont plus élevées que les dernières projections du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2014) pour les années 2050 et 2100, mais sont inférieures aux autres projections plus récentes qui tiennent compte de la dynamique des inlandsis et de l'augmentation de son potentiel d'effondrement.⁴

Pour l'étude de 2014 simulant les effets du rehaussement du niveau de la mer et des changements climatiques sur les scénarios de crue du Fleuve Fraser (NHC 2014a), le rehaussement du niveau de la mer projetée a été ajoutée à la série horaire des niveaux de l'océan spécifiés à la limite aval du modèle hydraulique. L'effet du rehaussement du niveau de la mer a été simulé pour des scénarios avec 0 m, 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m et 2,0 m de changement des niveaux d'eau de l'océan. Pour l'évaluation de la vulnérabilité des basses terres continentales, l'augmentation projetée du niveau de la mer de 1 m d'ici l'an 2100 a été ajoutée aux niveaux actuels de l'eau des océans.

Des parties des basses terres continentales côtières, en particulier celles du delta du Fleuve Fraser, s'affaissent progressivement. À mesure que le niveau de la mer augmente à l'échelle planétaire et que de l'affaissement se produit, l'élévation relative du niveau de la mer est amplifiée, ce qui entraîne une augmentation des inondations et de l'érosion dans les environnements côtiers. En particulier, l'affaissement dû à la consolidation des sédiments peut jouer un rôle important dans l'élévation relative du niveau de la mer dans les grands deltas. Les amplifications et les fortes variations spatiales touchant l'élévation relative du niveau de la mer doivent être prises en compte dans la planification locale et régionale (Mazzotti et coll., 2009). Le travail accompli à ce jour n'a pas estimé l'emplacement et l'ampleur de la subsidence et du soulèvement, ce qui est recommandé pour une analyse et une cartographie plus détaillées servant à désigner les plaines inondables officielles en tenant compte d'une augmentation relative du niveau de la mer.

¹ CMIP 3 désigne la 3e phase du Coupled Model Intercomparison Project. C'est une activité du Programme mondial de recherches sur le climat qui représente un ensemble de résultats issus du modèle climatique mondial utilisé par le Groupe de travail 1 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. CMIP 5 en est la phase la plus récente.

² NHC (2014a), Section 5.4, Table 8

³ Shrestha et coll. ont mis à jour en 2015 leur étude de 2012 en appliquant des paramètres variables dans le temps à l'analyse fréquentielle et en utilisant une nouvelle génération de modèles de changements climatiques mondiaux, de scénarios d'émissions et de projection climatique du CMIP 5. Il s'agit d'une meilleure manière d'effectuer l'analyse, mais les résultats de cette étude de cas n'ont pas encore été examinés à ce jour. Les comparaisons initiales donnent à penser que l'analyse de 2015 n'apporterait pas de changements importants.

⁴ Le rapport technique de la National Oceanic and Atmospheric Administration (Sweet et coll. 2017) utilise une plage de 0,3 à 2,5 m pour 2100.

3.3 Intégration des effets des changements climatiques à la modélisation hydraulique du Bas Fraser

Pour intégrer les effets des changements climatiques, les débits et les niveaux de l'océan projetés ont été utilisés comme conditions limites du modèle hydraulique numérique. Le modèle représente la bathymétrie du fleuve et la topographie de la plaine inondable et il permet de calculer les niveaux d'eau le long du fleuve pour différents débits et niveaux d'eau à l'aval à l'aide d'un algorithme de calcul du remous hydraulique d'un débit variable.

Le ministère des Forêts, des Terres et des Ressources naturelles de la C.-B. a exploité le modèle hydraulique du Bas Fraser pour chacun des 140 profils des scénarios d'inondation présentées dans le rapport de 2014 intitulé *Simulating the Effects of Sea Level Rise and Climate Change on Fraser River Flood Scenarios* (NHC 2014a). Ces profils d'inondation couvrent une gamme de magnitude d'inondation (probabilités de dépassement annuelles de 1:50 à 1:10 000 correspondant à « aucun changement climatique », « changements climatiques modérés » et « changements climatiques intenses ») ainsi que différents scénarios de rehaussement du niveau de la mer (0 m, 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m et 2,0 m). Les niveaux d'eau correspondants ont été estimés à plus de 1 000 endroits le long du Bas Fraser. À partir de l'analyse décrite ci-dessus, quatre scénarios d'inondation ont été sélectionnés pour être modélisés et cartographiés (voir le tableau 1).

Tableau 1 : Scénarios d'inondation sélectionnés pour l'évaluation de la vulnérabilité liée aux inondations des basses terres continentales

Scénario	Type de risque	Période	Commentaire
A	Côtier	Actuelle	Niveau de l'océan de PDA ^a de 1:500 = 3,4 m LGC ^b (niveau d'eau calme) ^c
B	Côtier	Future (2100)	Niveau de l'océan de PDA de 1:500 = 4,4 m LGC (niveau d'eaux calmes)
C	Crue printanière du Fleuve Fraser	Actuelle	Inondation par le Fleuve Fraser d'une PDA approximatif de 1:500 (récurrence de la crue record de 1894 avec un débit de pointe de 17 000 m ³ /s à Hope, C.-B.)
D	Crue printanière du Fleuve Fraser	Future (2100)	Inondation d'une PDA de 1:500 + débit augmenté pour tenir compte de l'impact des changements climatiques (17 % avec débit de pointe de 19 900 m ³ /s à Hope, C.-B.) et rehaussement du niveau de la mer de 1 m

^a PDA signifie la probabilité de dépassement annuel, c'est-à-dire la chance ou la probabilité qu'un incident lié à des risques naturels (dans ce cas-ci, une inondation) se produise à une année donnée et il est habituellement exprimé en pourcentage. Un événement de PDA de 1:500 présente 0,2 % de chance de se produire chaque année.

^b LGC désigne le Plan de référence des Levés géodésiques du Canada.

^c Le niveau « d'eaux calmes » désigne la combinaison de hautes marées et d'ondes de tempête, mais n'inclut pas les effets localisés des vagues.

Voici quelques observations résultant de cette analyse :

- **Montée du niveau de la mer :**

Dans la gamme des scénarios envisagés (0-2 m), le rehaussement du niveau de la mer peut avoir un effet important sur les niveaux d'inondation et les profils de conception des digues à un point situé en amont de la confluence de la rivière Sumas (à environ 90 km en amont de l'embouchure du Fleuve Fraser). Par conséquent, les collectivités de la vallée centrale et de la vallée inférieure du Fraser doivent tenir compte du rehaussement du niveau de la mer dans le cadre de la planification à long terme de la gestion des risques d'inondation.

- **Augmentation des débits de pointe :**

La modélisation a montré que les niveaux d'inondation du Fleuve Fraser sont très sensibles à l'augmentation des débits d'eau à Hope. Par exemple, le scénario de « changements climatiques modérés » augmente le niveau d'eau d'inondation de plus de 1 m dans le district de Mission, par rapport aux inondations historiques ayant la même probabilité annuelle de dépassement. La modélisation supposait que la hauteur de toutes les digues ait augmentée pour contenir même les débits les plus élevés, ce qui, essentiellement, élimine le stockage dans la plaine inondable et toute atténuation des débits de pointe. Pour les débits futurs augmentés, un ajustement des paramètres du modèle hydraulique devrait être effectué, en particulier à l'emplacement des ponts, mais cela n'a pas été fait dans cette analyse.

Au fur et à mesure que le niveau de la mer augmente, le point de transition dans le Fleuve Fraser – lorsque le scénario de crue hivernale entraîne des niveaux d'inondation plus élevées que le scénario de crues printanières/estivales – se déplacera progressivement en amont, mais seulement de quelques kilomètres.

3.4 Incertitudes touchant les effets des changements climatiques sur les débits de crue

Bien qu'il soit nécessaire de fournir des informations quantitatives pour la planification de la protection contre les inondations, les projections sous-jacentes des changements climatiques sont soumises à un grand degré d'incertitude. Les principales sources d'incertitude liées aux estimations de débits sont les suivantes :

- Niveaux futurs des émissions de gaz à effet de serre inconnus
- Réponse incertaine du système climatique mondial à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre
- Réduction d'échelle, en termes d'espace et de temps, des variables du modèle climatique mondial et compréhension incomplète des impacts régionaux résultant des changements globaux
- Application du modèle hydrologique
- Extrapolation des analyses fréquentielles aux périodes de récurrence extrêmes.

Les projections hydrologiques produites devraient être considérées comme étant des représentations plausibles pour l'année 2100, s'appuyant sur les meilleures informations scientifiques actuelles disponibles, et elles ne représentent pas des prédictions spécifiques. Les débits futurs réels pour le Fleuve Fraser à Hope différeront des scénarios projetés.

L'une des plus grandes incertitudes dans l'évaluation des effets potentiels futurs des changements climatiques sur les inondations du Fleuve Fraser concerne la large gamme de résultats obtenus au moyen des différents modèles climatiques mondiaux et des scénarios d'émissions ainsi que la variabilité correspondante des estimations du débit de pointe du Fleuve Fraser pour une probabilité annuelle de dépassement donnée. La simulation du scénario de « changements climatiques modérés » réalisée dans le cadre des travaux liés au rapport *Simulating the Effects of Sea Level Rise and Climate Change on Fraser River Flood Scenarios* (NHC 2014a) a entraîné des augmentations de 17 % par rapport à la crue de conception actuelle. Toutefois, l'augmentation des débits projetés pour les différentes simulations des modèles climatiques mondiaux varie de quelques degrés de pourcentage à plus de 30 %.⁵

L'étude mise à jour de Shrestha et coll. (2015) fournit une meilleure idée de ce pourcentage d'augmentation du débit applicable. L'étude a utilisé des résultats plus récents de modèle climatique mondial pour un plus grand nombre de modèles pour chacun des trois scénarios d'émission (appelés profils représentatifs d'évolution de concentration [RCP]). Comme dans l'étude antérieure (Shrestha et coll. 2012), la gamme de résultats étaient assez vaste. Par exemple, l'augmentation projetée du débit probable de dépassement annuel de 1:500 pour le Fleuve Fraser à Hope pour RCP4.5 variait de -5 % à 38 %, avec une augmentation médiane de 12 %.

Les lignes directrices de pratique professionnelle (Professional Practice Guidelines) de l'Association des ingénieurs professionnels et des géoscientifiques de la Colombie-Britannique tirées du document « *Legislated Flood Assessments in a Changing Climate in BC* » (APEGBC, 2012) recommandent que les praticiens appliquent un facteur de 10 % aux estimations des crues de conception pour les travaux de protection basés sur des données historiques afin de tenir compte de l'impact des

changements climatiques, à moins que des informations plus détaillées sur les changements climatiques soient disponibles.

Selon l'information obtenue dans le cadre des projets liés à cette étude de cas et les travaux récents de Shrestha et coll. (2015), du PCIC et les lignes directrices APEGBC, il semblerait approprié que les autorités provinciales reconnaissent formellement les effets des changements climatiques sur les débits de pointe du Fleuve Fraser et considèrent comment et quand réviser le profil officiel de la crue de conception pour le Bas Fraser afin de fournir les informations nécessaires à la conception des digues et à l'établissement des directives l'aménagement du territoire pour les zones à risque d'inondation.

La modélisation et la cartographie des plaines inondables ont été menées pour évaluer la vulnérabilité liée aux inondations à l'échelle régionale. Elle comprend un certain nombre de limitations touchant les données et les sources d'incertitude. Par conséquent, il est recommandé que la modélisation hydraulique et la cartographie ultérieure de l'étendue et de la profondeur des inondations soient complétées par des analyses plus détaillées et des mises à jour périodiques. L'incertitude associée à l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre n'est qu'un facteur dans la projection des effets des changements climatiques sur les débits de crue. Un certain nombre d'autres incertitudes peuvent modifier les résultats. Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (NHC, 2014a) a recommandé que plusieurs éléments soient pris en compte dans les analyses futures, y compris :

- des tests de la précision du modèle hydrologique du taux d'infiltration variable, en particulier pour les événements de débit élevés
- l'analyse des changements de couverture terrestre, tels que ceux associés aux infestations de coléoptères ou aux incendies répandus (et comment cela influence à leur tour l'infiltration et le ruissellement)
- l'analyse des effets des changements climatiques sur les affluents du Fleuve Fraser.

⁵ Le scénario de « changements climatiques modérés » correspond à un débit de pointe de 19 900 m³/s à Hope, soit 17 % de plus que le débit de crue record de 17 000 m³/s de 1894, qui est actuellement la norme provinciale de conception pour le Bas Fraser.



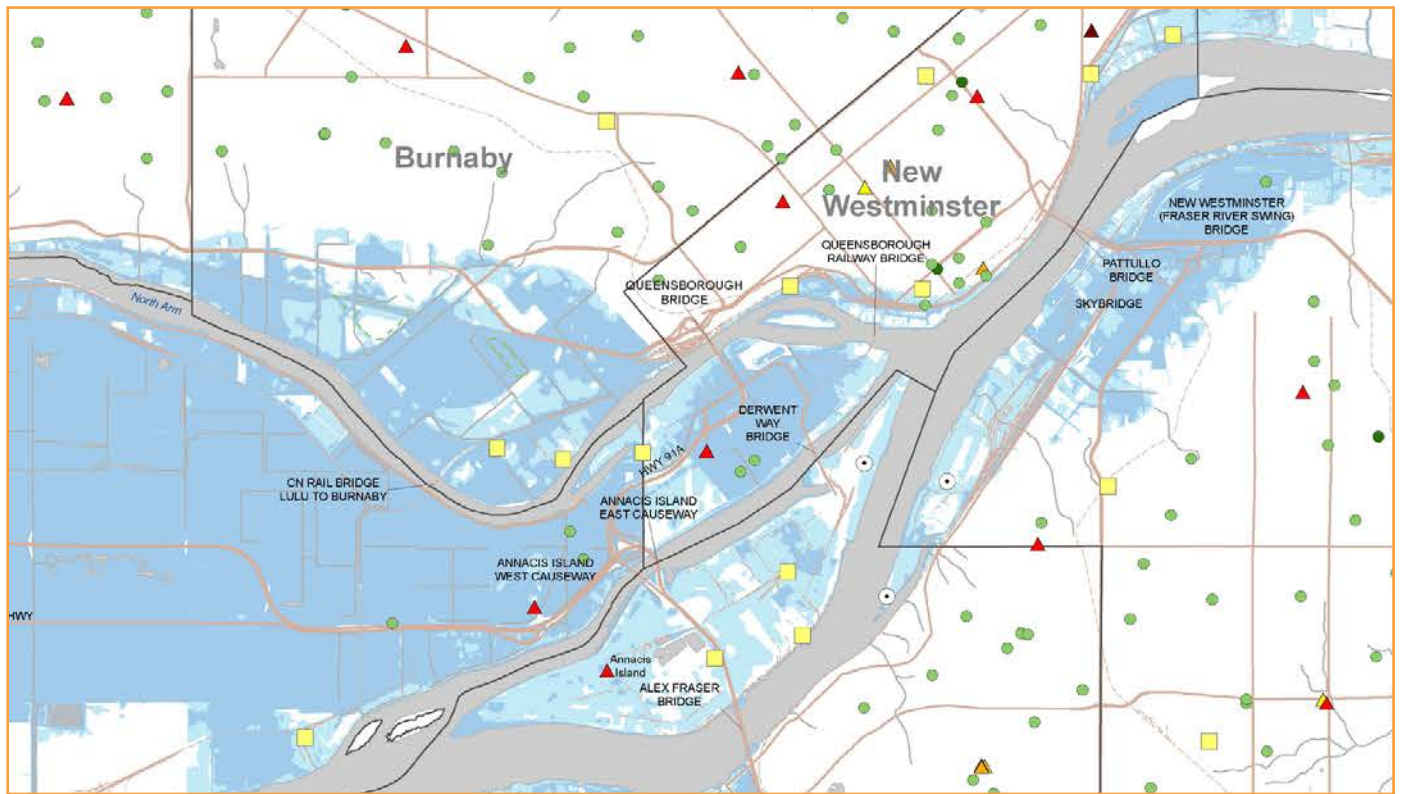
4. Cartographie des plaines inondables pour l'évaluation de la vulnérabilité des basses terres continentales

Comme on l'a noté, la modélisation des inondations décrite dans cette étude de cas n'a pas pour but d'élaborer une cartographie détaillée des plaines inondables pour la désignation officielle des plaines inondables, de nouveaux profils de conception de digue ou des niveaux de construction au-dessus des inondations. L'objectif de la cartographie était d'aider les décideurs et le public à mieux comprendre l'importance des changements climatiques sur les risques d'inondation dans les basses terres continentales de la Colombie-Britannique, de procéder à une évaluation régionale des vulnérabilités liée aux inondations et de soutenir l'élaboration d'une stratégie régionale de gestion des inondations. L'estimation plausible des pertes monétaires potentielles était un objectif principal de la cartographie des plaines inondables, en plus d'explorer d'autres impacts sociaux, économiques et environnementaux.

Comme il est indiqué à la section 1, la cartographie des plaines inondables a été produite pour quatre scénarios : les inondations côtières actuelles et pour l'an 2100 et les inondations fluviales actuelles et pour l'an 2100 du Bas Fraser. Cette section décrit brièvement les données d'entrée, certaines lacunes relatives aux données et d'autres aspects de la méthodologie associée à la cartographie de l'étendue et de la profondeur des inondations.

L'estimation crédible des pertes monétaires potentielle était un objectif principal de la cartographie des plaines inondables, en plus d'explorer d'autres impacts sociaux, économiques et environnementaux.

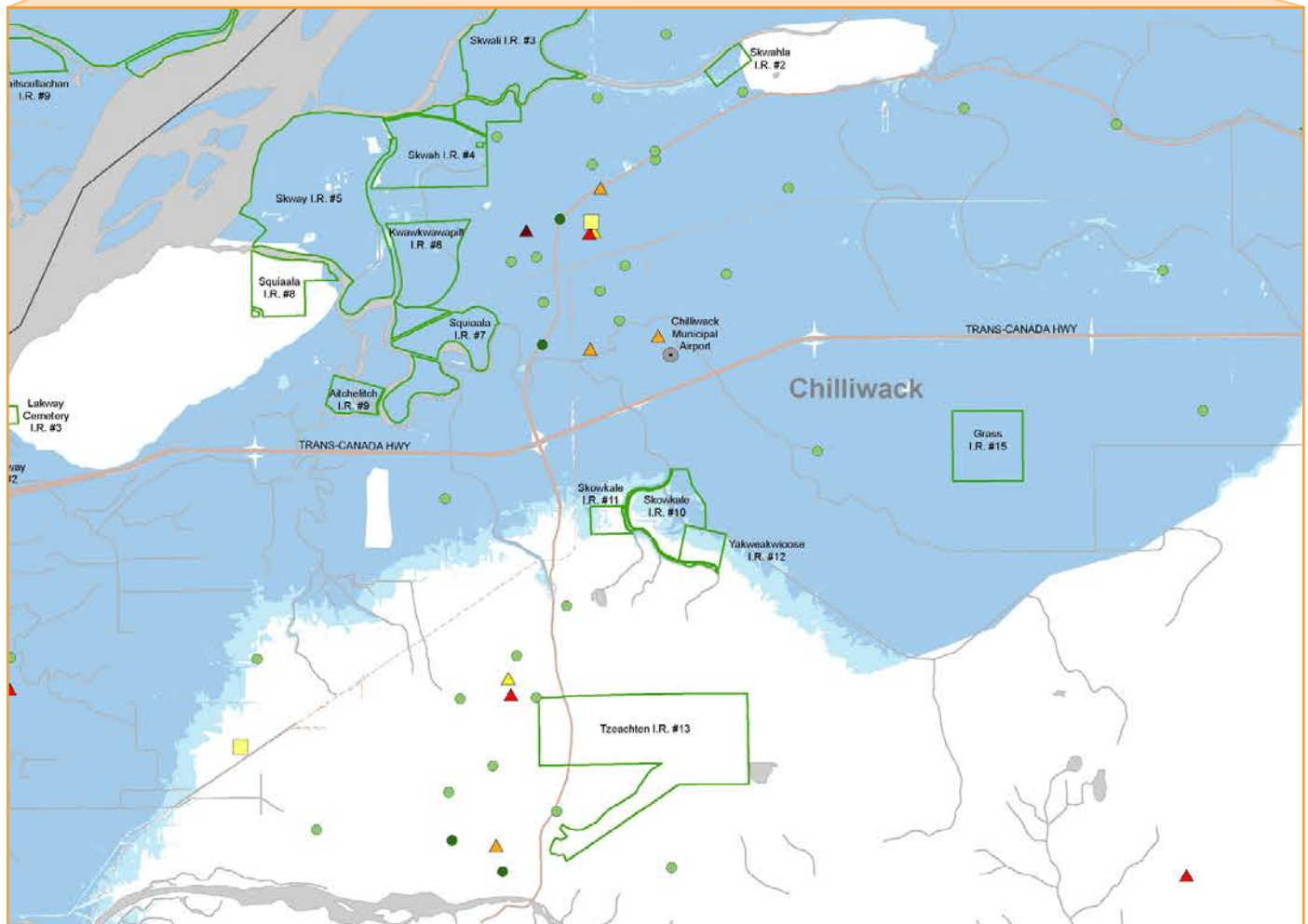
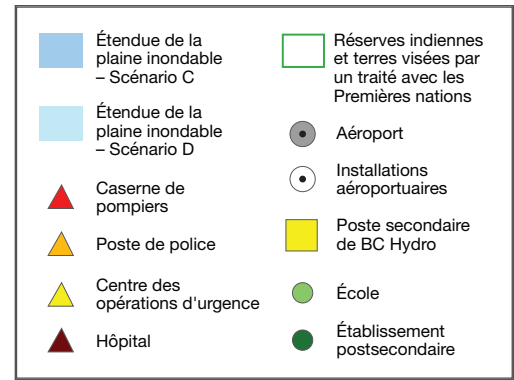
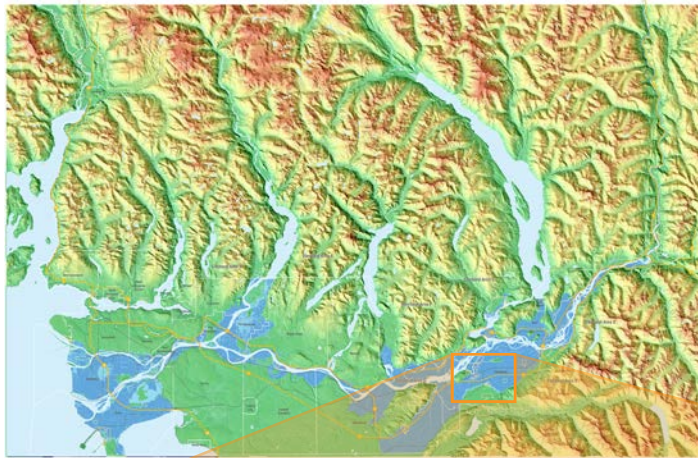




	Étendue de la plaine inondable - Scénario A		Réserves indiennes et terres visées par un traité avec les Premières nations
	Étendue de la plaine inondable - Scénario B		Aéroport
	Caserne de pompiers		Installations aéroportuaires
	Poste de police		Poste secondaire de BC Hydro
	Centre des opérations d'urgence		École
	Hôpital		Établissement postsecondaire

Carte:1 Étendue des inondations pour les scénarios d'inondation côtières (actuel et pour l'an 2100)

La carte 1 montre l'étendue des plaines inondables à Burnaby, à New Westminster et à l'île Annacis dans le Delta pour les scénarios d'inondation côtière A (actuel - bleu foncé) et B (an 2100 - bleu pâle) pour les régions des basses terres continentales de la C.-B. qui sont vulnérables aux inondations côtières. L'infrastructure de la région comprend des casernes de pompiers, des écoles et des postes électriques secondaires de BC Hydro. Voir la carte 3 pour un aperçu des profondeurs d'eau des plaines inondables dans la région-échantillon.



Carte 2: Étendue des inondations pour les scénarios d'inondation du Fleuve Fraser (actuel et pour l'an 2100)

La carte 2 montre l'étendue projetée des plaines inondables dans un secteur de Chilliwack et dans les collectivités des Premières nations de Skwah, Skway, Kwaw-kwaw-Apilt, Squiaala et Aitchelitch pour les scénarios de crue du Fleuve Fraser C (actuel - bleu foncé) et D (an 2100 - bleu pâle). Les inondations auront une incidence sur des infrastructures essentielles, y compris l'aéroport municipal, l'autoroute transcanadienne, les casernes de pompiers, les postes de police et un poste électrique secondaire de BC Hydro. La profondeur d'eau projetée des plaines inondables est indiquée dans la carte 4.

4.1 Données topographiques

Des données topographiques provenant de divers paliers de gouvernement ont été obtenues et traitées, simplifiées et intégrées dans un modèle altimétrique numérique des plaines dans la région des basses terres continentales.⁶ Aucune donnée topographique détaillée n'était disponible pour certains secteurs et certaines collectivités touchés. Des sociétés d'État, des organisations à but non lucratif et des données du modèle altimétrique numérique canadien de GéoGratis⁷ (de résolution inférieure) ont permis de combler certaines lacunes des données topographiques. La précision limitée de certains secteurs de la topographie de base pour certaines zones a ajouté de l'incertitude à la cartographie de l'étendue des inondations et de leur profondeur.

4.2 Cotes d'inondation

The four flood scenarios were adopted from the report produced Les quatre scénarios d'inondation ont été adoptés à partir du rapport produit par Kerr Wood Leidal (2015), Lower Mainland Flood Management Strategy – Analysis of Flood Scenarios.⁸

Pour les scénarios d'inondation côtière, les cotes d'inondation projetées ont été appliquées en supposant une étendue d'eau horizontale. On a supposé que tout le sol situé à un niveau inférieur au niveau d'inondation projetée était inondé. On a également supposé que toutes les digues dans toute la région seraient inefficaces et que la submersion serait presque instantanée. Des efforts considérablement plus importants seraient nécessaires pour effectuer des analyses de rupture de digue spécifiques et des évaluations de risques détaillées.

Dans la plupart des secteurs côtiers, il faudrait probablement un certain nombre d'heures avant que la plaine soit entièrement inondée. Au cours d'une marée descendante, l'écoulement se déplacerait dans une brèche dans la direction opposée et l'eau de la plaine inondable serait partiellement drainée. Une évaluation précise de l'inondation nécessiterait une modélisation 2D détaillée. Le présent degré d'analyse, n'était pas destiné à l'évaluation des scénarios de rupture de digue spécifiques. Ceci est proposé comme une étape subséquente dans le développement de la stratégie de gestion des inondations des basses terres continentales.

La modélisation hydraulique actuelle du Bas Fraser suppose que les débits de crue sont contenus par les digues existantes. Cette hypothèse est généralement conservatrice (c'est-à-dire qu'elle surestime potentiellement les cotes d'inondation) lors de l'application des niveaux d'eau calculés pour évaluer l'étendue potentielle de la plaine inondable. Au cours d'une inondation réelle, qui entraînerait la rupture d'une digue, l'eau serait transportée et stockée sur la plaine inondable et cela pourrait réduire les niveaux d'eau dans le chenal du fleuve et dans les zones inondées. Cet effet de confinement par des digues a été observé sur de nombreuses rivières, et cela explique pourquoi les niveaux d'inondation observés en 1894 étaient plus faibles dans de nombreuses régions que dans les conditions actuelles d'endiguement. Toutefois, dans certaines situations, la formation de plans d'eau derrière les digues peut provoquer des niveaux d'inondation plus élevés que dans le canal du fleuve.

À la plupart des emplacements, les niveaux d'inondation des rivières ont été projetés perpendiculairement à la plaine inondable, sauf dans les zones où la cartographie des plaines inondables était disponible, zones pour lesquelles on a utilisé les isolignes cartographiques pour guider les projections des cotes

d'inondation. Dans ce cas, on n'a pas tenu compte de la présence de digues et les niveaux d'inondation ont été projetés directement à travers la plaine inondable.

Un certain nombre de limitations sont associées aux niveaux d'inondation cartographiés⁹ :

- Les niveaux d'inondation côtière incluent une marge de 0,6 m pour tenir compte des incertitudes liées aux conditions locales (ex : la configuration du vent et des vagues, l'affaissement). Cette marge pourrait être dépassée dépendamment de la géométrie locale du rivage, de l'exposition au vent et aux vagues et d'autres facteurs.
- L'intensité et la fréquence des orages pourraient augmenter en raison des changements climatiques. Cependant, il y a beaucoup d'incertitude par rapport à cet aspect sur les risques futurs d'inondation côtière. Leur évaluation ne figurait pas dans les objectifs de ce projet.
- Le scénario d'inondation côtière pour l'année 2100 intègre un rehaussement du niveau de la mer de 1 m selon les directives adoptées par la province (B.C. Ministry of Environment, 2011).
- Les niveaux d'inondation côtière ont été projetés horizontalement, en supposant l'absence de digues. Les digues protègent de nombreuses zones côtières, bien qu'elles ne répondent généralement pas aux normes provinciales.
- Pour le scénario d'inondation fluviale future (2100), les changements potentiels touchant la couverture du sol (causés par exemple par des infestations de coléoptères ou des incendies couvrant de grandes superficies) n'ont pas été pris en compte, ce qui a entraîné une sous-estimation du niveau d'inondation associé à l'augmentation du ruissellement.
- L'inefficacité des digues a été supposée pour l'évaluation de la vulnérabilité, mais les niveaux d'inondation des rivières sont associés aux débits confinés entre les digues. Des isolignes d'inondation simplifiées ont été utilisées pour projeter le niveau du fleuve à travers la plaine inondable sans atténuation et on a supposé que toutes les terres derrière les digues situées à une élévation inférieure aux niveaux d'inondation étaient submergées, ce qui ne serait peut-être pas le cas.
- La simultanéité des inondations des affluents du Fleuve Fraser n'a pas été prise en considération, bien que des incidents d'inondation simultanée puissent survenir.
- Il existe des limites à la précision de la modélisation hydraulique unidimensionnelle. L'hypothèse concernant les digues contenant des débits de crue n'est pas réaliste, à moins que des améliorations importantes ne leur soient apportées. Un modèle 2D intégrant la modélisation de rupture des digues serait plus précis.
- Les géométries du canal et de la plaine inondable ont changé dans le passé et continueront à changer. Au cours des inondations majeures, il peut se produire des actions importantes d'affouillement, de sédimentation et d'avulsions, ce qui modifie le profil de la surface de l'eau. Ces changements n'ont pas été pris en compte dans l'analyse.

⁶ Pour plus de détails sur les sources de données, voir NHC (2016), Appendix C, Table C2.

⁷ Lien des données du modèle altimétrique numérique à GéoGratis : <http://geogratiss.gc.ca/api/fr/nrcan-rncan/ess-sst/c40acfb-a-c722-4be1-862e-146b80be738e.html>.

⁸ Voir tableau 1.

⁹ Pour plus de détails au sujet des hypothèses de départ et des limitations, voir NHC (2016), Sections 2.3, 2.4.4, 3.2.4, 3.3 et 6.1.1 et Appendix C.



4.3 Procédures de cartographie

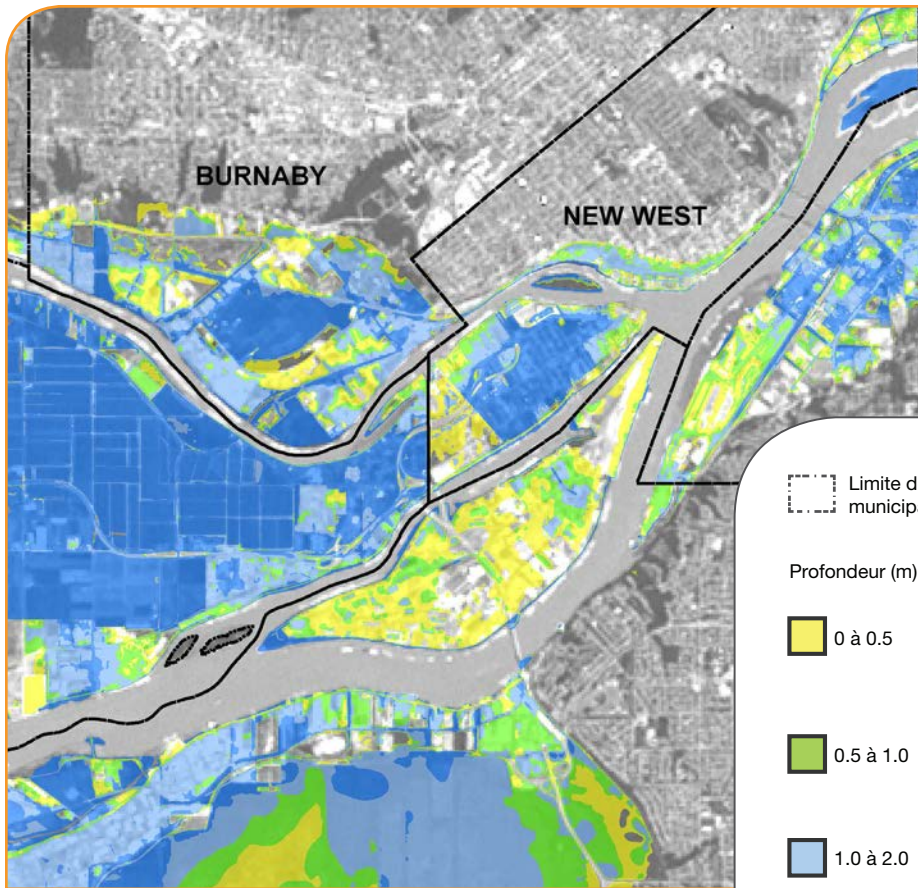
Des surfaces de cotes d'inondation ont été créées pour chaque scénario d'inondation à l'aide d'un RTI (réseau triangulé irrégulier) dans le logiciel ArcGIS. Les profondeurs d'inondation ont été déterminées en soustrayant le modèle altimétrique numérique aux surfaces des niveaux d'inondation. De même, les polygones des étendues des inondations ont été calculés à partir des surfaces des profondeurs d'inondation. Les zones de stockage isolées produites par cette technique qui, en réalité ne serait pas remplies d'eau suite au débordement du cours d'eau, n'ont pas été retirées de la cartographie. Typiquement, des méthodes plus précises de modélisation et de cartographie seraient utilisées pour l'étude des inondations locales. Les méthodes et les généralisations utilisées dans cette étude de niveau général ne seraient pas appropriées pour une évaluation détaillée.

Northwest Hydraulic Consultants Ltd. a adapté la norme nationale japonaise (EXCIMAP 2007) pour les catégories de profondeur avec certaines modifications pour les cartes des profondeurs d'inondation. Les classes de profondeur correspondent aux dangers potentiels pour les structures, l'électricité, les véhicules, les personnes et l'évacuation. Les classes de profondeurs cartographiées sont présentées dans le tableau 2.

Le parcours de l'eau à travers la plaine inondable n'a pas été modélisé et les routes, les chemins de fer et les autres obstructions n'ont pas été considérés. Les vitesses d'inondation n'ont pas été modélisées ou cartographiées dans le cadre de cette étude. Les vitesses ainsi que les profondeurs d'inondation, influenceront le degré des risques d'inondation ainsi que les dommages et les pertes connexes.

Tableau 2 : Catégories de profondeur pour la cartographie des plaines inondables

Profondeur	Type de risque
0 à 0,5 m	La plupart des maisons sont exemptes d'eau; marcher ou conduire dans l'eau en mouvement peut être risquée; les sous-sols et les stationnements souterrains peuvent être inondés; ce qui peut entraîner des évacuations.
0,5 à 1,0 m	Il y a de l'eau sur le plancher des rez-de-chaussée, les sous-sols et les stationnements souterrains sont inondés, ce qui peut entraîner des évacuations; il y a des pannes d'électricité; les véhicules sont souvent emportés hors de la route.
1,0 à 2,0 m	Le plancher du rez-de-chaussée est inondé; évacuation des résidents
2,0 à 5,0 m	Le premier étage et souvent le toit sont recouverts d'eau; évacuation des résidents
> 5,0 m	Le premier étage et souvent le toit sont couverts par l'eau; évacuation des résidents.



Carte 3 : Profondeur d'eau dans le scénario d'inondation côtière (an 2100)

La carte 3 montre la profondeur projetée des eaux d'inondation selon le scénario B (inondation côtière – an 2100) pour le même secteur de New Westminster et de Delta que celui montré dans la carte 1.

--- Limite de la municipalité

▭ Réserves indiennes et terres visées par un traité avec les Premières nations

Profondeur (m)

0 à 0.5

La plupart des maisons sont exemptes d'eau; marcher ou conduire dans de l'eau en mouvement peuvent être dangereuses; les sous-sols et les stationnements souterrains peuvent être inondés, ce qui peut entraîner des évacuations.

0.5 à 1.0

Eau au rez-de-chaussée; les sous-sols et les stationnements souterrains sont inondés; ce qui peut entraîner des évacuations; il y a des pannes d'électricité; les véhicules sont souvent emportés hors de la route.

1.0 à 2.0

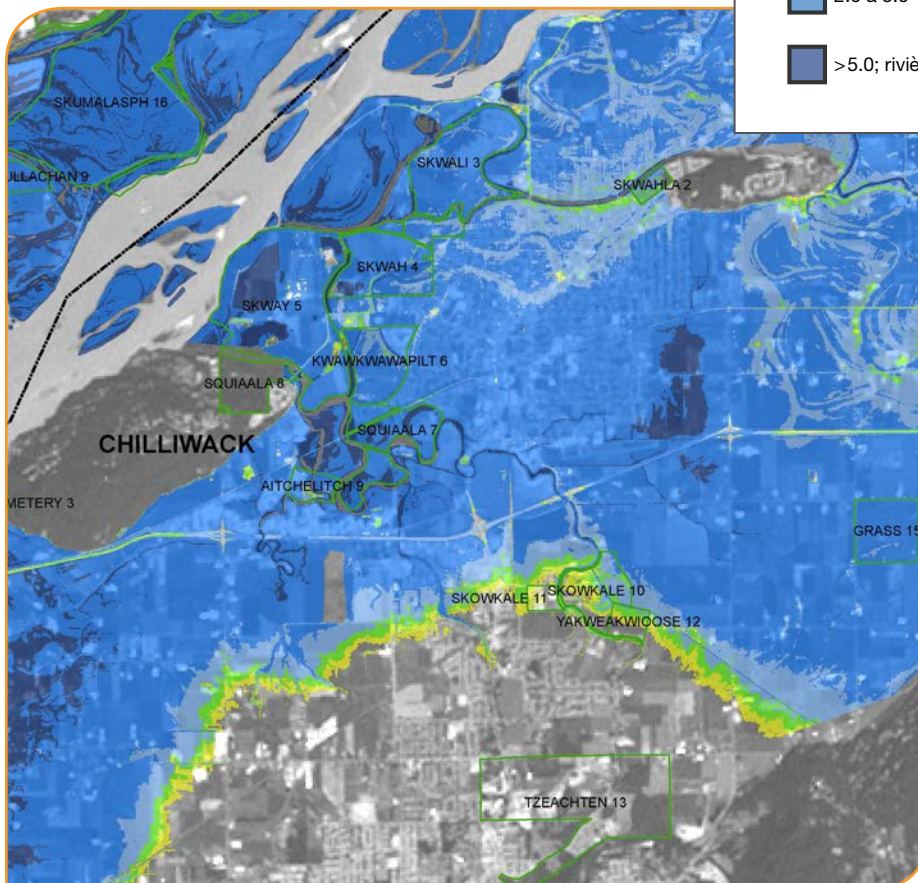
Le plancher du rez-de-chaussée est inondé; évacuation des résidents.

2.0 à 5.0

Le premier étage et souvent le toit sont recouverts d'eau; évacuation des résidents.

>5.0; rivière

Le premier étage et souvent le toit sont recouverts d'eau; évacuation des résidents.



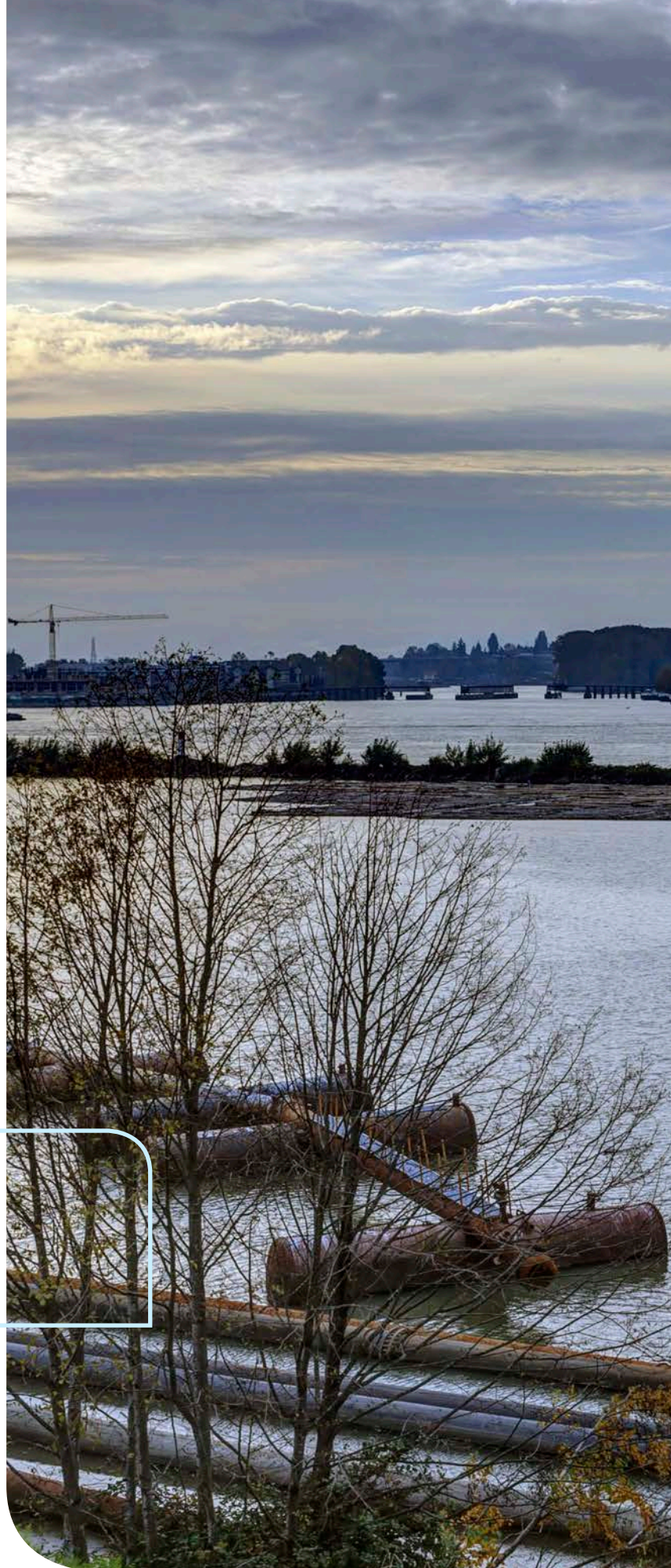
Carte 4 : Profondeur d'eau dans le scénario d'inondation par le Fleuve Fraser (an 2100)

La carte 4 montre la profondeur projetée des eaux d'inondation selon le scénario D (inondation par le Fleuve Fraser – an 2100) pour le même secteur de Chilliwack que celui montré dans la carte 2.

4.4 Sommaire des résultats

Voici les principales conclusions de cette étude :

- En raison de la topographie des basses terres continentales, les deux scénarios d'inondation future qui intègrent les effets des changements climatiques montrent des augmentations relativement mineures de l'étendue des plaines inondables par rapport aux conditions actuelles. Cependant, les changements climatiques augmenteront considérablement la profondeur des inondations et, en particulier, leur fréquence.
- L'inondation fluviale du Bas Fraser touche une zone trois fois supérieure à celle des scénarios d'inondation côtière équivalents.
- L'étendue actuelle des inondations du Bas Fraser et des inondations côtières soulignent la nécessité d'entreprendre des efforts d'atténuation des inondations dès que possible.
- La cartographie a facilité l'estimation des pertes économiques totales associées aux bâtiments, à l'agriculture, à l'infrastructure et à l'interruption du transport maritime de marchandises pour les quatre scénarios d'inondation résumés dans NHC (2016). Les pertes économiques ont augmenté de manière significative pour les scénarios de l'an 2100, principalement en raison de l'augmentation de la profondeur des inondations.



5. Conclusions, leçons retenues et recommandations

5.1 Conclusions

Les cartes des plaines inondables fournissent généralement le portrait d'une rivière et de sa plaine inondable au moment où les cartes sont préparées. Il est difficile de prédire comment le canal et la plaine inondable du Bas Fraser changeront avec le temps. La précision des cartes dépend également des outils disponibles au moment de la cartographie (ex : méthodes d'arpentage, modélisation numérique). Les cartes des plaines inondables doivent être mises à jour au fur et à mesure que les outils s'améliorent et que les conditions physiques et météorologiques changent. Dans un climat changeant, cela devient encore plus critique, car les cartes doivent devenir plus dynamiques et être facilement mises en fonction des scénarios d'émissions actualisés, des résultats du modèle climatique mondial et des nouvelles informations.

Les progrès récents en climatologie offrent la possibilité de prévoir les conditions d'inondation futures. Cette étude de cas illustre une méthode pour tenir compte des effets des changements climatiques sur les débits de pointe des crues et le rehaussement du niveau de l'océan. Il est important de garder à l'esprit que les cartes d'étude préparées pour les deux scénarios d'inondation actuel et les deux scénarios pour l'an 2100 ne sont pas des cartes officielles des plaines inondables. Le but est d'identifier les vulnérabilités liées aux inondations actuelles et futures, en supposant que le chenal et la plaine inondable du fleuve ne changent pas. Les résultats fournissent une image plausible des inondations actuelles et futures et permettent d'estimer les pertes économiques associées afin de démontrer l'importance d'élaborer une stratégie de gestion des inondations pour les basses terres continentales de la Colombie-Britannique.

Sur la base des estimations mondiales du rehaussement du niveau de la mer et des débits de crue du Fleuve Fraser projetés (par exemple, vers l'an 2100), la cartographie des plaines inondables estimant les conditions futures peut être préparée. Cependant, ces cartes ne resteront pas valides jusqu'à l'an 2100, car les projections climatiques ainsi que la morphologie du chenal/de la plaine inondable sont susceptibles de changer. Des mises à jour régulières de la cartographie seront nécessaires.

5.2 Leçons retenues

L'impact le plus important des changements climatiques sur les inondations dans les basses terres continentales résultera de la fréquence accrue d'inondation côtière et fluviale majeure. D'ici la fin du siècle, selon le scénario de changements climatiques intenses, la plaine inondable de récurrence de 50 ans du Fleuve Fraser pourrait avoir la même ampleur (c.-à-d. le même débit de pointe) que la crue de conception actuelle, correspondant à la crue historique record de 1894, qui a actuellement une récurrence de 500 ans. La réévaluation de la crue de conception, intégrant les effets des changements climatiques, sera clairement nécessaire.

Cette étude de cas (ainsi que les projets qui l'étayent et les études de références) conclut que les débits de pointe extrêmes du Fleuve Fraser augmenteront vraisemblablement en raison des changements climatiques d'ici l'an 2100. Les effets des changements climatiques sur l'augmentation des débits de pointe et sur le rehaussement du niveau de la mer (et de l'accroissement de la fréquence des inondations), exacerbent les risques d'inondation déjà importants le long du Bas Fraser. Les répercussions d'inondations de plus grande ampleur et plus fréquentes dans les basses terres continentales de la C.-B. sont critiques. Un plan régional pour une gestion efficace des inondations dans toute la région est essentiel. Une large gamme d'options d'atténuation des inondations sera examinée dans le cadre de la stratégie de gestion des inondations des basses terres continentales, telles que l'amélioration des digues et de l'infrastructure connexe, le réaligement des digues et ses inconvénients, la gestion de l'aménagement du territoire dans les plaines inondables, le stockage/détournement en amont, la gestion des sédiments, le verdissement des berges et d'autres innovations.

5.3 Recommandations

Il est recommandé de préparer des cartes officielles des plaines inondables plus précises pour le Bas Fraser et la côte sud en utilisant les dernières technologies disponibles et des informations à jour, et d'y inclure les effets des changements climatiques.

Pour élaborer et appliquer des cartes officielles des plaines inondables plus précises qui tiennent compte des effets des changements climatiques, les trois activités clés suivantes sont recommandées :

- a) examiner et hiérarchiser les limites et les incertitudes des données
- b) entreprendre des recherches en continu pour remédier aux limites et aux incertitudes touchant les données essentielles
- c) envisager l'élaboration et l'adoption de profils provisoires de la crue de conception pour les risques d'inondations fluviale et côtière du Bas Fraser, en tenant compte des effets des changements climatiques, pour la cartographie officielle des plaines inondables, l'aménagement du territoire et l'amélioration de la protection contre les inondations.

a) Examiner et hiérarchiser les limites et les incertitudes relatives aux données

Cette étude de cas reposait sur une méthodologie de pointe et bien adaptée pour projeter les effets des changements climatiques sur les débits de crue. Toutefois, en raison de nombreuses limites et incertitudes relative aux données, un niveau de confiance faible est accordé aux projections numériques des changements relatifs à l'ampleur ou à la fréquence des inondations résultant des changements climatiques (Kundewicz et coll., 2013). Cela est particulièrement difficile pour un bassin versant aussi vaste et complexe que celui du Fleuve Fraser. Des exemples des limites et des incertitudes relatives aux données comprennent les émissions réelles de gaz à effet de serre dans le futur, les effets réels des émissions sur la température, les précipitations, l'hydrologie des cours d'eau et le niveau de la mer; l'élévation relative du niveau de la mer, la prise en compte du soulèvement et de l'affaissement localisés; les niveaux d'inondation côtière spécifiques, la prise en compte de la configuration du vent et des effets des vagues; et la topographie. La précision des analyses futures devrait augmenter au fur et à mesure que de nouvelles données sur les changements climatiques réels et de ses effets sur les débits de crue des cours d'eau et les niveaux de l'océan seront disponibles et, à mesure que des études locales plus détaillées seront entreprises.

b) Entreprendre des recherches en continu pour remédier aux limites et aux incertitudes des données essentielles

En raison des nombreuses sources d'incertitude liées aux projections des changements climatiques et à l'influence des changements climatiques sur les risques d'inondation, il est justifié d'effectuer des examens et des mises à jour périodiques afin d'intégrer les nouvelles connaissances scientifiques à la modélisation et à la cartographie des plaines inondables, à l'évaluation des vulnérabilités liées aux inondations, aux politiques et aux pratiques de gestion des inondations ainsi qu'à l'adaptation au climat.

Il est recommandé que la modélisation et la cartographie actuelles soient revues et mises à jour au fur et à mesure que de nouvelles informations seront disponibles, incluant, sans s'y limiter, les mises à jour sur les projections des émissions de gaz à effet de serre et l'évolution de la climatologie concernant les changements projetés de la température, des précipitations, de l'hydrologie du bassin versant et du rehaussement du niveau de la mer. La précision de la cartographie de l'étendue et de la profondeur des inondations pourrait être améliorée par l'utilisation de données topographiques plus précises pour certains secteurs de la région.

La plaine inondable du Bas Fraser est complexe sur le plan hydraulique; les niveaux d'inondation à un endroit dépendent non seulement des débits du fleuve et des conditions de l'océan, mais aussi des brèches des digues et du degré d'inondation dans d'autres zones inondables. En raison de la simplification des hypothèses de départ, les profondeurs et les étendues des plaines inondables réelles peuvent être inférieures ou supérieures à celles des scénarios d'inondation modélisés. Il est recommandé d'effectuer une modélisation hydraulique plus détaillée des zones inondables, y compris des simulations de rupture de digues, afin d'élaborer des estimations plus précises de l'étendue et de la profondeur des inondations dans les plaines inondables.

Il est recommandé d'effectuer des recherches ciblées afin de mieux comprendre les changements prévus touchant la fréquence et l'ampleur des ondes de tempête côtière et des conditions orageuses. En outre, la prise en compte des circonstances locales concernant la subsidence et le soulèvement du sol, ainsi que la géométrie du littoral et l'exposition au vent et aux vagues amélioreraient la précision de la cartographie des plaines inondables pour les ondes de tempête côtière. La probabilité conjointe de coïncidence avec les hautes marées, les déferlements de tempêtes et les dénivellations de l'eau dues au vent et aux vagues devrait être considérée.

c) Envisager l'élaboration et l'adoption de profils provisoires de la crue de conception pour les risques d'inondation du Bas Fraser et des secteurs côtiers en tenant compte des effets des changements climatiques, pour réaliser la cartographie officielle des plaines inondables, gérer l'aménagement du territoire et améliorer la protection contre les inondations

Il est important que les autorités provinciales et locales reconnaissent officiellement les effets projetés des changements climatiques sur les débits de pointe du Fleuve Fraser et les niveaux de l'océan et qu'elles envisagent d'autres recherches scientifiques et appliquées afin d'identifier comment et quand réviser la norme provinciale et la mise en œuvre par le gouvernement local du profil de conception pour le Bas Fraser et les secteurs côtiers. Cette approche pourrait influencer la conception des digues, les lignes directrices sur l'aménagement du territoire pour les zones à risque d'inondation et la cartographie officielle détaillée des plaines inondables pour les basses terres continentales.¹⁰

Il peut être approprié d'adopter des profils provisoires de la crue de conception car les limites et les incertitudes des données ne seront jamais complètement résolues. Entre-temps, des décisions relatives à l'aménagement des plaines inondables et la mises à niveau de l'infrastructure seront nécessaires. Il est recommandé de renforcer la flexibilité de l'adaptation à venir au fur et à mesure que des améliorations sont apportées à la protection contre les inondations et que des politiques de gestion des inondations sont adoptées à court terme. Cela permettra aux responsables de l'élaboration de politiques et aux professionnels de la gestion des inondations de mieux s'adapter à l'évolution des risques d'inondation à mesure que de nouvelles recherches seront disponibles et que les incertitudes seront réduites.

¹⁰ Voir aussi NHC (2016), Sections 6 et 7.





6. Références

- Association of Professional Engineers and Geoscientists of British Columbia (APEGBC.-B.). 2012. *Professional practice guidelines – legislated flood assessments in a changing climate in BC* Préparé pour le B.C. Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations, Victoria, C.-B. <https://www.apeg.bc.ca/getmedia/18e44281-fb4b-410a-96e9-cb3ea74683c3/APEGBC-Legislated-Flood-Assessments.pdf.aspx>.
- Ausenco-Sandwell. 2011. *Climate change adaption guidelines for sea dikes and coastal flood hazard land use*. Préparé pour le B.C. Ministry of Environment., Victoria, C.-B.
- B.C. Ministry of Environment. 2011. *Climate change adaption guidelines for sea dikes and coastal flood hazard land use*. Victoria, C.-B. http://www.env.gov.bc.ca/wsd/public_safety/flood/fhm-2012/draw_report.html#3
- EXCIMAP. 2007. *Handbook on good practices for flood mapping in Europe*. [en ligne] Disponible à http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/flood_atlas/index.htm (dernier accès le 15 mai 2013) [en anglais seulement]
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 2014. *Changements climatiques 2014, Rapport de synthèse, Résumé à l'intention des décideurs*. [en ligne] Disponible à : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM_fr.pdf (Dernier accès le 27 janvier 2017).
- Kerr Wood Leidal. 2015. *Lower Mainland flood management strategy – analysis of flood scenarios*. Préparé pour le Fraser Basin Council, Vancouver, B.C.
- Kundewicz, A.W., S. Kanae S.I. Seneviratne, J. Handmer, N. Nicholls, P. Peduzzi, R. Mechler, L.M. Bouwer, N. Arnell, K. Mach, R. Muir-Wood., G.R. Brakenridge, W. Kron, G. Benito, Y. Honda, K. Takahashi. et B. Sherstyukov. 2013. *Flood risk and climate change : global and regional perspectives*. *Hydrological Sciences Journal* 59(1) :1–28. DOI :10.1080/02626667.2013.857411.
- Mazzotti, S., A. Lambert, M. Van der Kooij et A. Mainville. 2009. *Impact of anthropogenic subsidence on relative sea level rise in the Fleuve Fraser delta*. *Geology* 37 :771–774. <http://geology.gsapubs.org/content/37/9/771>
- Murdock, T.Q. et D.L. Spittlehouse. 2011. *Selecting and using climate change scenarios for British Columbia*. Pacific Climate Impacts Consortium, Université de Victoria, Victoria, C.-B. <http://www.pacificclimate.org/sites/default/files/publications/Murdock.ScenariosGuidance.Dec2011.pdf>
- Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (NHC) 2006. *Lower Fraser hydraulic model*. Final report. Préparé pour le Fraser Basin Council, Vancouver B.C. http://www.env.gov.bc.ca/wsd/public_safety/flood/pdfs_word/2006nhc_fraser_flood_profile.pdf
- Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (NHC) 2008a. *Fleuve Fraser hydraulic model update*. Final report. Préparé pour le B.C. Ministry of Environment., Victoria, C.-B.
- Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (NHC) 2008b. *Comprehensive review of Fleuve Fraser River at Hope. Flood hydrology and flows – scoping study*. Final report. Préparé pour le B.C. Ministry of Environment., Victoria, C.-B. http://www.env.gov.bc.ca/wsd/public_safety/flood/pdfs_word/review_fraser_flood_flows_hope.pdf
- Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (NHC) 2014a. *Simulating the effects of sea level rise and climate change on Fleuve Fraser River Flood Scenarios*. Final report 300305. Préparé pour le B.C. Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations, Victoria, C.-B. http://www.env.gov.bc.ca/wsd/public_safety/flood/pdfs_word/Simulating_Effects_of_Sea_Level_Rise_and_Climate_Change_on_Fraser_Flood_Scenarios_Final_Report_May-2014.pdf
- Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (NHC) 2014b. *City of Vancouver coastal flood risk assessment*. Final report. Préparé pour la ville de Vancouver, Vancouver, C.-B. http://vancouver.ca/files/cov/CFRA-Phase-1-Final_Report.pdf
- Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (NHC) 2016. *Lower Mainland flood management strategy. Project 2 : regional assessment of flood vulnerability*. Final report. Préparé pour le Fraser Basin Council, Vancouver B.C. http://www.fraserbasin.bc.ca/_Library/Water_Flood_Strategy/Regional_Assessment_of_Flood_Vulnerability_April_25_2016_web.pdf
- Shrestha, R. R., M.A. Schnorbus, A.T. Werner et A.J. Berland. 2012. *Modeling spatial and temporal variability of hydrologic impacts of climate change in the Fleuve Fraser River basin, British Columbia, Canada*. *Hydrological Processes* 26 :1840–1860. DOI :10.1002/hyp.9283.
- Shrestha, R.R., M.A. Schnorbus, A.J. Cannon et F.W. Zwiens. 2015. *Simulating the effects of climate change on Fleuve Fraser River Flood Scenario – Phase 2*. Préparé pour le B.C. Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations, Victoria, C.-B. http://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/integrated-flood-hazard-mgmt/simulating_effects_of_cc_on_fraser_flood_scenarios_phase_2_final_26-may-15.pdf
- Sweet, W.V., R.E. Kopp, C.P. Weaver, J. Obeysekera, R.M. Horton, E.R. Thieler et C. Zervas. 2017. *Global and regional sea level rise scenarios for the United States*. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 083. https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/techrpt83_Global_and_Regional_SLR_Scenarios_for_the_US_final.pdf



**ANNEXE C : CARTOGRAPHIE DES PLAINES INONDABLES ET CHANGEMENTS
CLIMATIQUES – ANALYSE DE L'ÉTUDE DE CAS DE LA RIVIÈRE WATERFORD**



CBCL LIMITED
Consulting Engineers

CARTOGRAPHIE DES PLAINES INONDABLES ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Analyse de l'étude de cas de la rivière Waterford

Client : Ressources Naturelles Canada
Consultant: CBCL Limited
Date: 31 mars 2017



CBCL LIMITED
Consulting Engineers

CARTOGRAPHIE DES PLAINES INONDABLES ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Analyse de l'étude de cas de la rivière Waterford

Client : Ressources Naturelles Canada
Consultant: CBCL Limited
Date: 31 mars 2017

Table of Contents

1 • Résumé	1
2 • Introduction	2
3 • Contexte	4
3.1 Étude sur l'hydrologie urbaine du bassin de la rivière Waterford.....	5
3.1.1 Secteur de la rivière Waterford — Étude hydrotechnique.....	5
3.1.2 Mise à jour de la délimitation des plaines inondables de la rivière Waterford	5
3.2 Objectif de l'étude de cas.....	5
4 • Méthodologie	7
4.1 Collecte des données.....	7
4.2 Sélection des courbes intensité-durée-fréquence (IDF)	7
4.3 Estimation des débits de crue	8
4.4 Modélisation hydraulique.....	10
4.5 Analyse de sensibilité	11
4.6 Conception des cartes.....	12
4.7 Discussion	13
5 • Recommandations	18
6 • Remerciements.....	20
7 • Références.....	21

1 • Résumé

En 2017, la société CBCL Limited (CBCL) a produit des cartes illustrant les risques d'inondation de la rivière Waterford, située dans les municipalités de St John's, de Mount Pearl et de Paradise à Terre-Neuve-et-Labrador. Pour produire ces cartes, CBCL a eu recours à la sélection de courbes d'intensité-durée-fréquence (IDF), à l'estimation des débits de crue, à la modélisation hydraulique, à l'analyse de sensibilité, et à la superposition des résultats de la modélisation hydraulique à la cartographie topographique (création de cartes). Les répercussions liées aux changements climatiques ont été prises en considération lors de la conception des cartes.

La préparation d'une étude de cas dans le cadre du projet de cartographie des zones à risque d'inondation de la rivière Waterford (« le projet CZRIRW») vise à documenter la manière dont les facteurs à prendre en compte relativement aux changements climatiques ont été intégrés dans le processus de cartographie des zones à risque d'inondation. Voici les recommandations formulées à l'intention des professionnels qui participent à la préparation de cartes de risque d'inondation au Canada :

- Prendre en compte les politiques locales inhérentes à la gestion des eaux pluviales, notamment la mise en place d'un critère d'augmentation nulle du ruissellement, lorsque le bassin versant couvre plus d'une municipalité.
- Utiliser des courbes IDF intégrant les changements climatiques qui sont justifiables.
- Préparer des modèles hydrologiques permettant de modifier facilement les pluies de conception, au fur et à mesure que de nouvelles courbes IDF sont disponibles.
- Produire des cartes qui sont claires et conviviales.

En outre, les études sur la cartographie des zones à risque d'inondation qui tiennent compte des impacts des changements climatiques peuvent servir d'outils d'adaptation aux changements climatiques :

- Les planificateurs municipaux peuvent s'appuyer sur les cartes de risque d'inondation pour élaborer des politiques relatives à l'aménagement du territoire.
- Les sommaires sur les capacités hydrauliques des ponts et des ponceaux peuvent aider les ingénieurs dans la planification des travaux d'infrastructures.
- Les premiers répondants peuvent également utiliser les cartes de risque d'inondation..
- Les modèles hydrauliques peuvent être employés pour la conception de systèmes de prévision des inondations en temps réel.

La méthodologie du projet CZRIRW et des exemples de la trousse finale de la cartographie des zones à risque d'inondation sont présentés dans la présente étude de cas.

2 • Introduction

En 2015, la Division de la gestion des ressources en eaux (Water Resources Management Division) du ministère des Affaires municipales et de l'Environnement (Department of Municipal Affairs and Environment) de Terre-Neuve-et-Labrador a retenu les services de CBCL Limited (CBCL) en vue de la production de cartes des zones à risque d'inondation de la rivière Waterford.

L'objectif du projet CZRIRW consistait à produire des cartes des zones à risque d'inondation pour différentes conditions d'aménagement du territoire et diverses conditions climatiques au sein du bassin versant.

La zone d'étude du projet CZRIRW comprend la rivière Waterford et ses principaux affluents : South Brook, Kilbride Brook, Branscombes Pond, Nevilles Pond, une rivière sans nom, et Bremigens Pond. Le bassin versant a une superficie de 66,3 km² et couvre trois municipalités, soit St John's, Mount Pearl et Paradise. La rivière Waterford prend sa source dans le lac Bremigens Pond et le lac Brazil Pond à l'extrémité est de la municipalité de Paradise. De là, elle traverse la municipalité de Mount Pearl jusqu'à la confluence de la rivière sans nom, puis sillonne les municipalités de Mount Pearl et de St. John's, où elle rejoint le ruisseau South Brook, pour finir par se jeter dans le port de St John's. La figure 1 montre la zone étudiée.

L'objectif du projet CZRIRW consistait à produire des cartes des zones à risque d'inondation pour différentes conditions d'aménagement du territoire et diverses conditions climatiques au sein du bassin versant. La modélisation

hydrologique a été utilisée pour évaluer la réponse du bassin versant à des événements de récurrence prédéfinis. Les débits générés sont devenus les principaux intrants du modèle hydraulique, lequel mesure la réponse de la rivière aux débits de crue. Enfin, l'exercice de cartographie comprenait la superposition des résultats du modèle hydraulique à la topographie propre au site.

Les cartes de risque d'inondation ont été présentées en séries en vue de structurer l'important volume de données. Chaque série comprenait six (6) figures à une échelle de 1:2500, précédées par une carte générale de l'ensemble du réseau hydrographique.

La liste suivante présente les séries de cartes de risque d'inondation comprises dans le rapport d'étude du projet CZRIRW ainsi qu'une description des données présentées :

1. Série de cartes de l'étendue des zones à risque d'inondation — plaines inondables et cotes de crues associées aux conditions suivantes :
 - Probabilité de dépassement annuelle (PDA) 1:20 et 1:100 pour le climat actuel, les aménagements actuels (CAAA)
 - PDA 1:20 et 1:100 pour les changements climatiques, les aménagements futurs (CCL-AF)

2. Série de cartes de la distribution des vitesses de la zone à risque d'inondation— vitesse dans la zone à risque d'inondation associée aux conditions suivantes :

- PDA 1:20 pour CAAA
- PDA 1:100 pour CAAA
- PDA 1:20 pour CCL-AF
- PDA 1:100 pour CCL-AF

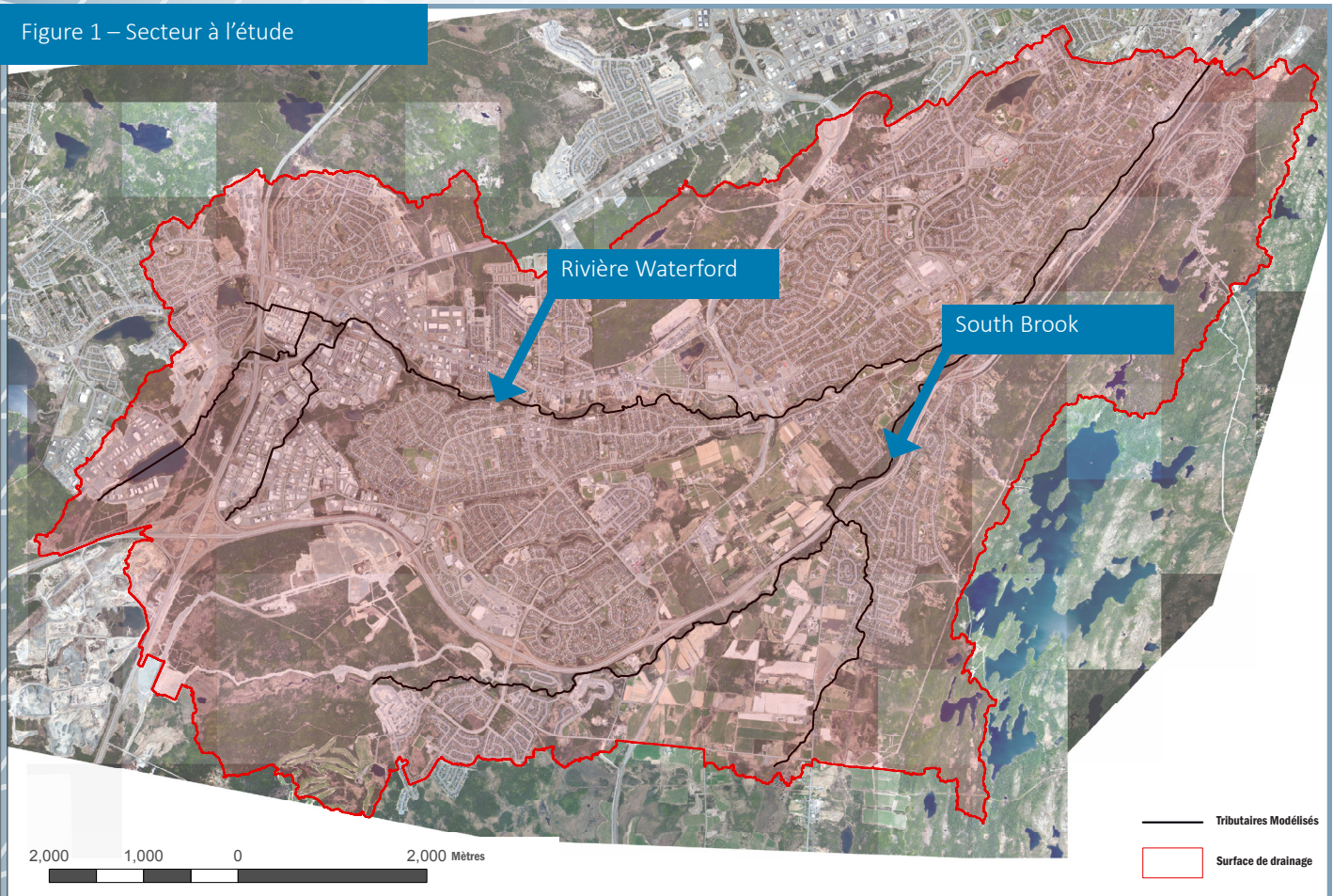
3. Série de cartes des risques d'inondation — risques d'inondation associés aux conditions suivantes :

- PDA 1:20 pour CAAA
- PDA 1:100 pour CAAA
- PDA 1:20 pour CCL-AF
- PDA 1:100 pour CCL-AF

4. Série de cartes comparatives de l'étendue des zones à risque d'inondation— plaines inondables associées aux conditions suivantes :

- PDA 1:20 et comparaison entre CAAA et CCL-AF
- PDA 1:100 et comparaison entre CAAA et CCL-AF
- PDA 1:20 et comparaison entre CAAA et les limites historiques des inondations
- PDA 1:100 et comparaison entre CAAA et les limites historiques des inondations

Figure 1 – Secteur à l'étude



3 • Contexte

Selon la Constitution canadienne, la gestion des plaines inondables relève de la compétence des provinces, étant donné qu'elles sont les principales responsables des ressources en eau et des questions liées à l'aménagement du territoire. Traditionnellement, le gouvernement fédéral a appuyé les provinces en leur octroyant du financement pour des mesures d'améliorations structurelles contre les inondations. Dans les années 1950, 1960, et 1970, et dans une moindre mesure dans les années 1980, le gouvernement fédéral, de concert avec les provinces, a consacré des millions de dollars à l'aménagement de barrages et de digues. Les dommages importants causés par les inondations à l'échelle du Canada au début des années 1970 ont clairement prouvé qu'il fallait trouver une nouvelle façon de réduire ce type de dommages. Les inondations en question ont incité le gouvernement fédéral à adopter en 1975 un programme national connu sous le nom de Programme de réduction des dommages causés par les inondations (PRDI) en vertu de la Loi sur les ressources en eau du Canada. Ce programme a été mis en œuvre dans le cadre d'ententes fédérales provinciales de partage des coûts.

La province de Terre-Neuve-et-Labrador a adhéré au PRDI en 1981 en signant une entente générale et une entente de cartographie et, deux ans plus tard, une entente sur des études. Dans les années 1980 et 1990, la cartographie des collectivités de Terre-Neuve-et-Labrador ayant connu des inondations a été réalisée et les plaines inondables associées aux probabilités de dépassement annuelles (PDA) de 1:20 et 1:100 ont été désignées. La plus récente étude entreprise dans le cadre du programme fédéral provincial remonte à 1996, et la dernière étude pour le bassin versant de la rivière Waterford a été réalisée en 1988. En 2008, la province a financé une nouvelle étude concernant Stephenville et Cold Brook. L'étude Stephenville/Cold Brook est l'une des premières au Canada à présenter la cartographie des zones à risque d'inondation intégrant les changements climatiques. Après le succès de l'étude de 2008, un partenariat avec Ressources naturelles Canada a permis de financer des études sur la cartographie des zones à risque d'inondation intégrant les changements climatiques pour trois autres régions.

Selon la Constitution canadienne, la gestion des plaines inondables relève de la compétence des provinces, étant donné qu'elles sont les principales responsables des ressources en eau et des questions liées à l'aménagement du territoire.

En 2011, le gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador a annoncé une nouvelle initiative sur l'adaptation aux changements climatiques visant à actualiser les études sur la cartographie des zones à risque d'inondation et à en entreprendre de nouvelles. Ces études continuent

d'intégrer les projections en matière de changements climatiques, ce qui facilite l'adaptation aux changements climatiques. Depuis leur création, les cartes de risque d'inondation ont servi de nombreuses applications, incluant la sécurité publique, la conception d'infrastructures, la gestion des ressources en eau, les évaluations environnementales, l'aménagement du territoire, la planification de l'aménagement à l'échelle municipale, l'établissement de critères de conception des structures et les interventions en cas d'inondation.

Trois études sur la cartographie des plaines inondables de la rivière Waterford ont déjà été réalisées. Elles sont résumées cidessous.

3.1 Étude sur l'hydrologie urbaine du bassin de la rivière Waterford

L'étude sur l'hydrologie urbaine du bassin de la rivière Waterford (Urban Hydrology Study of the Waterford River Basin) consiste en une étude quinquennale qui s'est amorcée en 1980 et qui a été en grande partie terminée en 1985. Cette étude était le fruit d'un partenariat entre le gouvernement du Canada et la province de Terre Neuve et Labrador. Elle était axée sur l'incidence de l'urbanisation sur la qualité de l'eau et la quantité d'eau dans le bassin de la rivière Waterford. Les thèmes suivants relatifs au bassin versant de la rivière Waterford ont été étudiés en détail: géologie de surface, géologie, aménagement du territoire, qualité des eaux de surface, étude du ruissellement du bassin versant urbain de Newtown, eau souterraine, installation et mise à l'essai du réseau des puits d'observation, étude biologique, modélisation du bassin versant à l'aide du modèle HYMO, étude des inondations et modélisation de l'écoulement fluvial.

L'étude sur l'hydrologie urbaine du bassin de la rivière Waterford — étude des inondations (UHSWRB: Flood Study) a été publiée en 1986. Les débits des PDA de 1:20 et 1:100 générés par le modèle hydrologique HYMO ont été examinés. Le programme HEC2 a été utilisé pour simuler les débits des PDA de 1:20 et 1:100 et pour calculer l'étendue de la plaine inondable. Le modèle hydraulique a été limité à trois sections de la rivière Waterford, qui représentaient approximativement un tronçon de 300 m depuis la jauge hydrométrique 02ZM008 et s'étendant en amont, un tronçon d'environ 1 120 m à Mount Pearl depuis la jauge hydrométrique 02ZM010 et s'étendant en aval, et un tronçon d'environ 510 m au parc industriel Donovan en amont de la jauge hydrométrique 02ZM011. Les tronçons à l'étude montraient que les zones inondées pour les PDA de 1:20 et 1:100 s'étendaient autour de l'église Corpus Christi dans le tronçon de Kilbride et touchaient également de nombreux autres édifices situés dans ce tronçon.

Cette étude était le fruit d'un partenariat entre le gouvernement du Canada et la province de Terre Neuve et Labrador. Elle était axée sur l'incidence de l'urbanisation sur la qualité de l'eau et la quantité d'eau dans le bassin de la rivière Waterford.

3.1.1 Secteur de la rivière Waterford — Étude hydrotechnique

En juin 1988, Fenco Newfoundland Limited a réalisé une étude sur la cartographie des zones inondables pour ce qui était alors le ministère de l'environnement et des terres (Department of Environment and Lands). Cette étude a délimité l'étendue des plaines inondables et a proposé des stratégies pour la réduction des dommages causés par les inondations de la rivière Waterford, entre le port de St. John's et le parc industriel Donovan de Mount Pearl. Cette étude comprenait l'estimation des débits des PDA de 1:20 et 1:100 à l'aide du logiciel de modélisation QUALHYMO et de techniques statistiques, et la délimitation des plaines inondables qui en découlaient en transposant les niveaux d'eau générés à partir du modèle HEC2 sur des cartes topographiques à l'échelle 1:2500. Les cartes de risque d'inondation ont permis de répertorier vingt structures le long de la rivière Waterford qui seraient inondées lors de la PDA de 1:100.

3.1.2 Mise à jour de la délimitation des plaines inondables de la rivière Waterford

En 1998, la Division de la gestion des ressources en eaux du ministère a procédé à une mise à jour de l'étude réalisée en 1988 par la société Fenco Newfoundland Limited. Cette étude passait en revue les débits de crue de la PDA de 1:100 de l'étude de 1988, présentait une analyse statistique des débits de pointe instantanés annuels jusqu'en 1996 et recommandait les débits de crue à utiliser pour préparer les nouvelles cartes des risques d'inondation. Le modèle hydraulique HEC-RAS a été retenu et les sections transversales relevées pour l'étude de 1988 ont été utilisées. Les résultats de cette nouvelle étude, dont les estimations des PDA de 1:20 et 1:100 étaient plus élevées, étaient que les niveaux d'eau augmentaient de 15 et 17 cm, respectivement, par rapport à l'étude de 1988. En outre, l'étude montrait que la largeur des plaines inondables établies selon les nouvelles valeurs des PDA de 1:20 et 1:100 augmentaient comparativement à l'étude de 1988. Les plaines inondables de la PDA 1:100 établies selon les valeurs actualisées n'augmentaient que peu par rapport à l'étendue de 1988, tandis

que les plaines inondables de la PDA de 1:20 établies selon les valeurs actualisées augmentaient de façon plus significative.

3.2 Objectif de l'étude de cas

La préparation d'une étude de cas pour le projet de cartographie des zones à risque d'inondation de la rivière Waterford (« le projet CZRIRW ») vise à documenter la manière dont les facteurs à prendre en compte relativement aux changements climatiques ont été intégrés dans le processus de cartographie des zones à risque d'inondation. Le projet CZRIRW convient parfaitement à une étude de cas, étant donné que les répercussions liées aux changements climatiques ont été prises en considération dans le calcul des débits de crue. En outre, des opportunités de partage d'expériences ont été identifiées, notamment en ce qui a trait aux difficultés rattachées à l'adaptation aux changements climatiques dans un environnement urbain et à la manière dont les politiques plurigouvernementales influencent la façon de mener les études sur la cartographie des zones à risque d'inondation.

La présente étude de cas a été réalisée dans le cadre de la Série de guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des plaines inondables pour informer les personnes ou les organisations concernées par la gestion des plaines inondables au Canada.

4 • Méthodologie

Étapes en vue de l'élaboration de cartes de risque d'inondation du projet CZRIRW :

- Sélection des courbes intensité-durée-fréquence (IDF);
- Estimation des débits de crue;
- Modélisation hydraulique;
- Analyse de sensibilité;
- Superposition des résultats de la modélisation hydraulique à la topographie (création de cartes).

4.1 Collecte des données

Des photographies aériennes et des données topographiques de télédétection par ondes lumineuses (Lidar) ont été acquises au début du projet CZRIRW. En outre, un programme complet d'acquisition des données sur le terrain a été entrepris afin de mieux représenter la géométrie de la rivière sous la surface des eaux, qui était inaccessible par la méthode de relevé Lidar. Des relevés terrain ont permis de recueillir 433 sections transversales à des emplacements clés de la rivière Waterford et de ses affluents.

Un relevé des ouvrages hydrauliques, comme les ponceaux et les ponts présents sur les affluents modélisés, a également été effectué. En outre, les caractéristiques des structures et les photographies des lieux ont été consignées et intégrées au modèle hydraulique. Les tronçons de rivière situés entre les sections transversales ayant fait l'objet d'un relevé ont été générées à l'aide de lignes de traçage du modèle numérique d'altitude (MNA) créé à partir du relevé Lidar.

4.2 Sélection des courbes intensité-durée-fréquence (IDF)

Les courbes IDF sont élaborées pour une aire géographique spécifique à l'aide de séries de données pluviométriques historiques. Il en résulte un ensemble de courbes représentant l'intensité des précipitations en fonction de diverses durées d'averses pour différentes périodes de récurrence, soit généralement les probabilités de dépassement annuelles suivantes : 1:2 ans, 1:5 ans, 1:10 ans, 1:25 ans, 1:50 ans et 1:100 ans.

En 2015, ConestogaRovers and Associates (CRA) a rédigé un rapport sur la mise à jour des courbes IDF pour Terre-Neuve-et-Labrador (IDF Curve Updates for Newfoundland and Labrador) destiné au bureau des changements climatiques et de l'efficacité énergétique (Labrador's Office of Climate Change and Energy Efficiency) du gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador. Comme il est indiqué dans le rapport, on s'attend, pour ce qui est des futures conditions climatiques au Canada, à ce que la température globale de l'air augmente, et que les plus forts effets soient ressentis durant les mois d'hiver à Terre-Neuve-et-Labrador, avec des variations de 2 à 3 oC d'ici le milieu du 21e siècle. En outre, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prédit que les événements pluvieux augmenteront en termes de durée et de fréquence en raison des changements climatiques.

CRA a appliqué une approche de modélisation statistique pour établir un rapport entre la répartition des courbes IDF historiques et la répartition des précipitations pour différents modèles climatiques mondiaux (MCM). Dans ce rapport de 2015, des courbes IDF actualisées sont présentées pour dix-neuf (19) stations réparties dans toute la province. En outre, les courbes IDF du climat futur ont été générées à partir des courbes IDF des conditions actuelles (IDF-CC) au moyen d'un outil sur les changements climatiques conçu à l'Université Western, en Ontario (Sirvastav et al, 2015). Cet outil constitue une nouvelle méthodologie élaborée expressément pour calculer les courbes IDF du climat futur au Canada au moyen de l'approche fondée sur la modélisation d'ensemble. Une projection d'ensemble moyenne a été établie à partir de vingt-deux (22) MCM distincts. Les projections de chaque modèle n'ont pas été pondérées pour la construction du modèle d'ensemble et celui-ci a été calculé comme valeur médiane dans l'outil IDF-CA.

Le scénario relatif à l'évolution de la concentration des gaz à effet de serre (RPC) 4.5, qui a été élaboré dans le cadre du Rapport d'évaluation 5 du GIEC (RE5 GIEC), a été utilisé pour établir des projections des courbes IDF pour le climat futur pour trois horizons temporels (20112040, 20412070 et 20712100). Les RPC reposent sur des projections des concentrations des gaz à effet de serre et sur des données sur l'utilisation des terres. Le RPC 4.5 a été retenu comme le scénario futur le plus probable et fait référence au profil de stabilisation intermédiaire au sein duquel le forçage radiatif est stabilisé à 4,5 W/m² peu après 2100 (CRA, 2015). Les courbes IDF futures qui en découlent au cours des trois horizons temporels ont été calculées pour les dix-neuf (19) stations IDF au sein de Terre-Neuve-et-Labrador.

Dans le rapport de CRA de 2015, de nouvelles courbes IDF sont présentées pour un pluviomètre situé à la station de pompage Ruby Line, qui est détenue et exploitée par la municipalité de St. John's. Ces courbes ont été créées à l'aide de seize (16) ans de données, recueillies de 1997 à 2014. Le pluviomètre de Ruby Line se trouve dans le bassin versant de la rivière Waterford. Les nouvelles courbes IDF et celles pour le climat futur à l'emplacement de Ruby Line ont été utilisées afin d'établir les hyétogrammes des précipitations pour les modèles hydrologiques. Selon les conclusions de l'étude, pour la station de pompage Ruby Line spécifiquement, l'augmentation moyenne de l'intensité, de la durée et de la fréquence des quantités de précipitations devrait être d'environ 16 %, 22 % et 26 % respectivement pour les horizons temporels 20112040, 20412070 et 20712100. En outre, on prévoit que la période de récurrence d'un événement de 100 ans deviendra une récurrence de 25 ans d'ici 2080 pour cette station.

Spécifiquement, les courbes IDF pour les événements suivants ont été utilisées pour élaborer les pluies du modèle (à noter que l'événement de la PDA de 1:20 a été interpolé) :

- PDA 1:20 (Climat actuel)
- PDA 1:100 (Climat actuel)
- PDA 1:20 (Changement climatique : courbe IDF future pour l'horizon temporel 20712100)
- PDA 1:100 (Changement climatique : courbe IDF future pour l'horizon temporel 20712100)

L'horizon temporel 20712100 a été utilisé dans le cadre du projet CZRIRW, car il constitue la projection la plus conservatrice. L'élaboration de courbes IDF pour le climat futur pour toutes les stations IDF au sein de la province permet d'assurer l'uniformité des projections en matière de changements climatiques. Les projections des courbes IDF relatives aux changements climatiques doivent être mises à jour régulièrement et constituent l'unique référence pour l'ensemble des projections inhérentes à l'intensité des précipitations au sein de Terre-Neuve-et-Labrador.

4.3 Estimation des débits de crue

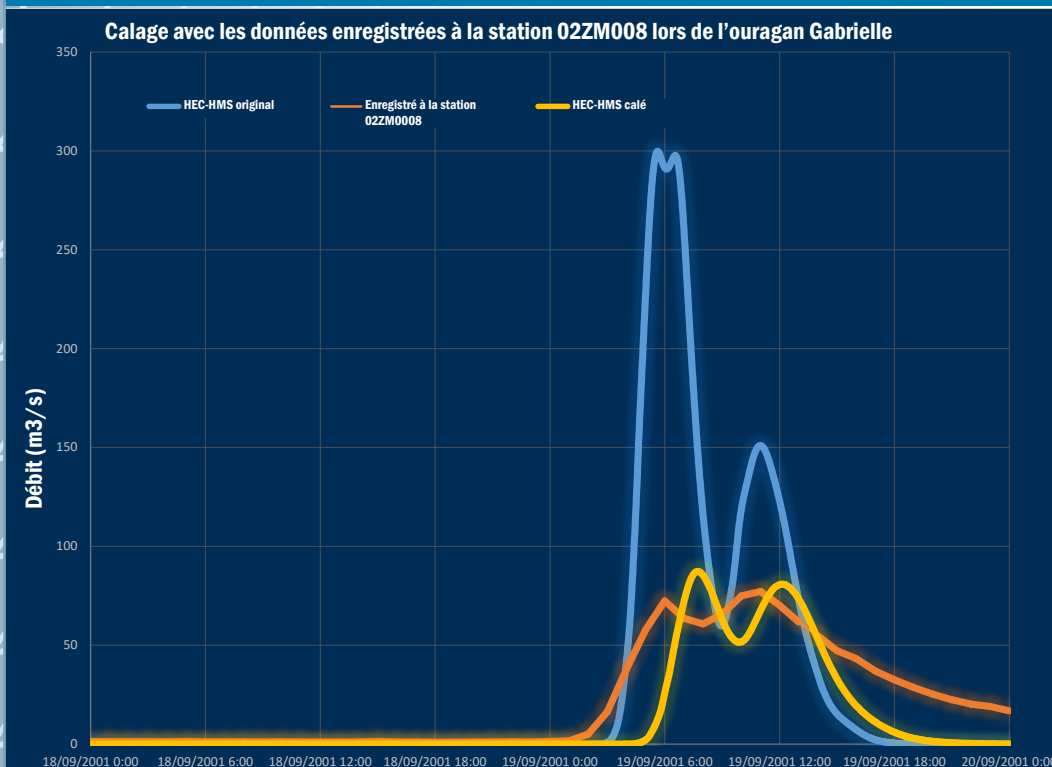
Dans le cadre du projet CZRIRW, les débits ont été estimés à l'aide de trois méthodes, soit l'analyse fréquentielle des inondations par station unique, l'analyse fréquentielle régionale des inondations (analyse régionale), et l'analyse déterministe (modélisation hydrologique). La modélisation hydrologique est la seule méthode pouvant être employée pour comparer les impacts de l'aménagement du territoire et des conditions climatiques, car les paramètres du bassin peuvent être ajustés pour tenir compte des différents degrés d'aménagement et les intrants liées aux précipitations

peuvent être modifiées afin de représenter les changements climatiques. Étant donné que cette étude de cas est axée sur la manière d'aborder les changements climatiques dans les études sur la cartographie des zones à risque d'inondation, les résultats relatifs à l'analyse fréquentielle des inondations par station unique et à l'analyse fréquentielle régionale des inondations ne sont pas expliqués en détail.

La modélisation hydrologique a été effectuée à l'aide du système de modélisation hydrologique HEC-HMS du centre d'ingénierie hydrologique (Hydrologic Engineering Center) et de son extension de modélisation géospatiale (HECGeoHMS). HEC-HMS a été conçu par le service de génie de l'armée américaine (US Army Corp of Engineers), et il est tout spécialement axé sur le processus de précipitation-ruissellement d'un bassin versant. Un large éventail de méthodes d'analyses servant à simuler l'infiltration dans le sol, la transformation du surplus de précipitations, le débit de base et l'écoulement à surface libre est offert. HECGeoHMS est une extension du modèle intégrant les systèmes d'information géographique (SIG) qui permet au modélisateur d'extraire les caractéristiques du bassin versant, de définir les surfaces de drainage et les cours d'eau et d'assembler les intrants du modèle hydrologique afin qu'elles puissent être exploitées directement par HEC-HMS.

Avant d'utiliser HECGeoHMS pour l'extraction des caractéristiques du bassin versant, un traitement préliminaire du terrain et des caractéristiques du bassin versant est effectué pour calculer le réseau hydrographique. Le traitement préliminaire sert à déterminer la direction de l'écoulement, l'accumulation de l'écoulement, la définition du réseau linéaire d'écoulement et la délimitation du bassin. Durant le traitement préliminaire du bassin, le bassin versant est divisé en surfaces de drainage en fonction des exigences spécifiques au projet. Selon la définition des cours d'eau et la délimitation des surfaces de drainage, les propriétés physiques telles que la longueur et la pente du cours d'eau, les plus longues trajectoires d'écoulement, les centroïdes des trajectoires d'écoulement, et les pentes des bassins sont extraites à partir des données terrain à l'aide de l'extension HECGeoHMS. Cette extension est également utilisée pour extraire les paramètres hydrologiques, notamment l'indice de ruissellement CN (runoff curve number) et le temps de réponse du bassin, et pour préciser les méthodes de perte, de propagation et de routage qui seront utilisées dans le modèle hydrologique.

Figure 2 – Calage avec les données enregistrées à la station 02ZM008 lors de l'ouragan Gabrielle



Voici les méthodes d'analyse de HEC-HMS utilisées pour le projet CZRIRW :

Méthode d'analyse des pertes : indice de ruissellement CN du Soil Conservation Service (SCS)

Méthode de propagation : hydrogramme unitaire du SCS

Méthode de routage : MuskingumCunge

Le calage du modèle hydrologique se fait en simulant un événement de précipitations enregistrées et en comparant l'hydrogramme calculé aux débits mesurés. La jauge hydrométrique de Kilbride (02ZM008) sur la rivière Waterford a été

utilisée pour caler le modèle HECHMS. Les données de précipitations enregistrées au pluviomètre de Ruby Line au cours de l'ouragan Gabrielle en septembre 2001 à des intervalles de cinq minutes ont été obtenues auprès de la municipalité de St. John's. Les données sur les débits horaires enregistrées à la jauge hydrométrique 02ZM008 ont été obtenues auprès d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) pour la même période. Le modèle HECHMS a été exécuté en utilisant les données pluviométriques et les résultats ont été comparés aux débits enregistrés en représentant les deux hydrogrammes sur un même graphique (voir figure 2). On a répété ce processus en utilisant les données sur les débits et les précipitations enregistrées au cours de la tempête tropicale Chantal en août 2007. HECHMS exige un hyétogramme des précipitations (série temporelle de données sur les précipitations) comme intrant pour simuler le processus de précipitation-ruisellement. Les hyétogrammes représentant les quantités de précipitations pour les PDA de 1:20 et 1:100, comme il a été établi à partir de la mise à jour des courbes IDF, ont été entrés dans le modèle HECHMS afin d'estimer les débits de crue correspondants aux PDA de 1:20 et 1:100. La méthode des blocs alternatifs a été employée pour estimer la forme de l'hyétogramme synthétique. Les hyétogrammes sur le climat actuel et les changements climatiques créés pour les périodes de retour des PDA de 1:20 et 1:100 comprennent les quantités de précipitations pour des durées de 15 et 30 minutes, et de 1, 2, 6, 12 et 24 heures.

Les futures configurations d'aménagements du territoire peuvent être modélisées dans HECHMS en modifiant les indices de ruissellement CN, et par conséquent les temps de concentration. Ce processus a été utilisé dans le cadre des récentes études sur la cartographie des risques d'inondation réalisées pour la Division de la gestion des ressources en eaux du ministère. Toutefois, il est plus difficile de tenir compte des politiques municipales sur la gestion des eaux pluviales. Par exemple, les municipalités de St. John's et de Mount Pearl ont une politique « d'augmentation nette nulle du ruissellement », mais pas la municipalité de Paradise. Par conséquent, on a établi que les conditions ultimes de développement pour la présente étude devraient être modélisées ainsi :

Les indices de ruissellement CN dans les limites de la municipalité de Paradise et le bassin versant ont été modifiés afin de représenter les futures utilisations du territoire.

Les indices de ruissellement CN dans les limites des municipalités de Mount Pearl et de St. John's, et le bassin versant sont demeurés identiques à ceux des conditions existantes.

Les estimations de débits sont résumées cidessous.

Emplacement	Période de retour	Résultats de l'analyse fréquentielle (m ³ /s)	Résultats de la modélisation (m ³ /s)		% d'augmentation des débits (CAAA à CCL-AF)
			CAAA	CCL-AF	
02ZM008	1:20 ans	80,5	80,2	107,0	33
	1:100 ans	100,0	118,0	164,1	39
Exutoire	1:20 ans	S. O.	91,6	122,6	34
	1:100 ans	S. O.	136,4	192,0	41

4.4 Modélisation hydraulique

Le principal objectif de l'analyse hydraulique consiste à traduire les débits de crue pour les PDA 1:20 et 1:100 estimés au cours de l'analyse hydrologique en profils du plan d'eau le long des tronçons de la rivière. Les profils du plan d'eau contiennent des profondeurs et des vitesses associées pour chaque débit de crue et chaque condition d'aménagement (actuelle et future). Les résultats de vitesses et de profondeurs ont été pris en compte pour l'élaboration des cartes des risques d'inondation, lesquelles reposent sur la matrice des risques d'inondation Royal Haskoning.

En résumé, les résultats suivants sont présentés sur les cartes des risques d'inondation dans le cadre du projet CZRIRW :

- Niveau d'eau;
- Profondeur;
- Débit;
- Vitesse;
- Limites de la plaine inondable.

L'objectif secondaire de l'analyse hydraulique consiste à identifier les ponts et les ponceaux sous-dimensionnés. Dans le cadre du projet CZRIRW, une liste des structures en question pour les différentes conditions d'aménagement du territoire et d'inondation a été jointe au rapport.

La modélisation hydraulique a été effectuée à l'aide du système d'analyse des rivières (River Analysis System) du centre d'ingénierie hydrologique (HECRAS) et de son extension de modélisation géospatiale (HECGeRAS). HECRAS procure des solutions en matière d'écoulement à surface libre pour les circuits hydrauliques à écoulement permanent et non permanent à une ou deux dimensions. Dans le cadre du projet CZRIRW, la modélisation a été effectuée au moyen de l'approche de l'état d'écoulement permanent unidimensionnel.

L'élaboration du modèle HECRAS exige les éléments géométriques suivants :

- Lignes centrales du cours d'eau — polygones numériques qui représentent les tronçons de la rivière
- Sections transversales — emplacements où le modèle calcule les résultats pour les sections de la rivière;
- Lignes de rive — représente les rives droite et gauche à chacune des sections transversales;
- Jonctions — marque la confluence, les points de début et de fin sur la rivière
- Structures hydrauliques — ponts et ponceaux aux passages routiers le long de la rivière.

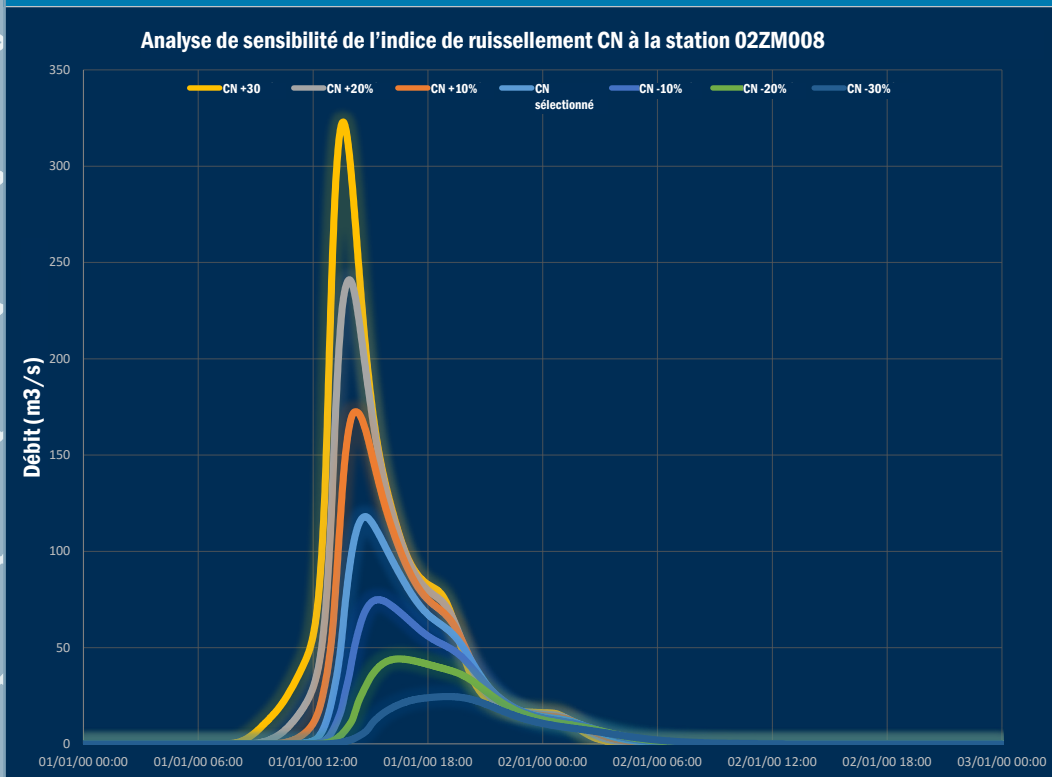
Le calage d'un modèle hydraulique à écoulement à surface libre se fait en ajustant les paramètres du modèle, notamment la rugosité, afin qu'il puisse reproduire les niveaux d'eau observés. Dans le cadre du projet CZRIRW, les débits et les niveaux enregistrés au cours de la tempête tropicale Chantal en août 2007 ont été utilisés pour le calage. Des ajustements ont été apportés uniquement aux coefficients de rugosité n de Manning. Toutes les valeurs finales des coefficients de rugosité n de Manning s'inscrivent dans les gammes de valeurs recommandées.

Le scénario lié aux changements climatiques tient compte à la fois de l'aménagement du territoire futur et de rehaussement du niveau de la mer. Le ruissellement accru provenant des aires imperméables issues de l'estimation de l'aménagement du territoire futur a été pris en considération pour les trois municipalités au sein de la zone d'étude en faisant référence aux plans de gestion des eaux pluviales et de zonages appropriés. Le rehaussement du niveau de la mer prévue de 1.0 m en raison des changements climatiques repose sur le rapport de 2010 de M. Batterson et D. Liverman intitulé Past and Future Sea-Level Change in Newfoundland and Labrador: Guidelines for Policy and Planning. Cette condition limite a été appliquée au modèle hydraulique pour simuler le rehaussement futur du niveau de la mer à l'exutoire localisé au port de St. John's dans le cadre des différents scénarios de changements climatiques.

4.5 Analyse de sensibilité

Des analyses de sensibilité de certains paramètres du modèle ont été effectuées afin d'évaluer l'impact des changements de ces paramètres sur les résultats du modèle. Les paramètres hydrologiques retenus pour l'analyse de sensibilité comprennent l'indice de ruissellement CN et les coefficients de rugosité de Manning. La PDA 1:100 pour les conditions d'aménagement actuelles ont été sélectionnées comme référence pour évaluer la sensibilité du débit par rapport à la variation de chaque paramètre. Les résultats sont présentés aux figures 3 et 4.

Figure 3 – Analyse de sensibilité de l'indice de ruissellement CN



de sorte que les deux formes de données puissent être combinées. La zone d'étude a été codée par couleur conformément à la matrice sur les risques d'inondation figurant

4.6 Conception des cartes

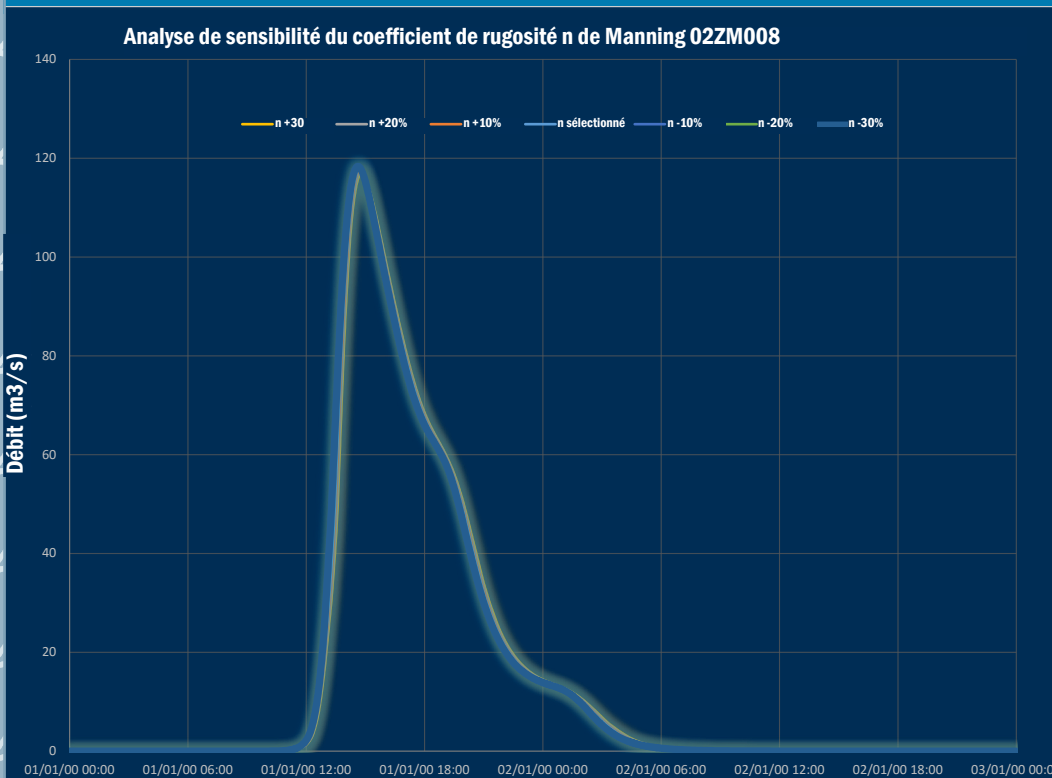
Les cartes de risque d'inondation sont générées en effectuant les simulations HECRAS des scénarios de référence et de changements climatiques et en exportant les résultats dans ArcGIS à l'aide de l'extension HECGeoRAS. Les résultats de vitesses et de profondeurs d'eau de la simulation du scénario de référence sont exportés à l'aide de HECGeoRAS et ils permettent de produire des cartes illustrant l'étendue de la zone inondable et de la vitesse des crues au moyen d'un code de couleur.

Les cartes de risque d'inondation sont générées en saisissant la vitesse et la profondeur d'eau dans un système de grille et de matrice (raster) au sein de ArcGIS,

de sorte que les deux formes de données puissent être combinées. La zone d'étude a été codée par couleur conformément à la matrice sur les risques d'inondation figurant dans l'exposé sur l'application de la télédétection (modèle numérique de terrain) dans l'évaluation des risques d'inondation (Application of Remote Sensing (Digital Terrain Models)) in Flood Risk Assessments, présenté au séminaire national sur l'hydrologie de 2007 dont le thème était le SIG en hydrologie par Mercedes Uden (Royal Haskoning) et Hamish Hall (Royal Haskoning).

Map to Map (M2M) est un processus de travail élaboré à l'Université du Texas et modifié par ESRI pour la Division de la gestion des ressources en eaux (DGRE) en vue d'uniformiser la conception des cartes de risque d'inondation. Il nécessite le référencement du logiciel de modélisation hydrologique et hydraulique par l'entremise de ArcMAP, un logiciel d'ESRI, afin de

Figure 4 – Analyse de sensibilité du coefficient de rugosité n de Manning 02ZM008



transformer une “carte des précipitations” en une “carte des inondations”. Le processus M2M a été mis en œuvre avec succès dans le cadre de projets précédents, même s’il était personnalisé et non transférable à d’autres projets. La DGRE a retenu les services d’ESRI pour simplifier l’ensemble du processus M2M, afin qu’il puisse être appliqué à d’autres zones d’étude. Dans l’ensemble, le processus M2M est un exercice permettant de nommer, classer et organiser adéquatement les fichiers des composantes clés.

Le posttraitement des résultats HECRAS peut se révéler un exercice de grande envergure en raison de la création d’« îles » dans la plaine inondable qui en découle. Les îles font référence à des polygones délimités qui sont isolés des principaux affluents de la rivière sur tous ses côtés. À l’heure actuelle, ces

îles doivent être traitées manuellement, mais les prochaines mises à jour du processus de travail M2M pourraient inclure une procédure automatique.

Figure 5 – Hyétoqramme de la station Ruby Line, PDA 1:20

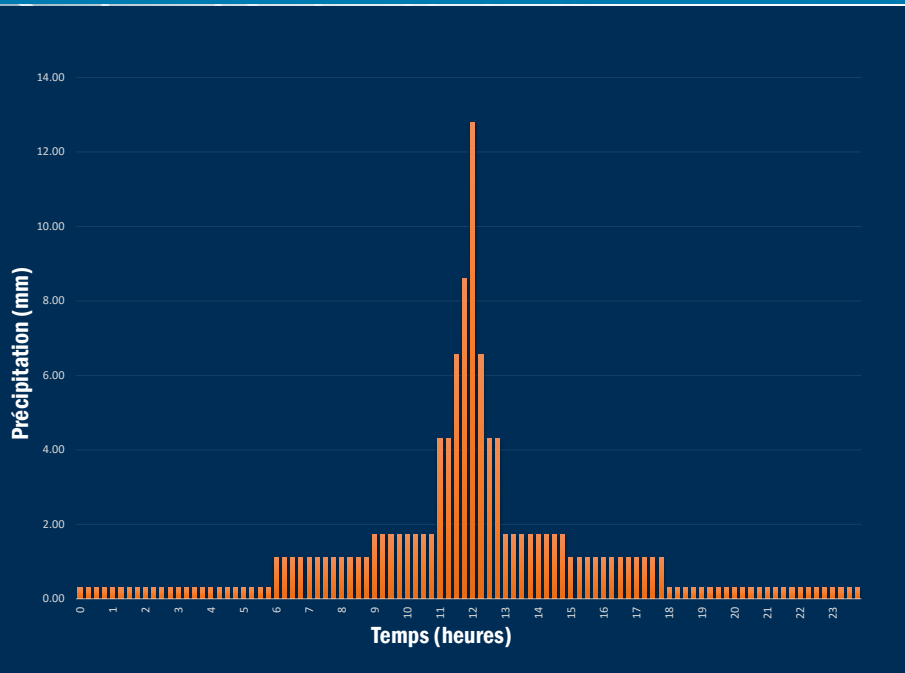
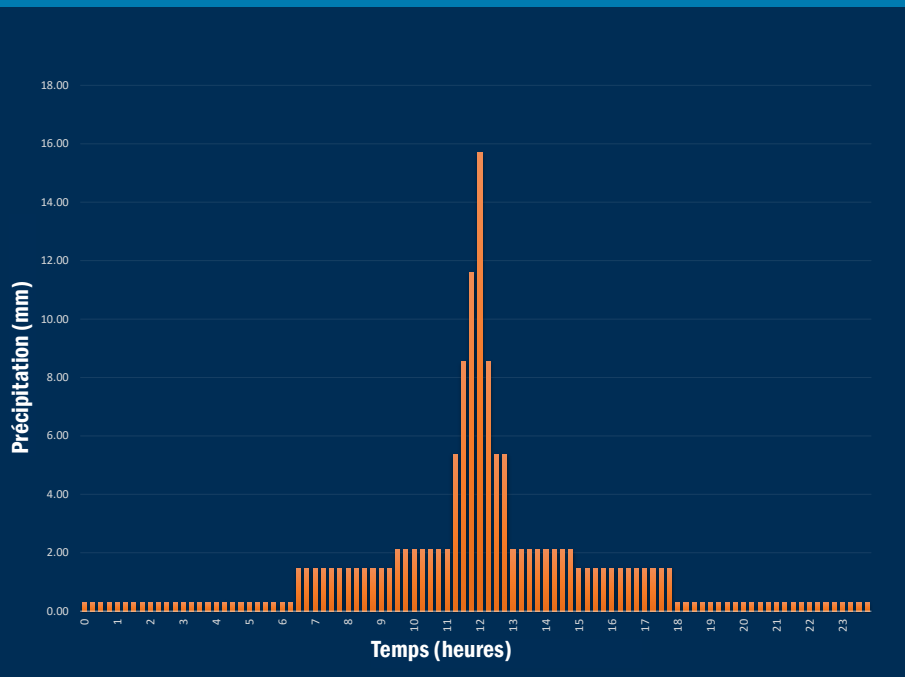


Figure 6 – Hyétoqramme de la station Ruby Line, PDA 1:100



4.7 Discussion

Les effets des changements climatiques sont modélisés en modifiant les données de précipitations. Dans le cadre du projet CZRIRW, cela a été fait en modifiant les hyétoqrammes de conception, lesquels ont été élaborés à partir des courbes IDF de Ruby Line. Les figures 5 à 8 présentent les hyétoqrammes de conception qui ont servi à élaborer les estimations de débits pour ce projet. Au fur et à mesure que les courbes IDF actualisées seront accessibles, de nouveaux hyétoqrammes de conception pourront être élaborés et utilisés pour estimer les nouveaux débits de crues. Les événements orageux des conditions des changements climatiques sont plus intenses que celles des conditions de climat actuel. Par conséquent, elles produisent des débits plus élevés dans les modèles hydrologiques. Le modèle hydraulique de base, qui permet de comparer le climat actuel et le climat futur, représente la condition d’aménagement actuelle.

Le scénario des changements climatiques qui a été envisagé dans l’étude du projet CZRIRW incluent à la fois les conditions d’aménagement du territoire futur au sein du bassin versant et le rehaussement du niveau de la mer à l’exutoire de la rivière Waterford jusqu’au port de St. John’s. Les conditions d’aménagement du territoire futur sont le reflet des documents actuels sur le zonage qui ont été mis à disposition par les municipalités de Paradise, Mount Pearl et St. John’s, respectivement. Au fur et à mesure que les documents sur la planification et les critères de gestion des eaux pluviales seront mis à jour dans ces trois municipalités, les cartes des risques d’inondation devraient également être actualisées.

Figure 7 – Hyétogramme de la station Ruby Line, PDA 1:20 incluant les changements climatiques

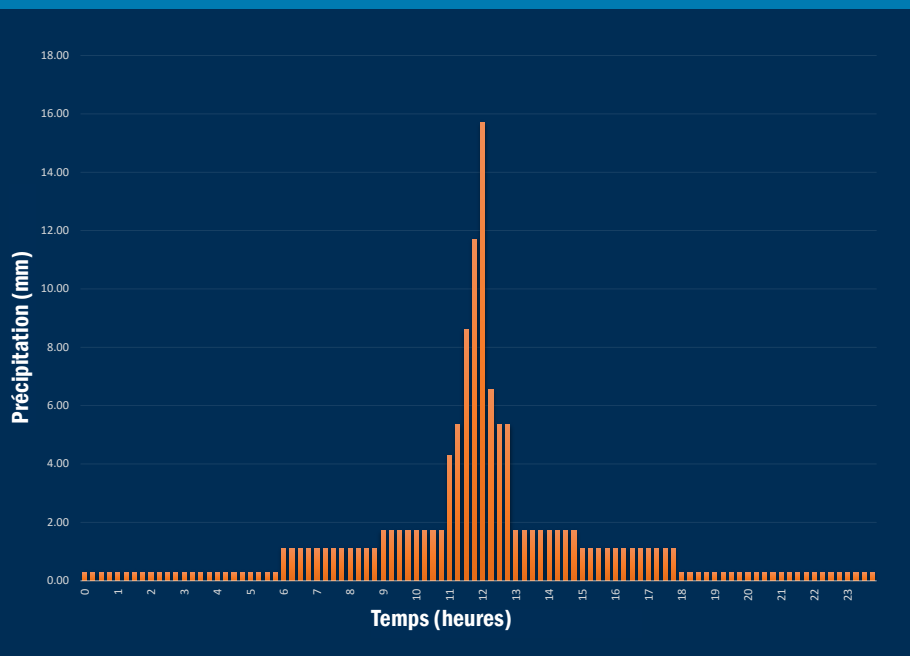
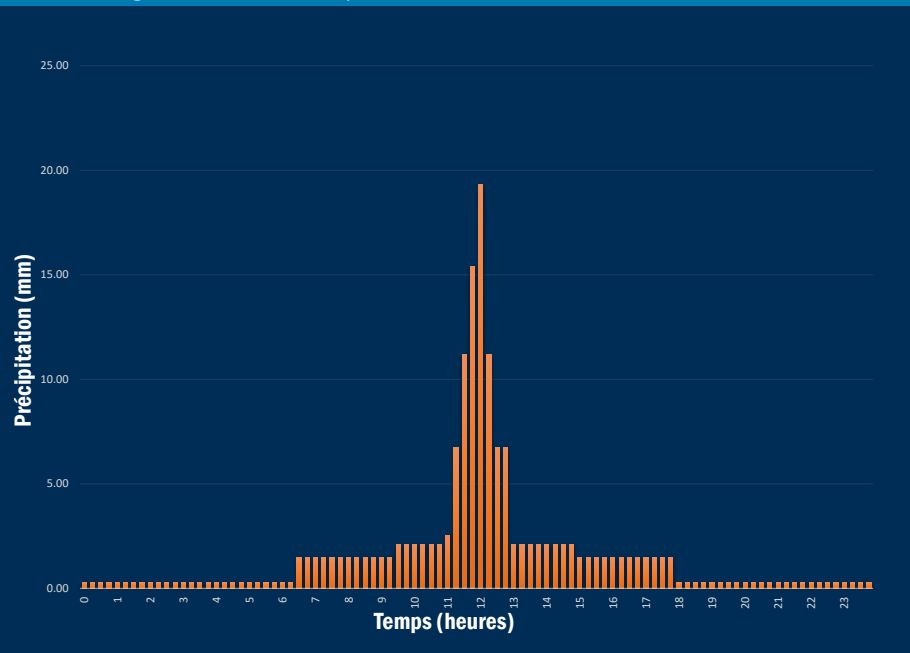


Figure 8 – Hyétogramme de la station Ruby Line, PDA 1:100 incluant les changements climatiques



Comme indiqué précédemment, les cartes de comparaison de l'étendue des plaines inondables produites pour l'étude du projet CZRIRW comprennent ce qui suit :

- Comparaison de l'étendue des plaines inondable pour la PDA 1:20 entre le climat actuel et l'aménagement actuel (CAAA) et les changements climatiques et l'aménagement futur (CCL-AF)
- Comparaison de l'étendue des plaines inondable pour la PDA 1:100 entre CAAA et CCL-AF
- Comparaison de l'étendue des plaines inondables pour la PDA 1:20 entre CAAA et les inondations historiques
- Comparaison de l'étendue des plaines inondables pour la PDA 1:100 entre CA-AA et les inondations historiques

Les figures 9 à 12 présentent des exemples de comparaisons qui ont été faites le long de la rivière Waterford. La figure 13 montre un exemple de carte des risques d'inondation.

Figure 9 – Comparaison de l'étendue des plaines inondable pour la PDA 1:20 entre CA-AA et CCL-AF

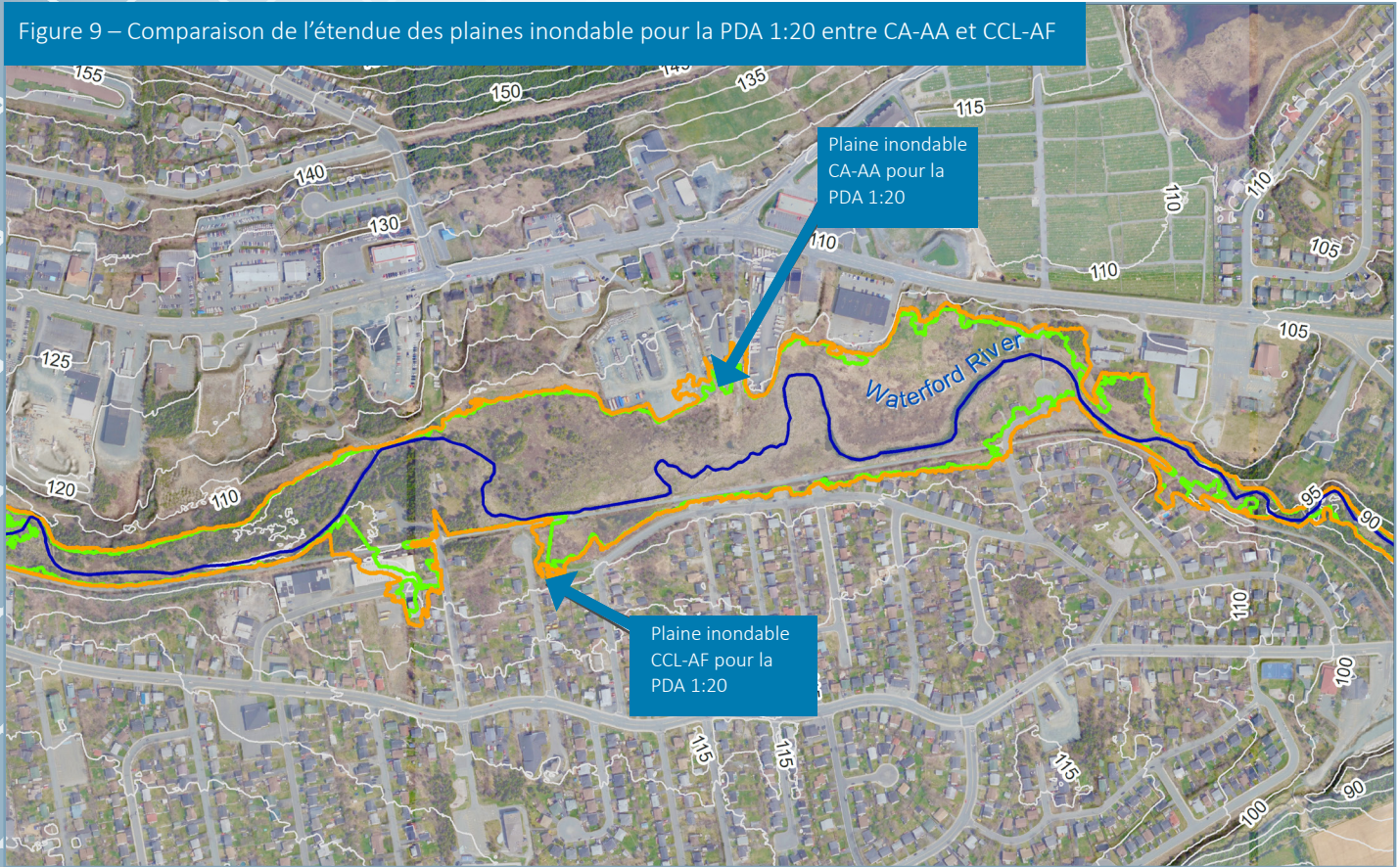


Figure 10 – Comparaison de l'étendue des plaines inondable pour la PDA 1:100 entre CA-AA et CCL-AF

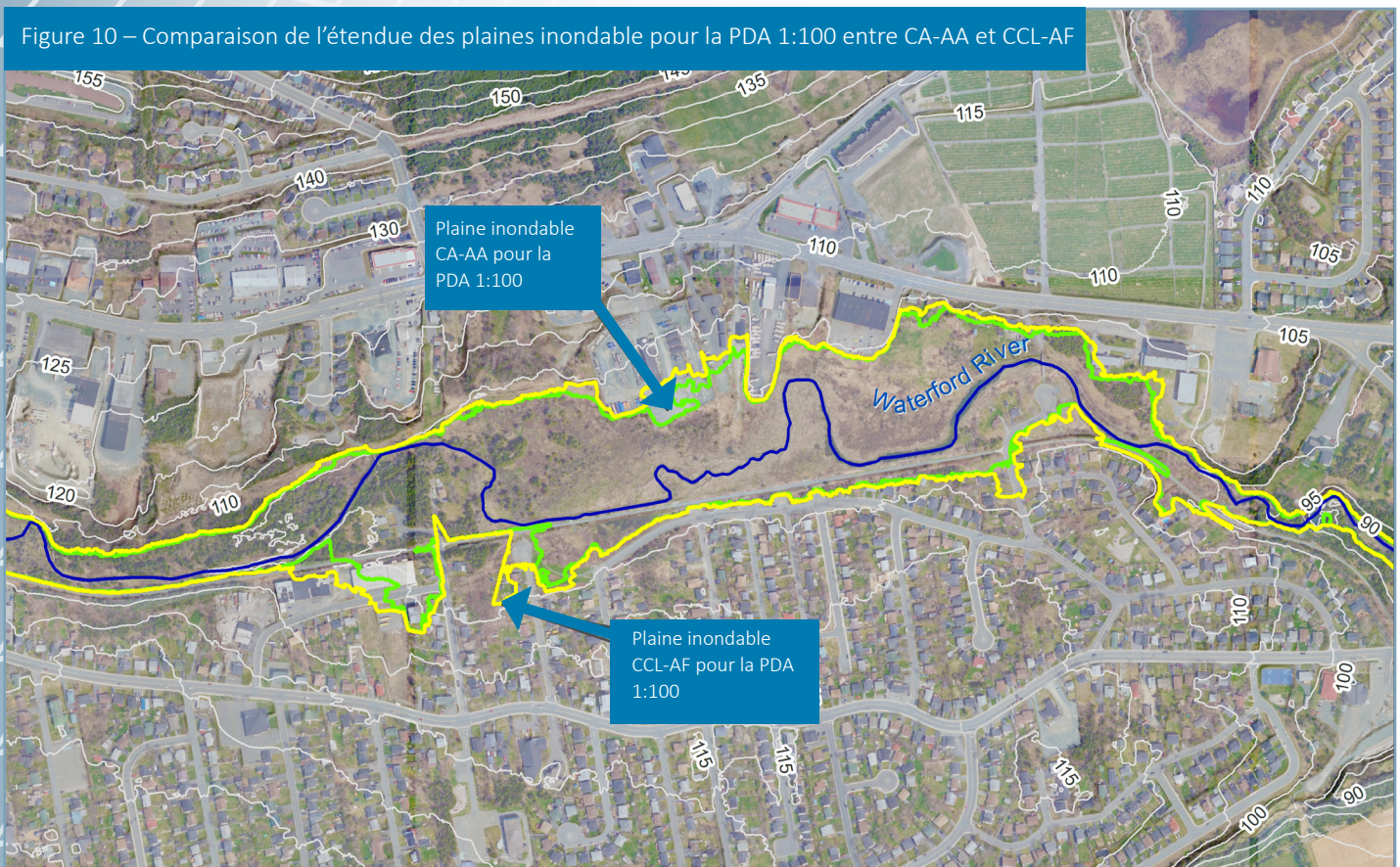


Figure 11 – Comparaison de l'étendue des plaines inondable pour la PDA 1:20 entre CA-AA et les inondations historiques

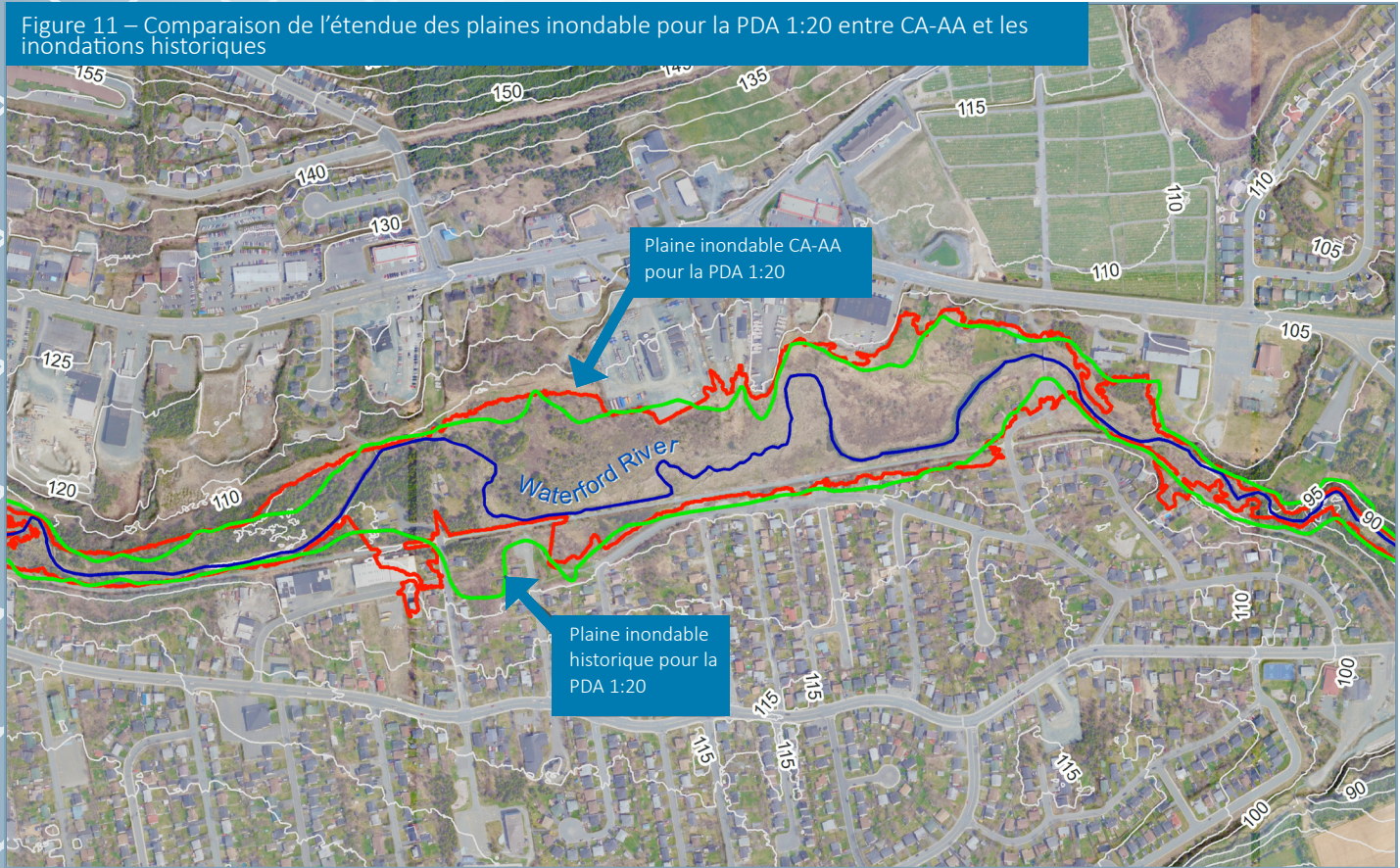


Figure 12 – Comparaison de l'étendue des plaines inondable pour la PDA 1:100 entre CA-AA et les inondations historiques

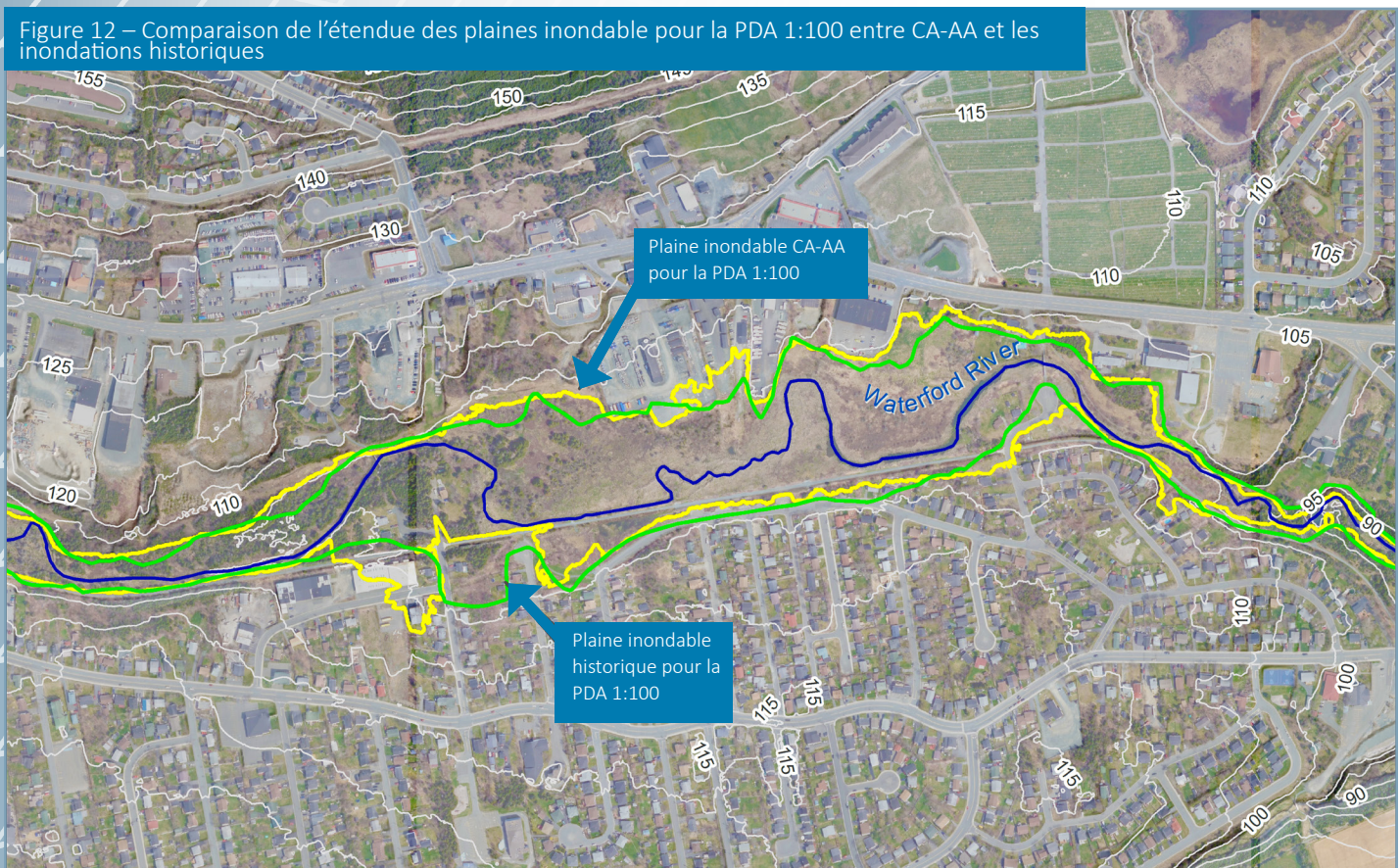
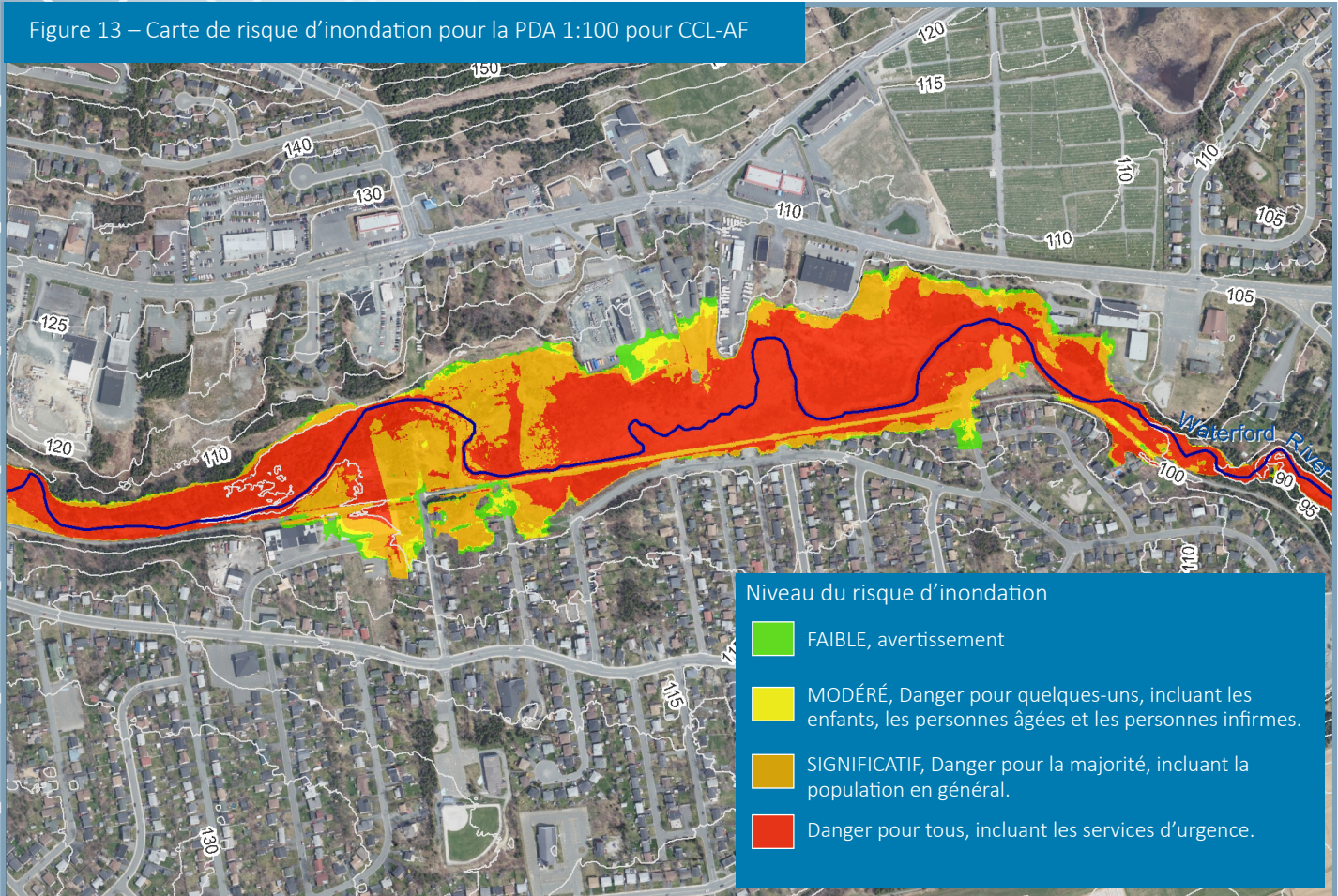


Figure 13 – Carte de risque d'inondation pour la PDA 1:100 pour CCL-AF



5 • Recommandations

La préparation d'une étude de cas pour le projet CZRIRW vise à documenter la manière dont les facteurs à prendre en compte relativement aux changements climatiques ont été intégrés dans le processus de cartographie des zones à risque d'inondation.

Voici les recommandations à l'intention des personnes qui participent à la préparation des cartes de risque d'inondation au Canada :

- Tenir compte des politiques locales inhérentes à la gestion des eaux pluviales, notamment les exigences relatives à l'augmentation nulle du ruissellement, lorsque la superficie du bassin versant couvre plus d'une municipalité.
- Utiliser des courbes IDF modifiées pour tenir compte des changements climatiques qui sont justifiables.
- Créer des modèles hydrologiques permettant de modifier facilement les pluies de conception, au fur et à mesure que les courbes IDF actualisées deviennent accessibles.
- Produire des cartes qui sont claires et conviviales.

En outre, les études sur la cartographie des zones à risque d'inondation qui tiennent compte de l'impact des changements climatiques peuvent servir d'outils d'adaptation aux changements climatiques :

- Les planificateurs municipaux peuvent tirer parti des cartes des risques d'inondation pour élaborer des politiques d'aménagement du territoire.
- Les sommaires sur les capacités hydrauliques des ponts et des ponceaux sont susceptibles d'aider les ingénieurs dans la planification des travaux d'infrastructures.
- Les premiers répondants peuvent utiliser les cartes des risques d'inondation lors d'inondations.
- Les modèles hydrologiques et hydrauliques peuvent être employés pour la conception de systèmes de prévision des inondations en temps réel.

Voici un exemple de tableau représentant la capacité hydraulique des structures le long de la rivière Waterford :

Rivière (tronçon)	Station de la rivière (ID de la structure)	Profil*	Débit au Ponceau	Débit au Déversoir	Débit Total	Profondeur de débordement
			(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	cm
Waterford (tronçon amont)	13832.02	PDA 100 CA-AA	8,5		8,5	
	(251252)					
	Double tonneau					
Waterford (tronçon amont)	13832.02	PDA 100 CCL-AF	10,8	3,8	14,6	22
	(251252)					
	Double tonneau					
South Brook (tronçon aval)	309.5599	PDA 100 CA-AA	39,5		39,5	
	(5152)					
South Brook (tronçon aval)	309.5599	PDA 100 CCL-AF	43,8	12,4	56,2	5
	(5152)					

Les logiciels hydrologique et hydraulique utilisés pour produire les livrables requis dans le cadre du projet CZRIRW a donné lieu à des défis uniques en ce qui concerne les erreurs logicielles. HECHMS et HECRAS, ainsi que leurs extensions géospatiales, sont des logiciels libres qui ont été élaborés afin de répondre aux besoins du service de génie de l'armée américaine. Le logiciel est accessible au public, gratuitement. Toutefois, les développeurs du logiciel HEC n'offrent pas d'aide technique ni de soutien. De nouvelles versions comportant moins d'erreurs pourraient devenir disponibles à tout moment lors de la réalisation d'un projet. Il faut prêter attention aux notes de version du logiciel qui consignent les questions se rapportant aux corrections des versions antérieures du logiciel. Malheureusement, des problèmes mineurs dans l'interface sont corrigés sans être explicitement documentés.

Les capacités des modèles évoluent sans cesse grâce aux nouvelles versions des logiciels. La dernière version de HECRAS (5.0.3) comprenait de nouvelles composantes de simulation, telle que RAS Mapper. Cette fonction permet à l'utilisateur de visualiser automatiquement les résultats du rendu tout en procédant aux mises à jour de la modélisation ou en exécutant différents scénarios de simulation des débits.

Les prochaines évolutions technologiques concernant le Lidar pourront permettre de pénétrer sous la surface de l'eau et de saisir la géométrie du lit de la rivière sans avoir recours à des relevés terrain. Tant que cette méthode n'est pas offerte, un relevé approfondi est nécessaire pour compléter les données topographiques du sol recueillies grâce aux méthodes Lidar. Afin de garantir l'exactitude des résultats de la cartographie des risques d'inondation au fil du temps, les modifications apportées à la géométrie de la rivière et les modifications de l'infrastructure existante doivent faire l'objet d'un suivi et la géométrie des modèles doit être conformément mise à jour.

6 • Remerciements

CBCL Limited remercie la Division de la gestion des ressources en eaux du ministère des Affaires municipales et de l'Environnement de Terre-Neuve-et-Labrador pour son soutien dans la préparation de cette étude de cas.

7 • Références

1. *Policy for Development in Shore Water Zones (Environmental and Conservation, 2001)*
2. *Past and Future Sea-level Change in Newfoundland and Labrador: Guidelines for Policy and Planning (M. Batterson et D. Liverman, 2010)*
3. *Government of Newfoundland and Labrador Report Directory: <http://www.canal.gov.nl.ca/reports/>*



CBCL LIMITED

Consulting Engineers



www.CBCL.ca

Nova Scotia: Halifax, Sydney
Prince Edward Island: Charlottetown
New Brunswick: Saint John, Fredericton, Moncton
Newfoundland & Labrador: St. John's, Happy Valley-Goose Bay

ANNEXE D : RESSOURCES SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Partie 1 : Exemples de sources de renseignements sur les scénarios climatiques

Les renseignements suivants ont été adaptés du Guide sur les scénarios climatiques (Ouranos, 2016). Remarquez que cette liste n'est pas une énumération exhaustive des fournisseurs de services climatologiques canadiens, mais est plutôt une liste d'exemples représentatifs de ce qui peut être retrouvé sur le Web.

Environnement et Changement climatique Canada

Ce site fournit des renseignements sur les changements climatiques au Canada y compris les causes, les faits, les impacts, etc.

<https://www.canada.ca/fr/services/environnement/meteo/changementsclimatiques/causes-effets.html>

Données et scénarios climatiques canadiens (DSCC)

Ce site fournit différents formats de visualisation des scénarios climatiques pour le Canada.

<http://scenarios-climatiques.canada.ca/index.php?page=main>

Archives nationales d'information et de données climatologiques

Ce site fournit des données météorologiques et climatiques ainsi que des renseignements connexes pour de nombreux endroits partout au Canada, y compris la température, les précipitations, les degrés-jour, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent.

http://climate.weather.gc.ca/index_f.html

Données climatiques canadiennes ajustées et homogénéisées

Ce site fournit des données climatiques homogénéisées pour plusieurs stations climatologiques au Canada pour la température, les précipitations, la pression de surface et le vent.

<http://www.ec.gc.ca/dccha-ahccd/Default.asp?lang=Fr&n=B1F8423A-1>

Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique

Ce site fournit des renseignements sur les modèles canadiens globaux et régionaux en plus de tracés de prévisions futures.

<https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/recherche-donnees/modelisation-analyse-climatique/centre-modelisation-analyse.html>

Tendances et variations climatiques récentes

Ce bulletin résume les données climatiques récentes et les présente dans un contexte historique.

<https://www.ec.gc.ca/sc-cs/default.asp?lang=Fr&n=319D8D34-1>

Pacific Climate Impacts Consortium Plan2Adapt

Ce site Web génère des cartes, des plans et des données décrivant les conditions climatiques futures prévues pour la Colombie-Britannique.

<https://pacificclimate.org/analysis-tools/plan2adapt>

Gouvernement du Québec – Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques – Surveillance du climat

Ce site fournit des données sur les normales climatologiques (1981-2010), les tendances de la température (1961-2010) de même que des données climatologiques quotidiennes pour la province de Québec.

<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/surveillance/index.asp>

Services climatiques Ouranos

Ce site Web génère des scénarios et des services climatiques parmi un large éventail de services liés à la science sur les changements climatiques.

<https://www.ouranos.ca/programmes/>

Bureau des changements climatiques et de l'efficacité énergétique de Terre-Neuve-et-Labrador

Cette page Web fournit des liens vers les projections en matière de changements climatiques pour Terre-Neuve-et-Labrador ainsi que les fichiers IDF liés aux changements climatiques pour Terre-Neuve-et-Labrador

<http://www.exec.gov.nl.ca/exec/ccee/climate-data/index.html>

North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP)

Ce programme est consacré à la production de simulations climatiques à haute résolution au-dessus de l'Amérique du Nord.

<http://www.narccap.ucar.edu/about/index.html>

Partie 2 : Exemples de cartographie des changements climatiques et des plaines inondables

La sous-section suivante fournit des sources d'exemples de cartographie des changements climatiques et des plaines inondables et des renseignements sur les projections climatiques.

Tableau 1 : Exemples de cartographie des changements climatiques et des plaines inondables

Description	Endroit
<p>Climate Change Adaptation Guidelines for Sea Dykes and Coastal Flood Hazard Land Use: Guidelines for Management of Coastal Flood Hazard Land Use</p> <p>Par le ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique.</p> <p>Janvier 2011</p>	<p><i>Rapport</i></p> <p>http://www.env.gov.bc.ca/wsd/public_safety/flood/pdfs_word/coastal_flooded_land_guidelines.pdf</p>
<p>City of Vancouver Coastal Flood Risk Assessment</p> <p>Préparé pour la ville de Vancouver.</p> <p>Décembre 2014</p>	<p><i>Site Web</i></p> <p>http://vancouver.ca/green-vancouver/climate-change-adaptation-strategy.aspx</p> <p><i>Rapport</i></p> <p>http://vancouver.ca/files/cov/CFRA-Phase-1-Final_Report.pdf</p>
<p>Assessing coastal flood risk in a changing climate for the City of Vancouver</p> <p><i>Revue canadienne des ressources hydriques</i></p> <p>Février 2016</p>	<p><i>Résumé</i></p> <p>http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07011784.2015.1126695?scroll=top&needAccess=true</p>
<p>Coastal Sea Level Rise Flood Risk Assessment Report – Capital Regional District (Victoria)</p> <p>AECOM</p> <p>Janvier 2015</p>	<p><i>Site Web</i></p> <p>https://www.crd.bc.ca/about/what-we-do/sustainability/climate-change-a-priority</p> <p><i>Rapport</i></p> <p>https://www.crd.bc.ca/docs/default-source/climate-action-pdf/coastal-sea-level-rise_risk-assessment-report.pdf?sfvrsn=0</p>

<p>Stratégie d'adaptation aux changements climatiques et de gestion des inondations de la ville de Moncton</p> <p>Préparé par la ville de Moncton.</p> <p>Juin 2013</p>	<p><i>Site Web</i> https://www.moncton.ca/Residants/Environnement/Adaptation_aux_changements_climatiques.htm</p> <p><i>Rapport</i> https://www.moncton.ca/Assets/Residants+French/Environnement+French/Strat%3C3\$a9gie+d\$!27adaptation+aux+changement+climatiques.pdf</p>
<p>Mesures d'adaptation aux changements climatiques pour la région du Grand Moncton</p> <p>Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique</p> <p>Décembre 2011</p>	<p><i>Site Web</i> https://atlanticadaptation.ca/fr/islandora/object/acasa%3A551</p>
<p>Construction and Analysis of Flood Risk Maps for Select Coastal Communities in Nova Scotia</p> <p>Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique</p> <p>2011</p>	<p><i>Site Web</i> https://wet.researchspaces.ca/fr/islandora/object/acasa%3A530</p> <p><i>Rapport</i> https://wet.researchspaces.ca/fr/islandora/object/acasa%3A448</p>
<p>The Economic Impacts of the Weather Effects of Climate Change on Communities</p> <p>Préparé pour le Bureau d'assurance du Canada.</p> <p>Mai 2015</p>	<p><i>Site Web</i> http://www.ibc.ca/nb/resources/media-centre/media-releases/new-study-estimates-future-costs-of-climate-change</p> <p><i>Rapport</i> http://assets.ibc.ca/Documents/Studies/IBC-The-Economic-Impacts.pdf</p>
<p>Halifax Harbour Extreme Water Levels in the Context of Climate Change: Scenarios for a 100- Year Planning Horizon</p> <p>Commission géologique du Canada</p> <p>2009</p>	<p><i>Site Web</i> http://publications.gc.ca/site/fra/9.821491/publication.html</p> <p><i>Rapport</i> http://publications.gc.ca/collections/collection_2016/rn-can-nrcan/M183-2-6346-eng.pdf</p>

<p>Flood Risk Mapping Studies / Public Information Maps - Climate Change Adaptation</p> <p>Ministère de l'Environnement et Changement climatique de Terre-Neuve-et-Labrador</p> <p>2012 et 2013</p> <p>Les zones d'étude comprennent :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Municipalité de Stephenville • Municipalité de Stephenville Crossing/Black Duck Siding • Région de Shearstown/de Bay Roberts • Région de Goulds et Petty Harbour • Ville de Logy Bay/Middle Cove/Outer Cove • Municipalité de Corner Brook/Petrie's Brook • Ville de Portugal/Cove St. Philips 	<p><i>Site Web</i></p> <p>http://www.mae.gov.nl.ca/waterres/flooding/frm.html</p> <p><i>Brochure</i></p> <p>http://www.mae.gov.nl.ca/waterres/flooding/FRMS_Brochure.pdf</p>
<p>Voie navigable Trent-Severn : Étude sur la gestion de l'eau 2011 de l'évaluation de l'approche actuelle en matière de gestion de l'eau</p> <p>Commandé par Parcs Canada.</p> <p>2012</p>	<p><i>Site Web</i></p> <p>https://www.pc.gc.ca/fr/lhn-nhs/on/trentsevern/info/gestion-eau-water-management/etude-gestion-eau-water-management-study</p> <p><i>Rapport</i></p> <p>Sur demande, voir le site Web.</p>
<p>British Columbia Lower Mainland Flood Management Strategy: Phase 1 Results & Next Steps</p> <p>Préparé par le Fraser Basin Council.</p> <p>2016</p>	<p><i>Site Web</i></p> <p>http://www.fraserbasin.bc.ca/water_flood.html</p> <p><i>Rapport</i></p> <p>https://www.fraserbasin.bc.ca/Library/Water_Flood_Strategy/Simulating_Effects_of_Sea_Level_Rise_and_Climate_Change_on_Fraser_Flood_Scenarios_Final_Report.pdf</p>

<p>Professional Practice Guidelines: Legislated Flood Assessments in a Changing Climate in BC</p> <p>Association of Professional Engineers & Geoscientists of British Columbia</p> <p>2012</p>	<p><i>Site Web</i> https://www.egbc.ca/Practice-Resources/Professional-Practice-Guidelines</p> <p><i>Rapport</i> https://www.egbc.ca/getmedia/18e44281-fb4b-410a-96e9-cb3ea74683c3/APEGBC-Legislated-Flood-Assessments.pdf.aspx</p>
<p>Flood Mapping in BC</p> <p>Association of Professional Engineers & Geoscientists of British Columbia</p> <p>2016</p>	<p><i>Rapport</i> https://www.egbc.ca/getmedia/8748e1cf-3a80-458d-8f73-94d6460f310f/APEGBC-Guidelines-for-Flood-Mapping-in-BC.pdf.aspx</p>
<p>City of Surrey Coastal Flood Adaptation Strategy</p> <p>Préparé par la ville de Surrey.</p> <p>À terminer d'ici mars 2018</p>	<p><i>Site Web</i> http://www.surrey.ca/city-services/19888.aspx</p>