

## NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

### **Lignes directrices pour l'évaluation des risques d'inondation côtière pour les applications de conception de bâtiments et d'infrastructures : soutenir la résilience aux inondations sur les côtes canadiennes**

Murphy, Enda; Lyle, Tamsin; Wiebe, Josh; Hund, Silja V.; Davies, Mike; Williamson, Derek

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

<https://doi.org/10.4224/40003696>

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

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=5e619226-d6ff-417e-84a8-a722f2a26a23>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=5e619226-d6ff-417e-84a8-a722f2a26a23>

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

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

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

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

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

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

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

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

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

**CMRC·MRC**

# LIGNES DIRECTRICES SUR L'ÉVALUATION DES RISQUES D'INONDATION CÔTIÈRE POUR LA CONCEPTION DE BÂTIMENTS ET D'INFRASTRUCTURES

●●● Soutenir la résilience aux inondations sur les côtes canadiennes



Conseil national de  
recherches Canada

National Research  
Council Canada

**Canada**

© (2020) Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le Conseil national de recherches du Canada.

La reproduction partielle ou entière de la présente publication, sous quelque forme que ce soit, est interdite sans l'autorisation de l'éditeur.

Papier : N° de cat. NR16-333/2020F · ISBN 978-0-660-37619-6  
PDF : N° de cat. NR16-333/2020F-PDF · ISBN 978-0-660-37618-9

*NRC-CNRC*

# **Lignes directrices sur l'évaluation des risques d'inondation côtière pour la conception de bâtiments et d'infrastructures**

**Auteurs : Enda Murphy<sup>1</sup>, Tamsin Lyle<sup>2</sup>, Josh Wiebe<sup>3</sup>,  
Silja V. Hund<sup>2</sup>, Mike Davies<sup>4</sup>, Derek Williamson<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Conseil national de recherches Canada – Centre de recherche en génie océanique, côtier et fluvial

<sup>2</sup> Ebbwater Consulting Inc.

<sup>3</sup> W. F. Baird & Associates Coastal Engineers Ltd.

<sup>4</sup> Coldwater Consulting Ltd.

## Préface

Il s'agit de la première édition (ébauche) des *Lignes directrices sur l'évaluation des risques d'inondation côtière pour la conception de bâtiments et d'infrastructures*.

Les bâtiments et les infrastructures situés sur les côtes marines et les grands lacs du Canada, ainsi que les collectivités qu'ils desservent, sont vulnérables aux risques d'inondations causés par les effets combinés des marées, des ondes de tempête, des vagues et des tsunamis. Dans de nombreuses régions côtières, on s'attend à ce que les risques associés aux risques d'inondation augmentent au cours des prochaines décennies en raison du développement et de la croissance de la population, de l'élévation du niveau de la mer, de l'affaissement des terres, de la diminution de la couverture de glace de mer et, éventuellement, de l'évolution dans les régimes climatiques liés aux changements climatiques. Ce profil de risques croissant nécessitera des approches plus sophistiquées de la gestion des risques d'inondation côtière qui font appel à un plus large éventail d'options et de techniques, y compris des mesures de conception au niveau des bâtiments et des infrastructures.

Le présent document a été élaboré pour combler les lacunes des directives sur la façon d'évaluer les risques d'inondation des bâtiments et des infrastructures des régions côtières du Canada pour les applications de conception (et de modernisation). Les évaluations des risques d'inondation côtière (ERIC) fournissent un moyen de déterminer les risques (probabilité et conséquences) des inondations, en tant que première étape vitale afin de guider la prise de décision pour la conception de bâtiments et d'infrastructures résistants aux inondations. Les lignes directrices visent à informer les concepteurs de bâtiments et d'infrastructures, ainsi que les autres parties intéressées (y compris les propriétaires), des pratiques exemplaires pour mener des ERIC à l'appui de la conception résiliente. Cela vise à compléter les orientations nationales existantes et émergentes qui traitent d'autres aspects et applications de l'évaluation du risque d'inondation (p. ex. la série de lignes directrices fédérales pour la cartographie des plaines inondables) et à établir des liens avec la conception des bâtiments et des infrastructures, pour soutenir des approches plus holistiques de la réduction des risques d'inondation. On estime qu'au fil du temps, les lignes directrices permettront l'élaboration de nouvelles dispositions dans les codes du bâtiment et les normes de conception d'infrastructure du Canada dans le but d'améliorer la résilience aux inondations et d'aider à clarifier le rôle éventuel de la conception des bâtiments et des infrastructures dans le portefeuille d'outils de gestion des risques d'inondation disponibles.

En 2018, un comité consultatif a été créé pour fournir (sur une base volontaire) un examen technique et des conseils à l'appui de l'élaboration des lignes directrices, et pour assurer la coordination avec d'autres initiatives et intervenants pertinents. Collectivement, les membres possèdent une vaste expertise dans divers domaines pertinents pour l'évaluation des risques d'inondation côtière (analyse des risques, génie côtier, océanographie, science du climat, dangers naturels, génie municipal et intervention d'urgence), une connaissance des défis distincts auxquels sont confrontées chacune des quatre régions côtières du Canada (Arctique, Atlantique, Réseau Grands Lacs-Saint-Laurent et Pacifique) et des pratiques en conception de bâtiments/infrastructures. Le comité comprend des représentants de divers paliers de gouvernement, du milieu universitaire et du secteur privé.

Les présentes lignes directrices à l'état d'ébauche visent à promouvoir la discussion et l'échange d'idées sur la recherche des pratiques exemplaires pour évaluer et traiter les risques d'inondation côtière pour les bâtiments et les infrastructures, et finalement les collectivités, partout au Canada. Cela nécessitera la participation d'un plus grand nombre de groupes intéressés et de professionnels qui pourraient être invités à participer, dans un délai pratique, à l'élaboration de ce projet. On s'attend à ce que le document évolue

avec le temps, qu'il soit mis à jour périodiquement ou intégré dans des lignes directrices, codes ou normes plus holistiques pour la gestion des risques d'inondation et la conception des bâtiments/infrastructures.

L'élaboration du présent document d'orientation a été rendue possible, en partie, grâce au soutien financier d'Infrastructure Canada et du Conseil national de recherches du Canada, dans le cadre du projet d'immeubles résilients aux changements climatiques et d'infrastructures publiques de base dans le cadre du Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques.

## Résumé

Plus de 15 millions de personnes vivent à moins de 20 km des côtes marines et des Grands Lacs du Canada. Les bâtiments et les infrastructures sur lesquels ils dépendent sont vulnérables aux risques d'inondation côtière résultant des niveaux d'eau extrêmes, des vagues, des tsunamis et d'autres facteurs contributifs. Les risques associés aux risques d'inondation côtière augmentent au fil du temps, en raison du développement et de la croissance démographique dans les zones côtières, et des effets du climat, tels que l'élévation du niveau de la mer dans le monde. Ces préoccupations croissantes incitent à repenser en profondeur la façon dont les risques d'inondation côtière peuvent être mieux gérés au Canada, y compris la façon dont les pratiques de conception des bâtiments et des infrastructures peuvent être améliorées pour soutenir les objectifs de résistance.

Les présentes lignes directrices s'appliquent aux évaluations des risques d'inondation côtière pour les applications de conception de bâtiments et d'infrastructures (y compris la conception de modernisation) au Canada. Le document est destiné à informer et à fournir une référence technique pour une grande variété d'utilisateurs intéressés par la conception de bâtiments et d'infrastructures dans des zones pouvant être exposées aux risques d'inondation côtière dans les conditions actuelles et/ou futures. Les lignes directrices préconisent une évolution vers des approches d'analyse et de conception basées sur les risques pour la résilience aux inondations, et identifient les éléments suivants :

- concepts clés et terminologie pertinente pour comprendre et réaliser des évaluations des risques d'inondation côtière pour appuyer la conception des bâtiments et des infrastructures;
- un cadre et une méthodologie possibles pour mener des évaluations du danger et des risques d'inondation côtière pour éclairer la conception et la réhabilitation des bâtiments et des infrastructures dans les zones pouvant être exposées aux risques d'inondation côtière;
- différents niveaux d'analyse qui peuvent être utilisés comme base pour les évaluations du risque et les circonstances dans lesquelles ils doivent être appliqués;
- des suggestions pour une participation efficace des intervenants, des partenaires et du public dans le processus d'évaluation des risques d'inondation côtière;
- des recommandations pour l'établissement de critères de conception fondés sur les risques pour les bâtiments et les infrastructures;
- des exigences en matière de données et sources de données et d'informations à l'appui des évaluations des risques d'inondation côtière;
- des méthodologies et considérations clés pour évaluer les risques d'inondation côtière;
- le rôle de la pratique de conception de bâtiments et d'infrastructures dans le portefeuille d'outils et de stratégies disponibles pour faire face aux risques d'inondation côtière dans un climat en évolution.

Bien que ce ne soit pas l'objet des présentes lignes directrices, certaines informations générales sur les approches stratégiques de la gestion des risques d'inondation côtière sont fournies. Ces informations sont fournies pour illustrer comment les informations dérivées d'une évaluation des risques d'inondation côtière peuvent être utilisées pour soutenir la conception de bâtiments et d'infrastructures dans le contexte plus large de la gestion, de l'atténuation des risques d'inondation et de l'adaptation à ceux-ci. Des efforts ont également été déployés pour identifier les lacunes et les besoins futurs pour soutenir les évaluations des risques d'inondation côtière pour les applications de conception, qui comprennent :

- l'élargissement des ensembles de données sur les dangers (y compris une couverture spatiale et temporelle améliorée du niveau des eaux, des vagues et d'autres mesures de paramètres);
- l'amélioration des ensembles de données sur les fonctions de vulnérabilité-risque, qui permettraient de prendre en compte correctement dans les évaluations du risque (i) les avantages et les performances des différentes caractéristiques structurelles, des matériaux et des techniques de construction; (ii) les différences régionales dans les risques et les types de construction;
- de nouvelles dispositions dans les codes du bâtiment et les normes de conception des infrastructures pour répondre aux objectifs de résilience aux inondations et pour permettre l'intégration des pratiques de gestion des risques d'inondation (et éventuellement multi-risques) avec les codes et les normes.

# Table des matières

.....	i
Préface.....	ii
Résumé.....	v
Table des matières.....	vii
Figures.....	xii
Glossaire.....	xiv
Acronymes.....	xxi
Membres du Comité consultatif.....	xxiv
Remerciements.....	xxv
1 Présentation.....	26
1.1 Portée et objet.....	26
1.1.1 Généralités.....	26
1.1.2 Utilisateurs/public.....	26
1.1.3 Applicabilité.....	26
1.1.4 Exclusions.....	27
1.2 Suggestions sur l'utilisation du présent document.....	27
1.3 Directives connexes.....	29
2 Qu'est-ce que le risque d'inondation?.....	30
2.1 Risque.....	30
2.2 Risque d'inondation côtière.....	31
2.3 Le risque en tant que concept dynamique.....	32
2.4 Concepts de probabilité de danger.....	33
2.4.1 Probabilités de dépassement annuelles.....	34
2.4.2 Probabilité d'occurrence.....	35
3 Cadre d'évaluation des risques d'inondation côtière (ERIC).....	37
4 Participation des intervenants, des partenaires et du public.....	39
4.1 La valeur de la participation des intervenants, des partenaires et du public.....	40
4.2 Niveaux de mobilisation.....	40
4.3 Mobilisation des Autochtones.....	41
4.4 Étapes à la mobilisation des intervenants.....	41
4.4.1 Définir le contexte et l'objectif.....	41
4.4.2 Identifier les intervenants et les décideurs.....	41
4.4.3 Collaboration avec les intervenants.....	42

4.4.4 Documenter les activités et rendre compte.....	43
4.5 Mise en œuvre de la mobilisation .....	43
5 Critères de conception fondés sur les risques pour les bâtiments et les infrastructures dans les zones côtières inondables .....	44
5.1 Codes, normes, règlements et lignes directrices canadiens .....	45
5.1.1 Codes .....	45
5.1.2 Normes.....	46
5.1.3 Règlements .....	47
5.1.4 Lignes directrices .....	48
5.2 Exemples internationaux.....	50
5.3 Recommandations de conception basées sur les risques.....	53
5.3.1 Concevoir pour atteindre les objectifs de planification stratégique et de gestion des risques ..	53
5.3.2 Passer à une approche de conception basée sur les risques .....	54
5.3.3 Conception tenant compte de la criticité des bâtiments/infrastructures .....	54
5.3.4 Conception tenant compte des critères environnementaux.....	58
5.3.5 Conception selon la tolérance au risque.....	58
5.3.6 Conception permettant d'atténuer les risques résiduels au niveau du bâtiment/de l'infrastructure .....	59
5.3.7 Conception pour un risque futur dynamique (y compris l'élévation du niveau de la mer) .....	60
5.3.8 Conception pour plusieurs dangers naturels .....	62
5.3.9 Intégrer la conception dans des stratégies plus larges de gestion des risques d'inondation côtière .....	62
6 Réunion des données et analyse des lacunes .....	64
6.1 Données sur le niveau d'eau .....	66
6.1.1 Données de niveau de l'eau disponibles .....	66
6.1.2 Acquisition de données de niveaux d'eau.....	70
6.1.3 Contrôle de la qualité des données de niveaux d'eau .....	70
6.2 Données météorologiques .....	72
6.2.1 Données météorologiques disponibles .....	72
6.2.2 Acquisition de données météorologiques .....	73
6.2.3 Contrôle de la qualité des données météorologiques.....	73
6.3 Données sur la glace de mer/lac .....	74
6.3.1 Données de glace disponibles .....	75
6.3.2 Acquisition de données sur les glaces.....	75
6.3.3 Contrôle de la qualité des données sur les glaces .....	76
6.4 Données sur les vagues.....	76

6.4.1	Données sur les vagues disponibles .....	77
6.4.2	Acquisition de données sur les vagues.....	80
6.4.3	Contrôle de la qualité des données sur les vagues .....	80
6.5	Données sur les tsunamis.....	80
6.5.1	Données disponibles sur les tsunamis.....	80
6.5.2	Acquisition de données sur les tsunamis.....	81
6.5.3	Contrôle de la qualité des données sur les tsunamis .....	81
6.6	Données bathymétriques et topographiques .....	82
6.6.1	Données bathymétriques et topographiques disponibles .....	82
6.6.2	Acquisition de données bathymétriques et topographiques .....	83
6.6.3	Contrôle de la qualité des données bathymétriques et topographiques.....	83
6.7	Imagerie aérienne .....	84
6.7.1	Imagerie aérienne disponible.....	85
6.7.2	Acquisition de données d'imagerie aérienne .....	85
6.7.3	Contrôle de la qualité des images aériennes.....	85
6.8	Projections des changements climatiques.....	85
6.8.1	Niveaux de la mer et des lacs.....	87
6.8.2	Glace de mer et de lac.....	88
6.8.3	Ondes de tempête et vagues extrêmes.....	88
6.8.4	Données du modèle climatique mondial et régional .....	89
6.9	Données de bâtiment et d'infrastructure .....	89
6.9.1	Données disponibles sur les bâtiments et les infrastructures.....	89
6.9.2	Acquisition de données de bâtiment et d'infrastructure .....	90
6.9.3	Contrôle de la qualité des données des bâtiments et des infrastructures .....	90
6.10	Fonctions de dommages causés par les inondations.....	91
6.10.1	Données disponibles sur les dommages dus aux inondations.....	91
6.10.2	Acquisition de données sur les dommages causés par les inondations .....	93
6.10.3	Contrôle de la qualité des données sur les dommages causés par les inondations .....	94
6.11	Données sur les conséquences socio-culturelles, environnementales et indirectes.....	94
6.11.1	Données disponibles sur les conséquences socio-culturelles, environnementales et indirectes .....	94
6.11.2	Acquisition de données sur les conséquences socio-culturelles, environnementales et indirectes.....	97
6.11.3	Contrôle de la qualité des données sur les conséquences socio-culturelles, environnementales et indirectes.....	97
7	Sélection des niveaux d'analyse appropriés.....	99

7.1 Facteurs pertinents .....	99
7.2 Niveaux et dimensions de l'analyse.....	101
7.2.1 Analyse quantitative (en comparaison avec l'analyse qualitative).....	101
7.2.2 Approche à scénario unique ou approche à scénarios multiples .....	102
7.2.3 Prise en compte du risque comme concept dynamique .....	102
7.2.4 Risque lié aux actifs ou risque systémique.....	103
7.2.5 Niveaux d'analyse dans les étapes du processus d'évaluation des risques .....	103
7.3 Sélection d'un niveau d'analyse.....	104
8 Évaluation du danger .....	107
8.1 Cadre et considérations générales .....	107
8.2 Identification des dangers .....	108
8.2.1 Sources .....	109
8.2.2 Voies d'accès .....	112
8.3 Définition des paramètres de danger.....	113
8.4 Modélisation et analyse des dangers.....	114
8.4.1 Niveaux d'eau .....	114
8.4.2 Vagues .....	124
8.4.3 Tsunamis.....	129
8.4.4 Glace .....	133
8.4.5 Écoulements fluviaux (zones estuariennes) .....	134
8.4.6 Probabilités conjointes/analyse multivariée .....	134
8.5 Effets des changements climatiques et non-stationnarité .....	136
8.5.1 Scénarios de changements climatiques .....	136
8.5.2 Gérer l'incertitude dans les projections.....	137
8.6 La cartographie des risques.....	140
9 Évaluation de la vulnérabilité et des conséquences .....	144
9.1 Rôle de l'évaluation de la vulnérabilité et des conséquences dans la pratique de conception.....	144
9.2 Approche générale.....	145
9.3 Évaluation de l'exposition.....	145
9.4 Évaluation de la vulnérabilité (ou de la fragilité) .....	146
9.5 Évaluer les conséquences .....	146
9.5.1 Inondations de tempête côtière.....	147
9.5.2 Tsunamis.....	148
9.5.3 Dommages directs aux bâtiments.....	148
9.5.4 Dommages directs aux infrastructures .....	149

9.5.5 Conséquences socio-culturelles, environnementales et économiques indirectes.....	150
9.6 Présentation d'informations sur la vulnérabilité et les conséquences .....	151
10 Évaluation du risque.....	153
10.1 Dommages annuels moyens .....	153
10.2 Cartes, tableaux et figures des risques.....	154
10.3 Grilles des risques.....	157
11 Gestion, atténuation et adaptation des risques .....	159
12 Mot de la fin.....	163
13 Références.....	164

# Figures

Figure 1. Cadre d'évaluation des risques d'inondation côtière. .... 29

Figure 2. Le risque en fonction de la conséquence et de la probabilité (Ebbwater Consulting Inc., 2019).  
..... 30

Figure 3. Le risque en fonction de la probabilité et des conséquences - risque de nuisance et de catastrophe  
(Ebbwater Consulting Inc., 2019)..... 31

Figure 4. Matrice de risque illustrative pour certains dangers naturels (Ebbwater Consulting Inc., 2019). 32

Figure 5. Risque dynamique combiné aux changements climatiques et à un développement accru  
(Ebbwater Consulting Inc., 2019)..... 33

Figure 6. Exemple d'ajustement de la distribution des valeurs extrêmes (courbe noire pleine) aux  
événements historiques d'ondes de tempête (points bleus)..... 34

Figure 7. Probabilités d'occurrence pour diverses PDA et durée de vie théorique/de service..... 36

Figure 8. Cadre pour l'ERIC..... 38

Figure 9. Exemple de calendrier pour s'adapter aux inondations côtières avec élévation du niveau de la  
mer. Figure adaptée d'Ebbwater Consulting et Compass Resource Management (2018), avec  
autorisation de réimpression..... 61

Figure 10. Inventaire des stations limnimétriques sur les côtes marines et du réseau Saint-Laurent-Grands  
Lacs du Canada. .... 67

Figure 11. Inventaire des stations limnimétriques pour les eaux intérieures canadiennes. .... 68

Figure 12. Points de grille de simulations rétrospectives de vagues..... 79

Figure 13. Changement relatif médian projeté du niveau de la mer d'ici 2100, par rapport à la période  
de 1986 à 2005, pour le scénario de RCP 8.5 à émissions élevées (d'après Atkinson et al., 2016). 87

Figure 14. Changement relatif projeté du niveau de la mer pour Halifax, Vancouver et Iqaluit, par rapport à  
la période de 1986 à 2005 (James et al., 2015), pour quatre scénarios de trajectoire de concentration  
représentative (RCP), et pour un scénario augmenté (triangle vert) prévoyant une augmentation du  
niveau de la mer additionnelle de 65 cm pour 2100 s'ajoutant à la projection médiane du scénario  
RCP 8.5 à émissions élevées..... 88

Figure 15. Cadre d'évaluation des risques d'inondation côtière pour la conception des bâtiments et des  
infrastructures. .... 107

Figure 16. Vagues de tempête débordant de la route en remblai à Cow Bay, Halifax, Nouvelle-Écosse  
(photo : M. Davies)..... 109

Figure 17. Impact, remontée et débordement de la vague à Stoney Creek, lac Ontario (photo : M. Davies).  
..... 110

Figure 18. Vagues frappant l'ouvrage de protection longitudinal sur la plage d'Ambleside à West Vancouver  
à marée haute, inondant le parc John Lawson local, le 17 décembre 2012 (photo : Mark Van  
Manen/PNG). .... 111

Figure 19. Inondation directe à North Rustico, Île-du-Prince-Édouard (photo : D. Jardine)..... 113

Figure 20. Probabilité de niveaux d'eau élevés (marée + onde de tempête) au cours des années  
sélectionnées. .... 118

Figure 21. Interaction marée-onde à Charlottetown (selon Bernier et Thompson, 2007). .... 122

Figure 22. Carte probabiliste des risques de tsunami pour le Canada (remontée de la vague de plus de 3 m  
en 50 ans) pour un dépassement sur une remontée de la vague  $\geq 3$  m (figure 18 de Leonard et al.,  
2012). .... 132

Figure 23. Les côtes canadiennes (bleues) sensibles aux vagues locales déclenchées par des glissements  
de terrain subaériens ou sous-marins ou par le vêlage glaciaire (figure 19 de Leonard et al., 2012).  
..... 133

Figure 24. Caractéristiques des quatre scénarios RCP (van Vuuren et al., 2011).....	137
Figure 25. Trajectoires des émissions de carbone et changement de température mondiale au cours du 21 <sup>e</sup> siècle pour une gamme de scénarios d'émissions (Hausfather et Peters, 2020). Les politiques d'émissions de carbone promises (ligne jaune) et la trajectoire projetée actuelle basée sur les politiques actuelles (ligne rouge) jusqu'en 2040 sont illustrées, où il est indiqué qu'un scénario d'émissions intermédiaires peut convenir comme scénario « le plus probable ».....	139
Figure 26. Exemple de carte d'inondation pour Victoria, Île-du-Prince-Édouard (photo : M. Davies, 2019). .....	141
Figure 27. Exemple de carte de profondeur d'inondation pour les îles de Toronto (photo : Baird, 2019). .....	142
Figure 28. Exemple de carte montrant les limites de risque d'inondation (ligne bleue continue), les limites de risque d'érosion (ligne jaune continue) et le niveau d'inondation pour une PDA de 1 % (ligne bleue en pointillés) (photo : Baird, 2019). ....	143
Figure 29. Types de conséquences des inondations (adapté de l'UNDRR avec des contributions supplémentaires de Messner et al., 2006, et de RNCAN, 2017).....	147
Figure 30. Exemple de création de cartes de vulnérabilité (adapté de Wiebe et Cox, 2014). ....	152
Figure 31. Relation entre la PDA et les dommages (à gauche) et la courbe de densité des risques d'inondation (à droite) (source : Olsen et al., 2015).....	154
Figure 32. Carte des risques pour l'indicateur d'économie du District de Tofino, pour 1 m d'élévation relative du niveau de la mer.....	155
Figure 33. Estimation du total des dommages financiers à différentes PDA des îles de Toronto.....	157
Figure 34. Exemple de matrice de risque d'inondation (Ebbwater Consulting Inc., 2019, CC BY-NC-ND). .....	158
Figure 35. Effet potentiel des mesures de conception des bâtiments sur la vulnérabilité d'un bâtiment résidentiel d'un étage (courbe profondeur-dommages adaptée de RNCAN, 2017).....	161
Figure 36. Hiérarchie des stratégies de gestion des risques d'inondation et mise en œuvre (adapté de Bowker et al., 2007). ....	162

# Glossaire

<b>Terme</b>	<b>Définition</b>
Adaptation	La pratique d'ajuster ou de prendre des mesures pour limiter ou réduire la vulnérabilité à l'évolution des risques. Dans le contexte des impacts des changements climatiques sur les risques d'inondation côtière, des mesures d'adaptation spécifiques pourraient inclure une meilleure gestion des zones côtières, des changements dans la planification, les permis, les codes, les normes, la conception des bâtiments/infrastructures et l'état de préparation de la société.
Tous risques	Expression renvoyant à l'ensemble des dangers, naturels ou d'origine humaine. Exemples : danger résultant d'un accident industriel, d'un événement naturel (p. ex. géologique ou météorologique), relatif à la sécurité nationale ou d'un cyberévénement.
Approche tous risques	Approche de gestion des urgences qui tient compte du fait que les mesures requises pour atténuer les effets de différents types d'urgences peuvent être similaires, peu importe la nature de l'incident ou du danger, ce qui permet d'optimiser les ressources destinées à la planification, à l'intervention et au soutien.
Probabilité de dépassement annuelle (PDA)	Probabilité ou possibilité qu'un événement dangereux d'une ampleur donnée se produise ou soit au-delà de la plage normale au cours d'une année donnée, généralement exprimée en pourcentage.
Biens exposés	Désigne les choses qui peuvent être endommagées par un danger (p. ex. les maisons, les bâtiments, les infrastructures, les biens culturels ou l'environnement).
Dommages annuels moyens	Un paramètre de risque exprimant, en termes monétaires, les dommages moyens attendus pour une année (p. ex. en raison d'inondations côtières), en tenant compte de tous les événements PDA possibles et des dommages associés.
Surélévation (abaissement) barométrique	Également appelé surélévation (abaissement) atmosphérique. La montée (ou la descente) du niveau de l'eau due aux changements de pression atmosphérique lors du passage des tempêtes. C'est une composante de l'onde de tempête.
Côte	Dans les présentes lignes directrices, les zones côtières désignent généralement les côtes marines du Canada (Arctique, Atlantique et Pacifique) et les Grands Lacs. Les lignes directrices peuvent également être utiles pour éclairer les évaluations du risque sur les rives d'autres lacs au Canada; des lacs particulièrement plus grands où certains processus physiques sont similaires aux processus océaniques.
Risque d'inondation côtière	Un événement d'inondation potentiellement dommageable (ou des événements multiples), qui peuvent causer des dommages aux bâtiments et aux infrastructures dans les régions côtières, et/ou des pertes en vies humaines, des blessures, des dommages matériels, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de

l'environnement. Les risques d'inondation côtière sont caractérisés par leur emplacement, leur intensité, leur durée, leur fréquence et leur probabilité. Les présentes lignes directrices portent principalement sur les risques d'inondation côtière et les risques liés aux processus océaniques/maritimes et lacustres, y compris les effets des marées, des niveaux d'eau extrêmes, de l'élévation relative du niveau de la mer et des vagues. Les contributions des dangers fluviaux (riverains), pluviaux (précipitations intenses), des niveaux élevés d'eau souterraine, de la glace des rivières et des dangers d'érosion ne sont pas traitées en détail, sauf pour mettre en évidence les circonstances et les exceptions où de tels processus peuvent avoir une influence importante sur les risques d'inondation côtière pour les bâtiments et les infrastructures.

Risque d'inondation côtière	La combinaison de la probabilité d'un événement de risque d'inondation côtière (ou d'événements multiples) et des conséquences négatives associées.
Dommages au contenu	Les dommages au contenu d'un bâtiment, tels que les appareils électroménagers, les meubles, l'électronique, etc.
Infrastructures essentielles (IE)	Processus, systèmes, installations, technologies, réseaux, actifs et services essentiels assurant la santé, la sûreté, la sécurité et le bien-être économique des Canadiens ainsi que le fonctionnement efficace du gouvernement.
Dommages	Les répercussions/conséquences financières et non financières d'un événement dangereux. Pour les bâtiments et les infrastructures, cela peut inclure des dommages structurels ou une perte de rendement, ou des dommages dus à une perte de service/de fonctionnement.
Critères de conception	Les objectifs explicites qui doivent être atteints par un bâtiment ou un actif ou un système d'infrastructure, définissant à quoi ressemble le succès d'une nouvelle construction ou d'une rénovation.
Modèle altimétrique numérique	Une représentation numérique du relief composée d'un tableau de valeurs d'élévation par rapport aux référents altimétriques communs et correspondant à une grille régulière de points sur la surface de la Terre. Ces élévations peuvent être des élévations au sol ou à surface réfléchissante.
Modèle numérique de surface (MNS)	Une représentation de la surface de la Terre, y compris la végétation et les structures artificielles. Le modèle numérique de surface (MNS) indique la hauteur de la végétation, des couvertures et des structures par rapport aux référents altimétriques.
Modèle numérique de terrain (MNT)	Une représentation de la surface du sol nu sans aucun objet, comme la végétation et les bâtiments. Le modèle numérique de terrain (MNT) indique la hauteur du sol par rapport aux données des référents altimétriques.
Dommages directs	Les coûts financiers pour réparer ou remplacer un actif à son état d'avant l'inondation. Les dommages directs comprennent les dommages à la structure et au contenu.

Les dommages directs, par unité de surface de plancher, sont estimés en fonction du classement de la structure et de la profondeur de l'eau. Des facteurs d'ajustement peuvent être utilisés pour tenir compte de la durée des crues, de la teneur en sédiments, etc.

Catastrophe	Une perturbation grave du fonctionnement d'une collectivité ou d'une société à quelque échelle que ce soit en raison d'événements dangereux interagissant avec les conditions d'exposition, de vulnérabilité et de capacité, entraînant un ou plusieurs des éléments suivants : pertes et impacts sur les personnes, matériels, économiques et environnementaux.
Gestion des risques de catastrophes	L'application de politiques et de stratégies de réduction des risques de catastrophe pour prévenir de nouveaux risques de catastrophe, réduire les risques de catastrophe existants et gérer les risques résiduels, contribuant au renforcement de la résilience et à la réduction des pertes dues aux catastrophes.
Réduction des risques liés aux catastrophes	Le concept et les pratiques visant à réduire les risques de catastrophe au moyen de mesures systématiques d'analyse et de réduction des facteurs déterminants des catastrophes. La réduction des risques de catastrophe comprend des disciplines telles que l'atténuation et la préparation aux catastrophes.
Probabilité d'occurrence	La probabilité qu'un événement avec une PDA définie survienne (ou soit au-delà de la plage normale) sur un horizon temporel prescrit, comme la durée de vie nominale d'un bâtiment ou d'un actif d'infrastructure.
Érosion	L'élimination des sédiments par, notamment, le vent ou l'eau en mouvement.
Exposition	<p>La présence de personnes, d'infrastructures, de logements ou d'autres actifs à risque (ou de parties de ceux-ci) dans des endroits susceptibles d'être affectés par des dangers.</p> <p>L'exposition se produit lorsqu'un actif à risque se trouve dans une région où un danger peut se produire. Par conséquent, tout comme il existe différents niveaux de danger (différentes PDA), il existe différents niveaux d'exposition. L'exposition n'implique pas nécessairement des répercussions négatives. Exemple : des parties ou la totalité des maisons, des écoles et du bétail dans une zone sujette aux risques d'inondation.</p>
Inondations	La présence d'eau de surface sur des terres normalement sèches.
Protection contre les inondations	Toute combinaison d'ajouts, de changements ou d'ajustements structurels ou non structurels aux structures qui réduisent ou éliminent les dommages causés par les inondations aux bâtiments, aux infrastructures et à leur contenu. Les mesures de protection totale contre les inondations empêchent la pénétration d'eau dans l'enveloppe d'un bâtiment ou d'une infrastructure. Les mesures de protection partielle contre les inondations empêchent ou offrent une résistance aux dommages causés par les inondations tout en

permettant aux eaux de crue de pénétrer dans l'enveloppe du bâtiment ou de l'infrastructure.

Fréquence des inondations	Nombre d'occurrences d'événements d'inondation au cours d'une période déterminée. Souvent exprimé comme la probabilité de dépassement annuelle.
Danger	Un événement physique pouvant causer des dommages, ou un phénomène ou une activité humaine qui peut causer une perte de vie ou des blessures, des dommages aux biens, une perturbation sur le plan social ou économique ou une dégradation de l'environnement. Les dangers peuvent inclure des conditions latentes qui peuvent représenter des menaces futures et peuvent avoir différentes origines : naturelles (géologiques, hydrométéorologiques et biologiques) ou induites par des processus humains.
Évaluation du danger	Acquérir des connaissances sur la nature, l'étendue, l'intensité, la durée, la fréquence et la probabilité qu'un danger se produise.
Pleine mer supérieure, grande marée	La moyenne des plus hautes des pleines mers, une pour chaque année d'une prédiction de marées sur 19 ans.
Dommages indirects	Coût financier engagé dans le cadre d'un événement d'inondation. Les dommages indirects comprennent la lutte/l'atténuation contre les inondations, l'évacuation, le logement temporaire, les pertes d'emplois et de productivité, le nettoyage après les inondations, etc. Les zones en dehors du risque d'inondation peuvent également subir des dommages indirects, tels que des perturbations des activités.
Dommages intangibles	Les effets non financiers ou autrement non quantifiables dus à une inondation, y compris les effets sur la collectivité, la santé et l'environnement. Les zones en dehors du risque d'inondation peuvent également subir des dommages intangibles, tels que ceux dus au déversement et au transport d'un matériau nocif.
Inondation	Inondation ou envahissement des terres résultant de niveaux d'eau dépassant les altitudes locales du sol.
Probabilité	Un concept général relatif à la probabilité qu'un événement se produise. La probabilité est généralement exprimée comme une probabilité ou une fréquence d'un danger d'une ampleur ou d'une gravité donnée se produisant ou étant dépassée au cours d'une année donnée. Elle est basée sur la fréquence moyenne estimée, mesurée ou extrapolée à partir d'enregistrements sur un grand nombre d'années, et est généralement exprimée comme la probabilité qu'un danger particulier soit égalé ou dépassé au cours d'une année donnée (p. ex. probabilité de dépassement annuelle).
Détection et télémétrie par ondes lumineuses (LIDAR)	Méthode de télédétection qui utilise la lumière sous la forme d'un laser pulsé pour mesurer des portées (distances variables) à la Terre.
Pertes	Équivalentes aux dommages qui surviennent à la suite d'une inondation, à la fois directs et indirects, tangibles et intangibles.

Mésadaptation	Actions, ou inaction, qui peuvent conduire à une vulnérabilité ou un risque accru, ou réduire la capacité à s'adapter à l'évolution des risques.
Atténuation	<p>La pratique consistant à prendre des mesures ou à mettre en œuvre des mesures pour contrôler ou limiter le risque d'inondation, généralement en réduisant la vulnérabilité.</p> <p>Nota : Cette définition diffère de « l'atténuation des changements climatiques », qui est généralement utilisée pour désigner les efforts visant à réduire ou à prévenir les émissions de carbone.</p>
Danger naturel	Processus ou phénomène naturel pouvant entraîner des pertes en vies humaines, des blessures, d'autres effets sur la santé, des dommages matériels, la perte de moyens de subsistance et de services, des perturbations sociales et économiques ou des dommages environnementaux.
Probabilité	En statistique, mesure du risque qu'un événement ou incident survienne. Ceci est directement relié à la probabilité.
Évaluation quantitative du risque	Une évaluation du risque effectuée à l'aide de mesures de risque quantifiées ou calculées.
Risque résiduel	Le risque qui demeure même lorsque des mesures efficaces de réduction des risques sont en place.
Niveau d'eau résiduel	La différence entre le niveau de l'eau absolu ou total (mesuré par un marégraphe) et la composante astronomique (marée). Puisque les ondes de tempête représentent souvent la plus grande contribution au niveau de l'eau résiduel sur un site côtier, les termes « onde de tempête » et « niveau de l'eau résiduelle » sont parfois utilisés de manière interchangeable.
Résilience	La résilience aux catastrophes, selon le Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophe, est la capacité d'un système, d'une collectivité ou d'une société exposée aux risques de résister, d'absorber, de s'adapter aux et de corriger les effets d'un danger, en temps opportun et de manière efficace, notamment par la préservation et la restauration de ses structures essentielles et de ses fonctions de base.
Risque	La combinaison de la probabilité d'un événement dangereux et de ses conséquences négatives.
Évaluation du risque	<p>Une méthode pour déterminer la nature et l'étendue du risque en analysant les dangers potentiels et en évaluant les conditions existantes de vulnérabilité qui, ensemble, pourraient nuire aux bâtiments, aux infrastructures, aux personnes, aux biens, aux services, aux moyens de subsistance et à l'environnement dont ils dépendent.</p> <p>Les évaluations du risque (et la cartographie des risques associés) comprennent : un examen des caractéristiques techniques des dangers, telles que leur emplacement, leur intensité, leur durée, leur</p>

fréquence et leur probabilité; l'analyse de l'exposition et de la vulnérabilité, y compris les dimensions physique, sociale, sanitaire, économique et environnementale; l'évaluation de l'efficacité des capacités d'adaptation existantes et alternatives, par rapport aux scénarios de risque probables. Cette série d'activités est parfois appelée processus d'analyse des risques.

Gestion des risques	L'approche et la pratique systématiques de gestion de l'incertitude pour réduire le plus possible les pertes et dommages potentiels.
Tolérance aux risques	La volonté d'assumer des risques. Cela varie selon les dangers, les personnes et le temps.
Affouillement	Érosion des sédiments (p. ex. sous l'effet des inondations ou des vagues), généralement à proximité d'une structure ou d'un bâtiment.
Onde de tempête	L'augmentation (ou la diminution) du niveau de repos sur un site côtier en raison des conditions météorologiques. Les ondes de tempête peuvent inclure la hausse (ou la baisse) liée au vent et à la surélévation (l'abaissement) barométrique.
Dommages physiques	Dommages aux systèmes physiques d'un bâtiment ou d'une infrastructure, tels que les murs, les planchers, les systèmes de chauffage et de refroidissement, etc.
Langue d'écume	Voir « remontée de la vague ».
Dommages tangibles	Impacts mesurables dus à une inondation.
Tsunami	Le tsunami consiste en une grande vague provoquée par un mouvement rapide et à grande échelle d'un volume d'eau. Les tsunamis peuvent être déclenchés par des tremblements de terre, des glissements de terrain, des éruptions volcaniques, des impacts de météorites, des activités humaines (p. ex. des explosions) et des phénomènes météorologiques/atmosphériques (météotsunamis).
Vulnérabilité	Les caractéristiques et les circonstances d'une collectivité, d'un système ou d'un actif qui le rendent vulnérable aux effets dommageables d'un danger.
Débordement de la vague	Lorsque la remontée de la vague dépasse la hauteur de crête d'une plage ou d'une structure côtière, l'eau s'écoule par-dessus la crête. C'est ce qu'on appelle le débordement de « paquets de mer ». Une autre forme de débordement de la vague peut se produire lorsque les vagues se brisent sur la face d'une structure côté mer, entraînant le transport de gouttelettes d'éclaboussures par-dessus la crête par leur propre élan ou le vent.
Remontée de la vague	L'élévation maximale du jet des vagues sur la rive au-dessus du niveau de la mer au repos. Il y a deux composantes à la remontée de la vague : l'élévation du niveau moyen de l'eau due à l'action des vagues (zone de déferlement des vagues) et les fluctuations autour de cette moyenne (langue d'écume). Il n'est généralement pas inclus dans la définition d'onde de tempête.

Zone de déferlement des vagues

L'augmentation du niveau d'eau moyen près du littoral qui résulte d'une pente dans le niveau d'eau requise pour équilibrer le flux terrestre de la quantité de mouvement des vagues (stress de rayonnement), généralement associée à la rupture de la vague. La zone de déferlement des vagues contribue à la remontée de la vague. Elle n'est généralement pas incluse dans la définition d'onde de tempête.

Hausse (baisse) liée au vent

L'augmentation (ou la diminution) du niveau de la mer sous le vent (ou contre le vent) se produit en raison de la contrainte de cisaillement exercée par le vent sur la surface de l'eau. C'est une composante de l'onde de tempête.

## Acronymes

DAM	Dommmages annuels moyens
PDA	Probabilité de dépassement annuelle
AIDR	Australian Institute for Disaster Resilience
ASCE	American Society of Civil Engineers
BSI	British Standards Institution
OCANEE	Outil canadien d'adaptation aux niveaux d'eau extrêmes
MNEC	Modèle numérique d'élévation du Canada
FDC	Fonction de distribution cumulative
DFN	Dynamique des fluides numérique
ERIC	Évaluation des risques d'inondation côtière
RSPC	Réanalyse du système de prévisions climatiques
CGVD SCRA) SHC	(ou Système canadien de référents altimétriques Service hydrographique du Canada
IE	Infrastructures essentielles
CIRIA	Construction Industry Research and Information Association
CORDEX	Coordinated Regional Downscaling Experiment
MAN	Modèle altimétrique numérique
MPO	Pêches et Océans Canada
MNS	Modèle numérique de surface
MNT	Modèle numérique de terrain
FEMA	(É.-U.) Federal Emergency Management Agency (organisme fédéral de la gestion des urgences)
CPLCC	Consentement préalable, donné librement et en connaissance de cause
LEG	Loi d'extremum généralisée
GFDRR	Dispositif mondial de réduction des effets des catastrophes et de relèvement
GLERL	Great Lakes Environmental Research Laboratory
GPS	Système mondial de localisation
HAT	Marée astronomique maximale

PMSGM	Pleine mer supérieure, grande marée
MANHR	Modèle altimètre numérique haute résolution
HyVSepS	Surfaces de séparation verticale hydrographique
IDF	Intensité / durée / fréquence
SRIGL	Système de référence international des Grands Lacs
OHI	Organisation hydrographique internationale
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ISO	Organisation internationale de normalisation
MPC	Méthode de probabilité conjointe
LiDAR	Détection et télémétrie par ondes lumineuses
GNL	Gaz naturel liquéfié
TMC	Tsunami maximum considéré
NMM	Niveau moyen de la mer
NARCCAP	North American Regional Climate Change Assessment Program
NAVD 88	Système nord-américain de référents altimétriques de 1988
NFIP	National Flood Insurance Program - États-Unis
EPPNL	Eau peu profonde non-linéaire
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration - États-Unis
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
RNCan	Ressources naturelles Canada
MRNFO	Ministère des Richesses naturelles et des Forêts de l'Ontario
EPRT	Étude probabiliste des risques de tsunami
RCP	Profil représentatif d'évolution de concentration
ERNM	Élévation relative du niveau de la mer
BDS	Bathymétrie par satellite
SEI	Structural Engineering Institute
SpM	Structure à partir du mouvement
ENM	Élévation du niveau de la mer
Mandat	Mandat
UAV	Véhicule aérien sans pilote

NU	Nations Unies
DNUDPA	Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones
UNDRR	Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophes
UNISDR	Ancien acronyme de Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophes (voir UNDRR)
USACE	Army Corps of Engineers (É.-U.)
WIS	Wave Information Study
RHC	Relevés hydrologiques du Canada

## Membres du Comité consultatif

Brent Baron	Services aux Autochtones Canada
Carrie Baron	Ville de Surrey, Colombie-Britannique
Natacha Bernier	Environnement et Changement climatique Canada
Jasmin Boisvert	Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux du Nouveau-Brunswick
Robin Bourke	Ressources naturelles Canada
Andrew Cornett	Conseil national de recherches du Canada/Université d'Ottawa
Blair Greenan	Pêches et Océans Canada/Institut océanographique de Bedford
Nicky Hastings	Ressources naturelles Canada
Sara Holzman	Secrétariat du changement climatique, ministère de l'Environnement, gouvernement du Nunavut
Thomas James	Ressources naturelles Canada
M. Naveed Khaliq	Conseil national de recherches du Canada
Tania Lado Insua	Université de Victoria (anciennement Oceans Network Canada)
Steve Litke	Conseil du bassin du Fraser
Gavin Manson	Ressources naturelles Canada
Ryan Mulligan	Université Queen's
Ioan Nistor	Université d'Ottawa
Keith Orchiston	District de Tofino, Colombie-Britannique
Kala Pendakur	Conseil canadien des normes
Harshan Radhakrishnan	Engineers and Geoscientists British Columbia
Jesal Shah	Gestion des urgences Colombie-Britannique
Robert White	Gestion des urgences Colombie-Britannique

## Remerciements

Les auteurs remercient tous les collaborateurs pour leur contribution, leur soutien et leurs conseils lors de l'élaboration des présentes lignes directrices. Nous remercions l'équipe de gestion du projet d'immeubles résilients aux changements climatiques et d'infrastructures publiques de base (IRCCIPB) et les équipes techniques du Centre de recherche en construction du Conseil national de recherches de leur soutien à l'effort des lignes directrices de diverses manières, en particulier Marianne Armstrong, Sarah Gagné, Fiona Hill, Johanne Lavictoire et Ahmed Attar. Nous remercions aussi Karen Hagar, Mallory Kroker et Maryse Proulx du Centre de recherche en génie océanique, côtier et fluvial du Conseil national de recherches de leur soutien administratif. Anne Barker, Seth Bryant, David Didier, Mike Currie, Donald Forbes, Bob Frederking, Mitchell Hahn, Carolyn Mann, Irvin Marucelj, Diane Meehan, Karen Savage, John Sommerville, Denise Sudom et Jackie Yip ont aussi fourni des commentaires, modifications et suggestions utiles pour améliorer diverses sections des lignes directrices. Nicole Couture de Ressources naturelles Canada a fourni une contribution utile aux premières phases de l'élaboration des lignes directrices. Le soutien reçu du programme Infrastructure marine, énergie et ressources hydriques du Conseil national de recherches est vivement apprécié. Les lignes directrices ont été rédigées par Sarah MacKinnon de Interwoven Editing.

# 1 Présentation

## 1.1 Portée et objet

### 1.1.1 Généralités

Les présentes lignes directrices s'appliquent aux évaluations des risques d'inondation côtière pour les applications de conception de bâtiments et d'infrastructures au Canada. Les lignes directrices identifient :

- un cadre et une méthodologie possibles pour mener des évaluations du danger et des risques d'inondation côtière pour éclairer la conception et la réhabilitation des bâtiments et des infrastructures dans les zones pouvant être exposées aux risques d'inondation côtière;
- des exigences en matière de données et sources de données et d'informations à l'appui des évaluations des risques d'inondation côtière;
- des suggestions pour la mobilisation des intervenants et des partenaires;
- des recommandations pour l'établissement de critères de conception pour les bâtiments et les infrastructures afin de faire face aux risques d'inondation côtière.

### 1.1.2 Utilisateurs/public

Les présentes lignes directrices ont été rédigées à l'intention :

- des concepteurs de bâtiments et d'infrastructures dans les régions côtières du Canada (p. ex. les personnes utilisant ou adoptant le Code national du bâtiment du Canada);
- des professionnels participant à la conception de la modernisation de bâtiments et d'infrastructures pour la résilience aux inondations côtières;
- des autorités provinciales et municipales ou autres parties intéressées par les mesures de résilience aux inondations côtières pour les bâtiments et les infrastructures (p. ex. par la mise en œuvre régionale du Code national du bâtiment);
- des propriétaires et exploitants de bâtiments et d'infrastructures dans les régions côtières du Canada;
- des éducateurs aux fins du transfert des connaissances;
- des autres parties ayant un intérêt direct à comprendre ou à gérer les risques d'inondation côtière et les risques pour les bâtiments et les infrastructures.

### 1.1.3 Applicabilité

Les présentes lignes directrices s'appliquent à l'évaluation des risques d'inondation côtière pour les bâtiments et certains types d'infrastructures. Les résultats de ces évaluations visent à éclairer la conception de nouveaux bâtiments et de nouvelles infrastructures, ainsi que les mesures de modernisation des bâtiments et des infrastructures existants.

L'objectif principal du présent document d'orientation est d'évaluer les risques d'inondation côtière pour les bâtiments et certains types d'« infrastructures publiques essentielles », en particulier :

- les ponts;
- les routes;
- l'infrastructure d'approvisionnement en eau et de traitement des eaux usées;
- le transport en commun.

Dans les présentes lignes directrices, les zones côtières désignent généralement les côtes marines du Canada (Arctique, Atlantique et Pacifique) et les Grands Lacs. Les lignes directrices peuvent également être utiles pour éclairer les évaluations du risque sur les rives d'autres lacs au Canada; des lacs particulièrement plus grands où certains processus physiques sont similaires aux processus océaniques.

#### 1.1.4 Exclusions

Bien que certaines stratégies de haut niveau pour l'atténuation des risques d'inondation côtière et l'adaptation aux changements futurs aux risques d'inondation côtière soient présentées dans le présent document, l'accent principal est mis sur les pratiques exemplaires afin d'évaluer les risques d'inondation côtière pour éclairer l'atténuation et l'adaptation. Il est attendu que les mesures d'atténuation et d'adaptation seront abordées de manière plus complète dans d'autres documents d'orientation, notamment les règlements d'aménagement du territoire, les règlements locaux, les normes de conception des infrastructures et les codes du bâtiment. Néanmoins, les lignes directrices fournies dans le présent document peuvent éclairer l'élaboration ou la mise à jour des réglementations existantes et des orientations sur les mesures d'atténuation et d'adaptation.

Les considérations spécifiques pour les infrastructures non décrites comme « infrastructures publiques essentielles » à la section 1.1.3, telles que les travaux de protection communautaire contre les inondations (p. ex. digues marines), les systèmes d'eaux de ruissellement et les ports, sont exclues. Cependant, les informations présentées dans les présentes lignes directrices peuvent encore être utiles pour les intervenants intéressés par la planification et la conception de ces types d'infrastructures.

Le Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe (SIPC, 2015), dont le Canada est signataire, met l'accent sur les approches pour de multiples dangers pour évaluer et gérer les risques de catastrophe. Le champ d'application des présentes lignes directrices se limite à la présentation des pratiques exemplaires permettant d'évaluer les risques d'inondation côtière et les risques pour les bâtiments et les infrastructures, et ne prend donc pas en compte les approches à risques multiples (p. ex. les incendies de forêt, les tremblements de terre, les glissements de terrain), au-delà du fait que les dangers d'inondation côtière proviennent de sources multiples. Néanmoins, on peut s'attendre à ce que les informations dans les présentes fournissent des informations de base précieuses sur la manière dont les risques d'inondation côtière peuvent être caractérisés dans le cadre des évaluations analyses de risques liés à de multiples dangers.

Les présentes lignes directrices visent principalement les risques d'inondation côtière et les risques découlant des processus océan/mer et lac, y compris les effets des marées, des niveaux d'eau extrêmes, de l'élévation du niveau de la mer, des vagues et des tsunamis. Les facteurs contributifs des dangers fluviaux (riverains), pluviaux (précipitations intenses), des débris, des rivières/lacs/glaces de mer, des eaux souterraines, de l'hydrogéologie, des météotsunamis et des risques d'érosion ne sont pas traités en détail, sauf pour mettre en évidence certaines circonstances et exceptions où ces processus peuvent avoir une influence sur les risques d'inondation côtière pour les bâtiments et les infrastructures.

## 1.2 Suggestions sur l'utilisation du présent document

Sur la base des utilisateurs/publics cibles identifiés dans la section 1.1.2, on suppose que les utilisateurs des présentes lignes directrices ont des connaissances et une compréhension préalables de base des dangers que présentent les inondations côtières et des processus d'évaluation des risques. Il est donc peu probable que les présentes lignes directrices soient lues « d'un bout à l'autre », mais elles sont destinées à fournir une référence utile pour les informations techniques et les pratiques exemplaires en matière

d'évaluation des risques d'inondation côtière. Bien que les orientations visent à identifier les pratiques exemplaires générales, il est reconnu qu'il n'y a pas d'approche universelle. En effet, il existe une multitude de problèmes spécifiques à la région et au site et aux besoins des intervenants qui peuvent justifier d'être pris en compte lors d'une évaluation des risques d'inondation côtière, et il n'est pas possible de les aborder de manière exhaustive dans les présentes. On a donc tenté de trouver un équilibre entre : (i) fournir suffisamment de détails pour répondre aux besoins des concepteurs et des praticiens qui peuvent mieux connaître le sujet sous-jacent, et (ii) rendre les processus et les informations de haut niveau accessibles aux utilisateurs non spécialisés ou aux publics intéressés de façon raisonnablement conviviale. Des références aux pratiques exemplaires et aux sources de données sont donc fournies, sans trop approfondir les détails techniques et les spécificités qui sont expliqués dans d'autres guides et documents de référence. Pour faciliter cette convivialité, le cadre général de l'évaluation des risques d'inondation côtière est fourni dans la Figure 1 (voir également la section 3), qui contient des hyperliens vers les sections traitant des principales étapes du processus. Il est prévu que ce cadre fournira un point de départ et une référence utiles aux utilisateurs des lignes directrices, en les orientant vers les sections pertinentes du document.

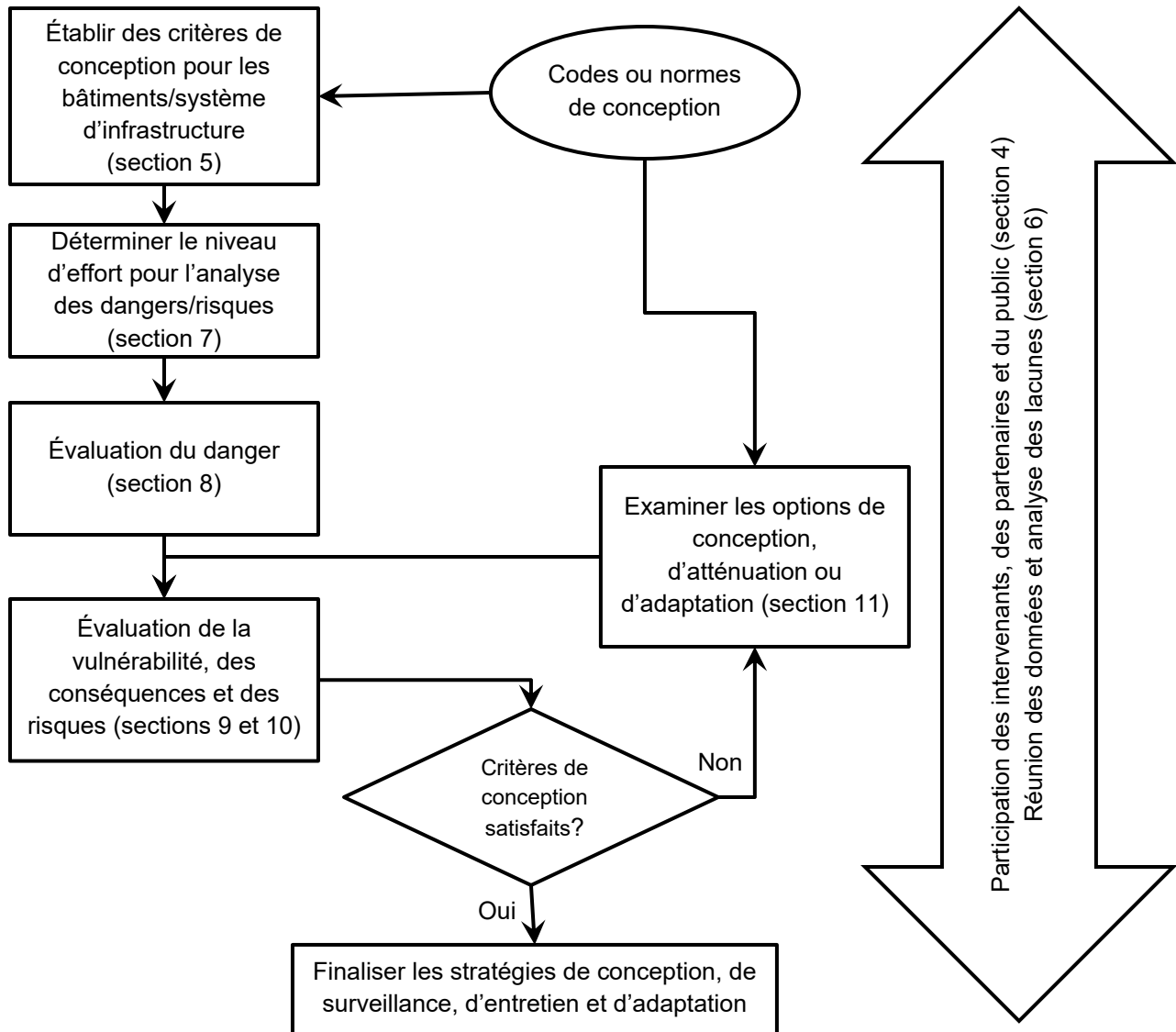


Figure 1. Cadre d'évaluation des risques d'inondation côtière.

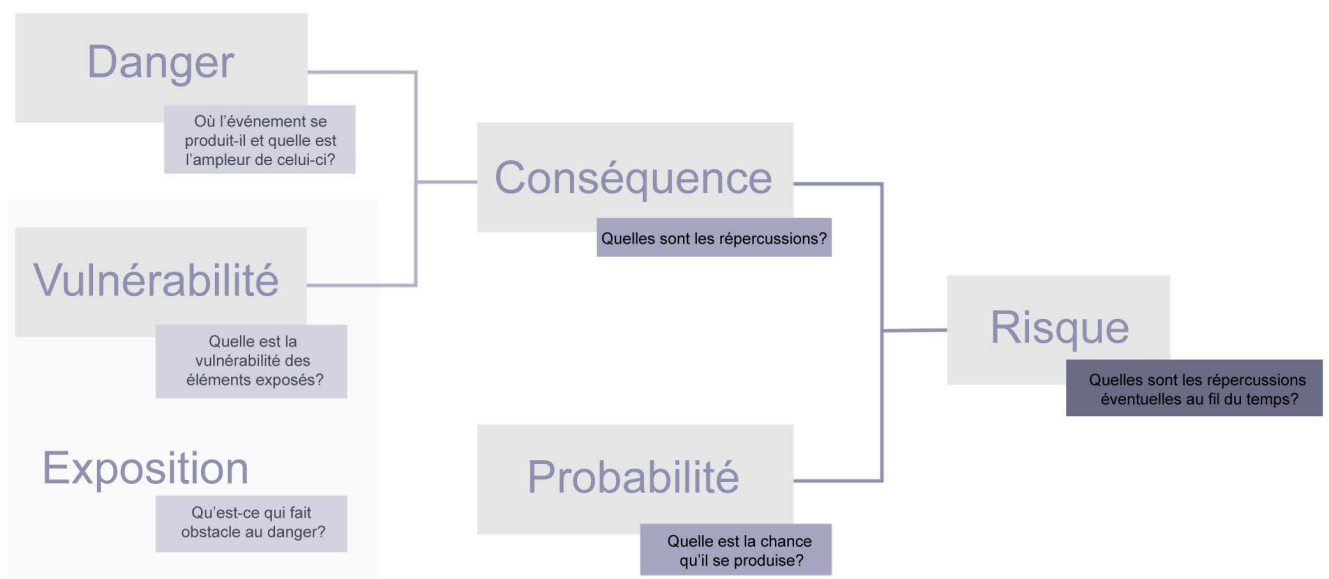
### 1.3 Directives connexes

Les lignes directrices fournies dans le présent document visent à compléter les orientations existantes élaborées par les provinces, les territoires et les municipalités, ainsi que la série de lignes directrices fédérales sur la cartographie des plaines inondables en cours d'élaboration par Ressources naturelles Canada (2019), en fournissant des informations supplémentaires pertinentes pour l'évaluation des risques d'inondation côtière spécifiques à la conception (ou à la modernisation) des bâtiments et des infrastructures. À ce titre, on prévoit qu'à l'avenir, les lignes directrices pourront être citées sous forme de renvois ou remplacées par des dispositions nouvelles ou mises à jour pour traiter les charges et les effets des inondations dans les normes de conception des infrastructures, le Code national du bâtiment du Canada et les codes du bâtiment provinciaux/territoriaux.

## 2 Qu'est-ce que le risque d'inondation?

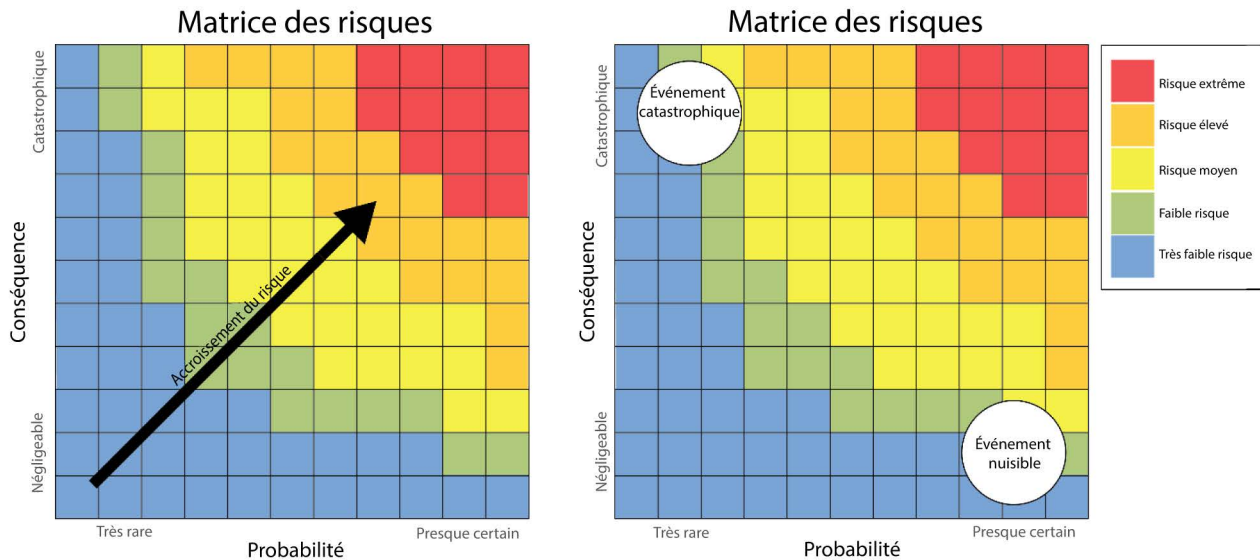
### 2.1 Risque

Il est essentiel de bien comprendre le terme *risque* afin de comprendre les éléments d'une évaluation du risque. Le *risque* est fonction à la fois de la *probabilité* qu'un événement se produise et des *conséquences* si cet événement se produit (Figure 2). La conséquence est définie en fonction du *danger* (où l'événement se produit-il et quelle est la gravité de celui-ci?), de l'*exposition* (qu'est-ce qui fait obstacle au danger?) et de la *vulnérabilité* (dans quelle mesure l'actif est-il vulnérable?). La *vulnérabilité* peut être décrite plus en détail comme une fonction de la résilience (comment le système - un bâtiment, un actif d'infrastructure, ses utilisateurs ou habitants et les systèmes interconnectés, par exemple - résistera-t-il et se rétablira-t-il?), et l'*atténuation des dommages* (quelles mesures sont en place pour réduire les dommages?).



**Figure 2. Le risque en fonction de la conséquence et de la probabilité (Ebbwater Consulting Inc., 2019).**

Le risque augmente avec la probabilité et les conséquences (Figure 3). Un événement pratiquement certain et à faible conséquence peut avoir un niveau de risque similaire à un événement catastrophique, mais rare. Cela devient particulièrement important lorsque nous examinons les horizons temporels longs (c'est-à-dire multidécennaux) applicables à la durée de vie de conception des bâtiments et des infrastructures. Par exemple, un danger de nuisance qui survient chaque année pendant plusieurs décennies et accumule des pertes peut en fait avoir plus d'impact qu'un danger catastrophique qui ne survient qu'une seule fois. Une évaluation des risques peut être utilisée pour comparer à la fois les répercussions et les avantages éventuels de la conception et des options d'atténuation pour l'ensemble du spectre des nuisances aux événements catastrophiques. Les évaluations des risques fournissent donc une base rigoureuse, logique et défendable sur laquelle prendre des décisions éclairées en matière d'investissement, de planification et de conception. Par conséquent, les méthodologies d'évaluation fondées sur les risques jouent un rôle important dans le renforcement de la résilience aux effets des inondations côtières et des changements climatiques dans le monde (p. ex. Bowker et al., 2007; FEMA, 2016b; Jongejan et Maaskant, 2015; Nicholls et al., 2005; van Alphen et al., 2011).



**Figure 3. Le risque en fonction de la probabilité et des conséquences - risque de nuisance et de catastrophe (Ebbwater Consulting Inc., 2019).**

## 2.2 Risque d’inondation côtière

Les risques d’inondation côtière proviennent de diverses sources et combinaisons de sources; y compris les marées, les ondes de tempête, les vagues, les seiches, les précipitations, les débits de cours d’eau et les tsunamis. Les probabilités associées à chaque type d’événement sont différentes et propres au site, et le type et les combinaisons de sources de danger peuvent influencer de manière importante sur l’ampleur et la gravité des impacts (conséquences) (p. ex. Figure 4<sup>1</sup>). Par exemple, les risques d’inondation côtière peuvent être associés à des événements à faible probabilité, tels que les tsunamis, qui peuvent avoir des impacts minimes ou catastrophiques, ou à des tempêtes plus fréquentes. Il existe de nombreuses voies différentes qui peuvent donner lieu à une exposition des collectivités, des bâtiments ou des infrastructures côtières aux risques d’inondation (p. ex. rupture ou débordement des défenses côtières, inondation directe, érosion, etc.). En outre, comme expliqué dans la section 2.1, de multiples facteurs influent sur la vulnérabilité. Les dangers naturels sont également caractérisés par la vitesse à laquelle ils se déclenchent et se propagent. Par exemple, les tsunamis provoqués par un tremblement de terre proximal (c’est-à-dire lorsque la source sismique est proche de la zone d’intérêt) sont généralement considérés comme des événements aléatoires soudains (par opposition à évolution lente), ce qui a des répercussions considérables sur les délais d’alerte et la capacité de réponse. La durée d’un événement de risque d’inondation côtière (heures ou jours) influera également sur le risque. Comprendre l’envergure et la nature spécifique du risque de danger est essentielle à la planification et à la conception des mesures d’atténuation, de gestion et d’intervention.

<sup>1</sup> Les désignations de probabilité et de conséquence de la Figure 4 sont données à des fins exclusivement illustratives et à titre indicatif. La probabilité et les conséquences de différents types d’événements sont très spécifiques au site.

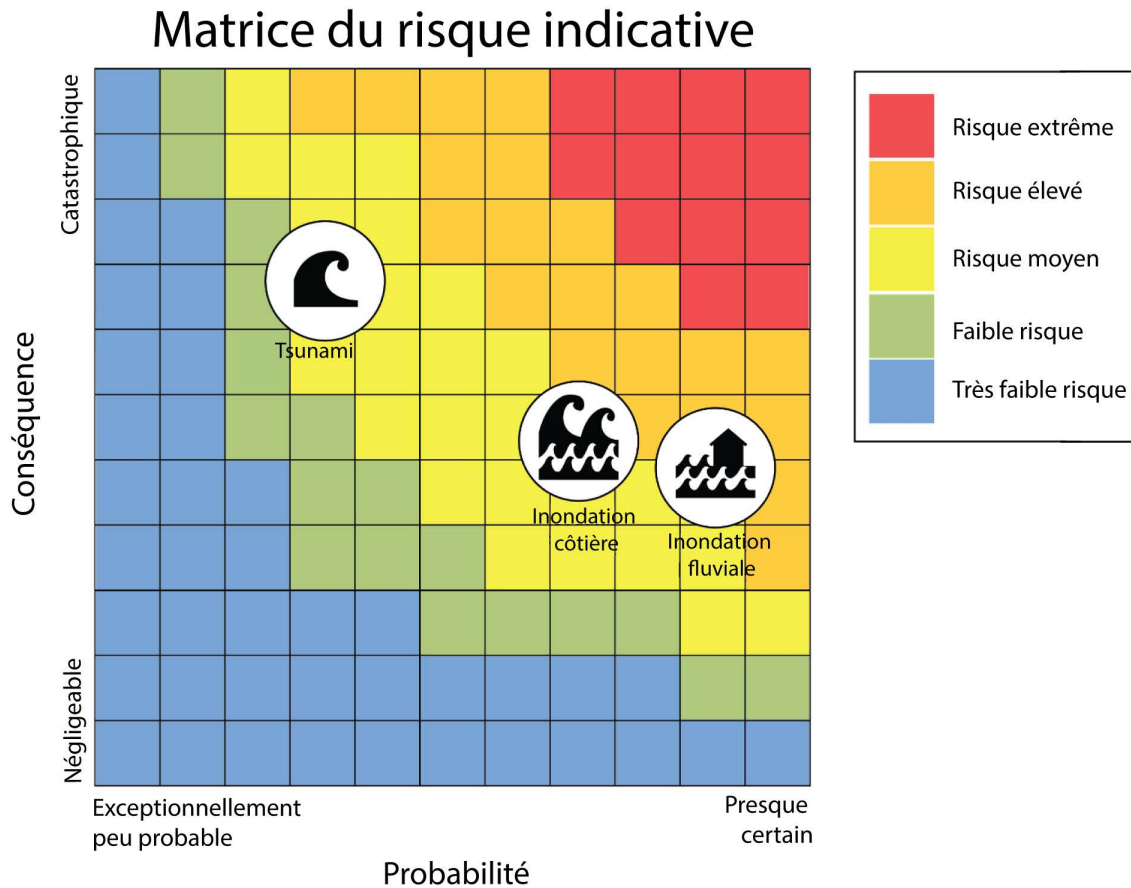
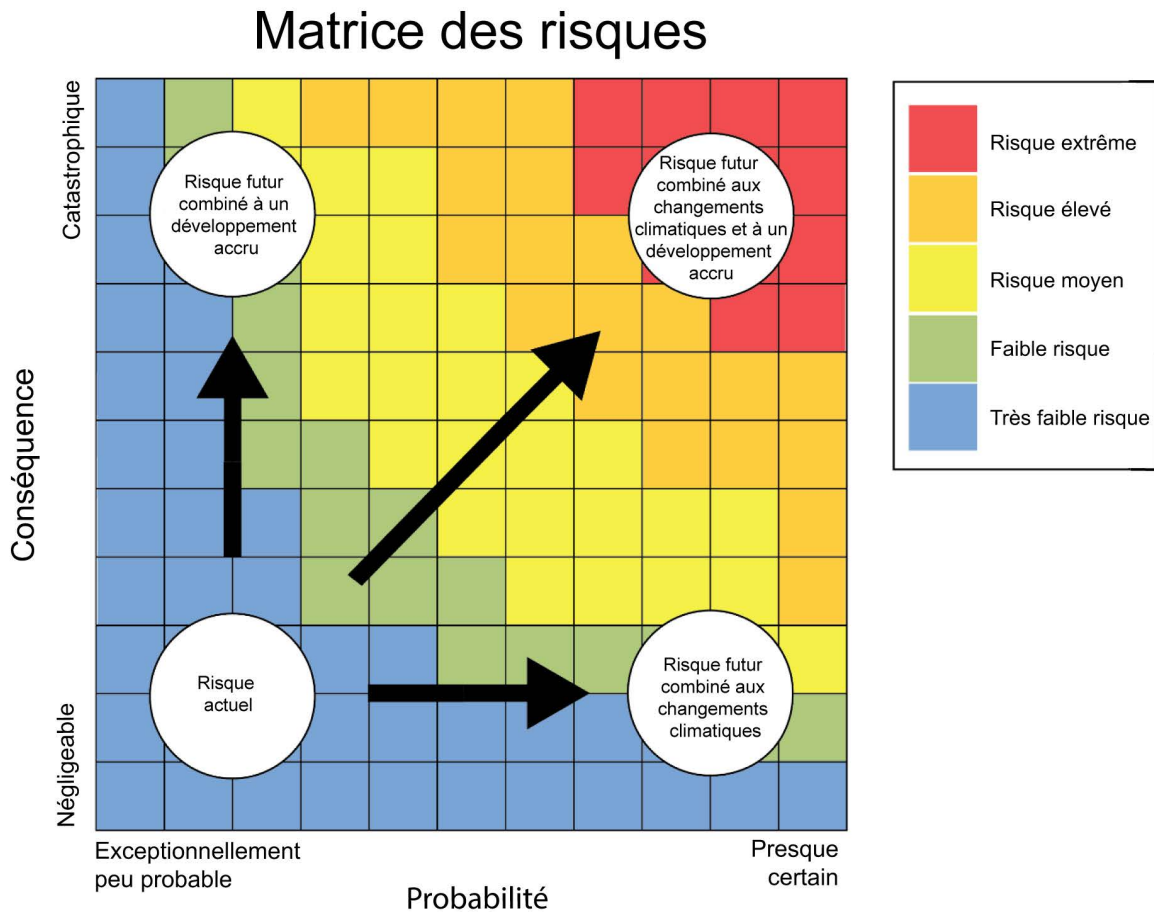


Figure 4. Matrice de risque illustrative pour certains dangers naturels (Ebbwater Consulting Inc., 2019).

### 2.3 Le risque en tant que concept dynamique

Le risque n'est pas statique. Les variables qui influent sur le risque (c.-à-d. la probabilité et la gravité du danger, l'exposition et la vulnérabilité) sont toutes susceptibles de changer avec le temps. Ces changements peuvent résulter de problèmes à l'échelle mondiale, tels que les changements climatiques, qui peuvent avoir une incidence sur les profils de dangers locaux (p. ex. en raison de l'élévation du niveau de la mer), ou des problèmes locaux (p. ex. les décisions d'utilisation des terres) qui peuvent avoir une incidence sur l'exposition et la vulnérabilité. La Figure 5 montre de façon schématique comment le risque peut augmenter avec le temps. Pour de nombreux risques naturels, on s'attend à ce que les changements climatiques entraînent une augmentation des probabilités d'événements (ils peuvent également entraîner une augmentation de la gravité des événements et donc des conséquences), entraînant une augmentation du risque (c.-à-d. un déplacement de la bulle de risque de gauche à droite le long de l'axe des probabilités à la Figure 5). Les conséquences associées aux événements dangereux peuvent également changer avec le temps. Lorsque le développement est autorisé dans les zones à risque, les conséquences négatives seront exacerbées, ce qui correspond à un déplacement du bas vers le haut de la Figure 5 le long de l'axe

des conséquences et à une augmentation du risque. Ces effets peuvent être exacerbés et des probabilités d'événements accrues combinées à des conséquences accrues entraîneront une augmentation importante du risque (comme l'illustre la bulle en haut à droite du graphique).



**Figure 5. Risque dynamique combiné aux changements climatiques et à un développement accru (Ebbwater Consulting Inc., 2019).**

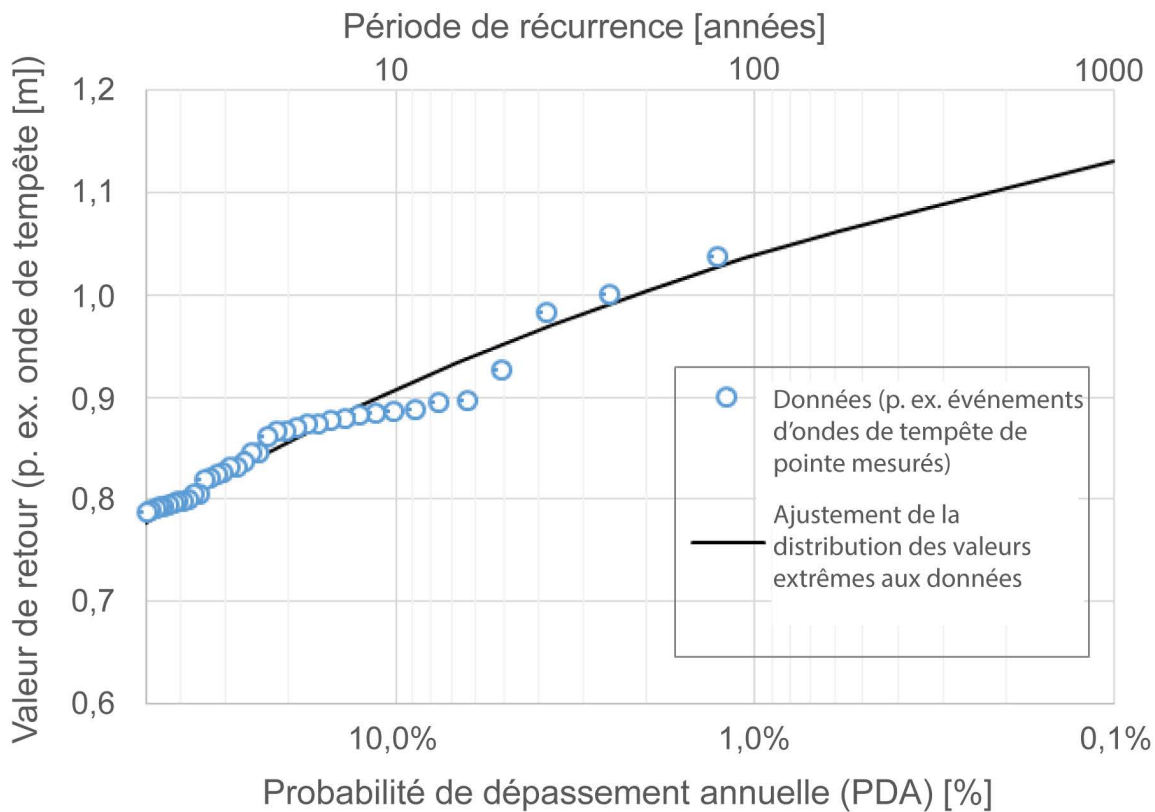
Compte tenu de la nature dynamique du risque, il est important de tenir compte des risques actuels et futurs, couvrant ou s'étendant au-delà du cycle de vie complet des bâtiments et des infrastructures, en particulier lorsque l'on cherche à maintenir ou à réduire le risque au fil du temps. Ces idées, dans le contexte des risques d'inondation côtière, sont explorées plus en détail plus loin dans les présentes lignes directrices.

## 2.4 Concepts de probabilité de danger

La probabilité d'occurrence d'un danger est un descripteur clé contribuant à la compréhension du danger. La fréquence d'un événement particulier est liée à sa gravité. Les événements dangereux mineurs ont tendance à se produire plus fréquemment et les événements de plus grande ampleur se produisent moins fréquemment.

### 2.4.1 Probabilités de dépassement annuelles

Dans ce rapport, la probabilité de danger est exprimée en tant que probabilité de dépassement annuelle (PDA). La PDA fait référence à la probabilité qu'un événement de risque d'inondation côtière se produise ou soit dépassé au cours d'une année, exprimée en pourcentage.<sup>2</sup> Par exemple, un risque d'inondation côtière extrême qui a une probabilité calculée de 0,2 % de se produire ou d'être dépassé au cours de cette année ou d'une année donnée est décrit comme le risque d'inondation côtière avec PDA de 0,2 %. La valeur de retour (c'est-à-dire l'ampleur du danger) pour une PDA définie est généralement déterminée en ajoutant une distribution statistique de valeur extrême aux données historiques (Figure 6). De plus amples détails sur les techniques permettant d'évaluer les PDA associées aux risques d'inondation côtière, ou leurs composantes, sont fournis dans la section 8.4.



**Figure 6. Exemple d'ajustement de la distribution des valeurs extrêmes (courbe noire pleine) aux événements historiques d'ondes de tempête (points bleus).**

<sup>2</sup> Une pratique exemplaire émergente consiste à représenter les probabilités de danger avec une PDA. Dans le passé, la probabilité du danger était généralement représentée par une période de récurrence de 1 sur X ans. Cependant, chez le public profane, cela tend à prêter à confusion quant à la fréquence d'un événement. Par exemple, on croit généralement que si un événement de 100 ans s'est produit, il ne se reproduira pas avant 99 ans, ce qui est incorrect.  $DPA \text{ en } \% = (1/X) \times 100$ .

## 2.4.2 Probabilité d'occurrence

Dans le contexte de la conception de bâtiments et d'infrastructures, il peut être plus utile de réfléchir à la probabilité de danger en termes de probabilité d'occurrence d'un événement d'une ampleur donnée sur une période de temps définie, telle que la durée de vie nominale d'un bâtiment ou d'un actif d'infrastructure. (p. ex. 75 ans pour les ponts couverts par le Code canadien sur le calcul des ponts routiers). Pour un événement ayant une PDA de 1 %, il y a 53 % de chances qu'un événement de cette ampleur ou plus se produise sur une période de 75 ans (Tableau 1 et Figure 7). Comprendre la probabilité d'un événement ainsi que la probabilité d'occurrence au cours de la durée de vie théorique peut soutenir les décisions de conception liées aux mesures au niveau des bâtiments et des infrastructures pour améliorer la résilience en fonction des tolérances aux risques des intervenants, ainsi que des décisions liées à une stratégie plus large de gestion des risques d'inondation côtière. Pour la même probabilité d'occurrence, des PDA plus élevées peuvent être adoptées pour la conception d'une structure avec une durée de vie de 25 ans que pour une structure dont la durée de vie est de 50 ans. Les probabilités d'occurrence peuvent être liées à des critères de conception cibles pour les bâtiments ou les infrastructures. Par exemple, un code ou une norme de conception peut exiger que l'intégrité structurelle (ou l'intégrité du bâtiment) soit maintenue pour de très faibles probabilités d'occurrence (p. ex. pour atteindre les objectifs de sécurité des personnes), alors que les critères de service peuvent être basés sur des probabilités d'occurrence plus élevées, en supposant qu'une perte occasionnelle de la fonction peut être acceptée au cours de la durée de vie. Ces critères peuvent prendre en compte le capital et la maintenance ou les coûts du cycle de vie complet et les compromis associés.

**Tableau 1. Probabilités d'occurrence pour diverses PDA et durée de vie théorique/de service.<sup>3</sup>**

Probabilité de dépassement annuelle (PDA)	Conception ou durée de vie du bâtiment/de l'infrastructure			
	25 ans	50 ans	75 ans	100 ans
10 %	93 %	99 %	100 %	100 %
3 %	53 %	78 %	90 %	95 %
2 %	40 %	64 %	78 %	87 %
1 %	22 %	39 %	53 %	63 %
0,5 %	12 %	22 %	31 %	39 %
0,2 %	5 %	10 %	14 %	18 %
0,1 %	2 %	5 %	7 %	10 %

<sup>3</sup> Les probabilités d'occurrence sont calculées comme étant  $Pe = 1 - (1 - AEP)^n$ , où  $Pe$  est la probabilité d'occurrence,  $AEP$  est la probabilité de dépassement annuelle et  $n$  est la durée de vie théorique (en années).

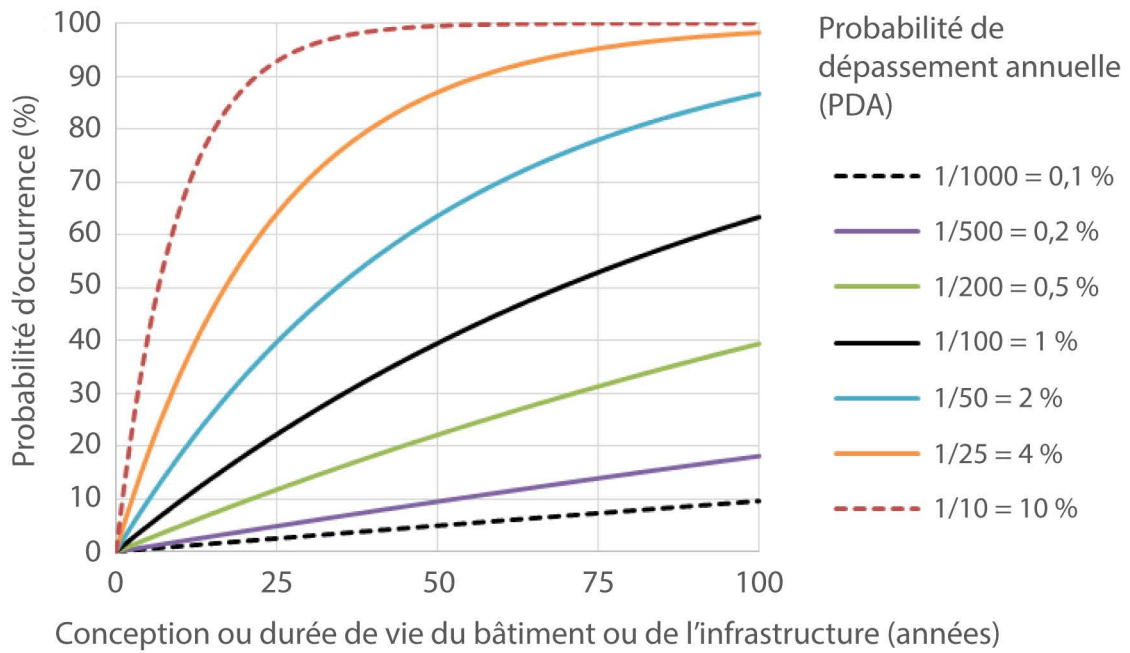


Figure 7. Probabilités d'occurrence pour diverses PDA et durée de vie théorique/de service.

## 3 Cadre d'évaluation des risques d'inondation côtière (ERIC)

Un cadre suggéré pour la conduite des évaluations des risques d'inondation côtière (ERIC) dans le but d'éclairer la conception ou la modernisation des bâtiments et des infrastructures est présenté à la Figure 8 ci-dessous, et est globalement conforme aux méthodologies établies pour l'évaluation des risques (p. ex. Journeay et al., 2015). Le cadre vise à illustrer les liens potentiels avec les codes et les normes de conception des bâtiments et des infrastructures. Les codes et les normes identifient généralement les critères de conception minimaux obligatoires (mais pas nécessairement tous), et peuvent spécifier certains types de mesures d'atténuation et d'adaptation qui peuvent être mises en œuvre par la conception ou la modernisation. Les sections décrivant chaque tâche ou composante du cadre sont présentées dans la Figure 8.

Le cadre ERIC (Figure 8) comprend les étapes clés suivantes :

1. **Participation des intervenants, des partenaires et du public** (section 4), qui se produit tout au long du processus. Cette activité garantit que les points de vue et les besoins des intervenants sont capturés par l'évaluation et que les risques sont bien compris.
2. **Établir des critères de conception fondés sur les risques** pour le ou les bâtiments ou le ou les systèmes d'infrastructure (section 5), qui incluent, sans s'y limiter, les exigences identifiées dans les codes et les normes. Cette étape définit essentiellement les résultats attendus de l'évaluation des risques et éclairera par conséquent les besoins en données et les décisions concernant le niveau d'analyse approprié.
3. **Réunion des données et analyse des lacunes** (section 6), commençant généralement par le déclenchement de l'évaluation des risques pour identifier les besoins d'acquisition de données pour les étapes ultérieures du processus.
4. **Déterminer les niveaux d'analyse appropriés** (section 7) nécessaires pour l'évaluation des risques, qui peuvent dépendre : des objectifs de l'évaluation, de la phase du processus de conception, de l'échelle spatiale du système/de l'actif et des zones touchées, de la criticité des bâtiments et des infrastructures exposés aux risques d'inondation et la disponibilité de données et d'autres ressources pour mener l'évaluation.
5. **Évaluation du danger** (section 8), pour caractériser la probabilité et l'intensité des risques d'inondation.
6. **Évaluation de la vulnérabilité et des conséquences** (section 9), qui combine des informations issues de l'évaluation des dangers avec des informations sur la vulnérabilité des bâtiments et des infrastructures, ainsi que des personnes ou des systèmes qui en dépendent, pour déterminer les conséquences des inondations.
7. **Évaluation des risques** (section 10), qui multiplie la probabilité d'événements de risque d'inondation côtière par les conséquences de chaque événement.

En fonction du résultat de l'ERIC; des stratégies de gestion des risques, des mesures d'atténuation ou une planification de l'adaptation peuvent être nécessaires pour garantir le respect des critères de tolérance au risque (section 11). Une approche itérative sera souvent nécessaire lorsque diverses options sont générées, développées et évaluées (c.-à-d. réévaluer les risques associés à chaque option) pour arriver à une stratégie ou une solution qui répond aux critères de conception.

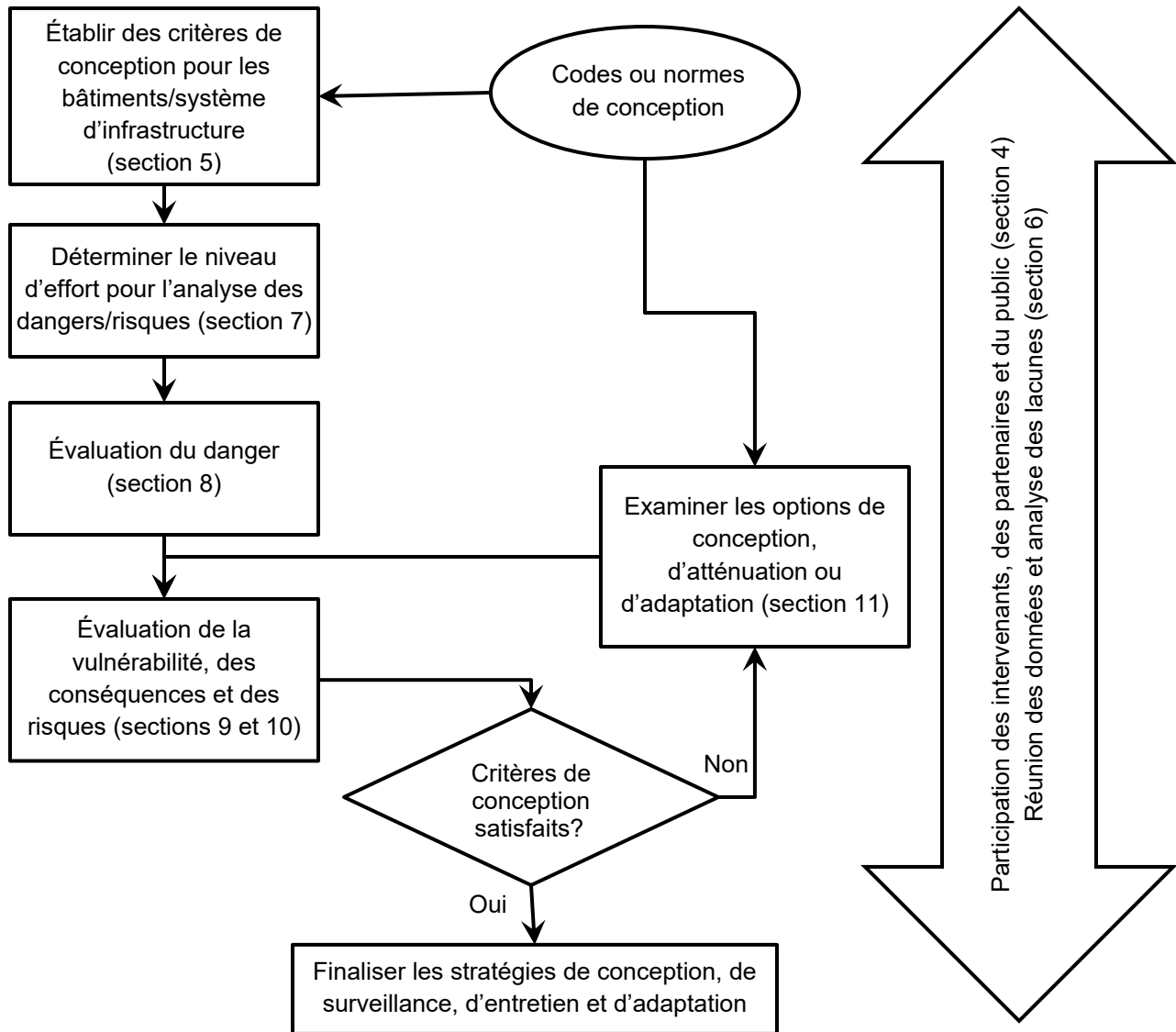


Figure 8. Cadre pour l'ERIC.

## 4 Participation des intervenants, des partenaires et du public

Tout nouveau projet de bâtiment ou d'infrastructure (ou de modernisation) a le potentiel d'avoir une incidence ou des répercussions sur les intérêts d'une variété d'intervenants, de partenaires et du grand public. Les parties intéressées et concernées peuvent inclure les propriétaires, les décideurs, le gouvernement, les régulateurs, les voisins, les collectivités voisines, les groupes d'intérêt public ou de campagne, les organisations du secteur privé et les membres du grand public. Là où il y a des risques d'inondation côtière, il y a presque inévitablement une certaine exposition humaine (soit directe, par exemple en ce qui concerne la sécurité des personnes; soit indirecte, par le biais d'impacts éventuels sur les actifs ou de perturbation de ceux-ci qui desservent la collectivité). Il s'ensuit qu'un processus de consultation bien planifié est un élément essentiel de toute évaluation des risques d'inondation côtière, et il est généralement davantage nécessaire pour assurer le succès d'un projet de construction ou d'infrastructure.

Il est généralement admis que les risques d'inondation côtière sont gérés le plus efficacement par des approches systémiques, qui prennent en compte l'étendue, l'interdépendance et les rétroactions du système exposé aux risques d'inondation. Comprendre le rôle des bâtiments et des infrastructures au sein du système est essentiel pour identifier les parties qui pourraient être intéressées ou touchées par de nouvelles constructions ou des modernisations. Par exemple, la mise en œuvre de mesures de réduction des risques d'inondation au niveau local (au niveau du bâtiment) peut avoir des répercussions négatives (que ce soit par inadvertance) sur les collectivités environnantes, l'infrastructure ou le système naturel (environnement). Les interruptions des services d'infrastructure essentielles en raison des risques d'inondation côtière peuvent entraîner, en raison des interdépendances, des effets en cascade dans de nombreux secteurs, touchant de nombreux intervenants. Comprendre la norme et la longévité des mesures de protection contre les inondations à l'échelle de la collectivité (p. ex. les digues marines) peut avoir une incidence vitale sur le risque d'inondation côtière sur un site, et requiert généralement une certaine participation des municipalités locales ou des autorités responsables de la gestion et de l'entretien de cette infrastructure. Dans le contexte de la conception visant à réduire ou à atténuer les risques d'inondation côtière, une mobilisation plus large peut aider à identifier les avantages connexes et les occasions de mettre en commun les ressources afin d'obtenir le plus d'avantages possible.

La section suivante décrit la valeur et le processus de la participation des intervenants, des partenaires et du grand public dans un processus d'évaluation des risques. Le matériel discuté ci-dessous est tiré des pratiques exemplaires internationales (Cornell, 2006; Australian Institute for Disaster Resilience, 2014, 2015; Edelenbos et al., 2017; FLOODsite, 2009; Sayers et al., 2014; SIPC, 2017; FEMA, 2016). Cette section ne se veut pas un guide complet de la mobilisation, mais donne un aperçu des éléments généraux de celle-ci. Les lecteurs sont encouragés à effectuer leurs propres recherches et à travailler avec des spécialistes en communication et en mobilisation pour développer des processus appropriés pour leur projet.

## 4.1 La valeur de la participation des intervenants, des partenaires et du public

Les intervenants, les partenaires, le grand public et les autres parties intéressées ou touchées (intervenants) doivent être considérés comme un élément important de tout processus d'évaluation des risques. Les intervenants, et la société dans son ensemble, doivent comprendre les risques auxquels ils sont exposés et ont un intérêt légitime dans les décisions relatives à la réduction des risques d'inondation (Cornell, 2006; SIPC, 2017). En outre, une mobilisation significative des intervenants permettra aux évaluateurs des risques de mieux comprendre la diversité et l'ampleur du problème. L'objectif d'un processus de mobilisation des intervenants dans le cadre d'un processus d'évaluation des risques est donc de s'assurer que les objectifs, intérêts et défis sociétaux plus larges sont idéalement reflétés dans l'évaluation ou, dans certains cas, sont considérés comme une lacune. De plus, étant donné la nature intensive des données de l'évaluation des risques, il y a des avantages éventuels à faire participer les intervenants qui pourraient contribuer des données et des connaissances locales pouvant être mises à profit. Bien que dans cette section l'accent soit mis sur la participation des intervenants, des partenaires et du public dans le cadre du processus d'évaluation des risques d'inondation, il est reconnu que dans le contexte plus large de la gestion des risques d'inondation, il est nécessaire de maintenir une participation et une communication continues.

## 4.2 Niveaux de mobilisation

La mobilisation décrit un large éventail de concepts liés à la participation et aux interactions avec les intervenants dans les processus de prise de décision. Dans le contexte de l'évaluation des risques d'inondation côtière pour les applications de conception de bâtiments et d'infrastructures, cela peut aller de l'information des intervenants sur le processus à la « vérification » afin de déterminer si le processus est sur la bonne voie, à des processus totalement inclusifs où les intervenants ont leur mot à dire sur la façon dont ils participent, sur la fréquence à laquelle ils sont appelés à participer et l'influence qu'ils ont sur la prise de décision. Le niveau de mobilisation devrait dépendre de la portée du processus d'évaluation des risques et, en lien à cela, à la criticité du bâtiment ou de l'infrastructure ou à son rôle dans des systèmes plus larges. La criticité des bâtiments/infrastructures est discutée et définie plus en détail dans la section 5.3, et les niveaux d'analyse de l'évaluation des risques en général sont traités dans la section 7.

La plupart des processus d'évaluation des risques côtiers, en particulier ceux axés sur les infrastructures, se situent probablement quelque part au milieu du spectre de la mobilisation, où les intervenants sont invités à participer pour soutenir l'évaluation des risques et pour garantir que les résultats sont exacts et pertinents.

Les exigences réglementaires et législatives pour la mobilisation sont également des considérations importantes pour les bâtiments et les projets d'infrastructure, comme l'obligation de consulter les peuples autochtones (voir la section suivante).

En plus de l'expertise technique liée aux risques d'inondation côtière, à l'exposition/la vulnérabilité et aux risques nécessaires pour soutenir le processus d'évaluation des risques, il peut être souhaitable ou avantageux d'inviter à participer des experts en facilitation/mobilisation pour piloter le processus.

## 4.3 Mobilisation des Autochtones

Le Canada est signataire de la Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones (DNUDPA) (Assemblée générale des Nations Unies, 2007). Un principe de la DNUDPA est le devoir du gouvernement d'obtenir le consentement préalable, donné librement et en connaissance de cause (CPLCC) des peuples autochtones sur des questions qui pourraient avoir une incidence sur leurs intérêts. De plus, le Canada traverse une période de réconciliation avec les peuples autochtones (Premières Nations, Métis et Inuit).

Il existe de nombreuses circonstances dans lesquelles il est essentiel que les peuples autochtones soient correctement associés à une évaluation des risques pour la planification des infrastructures côtières. Outre les facteurs systémiques mentionnés ci-dessus, l'intégration des visions du monde autochtones ajoute de la richesse à une évaluation, qu'elle soit dirigée ou non par une organisation autochtone. Grâce à un processus de tissage des perspectives scientifiques autochtones et occidentales, une compréhension plus holistique du risque peut éclairer des mesures globales de réduction des risques. Par exemple, une vision du monde autochtone peut fournir des perspectives écosystémiques sur les dangers, en identifiant le rôle et les avantages potentiels de ces phénomènes naturels. Les connaissances autochtones peuvent également mettre en évidence les vulnérabilités et les conséquences (p. ex. l'emplacement forcé de réserves dans les zones à risque, la conversion des terres côtières utilisées pour la subsistance des collectivités autochtones pour construire des ouvrages de lutte contre les inondations protégeant les collectivités de colons) et les lacunes des ensembles de données existants (p. ex. des données de recensement qui n'intègrent pas les lieux de chasse et de pêche, et qui ne définissent donc pas précisément où les gens passent leur temps).

Le besoin de conseils d'experts sur les pratiques de mobilisation des autochtones spécifiques aux collectivités locales devrait être pris en compte lors de l'élaboration de la portée d'une évaluation des risques d'inondation côtière.

## 4.4 Étapes à la mobilisation des intervenants

### 4.4.1 Définir le contexte et l'objectif

Avant d'identifier les intervenants à inviter à participer au processus d'évaluation des risques, le contexte et le but de leur participation doivent être clairement définis. Dans le contexte d'une évaluation des risques d'inondation côtière pour un bâtiment ou un bien d'infrastructure, les objectifs de la participation seront probablement de s'assurer que la vulnérabilité est bien comprise, d'établir des tolérances au risque et des critères de conception, de garantir le respect des exigences législatives et réglementaires (y compris l'obtention de permis) et d'évaluer les risques éventuels sur les zones environnantes (le cas échéant). Dans le cas d'une évaluation des risques avec une portée géographique plus large (p. ex. lorsque les risques pour de multiples actifs d'infrastructure sont évalués, ou lorsque des mesures de gestion des risques d'inondation à l'échelle communautaire sont envisagées), l'objectif de l'invitation à participer peut être de mieux comprendre les répercussions plus larges de l'infrastructure côtière (p. ex. digues ou stations de pompage) existante ou défaillante.

### 4.4.2 Identifier les intervenants et les décideurs

L'identification des intervenants appropriés est la clé du succès des initiatives de gestion des inondations (Edelenbos et al., 2017). Il est clair que les voix autour de la table influenceront sur le résultat du processus. Quelques exemples d'intervenants éventuels pour les processus d'évaluation des risques sont énumérés dans le Tableau 2; cette liste est fournie à titre d'exemple et n'est pas exhaustive pour des conditions

locales spécifiques. Le tableau indique que le nombre d'intervenants reflète généralement (mais pas nécessairement toujours) l'échelle et l'empreinte du ou des projets d'infrastructure.

Tableau 2. Intervenants éventuels pour les processus d'évaluation des risques d'inondation côtière.

Structure individuelle (qui comporte généralement moins d'intervenants)	Communauté ou système d'infrastructure (qui comporte généralement plus d'intervenants)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propriétaire ou promoteur de l'actif</li> <li>• Propriétaires voisins</li> <li>• Utilisateurs des actifs (p. ex. pour une centrale électrique, pensez aux principaux utilisateurs de l'électricité)</li> <li>• Peuples autochtones (Premières Nations, Métis et Inuit)</li> <li>• Fonctionnaires du gouvernement local (ingénieurs/opérateurs, biologistes, planificateurs, régulateurs)</li> <li>• Fonctionnaires du gouvernement régional (ingénieurs/opérateurs, etc.)</li> <li>• Fonctionnaires du gouvernement fédéral (ingénieurs/scientifiques, etc.)</li> <li>• Associations professionnelles (p. ex. ingénieurs)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propriétaires d'actifs ou promoteurs</li> <li>• Peuples autochtones (Premières Nations, Métis et Inuit)</li> <li>• Fonctionnaires du gouvernement local (ingénierie et planification)</li> <li>• Fonctionnaires du gouvernement régional (ingénierie et planification)</li> <li>• Agents provinciaux/territoriaux (ingénierie et planification)</li> <li>• Fonctionnaires du gouvernement fédéral (ingénieurs, planificateurs, scientifiques)</li> <li>• Associations professionnelles (ingénieurs et planificateurs)</li> <li>• Autres partenaires touchés</li> <li>• Le public</li> </ul>

Dans l'identification des intervenants, il faut aussi prendre en compte le rôle qu'ils jouent au sein de leurs organisations respectives. Dans la plupart des cas pour l'évaluation des risques d'inondation côtière, il sera important de collaborer avec des experts au niveau du personnel (qui peuvent commenter l'exposition aux risques et la vulnérabilité). Cependant, dans certains cas, où le résultat du processus peut exiger un appui de haut niveau, il peut être important de faire participer les décideurs et, dans de rares cas, les élus. Chacun de ces groupes peut être invité à participer ensemble ou séparément en fonction de la portée du projet et du plan de gestion des intervenants.

#### 4.4.3 Collaboration avec les intervenants

Les intervenants devraient être invités à participer à un stade précoce du processus d'évaluation des risques, et de manière significative. Voici quelques principes de base :

1. communications claires, précises et opportunes;
2. activités accessibles et inclusives;
3. transparence des processus;
4. cibles mesurables.

Pour s'assurer que les processus de participation sont clairs et que les rôles et les responsabilités sont délimités; on peut élaborer des mandats spécifiques pour les intervenants/le comité consultatif. Voici quelques éléments de base des mandats :

- nom du comité;
- buts et objectifs du comité (voir ci-dessus);
- portée des travaux (p. ex. fournir une expertise, des commentaires et des conseils pour appuyer l'évaluation des risques);
- rôles et responsabilités en matière de gouvernance et de prise de décision;
- calendrier et attentes des réunions;

- processus décisionnel (p. ex. majorité, consensus);
- approche du dialogue (p. ex. favorable, collaboratif, etc.);
- rôles des membres du comité.

Les activités de participation doivent couvrir tout le cycle de vie du projet d'évaluation des risques (comme indiqué dans la Figure 8 de la section 3), pour garantir que toutes les parties sont correctement informées, conscientes des points de vue des autres et pour orienter la prise de décision. Les stratégies de participation doivent être surveillées et parfois modifiées à mesure que le projet progresse.

#### **4.4.4 Documenter les activités et rendre compte**

Les activités des intervenants doivent être consignées et incluses de manière significative dans le processus d'évaluation des risques. Au minimum, cela peut inclure des notes de réunion rédigées ou peut inclure des rapports plus détaillés décrivant le processus, les contributions des intervenants et la manière dont les contributions ont été utilisées dans le processus global d'évaluation des risques.

### **4.5 Mise en œuvre de la mobilisation**

Les processus de participation des intervenants sont extrêmement précieux et peuvent grandement améliorer le résultat final d'un processus d'évaluation des risques. Cependant, la participation des intervenants peut être une entreprise coûteuse et gourmande en ressources, en particulier pour les grands projets d'infrastructure, ou pour les projets ayant une forte empreinte ou un grand nombre d'intervenants. Un moyen de réduire l'effort et de mettre en valeur le capital social et de connaissances existant consiste à tirer parti des réseaux et processus existants (Sayers et al., 2014). Par exemple, les processus de planification stratégique existants dans les zones côtières pourraient être mis à profit pour soutenir les évaluations des risques pour les nouveaux bâtiments et les nouvelles infrastructures, ou les modernisations.

## 5 Critères de conception fondés sur les risques pour les bâtiments et les infrastructures dans les zones côtières inondables

L'établissement de critères de conception est généralement l'une des premières étapes du processus de conception des bâtiments et des infrastructures. Les critères de conception sont les objectifs explicites qui doivent être respectés dans la construction ou la modernisation d'un immeuble ou d'un actif d'infrastructure, et définissent donc à quoi ressemble une nouvelle construction ou une modernisation réussie. Les critères de conception peuvent être subdivisés en critères essentiels (obligatoires ou minimaux) qui doivent être respectés et en critères souhaitables (mais pas nécessairement essentiels). Les critères de conception peuvent être déterminés à la suite de la participation des intervenants (p. ex. besoins du propriétaire ou de l'utilisateur final), des exigences législatives (p. ex. codes du bâtiment ou règlements municipaux, ou conformité réglementaire) et des cadres de planification stratégique.

Au Canada, des critères de conception minimaux (obligatoires) pour les bâtiments et les infrastructures sont établis et appliqués au moyen de codes et de normes adoptés par l'autorité compétente. Ceux-ci visent généralement (comme dans le cas du Code national du bâtiment) à établir des exigences minimales pour satisfaire les objectifs liés à la sécurité, à la santé, à l'accessibilité, à la protection des structures et contre les incendies, et à l'environnement. Ces exigences minimales peuvent inclure des spécifications pour la durée de vie de conception (p. ex. 75 ans pour les structures couvertes par le Code canadien sur le calcul des ponts routiers), l'état de fonctionnement, la fonction, la résistance aux dangers ou les niveaux de dommages acceptables, ou l'entretien; ce qui peut dicter certaines exigences pour une évaluation des risques d'inondation côtière. Par exemple, la durée de vie théorique d'un bâtiment ou d'un actif d'infrastructure a des répercussions sur la probabilité d'occurrence d'un risque d'inondation (section 2.4) et peut donc influencer sur les décisions concernant la gamme d'événements à prendre en compte dans l'évaluation des risques.

Au-delà des critères de conception minimaux pour les bâtiments et les infrastructures, il peut y avoir une gamme de critères qui sont établis en fonction des besoins ou des désirs des propriétaires ou des intervenants (voir la section 4), qui peuvent avoir une incidence sur les approches et méthodes d'évaluation des risques d'inondation côtière. Ceux-ci peuvent inclure des critères déterminés comme étant basés sur, par exemple :

- les objectifs du cycle de vie (p. ex. le propriétaire du bâtiment/de l'infrastructure peut avoir une préférence pour les dépenses en capital pour améliorer la résistance/résilience structurelle et réduire le plus possible les coûts d'entretien périodique ou de gestion adaptative pendant la durée de vie de conception);
- les tolérances au risque (p. ex. le propriétaire du bâtiment ou de l'infrastructure peut avoir des tolérances différentes pour le risque d'inondation en fonction de l'utilisation prévue, du contenu et/ou de la couverture d'assurance);
- la criticité de l'infrastructure (p. ex. si une défaillance ou une perte de fonction pourrait entraîner des pertes de vie ou entraver les interventions d'urgence);
- les exigences de rendement (p. ex. une infrastructure essentielle peut devoir rester fonctionnelle pendant ou immédiatement après des événements extrêmes);

- les informations sur les dangers nécessaires pour appuyer la conception (p. ex. profondeurs de l'eau, vitesses, conditions des vagues).

Les sections suivantes visent à encadrer les codes et les normes de conception des bâtiments et des infrastructures existants du Canada, en tant que références clés pour les critères de conception minimaux (obligatoires). Certaines lignes directrices et certains règlements provinciaux et territoriaux, ainsi que des exemples internationaux de codes, de normes et de lignes directrices, sont présentés pour illustrer les contrastes et les similitudes dans la façon dont le risque d'inondation des bâtiments et des infrastructures est pris en compte dans différents territoires de compétence. L'accent est mis sur les risques côtiers dus aux tempêtes; des informations limitées sont fournies sur les risques de tsunami. Cet examen n'est pas exhaustif.

Enfin, cette section comprend des conseils sur l'évolution vers des critères de conception fondés sur les risques. Plus précisément, elle met en évidence les considérations entourant la criticité des bâtiments/infrastructures, et fournit des notes et des conseils sur la gestion de l'incertitude, l'évolution des risques au fil du temps et les risques multiples.

## 5.1 Codes, normes, règlements et lignes directrices canadiens

### 5.1.1 Codes

#### **Code national du bâtiment du Canada**

L'actuel Code national du bâtiment du Canada 2015, qui est un code modèle adopté et mis en application par certaines provinces et certains territoires, porte principalement sur les questions de sécurité des personnes et ne traite pas des risques d'inondation potentiels pour les bâtiments. Bien que des travaux soient actuellement en cours pour élaborer des dispositions recommandées pour les inondations, le code n'inclut pas encore d'exigences de conception pour rendre les bâtiments plus résistants aux inondations côtières, ni ne prend en compte les risques éventuels de tsunami ou les effets des changements climatiques, tels que l'élévation du niveau de la mer. Récemment, cependant, certaines normes de l'Association canadienne de normalisation (CSA) pour la conception de bâtiments et d'infrastructures ont été élaborées, ou font actuellement l'objet d'un examen préliminaire, et traitent de certains aspects des inondations (CSA Z800-18 et CSA W204; Groupe CSA 2018, 2019). Elles sont brièvement décrites dans les sections ci-dessous, cependant, elles visent principalement la conception du drainage urbain et ne traitent pas des risques d'inondation côtière pour les bâtiments et les infrastructures. Un document express relatif aux installations de GNL (CSA EXP276.1-2015) fournit des conseils sur la gestion des risques de tsunami, mais encore une fois, n'est pas directement lié à tous les autres types de bâtiments et d'infrastructures visés par les présentes lignes directrices. Certaines lignes directrices nationales et provinciales sont également brièvement discutées dans les sections suivantes, dans la mesure où elles concernent la conception des risques d'inondation côtière ou peuvent fournir des informations supplémentaires sur les normes de conception fondées sur les risques.

#### **CAN/CSA S6-19 Code canadien sur le calcul des ponts routiers**

À l'exception du Manitoba, toutes les provinces et tous les territoires ont rendu obligatoire l'utilisation du Code canadien sur le calcul des ponts routiers pour établir des critères de conception des ponts routiers, dans certains cas avec des modifications ou des ajouts. La norme CAN/CSA S6-19 s'applique à la conception, à l'évaluation et à la réhabilitation structurale des ponts routiers et comprend des dispositions pour la conception hydraulique (y compris les inondations et l'affouillement), les charges d'eau et les

charges de glace (Groupe CSA, 2019). Cependant, le code ne comprend pas de dispositions pour les risques d'inondation côtière, tels que ceux liés aux ondes de tempête, aux vagues et aux tsunamis (Murphy et al., 2018).

### 5.1.2 Normes

#### **CSA W204 Conception résiliente aux inondations pour les nouvelles communautés résidentielles**

Une nouvelle norme de conception d'inondation pour les nouvelles communautés résidentielles a été publiée en décembre 2019 (Groupe CSA, 2019). La norme vise spécifiquement les nouveaux complexes au niveau des quartiers de maisons individuelles/jumelées et de maisons en rangée, et les complexes domiciliaires à usage mixte (y compris également les petits usages commerciaux et institutionnels). Le champ d'application de la norme comprend les risques d'inondation liés aux inondations fluviales, des inondations de surface, des surcharges d'égouts pluviaux et sanitaires, les défaillances du réseau d'évacuation et de drainage, et les infiltrations d'eaux souterraines. Cependant, aucun risque d'inondation côtière lié aux ondes de tempête, à l'élévation du niveau de la mer ou aux tsunamis n'est discuté.

La norme vise à accroître la résilience aux inondations des nouveaux complexes de quartiers. La résilience aux inondations est définie ici comme « la capacité du réseau (à la fois l'infrastructure naturelle et bâtie) à se remettre d'un événement extrême avec des dommages, des perturbations de fonctionnalité et des impacts socio-économiques minimales pendant et après une inondation extrême ». Dans le cadre de la résilience aux inondations, la norme recommande d'implanter les nouveaux complexes résidentiels en dehors des zones inondables et d'utiliser la conception de maisons anti-inondations pour les complexes dans les zones inondables. Voici quatre caractéristiques servant à définir une collectivité résiliente : la résistance (« protection des actifs bâtis et naturels contre les dangers »), la fiabilité (« la conception des actifs de telle sorte qu'ils puissent fonctionner dans un éventail de conditions »), la redondance (« la disponibilité de capacités de réserve ou capacité de fournir des services au moyen d'autres parties d'un réseau »), et l'intervention et le rétablissement (« planification, préparation et pratique sur le terrain pour répondre à des tâches spécifiques et plus générales »). La norme comprend une annexe sur les approches théoriques de la résilience et de la conception résiliente des infrastructures de drainage. Dans la norme, des détails de conception sont fournis pour la conception du système d'égout pluvial, la conception des rues (considérations relatives au système de drainage terrestre), la conception des égouts sanitaires et la conception des stations de pompage des eaux usées. La norme met également en évidence « des considérations pour la préservation des infrastructures naturelles et des mesures de développement à faible impact ».

La norme exige généralement la conception d'une « inondation réglementaire » pour chaque province/territoire; l'inondation avec PDA de 1 % (période de récurrence indicative de 1:100 ans) pour la plupart des territoires de compétence, à quelques exceptions près, notamment une PDA de 0,5 % (1:200 ans) pour la majeure partie de la Colombie-Britannique et une PDA de 0,2 % (1:500 ans) pour la Saskatchewan (Groupe CSA, 2019).

Bien que l'examen des infrastructures essentielles soit brièvement mentionné dans la norme CSA W204, aucun détail n'est fourni. Il est également suggéré d'utiliser des données qui « anticipent les changements climatiques futurs », mais comme elles « ne sont pas encore disponibles avec une confiance suffisante », il est recommandé d'appliquer des ajustements aux courbes intensité-durée-fréquence (IDF) actuelles. Aucune mention de la modélisation hydrologique et hydraulique des crues fluviales intégrant les effets des changements climatiques n'est incluse; la norme se concentre sur la conception pour gérer les eaux de ruissellement urbaines.

## CSA W205:19 Gestion de l'érosion et de la sédimentation pour l'infrastructure des collectivités nordiques

Dans le cadre de l'Initiative de normalisation des infrastructures du Nord,<sup>4</sup> la première édition d'une norme visant à répondre aux exigences de gestion des risques d'érosion et de sédimentation dans les environnements côtiers et lacustres nordiques, les environnements à surface libre et les environnements terrestres a été publiée en novembre 2019 (Groupe CSA, 2019b). Bien que l'objectif principal de la norme soit les risques d'érosion et de sédimentation, le document reconnaît que les inondations sont souvent un risque connexe, en particulier dans les zones côtières. À ce titre, la CSA W205 contient des renseignements et des conseils particulièrement pertinents pour identifier les facteurs distincts contribuant au risque d'inondation dans les régions nordiques (p. ex. l'érosion causée par le dégel du pergélisol, le changement de la couverture de glace de mer et la durée de la saison des glaces) et les stratégies de gestion des risques. Globalement, les étapes et procédures d'évaluation des risques décrites dans la norme CSA W205 sont conformes à celles présentées dans les présentes lignes directrices.

### 5.1.3 Règlements

#### Ontario

En Ontario, la Déclaration de principes provinciale (DPP; ministère des Affaires municipales et du Logement, 2014) et ses guides techniques associés (ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, 2001, 2001b, 2002) identifient la limite de risques d'inondation des réseaux fluviaux comme la plus élevée entre une inondation avec PDA de 1 %, une inondation résultant de précipitations subies dans un scénario de « tempête régionale » ou un événement d'inondation réel dans un bassin versant. Pour les lacs de plus de 100 km<sup>2</sup>, une tolérance de vent supplémentaire est ajoutée. La DPP met l'accent sur « l'évitement », c'est-à-dire sur l'orientation du développement loin des zones dangereuses, y compris des zones sujettes aux inondations. En vertu de la *Loi sur les offices de protection de la nature*, une série de règlements habilite chaque office de protection de la nature à réglementer le développement et les activités dans les zones inondables sur leur territoire de compétence. Le Code du bâtiment de l'Ontario saisit les exigences minimales pour la protection contre les inondations des bâtiments dans les zones inondables, indiquant que les bâtiments doivent être conçus pour « résister aux pressions hydrostatiques verticales et horizontales prévues agissant sur la structure » et « intégrer des mesures de protection contre les inondations ». Les normes et règlements locaux pour la protection contre les inondations des bâtiments sont établis par les municipalités. Un examen récent des normes provinciales (McNeil, 2019) a révélé qu'il existe peu de directives pour l'élaboration de futures normes sur les inondations tenant compte du climat et que les normes de protection contre les inondations sont dépassées (elles datent des années 1980).

#### Québec

La *Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables* du Québec (Gouvernement du Québec 2019) en vertu de l'article 2.1 de la *Loi sur la qualité de l'environnement* (1987) fournit un cadre normatif minimal avec des objectifs tels que : la sécurité des personnes et des biens dans les zones inondables; prévenir la dégradation et l'érosion des rives, du littoral et des plaines inondables; la protection de l'environnement; la promotion de la durabilité et de la qualité environnementale; la promotion de la réhabilitation des zones dégradées. Le document fournit des orientations pour réglementer les emplacements et les caractéristiques des structures, des entreprises et des ouvrages sur les rives des lacs, les zones sublittorales et les plaines inondables. Cependant, il y a peu de références aux processus générateurs de risques d'inondation côtière, tels que les marées, les ondes de tempête et les vagues. En

---

<sup>4</sup> <https://www.scc.ca/fr/inin>

général, les municipalités sont responsables de l'adoption et de l'application des règlements pour mettre en œuvre les principes de la politique. Le document comprend les exigences de base pour la protection contre les inondations et d'autres considérations pour les structures, les entreprises et les travaux autorisés dans les zones à fort risque d'inondation. Les mesures de protection contre les inondations mentionnées dans les annexes de la politique comprennent : l'élévation des ouvertures (portes, fenêtres, etc.) et les niveaux d'inondation du sol au-dessus du niveau d'inondation pour une PDA de 1 %; installation de clapets anti-retour sur les drains; études de résistance aux inondations (définies en termes d'imperméabilisation, de stabilité structurelle, de besoins de renforcement, de capacité de pompage des eaux d'infiltration et de résistance du béton à la compression et à la tension) pour les parties de toute structure en dessous de la PDA de 1 % du niveau d'inondation; restrictions sur le remplissage du terrain autour de la structure; en tenant compte des caractéristiques des matériaux de construction.

### **Nouveau-Brunswick**

La Politique de protection des zones côtières du Nouveau-Brunswick (Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2019) identifie les activités (y compris les projets, les infrastructures et les bâtiments) autorisées dans différentes zones. Le document stipule que les parties habitables des structures nouvelles ou reconstruites sur les terres côtières doivent être à au moins 2 mètres au-dessus de la pleine mer supérieure, grande marée (PMSGM) ou de toute autre élévation déterminée par le gouvernement local ou la commission de services régionaux. Sinon, aucun guide de conception de bâtiments ou d'infrastructures pour la résilience aux inondations n'est fourni.

### **Nouvelle-Écosse**

Dans la *Municipal Government Act* (modifiée en 2019) de la Nouvelle-Écosse, la zone inondable est définie comme l'étendue des inondations ayant une PDA de 1 %, et les restrictions de développement sont basées sur l'emplacement dans la zone de risque d'inondation. Le pouvoir de réglementer ce développement appartient aux municipalités. À notre connaissance, il n'existe aucun règlement provincial sur la conception des bâtiments et des infrastructures concernant la conception résistante aux inondations.

## **5.1.4 Lignes directrices**

### **Série de Lignes directrices fédérales sur la cartographie des plaines inondables**

Le Cadre fédéral de la cartographie des zones inondables de Ressources naturelles Canada (RNCa) fournit une série de documents d'orientation nationaux sur la cartographie des dangers (RNCa, 2019), mais les documents élaborés jusqu'à présent se concentrent principalement sur les dangers alors qu'un guide d'évaluation des risques d'inondation est toujours en cours d'élaboration. Dans cette série, les Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables fournissent des informations sur la caractérisation des risques d'inondation dans les zones côtières et les grands lacs. Un guide d'utilisation des terres fondé sur les risques de RNCa fournit également des conseils sur l'utilisation des terres et la gestion des risques d'inondation (Struik et al., 2015), mais il est axé sur tous les dangers et n'est pas spécifiquement axé sur les bâtiments et les infrastructures. Une ébauche de rapport non publié sur les « Canadian Guidelines and Database of Flood Vulnerability Functions » (en anglais seulement) a été préparée dans le cadre de cette série (RNCa, 2017). Le document est en cours de révision et sera publié ultérieurement.

### **CSA Z800-18 Lignes directrices sur la protection des sous-sols contre les inondations et la réduction des risques**

Les lignes directrices CSA Z800-18 portent principalement sur la prévention des inondations dans les sous-sols et des dommages aux fondations causés par le refoulement des égouts pluviaux et sanitaires (Groupe CSA, 2018). Elles ne sont donc pas directement pertinentes pour les risques d'inondation côtière discutés dans les présentes lignes directrices.

### **CSA EXP276.1 Document express pour les installations de GNL - Prise en compte du tsunami**

Ce document express (Groupe CSA, 2015) fournit des lignes directrices et des exigences minimales de conception pour les structures marines liées aux installations de gaz naturel liquéfié (GNL). Il n'est cependant pas une norme qui a été officiellement révisée ou approuvée par un comité technique CSA. La norme CSA EXP276.1 recommande une évaluation générale du risque de tsunami au début du développement du projet afin de prendre en compte le risque de tsunami dans la sélection du site et le développement de l'aménagement, ainsi qu'une évaluation et une quantification plus détaillées des risques de tsunami pendant la phase de conception afin d'inclure une atténuation appropriée dans la conception de l'installation et dans les procédures d'exploitation des installations pour les plans d'intervention d'urgence (Groupe CSA, 2015).

### **Lignes directrices provinciales de la Colombie-Britannique**

Certaines directives provinciales et internationales (section 5.2) qui se concentrent sur la gestion des risques d'inondation côtière, comme les lignes directrices de gestion de l'utilisation des terres dans les zones de risque d'inondation de la Colombie-Britannique (C.-B.) (Ministry of Environment, 2012; Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development, 2018), comprennent des recommandations pour l'emplacement ou l'élévation des bâtiments. Celles-ci se présentent souvent sous la forme d'une élévation minimale prescrite pour les éléments des nouveaux bâtiments qui intègre des informations sur le danger (c.-à-d. niveaux des eaux et remontée de la vague élevés avec une PDA prescrite, marges pour l'érosion le cas échéant, l'élévation relative du niveau de la mer, et marges de franc-bord<sup>5</sup>). En Colombie-Britannique, cette élévation minimale est appelée « niveau de construction d'inondation » et représente le niveau de la crue nominale, les effets des vagues, l'élévation relative du niveau de la mer (ERNM) et le franc-bord, qui est utilisé pour déterminer la hauteur du dessous du système de plancher en bois ou du dessus de la dalle de béton des bâtiments habitables. Les lignes directrices du document Professional Practice Guidelines de la Colombie-Britannique recommandent aux zones côtières (qui ne sont pas exposées à un risque de tsunami important) de planifier de construire au-dessus du niveau d'inondation en tenant compte de l'élévation du niveau de la mer de 1 m (indicatif de 2100), un niveau de l'eau total de 0,5 % ou pour une PDA de 0,2 % (y compris les effets des ondes de tempête, de la marée et des vagues, déterminés par la méthode de probabilité conjointe ou combinée), ainsi qu'un franc-bord minimal de 0,6 m (Engineers and Geoscientists BC, 2016). La version la plus récente des présentes lignes directrices (Engineers and Geoscientists BC, 2018) est moins normative.

### **Lignes directrices sur la gestion des inondations fluviales, Alberta Infrastructure**

Bien que cela ne s'applique pas directement aux inondations côtières, Alberta Infrastructure a élaboré des lignes directrices de gestion des inondations avec une approche fondée sur les risques pour les classements des bâtiments pour les nouveaux complexes qu'ils financent (Alberta Infrastructure, 2017).

---

<sup>5</sup> Le terme « franc-bord » est défini différemment dans divers documents d'orientation, mais il est généralement pris comme signifiant une tolérance verticale, ou « tampon », ajoutée à l'élévation des risques d'inondation prévus (y compris les niveaux d'eau, la remontée de la vague, l'élévation relative du niveau de la mer, etc.). Il fournit une mesure de la sécurité et compense l'incertitude dans les estimations des risques d'inondation, tout en laissant une certaine capacité d'adaptation face à l'évolution des dangers (p. ex. en réponse à l'élévation relative du niveau de la mer).

Bien que ces catégories de conception ne traitent pas des inondations côtières, elles fournissent un aperçu des critères de conception basés sur la criticité des bâtiments.

Le premier principe mis en évidence dans les lignes directrices est d'éviter de construire dans les zones inondables, mais si cela n'est pas faisable, différents niveaux de crue nominale sont définis en fonction de l'utilisation prévue du bâtiment (Alberta Infrastructure, 2017) :

- La crue nominale la plus élevée pour une PDA de 0,1 % (période de récurrence indicative de 1:1 000 ans) est requise pour les installations vitales essentielles à « la capacité de sauver et d'éviter la perte de vies humaines » et de « sauver et traiter les blessés et de prévenir les risques secondaires ». La crue nominale la plus élevée pour une PDA de 0,1 % est également requise pour les installations qui peuvent mettre en danger la vie humaine et l'environnement, ainsi que les installations qui sont importantes pour la conservation des données historiques documentées et des artefacts.
- Le deuxième niveau de crue nominale pour une PDA de 0,2 % (période de récurrence indicative de 1:500 ans) est destiné à d'autres installations vitales qui sont « essentielles au maintien de l'ordre public et du bien-être », « essentielles au logement continu de populations importantes », et « essentielle au retour ordonné du bien-être social et économique à long terme ».
- Un niveau de crue nominale minimal pour une PDA de 1 % (période de récurrence indicative de 1:100 ans) est défini pour les installations restantes (non essentielles à la vie).

## 5.2 Exemples internationaux

### Classes de bâtiments basées sur les risques pour la conception tenant compte des inondations (États-Unis)

Aux États-Unis, les codes et normes du bâtiment incluent des exigences minimales pour les bâtiments et les infrastructures dans les zones inondables qui sont adaptées à la criticité du bâtiment (prescrite dans la norme ASCE 7-16 sur les « Charges minimales de conception et critères associés pour les bâtiments et autres structures » (ASCE/SEI, 2016), et en particulier pour les inondations, dans ASCE 24-14 « Conception et construction résistantes aux inondations » (ASCE, 2015). Les mêmes catégorisations de bâtiments fondées sur les risques sont également utilisées pour prescrire des exigences minimales pour les charges de vent, de neige, sismique et de glace. Au total, quatre classes de bâtiments sont définies « en fonction du risque pour la vie humaine, la santé et le bien-être des personnes associées à leurs dommages ou défaillances en raison de leur occupation ou de leur utilisation » (ASCE/SEI, 2016) :

- La classe 1 comprend les bâtiments et les structures qui sont généralement inoccupés et qui présentent un risque et une perturbation minimales pour le public en cas de défaillance (p. ex. les structures temporaires).
- La classe 2 comprend les bâtiments qui présentent un risque modéré pour le public et une perturbation modérée pour la collectivité en cas de défaillance (c.-à-d. La plupart des bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels).
- La classe 3 décrit les bâtiments et les structures qui présentent un risque élevé pour le public ou des perturbations importantes pour la collectivité s'ils sont endommagés ou tombent en panne en raison d'inondations. Cette classe comprend les bâtiments où se rassemblent un grand nombre de personnes, les services publics (électricité, traitement de l'eau et des eaux usées, télécommunications, etc.), ainsi que les bâtiments où sont stockées des substances dangereuses et toxiques.

- Les bâtiments et structures de classe 4 présentent un risque important pour le public en cas de défaillance en raison de grandes quantités de matières dangereuses ou parce qu'ils sont essentiels pour les opérations d'urgence.

Les exigences minimales de conception deviennent plus restrictives avec l'augmentation du risque pour le public en cas de défaillance du bâtiment (c.-à-d. de la classe de bâtiment 1 à 4). Par exemple, l'élévation minimale requise de l'étage le plus bas est augmentée pour les classes de bâtiment 2 et 3, et pour la classe de bâtiment 4, une crue nominale plus extrême est requise. De même, l'élévation minimale pour un matériau résistant aux inondations ou une protection contre les inondations humide et sèche augmente avec la criticité du bâtiment. Selon la classe de bâtiment, les charges de neige, de glace, de vent et sismiques nominales sont également mises à l'échelle en utilisant un « facteur d'importance » qui augmente avec la criticité du bâtiment (ASCE/SEI, 2016).

Pour les risques d'inondation côtière en particulier, deux types de zones côtières sont définis dans l'ASCE 7-16 (ASCE/SEI, 2016) :

- la zone côtière à haut risque (zone V), qui est « une zone située dans une zone de risque d'inondation spéciale, s'étendant du large à la limite intérieure d'une dune frontale principale le long d'une côte ouverte, et toute autre zone soumise à l'action des vagues à vitesse élevée provenant de sources orageuses ou sismiques ».
- la zone A côtière, qui est « une zone située dans une zone inondable spéciale, vers les terres d'une zone V ou vers les terres d'une côte ouverte sans zones V cartographiées, où les principales sources d'inondations doivent être des marées astronomiques, des ondes de tempête, des seiches ou des tsunamis, pas d'inondations fluviales, et où la possibilité que les vagues déferlantes soient supérieures ou égales à 0,46 m doit exister pendant la crue de base. »

Tous les bâtiments et toutes les structures situés dans les zones inondables doivent respecter ou dépasser les exigences minimales de conception d'inondation énoncées dans la norme ASCE 24-14, également exigée par le National Flood Insurance Program (NFIP) de la Federal Emergency Management Agency (FEMA) des États-Unis.

### **Programme Delta (Pays-Bas)**

En 2015, une décision a été prise aux Pays-Bas pour adopter une approche basée sur les risques pour la politique de gestion des risques d'inondation. Plus précisément, de nouvelles normes de conception pour les digues ont été définies en fonction à la fois de la probabilité et des répercussions, y compris les conséquences socio-économiques éventuelles, des inondations dues à la rupture des digues (van der Most et al., 2011). Plus précisément, la sécurité publique (y compris l'exploitabilité des procédures d'urgence), l'ampleur éventuelle des perturbations sociétales dues aux inondations (victimes ou dommages économiques) et la protection des infrastructures vitales et vulnérables ont été prises en compte. Des normes de protection plus élevées sont appliquées dans les zones où les inondations peuvent causer des dommages majeurs (en termes de grand nombre de victimes, de pertes économiques ou d'infrastructures vitales d'importance nationale). Les nouvelles normes de conception ont été exprimées par la probabilité d'inondation désignée requise pour différentes digues, qui ont été mises à l'échelle de manière logarithmique (p. ex. la zone à faible risque nécessite une conception de digue à une crue de conception pour une PDA de 1 %, tandis que la zone à risque le plus élevé nécessite une digue conçue pour une crue ayant une PDA de 0,001 % (van der Most et al., 2014).

## Normes de conception relatives aux tsunamis pour les bâtiments et les infrastructures (États-Unis)

Aux États-Unis, les infrastructures essentielles (et les bâtiments contenant de grandes quantités de matières dangereuses) doivent être conçues selon des normes strictes en matière de tsunami, si elles sont situées dans une zone de submersion par tsunami. Une zone de submersion par tsunami est définie comme la zone située entre le rivage et l'étendue maximale de l'inondation du « tsunami maximum considéré », qui est un « tsunami probabiliste ayant une probabilité de 2 % d'être dépassé sur une période de 50 ans ou un intervalle de récurrence moyen de 2 475 ans »(ASCE/SEI, 2016). Un chapitre détaillé de la norme ASCE 7, qui a été ajouté dans la mise à jour de la norme 2016, décrit les exigences relatives aux charges théoriques pour les tsunamis (ASCE/SEI, 2016). Les catégories de risque de tsunami pour les bâtiments sont similaires aux classes de bâtiments générales décrites ci-dessus, avec quelques légères modifications et ajouts (p. ex. les structures d'évacuation verticale en cas de tsunami sont ajoutées à la classe 4).

Les exigences de conception relatives aux tsunamis de l'ASCE 7 s'appliquent à une classe limitée de bâtiments et de structures qui fournissent des services essentiels ou présentent un risque élevé pour le public en cas de défaillance. Plus précisément, les dispositions relatives à la résistance aux tsunamis et à la résilience des collectivités dans l'ASCE 7 s'appliquent aux catégories de bâtiments suivants :

- catégorie de risque de tsunami 4 (bâtiments qui présentent un risque important pour le public en raison de matières dangereuses ou qui sont nécessaires pour une intervention d'urgence);
- catégorie de risque de tsunami 3 (bâtiments où un grand nombre de personnes se rassemblent ou qui peuvent présenter un risque pour le public) si la profondeur de l'inondation due à un tsunami du tsunami maximum considéré est supérieure à 3 pieds (0,914 m);
- catégorie de risque de tsunami 2 (la plupart des bâtiments résidentiels et commerciaux et des infrastructures pour les bâtiments indiquant des profondeurs de tsunami supérieures à 3 pieds, lorsque cela est requis par les codes du bâtiment de l'État ou locaux.

Si la conception du tsunami est requise pour les bâtiments/infrastructures comme cela est décrit en détail ci-dessus, la profondeur et la vitesse des tsunamis doivent être déterminées par une analyse spécifique au site, pour laquelle des exigences détaillées sont données dans la norme. Une géodatabase en ligne pour la conception en tenant compte des tsunamis (Tsunami Design Geodatabase) de l'ASCE (ASCE, 2018) fournit des points de référence géocodés de l'amplitude des tsunamis en mer et d'autres informations connexes, qui peuvent être intégrés à un modèle d'inondation pour le site, sinon, un modèle intégré de génération, de propagation et d'inondation de tsunami doit être utilisé en tenant compte des sources tsunamigènes prescrites dans la norme, en fonction de l'emplacement du site.

Il est important de noter que la norme prescrit également que l'élévation relative du niveau de la mer doit être prise en compte lors de la détermination de la profondeur maximale d'inondation due au tsunami au cours du cycle de vie du projet (ASCE/SEI, 2016). Le cycle de vie du projet doit être calculé pour au moins 50 ans, et l'élévation relative du niveau de la mer au cours de cette période doit être ajoutée à l'élévation de la remontée du tsunami.

Enfin, la norme fournit également des procédures de conception structurelle qui définissent les charges de tsunami requises pour lesquelles les bâtiments et les infrastructures doivent être conçus. Encore une fois, les charges hydrodynamiques et d'impact des tsunamis sont multipliées par un facteur d'importance, qui est plus élevé pour les bâtiments des catégories de risque de tsunami 3 et 4.

## Hiérarchie des options de protection des bâtiments (Royaume-Uni)

La British Standards Institution (BSI) a élaboré la norme BS 85500:2015 pour la construction résistante et résiliente aux inondations, dans le but d'améliorer la performance des bâtiments contre les inondations (BSI, 2015). La norme décourage fortement les aménagements inappropriés dans les zones inondables, mais fournit des conseils sur la manière de réduire le risque résiduel des bâtiments qui, après la mise en œuvre d'autres mesures, telles que l'évitement, sont toujours situés dans une zone inondable. Elle recommande une hiérarchie des options de protection des bâtiments, qui sont associées à un risque d'inondation résiduel décroissant au fur et à mesure que les options sont mises en œuvre, où l'« évitement » est l'option privilégiée, suivie de trois options qui ciblent la conception au niveau du bâtiment : « résistance », « résilience » et « facilité de réparation » (BSI, 2015; Tagg, 2017; Tagg et al., 2016; Bowker et al., 2007).<sup>6</sup> Les définitions des stratégies au niveau du bâtiment et de plus amples détails sur cette approche sont fournis dans la section 5.3.6.

Les stratégies de conception au niveau du bâtiment ne sont recommandées que lorsque la profondeur des eaux de crue pour la crue nominale est limitée, c'est-à-dire que des mesures de résistance sont recommandées pour des profondeurs d'inondation inférieures à 300 mm, et des mesures de résistance et de résilience sont recommandées pour des profondeurs de 300 à 600 mm. (BSI, 2015).

### 5.3 Recommandations de conception basées sur les risques

Étant donné qu'il n'existe à ce jour aucun code ou norme de conception traitant spécifiquement des risques d'inondation côtière pour les bâtiments et les infrastructures au Canada, cette section fournit des recommandations pour l'établissement de critères de conception, qui influenceront à la fois l'évaluation des risques et les processus de conception. Ces recommandations sont basées sur les pratiques exemplaires internationales et, surtout, préconisent une approche de conception basée sur les risques, qui est également intégrée dans une stratégie plus large de gestion des risques d'inondation. Les 9 recommandations clés suivantes sont décrites en détail dans les sections ci-dessous :

1. concevoir pour atteindre les objectifs de planification stratégique et de gestion des risques;
2. passer à une approche de conception basée sur les risques;
3. conception tenant compte de la criticité des bâtiments/infrastructures;
4. conception tenant compte des impacts environnementaux;
5. conception selon la tolérance au risque;
6. conception pour atténuer le risque résiduel au niveau du bâtiment;
7. conception pour un risque futur dynamique (y compris l'élévation du niveau de la mer);
8. conception pour de multiples dangers;
9. intégrer la conception dans une gestion plus large des risques d'inondation.

#### 5.3.1 Concevoir pour atteindre les objectifs de planification stratégique et de gestion des risques

Les mesures de conception de bâtiments et d'infrastructures pour réduire les risques d'inondation côtière sont plus efficaces lorsqu'elles sont appliquées dans le contexte d'initiatives de planification stratégique plus larges qui prennent en compte une variété de besoins et de risques sociétaux et environnementaux. Le besoin et la hiérarchisation des bâtiments et des infrastructures neufs doivent être déterminés par une

---

<sup>6</sup> Il est entendu que la révision des lignes directrices au Royaume-Uni comprendra une nouvelle définition du terme « résilience », qui comprendra à la fois « résistance » et « facilité de récupération ».

stratégie de planification, qui peut également aider à définir des objectifs clairs pour l'évaluation des risques. Lorsque des cadres de planification stratégique efficaces sont en place, les circonstances dans lesquelles des mesures de conception des bâtiments et des infrastructures sont nécessaires pour gérer les risques d'inondation côtière peuvent être limitées. Le processus d'évaluation des risques d'inondation aidera à déterminer la nécessité et la portée des mesures de conception des bâtiments et des infrastructures pour gérer les risques, ce qui peut valider ou rejeter les décisions de planification stratégique. Le processus d'évaluation des risques d'inondation offre donc l'occasion de prendre du recul et de déterminer si un bâtiment ou un système d'infrastructure particulier répond le mieux aux besoins de la société. Par exemple, comprendre le risque réel (c.-à-d., y compris la défaillance potentielle) d'une station de pompage dans une zone côtière à risque pourrait justifier un examen plus approfondi des infrastructures et des mesures du côté de la demande (p. ex. réduire les charges grâce à l'éducation ou à l'infrastructure verte) qui auraient un profil de risques plus faible.

### **5.3.2 Passer à une approche de conception basée sur les risques**

Historiquement, une approche fixe basée sur des normes a été utilisée pour promouvoir la prévention des risques d'inondation côtière au Canada, où, par exemple, des élévations minimales ou des distances de recul prescrites sont recommandées pour les bâtiments pour une crue nominale spécifique (généralement pour une PDA de 1 %, 0,5 %, 0,2 % ou 0,1 %). Cependant, le défi est que cette approche basée sur des normes ne se concentre que sur un seul scénario. Il n'inclut donc pas la gamme complète des inondations éventuelles, où les inondations à haute fréquence/à faible impact peuvent entraîner des impacts cumulatifs sur les bâtiments et les infrastructures, ou lorsque des inondations rares mais graves peuvent entraîner des impacts pires que ceux capturés par la crue nominale. Les approches fondées sur des normes manquent également de la flexibilité nécessaire pour faire face à la nature dynamique des risques d'inondation côtière dans un climat changeant (section 2.3), et peuvent créer des obstacles à l'adaptation lorsque des changements importants se produisent (p. ex. en perpétuant le développement à proximité de la zone inondable « réglementaire ») et de fausses perceptions du risque (c.-à-d. faux sentiment de sécurité pour les propriétaires/exploitants de bâtiments et d'infrastructures juste à l'extérieur de la zone inondable réglementaire).

Les pratiques exemplaires internationales préconisent de passer d'une approche basée sur des normes fixes à une approche basée sur les risques qui prend en compte à la fois les risques locaux et les conséquences des inondations (Sayers et al., 2013, 2014). L'idée est de ne plus concevoir uniquement un événement unique axé sur la sécurité et utilisant des défenses contre les inondations prévues dans l'étude technique, mais d'utiliser une approche plus holistique qui prend en compte ce qui est à risque et maximise les avantages sociaux, économiques et environnementaux (Sayers et al., 2013). En général, cela nécessiterait la mise en œuvre d'un large éventail de mesures et d'instruments intégrés contre les inondations.

### **5.3.3 Conception tenant compte de la criticité des bâtiments/infrastructures**

L'emplacement/le choix du site et la conception des bâtiments individuels et des infrastructures, ou des systèmes d'infrastructure, jouent un rôle important dans la détermination des risques d'inondation côtière pour les collectivités et les systèmes de façon plus générale. Une conception appropriée et résistante aux inondations est particulièrement essentielle pour les infrastructures essentielles où une défaillance due aux inondations pourrait avoir des conséquences sociales et économiques importantes, ou pour les bâtiments où sont stockées des matières où une défaillance pourrait entraîner des impacts importants sur la santé publique et l'environnement naturel (voir également la section 5.3.4).

Le besoin de résilience des infrastructures essentielles aux dangers actuels et émergents est également mis en évidence dans la Stratégie nationale sur les infrastructures essentielles, qui préconise une approche tous risques et fondée sur les risques (gouvernement du Canada, 2009).

Une façon d'aborder une conception basée sur les risques, qui tient compte des conséquences éventuelles des dommages ou de la défaillance d'un bâtiment, consiste à ajuster les critères de conception en fonction de la criticité et du potentiel de dommages aux écosystèmes publics et naturels. Nous définissons quatre catégories de criticité pour les bâtiments et les infrastructures ci-dessous, et pour chacune de ces catégories de bâtiments, fournissons des recommandations de conception pour les tempêtes côtières et les tsunamis (voir le Tableau 3; les catégories de criticité et les recommandations de conception ont été élaborées sur la base de la norme ASCE 7-16 des États-Unis et les lignes directrices de l'Alberta Infrastructure). Prendre note que dans certains cas, il y aura à la fois un risque de tsunami et de tempête côtière, et la conception doit tenir compte des deux risques. Des détails sur les types de bâtiments et d'infrastructures inclus dans chacune des quatre catégories sont fournis dans les notes de bas de page respectives.

Les catégories fondées sur les risques définies dans le Tableau 3 font référence aux catégories de risque de tempête côtière et de tsunami nominales « minimale », « modérée », « élevée » et « importante ». Cependant, aucune PDA spécifique (ou scénario de tsunami) n'est prescrite, car elles doivent être sélectionnées en fonction de la **tolérance au risque** des intervenants (voir la section 5.3.5 sur la tolérance au risque et la section 4 sur la participation des intervenants).

Pour les **tempêtes côtières**, il est recommandé que tous les types de bâtiments et d'infrastructures dans la zone inondable soient conçus pour résister à la crue nominale appropriée (voir la section 11 pour une discussion sur la résistance, la résilience et la réparabilité). Cependant, l'évitement est généralement la stratégie la plus efficace pour la gestion des risques d'inondation (section 11), et par conséquent, on doit toujours être éviter de construire des bâtiments et des infrastructures dans des zones à fort risque d'inondation lorsque cela est possible.

Dans le cas des tsunamis, il n'est pas possible de concevoir tous les bâtiments et infrastructures dans une zone inondable par les tsunamis pour résister aux impacts des tsunamis. Certains tsunamis seront précédés de ou coïncideront avec des tremblements de terre, ce qui rendra encore plus difficile la conception de structures capables de résister aux deux dangers. Nous recommandons donc que tous les bâtiments de catégorie 4 et les bâtiments de catégorie 3 qui dépassent un seuil de risque de tsunami défini<sup>7</sup> soient conçus selon les critères de tsunami (les bâtiments de catégorie 2 peuvent être ajoutés si les codes régionaux/locaux le requièrent). Plus important encore, dans le cas des tsunamis, il est essentiel qu'il y ait suffisamment de bâtiments résistants aux tsunamis dans une zone inondable par tsunami pour accueillir et fournir des services d'urgence à la population de la zone inondable, si les centres d'évacuation en terrain plus élevé ne sont pas raisonnablement accessibles dans le délai d'alerte au tsunami. Encore une fois, l'évitement est fortement recommandé.

En outre, au minimum, l'**élévation relative du niveau de la mer** au cours de la période de cycle de vie prévue des bâtiments doit être incluse (voir également la section 5.3.7 relative à la conception du risque futur dynamique). Les changements potentiels de la fréquence et de l'intensité des tempêtes au fil du

---

<sup>7</sup> Dans la norme ASCE 7-16, les seuils de risque de tsunami peuvent être déterminés par les gouvernements étatiques ou locaux et peuvent dépendre du risque de tsunami auquel est exposée la collectivité, des procédures d'intervention en cas de tsunami, des temps d'évacuation et des objectifs de résilience de la collectivité dans son ensemble. Au moment de la rédaction des présentes lignes directrices, des évaluations probabilistes détaillées de danger de tsunami ne sont pas disponibles pour les régions côtières canadiennes, ce qui éclairerait l'élaboration de ces seuils.

temps, ainsi que d'autres non-stationnarités, doivent également être pris en compte lors de la définition de la crue nominale. Cependant, l'incertitude et la variabilité inter-modèles dans les projections futures des vents extrêmes rendent cela pratiquement difficile, et la compréhension des impacts futurs du climat sur les conditions des tempêtes côtières continue de faire l'objet de recherches (Casas-Prat et Wang, 2019; Murphy et al., 2020). Dans de nombreux cas, les changements du niveau de la mer sont le facteur prédominant influant sur la fréquence accrue des niveaux d'eau extrêmes, mais une simple analyse de sensibilité de Bernier et al. (2007) a démontré que « les changements dans les activités orageuses ne doivent pas être négligés ».

**Tableau 3. Catégories fondées sur les risques pour la conception de bâtiments et d'infrastructures pour les inondations dues aux tempêtes côtières et aux tsunamis, basées sur la norme ASCE/SEI (2016) et Alberta Infrastructure (2017).**

Catégorie	Perturbation et risque possibles	Types de bâtiment et de structure inclus	Inondation par tempête côtière		Tsunami	
			Événement nominal	Mesures nominales	Événement nominal	Mesures nominales
1	<b>Perturbation minimale</b> de la collectivité, ou  <b>Risque minimal</b> pour les personnes ou l'environnement naturel	Structures temporaires, bâtiments de stockage (hormis le stockage commercial) et certaines structures agricoles	Crue de tempête côtière nominale <b>minimale</b> + ERNM* pour tout le cycle de vie	Basé sur les seuils de risque d'inondation et les impacts cumulatifs des inondations. L'évitement est privilégié.	Catégorie de risque <b>minimal</b> de tsunami Danger de tsunami + ERNM pour tout le cycle de vie	Ce n'est généralement pas faisable, mais il faut veiller à ce qu'aucun nouveau danger (p. ex. des débris) ne soit créé. L'évitement est privilégié.
2	<b>Perturbation modérée</b> de la collectivité, ou  <b>Risque modéré</b> pour les personnes ou l'environnement naturel	La plupart des bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels	Crue de tempête côtière nominale modérée + ERNM pour tout le cycle de vie	Basé sur les seuils de risque d'inondation et les impacts cumulatifs des inondations. L'évitement est privilégié.	Catégorie de risque de tsunami <b>modéré</b> Danger de tsunami + ERNM pour tout le cycle de vie	Pas faisable dans tous les cas, mais il faut veiller à ce qu'aucun nouveau danger (p. ex. des débris) ne soit créé. L'évitement est privilégié.
3	<b>Perturbation importante</b> de la collectivité, ou  <b>Risque élevé</b> pour les personnes ou l'environnement naturel, ou  <b>Perte élevée</b> de données historiques et d'artefacts	Infrastructure essentielle; bâtiments où de nombreuses personnes se rassemblent; bâtiments contenant des matières dangereuses (non inclus dans la catégorie 4); musée/archives <sup>8</sup>	Crue de tempête côtière nominale <b>élevée</b> + ERNM pour tout le cycle de vie	L'évitement est recommandé. Si ce n'est pas possible, concevoir des mesures basées sur les seuils de risque d'inondation et les impacts cumulatifs des inondations	Catégorie à risque de tsunami <b>élevé</b> Danger de tsunami + ERNM pour tout le cycle de vie	L'évitement est recommandé. Si ce n'est pas possible, concevoir des mesures basées sur un seuil de risque de tsunami défini.
4	<b>Essentiel pour l'intervention d'urgence et le rétablissement</b> de la collectivité, ou  <b>Risque important</b> pour les personnes ou l'environnement naturel	Infrastructures et bâtiments d'intervention d'urgence et de récupération critiques contenant des matières dangereuses <sup>9</sup>	Crue de tempête côtière nominale <b>importante</b> + ERNM pour tout le cycle de vie	L'évitement est fortement recommandé. Si ce n'est pas possible, concevoir des mesures basées sur les seuils de risque d'inondation et les impacts cumulatifs des inondations.	Catégorie de risque de tsunami <b>important</b> Danger de tsunami + ERNM pour tout le cycle de vie	L'évitement est fortement recommandé (sauf les structures d'évacuation verticales). Si ce n'est pas possible, concevoir des mesures basées sur un seuil de risque de tsunami défini.

\*Nota : ERNM = élévation relative du niveau de la mer.

<sup>8</sup> Catégorie 3 : Bâtiments où de nombreuses personnes se rassemblent (centres communautaires, écoles, centres culturels, etc.) et infrastructures essentielles non incluses dans la catégorie 4 qui entraîneraient des perturbations et des pertes économiques. Bâtiments non inclus dans la catégorie 4 qui contiennent des substances toxiques ou explosives menaçant l'environnement public ou naturel (p. ex. certaines fournitures agricoles). Musées, archives, bâtiments historiques et sites culturels, etc.

<sup>9</sup> Catégorie 4 : Hôpitaux et autres installations de traitement d'urgence; postes d'incendie, de sauvetage, d'ambulance et de police; abris d'urgence désignés; centres d'opérations d'urgence désignés; installations de production d'électricité, de distribution d'eau et de traitement des eaux usées et autres services publics essentiels pour les opérations d'urgence, les interventions d'urgence liées à l'aviation, aux télécommunications, aux installations de stockage de carburant ou d'eau; bâtiments et structures où sont stockées de grandes quantités de matières dangereuses (carburants, produits chimiques, déchets) qui sont toxiques ou explosives et constituent une menace pour l'environnement public ou naturel lorsqu'elles sont rejetées.

Sur la base des seuils de risque d'inondation (y compris la profondeur de l'inondation, la vitesse, la charge de débris, etc.) pour la crue nominale d'une tempête côtière spécifiée, différentes mesures de **conception de bâtiments et d'infrastructures résilientes aux inondations** peuvent être utilisées, semblables à celles de l'approche conceptuelle du Royaume-Uni (section 5.2). Les seuils spécifiques de risque d'inondation sont basés sur la tolérance au risque (et le domaine en évolution de la protection contre les inondations humide et sèche). Tout d'abord, des efforts devraient être faits pour éviter de nouveaux complexes (et en particulier, aucun bâtiment ni aucune infrastructure de catégorie 3 ou 4) dans les zones à fort risque d'inondation. Si des bâtiments ou des infrastructures doivent être situés dans ces zones (ou y sont déjà situés), des mesures de conception résistantes, résilientes et réparables doivent être utilisées. Lors de la conception de mesures pour des bâtiments et des infrastructures résistants aux inondations, les effets cumulatifs des inondations à faible impact mais fréquentes doivent également être pris en compte. L'atténuation du risque résiduel au niveau du bâtiment est abordée plus en détail dans la section 5.3.6.

### 5.3.4 Conception tenant compte des critères environnementaux

Il est essentiel de prendre en compte les impacts éventuels sur la santé publique et les écosystèmes naturels qu'un rejet de matières dangereuses ou toxiques lié aux inondations pourrait avoir. L'ASCE 7-16 et les lignes directrices de l'Alberta Infrastructure prescrivent les niveaux de conception les plus élevés pour les bâtiments où sont stockées des quantités importantes de matières dangereuses, toxiques ou explosives (Tableau 3). En outre, les conséquences environnementales négatives d'autres décisions de conception (telles que les matériaux de construction et le remblai) ou les conséquences sur l'écosystème des défenses artificielles contre les inondations doivent être réduites le plus possible. Le cas échéant, des caractéristiques de conception fondées sur la nature (infrastructures vertes côtières), telles que les reliefs côtiers dynamiques (plages, dunes) et la végétation côtière (marais salés, forêts de varech, dunes et végétation riveraine) (Banque mondiale, 2017; Conger, 2018; Bridges et al., 2015) devraient être considérés comme faisant partie du processus de conception pour réduire le risque d'inondation côtière. Plus généralement (c'est-à-dire au-delà des considérations relatives à la conception des bâtiments et des infrastructures), des approches stratégiques d'utilisation des terres et de planification urbaine (y compris des mesures de prévention des risques d'inondation) qui prennent en compte la santé et la durabilité du système dans son ensemble devraient être utilisées pour gérer les risques d'inondation côtière.

### 5.3.5 Conception selon la tolérance au risque

Les critères de conception doivent établir les probabilités d'événements d'inondation (et les risques d'inondation correspondants) pour lesquels différents objectifs de rendement doivent être satisfaits. Idéalement, une gamme de scénarios d'inondation devrait être envisagée (c'est-à-dire aller au-delà de l'approche traditionnelle fondée sur les normes). Certaines des décisions concernant les critères de conception seront déterminées par la tolérance au risque des intervenants. Pour les nouvelles constructions, le niveau minimum de risque acceptable pour les collectivités et les municipalités est, dans une certaine mesure, fixé par les règlements d'aménagement du territoire et les normes de conception des infrastructures. Cependant, dans les cas où ces normes ne peuvent être respectées (p. ex. des infrastructures essentielles dans des zones à risque élevé) ou lorsque les promoteurs souhaitent aller au-delà des exigences minimales pour protéger leurs intérêts, des jugements doivent être portés sur ce qui constitue un risque d'inondation acceptable ou non. La tolérance au risque est définie comme « la volonté d'une organisation (ou d'un territoire de compétence) ou d'un intervenant de supporter le risque après le traitement du risque pour atteindre ses objectifs » (Australian Institute for Disaster Resilience, 2015, adapté de la norme ISO 2009). Les tolérances au risque sont généralement liées à la criticité des bâtiments ou de l'infrastructure, de sorte que les infrastructures essentielles auront une tolérance au risque beaucoup plus faible que d'autres types d'infrastructure.

Différentes tolérances au risque sont reflétées dans les quatre catégories de risque définies dans le Tableau 3, où la catégorie de risque 4 (bâtiments ou infrastructures essentielles pour les interventions d'urgence, ou avec des quantités élevées de substances toxiques) a un seuil de risque beaucoup plus faible, ce qui entraîne des exigences de conception plus strictes.

#### Élaboration de profils de tolérance au risque pour la ville de Vancouver

On trouve un exemple de la façon dont les critères de tolérance au risque peuvent être établis pour une collectivité dans le cadre de planification de l'élévation du niveau de la mer de la ville de Vancouver (Ebbwater Consulting et Compass Resource Management, 2018). Dans cette étude, les actifs de la ville ont été classés en 5 catégories principales : propriété résidentielle, propriété commerciale, bâtiments institutionnels, infrastructures essentielles (y compris l'alimentation électrique et les télécommunications, l'approvisionnement en eau, les eaux usées et les routes/transports) et les parcs. Ce classement était basé sur les documents des Nations Unies sur la RRC (SIPC, 2015, 2016), ainsi que sur les exigences du gouvernement municipal. Dans les ateliers, le personnel de la Ville et les décideurs ont été invités à indiquer leur tolérance au risque, en termes de probabilité tolérable d'inondation, pour trois scénarios d'inondation : inondation mineure/nuisible avec une profondeur d'inondation de 0 à 10 cm, inondation modérée (~30 cm de profondeur) et inondation grave (~1 m de

### 5.3.6 Conception permettant d'atténuer les risques résiduels au niveau du bâtiment/de l'infrastructure

À moins que l'exposition aux risques d'inondation côtière ne puisse être complètement évitée pour toutes les probabilités d'événements, un certain risque résiduel d'impacts d'inondations subsistera. Le risque résiduel d'inondation peut être réduit à l'aide de mesures d'évitement (p. ex. augmentation des distances de recul ou des marges de franc-bord), généralement en tant que solution privilégiée, ou en mettant en œuvre des mesures de conception au niveau des bâtiments et des infrastructures. Un modèle concordant avec cette approche identifie une hiérarchie de quatre principes ou stratégies de réduction des risques d'inondation résiduelles, décrits comme l'évitement, la résistance, la résilience et la facilité de réparation (BSI, 2015; Tagg, 2017; Tagg et al., 2016; Bowker et al., 2007) :

- **Évitement** : comprend l'utilisation d'outils de planification de l'utilisation des terres ou d'élévations minimales pour la construction afin de restreindre le développement dans les zones inondables.
- **Résistance** : comprend des mesures pour empêcher les eaux de crue de pénétrer dans un bâtiment ou des composants d'infrastructure (barrières, portes anti-inondation, matériaux résistants, tels que les enduits imperméables).
- **Résilience** :<sup>10</sup> vise à réduire l'impact des eaux de crue en intégrant des mesures permettant un rétablissement plus rapide et plus économique suite à une inondation (p. ex. des matériaux qui permettent un séchage et un nettoyage plus faciles et plus rapides).
- **Facilité de réparation** : similaire à la résilience, mais se concentre davantage sur l'intégration de composants (p. ex. des matériaux) qui rendent le remplacement et les réparations plus faciles ou plus économiques à la suite d'une inondation.

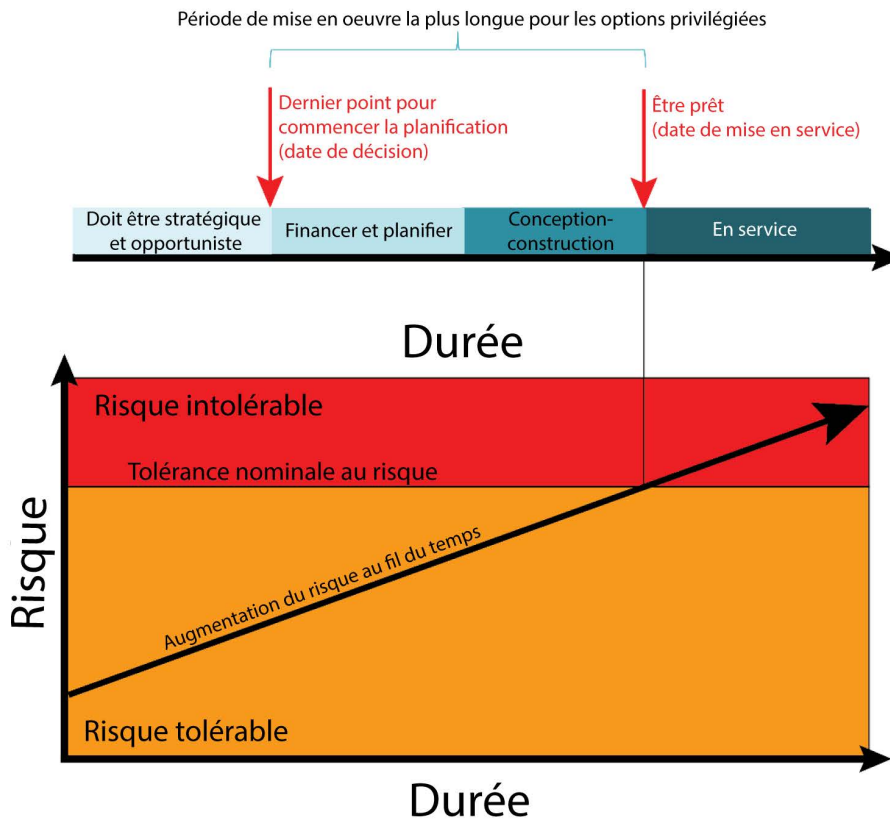
<sup>10</sup> Quelque peu différent de l'utilisation conventionnelle de « résilience » pour signifier « la capacité d'un système, d'une collectivité ou d'une société exposée aux risques de résister, d'absorber, d'accueillir et de corriger les effets d'un danger, en temps opportun et de manière efficace, notamment par la préservation et la restauration de ses structures essentielles et de ses fonctions de base ».

Il est entendu que la révision des lignes directrices au Royaume-Uni comprendra une nouvelle définition du terme « résilience », qui comprendra à la fois « résistance » et « facilité de récupération ».

### 5.3.7 Conception pour un risque futur dynamique (y compris l'élévation du niveau de la mer)

Le risque d'inondation est dynamique, en raison de conditions environnementales et sociales en constante évolution (GFDRR, 2016). Les risques d'inondation côtière sont influencés par les effets des changements climatiques (p. ex. changement du niveau de la mer, changements éventuels de la fréquence et de l'intensité des tempêtes, changement des conditions des glaces) ainsi que d'autres changements environnementaux qui ne sont pas nécessairement attribuables aux changements climatiques ou qui se produisent sur des périodes différentes (p. ex. érosion côtière et ajustement isostatique). L'exposition aux risques d'inondation côtière change également avec le temps. Par exemple, les quartiers côtiers qui ne sont pas exposés à un risque d'inondation côtière important dans les conditions actuelles peuvent devenir exposés à l'avenir en raison de l'élévation relative du niveau de la mer ou de l'érosion côtière. L'augmentation des densités de population dans les collectivités côtières et le développement associé de bâtiments et de services d'infrastructure essentiels peuvent également entraîner une exposition accrue aux risques d'inondation côtière (GFDRR, 2016).

Dans le contexte du risque dynamique (changeant), il est essentiel de tenir compte de la période de cycle de vie prévue du bâtiment ou de l'infrastructure, et de s'assurer que les bâtiments et les infrastructures sont situés et conçus en prévision des changements futurs - ou qu'ils sont conçus de manière suffisamment flexible pour permettre des ajustements face à un avenir changeant. De plus, il est essentiel de planifier à l'avance et d'anticiper le moment où le risque futur peut dépasser les seuils de tolérance au risque (p. ex. en raison de l'élévation du niveau de la mer). Cela peut nécessiter la planification des changements de profil de risques sur plusieurs décennies et l'identification des délais requis ou des points de déclenchement pour la prise de décision, car la plupart des grands projets d'infrastructure ou des adaptations de conception peuvent prendre plusieurs années à mettre en œuvre. Le processus de planification et de conception de l'adaptation doit généralement commencer des années avant les dates de mise en service requises (Figure 9).



**Figure 9. Exemple de calendrier pour s’adapter aux inondations côtières avec élévation du niveau de la mer. Figure adaptée d’Ebbwater Consulting et Compass Resource Management (2018), avec autorisation de réimpression.**

La fréquence et la gravité des inondations peuvent changer avec le temps. Par exemple, les changements climatiques peuvent avoir une incidence sur la fréquence des tempêtes côtières, et l’élévation relative du niveau de la mer entraînera une augmentation de la fréquence et de l’ampleur des événements de niveau élevé des eaux au fil du temps dans certaines régions du Canada. Cela signifie que les amplitudes des niveaux de retour peuvent changer au fil du temps (c.-à-d. que le niveau élevé des eaux pour une PDA de 1 % à un horizon temporel futur peut être plus élevé que le niveau élevé des eaux pour une PDA de 1 % basée sur le climat actuel ou historique), ou inversement, la fréquence des événements extrêmes peut changer (p. ex. l’événement de niveau élevé des eaux pour une PDA de 1 % peut devenir un événement ayant une PDA de 2 % pour un horizon temporel futur). Pour de plus amples informations, se reporter à la section 6.8 (Projections des changements climatiques) et à la section 8.4.1.2 (Élévation du niveau de la mer). Le maintien de la capacité d’adaptation et de la flexibilité pour répondre à un environnement changeant est un élément important de la conception pour le risque dynamique. Étant donné qu’il existe de nombreuses incertitudes entourant les projections des changements climatiques, du changement démographique et du changement d’utilisation des terres, il est essentiel d’utiliser un cadre de conception qui soit flexible pour répondre aux circonstances changeantes et qui soutienne un éventail d’options d’adaptation robustes. Par exemple, cela pourrait inclure une conception de bâtiment qui peut être facilement améliorée en réponse à l’augmentation des risques liés au climat.

Pour identifier les moments où le risque peut (en raison d'une combinaison de changements dans les dangers et les conséquences) devenir inacceptable, les déclencheurs de l'adaptation doivent être identifiés. Les déclencheurs des changements climatiques peuvent être liés à des seuils spécifiques (p. ex. lorsque le niveau de la mer s'élève au-dessus d'un certain niveau) et peuvent refléter les données observées, ainsi que les changements dans les projections futures. Pour s'assurer que les changements et les déclencheurs d'intervention sont pris en compte, il est recommandé de revoir les approches de conception et de planification des crues tous les cinq ans, conformément aux recommandations de la FEMA aux États-Unis (FEMA, 2003).

Un avantage important du maintien de la flexibilité et de la conception du risque dynamique est que la mésadaptation peut être évitée. Les grands projets d'infrastructure (p. ex. les défenses contre les inondations), qui sont souvent associés à des coûts d'investissement importants et parfois à des impacts négatifs sur l'environnement naturel, n'intègrent souvent pas une capacité d'adaptation adéquate. « De mauvaises décisions peuvent 'verrouiller' une mésadaptation qui servirait mal une société future changée et qui sont très coûteuses à inverser » (Sayers et al., 2013). Ainsi, les pratiques exemplaires en matière de gestion des risques d'inondation reconnaissent l'importance de la surveillance, de la révision et de l'adaptation, ce qui nécessite un changement fondamental par rapport aux approches traditionnelles de « construire et maintenir » (Sayers et al., 2013).

### **5.3.8 Conception pour plusieurs dangers naturels**

Un autre élément important de la conception de bâtiments et d'infrastructures résilients consiste à prendre en compte les impacts de multiples risques naturels, seuls et combinés, sur le site. Cela permet de garantir que la conception de bâtiments et d'infrastructures résistants aux inondations ne compromet pas la résilience à d'autres dangers naturels. Au lieu de cela, l'objectif est de s'assurer que les bâtiments et les infrastructures sont conçus pour résister à l'éventail de risques dominants sur un site donné. Par exemple, pour les régions côtières situées dans des zones sismiques actives, comme en Colombie-Britannique, il peut être nécessaire de prévoir la conception en fonction des risques sismiques, en plus des risques d'inondation côtière. Les autres dangers naturels liés aux bâtiments et aux infrastructures sur les côtes canadiennes comprennent l'érosion, les incendies de forêt, les vents et les précipitations extrêmes (pluie, neige, glace, grêle), les effets de la glace et du frasil, les températures extrêmes, les glissements de terrain, les charges et impacts de débris et le dégel du pergélisol. Pour certains de ces dangers, la fréquence et l'intensité des événements dangereux peuvent être modifiées par les changements climatiques (Radić et al., 2015; Cheng et al., 2014; Jeong et Sushama, 2018; Flannigan et al., 2015; Wotton et al., 2017; Jeong et al., 2018). La norme ASCE 7-16 aux États-Unis définit des catégories de risques pour de multiples dangers naturels, similaires à l'approche pour les inondations et les tsunamis (section 5.2); où, par exemple, les charges nominales sismiques, éoliennes, de neige et de glace sont augmentées pour les bâtiments ou les infrastructures à plus haute criticité.

### **5.3.9 Intégrer la conception dans des stratégies plus larges de gestion des risques d'inondation côtière**

Avec le passage à une approche fondée sur les risques, les critères de conception des bâtiments et des infrastructures devraient concorder avec et être intégrés dans une approche plus large de gestion des risques d'inondation, où l'utilisation des terres, les contraintes environnementales et socio-économiques sont prises en compte. Cela inclurait des approches holistiques de conception de bâtiments et d'infrastructures, où les aspects environnementaux du bâtiment et des matériaux de construction sont également pris en compte. La conception résistante aux inondations peut intégrer de nombreux aspects, allant de l'infrastructure verte côtière, comme les reliefs côtiers dynamiques et la végétation côtière, à la conception de bâtiments résistants aux inondations, comme les bâtiments surélevés ou la protection contre

les inondations humide et sèche. Les horizons temporels plus longs pour l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer offrent également de nombreuses opportunités de planification stratégique et opportuniste. Les collectivités changent constamment, à mesure que des quartiers sont nouvellement développés, que les anciens bâtiments sont remplacés par de nouveaux ou que des rénovations sont effectuées. Ces renouvellements peuvent être utilisés pour rendre les bâtiments plus résistants aux inondations auxquelles ils pourraient être soumis à l'avenir avec les changements climatiques. Surtout pour les grands projets d'infrastructure essentielle, dont la durée de vie peut être très longue, il est logique de concevoir aujourd'hui en fonction des impacts futurs potentiels.

## 6 Réunion des données et analyse des lacunes

Les évaluations complètes des risques d'inondation côtière pour soutenir la conception des bâtiments et des infrastructures (et la modernisation) sont des exercices à grand volume de données. Les données nécessaires pour soutenir une évaluation des risques d'inondation côtière devraient être identifiées, acquises et examinées le plus tôt possible dans le processus, afin d'identifier les lacunes de données et d'élaborer une stratégie pour les combler. Les données météocean (météorologiques et océanographiques), l'imagerie aérienne, la topographie, la bathymétrie et les inventaires des bâtiments et des infrastructures sont disponibles auprès de sources gouvernementales fédérales, provinciales/territoriales et municipales, avec des couvertures spatiales et temporelles, une résolution et des niveaux d'assurance qualité variables. Les données météocean ont tendance à être librement disponibles, tandis que les images haute résolution et les données de terrain, de bâtiments et d'infrastructures peuvent nécessiter un accord de licence (elles sont souvent gratuites ou peuvent être acquises pour une somme modique). Des ensembles de données régionaux peuvent également être disponibles auprès des universités et des entreprises privées (p. ex. déploiements d'instruments à court terme, ensembles de données de diffusion rétrospective des vagues, imagerie par satellite, bathymétrie par satellite).

Il est rare que toutes les données nécessaires soient facilement disponibles sur ou assez près d'un site de projet pour être directement applicables au site. Des déploiements d'instruments à court terme et spécifiques au site peuvent être nécessaires pour caractériser les conditions environnementales (p. ex. vagues et niveaux d'eau) sur le site du projet. Ces ensembles de données de courte durée peuvent être utilisés comme données d'entrée ou pour calibrer et valider des modèles numériques qui visent à générer des données pour les périodes plus longues nécessaires pour comprendre les extrêmes et les processus à long terme. L'acquisition de données sur le terrain (p. ex. données topographiques ou bathymétriques) peut nécessiter des délais importants pour la planification et l'obtention de permis, et peut être limitée à certaines périodes de l'année (selon les niveaux d'eau saisonniers, les vagues, la couverture de glace, la couverture végétale, les règlements ou les périodes de récolte, etc.). Les types de données suivants peuvent être nécessaires pour évaluer le danger, la vulnérabilité et le risque d'inondation côtière sur un site :

### 1. Données à l'appui de la caractérisation des dangers

- **Cartes des dangers existantes** : cartes existantes des dangers d'inondation côtière, d'érosion et de plage dynamique.
- **Niveaux d'eau** : mesures à long terme qui capturent la gamme saisonnière des niveaux d'eau, des marées et des variations à court terme, telles que les ondes de tempête et les seiches.
- **Données météorologiques** : mesures à long terme de la vitesse du vent, de la direction du vent et de la pression atmosphérique. Les données météorologiques sont souvent utilisées pour créer des modèles prédictifs servant à estimer les conditions des ondes de tempête et des vagues lorsque les mesures directes ne sont pas disponibles.
- **Glace** : l'étendue de la glace de mer ou de lac et la présence de banquise côtière influe sur la génération de vagues et l'amortissement potentiel des vagues et des ondes de tempête sur le littoral.
- **Vagues** : mesures directes de la hauteur, de la période et de la direction des vagues ou des conditions de vagues rétrospectives (modélisées), élaborées à l'aide de données météorologiques.

- **Tsunamis** : les tsunamis sont des vagues de très longue période déclenchées par des tremblements de terre, des glissements de terrain, des éruptions volcaniques, des effets météorologiques ou d'autres événements. Des modèles prédictifs, des données géophysiques, géologiques et/ou paléotsunamis sont souvent utilisés pour estimer les caractéristiques des tsunamis.
- **Bathymétrie** : les processus des vagues sublittorales, les ondes de tempête et les tsunamis sont influencés par le terrain sous-marin.
- **Topographie** : la remontée et le débordement de la vague (deux voies possibles vers les inondations côtières), ainsi que l'étendue et la gravité des inondations sont influencés par le terrain au-dessus de l'eau.
- **Imagerie aérienne** : l'imagerie aérienne peut être utilisée pour identifier les structures du littoral, évaluer les changements à long terme de la position du rivage et classer le rivage en tronçons à analyser.
- **Impacts des changements climatiques** : les directives sur le changement relatif du niveau de la mer (y compris le soulèvement/l'affaissement de la surface du sol), l'hydrologie (p. ex. les lacs intérieurs), l'intensité des tempêtes et la couverture de glace devraient être examinées pour la zone d'étude.

## 2. Données d'exposition et de vulnérabilité

- **Inventaires des bâtiments et des infrastructures** : la vulnérabilité d'un bâtiment ou d'un bien d'infrastructure dépend de son emplacement, de son élévation et de son type/classement. Un inventaire des actifs à risque peut inclure l'emplacement, l'élévation du sol, l'élévation du rez-de-chaussée, le classement du bâtiment (selon le type ou l'utilisation, le nombre d'étages, etc.), la superficie de plancher, la valeur et les niveaux d'eau critiques (p. ex. les niveaux auxquels l'équipement électrique/mécanique serait exposé aux eaux de crue).
- **Données globales d'exposition et de vulnérabilité** :
  - **Personnes touchées** : données de recensement, données de socio-vulnérabilité.
  - **Économie** : données sur les conséquences en cascade des inondations pour l'économie (p. ex. nombre d'entreprises dans la zone touchée).
  - **Données sur l'infrastructure essentielle et perturbation des services de base**
  - **Environnement** : données sur les écosystèmes sensibles de la zone, données sur les matières dangereuses.
  - **Culture** : sites culturels et archéologiques (autochtones/non autochtones) dans la zone susceptible d'être touchée.

Cette section identifie et examine les sources de données disponibles, les options d'acquisition de données sur le terrain (si nécessaire), la longueur requise des enregistrements de données pour l'analyse, l'analyse des lacunes dans les données et le contrôle de la qualité pour les types de données nécessaires pour compléter un risque d'inondation côtière, la vulnérabilité et l'évaluation des risques. Toutes les données doivent être examinées afin de déceler les lacunes, les valeurs aberrantes ou les erreurs/inexactitudes présumées avant d'être utilisées dans une évaluation des risques d'inondation côtière. La qualité des données et toutes les incertitudes et hypothèses connexes doivent être enregistrées et incluses dans le rapport d'évaluation des risques.

## 6.1 Données sur le niveau d'eau

Les données sur le niveau de l'eau sont une condition préalable essentielle pour évaluer les risques d'inondation côtière. Idéalement, des mesures à long terme sont disponibles sur ou à proximité du site où les risques sont évalués, donnant un aperçu à court terme (p. ex. marées, ondes de tempête et seiches), saisonnier (p. ex. en réponse aux cycles hydrologiques), d'une année à l'autre (p. ex. induite par la variabilité climatique) et à long terme (changement relatif du niveau de la mer) des fluctuations des niveaux d'eau. Des données semi-qualitatives, telles que des photographies, des marques de crues sur les bâtiments, des lignes de loch et de débris, et des informations anecdotiques sur l'étendue et la gravité des tempêtes passées sont utiles (p. ex. Daigle, 2006; Forbes et al., 2013).

### 6.1.1 Données de niveau de l'eau disponibles

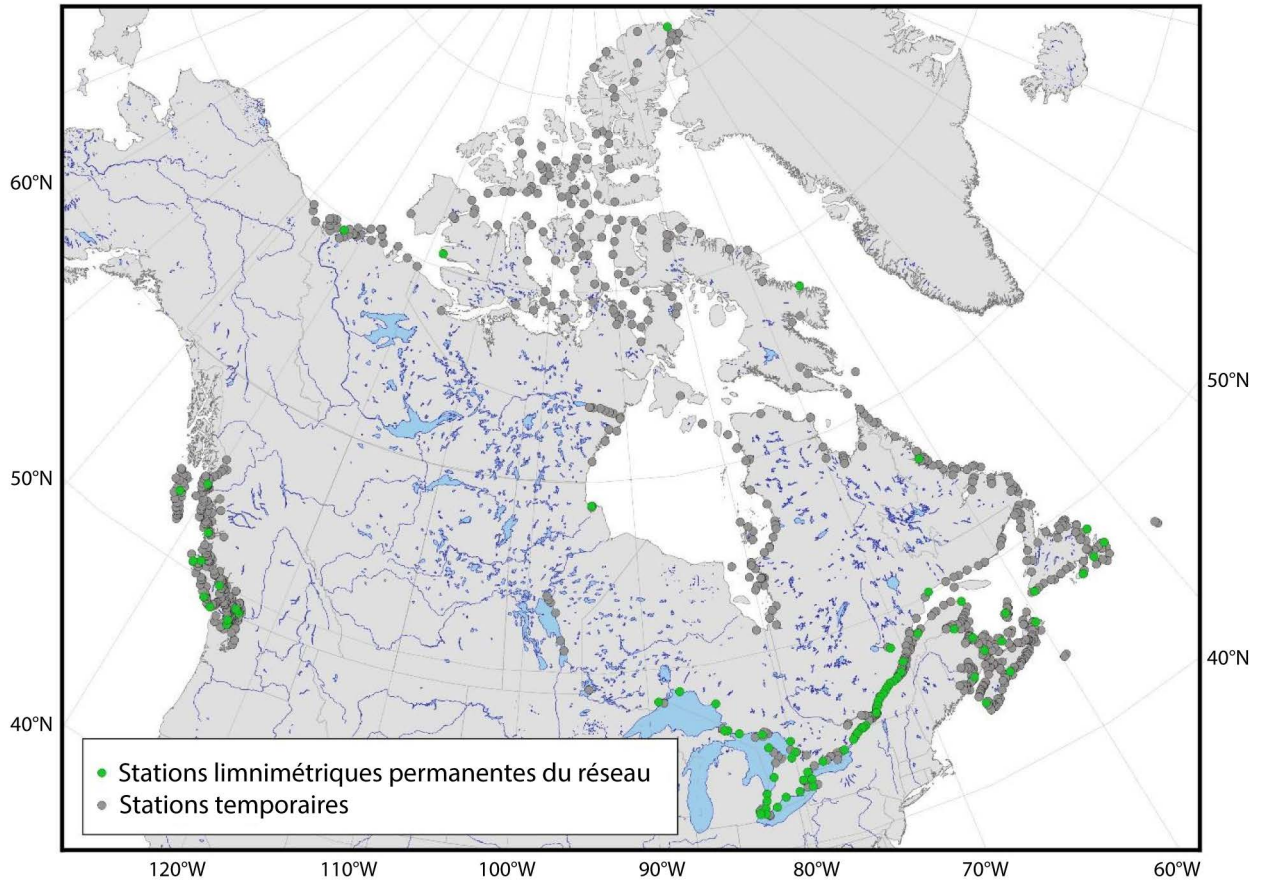
#### 6.1.1.1 Mesures du niveau d'eau

Le Service hydrographique du Canada (SHC) de Pêches et Océans Canada maintient un réseau de jauges permanentes de niveau d'eau le long des côtes maritimes et des Grands Lacs du Canada (Figure 10). Les données en temps réel et archivées sur les niveaux d'eau sont accessibles sur [waterlevels.gc.ca](http://waterlevels.gc.ca)<sup>11</sup>. Le réseau se compose de 88 stations limnimétriques permanentes et de données pour 806 autres stations temporaires qui ont été actives à un moment ou à un autre. Des données mesurées sur plus de 50 ans sont disponibles pour 60 des stations. Les données horaires sur les niveaux d'eau sont généralement disponibles à partir des années 1960, avec des mesures à plus haute fréquence depuis environ les années 1980 (15 minutes) et 2000 (3 minutes ou 1 minute). Les données horaires sont suffisantes pour la plupart des analyses de niveaux d'eau extrêmes. Les niveaux d'eau préliminaires (dont la qualité n'est pas contrôlée) peuvent être disponibles auprès des bureaux régionaux du Service hydrographique du Canada. Par exemple, SHC Pacifique possède des données préliminaires pour 35 marégraphes ([www.pac.dfo-mpo.gc.ca](http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca)).

Malgré le vaste inventaire de stations temporaires et à court terme décrit ci-dessus, il y a relativement peu de marégraphes fonctionnant en continu dans les eaux canadiennes avec de longs enregistrements appropriés pour analyser les distributions de probabilité des ondes de tempête ou des niveaux d'eau extrêmes. Les mesures à long terme, comme celles d'Halifax, de Charlottetown, de Vancouver et de Victoria, sont d'excellentes sources de données limnimétriques extrêmes. Cependant, de vastes zones des eaux canadiennes ne disposent que d'ensembles de données limnimétriques à court terme et/ou intermittents.

---

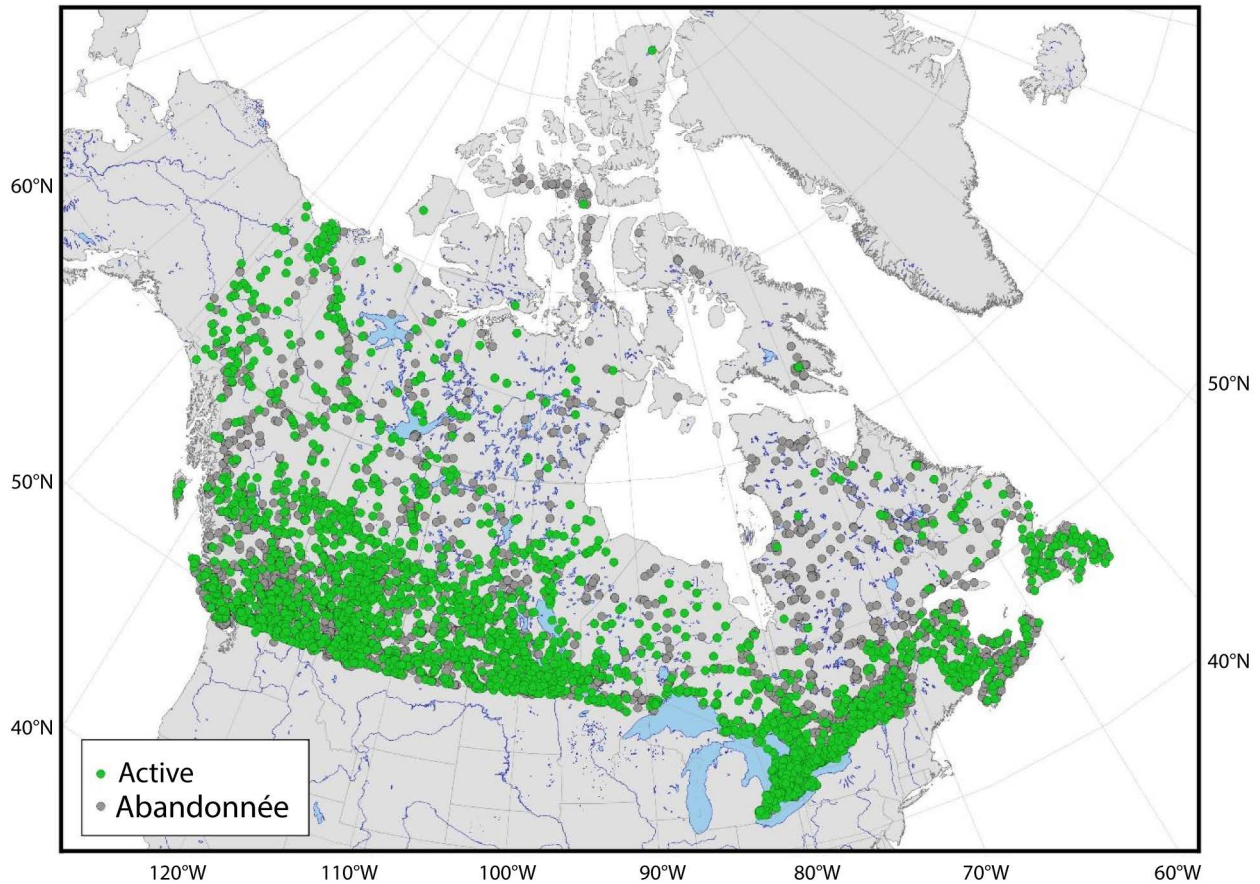
<sup>11</sup> Ces archives et de nombreuses autres archives de données du gouvernement du Canada sont également accessibles sur le portail Gouvernement ouvert (<https://open.canada.ca/fr>).



**Figure 10. Inventaire des stations limnimétriques sur les côtes marines et du réseau Saint-Laurent-Grands Lacs du Canada.**

En plus des stations limnimétriques du SHC le long du réseau Saint-Laurent-Grands Lacs, les données limnimétriques des lacs (et rivières) sont disponibles auprès de nombreux organismes différents selon le territoire de compétence. Les Relevés hydrologiques du Canada fournissent une couverture nationale et sont souvent la principale source pour obtenir des données limnimétriques. Les données quotidiennes contrôlées sur le niveau de l'eau et/ou le débit des rivières pour plus de 1 900 stations actives et plus de 7 700 stations abandonnées sont disponibles sur [eau.ec.gc.ca](http://eau.ec.gc.ca) (Figure 11). Les données de la station peuvent être téléchargées individuellement ou sous forme de base de données. Les données horaires ou plus fréquentes peuvent être obtenues sous licence auprès de Relevés hydrologiques du Canada pour une somme modique.

Les niveaux d'eau moyens mensuels sont également disponibles pour les Grands Lacs (lac Supérieur, lac Michigan-Huron, lac Sainte-Claire, lac Érié et lac Ontario) de 1918 à aujourd'hui (<https://www.waterlevels.gc.ca/C&A/historical-fra.html>). Les niveaux d'eau de chaque lac sont des moyennes basées sur un réseau de stations hydrométriques au Canada et aux États-Unis.



**Figure 11. Inventaire des stations limnimétriques pour les eaux intérieures canadiennes.**

Les autres sources de données limnimétriques des lacs et des réservoirs intérieurs comprennent les autorités provinciales, comme le ministère de l'Environnement du Québec ([cehq.gouv.qc.ca](http://cehq.gouv.qc.ca)), les offices de protection de la nature de l'Ontario, les exploitants hydroélectriques (p. ex. Manitoba Hydro, [hydro.mb.ca](http://hydro.mb.ca)) et les commissions de réglementation ou de contrôle (p. ex. la Commission de contrôle du lac des Bois). Récemment, la province de l'Île-du-Prince-Édouard a mis en place son propre réseau de marégraphes pour améliorer la résolution spatiale des statistiques sur les ondes de tempête (la province ne dispose actuellement que d'un seul marégraphe à long terme exploité par le SHC, à Charlottetown). Bon nombre de ces sources secondaires sont plus difficiles à obtenir et il peut être nécessaire de contacter le détenteur des données concerné dans la région d'intérêt.

#### 6.1.1.2 Composantes de la marée

L'analyse d'un enregistrement du niveau de l'eau peut fournir les composantes de la marée (p. ex. Pugh, 1987; Foreman, 1977; Pawlowicz et al., 2002), qui sont ensuite utilisés pour prédire le niveau de la marée astronomique dans le passé ou le futur, en supposant le niveau de la mer moyen statique et les conditions bathymétriques. La longueur de l'enregistrement influe sur le nombre de composantes de la marée qui peuvent être déterminées grâce à l'analyse. Une période d'un mois lunaire permet d'obtenir une compréhension de base des conditions de marée, tandis qu'une période plus longue de plusieurs années permet d'obtenir une meilleure représentation.

Les prévisions de marée basées sur les composantes analysées sont des estimations de la contribution astronomique des marées aux niveaux des eaux côtières uniquement. La précision des prévisions de marée est limitée par la longueur et la qualité des données d'entrée, les méthodes d'analyse/de prédiction, ainsi que la représentativité des données mesurées. Les événements atmosphériques, les débits des rivières à proximité, les anomalies du niveau de la mer (p. ex. El Niño-oscillation australe) et les interactions marée-onde peuvent tous être reflétés dans les mesures et peuvent avoir une incidence sur les résultats de l'analyse harmonique des marées. Les prévisions de niveaux d'eau générées à l'aide des constituants de la marée fournissent une estimation des contributions astronomiques au niveau de l'eau total et ne représentent pas les forçages météorologiques ni les autres composantes qui contribuent également aux niveaux d'eau.

Les composantes de marée sont généralement disponibles auprès des sources suivantes :

- **Service hydrographique du Canada (SHC)** : Les composantes officielles des marées pour les ports canadiens peuvent être obtenus auprès du SHC moyennant des frais de licence minimales.
- **Bases de données** : Des bases de données sur les composantes des marées sont également disponibles à partir de modèles régionaux ou mondiaux, qui peuvent être assimilés ou étalonnés/validés à l'aide d'observations (y compris des données altimétriques satellitaires). Les exemples incluent le modèle de prévision des marées WebTide ([bio.gc.ca](http://bio.gc.ca)), qui fournit des prévisions de marée pour les eaux canadiennes, et TPXO ([volkov.oce.orst.edu/tides](http://volkov.oce.orst.edu/tides)), une série de modèles mondiaux (Egbert et Erofeeva, 2002). Ces bases de données peuvent fournir des représentations raisonnables des niveaux d'eau en utilisant un nombre limité de constituants sur l'étendue du modèle. Dans les régions peu profondes et les régions à bathymétrie côtière complexe, les données peuvent présenter des limites importantes.
- **Analyse des marées** : Les composantes des marées peuvent être dérivées des niveaux d'eau mesurés. Le Progiciel d'analyse et de prévision des marées de Pêches et Océans Canada (Foreman, 1977) et les applications modernes des algorithmes, comme la boîte à outils MIKE21 ([www.mikepoweredbydhi.com](http://www.mikepoweredbydhi.com)), T\_TIDE (Pawlowicz et al., 2002) et UTide (Codiga, 2011) sont couramment utilisés pour l'analyse des harmoniques de marée.

### 6.1.1.3 Données modélisées sur les ondes de tempête

Il existe plusieurs modèles de calcul en fonctionnement qui fournissent des données sur les ondes de tempête. La plupart de ces modèles sont généralement appliqués à des fins de prévision à court terme (c.-à-d. opérationnelles) et sont donc limités dans leur utilité pour soutenir les évaluations des risques. Cependant, certaines analyses rétrospectives à long terme deviennent désormais disponibles (Zhai et al., 2019). Bernier (2005) a entrepris une analyse rétrospective de 40 ans de l'onde de tempête dans l'Atlantique Nord-Ouest. Les travaux de Bernier ont servi de base à un ensemble largement adopté de statistiques sur les ondes de tempête et le niveau de l'eau total pour les eaux maritimes canadiennes, élaboré par Richards et Daigle (2011).

Sur les Grands Lacs, les niveaux des eaux de ruissellement résultent d'une combinaison de hausse liée au vent, d'ondes et la formation de seiches. Le ministère des Richesses naturelles et des Forêts de l'Ontario a compilé les niveaux d'eau extrêmes pour toutes les eaux ontariennes des Grands Lacs et de leurs chenaux de raccordement (MRNFO, 2001). Ces niveaux d'eau sont fondés sur une analyse de probabilité conjointe des niveaux d'eau moyens mensuels maximums annuels et des niveaux d'onde maximum annuels. Les prévisions d'ondes sont basées sur le modèle SURGE, un modèle bidimensionnel de circulation à surface libre développé conjointement par Environnement Canada et le Great Lakes Environmental Research Lab (GLERL) de la NOAA. La dernière mise à jour de cette analyse remonte à 1989.

### 6.1.2 Acquisition de données de niveaux d'eau

L'acquisition de données sur le terrain peut être nécessaire dans les zones de marée et des lacs intérieurs si les données existantes sur les niveaux d'eau ne sont pas disponibles. La proximité des stations hydrométriques existantes, la configuration du rivage, les données bathymétriques et d'autres informations doivent être examinées pour évaluer si les niveaux d'eau (comme les marées, les seiches et les ondes de tempête) sont susceptibles d'être similaires, amplifiés ou atténués par rapport à ceux d'une station voisine.

Des déploiements sur le terrain à court terme d'un ou deux mois peuvent être suffisants pour développer une relation de niveau de l'eau entre deux sites voisins. Des déploiements pluriannuels peuvent être nécessaires pour évaluer les niveaux d'eau extrêmes.

Les instruments de terrain les plus courants pour les mesures de niveau de l'eau sont les transducteurs de pression submersibles. Les transducteurs de pression non ventilés enregistrent la pression totale sous laquelle l'instrument se trouve (pression hydrostatique et atmosphérique). La pression atmosphérique doit être soustraite de la mesure de la pression totale pour estimer avec précision le niveau de l'eau.

Des conseils complets sur la sélection des sites de marégraphes, l'installation, le contrôle des levés, le traitement des données et le contrôle de la qualité sont fournis dans le *Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer* (Commission océanographique intergouvernementale, 2016). Les normes, lignes directrices et manuels élaborés par les gouvernements provinciaux et locaux ou les associations professionnelles peuvent également stipuler des exigences en matière d'acquisition de données et de levés (p. ex. ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique, 2009).

Lorsque les mesures directes du niveau de l'eau ne sont pas facilement disponibles (p. ex. dans des endroits éloignés), les données de relevé post-événement ou les « indicateurs », tels que le bois flotté déposé ou les élévations de fucus, peuvent fournir des informations utiles sur les conditions de haut niveau de l'eau antérieures (Harper et al., 1988; Leonard et Bednarski, 2014; Didier et al., 2015; Kim et al., sous presse).

### 6.1.3 Contrôle de la qualité des données de niveaux d'eau

Le contrôle de la qualité des données sur le niveau de l'eau comporte de nombreux points à prendre en compte allant de l'erreur de mesure à la façon dont les données sont présentées et référencées. Un résumé de certains des problèmes courants est fourni ci-dessous :

- **Examen des données** : Des fluctuations importantes et rapides du niveau de l'eau peuvent se produire naturellement ou être le résultat d'un dysfonctionnement de l'instrument. Les mesures du niveau de l'eau à des intervalles de temps adjacents ou des données corroborantes (comme des événements météorologiques) peuvent souvent être utilisées pour accepter ou éliminer des données suspectes. Il est important de ne pas filtrer toutes les valeurs extrêmes légitimes, ce qui rend l'examen des données, le filtrage et la suppression des fausses valeurs aberrantes un processus délicat.
- **Lacunes dans les données** : Les données sur le niveau de l'eau devraient être examinées afin d'identifier les lacunes dans la couverture temporelle. Il n'est pas rare que les instruments tombent en panne lors d'événements extrêmes. L'examen d'autres ensembles de données (comme les données de vent et les niveaux d'eau à des stations hydrométriques proches) est donc utile pour comprendre si un événement extrême a été manqué. Il est également important de vérifier s'il y a des lacunes saisonnières (p. ex. l'hiver) et, s'il y en a, d'élaborer un plan pour y remédier.
- **Emplacement** :

- Le site de la station hydrométrique peut être ou non représentatif de la région d'intérêt. Par exemple, les relevés de niveau de l'eau à partir d'une station hydrométrique dans une zone portuaire profondément draguée montreraient potentiellement une influence réduite du vent et des vagues par rapport à une zone côtière peu profonde.
- La station hydrométrique pourrait être influencée par le débit de la rivière adjacente.
- Les données peuvent avoir été collectées à un endroit légèrement différent, car les stations hydrométriques présentent souvent des changements d'emplacement historiques.
- **Données** : Les niveaux d'eau sont mesurés par rapport à une élévation de référence verticale, qui pourrait être un niveau de référence local, un autre plan basé sur le niveau de la mer ou la marée, un point de référence ou un point de référence terrestre, un système de référents altimétriques basé sur un géoïde (p. ex. le Système canadien de référence altimétrique de 2013) ou une autre définition.
  - Le plan de référence (comme le niveau moyen des basses-eaux ou le niveau moyen de la mer) doit être pris en compte.
  - Certains plans de référence ne sont pas horizontaux et les données doivent être corrigées à des fins de modélisation/analyse.
  - Les stations hydrométriques sont comparées à des données des référents altimétriques qui peuvent changer dans le temps. Les plans de référence sont périodiquement mis à jour pour être plus précis ou représentatifs du présent.
  - Les niveaux enregistrés peuvent nécessiter un ajustement pour tenir compte du changement local relatif du niveau de la mer, y compris le mouvement vertical des terres, résultant du soulèvement ou de l'affaissement isostatique, du compactage des sédiments et d'autres facteurs.
  - Le site Web des réseaux de contrôle passif de RNCan et/ou l'outil GPS-H de RNCan doivent être consultés pour effectuer la conversion entre les données des référents altimétriques. Les réseaux de contrôle passif fournissent l'élévation de plus de 80 000 repères de contrôle verticaux dans les référents altimétriques communs pour cette région (p. ex. CGVD2013, CGVD28 et IGLD85)
- **Durée de l'enregistrement** : La durée de l'enregistrement est importante lors de l'évaluation des données mesurées, car des ensembles de données plus courts limiteront la possibilité de comprendre les statistiques et les tendances à long terme, ou de capturer les événements extrêmes qui mènent aux inondations côtières. Il importe de tenir compte des aspects suivants :
  - niveaux d'eau naturels ou régulés : Dans certaines régions riveraines (p. ex. le lac Ontario), les relevés des niveaux d'eau peuvent intégrer certaines influences de la réglementation. Les périodes pendant lesquelles différents scénarios ou différentes stratégies de régulation peuvent avoir été appliqués doivent donc être identifiées, car les fluctuations du niveau de l'eau pendant ces périodes peuvent présenter un comportement statistique distinct du comportement actuel ou futur.
  - Non-stationnarité : Que ce soit en raison des changements climatiques ou d'autres facteurs, un échantillon de quelques années de données peut ne pas être représentatif des distributions statistiques à long terme.
  - Pour les régions de marée, des enregistrements plus longs permettent d'identifier plus de constituants à l'aide d'une analyse des harmoniques de marée. Au minimum, environ un mois de données est nécessaire pour distinguer les différences de fréquence entre les composantes diurnes et semi-diurnes primaires conformément au critère de Rayleigh. Les constituants de période plus longue, comme les données bimensuelles, mensuelles, semestrielles et annuelles, peuvent nécessiter un an de données ou plus pour distinguer les signaux de marée du bruit de fond météorologique (p. ex. Crawford, 1982).

## 6.2 Données météorologiques

Les données météorologiques, y compris la vitesse du vent, la direction du vent et la pression atmosphérique, sont souvent utilisées pour estimer les conditions des ondes de tempête et des vagues pour les évaluations des risques d'inondation côtière. Dans les analyses côtières, les données de pression atmosphérique sont le plus couramment utilisées en conjonction avec les données de vent pour comprendre le forçage atmosphérique, ou elles peuvent être appliquées à un modèle lors de l'évaluation des ondes de tempête. Les données de pression atmosphérique ne présentent généralement pas le même degré de variabilité spatiale et temporelle qui prévaut dans les données de vent. Cependant, les tempêtes intenses (en particulier les ouragans) peuvent présenter de grands gradients de pression.

Sur les lacs intérieurs, les variations de la pression atmosphérique ont généralement un impact limité sur les niveaux d'eau en raison de la zone confinée du lac et de la plus petite échelle (par rapport aux eaux côtières). La pression peut avoir une influence sur les niveaux d'eau des grands lacs, tels que les Grands Lacs, le Grand lac de l'Ours, le Grand lac des Esclaves et le lac Winnipeg, mais peut souvent être ignorée en tant que force motrice des niveaux d'eau de la plupart des autres lacs. Dans les zones côtières, une diminution de la pression d'un millibar entraîne une augmentation d'environ un centimètre du niveau de l'eau.

### 6.2.1 Données météorologiques disponibles

Des données météorologiques horaires à long terme sont disponibles auprès d'Environnement Canada (<https://climat.meteo.gc.ca>) pour près de 2 000 stations partout au pays.

Les ensembles de données de vent et de pression atmosphérique dérivés du modèle (rétrospective, réanalyse, prévision/prévision pour l'immédiat ou ensemble) sont de plus en plus fréquemment utilisés comme intrants pour la modélisation des vagues et des ondes de tempête en raison de leur disponibilité, de leur large couverture temporelle et spatiale, de leur résolution et de leur précision, qui sont sans cesse améliorées. Cependant, les données modélisées sont des représentations mathématiques de processus complexes et sont sujettes à l'incertitude, en particulier au voisinage des interfaces terre-eau. Les ensembles de données modélisés sont souvent étalonnés/validés à l'aide de mesures, mais peuvent différer des conditions sur le terrain. Les données modélisées doivent donc être validées à l'aide de données mesurées.

Il existe actuellement trois types de données :

- **Données de prévision/prévision pour l'immédiat** : Développées chaque fois que le modèle est simulé, et une archive du temps d'exécution actuel de chaque simulation peut être utilisée pour développer une série chronologique. Ces modèles représentent la résolution/physique du modèle et les données disponibles au moment de la simulation et ne sont pas cohérents au fil des années.
- **Données rétrospectives** : Requierent une simulation complète des conditions historiques en utilisant une physique de modèle cohérente et des données d'entrée, mais n'assimile généralement aucune donnée d'observation.
- **Données de réanalyse** : Utilise une physique de modèle cohérente et (autant que possible) des ensembles de données d'entrée cohérents, et assimile les ensembles de données d'observation.

Des trois, seules les données de réanalyse ou de prévision rétrospective devraient être utilisées pour développer des statistiques à long terme, car les ensembles de données de prévision/prévision pour l'immédiat ne sont pas basés sur une physique de modèle cohérente ou des ensembles de données d'entrée et ne capturent donc pas nécessairement des statistiques à long terme. Exemples d'ensembles

de données de réanalyse : le Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) de la NOAA (Saha et al., 2010) et l'ERA5 Reanalysis du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (Service Copernicus concernant les changements climatiques, 2017).

### 6.2.2 Acquisition de données météorologiques

En raison de la disponibilité des données météorologiques des stations météorologiques à proximité (p. ex. aéroports, bouées houlomotrices, etc.) et des modèles de réanalyse, il n'est souvent pas nécessaire de collecter des données sur le vent et la pression atmosphérique pour les projets d'évaluation des risques d'inondation côtière. Cependant, les déploiements d'instruments à court terme peuvent être utilisés pour des sites éloignés ou nouveaux, en particulier si les influences topographiques locales sont jugées importantes.

Les données de pression atmosphérique sont souvent recueillies ou obtenues pour corriger les mesures de niveau de l'eau obtenues à l'aide de manomètres non ventilés. Il est préférable d'obtenir des données à proximité du site d'installation du manomètre; cependant, dans tous les événements, sauf de très rares cas où les gradients de pression sont graves (p. ex. tempêtes tropicales ou ouragans), une lecture de pression à des dizaines de kilomètres de la zone d'intérêt peut encore être acceptable.

### 6.2.3 Contrôle de la qualité des données météorologiques

Il existe plusieurs points à prendre en compte sur la manière dont les données météorologiques sont mesurées, traitées et utilisées pour les analyses côtières. Certains des aspects fondamentaux des données mesurées comprennent :

- **Élévation** : La vitesse du vent augmente généralement avec l'élévation et cela doit être pris en compte dans l'analyse des données de vent. L'élévation standard est de dix mètres au-dessus du sol et est généralement la hauteur de mesure pour les mesures terrestres, telles que celles enregistrées dans les stations météorologiques d'aéroport. Les bouées météorologiques océaniques prennent souvent des mesures à des altitudes plus basses (5 ou 6 m au-dessus de la surface de l'eau).
- **Période de moyenne** : Une vitesse du vent moyenne sur une heure sera inférieure à la vitesse moyenne du vent sur une minute (par exemple). Les évaluations structurelles sont souvent basées sur la vitesse du vent en rafale de trois secondes, qui est encore plus élevée. Il est important de considérer à la fois la période de calcul de la moyenne de la mesure (souvent 10 minutes en début d'heure) par rapport aux paramètres qui sont simulés ou évalués. De nombreux modèles côtiers sont dérivés sur la base de la vitesse moyenne du vent sur 10 minutes; cependant, certains organismes (notamment la NOAA aux États-Unis) publient la vitesse du vent pour une minute pour les conditions d'ouragan.
- **Au-dessus des terres et au-dessus des eaux** : Les vitesses du vent au-dessus des terres sont généralement inférieures à celles au-dessus des eaux, en raison des effets de rugosité de la surface. Les vents terrestres peuvent également être fortement influencés par la topographie locale. Les mesures au-dessus des terres doivent donc être ajustées pour mieux représenter les conditions au-dessus des eaux.
- **Différence de température air-mer** : La différence entre la température de l'eau et la température de l'air au-dessus de l'eau peut avoir une incidence importante sur les vents proches de la surface de l'eau. Ce processus est très évident au printemps au-dessus des Grands Lacs, où les vents de surface au-dessus de l'eau peuvent être très légers, mais on voit des nuages bas se déplacer rapidement dans le ciel. L'eau froide crée une couche d'air dense qui reste stable et ne permet pas aux vents plus chauds en altitude d'avoir une incidence sur le lac de la manière habituelle. À l'inverse, l'eau chaude du lac à l'automne et une journée froide entraîneront un mélange vertical des vents au-dessus du lac, apportant

des vents plus forts à la surface du lac. Bien prendre en compte l'incidence de la structure de température air/eau peut avoir une incidence importante sur les conditions côtières qui en résultent.

- **Exposition** : Les vents doivent être mesurés dans des zones bien exposées, libres de l'influence des bâtiments et autres structures, des arbres et du relief topographique. Les vents au-dessus des eaux sont souvent les plus compliqués à mesurer, mais peuvent fournir les meilleures données car ils indiquent les conditions au-dessus des eaux, qui est généralement la zone d'intérêt.
- **Pression atmosphérique** : est souvent convertie en « pression au niveau de la mer », qui représente la pression qui serait mesurée si la station était au niveau de la mer. Cet ajustement est nécessaire afin de pouvoir comparer les lectures de pression des stations adjacentes qui peuvent être à des élévations différentes. Pour évaluer les environnements marins, cet ajustement n'est nécessaire que si des données mesurées au-dessus des terres sont également utilisées, ou en cas d'interpolation de données de modèles atmosphériques mondiaux ou régionaux près de la côte. Pour les lacs intérieurs, il est presque toujours préférable d'utiliser la pression au niveau de la mer.

Pour les données modélisées, voici d'autres points dont il faut tenir compte :

- **Résolution spatiale et temporelle** : Jusqu'à récemment, de nombreux ensembles de données mondiaux et même régionaux ne disposaient pas des résolutions spatiales et temporelles élevées nécessaires pour résoudre correctement les champs de vent et de pression atmosphérique des cyclones tropicaux ou des ouragans. Dans certains cas, il peut être nécessaire de développer des champs de vent et de pression paramétriques et de les assimiler dans des données rétrospectives/de réanalyse afin de caractériser avec précision les événements les plus extrêmes. Cependant, les nouveaux ensembles de données à haute résolution, tels que l'ERA5, capturent bien mieux les champs de vent et de pression atmosphérique intenses associés à de tels événements.
- **Qualité et résolution des données d'observation** : La plupart des modèles sont étalonnés et validés à l'aide de données d'observation ou assimilent ces dernières (dans le cas de réanalyses). La sortie du modèle dépend donc de la qualité et de la résolution des données d'observation sur lesquelles elles reposent. Les performances du modèle varient également dans l'espace. La vérification locale à l'aide de mesures sur le terrain est toujours prudente, si possible.

### 6.3 Données sur la glace de mer/lac

La glace est un point important à prendre en compte dans de nombreuses zones côtières car elle peut :

- réduire ou éliminer la génération et la propagation des vagues de vent, réduisant ainsi la remontée de la vague et les inondations associées;
- remonter ou s'entasser à terre sous l'action du vent, ce qui contribue aux dangers;
- avoir une incidence sur le transport de la quantité de mouvement air-mer, modifiant ainsi (atténuant de façon générale) les ondes de tempête (Provan et al., sous presse; Kim et al., sous presse);
- être présente dans les eaux de crue et les vagues, contribuant aux dangers.

Les embâcles de glace dans les rivières peuvent causer de graves inondations, mais celles-ci ne sont pas couvertes par la portée du présent document.

La couverture de glace peut être extrêmement variable d'une année à l'autre en réponse à de nombreux processus au-delà de la température de l'air. Les vents, les vagues, la couverture de neige, les précipitations, la vitesse actuelle des vents et le moment de ces processus ne sont que quelques-uns des facteurs qui peuvent avoir une influence sur la couverture de glace. Pour cette raison, la couverture de

glace devrait être examinée sur plusieurs années ou décennies. Il est également important de prendre en compte que les changements climatiques pourraient avoir une incidence sur la couverture de glace et la durée de la saison des eaux libres (section 6.8). Cela est particulièrement vrai dans les régions arctiques, où le réchauffement est plus important et où la durée de la saison des eaux libres dans ces régions peut augmenter, augmentant l'exposition aux vagues, aux ondes de tempête et à d'autres risques d'inondation côtière.

### 6.3.1 Données de glace disponibles

Les données historiques d'observation des glaces sont disponibles auprès du Service canadien des glaces. La couverture de glace des Grands Lacs est également compilée par le Laboratoire de recherche environnementale des Grands Lacs (GLERL pour Great Lakes Environmental Research Laboratory) de la NOAA. La collecte et l'archivage de ces données servent principalement à la navigation.

Les données sur les glaces sont généralement collectées à partir de programmes de mesure satellitaire ou aérienne et fournissent des cartes de couverture sur une période quotidienne, hebdomadaire ou autre. Il y a de nombreuses années de données historiques sur les glaces qui ont maintenant été converties de cartes papier à des représentations numériques réparties sur une grille de la couverture de glace. Les données sur la glace peuvent inclure la concentration (pourcentage de la couverture de glace), le stade de développement (épaisseur) et la taille des radeaux glaciels.

Les données sur les glaces sont généralement collectées sur de grandes zones régionales et peuvent avoir une couverture limitée dans de petites zones géographiques. Par exemple, la glace de seulement 10 ou 20 m de largeur le long d'un rivage des Grands Lacs pourrait fournir une protection à la rive, mais il est peu probable qu'elle soit représentée dans les ensembles de données à l'échelle du bassin ou du lac. Des photos aériennes limitées le long du réseau des Grands Lacs et de la Voie maritime du Saint-Laurent sont également disponibles auprès du Service canadien des glaces et peuvent fournir des indications sur l'état des glaces locales.

Le Service canadien des glaces tient également une archive des mesures de l'épaisseur de la glace et de l'épaisseur de la neige à 195 sites partout au Canada (<https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/>). Ces mesures sont prises sur la glace côtière et sont donc particulièrement représentatives des conditions des sites côtiers. Ce programme a été presque complètement interrompu en 2002 et les données ne sont actuellement recueillies que dans 10 sites arctiques.

SmartICE (<https://www.smartice.org/>) est une société d'entreprise sociale à but non lucratif constituée en société qui se consacre à permettre aux collectivités nordiques de coproduire leurs propres données de cartographie des glaces combinant des profils de terrain d'épaisseur et de rugosité de la glace, une instrumentation in situ, et l'imagerie satellitaire (Bell et al., 2014; Safer, 2016). SmartICE est opérationnel dans plusieurs collectivités de l'Arctique canadien et de la région subarctique.

### 6.3.2 Acquisition de données sur les glaces

Les données sur les glaces de mer ou de lac sont rarement collectées pour les projets d'évaluation des risques d'inondation côtière, mais la collecte de données sur la glace de mer ou de lac spécifique au projet est conseillée. Les méthodologies utilisées par le Service canadien des glaces pour mesurer l'épaisseur de la glace (trousse spéciale de tarière ou jauge à fil chaud) pourraient être mises en œuvre pour recueillir des données propres au site. Des photographies de la couverture de glace côtière et des mesures d'épaisseur de glace peuvent être recueillies pour certains sites du projet afin de mieux comprendre les conditions du site. Des systèmes de caméras solaires sont disponibles et fournissent un moyen de collecter

des enregistrements d'une saison entière. Les connaissances locales peuvent fournir des informations précieuses sur l'état des glaces et sur le potentiel et la fréquence des événements extrêmes.

### 6.3.3 Contrôle de la qualité des données sur les glaces

Les données sur la couverture de glace de mer ou de lac peuvent être utilisées pour la modélisation des vagues ou des ondes de tempête. En général, les ensembles de données quadrillées sur la couverture de glace du Service canadien des glaces et de la NOAA sont de haute qualité et ne nécessitent pas de contrôle de qualité supplémentaire. Les données sur l'épaisseur de la glace provenant de nombreux sites non arctiques ne sont pas continues et peuvent ne concerner qu'un nombre relativement restreint d'années. Les déterminations des degrés-jours de gel à partir des données de température de l'air peuvent fournir un moyen d'étendre les données limitées d'épaisseur de glace.

## 6.4 Données sur les vagues

Les données sur les vagues peuvent généralement être classées comme mesurées ou modélisées.

- Les données mesurées sur les vagues peuvent provenir de diverses sources, y compris l'altimétrie par satellite, les bouées de vagues utilisant des accéléromètres ou le GPS, des manomètres/jauges acoustiques submergés (généralement à 25 m de profondeur ou moins), des manomètres immergés (non directionnels et à environ 10 m de profondeur de l'eau ou moins), les données de navires d'observation bénévoles (VOS) et, dans de rares cas, des mesures directes de la surface de l'eau. Les mesures des vagues sont souvent sujettes à une incertitude considérable. Les paramètres des vagues (p. ex. les hauteurs et périodes des vagues) sont généralement dérivés des pressions et des vitesses mesurées. Il est impératif de comprendre les sources potentielles d'incertitude et les limites des données mesurées sur les vagues, en fonction de la méthode d'acquisition.
- Les **données sur les vagues modélisées** consistent généralement en des conditions de vagues prédites (historiques ou prévues), généralement générées à l'aide de modèles basés sur la physique (formules empiriques simples ou modèles numériques) basés sur des données de vent. La qualité des données de vagues modélisées dépend directement de la qualité des données de vent d'entrée, de la bathymétrie, de la physique du modèle et de la représentation spatiale. Il est important de comprendre les capacités et les limites d'un modèle d'ondes en termes de capture des processus importants de génération, de propagation, de transformation et de dissipation des ondes. Les données modélisées doivent être vérifiées à l'aide de mesures lorsque cela est possible.

La hauteur des vagues en état de mer est souvent caractérisée par la « hauteur significative des vagues », qui représente la moyenne du tiers le plus élevé des vagues. La période des vagues (temps entre les crêtes successives) et la direction des vagues (exprimée conventionnellement en termes de direction à partir de laquelle les vagues se propagent, en degrés dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du nord vrai) sont également communément fournies à partir de données mesurées ou modélisées. Il existe de nombreuses variantes de ces paramètres, avec des définitions différentes, et une description complète de celles-ci dépasse le cadre du présent document (p. ex. U.S. Army Corps of Engineers, 2002; Goda, 2010; CIRIA et al., 2007). Les variables de données de vagues les plus courantes sont la hauteur significative des vagues, la période de pointe et la direction moyenne des vagues.

Les descripteurs paramétriques de l'état de la mer (hauteur, période, direction) fournissent une description générale des conditions des vagues, mais ne caractérisent pas complètement l'état de la mer à un endroit donné. Pour les régions côtières et lacustres protégées, ces trois variables peuvent fournir une approximation acceptable des conditions des vagues. Pour les régions côtières (marines) plus exposées,

les vagues peuvent s'approcher de plusieurs directions simultanément, avec des périodes et des hauteurs de vagues différentes. Dans de telles circonstances, une description complète du spectre d'énergie des vagues peut être nécessaire pour caractériser adéquatement l'état de la mer.

Des descriptions plus détaillées des conditions des vagues sont transmises par les spectres d'énergie des vagues qui définissent la quantité d'énergie des vagues à chaque fréquence (réciproque de la période des vagues). Les représentations spectrales peuvent être non directionnelles ou directionnelles et permettent de définir des champs d'ondes multidirectionnels complexes. Les spectres d'ondes peuvent être dérivés de mesures d'ondes ou en sortie de certains types de modèles d'ondes.

Dans la nature, les vagues sont irrégulières, en ce sens qu'il existe une variabilité d'une vague à l'autre en hauteur, en période et en direction. Il est donc important lors de la mesure des vagues d'obtenir un ensemble de données suffisamment long pour recueillir les informations statistiques appropriées. Il est courant de mesurer un échantillon d'environ 18 minutes (1 024 secondes à 2 Hz donne 2 048 lectures) ou plus si les ondes à longue période sont intéressantes. La longueur de l'échantillon influera sur la capacité des mesures à caractériser correctement un état de la mer, notamment en termes de paramètres de capture tels que  $H_{max}$  (la hauteur maximale des vagues sur une certaine période de temps).

## 6.4.1 Données sur les vagues disponibles

### 6.4.1.1 Données sur les vagues mesurées

Le Canada compte 53 bouées actives exploitées par Environnement Canada : 17 de ces bouées sont situées sur la côte du Pacifique, 16 en Ontario (Grands Lacs, lac Nipissing et lac des Bois), 13 sur la côte atlantique et le golfe du Saint-Laurent, 3 sur le lac Winnipeg, 2 sur le Grand lac des Esclaves, et 1 chacun à Churchill (Manitoba) et Tuktoyaktuk (Territoires du Nord-Ouest). De plus, les données de plus de 500 déploiements historiques de bouées houlomotrices sont également disponibles en ligne (<http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/>). Des données régionales sur les bouées houlomotrices peuvent également être disponibles auprès d'universités telles que l'Université de Victoria, l'Université du Québec à Rimouski et d'autres.

Les bouées adjacentes dans les eaux américaines fournissent des données disponibles par l'entremise du National Data Buoy Center (<https://www.ndbc.noaa.gov/>), qui fait partie de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) des États-Unis.

Bon nombre des bouées houlomotrices canadiennes et américaines sont retirées en hiver en raison de la glace de mer et de lac et peuvent présenter des manques importants en fonction des problèmes opérationnels. La plupart des bouées fournissent des paramètres d'état de la mer (hauteur et période des vagues) tandis que certaines fournissent également des spectres de vagues complets.

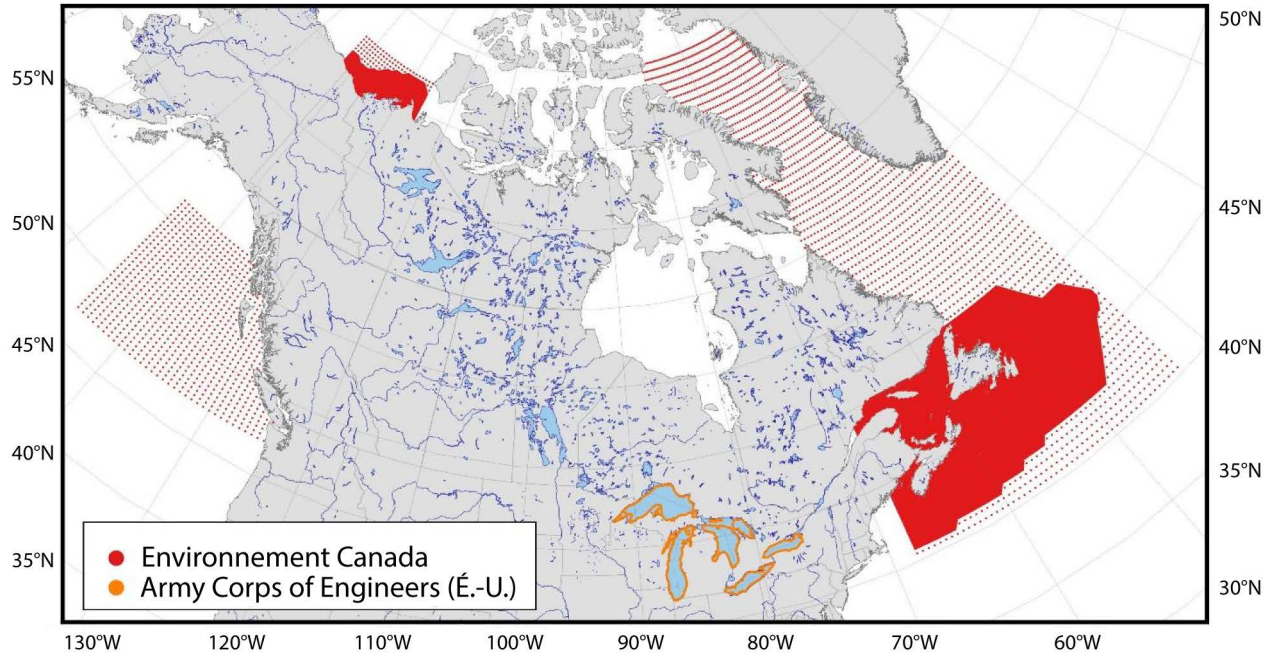
### 6.4.1.2 Données sur les vagues pour simulation rétrospective

Environnement et Changement climatique Canada a élaboré des simulations rétrospectives à long terme (sur plusieurs décennies) des conditions des vagues au large pour la plupart des eaux côtières canadiennes (Swail et al., 2007). Les données de ce modèle sont disponibles sous forme de séries chronologiques de paramètres spectraux (p. ex. hauteur de vague importante, période de pointe de vague, direction dominante) aux points de grille du modèle et spectres d'onde pleine aux points de grille sélectionnés (Figure 12). Il s'agit notamment de la simulation rétrospective du SMC-50 Atlantic pour l'Atlantique Nord-Ouest, qui couvre les eaux côtières du golfe du Maine au nord du cercle polaire arctique et fournit des conditions de vent et de vagues toutes les heures de 1954 à 2015 (Swail et al., 2007) (Tableau 4). Le modèle GROW-FINE du Pacifique Nord-Est (NE) fournit des simulations rétrospectives de

vent et de vagues en mer pour les eaux côtières de la Colombie-Britannique, à l'exclusion du détroit de Juan de Fuca et de la Géorgie. Pour les Grands Lacs, le US Army Corps of Engineers (USACE) et Environnement Canada ont collaboré pour générer des simulations rétrospectives à long terme pour toutes les rives des Grands Lacs, connues sous le nom de Wave Information Study (WIS) ([wis.usace.army.mil](http://wis.usace.army.mil)). La version la plus récente de l'ensemble de données de la WIS a utilisé les données éoliennes du CFSR et couvre la période de 1979 à 2014. Malheureusement, la WIS ne fournit pas de données aux emplacements des bouées houlomotrices, ce qui rend la validation de cette étude houlomotrice très difficile. Des ensembles de données de simulations rétrospectives de vagues à long terme peuvent également être disponibles auprès d'entreprises privées et de sources universitaires.

**Tableau 4. Résumé des données de simulations rétrospectives des vagues applicables aux eaux côtières canadiennes.**

Région	Simulation rétrospective	Étendue géographique	Résolution spatiale	Portée temporelle	Fréquence
<b>Atlantique Nord-Ouest</b>	MSC50 Atlantic	Entre 40,00° N et 75,00° N Entre 43,00° O et 80,00° O	Grille de 0,1 degré (environ 10 km)	1954-01 à 2018-12	chaque heure
<b>Nord-est du Pacifique</b>	NE Pacific GROW-FINE	Entre 47,19° N et 56,56° N Entre 124,38° O et 45,00° O	Grille de 35 km	1980-01 à 2015-12	aux 3 heures
<b>Mer de Beaufort</b>	SMC Beaufort	Entre 68,75° N et 71,75° N Entre 126,00° O et 42,50° O	0,05 degré de latitude par 0,15 degré de longitude (environ 5 km)	1970-01 à 2015-12	chaque heure
<b>Grands Lacs</b>	Simulations rétrospectives du WIS (USACE)	Toutes les eaux des Grands Lacs	S.O.	1979-01 à 2014-12	chaque heure



**Figure 12. Points de grille de simulations rétrospectives de vagues.**

D'autres organismes exécutent également des prévisions/prévisions pour l'immédiat de vagues opérationnelles, mais ces données ne sont généralement pas aussi fiables que le type de données de réanalyse. Des produits de données de simulations rétrospectives plus anciens peuvent être disponibles dans certaines régions, mais ont généralement été remplacés par les produits plus récents décrits ci-dessus.

Les données des simulations rétrospectives régionales peuvent être téléchargées pour les eaux du large. Les données doivent être examinées pour leur résolution spatiale sous-jacente, le recours à des données de télédétection pour la validation et la représentation de la physique de la transformation des vagues dans les eaux côtières. Les données disponibles dans les eaux côtières ou dans les zones maritimes restreintes (comme le golfe du Saint-Laurent ou la baie de Fundy) peuvent présenter une incertitude importante, en raison de la proximité de terres, d'îles, de hauts-fonds et d'autres caractéristiques qui ne sont pas correctement capturées par les modèles régionaux ou mondiaux à faible pouvoir de résolution. Les modèles de simulations rétrospectives/réanalyse des vagues sont souvent étalonnés à l'aide de données altimétriques satellitaires ou les assimilent, et la résolution temporelle et spatiale de celles-ci introduit des limites pour les applications en zones maritimes restreintes (Walker et al., 2014). Les données doivent être extraites dans les zones ouvertes en eau profonde et utilisées comme données d'entrée pour la modélisation sublittorale pour les zones plus confinées. Il faut alors tenir compte des vagues du vent générées localement dans les zones abritées et de la transformation des conditions houlomotrices au large vers le littoral, en tenant compte des effets des marées, des courants, de la réfraction, de la diffraction, de la dissipation par frottement, du déferlement des vagues et des interactions vagues-vagues.

## 6.4.2 Acquisition de données sur les vagues

Des instruments houlomoteurs peuvent être installés à proximité d'un site de projet pour mieux comprendre le climat des vagues et étalonner des modèles de vagues numériques. La durée du déploiement de l'instrument peut dépendre de l'intervalle d'échantillonnage, de la durée de vie de la batterie et du calendrier du projet. Un à trois mois de données mesurées sur les vagues sont souvent suffisants pour étalonner les modèles numériques de vagues. Idéalement, les instruments de vagues seront déployés pendant la saison des tempêtes avec au moins un événement de tempête enregistré à des fins d'étalonnage.

## 6.4.3 Contrôle de la qualité des données sur les vagues

Dans presque tous les grands lacs canadiens (p. ex., Grands Lacs, Grand lac des Esclaves), les bouées houlomotrices sont enlevées à l'automne et redéployées au printemps. En conséquence, les bouées houlomotrices peuvent ne pas enregistrer certaines tempêtes violentes. Les données sur les vagues devraient être examinées pour s'assurer que les instruments n'enregistraient pas alors qu'elles étaient à terre (p. ex. parcs de stockage). Des vérifications relationnelles peuvent être effectuées (p. ex. en comparant les données aux enregistrements de vent, aux enregistrements de capteurs de vagues en double ou aux données de sites adjacents) pour donner un aperçu de la plausibilité et de la qualité des données. Des conseils détaillés sur le contrôle de la qualité des données mesurées sur les vagues sont fournis, par exemple, par IOOS (2015) et Meindl (1996).

Les instruments de mesure des vagues sont généralement livrés avec un logiciel pour étalonner l'instrument et traiter les données brutes (pression, vitesse, accélération, etc.) en quantités d'ondes dérivées. Les données de terrain doivent être traitées à l'aide du logiciel du fabricant, en effectuant des contrôles de qualité conformément aux recommandations du fabricant.

## 6.5 Données sur les tsunamis

### 6.5.1 Données disponibles sur les tsunamis

Une évaluation préliminaire du risque de tsunami pour le littoral canadien a été menée par Leonard et al. (2012, 2014). Cette évaluation a présenté une première tentative de quantification du risque de tsunami sur les côtes du Pacifique, de l'Arctique et de l'Atlantique du Canada, provenant à la fois de sources proches et éloignées. L'étude a utilisé une méthodologie d'évaluation probabiliste simplifiée pour estimer les probabilités de jets de rive à deux niveaux ( $\geq 1,5$  m et 3,0 m). Des recommandations pour une meilleure évaluation probabiliste ont été formulées, y compris la nécessité de quantifier un plus large éventail de scénarios sources et de procéder à une modélisation numérique de la propagation des tsunamis intégrant une bathymétrie à haute résolution et une topographie terrestre.

Un examen de haut niveau du risque de tsunami et une description des tsunamis destructeurs passés ayant eu un impact sur les côtes canadiennes sont fournis par Clague et al. (2003).

Étant donné que les tsunamis importants touchant les côtes canadiennes peuvent être séparés par des centaines d'années (Clague et al., 2000), les mesures directes ou les documents historiques écrits sont limités. L'un des tsunamis les plus importants capturés par les marégraphes dans les eaux canadiennes est celui généré par le tremblement de terre de 1964 en Alaska, qui a été détecté par plusieurs marégraphes en Colombie-Britannique. Des preuves de tsunami préhistorique se trouvent souvent dans les dépôts de sédiments et les histoires orales des peuples autochtones (Clague et al., 2000; Gosse et al., 2020).

L'évaluation préliminaire des dangers par Leonard et al. (2012, 2014) a estimé que le risque de tsunami estimé cumulatif pour les événements de remontée de la vague potentiellement dommageables sur la côte extérieure du Pacifique du Canada est d'un ordre de grandeur supérieur à celui de l'Atlantique et de l'Arctique, en partie en raison de la dominance de sources de mégaséismes locales (zone de subduction de Cascadia). Des informations sur les scénarios potentiels de sources de mégaséismes de tsunami pour la zone de subduction la plus septentrionale de Cascadia sont fournies par Gao et al. (2018).

L'observatoire océanique des expériences sous-marines en réseau du Pacifique Nord-Est canadien (NEPTUNE - Canada) comprend un réseau de capteurs de pression montés au fond qui ont enregistré des tsunamis dans les eaux océaniques du Pacifique au large des côtes du Canada (Thomson et al., 2011; Fine et al., 2015).

### **6.5.2 Acquisition de données sur les tsunamis**

Il existe une variété de systèmes et de méthodes disponibles pour détecter les tsunamis (Thomson et al., 2011; Grilli et al., 2017), dont beaucoup peuvent être intégrés dans des systèmes opérationnels de prévision des tsunamis ou d'alerte précoce. Cependant, les longs intervalles entre les événements de tsunamis historiques dommageables par rapport à la longueur des enregistrements disponibles et la variété des sources potentielles de tsunamis (p. ex. les champs proche et lointain) rendent difficile l'utilisation de ces informations pour soutenir les évaluations des risques, au-delà de l'étalonnage et de la validation des modèles numériques.

Parce que les tsunamis peuvent transporter des sédiments et des débris sur de grandes distances et les déposer sur la terre ferme, les études géologiques peuvent fournir des preuves précieuses des tsunamis préhistoriques et sont un élément clé de la reconnaissance et de l'atténuation des risques de tsunami dans le Pacifique Nord-Ouest (Peters et al., 2003; Clague et al., 2003; Leonard et al., 2012).

Les levés scientifiques post-tsunami sur l'érosion, les schémas de déplacement des débris et les dommages ont fourni des informations précieuses sur les jets de rive des tsunamis, les profondeurs des inondations, les modèles d'écoulement et les dommages (Leonard et Bednarski, 2014; Nistor et al., 2017).

Les données topographiques, bathymétriques et géophysiques à haute résolution peuvent être utilisées pour identifier et reconstruire les événements de tsunami historiques subaériens et sous-marins générés par des glissements de terrain (Lintern et al., 2019).

La modélisation numérique peut être utilisée pour étudier la propagation des ondes de tsunami et les interactions avec les rivages complexes et la topographie/bathymétrie (Cherniawsky et al., 2007; Fine et al., 2008; AECOM, 2013; Thomson et al., 2011; Fine et al., 2015; Grilli et al., 2017) et pour caractériser les dangers associés à des scénarios de tsunami éventuels ou hypothétiques.

### **6.5.3 Contrôle de la qualité des données sur les tsunamis**

En raison des longs intervalles entre les tsunamis notables dans le passé ayant eu une incidence sur les côtes canadiennes, le manque de mesures directes est une source importante d'incertitude dans la caractérisation des risques de tsunami. L'identification et la caractérisation précise des sources tsunamigènes de champ lointain et proche demeurent un défi important (Venturato et al., 2007; Leonard et al., 2014). Une expertise spécialisée est généralement requise pour mener des études géologiques ou géophysiques, identifier et caractériser les sources potentielles de tsunamis, simuler de façon numérique les processus de propagation et de transformation des tsunamis et interpréter les données de terrain dans le but de caractériser les risques de tsunamis.

## 6.6 Données bathymétriques et topographiques

Les données bathymétriques et topographiques sont des intrants clés pour les études sur les risques d'inondation côtière. L'élévation et la forme de la surface du sol influencent fortement les processus de vagues sublittorales, la remontée et le débordement de la vague, les ondes de tempête, les seiches, les tsunamis, les vitesses et la profondeur des inondations.

### 6.6.1 Données bathymétriques et topographiques disponibles

Le Service hydrographique du Canada (SHC) est la principale source de données bathymétriques au Canada (<http://www.charts.gc.ca/>). Les données sont disponibles sous forme de cartes de navigation numériques et papier, de versions numériques de feuilles de terrain sur papier, de données de terrain numériques (p. ex. sondeur à faisceau unique ou multifaisceaux, LiDAR bathymétrique, etc.) et sous forme de jeu de données bathymétriques non navigationnelles quadrillé (NONNA-100) de 100 m.

Les cartes de navigation, les feuilles de terrain et les données de terrain sont fournies sous licence par le SHC. Le Service portail de données numériques du SHC - Portail pour les demandes de licences est un outil de cartographie en ligne qui permet aux utilisateurs de visualiser la couverture spatiale, la date, la technique de levé et d'autres informations avant de présenter une demande de licence de données. Des frais peuvent être exigés pour les cartes, les sondages et certains ensembles de données réparties sur une grille. L'ensemble de données NONNA-100 est disponible gratuitement.

Des données bathymétriques peuvent également être disponibles auprès de la Commission géologique du Canada, des autorités provinciales et d'autres sources gouvernementales. Par exemple, un ensemble de données bathymétriques de 3 secondes d'arc (résolution d'environ 90 m) des Grands Lacs est disponible auprès du National Geophysical Data Center de la National Oceanographic and Atmospheric Administration des États-Unis. Des produits spécialisés, tels que la bathymétrie par satellite (BPS), peuvent être disponibles auprès de fournisseurs commerciaux. La bathymétrie par satellite est la mieux adaptée aux eaux claires et peu profondes (< 20 m) et peut présenter une certaine incertitude. Elle doit donc être vérifiée au sol à l'aide de données de levé conventionnelles ou ayant fait l'objet d'un contrôle de la qualité.

Les données topographiques sont disponibles auprès de sources fédérales, provinciales et municipales. Les données sont généralement fournies sous forme d'ensembles de données réparties sur une grille, mais peuvent également être disponibles sous forme de contours ou de points. La détection et la télémétrie de la lumière aéroportée (LiDAR) et la photogrammétrie sont les deux principales technologies utilisées pour élaborer des ensembles de données topographiques à haute résolution sur de vastes zones. Par exemple, Service Nouveau-Brunswick rend les données LiDAR disponibles gratuitement en ligne pour la majeure partie de la province (<http://geonb.snb.ca/li/>). Les progrès des capteurs LiDAR bathymétriques ont rendu cette technologie plus courante pour la capture de données bathymétriques dans les eaux peu profondes. Le LiDAR bathymétrique utilise des longueurs d'onde lumineuses plus courtes que le LiDAR topographique pour pénétrer dans la colonne d'eau. Le LiDAR bathymétrique est limité par les conditions environnementales, telles que les conditions météorologiques, l'état de la mer et la turbidité, mais il est en mesure de capturer efficacement des données bathymétriques dans les régions sublittorales où les techniques de levé conventionnelles sont difficiles à mettre en œuvre.

De nombreuses municipalités ont acquis des ensembles de données topographiques à haute résolution pour soutenir diverses études de planification et d'ingénierie. Des ensembles de données avec une résolution horizontale de 0,5 m (ou mieux) sont donc souvent disponibles. Dans les régions rurales, les données peuvent provenir de sources provinciales ou fédérales. RNCan compile actuellement des ensembles de données LiDAR et de photogrammétrie en un ensemble de données topographiques

réparties sur une grille à haute résolution pour le pays. Le modèle numérique d'élévation de haute résolution (MNEHR) comprend un modèle numérique de terrain (MNT), un modèle numérique de surface (MNS) et d'autres données dérivées. Dans le sud du Canada (au sud de la limite forestière productive), les ensembles de données sont générés à partir de données LiDAR et sont disponibles à une résolution de 1 m ou 2 m. Dans le nord du Canada, seul un MNS est fourni en raison de la faible densité de végétation et d'infrastructure. L'ensemble de données nordique est élaboré à partir de l'imagerie optique (photogrammétrie) et est disponible à une résolution de 5 m. Bien que la couverture actuelle dans le sud du Canada soit clairsemée, la couverture continuera de s'améliorer à mesure que les données LiDAR seront acquises et intégrées dans l'ensemble de données. Le modèle numérique d'élévation canadien (MNEC) de RNCAN offre une couverture complète de la masse continentale canadienne à une résolution de base de 0,75 seconde d'arc (nord-sud) par 0,75 à 3 secondes d'arc (est-ouest). La résolution horizontale et la précision verticale de l'ensemble de données du MNEC sont trop grossières pour la plupart des études d'inondation côtière.

### 6.6.2 Acquisition de données bathymétriques et topographiques

Des levés bathymétriques et topographiques sublittoraux sont souvent effectués pour étayer les études ERIC. Les levés peuvent être effectués à l'aide de matériel d'arpentage terrestre, tel que des stations totales et des systèmes RTK-GPS, d'équipement embarqué, tel que les échosondeurs à faisceau unique ou multifaisceaux et de systèmes de véhicules aériens sans pilote (UAV). Les levés aériens LiDAR sont généralement d'un coût prohibitif pour les études d'évaluation des risques d'inondation côtière à petite échelle, mais les données existantes peuvent être disponibles auprès de sources gouvernementales (p. ex. le LiDAR bathymétrique du SHC). Des profils d'élévation précis sur l'ensemble de la zone de déferlement, du point de déferlement de la vague à la limite de la remontée de la vague/du débordement de la vague, sont une exigence clé pour estimer les volumes de débordement de vagues et les inondations associées. Cependant, la zone de déferlement est souvent caractérisée par des états de mer et des courants dangereux, des sédiments mobiles et des eaux peu profondes, ce qui peut rendre les levés dans ces zones difficiles ou dangereux. De plus, l'objectif principal de la plupart des levés bathymétriques est de fournir des données à des fins de navigation maritime et tend à éviter les eaux peu profondes. Diverses technologies et techniques ont été déployées pour relever ces défis, telles que les équipements de levés sur motomarine (Dugan et al., 2001), les véhicules amphibies, les véhicules télécommandés ou autonomes, les traîneaux de levé, l'imagerie optique à terre, le radar, et LiDAR bathymétrique (Wilson et al., 2014). Chacun de ces systèmes présente des inconvénients, des limites et des incertitudes. Des orientations sur les levés bathymétriques sont fournies par les Normes pour les levés hydrographiques de l'Organisation hydrographique internationale (OHI, 2008), qui sont en cours de révision.

### 6.6.3 Contrôle de la qualité des données bathymétriques et topographiques

Les ensembles de données bathymétriques et topographiques sont souvent fusionnés pour créer un MNE côtier homogène. Voici quelques-uns des problèmes qu'il faut connaître :

- **Chevauchement entre les ensembles de données** : Le plus souvent, il y a peu ou pas de chevauchement entre les ensembles de données topographiques et bathymétriques, avec quelques manques dans la couverture des données près de la ligne de flottaison. Idéalement, le levé bathymétrique devrait être effectué à marée haute (ou au niveau saisonnier élevé du lac) et le levé terrestre à marée basse (ou au niveau saisonnier bas du lac).
- **Interpolation** : Lors de la fusion des ensembles de données bathymétriques et topographiques (LiDAR, échosondeur, etc.), il faut veiller à ce que les interpolations à l'interface entre les deux ensembles de données soient représentatives du profil du littoral. Les interpolations linéaires, en

particulier sur de grandes distances, peuvent ne pas être représentatives de la pente du bas de plage.

- **Résolution spatiale** : Le LiDAR topographique est généralement fourni à une résolution horizontale de 1 m (ou plus fine) alors que le LiDAR bathymétrique est généralement fourni à une résolution plus grossière (p. ex. 5 m). La résolution requise varie en fonction de l'utilisation/de l'application prévue. Par exemple, les données bathymétriques à haute résolution peuvent ne pas être nécessaires pour soutenir la modélisation des vagues de vent dans les eaux plus profondes, mais deviennent importantes dans les eaux côtières peu profondes où les processus de transformation des vagues sont plus importants. Pour la simulation numérique de la propagation des tsunamis océaniques (ou d'autres vagues longues), une résolution spatiale plus élevée du fond marin dans les eaux du large peut être nécessaire.
- **MNT et MNS** : Le LiDAR topographique est généralement fourni sous forme de terrain en terre nue (dérivé de nuages de points classés), tandis que le LiDAR bathymétrique est généralement fourni sous forme de surface (premier retour de nuages de points non classés). Les retours de surface LiDAR incluent la hauteur de la végétation ainsi que les quais et les structures flottantes. Les ensembles de données LiDAR topographiques et bathymétriques doivent être coupés à l'élévation de la surface de l'eau à la date des levés afin que le LiDAR topographique n'inclue que le terrain au-dessus de la surface de l'eau et que le LiDAR bathymétrique ne contienne que le terrain sous la surface de l'eau.
- **Modifications morphologiques et/ou humaines du rivage ou de la surface du sol** : L'imagerie aérienne historique et d'autres informations devraient être examinées pour déterminer si les données sont appropriées pour l'étude. Par exemple, la bathymétrie recueillie il y a des décennies peut être très différente des conditions actuelles le long des rives en retrait et à proximité des structures côtières.
- **Référénts altimétriques** : Les référents altimétriques doivent être examinés pour s'assurer que les données sont référencées à une donnée du référent altimétrique commune. Le site Web des Réseaux de contrôle passif de RNCAN (<http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/data-donnees/passive-passif.php>) et/ou l'outil GPS-H de RNCAN doivent être consultés pour effectuer la conversion entre les données des référents altimétriques. Le site Web Réseaux de contrôle passif fournit l'élévation de plus de 80 000 repères de contrôle vertical dans les référents altimétriques communs pour cette région (p. ex. CGVD2013, CGVD28 et IGLD85). Pour les régions plus vastes, la conversion entre le niveau de référence local et l'élévation orthométrique peut être effectuée à l'aide des surfaces de séparation verticale hydrographique (HyV/SepS) élaborées par le SHC et RNCAN (Robin et al., 2016), en reconnaissant qu'il peut y avoir des différences locales par rapport aux points de contrôle (comme les marégraphes). Les HyV/SepS sont disponibles pour toutes les eaux de marée au Canada. L'élaboration de modèles numériques d'élévation dans les eaux transfrontières (p. ex. la mer des Salish et les Grands Lacs) peut présenter des complexités supplémentaires, comme l'intégration d'ensembles de données référencés à différents points de référence, et peut nécessiter une expertise spécialisée.

## 6.7 Imagerie aérienne

L'imagerie aérienne peut être utilisée pour identifier les structures du littoral, évaluer les changements à long terme de la position du rivage et classer le rivage en tronçons à des fins d'analyse.

### 6.7.1 Imagerie aérienne disponible

Les orthophotographies haute résolution et l'imagerie satellite peuvent être utiles pour les applications concernant l'ERIC. Les orthophotographies sont des photographies aériennes dont les distorsions de l'objectif de la caméra et du terrain ont été corrigées afin que chaque pixel soit à la même échelle et que l'image semble avoir été prise directement au-dessus. Les orthophotographies sont souvent fournies sous forme de carreaux de mosaïque sans soudure (p. ex. 1 km x 1 km) à une résolution horizontale généralement comprise entre 0,1 et 0,5 m. Les photographies sont exemptes de nuages et d'ombres de nuages et sont généralement prises au printemps ou à l'automne lorsqu'il n'y a ni feuilles, ni glace et ni neige.

Les orthophotographies sont généralement disponibles auprès de sources Web municipales et provinciales, telles que GeoBC, Information sur les terres de l'Ontario, GeoNB et GeoNOVA. Des images satellite haute résolution (généralement une résolution de 0,3 à 0,5 m) sont également disponibles auprès de fournisseurs commerciaux.

Des photographies aériennes historiques datant des années 1920 sont disponibles à la Photothèque nationale de l'air de RNCAN. Des versions numériques sont disponibles moyennant un supplément. D'anciennes photographies aériennes sont disponibles auprès des gouvernements provinciaux et municipaux, des universités et d'autres sources d'archives.

### 6.7.2 Acquisition de données d'imagerie aérienne

Les systèmes de véhicules aériens sans pilote (UAV) sont fréquemment utilisés pour capturer des photographies obliques et du nadir (orientées vers le bas) pour les études d'ERIC. Les photographies obliques sont souvent utilisées à des fins de documentation et de communication, tandis que les photographies du nadir sont généralement traitées à l'aide du logiciel de photogrammétrie de structure à partir du mouvement pour développer des produits de cartographie (orthophotographies, MNT, nuages de points, etc.). Des images orthomosaïques à très haute résolution (p. ex. une résolution au sol de 5 cm) sont possibles avec les systèmes UAV en raison des basses altitudes de vol (généralement de 20 à 100 m au-dessus du sol).

### 6.7.3 Contrôle de la qualité des images aériennes

Les orthophotographies modernes provenant de sources gouvernementales nécessitent rarement des contrôles de qualité et un traitement supplémentaires. Cependant, toutes les images aériennes (p. ex. les images satellites récentes) doivent être examinées afin de détecter les décalages horizontaux et autres distorsions avant d'être utilisées. Les anciennes images aériennes de la Photothèque nationale de l'air et d'autres sources ne contiennent pas d'informations de référence spatiale et doivent être ajustées et déformées à l'aide de points de contrôle connus (p. ex. bâtiments, intersections routières, etc.). Les photographies aériennes historiques sont souvent utilisées pour les changements de littoral et d'autres analyses. La précision spatiale des photos aériennes géoréférencées dépendra de l'échelle et de la résolution des photographies, de la qualité et de l'emplacement des points de contrôle communs aux deux images, de l'objectif de la caméra et de la distorsion du terrain, et d'autres facteurs.

## 6.8 Projections des changements climatiques

Lemmen et al. (2016) et Bush et Lemmen (2019) donnent un aperçu des impacts prévus des changements climatiques sur les risques d'inondation côtière au Canada. Voici les conclusions de haut niveau du rapport *Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat* (Lemmen et al., 2016) :

- *L'évolution du climat exerce une influence croissante sur le rythme et la nature des changements le long des côtes très dynamiques du Canada et a des impacts généralisés sur les systèmes naturels et humains.*
- *Les récents phénomènes météorologiques extrêmes démontrent la vulnérabilité de l'infrastructure côtière.*
- *Les changements dans l'étendue, l'épaisseur et la durée de la glace de mer, dans le Nord et dans certains secteurs de la région de la côte Est, ont déjà un impact sur les côtes, les écosystèmes, les collectivités côtières et les transports.*
- *Les changements dans le niveau de la mer varieront considérablement au Canada au cours de ce siècle et par la suite. Là où le niveau relatif de la mer s'élève, la fréquence et l'ampleur des inondations par les ondes de tempête augmenteront.*
- *La connaissance des risques climatiques et la nécessité d'une adaptation dans les régions côtières augmentent, et il y a de nombreux exemples d'administrations locales et régionales au Canada qui prennent des mesures en matière d'adaptation.*
- *Une gamme de mesures d'adaptation sera nécessaire dans la plupart des situations pour affronter un ensemble complexe de changements. Les solutions de rechange à des structures solides de protection des côtes peuvent être efficaces comme moyens de contrer l'érosion côtière et les inondations dans de nombreuses régions.*
- *Il est impératif que le développement futur soit entrepris dans la perspective de la nature dynamique du littoral et des risques des changements côtiers. La surveillance et l'évaluation de l'efficacité des mesures prises à ce jour de même que les recherches visant à combler les lacunes au niveau des données et des connaissances aideraient à éclairer une planification et un développement durables.*

Un message principal du plus récent *Rapport sur le climat changeant du Canada* concerne également les risques d'inondation côtière (Bush et Lemmen, 2019) :

*On s'attend à ce que les inondations côtières augmentent dans de nombreuses régions du Canada en raison de l'élévation locale du niveau de la mer. Les changements du niveau local de la mer sont une combinaison de l'élévation mondiale du niveau de la mer et de l'affaissement ou du soulèvement des terres au niveau local. On prévoit que le niveau local de la mer augmentera et que les inondations augmenteront le long de la plupart des côtes de l'Atlantique et du Pacifique du Canada et de la côte de la mer de Beaufort dans l'Arctique, où la terre s'affaisse ou se soulève lentement. La perte de glace de mer dans l'Arctique et au Canada atlantique augmente encore le risque de dommages aux infrastructures et aux écosystèmes côtiers en raison des ondes de tempête et des vagues plus importantes.*

Les données climatiques pour le Canada apparaissent sur plusieurs portails mis en ligne récemment,<sup>12</sup> élaborés par divers établissements et consortiums gouvernementaux et universitaires, y compris le Centre canadien des services climatologiques. Les sections suivantes identifient des sources spécifiques de

---

<sup>12</sup> <https://donneesclimatiques.ca/>  
<https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/centre-canadien-services-climatiques.html>

données qui peuvent être utiles pour soutenir la quantification des effets des changements climatiques sur les risques d'inondation côtière.

### 6.8.1 Niveaux de la mer et des lacs

Les projections relatives du niveau de la mer (intégrant les contributions de l'élévation mondiale du niveau de la mer, du mouvement vertical des terres et d'autres effets) pour les zones côtières canadiennes au 21<sup>e</sup> siècle et pour divers scénarios de trajectoires de concentration représentatives (RCP) sont fournies par James et al. (2014, 2015) et résumées dans Lemmen et al. (2016) et Bush et Lemmen (2019). Les projections ont été élaborées pour 59 sites du système mondial de localisation (GPS) situés près de la côte canadienne. Les projections sont basées sur l'élévation mondiale projetée du niveau de la mer, les variations spatiales résultant des courants océaniques et des effets gravitationnels, et les taux mesurés par GPS du mouvement vertical des terres. Les plus grandes quantités d'élévation relative du niveau de la mer sont prévues là où les terres sont actuellement en baisse en raison de l'ajustement isostatique glaciaire au Canada atlantique (James et al., 2014). Les autres régions où le niveau relatif de la mer devrait augmenter comprennent le littoral de la mer de Beaufort, des parties du sud de Terre-Neuve et du Québec et la côte de la Colombie-Britannique. Dans d'autres parties de l'Arctique, y compris la baie d'Hudson et le centre de l'archipel arctique, le soulèvement des terres et les effets des changements actuels de la masse de glace contrebalancent l'élévation mondiale projetée du niveau de la mer, entraînant des projections de baisse relative du niveau de la mer ou de petites élévations du niveau de la mer.

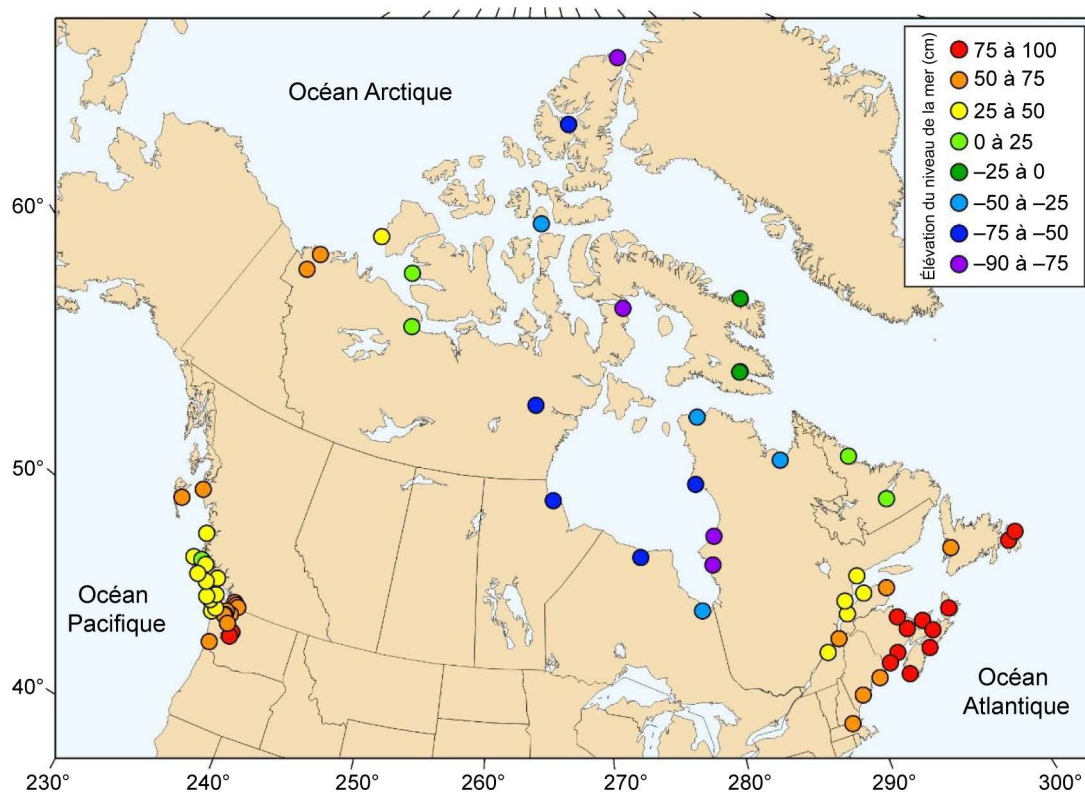
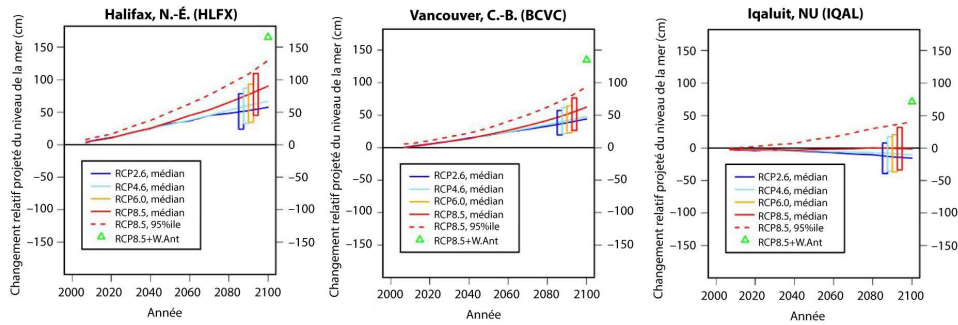


Figure 13. Changement relatif médian projeté du niveau de la mer d'ici 2100, par rapport à la période de 1986 à 2005, pour le scénario de RCP 8.5 à émissions élevées (d'après Atkinson et al., 2016).



**Figure 14. Changement relatif projeté du niveau de la mer pour Halifax, Vancouver et Iqaluit, par rapport à la période de 1986 à 2005 (James et al., 2015), pour quatre scénarios de trajectoire de concentration représentative (RCP), et pour un scénario augmenté (triangle vert) prévoyant une augmentation du niveau de la mer additionnelle de 65 cm pour 2100 s’ajoutant à la projection médiane du scénario RCP 8.5 à émissions élevées.**

Dans les zones où le niveau relatif de la mer devrait augmenter, il y a une forte certitude que la fréquence et l’ampleur des niveaux d’eau extrêmement élevés augmenteront avec le temps (GIEC, 2013; Lemmen et al., 2016; Greenan et al., 2018).

Les projections des changements futurs (moyens) du niveau de la mer pour le Canada n’incluent généralement pas les changements potentiels de l’amplitude des marées (p. ex. résultant du cycle nodal lunaire ou des interactions marée-bathymétrie), qui peuvent contribuer beaucoup plus à la fréquence et à l’ampleur des niveaux de la mer extrêmes à des échelles de temps décennales par rapport à l’élévation mondiale du niveau de la mer (Peng et al., 2019), et entraînent des fluctuations décennales des risques d’inondation côtière (Talke et al. 2018). Dans la baie de Fundy, les changements prévus de l’amplitude des marées devraient contribuer à l’augmentation des niveaux d’eau extrêmes (Greenberg et al., 2012).

### 6.8.2 Glace de mer et de lac

Le réchauffement climatique devrait entraîner une réduction généralisée de la durée et de l’étendue de la couverture de glace de mer dans les eaux côtières canadiennes au 21<sup>e</sup> siècle. La plupart des régions marines de l’Arctique canadien pourraient être libres de glace de mer pendant au moins un mois en été d’ici 2050, selon des simulations multimodèles (Bush et Lemmen, 2019). Des conditions hivernales pratiquement sans glace sont projetées d’ici le milieu du siècle sur la côte est selon un scénario d’émissions élevées, bien qu’il y ait un certain degré d’incertitude dans ces projections (Bush et Lemmen, 2019). On prévoit que la durée de la couverture de glace saisonnière sur les Grands Lacs diminuera de 25 à 50 jours d’ici le milieu du 21<sup>e</sup> siècle, en raison d’un gel ultérieur et d’une débâcle plus précoce. Ces projections de déclin de la couverture de glace de mer et de lac ont des répercussions sur l’exposition des bâtiments et des infrastructures côtières aux ondes de tempête, aux vagues et à d’autres sources de risque d’inondation, l’augmentation de la durée de la saison des eaux libres étant une préoccupation importante. Des détails supplémentaires sur la couverture de glace de mer et de lac prévue en raison des effets des changements climatiques sont fournis dans Derksen et al. (2018).

### 6.8.3 Ondes de tempête et vagues extrêmes

La fréquence et l’ampleur des ondes de tempête et des vagues extrêmes devraient augmenter dans les régions du Canada qui ont actuellement une couverture de glace saisonnière, à mesure que la durée saisonnière de la glace diminue. Les projections pour le 21<sup>e</sup> siècle indiquent un léger déplacement vers le

nord des trajectoires des tempêtes au large du Canada atlantique et une augmentation de la hauteur des vagues hivernales au large de la côte du Pacifique. La confiance pour ces projections est faible, en raison de l'incertitude associée aux projections de tempête, comme résultat des données d'observation limitées, des incohérences entre les résultats de la recherche et des différences dans les projections des modèles climatiques mondiaux et régionaux (Greenan et al., 2018).

#### **6.8.4 Données du modèle climatique mondial et régional**

Les projections climatiques sont basées sur des modèles du système terrestre mondial, qui ne fournissent généralement pas une résolution spatiale et temporelle suffisante pour soutenir les évaluations des risques d'inondation côtière pour les régions, les collectivités ou les sites de bâtiments/infrastructures, où les risques sont dus à la variabilité à haute fréquence et à petite échelle spatiale. Diverses stratégies de réduction d'échelle des projections des modèles climatiques mondiaux sont décrites par Flato et al. (2019). Des expériences de réduction d'échelle statistique et dynamique ont été menées pour l'Amérique du Nord, et les données sont disponibles gratuitement par le biais du North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP : <http://www.narccap.ucar.edu/>) et le Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX : <https://na-cordex.org/>). Ces expériences fournissent des simulations et des projections historiques pour le 21<sup>e</sup> siècle (y compris pour la pression quotidienne au niveau de la mer et les champs de vent de surface) à partir de différents modèles climatiques régionaux, éclairés par différents modèles climatiques mondiaux. Des ensembles de ces ensembles de données peuvent être utilisés pour donner un aperçu des changements éventuels des vents quotidiens et des pressions au niveau de la mer dans les régions du Canada, en reconnaissant qu'aucun modèle unique ou combinaison de modèles mondiaux/régionaux n'est universellement représentatif et que les risques d'inondation côtière peuvent être influencés par des fluctuations de fréquence plus élevée (c.-à-d. plusieurs fois par jour).

### **6.9 Données de bâtiment et d'infrastructure**

Lors de l'évaluation de la vulnérabilité et du risque des bâtiments et des infrastructures (existants ou proposés) exposés aux risques d'inondation côtière, il est important d'identifier les caractéristiques susceptibles d'avoir une incidence sur les niveaux de dommages, la récupération ou les risques pour la santé humaine. Par exemple, les niveaux de dommages subis par un bâtiment pour une exposition à un danger donné seront influencés par le type de bâtiment (ou le classement du bâtiment), le nombre d'étages, l'empreinte du bâtiment, l'élévation du rez-de-chaussée et la présence ou l'absence d'un sous-sol. Selon l'étape de conception/planification au cours de laquelle l'évaluation des risques d'inondation côtière est effectuée, si l'évaluation est requise pour soutenir une nouvelle conception ou une modernisation, ou si l'évaluation est requise pour déterminer les impacts potentiels sur les risques d'inondation sur les bâtiments et les infrastructures environnants, ces informations peuvent provenir d'inventaires de données disponibles pour des types d'actifs similaires ou de la documentation de conception réelle (p. ex. des dessins et des spécifications). Dans le premier cas, il est important de considérer comment les changements de conception éventuels qui diffèrent des normes historiques pourraient potentiellement influencer la vulnérabilité et le risque, pour éclairer les décisions sur les mesures au niveau des bâtiments et des infrastructures pour réduire les risques.

#### **6.9.1 Données disponibles sur les bâtiments et les infrastructures**

Pour les bâtiments existants, les données peuvent être obtenues à partir des archives municipales et peuvent inclure les adresses, les empreintes de bâtiments, les hauteurs/volumes des bâtiments et le zonage/l'utilisation du sol. Ces données peuvent être combinées avec les données des bureaux d'enregistrement/titres fonciers provinciaux et les autorités d'évaluation foncière (p. ex. BC Assessment, la

Société d'évaluation foncière des municipalités de l'Ontario), qui peuvent inclure des informations telles que le type de propriété, le nombre d'occupants, le nombre de ménages, l'utilisation du bâtiment, l'année de construction, la superficie totale en pieds carrés, la superficie du rez-de-chaussée, la superficie du deuxième étage, le nombre d'étages, la superficie du sous-sol non fini, la superficie du sous-sol fini, le niveau du plancher et la valeur estimée. Cette information peut être utilisée pour classer les bâtiments aux fins d'évaluation de la vulnérabilité et des risques (p. ex. RNCan,<sup>13</sup> 2017; IBI Group et Golder Associates, 2015).

Pour les bâtiments, l'élévation du rez-de-chaussée peut influencer considérablement sur les estimations des dommages. Pour les bâtiments existants (p. ex. évaluations pour justifier les rénovations ou comprendre les risques), l'élévation du rez-de-chaussée peut être étudiée à l'aide de techniques conventionnelles ou estimée en ajoutant la hauteur estimée du rez-de-chaussée (p. ex. compter le nombre de marches jusqu'à la porte principale) à l'élévation du sol à partir d'un MNE. Pour les bâtiments neufs (c.-à-d. proposés), la documentation de conception indiquera l'élévation du rez-de-chaussée.

Les méthodes de quantification des dommages causés par les inondations aux actifs d'infrastructure, tels que les routes, les ponts, les ponceaux, les égouts pluviaux et sanitaires, les conduites d'eau, les lignes hydroélectriques et les transformateurs, les conduites de gaz et les lignes de téléphone/câble/Internet sont moins bien développées. Les inventaires des infrastructures et les registres des dommages/de l'entretien peuvent donner un aperçu des niveaux de dommages subis en réponse aux événements de risque d'inondation côtière. Compte tenu de la sensibilité de ces informations, en particulier pour les infrastructures essentielles, ce type de données peut être difficile à obtenir.

### **6.9.2 Acquisition de données de bâtiment et d'infrastructure**

Pour les évaluations des risques d'inondation côtière menées à l'échelle de la collectivité, des visites de sites sont recommandées pour confirmer les données d'inventaire des bâtiments, remplir les données manquantes et créer une base de données de photos. L'accès aux propriétés n'est généralement pas nécessaire, car le classement, le nombre d'étages, le nombre de marches menant à la porte principale des bâtiments (pour estimer l'élévation du rez-de-chaussée), la présence d'un sous-sol et d'autres facteurs peuvent être examinés à partir du droit de passage public. Pour les études entreprises pour un bâtiment ou une infrastructure spécifique, les informations doivent être obtenues à partir des dessins de conception (p. ex. élévations des soffites de ponts).

Les exigences en matière de données varient selon les différentes méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité et des risques (voir la section 9). Les sources de données existantes doivent être examinées pour déterminer s'il y a des données suffisantes pour la méthodologie d'évaluation choisie.

### **6.9.3 Contrôle de la qualité des données des bâtiments et des infrastructures**

Les données sur les bâtiments et les infrastructures doivent être examinées pour confirmer que les informations sont actuelles et exactes. Par exemple, l'inventaire, l'équipement, les matières premières, les structures et les coûts de nettoyage seront différents pour différentes utilisations des bâtiments commerciaux (p. ex. restaurant, commerce de détail, bureau, etc.). Les données doivent également être examinées pour détecter les données manquantes, incomplètes, en double et suspectes.

---

<sup>13</sup> En 2017, une ébauche de rapport non publié sur les « Canadian Guidelines and Database of Flood Vulnerability Functions » (Lignes directrices canadiennes et base de données sur les fonctions de vulnérabilité aux inondations) a été préparée pour Ressources naturelles Canada dans le cadre des Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables. Le document est en cours de révision et sera publié ultérieurement.

## 6.10 Fonctions de dommages causés par les inondations

Les fonctions de dommages causés par les inondations développées pour les bâtiments et les infrastructures peuvent être utilisées pour estimer le montant des dommages causés à un actif par les eaux de crue. Le type le plus courant de fonctions de dommages, parfois appelées courbes de vulnérabilité ou de fragilité, est connu sous le nom de « courbes profondeur-dommages » et fournit une estimation des dommages subis par une structure (et son contenu, le cas échéant) pour une profondeur de l'inondation. Dans les régions côtières, les bâtiments et les infrastructures peuvent également être endommagés par les impacts des vagues, les écoulements à grande vitesse (remontée de la vague/flot de retour des vagues), l'érosion et les débris (tels que les billes, la glace, etc.). Par exemple, les débris entraînés par les vagues ont été cités comme facteur pouvant avoir exacerbé les/contribué aux dommages causés à une jetée à White Rock, en Colombie-Britannique, lors d'une tempête de vent en décembre 2018 (Ville de White Rock, 2019).

Les fonctions complètes de dommages aux bâtiments et aux infrastructures ne sont pas largement disponibles pour les vagues de tempête et les charges hydrodynamiques dans les régions côtières. Cependant, la FEMA (2001) fournit des courbes de base des dommages en profondeur pour les zones côtières en V (p. ex. vagues déferlantes de plus de 3 pieds, débordement de la vague, etc.) basées sur les effets combinés des ondes de tempête à grande vitesse, des inondations, des vagues et des impacts de débris. Les inspections des dommages après les tempêtes aux États-Unis indiquent que la construction standard offre peu ou pas de résistance aux charges de vagues déferlantes, avec une destruction complète des murs à ossature de bois et des murs de maçonnerie non renforcés sous l'élévation de la crête d'une onde (voir par exemple FEMA, 2006, 2009, 2011). Les murs en béton armé (p. ex. les murs de fondation) sont capables de résister à des charges de vagues modérées à condition que la structure ne soit pas affaiblie par l'affouillement et le débordement de la vague.

Dans certains cas, la gravité des dommages peut être influencée par le délai d'avertissement, la durée de l'événement, les conditions météorologiques (température, précipitations, etc.) et d'autres facteurs. Par exemple, des mesures temporaires de protection et d'atténuation pourraient être installées, ou le contenu du bâtiment déplacé, si un délai d'avertissement adéquat est donné.

### 6.10.1 Données disponibles sur les dommages dus aux inondations

En 2017, RNCan a publié une ébauche de rapport sur les *Lignes directrices canadiennes et base de données sur les fonctions de vulnérabilité aux inondations* dans le cadre de la série des Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables. Au moment de la rédaction des présentes lignes directrices de l'ERIC, l'ébauche de rapport est en cours de révision. Bien que le rapport ait été élaboré pour les inondations fluviales, la terminologie, les fonctions de vulnérabilité et les procédures sont largement applicables aux régions côtières. En particulier, les courbes profondeur-dommages développées pour les inondations fluviales peuvent probablement être utilisées pour les évaluations des risques d'inondation côtière (ondes de tempête) lorsque la profondeur de l'inondation est faible et la hauteur des vagues est limitée. RNCan (2017) fait remarquer que la pratique actuelle consiste à éliminer et à remplacer tous les articles qui sont entrés en contact avec les eaux de crue (p. ex. cloisons sèches, revêtements de sol, appareils électroménagers, meubles, etc.) en raison du risque de moisissure et de contamination. Compte tenu de cette pratique, les taux de récupération pour les inondations fluviales et côtières devraient être similaires et dépendent principalement de la profondeur de l'inondation, par opposition à d'autres caractéristiques des inondations (p. ex. durée de l'inondation, temps d'avertissement, teneur en boue, eau douce ou eau salée, présence de vagues, etc.). Cependant, à mesure que les matériaux avancés, les techniques de construction et les finitions et les principes « Rebâtir en mieux » seront plus largement utilisés au Canada dans le cadre d'approches plus globales de réduction des risques d'inondation, il sera

nécessaire d'élaborer de nouvelles fonctions de dommages qui capturent les spécificités des inondations côtières (p. ex. dommages dus à l'action des vagues).

Pour les emplacements côtiers exposés, la probabilité d'effondrement du bâtiment doit être évaluée en fonction des charges de vagues prévues et des caractéristiques du bâtiment. Par ailleurs, RNCan (2017) fournit des tableaux simplifiés pour estimer la combinaison de la profondeur de l'eau et de la vitesse de l'eau qui provoquerait l'effondrement des bâtiments en bois, en maçonnerie et en béton, et en acier (adapté du modèle HAZUS Multi-hazard, FEMA, 2006). Pour les bâtiments à ossature de bois, les tableaux indiquent un effondrement complet à des profondeurs d'inondation supérieures à 3 m ou à des profondeurs moins profondes lorsque la vitesse de l'eau est supérieure à 10 m/s. Très peu de bâtiments au Canada ont été exposés à des profondeurs d'eau et à des vitesses de cette ampleur lors d'inondations historiques causées par des tempêtes côtières extrêmes. Si la profondeur et la vitesse de l'eau sont inférieures au seuil d'effondrement du bâtiment, les dommages directs au bâtiment peuvent généralement être basés sur les seules courbes profondeur-dommages.

Les courbes profondeur-dommages de RNCan (2017) ont été élaborées à partir d'inspections des bâtiments après l'inondation suite à l'inondation de Calgary en 2013. Le guide fournit des méthodes pour adapter les coûts à différentes régions du Canada et à différentes années à l'aide de l'indice des prix à la consommation, de l'Enquête sur les dépenses des ménages et de l'indice des prix de la construction. Des tableaux détaillés sont fournis dans le guide décrivant le coût de retrait et de remplacement des composants de bâtiment pour différents classements de bâtiments. En général, les seuils de profondeur suivants s'appliquent aux inondations du sous-sol résidentiel et du rez-de-chaussée (les profondeurs sont au-dessus de l'élévation du sous-sol ou du rez-de-chaussée) :

- 0 à 0,1 m : Remplacer la totalité des revêtements de sol, cloisons sèches jusqu'au plafond, pare-vapeur, isolant, portes, armoires, etc., et nettoyer et sécher la structure.
- 0,3 m : Remplacer la fournaise (sous-sol seulement).
- 0,6 m : Remplacer tous les éléments électriques du panneau de service.
- 0,9 m à 1,5 m : Remplacer toutes les fenêtres (rez-de-chaussée/sous-sol).

Autrement, le modèle d'inondation HAZUS de FEMA utilise des courbes profondeur-dommages développées par la Federal Insurance Administration des États-Unis et les bureaux régionaux de l'USACE qui indiquent le pourcentage de dommages aux bâtiments pour une profondeur d'inondation donnée. Les courbes peuvent ne pas convenir au Canada en raison des différences de construction des bâtiments (p. ex. de nombreux bâtiments américains dans les zones côtières à risque sont en dalle sur le sol ou sur pilotis), de l'exposition relative aux risques d'inondation côtière (ouragans) et de l'âge des données (tendances dans la taille des bâtiments, la réparation/récupérabilité, le type de contenu et la valeur). Par exemple, les courbes profondeur-dommages préparées pour les bâtiments du golfe du Mexique sont sujettes à des vents d'ouragan, des vagues et des ondes de tempête qui dépassent de loin ce qui serait connu sur les côtes canadiennes de mer et des Grands Lacs. Les courbes profondeur-dommages préparées pour les inondations fluviales à Calgary, adaptées à différentes régions du Canada et pour l'année à l'aide des méthodes d'indexation de RNCan (2017), sont donc susceptibles d'être plus représentatives des dommages causés aux bâtiments par les inondations dues aux tempêtes côtières au Canada, mais doivent néanmoins être utilisées avec prudence. Au moment de la rédaction des présentes lignes directrices, des efforts régionaux sont en cours pour élaborer des courbes profondeur-dommages qui reflètent les conditions locales (p. ex. les basses-terres continentales de la Colombie-Britannique).

De plus, RNCan (2017) fournit des courbes profondeur-dommages, classées par type et utilisation de bâtiment, pour les bâtiments non résidentiels. Par exemple, les finitions et le contenu d'un immeuble de

bureaux seront différents de ceux d'un immeuble commercial avec le même classement structurel. RNCAN comprend une catégorie pour les hôpitaux et une autre pour les établissements institutionnels/autres, qui comprend les écoles, les bibliothèques, etc. La FEMA reconnaît que les courbes profondeur-dommages pour les installations essentielles (p. ex. hôpitaux, casernes de pompiers, postes de police, écoles, etc.) sont très variables et HAZUS exige que les courbes profondeur-dommages soient définies par l'utilisateur dans le cas des installations essentielles.

Dias et Edirisooriya (2019) présentent une méthode pour obtenir des courbes de dommages moyennes pour les structures dus aux risques de tsunami, basée sur des fonctions de fragilité. Les courbes de fragilité aux tsunamis ont été préparées pour être utilisées au Japon sur la base de levés réalisés suite au tremblement de terre et au tsunami de Tohoku en 2011 (Suppasri et al., 2012). Les constructions en bois japonaises diffèrent considérablement des maisons canadiennes types (p. ex. détails des joints, conception des fondations) et, par conséquent, les courbes de fragilité japonaises ne reflètent pas fidèlement la conception des bâtiments et des infrastructures au Canada (Rossetto et al., 2019).

### **6.10.2 Acquisition de données sur les dommages causés par les inondations**

Des visites de site peuvent être effectuées pour comparer l'inventaire local des bâtiments avec les classements des bâtiments qui seront utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité et des risques. Si les types de bâtiments ne sont pas bien représentés, des courbes profondeur-dommages synthétiques peuvent être préparées pour les bâtiments exposés aux risques d'inondation côtière. RNCAN (2017) fournit des conseils sur la collecte de données et l'élaboration de courbes de dommages au contenu synthétique pour les bâtiments résidentiels. Des conseils similaires pour les bâtiments non résidentiels sont fournis.

Sinon, les courbes profondeur-dommages fournies dans RNCAN (2017) peuvent être modifiées pour tenir compte des différences mineures dans le type de bâtiment, comme la présence de vides sanitaires, de sous-sols non finis, de contenu intérieur et extérieur, d'élévation des services publics (p. ex. chauffe-eau, fournaise, etc.), l'aménagement paysager et le nettoyage. Par exemple, les courbes profondeur-dommages pour un bâtiment avec un vide sanitaire (sans sous-sol) et une fournaise et un chauffe-eau au rez-de-chaussée peuvent être modifiées pour refléter une moindre vulnérabilité aux dommages causés par l'inondation du sous-sol/vide sanitaire. Dans les collectivités nordiques, de nombreuses résidences sont sur des fondations surélevées permettant à l'air de circuler en dessous afin de préserver le pergélisol, ce qui peut offrir une certaine protection contre les inondations peu profondes, mais peut augmenter le potentiel de dommages lors d'événements d'inondation plus extrêmes. Les valeurs nominales appliquées pour l'aménagement paysager et le nettoyage extérieur peuvent également être affinées en tenant compte du contenu et de la taille de la cour et des conséquences d'une inondation sur les conditions locales du site.

À mesure que davantage de données deviennent disponibles sur le rendement de différentes mesures de résistance/résilience/réparabilité aux inondations à l'échelle des bâtiments et des infrastructures (section 11), les problèmes de rendement propres aux inondations côtières (p. ex. les effets des vagues sur les dommages) et les différences régionales en matière de rendement des bâtiments et des infrastructures; les bases de données des courbes profondeur-dommages (ou de vulnérabilité/fragilité) devraient être mises à jour afin de faciliter des évaluations plus précises de la vulnérabilité aux risques d'inondation côtière.

### 6.10.3 Contrôle de la qualité des données sur les dommages causés par les inondations

Les courbes profondeur-dommages sélectionnées pour l'évaluation de la vulnérabilité et des risques doivent être examinées pour s'assurer qu'il n'y a pas d'erreurs évidentes dans les données, que l'inventaire du bâtiment correspond au schéma de classement des bâtiments et que le contenu du bâtiment reflète les tendances actuelles. Par exemple, il peut être nécessaire de créer une catégorie de bâtiments hybrides si de nombreux bâtiments se situent entre deux catégories. À mesure que les pratiques de conception, les codes et les normes évoluent pour inclure des caractéristiques de conception nouvelles ou innovantes résistantes aux inondations, les relations de dommages basées sur le rendement antérieur de différentes catégories de bâtiments peuvent ne plus être représentatives et de nouvelles approches peuvent être nécessaires pour élaborer des fonctions de dommages.

## 6.11 Données sur les conséquences socio-culturelles, environnementales et indirectes

Les dommages causés par les inondations à un bâtiment peuvent également avoir de nombreuses conséquences au-delà des dommages physiques. Celles-ci peuvent inclure un large éventail de conséquences économiques, sociales, culturelles et environnementales potentielles, qui devraient être évaluées afin d'avoir une image plus globale du risque d'inondation. Six catégories d'indicateurs différentes peuvent être utilisées pour décrire les conséquences plus larges au-delà des dommages physiques :

- 1) personnes touchées;
- 2) mortalité;
- 3) économie (conséquences indirectes);
- 4) infrastructure essentielle et interruption des services de base;
- 5) environnement;
- 6) culture.

Les catégories présentées ci-dessus tiennent compte des pratiques exemplaires internationales du Cadre d'action de Sendai et du Groupe de travail des Nations Unies sur les indicateurs. Cependant, il peut être pertinent d'ajuster ou de regrouper les indicateurs différemment en fonction de la portée du projet. Dans les sections ci-dessous, des exemples d'ensembles de données pour chacun des six indicateurs sont donnés. Toutefois, ils tiennent compte du fait que la disponibilité des données et le contexte local varient d'un site à l'autre.

### 6.11.1 Données disponibles sur les conséquences socio-culturelles, environnementales et indirectes

#### 6.11.1.1 Personnes touchées

Le nombre de personnes directement touchées sera éclairé, par exemple, par le nombre de résidents dans un bâtiment prévu/existant. Si l'on considère des conséquences plus indirectes, le nombre de personnes dans le quartier qui dépendent des services fournis dans le bâtiment ou l'infrastructure (p. ex. la population desservie par un poste électrique, etc.) doit être inclus. Le nombre de résidents du bâtiment peut être obtenu à partir des plans de conception pour les nouveaux bâtiments/quartiers et auprès des exploitants de bâtiments pour les bâtiments existants. Pour la population du tronçon de côte voisin, des données de recensement peuvent être utilisées, ainsi que des données plus détaillées provenant de sources municipales, si elles sont disponibles. Les aires de diffusion du recensement sont généralement vastes

dans les régions rurales où il peut donc être difficile de déterminer le nombre de personnes potentiellement touchées. Ressources naturelles Canada (RNC) élabore actuellement un ensemble de données « Schémas d'établissements humains au Canada » qui utilise des données de télédétection pour diffuser les données de recensement dans les zones d'établissements humains dans l'ensemble du Canada, qui peuvent être utilisés pour estimer les densités de population (Journeay et al., 2020).

La mesure dans laquelle les personnes dépendant d'un bâtiment ou d'un élément d'infrastructure seront touchées par les inondations dépend aussi largement de leur propre vulnérabilité. Dans ce contexte, la vulnérabilité décrit les « caractéristiques... d'une collectivité... qui la rendent vulnérable aux effets néfastes d'un danger » (SIPC, 2009). En règle générale, les groupes de population suivants sont considérés comme particulièrement vulnérables aux risques d'inondation (« vulnérabilité sociale ») (AIDR, 2009) :

- les personnes âgées, ou les personnes handicapées, qui pourraient ne pas être en mesure de comprendre ou de répondre aussi rapidement ou sans assistance;
- les personnes à faible revenu, car elles n'ont peut-être pas les ressources et la capacité de se préparer ou de réagir;
- les familles avec de jeunes enfants, car les enfants sont plus susceptibles d'être blessés par les eaux de crue profondes, et l'évacuation peut être difficile pour les parents avec de nombreux enfants;
- les nouveaux arrivants ou les touristes, qui pourraient ne pas être au courant des risques d'inondation ou des voies d'évacuation;
- les personnes de cultures ou de langues différentes, qui pourraient avoir des difficultés à comprendre les annonces d'urgence, et pour lesquelles une attention particulière devrait également être accordée pour s'assurer que les mesures d'urgence ne heurtent pas les sensibilités culturelles;
- les personnes à mobilité réduite (p. ex. en raison d'une maladie ou d'un manque de transport).

Les données du recensement et l'ensemble de données de RNC peuvent fournir de plus amples informations sur les caractéristiques de vulnérabilité sociale.

#### **6.11.1.2 Mortalité**

Bien que le risque de mortalité lié aux inondations côtières provoquées par les tempêtes soit généralement relativement faible (Sécurité publique Canada, 2019), les tsunamis présentent un risque élevé de mortalité, qui pourrait être estimé à l'aide des fonctions de mortalité (e.g., Smith and Rahman 2016) (voir la section 9). Il faudra peut-être tenir compte de la mortalité si le bâtiment ou l'infrastructure en question est situé dans la zone de risque de tsunami où les vitesses et les profondeurs d'eau devraient être élevées. La mortalité est généralement estimée sur la base du nombre estimé de personnes touchées dans la zone, des caractéristiques de danger (telles que la profondeur et la vitesse de l'inondation du tsunami), ainsi que l'accès aux voies d'évacuation ou aux structures d'évacuation verticales (voir la section 9). Ainsi, les données requises comprennent le nombre estimé de personnes dans la zone (cela devrait, par exemple, inclure également les visiteurs d'un jour dans les zones touristiques), ainsi que des informations sur la planification de l'évacuation dans la zone.

#### **6.11.1.3 Économie**

Outre les conséquences économiques directes des inondations associées aux dommages physiques et aux dommages au contenu des bâtiments (comme discuté dans la section 9), des conséquences économiques indirectes peuvent également se produire. Celles-ci peuvent inclure, par exemple, l'interruption d'entreprises situées dans le bâtiment/l'infrastructure ou le quartier prévu. Des informations

sur les actifs des bâtiments et les entreprises environnantes peuvent être obtenues à partir des évaluations foncières provinciales,<sup>14</sup> des sources de données spatiales municipales et provinciales, OpenStreetMap<sup>15</sup> ou les commentaires des intervenants. Les estimations économiques indirectes peuvent être estimées à partir des dommages économiques directs, et donc à partir des mêmes ensembles de données. Des calculs économiques plus détaillés peuvent être justifiés en cas de perturbation potentielle des infrastructures essentielles (voir ci-dessous). Des informations plus détaillées sur les impacts économiques et les données à l'appui de leur calcul seront fournies dans une publication à venir sur l'évaluation des dommages causés par les inondations en cours d'élaboration dans le cadre des Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables (RNCan, 2017).

#### **6.11.1.4 Infrastructure essentielle et interruption des services de base**

La détermination de la criticité d'un bâtiment ou d'une infrastructure est une information clé pour évaluer la conception résistante aux inondations requise (section 5). Si le bâtiment fournit des services essentiels à la collectivité ou à la région, les effets en cascade sur la société pourraient être considérables et nécessiteraient donc une conception plus résistante aux inondations. La criticité est éclairée par l'utilisation (prévue) du bâtiment ou de l'infrastructure (pour les descriptions des niveaux de criticité associés aux différents types de bâtiments, voir la section 5.3.3).

La perturbation des services de base, tels que l'électricité, le gaz, l'approvisionnement en eau et l'accès routier, peut également avoir des conséquences importantes pour une collectivité et pour le fonctionnement du bâtiment ou de l'infrastructure faisant l'objet de l'évaluation. Ainsi, lors de la planification de la conception résistante aux inondations d'un bâtiment, il est essentiel d'évaluer également son accès aux services de base et la rapidité du rétablissement. Par exemple, y a-t-il une seule route menant au bâtiment, où les inondations peuvent restreindre l'accès et ainsi interrompre la livraison d'aliments et d'autres approvisionnements? Ou l'infrastructure est-elle desservie par une seule ligne électrique sans redondance où les inondations pourraient entraîner des pannes d'électricité, nécessitant la prise en compte de générateurs de secours (en particulier pour les infrastructures essentielles)? Les données sur les structures de services de base peuvent être obtenues auprès de sources de données et de fournisseurs de services municipaux et provinciaux, ainsi que de sociétés indépendantes, comme l'Integrated Cadastral Information Society<sup>16</sup> en Colombie-Britannique.

Par ailleurs, des informations sur les impacts en cascade sont parfois disponibles sous la forme de scénarios de planification des incidents (gouvernement du Canada, 2009) auprès des propriétaires d'actifs. Le cas échéant, des exercices de scénarios avec les intervenants peuvent être réalisés pour aider au développement d'une compréhension plus solide des perturbations potentielles afin d'éclairer les caractéristiques et les approches de conception.

#### **6.11.1.5 Environnement**

Les conséquences environnementales des dommages causés aux bâtiments par les inondations peuvent être considérables, si des matières dangereuses sont libérées ou si des matériaux de construction endommagés contaminent les écosystèmes environnants. Deux types de données sont nécessaires pour évaluer les conséquences environnementales : les sources (telles que les sources de contamination, y compris les usines de traitement des eaux usées, le stockage de carburant/propane et d'autres matières dangereuses) et les récepteurs (écosystèmes sensibles). En outre, la voie (c.-à-d. la façon dont les sources de contamination peuvent atteindre les récepteurs) doit être prise en compte. L'utilisation prévue du

<sup>14</sup> Par exemple, BC Assessment : <https://www.bcassessment.ca/>.

<sup>15</sup> <https://www.openstreetmap.org/#map=10/51.3928/-121.9579>

<sup>16</sup> Integrated Cadastral Information Society (ICI) : <https://www.icisociety.ca/>

bâtiment/de l'infrastructure et de tout matériel/contenu stocké permettra de déterminer si le bâtiment ou l'infrastructure peut lui-même présenter un danger pour l'environnement (ou la santé humaine). Les conteneurs de stockage de carburant adjacents à un bâtiment peuvent également servir de sources de contamination, tout comme certaines activités commerciales, telles que les stations-service, les ateliers de réparation automobile, etc. Les évaluations foncières provinciales et les sources de données municipales peuvent fournir des informations sur le type d'activités commerciales. Enfin, le type de milieu environnant joue un rôle important dans la prise en compte des conséquences environnementales potentielles. Par exemple, si un écosystème protégé et sensible est situé à proximité d'un bâtiment prévu, des précautions supplémentaires doivent être prises pour réduire le plus possible les déversements dangereux en cas d'inondation. Les données sur les écosystèmes et les parcs à proximité peuvent également être généralement obtenues auprès de la municipalité et des intervenants locaux.

#### **6.11.1.6 Culture**

Les infrastructures endommagées ou détruites par les dangers côtiers peuvent avoir des répercussions sur les zones environnantes, lesquelles peuvent avoir une valeur culturelle. Les effets des inondations sur la culture d'une collectivité sont difficiles à quantifier. En l'absence de bonnes données culturelles, des indicateurs, tels que le nombre de sites culturels, sont utilisés. Les sites culturels peuvent inclure des centres communautaires, des écoles, des centres religieux, des galeries d'art, des théâtres, du patrimoine bâti et autres. Les données sur ces sites peuvent être obtenues auprès des municipalités locales, d'OpenStreetMap, des évaluations foncières provinciales et d'autres sources. Surtout, les sites historiques et archéologiques devraient également être inclus, tels que les sites pré-coloniaux autochtones. Certaines données peuvent être obtenues auprès des directions d'archéologie des gouvernements provinciaux, et ces données sont généralement sensibles (c'est-à-dire qu'elles ne peuvent pas être partagées ou présentées sur les produits cartographiques). Malgré ces défis, il est important que les biens culturels soient représentés et mesurés aussi bien que possible. Ne pas tenir compte de ces pertes potentielles dans une évaluation des risques pourrait rendre l'évaluation non fondée. Par exemple, en ce qui concerne la conception de bâtiments ou d'infrastructures, l'importance culturelle d'un bâtiment pour la collectivité locale doit être prise en compte, ainsi que les conséquences négatives éventuelles sur les sites culturels environnants, en cas de défaillance du bâtiment ou de dommages dus à des inondations.

#### **6.11.2 Acquisition de données sur les conséquences socio-culturelles, environnementales et indirectes**

Les données sont généralement obtenues à partir des référentiels de données spatiales municipales/provinciales en ligne et peuvent être enrichies par des visites sur le terrain. Surtout, les ateliers avec les intervenants peuvent fournir des informations supplémentaires sur les valeurs et le contexte locaux, les ensembles de données existants, ainsi que les conséquences les plus intangibles et indirectes.

#### **6.11.3 Contrôle de la qualité des données sur les conséquences socio-culturelles, environnementales et indirectes**

Compte tenu des incertitudes associées à de nombreux indicateurs de conséquences socioculturelles, environnementales et indirectes et à l'évaluation des risques, le contrôle de la qualité des données est essentiel. Dans ce cas-ci, les visites sur le terrain peuvent être utiles, et surtout, la vérification sur le terrain des informations avec les intervenants (p. ex. dans le cadre d'ateliers) peut profondément améliorer le processus d'évaluation des risques. Les intervenants doivent être intégrés dans le processus à un stade précoce (section 4).



## 7 Sélection des niveaux d'analyse appropriés

Les évaluations des risques peuvent fournir des informations sur les conséquences éventuelles des inondations côtières ou des tsunamis pour les bâtiments ou infrastructures existants ou nouveaux (proposés), ainsi que sur les conséquences sociétales, économiques et environnementales supplémentaires qui pourraient résulter des inondations. Les évaluations des risques peuvent donc fournir une contribution importante à la conception (nouvelle ou modernisée) de bâtiments ou d'infrastructures au sein de systèmes et de collectivités plus larges. Si les conséquences de la défaillance des bâtiments ou des infrastructures dues aux inondations côtières sont graves, que ce soit pour les propriétaires d'actifs ou pour d'autres intervenants de la collectivité/du système environnant, des mesures doivent être prises pour les atténuer ou les éviter. Les conséquences d'un risque d'inondation sont déterminées systématiquement dans une évaluation des risques et peuvent ensuite être classées comme minimales, modérées, élevées ou importantes pour aider à guider les critères de conception, tel que décrit dans la section 5.

Cependant, la portée, l'envergure, le niveau de détail et le niveau d'effort associés aux évaluations des risques peuvent varier, allant de haut niveau à détaillé, de national à local, de projets pluriannuels à des activités d'établissement de la portée de quelques mois, ou de se concentrer sur le risque lié aux actifs individuels à tenir compte des effets en cascade sur la société au sens large. Une pratique vraiment efficace de gestion des risques d'inondation tient compte des états, des processus et des interactions du système dans son ensemble, ainsi que des objectifs sociétaux généraux (Sayers et al., 2013). Quel que soit le niveau de détail, une évaluation des risques d'inondation est une analyse d'un système complexe, où la zone d'étude (bâtiment, actif d'infrastructure, quartier, ville, région) décrit le système et où les facteurs, tels que l'évolution des dangers, influencent les composants du système. Comme dans tout système complexe, il existe une multitude d'interactions entre les composantes du système, qui, si elles étaient décrites en détail, rendraient la tâche d'une analyse des risques un processus presque sans fin, et souvent, les données nécessaires à une telle analyse détaillée ne sont pas non plus disponibles. Il est donc nécessaire d'identifier un niveau d'analyse approprié pour chaque évaluation des risques d'inondation côtière qui peut traiter de manière adéquate les facteurs de risque, les tolérances et les objectifs prédéfinis (p. ex. tels qu'identifiés par les critères de conception).

Dans les sections suivantes, les facteurs influant sur les décisions concernant le niveau de détail approprié utilisé dans une analyse sont examinés. Différents niveaux d'analyse sont décrits et des conseils sur la sélection d'un niveau d'analyse approprié sont fournis.

### 7.1 Facteurs pertinents

Le niveau d'évaluation des risques nécessaire (ou réalisable dans la pratique) est déterminé par une série de facteurs sous-jacents, qui sont souvent apparents au début d'une évaluation des risques :

#### 1. Objectifs de l'étude (et phase de conception ciblée)

Tout d'abord, le niveau d'analyse nécessaire doit être éclairé par les critères de conception, qui définissent les besoins et les objectifs. Quelle est l'utilisation prévue de l'analyse? Sera-t-elle utilisée pour éclairer la planification de haut niveau, le choix de l'emplacement ou la conception détaillée des bâtiments ou de l'infrastructure? Plus précisément, quelle phase de conception (cadrage initial, étude de faisabilité, étude conceptuelle ou planification détaillée de la conception) est ciblée? Pour une première activité

d'établissement de la portée, une analyse superficielle pourrait suffire, tandis qu'une étude de faisabilité ou une conception détaillée nécessiterait une analyse plus approfondie.

## **2. Étendue spatiale de la zone d'étude**

L'étendue spatiale de la zone d'étude déterminera également le niveau de détail de l'analyse. Pour un grand tronçon côtier, il peut être plus difficile (et gourmand en ressources) de mener une analyse détaillée que de se concentrer sur un bâtiment ou un quartier individuel. Pour les grandes zones d'étude, il peut également être difficile d'obtenir des ensembles de données comparables dans toute la région, ce qui permet une évaluation cohérente. Bien que l'accent ou les objectifs puissent être d'évaluer les risques d'inondation côtière pour un bâtiment individuel ou un actif d'infrastructure, la nécessité d'envisager des processus à l'échelle du système peut dicter les exigences relatives à l'étendue spatiale de la zone d'étude. Cela peut être lié à la nécessité de prendre en compte les vulnérabilités et les interactions entre le bâtiment/l'actif et les systèmes communautaires/d'infrastructure plus larges, ou les besoins de caractériser correctement les processus du système naturel (p. ex. physique). Les exemples hypothétiques suivants illustrent l'importance d'une approche systémique pour déterminer l'étendue spatiale d'une étude :

- les risques d'inondation sur une route côtière ne sont pas seulement associés au potentiel de dommages directs et aux coûts de réparation associés - les risques associés à la perte de service (p. ex. la prévention des interventions d'urgence dans les collectivités voisines) doivent également être pris en compte et atténués de manière appropriée par la planification et la conception;
- les risques d'inondation côtière pour un bâtiment prévu à Saint John, au Nouveau-Brunswick, doivent tenir compte des marées locales, ainsi que des ondes de tempête et des vagues générées à l'intérieur et à l'extérieur de la baie de Fundy.

## **3. Criticité des bâtiments ou des infrastructures**

Pour les évaluations des risques soutenant la conception des bâtiments et des infrastructures, la criticité de l'actif est un facteur important ayant une incidence sur le niveau d'analyse requis. Différentes catégories de bâtiments ont été définies dans la section 5.3, où les bâtiments ou les infrastructures qui fournissent des services essentiels sont associés à des seuils de risque inférieurs à ceux des bâtiments résidentiels ou des structures temporaires. Pour la conception d'un actif essentiel (p. ex. une usine de traitement des eaux usées), une analyse des risques plus détaillée peut être nécessaire que pour un entrepôt ou même une maison unifamiliale. Si un actif essentiel est endommagé ou subit une perte de service lors d'une inondation, cela pourrait avoir des effets en cascade sur le quartier et les systèmes socio-économiques ou naturels plus larges, en particulier si le rétablissement prend du temps (des années).

## **4. Disponibilité des données**

La disponibilité des données existantes peut déterminer le niveau d'analyse des risques qui est possible, car il varie considérablement entre les territoires de compétence. Par exemple, certaines municipalités ont une cartographie des crues à jour qui est disponible gratuitement en ligne, tandis que d'autres territoires de compétence peuvent ne pas avoir de cartes des crues et nécessiter de nouvelles études de modélisation hydraulique. De même, la disponibilité des données sur l'exposition et la vulnérabilité peut varier considérablement d'un endroit à l'autre, où pour certains territoires de compétence, des levés détaillés sur les bâtiments sont disponibles et pour d'autres, ces données n'ont pas encore été recueillies. Les données du recensement, bien qu'elles fournissent des informations essentielles sur les caractéristiques de la population et soient simples à utiliser dans les centres de population dense, sont souvent difficiles à utiliser dans les zones rurales, où les aires de diffusion sont grandes et où seule une petite partie de l'aire de

diffusion peut être située à l'intérieur de la zone inondable. Les données du recensement sont également limitées sur les terres de réserve.

Dans la plupart des cas, des données supplémentaires devront être collectées (p. ex. levés des bâtiments, numérisation/catégorisation des empreintes de bâtiments à partir d'images), modélisées ou supposées en fonction des études d'exécution ou des inventaires pour d'autres emplacements.

Cependant, chacune de ces étapes supplémentaires nécessitera des ressources financières et techniques supplémentaires. La qualité et la spécificité des données disponibles peuvent avoir une incidence importante sur les niveaux d'incertitude pour l'analyse (p. ex. lors de l'utilisation de courbes profondeur-dommages basées sur l'inventaire provenant de régions où les types de bâtiments sont très différents des types de bâtiments de la zone d'étude).

## **5. Capacité en matière de ressources**

L'une des principales limites de l'étendue des évaluations des risques sont les contraintes financières et temporelles, ainsi que la capacité technique et l'expertise disponibles pour mener une évaluation des risques. Cela est particulièrement difficile pour les zones reculées, où les capacités financières et de ressources sont souvent beaucoup plus limitées que dans les villes bien équipées.

## **7.2 Niveaux et dimensions de l'analyse**

L'analyse peut aller de l'analyse qualitative à l'analyse quantitative, peut prendre en compte un ou plusieurs scénarios de danger, et peut traiter uniquement du risque actuel ou des facteurs dynamiques ayant une incidence sur le risque. Le niveau de détail peut varier à chaque étape de l'évaluation des risques. Ces différents niveaux d'analyse sont décrits dans les sections suivantes.

### **7.2.1 Analyse quantitative (en comparaison avec l'analyse qualitative)**

L'évaluation des risques peut être quantitative ou qualitative ou se situer quelque part entre les deux. Par exemple, l'évaluation tous risques nationale est un outil qualitatif qui peut aider à identifier, analyser et prioriser une gamme complète de menaces potentielles (Sécurité publique Canada, 2012). Ce type d'outil peut être relativement simple à développer pour les exercices de priorisation. Cependant, pour prendre des décisions visant à réduire les risques au niveau local, en particulier pour soutenir la conception des bâtiments et des infrastructures, il faut une méthodologie plus robuste - idéalement une évaluation quantitative des risques haute fidélité. Une évaluation quantitative des risques est une évaluation qui utilise des informations mesurables et objectives sur les dangers, la vulnérabilité et la probabilité pour calculer les risques et les pertes. La quantification du risque, bien que parfois lourde, fournit des informations précieuses pour la réduction des risques grâce à la fourniture de données pour la planification, la prise de décision et la conception.

Bien que les mesures quantitatives soient généralement considérées comme plus robustes, il n'est pas toujours possible de trouver les données appropriées sur les dangers, l'exposition et la vulnérabilité pour soutenir ce type d'évaluation. Cela peut être dû au fait que les données ou méthodes n'existent tout simplement pas ou n'ont pas été collectées, ou parce que les méthodes quantitatives ne sont pas appropriées pour mesurer les impacts intangibles du risque. Dans ce cas, plutôt que d'ignorer le risque parce qu'il est trop difficile à calculer, des mesures qualitatives - en particulier en sollicitant l'avis d'experts et la contribution des intervenants - peuvent être appropriées. Solliciter l'avis d'experts est utilisé couramment pour l'évaluation des dangers naturels et des risques climatiques en raison de la complexité

du problème. Autrement, une approche mixte, où des données quantifiables sont utilisées en combinaison avec l'opinion d'experts, peut être adoptée, comme dans le cas du profil de risques national du Canada.

### **7.2.2 Approche à scénario unique ou approche à scénarios multiples**

Dans une évaluation des risques, des scénarios à risque unique ou à risques multiples peuvent être envisagés. Si une seule probabilité, par exemple, un événement ayant une PDA de 0,5 %, est utilisée pour calculer les dommages et les pertes, on appelle cela une approche à scénario unique. Il s'agit du type d'évaluation des risques le plus couramment réalisé au Canada, car il est relativement simple et ne nécessite qu'un seul scénario de danger pour être calculé et cartographié. Les scénarios uniques sont couramment utilisés pour la planification des interventions d'urgence, où un grand scénario maximum probable éclaire les exercices en supposant qu'un plan pour un événement catastrophique sera également valable pour des événements plus petits. Des scénarios uniques ont également été traditionnellement utilisés pour appuyer les décisions d'atténuation des risques, car cette approche simple basée sur des normes est relativement simple à calculer.

En revanche, une évaluation à scénarios multiples (ou probabiliste) est une évaluation qui prend en compte une gamme de scénarios de danger et de conséquences potentielles de dommages. L'aire sous une courbe (avec la probabilité et la conséquence comme axes) est intégrée pour donner une image complète du risque (contrairement au point unique qui peut être obtenu à partir d'une approche à scénario unique). Bien qu'elle soit couramment utilisée dans de nombreux autres pays développés, l'approche à scénarios multiples est rarement utilisée au Canada à l'heure actuelle, mais elle est considérée comme une pratique exemplaire, car elle permet de comprendre les impacts potentiels des petites inondations fréquentes et des grosses inondations peu fréquentes. Les évaluations à scénarios multiples peuvent exiger des ressources importantes, mais les progrès technologiques et les méthodes novatrices réduisent le niveau d'effort requis pour les mener.

Les approches à scénario unique sont les plus couramment utilisées au Canada, principalement en raison du niveau d'effort relativement faible requis. Cependant, comme indiqué dans la section 5.3, les approches basées sur un scénario unique ou basées sur des normes n'ont pas la flexibilité nécessaire pour faire face à la nature dynamique des risques d'inondation côtière dans un climat changeant, et peuvent créer des obstacles à l'adaptation et perpétuer de fausses perceptions du risque - lesquelles peuvent toutes mener à de mauvaises pratiques pour la prise de décision et la conception. Les approches à scénarios multiples sont de plus en plus reconnues comme essentielles pour réduire les risques d'inondation et autres risques naturels au Canada, et sont généralement considérées comme des pratiques exemplaires. Cela est d'autant plus vrai que les changements climatiques influent sur les profils de risque et que certaines inondations plus petites et moyennes deviennent fréquentes ou que les inondations nuisibles se transforment en inondations chroniques. L'approche d'analyse adoptée influe sur la gestion des crues et les décisions de conception, et il est donc important de choisir une approche appropriée compte tenu des ressources, des données et du temps disponibles. En particulier pour les actifs d'infrastructures essentielles dont la durée de vie des services dépasse 50 ans et qui nécessitent d'importants investissements en capital, les avantages d'une analyse plus détaillée et multi-scénarios peuvent l'emporter largement sur les coûts et les besoins en ressources.

### **7.2.3 Prise en compte du risque comme concept dynamique**

Le risque d'inondation n'est pas statique. Les variables qui forment le risque (c'est-à-dire la probabilité et la gravité du danger, l'exposition et la vulnérabilité) sont toutes susceptibles de changer avec le temps (GFDRR, 2016). Ces changements résultent à la fois de problèmes mondiaux, tels que les changements climatiques, qui peuvent avoir un impact sur les profils de risques locaux, et de problèmes locaux, tels que

les décisions d'utilisation des terres et les changements d'utilisation des terres, qui peuvent avoir une incidence sur l'exposition et la vulnérabilité. Par exemple, le niveau local de la mer devrait continuer à augmenter sur une grande partie des côtes peuplées du Canada, et les changements climatiques pourraient également influencer sur la probabilité d'occurrence de tempêtes, ce qui entraînera un risque d'inondation accru (voir également la section 6.8). Le changement d'utilisation des terres (comme l'augmentation du nombre de surfaces imperméables grâce à l'urbanisation) pourrait également accroître les risques d'inondation. Le risque peut également changer en augmentant l'exposition, par exemple en permettant un développement accru dans les zones à risque, ou par la croissance démographique dans les villes côtières. Cependant, même avec une probabilité de danger croissante, il est possible de maintenir ou de réduire le risque. Cela peut se faire avant tout en réduisant les conséquences du danger, soit en modifiant l'exposition ou la vulnérabilité des actifs, et en rendant le système globalement plus résilient face au danger naturel.

Ainsi, dans toute évaluation des risques d'inondation côtière, les aspects dynamiques du risque doivent être pris en compte. La mesure dans laquelle le risque dynamique est pris en compte dépend quelque peu du niveau d'analyse. Cependant, même dans une évaluation des risques simplifiée ou de haut niveau, il est essentiel que des scénarios de stress liés aux changements climatiques simples (p. ex. un scénario climatique probable de meilleure estimation) soient inclus. Sinon, des changements importants de risque pourraient être manqués. Ceci est particulièrement important pour les bâtiments ou les infrastructures à longue durée de vie, alors que pour les structures temporaires à courte durée de vie, cela peut ne pas être essentiel. À tout le moins, il est important de prendre en compte différentes tendances futures (changements climatiques, croissance démographique, changement d'affectation des terres, etc.) et d'évaluer ces tendances par rapport à la durée de vie prévue d'un projet de bâtiment ou d'infrastructure.

#### **7.2.4 Risque lié aux actifs ou risque systémique**

Une évaluation des risques pour soutenir la conception des bâtiments et des infrastructures peut simplement se concentrer sur les risques pour l'actif spécifique, ou explorer le risque systémique plus large de défaillance des bâtiments/infrastructures. Le risque lié aux actifs se concentre sur les bâtiments et les infrastructures individuels et traite des dommages et des défaillances graves d'un seul actif d'infrastructure (p. ex. un poste électrique ou un bâtiment commercial inondé), contrairement au risque systémique plus large qui se répercute sur différents secteurs (p. ex. partie d'une ville sans électricité pendant un certain temps et ses conséquences). Le premier est un concept relativement simple où le risque lié aux actifs (ou aux objets) est défini comme un actif d'infrastructure individuel subissant l'impact négatif d'un danger. Le risque systémique est une affaire beaucoup plus complexe et peut, du moins en théorie, être étendu à l'infini. Par exemple, cela pourrait inclure les effets en cascade d'un point de défaillance unique dans un système électrique vers le réseau électrique plus large. Cela pourrait ensuite être pris en compte dans le contexte des interdépendances avec d'autres infrastructures essentielles (p. ex. les usines de traitement de l'eau, les télécommunications), puis plus loin dans le contexte des impacts sociétaux et économiques plus larges. Le risque systémique et la résilience devraient toujours être le but ultime. Cependant, une compréhension du risque lié aux actifs est nécessaire pour alimenter le contexte plus large du risque systémique, et souvent le risque lié aux actifs constitue la première étape d'une évaluation des risques et d'une conception visant à réduire le risque.

#### **7.2.5 Niveaux d'analyse dans les étapes du processus d'évaluation des risques**

Pour chaque étape du processus d'évaluation des risques, il peut y avoir une gamme de niveaux d'analyse (de haut niveau à détaillée), avec une gamme de complexité et de sophistication associées. Par exemple, les évaluations des risques d'inondation peuvent inclure des scénarios uniques ou multiples, aborder uniquement le présent ou inclure des scénarios de changements climatiques, et la qualité de la

cartographie des inondations peut également varier considérablement (modélisation hydraulique ou inondation approximative, ainsi que l'âge des cartes d'inondation). De même, l'évaluation des conséquences peut varier, y compris uniquement les données d'exposition de haut niveau ou en utilisant des évaluations détaillées de la vulnérabilité. Les évaluations des risques peuvent ainsi aller de simples exercices d'établissement de la portée à des analyses approximatives et axées sur l'exposition, à des analyses de vulnérabilité-conséquence-risque entièrement détaillées pour plusieurs scénarios de danger qui traitent à la fois du risque lié aux actifs et du risque systémique. Dans une analyse axée sur l'exposition, seule la présence du bâtiment ou de l'infrastructure dans la zone de risque d'inondation est prise en compte, mais aucune donnée sur la vulnérabilité du bâtiment n'est incluse, ni les conséquences monétaires. En revanche, une évaluation détaillée des risques comprendrait le calcul des conséquences monétaires (p. ex. via des courbes profondeur-dommages) et la prise en compte de plusieurs catégories d'indicateurs et de scénarios de changement futur.

### 7.3 Sélection d'un niveau d'analyse

Le niveau d'analyse adopté pour une évaluation des risques d'inondation côtière destinée à soutenir la conception des bâtiments ou des infrastructures doit concorder avec les objectifs de conception généraux et les critères de conception, y compris les tolérances aux risques identifiées (voir la section 5). Par exemple, le concepteur/constructeur ou l'acheteur d'une maison unifamiliale peut avoir besoin de connaître la probabilité et le coût des dommages et des pertes pour le bâtiment individuel, afin d'éclairer les décisions liées à la conception pour la résilience, les assurances ou le besoin de modernisation. À l'autre extrémité du spectre, les gouvernements peuvent avoir besoin d'informations pour les aider à prioriser les investissements pour développer, maintenir et adapter des portefeuilles entiers d'actifs d'infrastructure, de systèmes interconnectés et de collectivités. Chacun de ces intervenants aura besoin d'informations différentes et de méthodologies différentes pour l'évaluation des risques d'inondation.

Le Tableau 5 donne un aperçu des différents niveaux d'évaluation des risques et de leurs utilisations potentielles. Notamment, une évaluation des risques est généralement un processus par étapes. Tout d'abord, une analyse d'établissement de la portée de haut niveau est menée qui permet de hiérarchiser les dangers et l'exposition. Pour les sites présentant un risque (initial) élevé, davantage de données sont ensuite collectées, ce qui permet par conséquent une évaluation des risques plus détaillée. La nature progressive des évaluations des risques est illustrée dans le Tableau 5 au fur et à mesure que le niveau de détail progresse de l'étape 1 (établissement de la portée initial) à l'étape 2 (évaluation des risques de haut niveau) et à l'étape 3 (évaluation détaillée des risques axée sur le risque lié aux actifs), puis à l'étape 4 (évaluation détaillée des risques qui explore les impacts en cascade sur la société au sens large, c'est-à-dire le risque systémique). Le niveau de détail de l'analyse diffère selon les critères et les objectifs de conception, et la phase de conception du bâtiment/de l'infrastructure visée par l'analyse des risques. La criticité du bâtiment/de l'infrastructure joue également un rôle important, tout comme l'échelle spatiale de la zone d'étude. L'approche d'analyse choisie (évaluation des dangers, de l'exposition, de la vulnérabilité, des conséquences et des risques) et l'étendue de la mobilisation des intervenants varieront alors en fonction de ces facteurs, comme indiqué dans le Tableau 5.

Étant donné qu'une évaluation des risques peut devenir très complexe et demander beaucoup de temps et de ressources, une approche par étapes est recommandée. Un examen approfondi des dangers et de l'exposition peut permettre une évaluation détaillée des risques plus ciblée. La criticité d'un bâtiment, où les conséquences d'une défaillance due aux inondations (ou aux tsunamis) pourraient être particulièrement dommageables pour les personnes et l'environnement naturel, joue également un rôle clé dans la détermination du niveau d'analyse nécessaire.

Tableau 5. Vue d'ensemble des différents niveaux d'analyse. Basé sur Lyle et Hund (2017) et l'Australian Institute for Disaster Resilience (2015).

Objet	Criticité* et phase de conception	Échelle spatiale de l'étude	Approche de l'analyse	Participation des intervenants et du public	Exigences en matière de données
<b>1. Orientation initiale</b>					
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dépister rapidement les risques</li> <li>- Hiérarchiser les dangers/expositions pour une évaluation détaillée</li> <li>- Déterminer la méthode d'analyse pour l'étape suivante</li> <li>- L'accent est mis sur le risque lié aux actifs</li> <li>- Planification des infrastructures à l'échelle nationale</li> </ul>	<p><b>Criticité :</b> Tous les types de bâtiments (Catégories 1 à 4)</p> <p><b>Phase de conception</b> Première évaluation</p>	<p><b>Étendue spatiale :</b> National, provincial/territorial, régional</p> <p><b>Résolution spatiale :</b> Aspatial à faible</p>	Dépistage de haut niveau, qualitatif à semi-quantitatif	Rester informé du processus	<p><b>Danger :</b> Identification de haut niveau des inondations, cartes des inondations existantes et/ou cartes des tsunamis, tendances de haut niveau des changements climatiques</p> <p><b>Exposition :</b> Données à l'échelle régionale, tenir compte des changements d'utilisation des terres de haut niveau et des tendances de croissance démographique</p> <p><b>Vulnérabilité/conséquences :</b> N'est souvent pas pris en compte à ce stade; méthodes empiriques de haut niveau sur les pertes ou matrices qualitatives</p> <p><b>Risque :</b> Produit de l'échelle de probabilité et de l'échelle d'exposition/de conséquence</p>
<b>2. Évaluation des risques à un haut niveau</b>					
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour hiérarchiser davantage l'analyse des dangers/de l'exposition et mettre en évidence les principaux domaines de préoccupation</li> <li>- L'accent est mis sur le risque lié aux actifs</li> <li>- Planification et hiérarchisation des infrastructures provinciales/territoriales, régionales (locales)</li> </ul>	<p><b>Criticité :</b> La plupart des types de bâtiments (catégories 1 et 2)</p> <p><b>Phase de conception</b> Étude de faisabilité</p>	<p><b>Étendue spatiale :</b> Provincial/territorial, régional (local), tronçon côtier</p> <p><b>Résolution spatiale :</b> Faible à élevée</p>	Se concentrer sur l'analyse de l'exposition (que contient la zone de risque d'inondation?) et l'évaluation de la vulnérabilité de haut niveau; approche qualitative à (semi-) quantitative; scénarios simples à multiples; scénarios de changements climatiques simplifiés; tenir compte des changements d'utilisation des terres et des tendances de croissance démographique.	Éclairer ou consulter au sujet du processus	<p><b>Danger :</b> Cartographie des crues de haut niveau, cartes des crues et/ou des tsunamis existantes, élévation du niveau de la mer (approche d'inondation, pas de modélisation hydraulique supplémentaire), tendances de haut niveau des changements climatiques</p> <p><b>Exposition :</b> Données régionales au niveau des quartiers, catégories d'indicateurs multiples avec des approximations simplifiées, changement de haut niveau de l'utilisation des terres et tendances de la croissance démographique</p> <p><b>Vulnérabilité :</b> Informations génériques sur la vulnérabilité des bâtiments/infrastructures</p> <p><b>Conséquences :</b> Courbes profondeur-dommages génériques ou synthétiques; méthodes empiriques de haut niveau sur les pertes, ou matrices qualitatives, impacts directs/indirects</p> <p><b>Risque :</b> Produit de l'échelle de probabilité et de l'échelle d'exposition/des conséquences</p>
<b>3. Évaluation détaillée des risques (risque lié aux actifs)</b>					
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planification des infrastructures du gouvernement local</li> <li>- Prise de décision et conception d'atténuation des risques</li> <li>- L'accent est mis sur le risque lié aux actifs</li> </ul>	<p><b>Criticité</b> La plupart des types de bâtiments (catégorie 2), et en particulier les bâtiments essentiels (catégories 3 et 4)</p> <p><b>Phase de conception</b> Étude conceptuelle à la conception détaillée</p>	<p><b>Étendue spatiale :</b> Locale (petit tronçon côtier au bâtiment/actif individuel)</p> <p><b>Résolution spatiale :</b> Élevée</p>	Évaluation détaillée des risques complète, quantitative, des risques pour plusieurs catégories d'indicateurs et y compris les changements climatiques et le changement d'utilisation des terres	Consulter et faire contribuer les participants pour éclairer les conséquences immatérielles en particulier	<p><b>Danger :</b> Cartographie détaillée des crues au niveau local (modélisation hydraulique) et/ou cartographie détaillée des tsunamis (modélisation hydrodynamique), multiples probabilités de dépassement annuelles, multiples scénarios de changements climatiques et horizons temporels</p> <p><b>Exposition :</b> Données locales au niveau de la parcelle, cartographie de l'exposition, incluant les connaissances d'experts, plusieurs catégories d'indicateurs avec plusieurs d'estimations; tenir compte des changements d'utilisation des terres et des tendances de croissance démographique</p> <p><b>Vulnérabilité :</b> Informations sur la vulnérabilité des bâtiments/infrastructures individuelles</p> <p><b>Conséquences :</b> Courbes profondeur-dommages pertinentes et à jour, prise en compte des impacts directs/indirects et des aspects tangibles/intangibles</p> <p><b>Risque :</b> Approche d'évaluation des risques à scénarios multiples/probabilistes et calcul des pertes moyennes annuelles; produit de l'échelle de probabilité et de l'échelle des conséquences</p>

Objet	Criticité* et phase de conception	Échelle spatiale de l'étude	Approche de l'analyse	Participation des intervenants et du public	Exigences en matière de données
<b>4. Évaluation détaillée des risques (risque systémique)</b>					
<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'accent est mis sur le risque systémique</li> <li>- Planification du gouvernement local à national</li> <li>- Prise de décision et conception d'atténuation des risques</li> <li>- Planification d'urgence</li> </ul>	<p><b>Criticité :</b> Bâtiments/infrastructures essentielles (catégories 3 à 4)</p> <p><b>Phase de conception :</b> Conception détaillée (en particulier pour les infrastructures essentielles)</p>	<p><b>Étendue spatiale :</b> Local (peut inclure des conséquences régionales à nationales)</p> <p>Bâtiment individuel (petit tronçon côtier)</p> <p><b>Résolution spatiale :</b> Élevée</p>	<p>Évaluation des risques systémiques (à l'échelle de la société), qualitatifs et quantitatifs, matrices de risque pour plusieurs catégories d'indicateurs et tenant compte des changements climatiques</p>	<p>Consulter et inviter les participants à contribuer afin d'éclairer les conséquences immatérielles pour la société au sens large</p>	<p><b>Danger :</b> Cartographie détaillée des crues au niveau local (modélisation hydraulique) ou cartographie détaillée des tsunamis (modélisation hydrodynamique), multiples scénarios de changements climatiques et horizons temporels</p> <p><b>Exposition :</b> Empreintes de bâtiments au niveau de la parcelle, cartographie de l'exposition incluant les connaissances d'experts, plusieurs catégories d'indicateurs avec plusieurs approximations</p> <p><b>Vulnérabilité :</b> Informations sur la vulnérabilité des bâtiments/infrastructures individuelles</p> <p><b>Conséquences :</b> Courbes profondeur-dommages pertinentes et à jour, prise en compte des répercussions directes/indirectes et des aspects tangibles/intangibles, en tenant compte des répercussions en cascade pour la société au sens large</p> <p><b>Risque :</b> Produit de l'échelle de probabilité et de l'échelle des conséquences pour la société au sens large</p>

\*Nota : Pour les catégories de criticité des bâtiments et des infrastructures, se reporter au tableau 3 de la section 5.3.3.

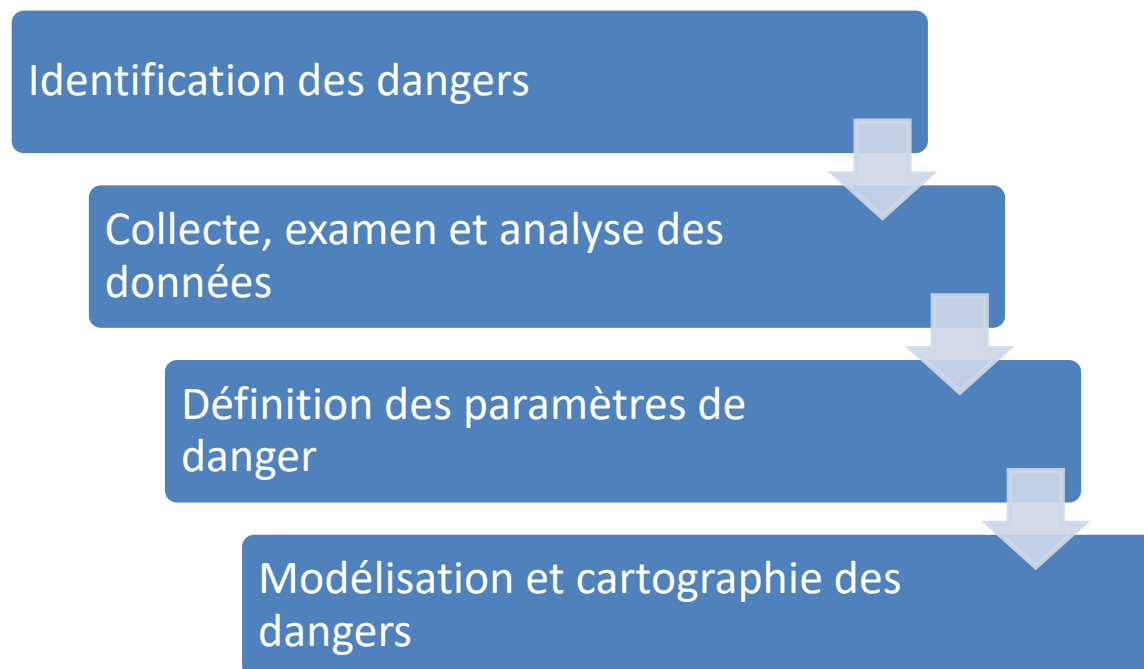
## 8 Évaluation du danger

Cette section donne un aperçu des risques d'inondation côtière et décrit un cadre d'évaluation des risques d'inondation côtière pour les sites d'immeubles et d'infrastructures existants ou proposés.

L'évaluation des risques d'inondation côtière nécessite la caractérisation et la compréhension des probabilités de divers événements générateurs d'inondations susceptibles de se produire, ainsi que leur intensité (qui peut varier dans le temps et dans l'espace). Bien que le concepteur d'un bâtiment ou d'un actif d'infrastructure puisse au départ se préoccuper uniquement des paramètres de danger sur le site proposé (p. ex. les profondeurs, les vitesses ou les hauteurs des vagues de pointe pour des PDA données), une évaluation spatiale plus large des dangers est généralement requise pour évaluer les répercussions éventuelles sur les zones environnantes ou les interdépendances des risques. Par conséquent, le processus d'évaluation des dangers requiert généralement la production de cartes de risques comme résultats. À ce titre, les méthodes et techniques de délimitation et de cartographie des risques d'inondation décrites par RNCan (2019) peuvent fournir des conseils utiles.

### 8.1 Cadre et considérations générales

Un cadre général pour l'évaluation des risques d'inondation côtière est fourni dans le Figure 1 (section 1.2) du présent rapport, et comprend une étape d'« évaluation des risques ». Un processus suggéré en quatre étapes pour cette composante d'évaluation des dangers est présenté dans la Figure 15.



**Figure 15. Cadre d'évaluation des risques d'inondation côtière pour la conception des bâtiments et des infrastructures.**

Comme indiqué dans la section 7 (Sélection des niveaux d'analyse appropriés), les évaluations des risques d'inondation côtière peuvent varier en termes de niveau de détail et de complexité, allant des grandes études d'établissement de la portée qualitatives ou semi-quantitatives jusqu'aux analyses détaillées au niveau des composants ou systématiques. La portée des évaluations des risques d'inondation côtière peut également varier en fonction des échelles spatiales et temporelles d'intérêt et des caractéristiques définissant le système naturel ou les systèmes d'infrastructure.

À l'échelle régionale, les risques d'inondation côtière sont généralement évalués sans considération détaillée des interactions avec les structures (p. ex. les ouvrages de protection longitudinaux, les cloisons, les revêtements) ou les composants individuels de l'infrastructure. Ce type d'analyse régionale est essentiel pour capturer les processus générateurs des risques d'inondation côtière qui peuvent agir à de grandes échelles spatiales, et pour garantir une approche systémique qui capture tous les processus physiques importants (voir la discussion des approches systémiques dans la section 4). Les évaluations régionales des risques peuvent également servir de base à la planification régionale de l'utilisation des terres et à la gestion stratégique du littoral. Une telle analyse évaluera généralement l'étendue horizontale de l'inondation et la portée horizontale et verticale de l'action des vagues. L'analyse est utilisée pour évaluer l'étendue et la gravité de l'exposition au danger et les limites de sécurité pour un ou plusieurs niveaux de risque donnés (cartographie des inondations). Une analyse des dangers plus détaillée est généralement entreprise lors de l'examen des risques pour des propriétés et/ou des structures spécifiques (phase de conception technique). Dans ces cas, les processus agissant à des échelles spatiales plus petites, telles que l'interaction vague-structure, deviennent importants et une analyse plus détaillée est requise.

Le passage à une approche basée sur les risques pour les risques d'inondation côtière (tel que recommandé dans la section 5.3) ajoute une dimension supplémentaire à l'analyse des risques. Plutôt que d'examiner une seule PDA d'inondation, comme cela a été traditionnellement l'approche de l'évaluation des dangers pour la planification et la réglementation de l'utilisation des terres au Canada, l'analyse est élargie pour prendre en compte une gamme d'événements de danger possibles. Cela augmente le nombre de scénarios générateurs d'inondations possibles (p. ex. des combinaisons de conditions possibles de marée, d'onde de tempête et de vagues) qui doivent être pris en compte. Bien que divers facteurs puissent influencer les décisions sur les scénarios générateurs d'inondations à prendre en compte pour une ERIC (section 7.2.2), une bonne gamme de scénarios avec des probabilités allant de très probable à très rare devrait être incluse. Trop peu de scénarios peuvent conduire à une mauvaise compréhension du risque (Ward et al., 2011).

## 8.2 Identification des dangers

La première étape du processus d'évaluation des risques d'inondation côtière consiste à identifier la nature des risques d'inondation côtière aux échelles régionales ou locales pertinentes. Cela requiert de comprendre les caractéristiques du système naturel et les processus moteurs (c'est-à-dire les sources de danger) et les mécanismes qui peuvent conduire à des risques d'inondation côtière (voies). Le modèle source-voie-récepteur-conséquence fournit un cadre conceptuel pour comprendre le risque des risques d'inondation (Reeve et al., 2012; Narayan et al., 2012), identifiant les composants à risque ainsi que les liens entre divers composants d'infrastructure, en particulier les mesures de contrôle d'inondation. Pour les évaluations régionales des dangers, le danger est généralement évalué indépendamment du récepteur, ce qui peut être une méthode utile pour l'identification préliminaire des dangers. Il est important de tenir compte de la façon dont le bâtiment ou l'actif d'infrastructure interagit avec le danger, à la fois en ce qui a trait aux répercussions du danger sur l'actif (section 9) et aux répercussions de l'actif sur le danger. Par exemple, l'interaction vague-structure et la forme et la texture de l'infrastructure côtière (p. ex. ouvrages de protection

longitudinaux, jetées, bâtiments individuels) peuvent grandement influencer la portée et l'intensité des contributions liées aux vagues aux risques d'inondation côtière.

### 8.2.1 Sources

Pour évaluer les risques d'inondation côtière, une compréhension claire des processus qui contribuent à ces risques (c'est-à-dire les sources) est nécessaire. Les principales sources de risques d'inondation côtière comprennent :

- les niveaux d'eau;
- les vagues;
- les tsunamis;

Ces sources peuvent agir seules ou en combinaison pour générer des inondations côtières. Un élément clé d'une évaluation des dangers côtiers est de définir l'intensité et la probabilité d'occurrence attendues de chacun de ces dangers, ainsi que d'examiner leurs interactions (section 8.3). L'analyse de probabilité conjointe est un aspect clé de la compréhension de la probabilité combinée d'occurrence de combinaisons de niveaux d'eau, de vents et de vagues.

Les contributions aux niveaux d'eau côtiers comprennent les niveaux d'eau moyens, les effets de l'élévation relative du niveau de la mer, les marées, les effets atmosphériques (pression barométrique, topographie dynamique de la surface de la mer, onde de tempête) et les effets des vagues (zone de déferlement et de remontée de la vague). La zone de déferlement des vagues, la remontée de la vague, les impacts et le débordement des défenses côtières (Figure 16 à la Figure 18) sont fortement influencés par la géométrie du rivage, qui peut être dynamique en réponse à l'état des marées, des vagues et du niveau de l'eau.



**Figure 16. Vagues de tempête débordant de la route en remblai à Cow Bay, Halifax, Nouvelle-Écosse (photo : M. Davies).**



Figure 17. Impact, remontée et débordement de la vague à Stoney Creek, lac Ontario (photo : M. Davies).



**Figure 18. Vagues frappant l'ouvrage de protection longitudinal sur la plage d'Ambleside à West Vancouver à marée haute, inondant le parc John Lawson local, le 17 décembre 2012 (photo : Mark Van Manen/PNG).**

Au moment de commencer à identifier les sources potentielles de risques d'inondation côtière, il est utile de prendre en compte le rôle de la météorologie des tempêtes régionales dans la conduite ou la contribution à des niveaux d'eau extrêmement élevés (p. ex. vents), l'érosion (souvent provoquée par des vagues extrêmes et des courants provoqués par les tempêtes), et même des tsunamis (c'est-à-dire des météotsunamis).

Atkinson et al. (2016) donne une description de la climatologie des tempêtes sur les côtes marines du Canada dont voici le résumé.

La côte pacifique canadienne n'est pas touchée par les cyclones tropicaux (typhons ou ouragans). Les tempêtes consistent généralement en des cyclones extra-tropicaux qui prennent naissance au-dessus de l'océan et se déplacent sous l'influence du courant-jet vers la côte pacifique du Canada, apportant une humidité importante dans la région. Comme indiqué par Atkinson et al. (2016), des systèmes de tempêtes secondaires sont parfois générés là où les fronts chauds et froids se rencontrent, et « ... peuvent apporter des vents forts et de fortes précipitations sur l'île Vancouver et la côte sud de la Colombie-Britannique ».

Sur la côte atlantique du Canada, les vents dominants en altitude de l'ouest et du sud-ouest entraînent des systèmes de tempêtes continentales dans la région au printemps et en hiver. Les tempêtes qui se forment sur la côte est des États-Unis se déplacent vers le nord-est et « ... pénètrent dans l'est du Canada 36 à 48 heures après la formation initiale » (Atkinson et al., 2016). Les plus puissants de ces systèmes sont généralement appelés « tempêtes du nord-est ». Comme indiqué par Atkinson et al. (2016), « En règle générale, les ouragans ne frappent pas directement l'est du Canada, mais l'ouragan Juan en

septembre 2003 fut une exception notable ». Les ouragans ont tendance à rencontrer les États-Unis continentaux au sud, où ils s'affaiblissent, se transformant de cyclones tropicaux en cyclones extra-tropicaux. Cependant, ils demeurent des tempêtes très importantes et intenses et peuvent continuer sur une trajectoire nord-est vers l'est du Canada. En raison de leur grande étendue spatiale, ces tempêtes tropicales et extra-tropicales peuvent avoir des impacts importants sur de grandes régions « ... et être presque aussi dommageables que les ouragans » (Atkinson et al., 2016).

Voici les deux trajectoires de tempête les plus importantes dans l'Arctique canadien (Atkinson et al., 2016) : (i) de l'est, dans la baie de Baffin par la mer du Labrador et le détroit de Davis; (ii) de l'ouest dans la mer de Beaufort et le golfe d'Amundsen, touchant l'archipel ouest et la côte continentale du Yukon, des Territoires du Nord-Ouest et de l'ouest du Nunavut. L'état de la glace de mer influence considérablement la génération et la propagation des tempêtes. Comme discuté par Atkinson et al. (2016), « ... les vastes étendues d'eau libre que l'on trouve actuellement dans l'océan Arctique et les mers marginales peuvent fournir les gradients thermiques nécessaires pour provoquer de puissantes tempêtes de grande étendue aréale ». La bathymétrie et la topographie peu profondes et en pente douce de l'est de la mer de Beaufort et du delta du fleuve Mackenzie influencent également la propagation des ondes de tempête.

À part la côte du Pacifique, la couverture de glace est un facteur majeur dans les conditions côtières sublittorales de la plupart des eaux canadiennes. L'apparition de la glace hivernale réduit généralement les fetchs disponible en mer libre pour la génération de vagues de vent et la banquise côtière dissipe l'énergie des vagues et tend à protéger le rivage de l'action des vagues. Une vaste couverture de glace de mer ou de lac peut également atténuer les ondes de tempête (Provan et al., sous presse; Kim et al., sous presse). La glace hivernale comporte cependant son propre ensemble de dangers naturels, y compris ceux associés à l'interaction du transport glaciaire et des ondes glaciaires avec les structures côtières et sublittorales.

## 8.2.2 Voies d'accès

Pour qu'il y ait des risques d'inondation côtière, il doit y avoir une voie d'accès qui relie le danger à un récepteur vulnérable (p. ex. l'infrastructure, les biens, les personnes, les biens culturels et l'environnement).

Il existe de nombreuses voies d'accès sources-récepteurs potentielles pour les inondations côtières. Voici les quatre voies d'accès principales :

- **Inondation directe** : Le niveau de la mer dépasse l'élévation de la terre (Figure 19). Cela se produit généralement dans les basses plaines côtières et dans les zones estuariennes, et peut se produire là où une barrière naturelle ou construite fait défaut.
- **Érosion** : Dans certains environnements côtiers, la réaction du littoral ou des structures riveraines aux processus d'érosion en cours et liés aux tempêtes peut conduire directement à des inondations. Cela comprend la rupture de barrière, dans laquelle les écoulements entraînés par les vagues, les impacts des vagues et la charge hydrostatique peuvent provoquer la rupture d'une barrière côtière, ce qui permet une inondation intérieure. Dans certaines parties du nord du Canada (comme sur la côte de la mer de Beaufort), le dégel du pergélisol et l'élévation du niveau de la mer accélèrent l'érosion (CSA W205), créant de nouvelles voies d'accès pour les inondations côtières.
- **Débordement de la barrière** : Les niveaux d'eau moyens restent en dessous de la barrière côtière (qui peut être naturelle ou artificielle) et le débordement se produit lorsque la remontée de la vague dépasse la crête de la barrière, permettant à l'eau de s'écouler au-dessus de la barrière, inondant la terre derrière celle-ci.
- **Contournement de la barrière** : Les eaux de crue contournent généralement les défenses côtières et les barrières de dunes en exploitant des goulets de marée ou des chenaux de débordement, ou en contournant les extrémités des systèmes de dunes/de défense.



Figure 19. Inondation directe à North Rustico, Île-du-Prince-Édouard (photo : D. Jardine).

### 8.3 Définition des paramètres de danger

Les paramètres et les variables de danger doivent être identifiés pour guider les résultats de l'évaluation des dangers. Ces paramètres et variables dépendront des critères de conception (y compris les besoins identifiés par les intervenants, les partenaires et le public - sections 4 et 5), du niveau d'analyse (section 7), de la disponibilité des données (section 6) et de la nature des sources et voies d'accès de danger potentielles (section 8.2). Les paramètres et les variables de risque devraient inclure des délais (p. ex. pour l'élévation projetée du niveau de la mer), des probabilités (PDA) et des indicateurs d'intensité. Les mesures d'intensité des risques d'inondation côtière peuvent inclure les profondeurs de l'eau, les vitesses, les conditions des vagues (hauteurs, périodes, directions, jets de rive), la durée des inondations, les quantités de débris et les vitesses d'écoulement. Pour les applications de conception de bâtiments et d'infrastructures, les charges hydrostatiques peuvent être calculées à partir de la seule profondeur de l'eau. Cependant, des informations supplémentaires sur les vitesses d'écoulement, les vagues ou les débris peuvent être requises pour décrire de manière adéquate les charges dynamiques ou le potentiel d'érosion/d'affouillement, qui sont généralement une considération dans les contextes côtiers.

## 8.4 Modélisation et analyse des dangers

Afin d'évaluer les risques d'inondation côtière sur un site donné, les questions suivantes sont généralement posées :

- **Quelles sont les conditions météorologiques et océanographiques (« météocéan ») sur le site et dans les environs?**

Répondre à cette question requiert généralement une évaluation des conditions météorologiques (vents, pression barométrique, température) et des conditions océanographiques/limnologiques (niveaux d'eau, courants, vagues, couverture de glace et mouvement des glaces). Les sources de données comprennent les stations météorologiques locales, les ensembles de données climatiques régionales et les prévisions a posteriori régionales (section 6). La première étape consiste généralement à définir les conditions de « champ lointain » à partir des sources de données disponibles, qui peuvent ensuite servir de base pour caractériser les conditions de « champ proche » par la modélisation et l'analyse (c'est-à-dire la « mise à l'échelle inférieure »).

- **Quelles sont les caractéristiques physiques du site dans la mesure où elles influent sur les risques côtiers?**

Cela nécessite l'évaluation de la bathymétrie et de la topographie, des sédiments superficiels, de la géologie du substratum rocheux et du couvert végétal. La cartographie et les données provenant d'un large éventail de sources doivent être compilées pour fournir une description des conditions passées et présentes sur le site.

- **Quelles sont les conditions sublittorales?**

Les interactions entre les processus physiques extracôtiers et sublittoraux, la topographie/bathymétrie locale et les facteurs locaux (p. ex. le débit des rivières) influent sur les marées, les niveaux d'eau, les modèles d'écoulement et les conditions des vagues près de la côte. Alors que les outils empiriques donnent souvent une estimation préliminaire des conditions sublittorales, l'analyse s'appuie aujourd'hui généralement sur la modélisation informatique pour évaluer ces processus physiques. La modélisation physique peut également être utilisée pour l'évaluation de l'hydrodynamique sublittorale. Les observations sur le terrain peuvent fournir des informations précieuses sur les processus et peuvent être essentielles pour l'étalonnage et la validation des modèles. L'évaluation des conditions sublittorales peut aller au-delà de la simple évaluation des sources de danger (vagues et niveaux d'eau) à une évaluation plus détaillée des voies d'accès potentielles qui peuvent conduire à des inondations, telles que l'érosion côtière et le débordement de la vague.

- **Quelles sont les voies d'accès menant aux inondations côtières?**

Une fois que les dangers sublittoraux sont quantifiés et les voies d'accès source-récepteur identifiées (p. ex. inondation directe, brèche, débordement), divers scénarios source-voie (basés sur des événements ou probabilistes) peuvent être explorés pour déterminer les risques d'inondation locaux (terrestres).

### 8.4.1 Niveaux d'eau

Les niveaux d'eau sont le point de départ de toute évaluation des risques d'inondation côtière. Le niveau moyen de la mer, l'affaissement des terres, les marées, la pression atmosphérique, les vents, les

processus provoqués par les marées et les vagues, tels que la zone de déferlement des vagues et le battement de déferlement, contribuent tous à des niveaux d'eau extrêmes.

Les composantes individuelles qui contribuent aux variations spatiales et temporelles du niveau de la mer sont assez complexes. Pugh (1987) donne un aperçu complet des marées, des ondes et du niveau moyen de la mer en relation avec les niveaux des eaux côtières. Les inondations côtières peuvent résulter de niveaux d'eau élevés qui incluent des contributions du/des :

- niveau moyen de la mer (actuel);
- changement du niveau relatif de la mer dû aux changements climatiques et au mouvement vertical de la croûte terrestre;
- marées;
- ondes de tempête, généralement comprises comme incluant la hausse/baisse liée au vent et la configuration/la réduction de la pression atmosphérique.
- Effets de vague :
  - Zone de déferlement des vagues - augmentation moyenne du niveau de la mer à la côte nécessaire pour équilibrer les gradients côtiers du flux de quantité de mouvement lié à la présence des vagues, généralement associée au déferlement des vagues.
  - Langue d'écume et action de vagues à période très longue (battement de déferlement).
  - Remontée de la vague (et débordement).

De plus, il peut être nécessaire de tenir compte des effets des fluctuations saisonnières, interannuelles ou décennales des niveaux d'eau, des seiches, du débit des rivières et du ruissellement local sur les niveaux d'eau.

#### 8.4.1.1 Référents altimétriques

L'établissement de référents altimétriques cohérents pour les niveaux d'eau et la topographie (et la bathymétrie, si elle est utilisée pour soutenir l'évaluation des risques) est une condition préalable cruciale pour évaluer avec précision les risques d'inondation côtière. Cette tâche est souvent compliquée par les différences dans les référentiels utilisés pour les applications terrestres et océaniques, et par l'évolution des normes pour l'établissement de référentiels et le contrôle vertical. Voici une brève description des référentiels utilisés au Canada.

Jusqu'en 2013, le terme « référentiel géodésique » au Canada faisait généralement référence au Système canadien de référence altimétrique de 1928 de 1928 (CGVD28), qui était une approximation du niveau moyen de la mer vers 1928, basée sur les relevés de niveau de l'eau à plusieurs sites de marégraphe. En 2013, Ressources naturelles Canada a publié un nouveau référentiel géodésique national, CGVD2013, qui est une estimation plus sophistiquée, détaillée et à jour du niveau moyen de la mer. C'est une surface gravitationnelle équipotentielle qui représente par convention le niveau moyen de la mer côtière pour l'Amérique du Nord.<sup>17</sup> À ce jour, de nombreuses municipalités n'ont pas encore fait la transition du CGVD28 au CGVD2013, de sorte que les transformations et les conversions des anciens ensembles de données peuvent devoir être envisagées.

La séparation verticale entre les référentiels CGVD2013 et CGVD28 varie dans l'espace sur l'ensemble du Canada. Par exemple, le référentiel CGVD2013 est 15 cm en dessous du CGVD28 à Vancouver et 64 cm au-dessus de ce dernier à Halifax. De plus, alors que le CGVD2013 représente le niveau moyen de la mer « par convention », les niveaux moyens réels de l'eau s'écartent un peu du CGVD2013. Le niveau de l'eau

<sup>17</sup> [www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems](http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems)

moyen à Vancouver est de 19 cm au-dessus du CGVD2013, tandis que le niveau de l'eau moyen à Halifax est de 39 cm en dessous. Cette différence est due aux variations de la topographie dynamique de la surface de la mer (effets de la pression atmosphérique, de la densité de l'eau et des courants et autres facteurs qui font varier la surface moyenne de la mer).

La topographie des plaines inondables et les élévations des bâtiments et des infrastructures sont généralement cartographiées par rapport au référentiel géodésique, tandis que les données bathymétriques sont généralement rapportées par rapport au référentiel local des cartes hydrographiques (niveau de référence, qui est généralement défini sur la base d'une référence de marée basse dérivée des relevés de niveau de l'eau à un marégraphe local), tandis que les études océanographiques utilisent plus souvent le niveau moyen de la mer comme référentiel. Dans les Grands Lacs, le système de référence international des Grands Lacs, IGLD85 est le plus couramment utilisé, tandis que les États-Unis utilisent le référent altimétrique NAVD88<sup>18</sup> basé sur le niveau moyen de la mer à Rimouski, au Québec. L'utilisation du niveau de référence pour les données bathymétriques peut créer des défis lors de la réalisation d'évaluations régionales à grande échelle des risques d'inondation côtière, qui peuvent englober des zones où les données bathymétriques sont référencées à différents niveaux de référence locaux.

Il faut veiller à ce que des références appropriées et cohérentes soient utilisées dans l'examen des risques d'inondation et que les conversions de référentiels correctes soient appliquées. Cela est exacerbé par le fait que, de manière anecdotique, le CGVD28 et le CGVD2013 sont appelés « référentiel géodésique » ou même « niveau moyen de la mer ». Dans le présent document, le terme « niveau moyen de la mer » (NMM) fait référence au niveau moyen de la mer local selon la convention hydrographique (OHI, 2011), et non au niveau géodésique moyen de la mer.

Des tentatives ont récemment été faites pour simplifier les conversions de référentiels pour les applications hydrographiques au Canada grâce au développement de surfaces de séparation verticale hydrographique (HyVsepS) (Robin et al., 2016). Ce sont des surfaces qui capturent la variabilité spatiale des référentiels et des niveaux de marée à l'aide du modèle géoïde, des modèles semi-empiriques, des modèles océaniques dynamiques, de l'altimétrie par satellite, des estimations d'élévation relative du niveau de la mer et des observations de marégraphes. En théorie, les HyVsepS facilitent la conversion directe entre les élévations hydrographiques (niveaux de référence, élévations des marées, niveau moyen de la mer) en élévations géodésiques (CGVD2013). Cependant, des précautions doivent être prises lors de l'application des surfaces, compte tenu des nombreuses hypothèses et de l'incertitude associées aux modèles sur lesquels les surfaces sont basées, et des écarts locaux avec les décalages de référence aux sites marégraphiques et dans les zones où le débit des rivières ou la bathymétrie sublittorale peu profonde influe sur les marées. Le logiciel GPS-H de Ressources naturelles Canada permet la conversion entre les altitudes ellipsoïdales CGVD28, CGVD2013 et dérivées du GPS (RNCAN, 2019).

#### **8.4.1.2 Changement relatif du niveau de la mer**

Les inondations côtières devraient devenir plus fréquentes et plus graves dans de nombreuses régions du Canada en raison de l'élévation locale du niveau de la mer (Lemmen et al., 2016; Greenan et al., 2018). Le changement relatif du niveau de la mer est dû à une combinaison d'élévation globale du niveau de la

---

<sup>18</sup> En 2022, le US National Geodetic Survey (NGS) remplacera le Système nord-américain de référence altimétrique de 1988 (NAVD 88) par un système de référence altimétrique basé sur un géoïde appelé le Système nord-américain-pacifique de référence altimétrique de 2022 (NAPGD2022). Ce futur système de référence altimétrique américain a la même définition que CGVD2013 et permettra, au moment de sa publication, de créer un système de référence altimétrique continental unifié.  
[https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/outils/outil-de-systeme-de-referance-ge/modernisation-systeme-referance-altimetrique/9055?\\_ga=2.74419794.1584988690.1610068353-2014737142.1608171280](https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/outils/outil-de-systeme-de-referance-ge/modernisation-systeme-referance-altimetrique/9055?_ga=2.74419794.1584988690.1610068353-2014737142.1608171280)

mer, d'affaissement ou de soulèvement des terres, et ajoute au défi de prédire les futurs risques d'inondation côtière. James et al. (2014) présentent une analyse détaillée des effets de l'élévation du niveau de la mer dans le monde et de l'élévation des terres changeante (principalement en raison de l'ajustement isostatique glaciaire) sur les changements locaux du niveau de la mer au Canada. Là où le niveau relatif de la mer devrait augmenter (la plupart des côtes de l'Atlantique et du Pacifique et la côte de Beaufort dans l'Arctique), la fréquence et l'ampleur des événements de niveau de l'eau extrêmement élevé augmenteront (Greenan et al., 2018). L'effet de l'élévation du niveau de la mer sur la fréquence des inondations a été démontré pour les extrêmes annuels de marée et d'ondes combinées pour Halifax (Forbes et al., 2009; Atkinson et al., 2016) et Tuktoyaktuk (Lamoureux et al., 2015). Les projections de l'élévation relative du niveau de la mer sur des horizons temporels appropriés (p. ex. la durée de vie théorique des bâtiments ou des infrastructures) doivent donc être prises en compte dans l'évaluation des dangers et des risques, pour soutenir la conception de la résilience et/ou de l'adaptation.

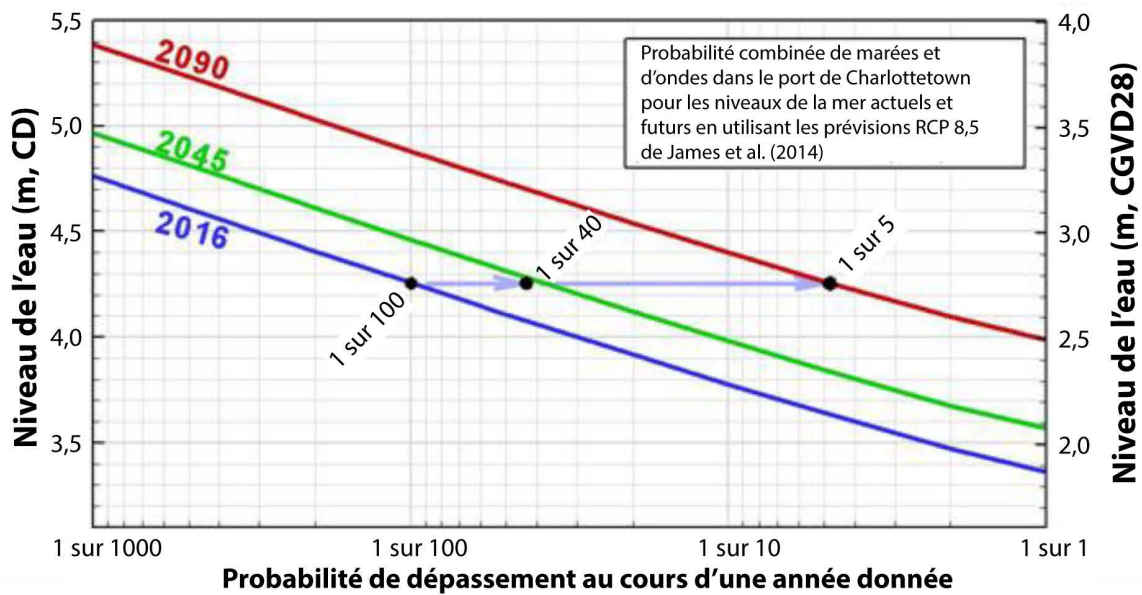
La sélection des futurs scénarios d'élévation du niveau de la mer devrait prendre en compte :

- **Les horizons de planification/conception** ou les durées de vie théoriques des bâtiments/infrastructures, et la sensibilité/vulnérabilité des actifs à risque. Pour de nombreux bâtiments résidentiels et commerciaux ayant des interdépendances limitées entre les systèmes, un horizon de planification/conception de 50 ans ou moins peut être considéré comme approprié, en rapport avec les considérations fiscales globales (p. ex. durée de possession, analyse coûts-avantages de l'investissement). Du point de vue de l'aménagement du territoire, ou pour des infrastructures plus critiques/sensibles, des horizons temporels plus longs devraient être envisagés. Pour la planification de l'utilisation des terres, les prévisions relatives du niveau de la mer jusqu'en 2100 sont prises en compte dans de nombreux territoires de compétence (p. ex. la Colombie-Britannique et le Nouveau-Brunswick).
- **Les scénarios d'émissions mondiales**, tels que ceux décrits par le profil représentatif d'évolution des concentrations (RCP) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Sur les quatre RCP, le RCP 8.5 est le scénario ayant les émissions les plus élevées, en supposant un avenir avec peu de réduction des émissions, où la concentration de CO<sub>2</sub> continue d'augmenter rapidement et devrait atteindre 940 ppm d'ici 2100. Il n'y a pas de probabilité associée aux scénarios et, comme l'ont souligné Greenan et al. (2018), des scénarios entraînant des taux d'élévation du niveau de la mer encore plus élevés (p. ex. qui résulteraient d'une réduction rapide de la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental et d'une élévation supplémentaire du niveau de la mer) ne peuvent être exclus.
- **Incertitude dans les projections.** Sur des périodes plus courtes (c.-à-d. jusqu'au milieu du 21<sup>e</sup> siècle), les taux d'élévation relative du niveau de la mer projetés sont similaires pour les divers scénarios d'émissions et l'incertitude est limitée, alors que vers la fin du 21<sup>e</sup> siècle, les projections pour différents scénarios divergent et les plages d'incertitude augmentent considérablement. Certaines publications soulèvent la possibilité d'une élévation globale du niveau de la mer d'ici 2100, principalement associée à des taux plus élevés de libération de glace antarctique dans les océans (Greenan et al., 2018). Les projections de Han et al. (2015, 2016) sont de jusqu'à 1 m plus haut d'ici 2100 que les indications présentées dans James et al. (2014) qui est basé sur le GIEC. Les projections les plus élevées suivent les scénarios de limite supérieure du niveau de la mer présentés par la NOAA (Sweet et al., 2017), qui reposent, en partie, sur une méthode de projection du niveau de la mer à laquelle le GIEC a accordé une faible confiance (Church et al., 2013).
- **Potentiel d'adaptation au fil du temps.** À mesure que les ensembles de données se développent et que les modèles climatiques s'améliorent, les prévisions évolueront et l'incertitude diminuera.

Les possibilités de s'adapter aux changements observés du niveau de la mer et les projections de changements climatiques et relatifs du niveau de la mer devraient, dans la mesure du possible, être intégrées dans les processus d'évaluation et de conception.

**Étude de cas : port de Charlottetown, Île-du-Prince-Édouard**

Les probabilités de dépassement annuelles pour différents niveaux d'eau dans le port de Charlottetown sous les niveaux de la mer actuels et futurs projetés (estimation médiane pour un profil représentatif de concentration représentative ou scénario d'émissions mondiales - RCP 8.5) sont indiquées dans la Figure 20. Le niveau moyen de la mer projeté en 2045 devrait dépasser le niveau actuel d'environ 20 cm; d'ici 2090, les niveaux devraient être de 62 cm plus élevés qu'aujourd'hui. Actuellement, un niveau de l'eau de 4,25 m au-dessus du niveau de référence - suffisamment élevé pour inonder une grande partie du front de mer - a 1 % de chances de se produire ou d'être dépassé au cours d'une année donnée; d'ici 2045, la probabilité annuelle de dépassement d'un tel événement sera passée à 2,5 % et, d'ici 2090, un événement de cette ampleur aura une PDA de 20 %. Ces estimations ne tiennent pas compte des changements éventuels de la variabilité climatique ou de la fréquence et de l'intensité des tempêtes (p. ex. Barnard et al., 2015), de la modification des ondes de tempête et des marées dues aux changements de profondeur de l'eau (localement et globalement) (p. ex. Schindelegger et al., 2018), ou la modulation nodale des marées sur des échelles de temps décennales qui domine les marées annuelles moyennes sur la côte Est (Houston et Dean, 2011).



**Figure 20. Probabilité de niveaux d'eau élevés (marée + onde de tempête) au cours des années sélectionnées.**

Dans les Grands Lacs, les précipitations lacustres, l'évaporation et le ruissellement superficiels sont les principaux facteurs du niveau des lacs sur des échelles de temps interannuelles à plus longues (Gronewold et al., 2013). Les changements induits par le climat dans les précipitations et la couverture de glace influenceront sur les taux d'évaporation et donc le niveau des lacs. Bien que les projections futures soient incertaines (Lofgren et Gronewold, 2014), il est prouvé que des niveaux d'eau plus extrêmes (hauts et bas) se produiront dans les Grands Lacs à l'avenir (Commission mixte internationale, 2014). L'activité humaine sur les Grands Lacs, comme la régulation des débits sortants du lac Supérieur et du lac Ontario, a influé sur les fluctuations du niveau de l'eau. Une gestion et une régulation adaptatives éventuelles des niveaux

d'eau du lac pourraient avoir une incidence additionnelle sur la distribution statistique des niveaux d'eau et des vagues qui contribuent aux inondations à l'avenir.

#### **8.4.1.3 Marées**

Les mesures de marée disponibles, les modèles de marée et les bases de données résultantes des composantes harmoniques de la marée décrits dans la section 6.1 fournissent des informations sur les niveaux de marée astronomiques pour la plupart des eaux canadiennes, bien que la couverture demeure clairsemée dans certaines régions (p. ex. l'Arctique). Comme discuté dans la section 6.1.1.2, l'analyse harmonique d'un enregistrement de niveau de l'eau peut être utilisée pour estimer la contribution de la marée au niveau de l'eau total et obtenir les composantes de la marée (Foreman, 1977; Pugh, 1987; Pawlowicz, 2002), qui peuvent être utilisées pour reconstruire ou prédire les séries chronologiques et les distributions de probabilité des marées. Celles-ci peuvent être combinées avec les ondes de tempête et d'autres contributions aux niveaux extrêmement élevés de l'eau pour établir des distributions de probabilité conjointes. Les interactions onde de tempête-marée et les interactions vague-marée peuvent compliquer ce type d'analyse. Pour les sites où les données limnimétriques ne sont pas disponibles, la modélisation hydrodynamique peut être utilisée pour évaluer les contributions des marées aux niveaux d'eau extrêmes, en supposant que le modèle peut être étalonné et validé par rapport aux données d'un emplacement proche.

#### **8.4.1.4 Onde de tempête**

Comme indiqué dans la section 6.1, les informations relatives aux ondes de tempête peuvent être tirées des relevés de niveau de l'eau aux marégraphes et de modèles numériques. L'analyse des statistiques d'ondes à partir des mesures du niveau de l'eau observé (marégraphe) a été traditionnellement effectuée en calculant le « résiduel » - la différence d'altitude instantanée entre le niveau de l'eau observé et la marée astronomique prévue telle que prédite par l'analyse harmonique. Bien que le résidu non marémoteur soit principalement constitué de l'onde, il peut également contenir des erreurs de prédiction harmonique, des erreurs de synchronisation et des interactions non linéaires (Haigh et al., 2016). Par exemple, les analyses harmoniques des données de marégraphes provenant de stations de la Colombie-Britannique donnent généralement lieu à des séries chronologiques résiduelles présentant une périodicité semi-diurne prononcée (Murphy et al., 2016; Zhai et al., 2019), typiques des sites macrotidaux où les effets et autres processus physiques interagissent avec les marées (p. ex. Horsburgh et Wilson, 2007). Récemment, des chercheurs (Williams et al., 2016; Wahl et Chambers, 2015) ont préconisé l'utilisation de la statistique de « surcote météorologique », qui correspond à la différence entre le niveau de la mer maximal observé et le niveau de marée (astronomique) prévu, quel que soit leur synchronisme pendant le cycle des marées. La surcote météorologique est largement indépendante des marées pour les grands événements, ce qui permet une approche simplifiée du problème des probabilités conjointes de marées et d'onde.

Les méthodes simplifiées d'évaluation des ondes de tempête sur un site donné requièrent généralement l'utilisation de modèles analytiques ou de formules empiriques pour prédire les contributions des effets du vent et de la pression atmosphérique sur les niveaux d'eau. Cette approche requiert généralement de faire des hypothèses simplificatrices en ce qui concerne la bathymétrie sublittorale, la géométrie du littoral (p. ex. contours de fond droits et parallèles) ou la réponse locale des niveaux d'eau aux fluctuations du vent et de la pression atmosphérique. Par conséquent, ce type de méthodologie n'est approprié que dans des situations restreintes où les hypothèses simplificatrices sont valables et/ou pour des évaluations préliminaires. Des exemples de ces méthodes sont fournis dans le chapitre 4 du Rock Manual (CIRIA et al., 2007), Pugh (1987) et le volume G - partie 4 des directives du ministère des Richesses naturelles de l'Ontario (2001).

Des progrès importants ont été réalisés dans les capacités des modèles numériques à prédire les ondes de tempête, y compris le développement de modèles couplés vagues-ondes (Bode et Hardy, 1997; Resio et Westerink, 2008) et des réanalyses mondiales (Muis et al., 2016). Des approches de modélisation multi-échelles peuvent désormais être utilisées pour réduire les prévisions d'ondes de tempête de l'échelle océanique à l'échelle côtière (Barnard et al., 2014). Des modèles numériques d'ondes de tempête de complexité différente sont largement utilisés. La plupart des modèles d'ondes de tempête sont soit bidimensionnels (c'est-à-dire basés sur des équations d'eau peu profonde) ou tridimensionnels, et permettent de prescrire des champs de vent, des champs de pression et des conditions aux limites des marées variant dans le temps et l'espace (pour les modèles côtiers) afin de générer des prédictions d'ondes de tempête. Les considérations générales pour les études de modélisation des ondes de tempête sont décrites dans Barnard et al. (2014), FEMA (2016), Muis et al. (2016) et Resio et Westerink (2008). Des examens de divers modèles numériques et approches de la modélisation des ondes de tempête sont fournis par de Vries et al. (1995) et Murphy et Khaliq (2017).

#### 8.4.1.5 Seiches

Les seiches sont des amplifications d'ondes longues qui se produisent généralement lorsque certains forçages (p. ex. des événements météorologiques ou de longues vagues se propageant de l'océan ouvert dans un port ou une baie côtière) entraînent des oscillations aux périodes naturelles (résonnantes) d'un lac, d'une baie ou d'un port, appelées périodes propres (Rabinovich, 2009). Les seiches peuvent représenter des contributions importantes aux niveaux d'eau extrêmes dans les grands lacs (p. ex. les Grands Lacs, le lac Winnipeg) et les baies côtières, les criques ou les ports (p. ex. Halifax) (Forbes et al., 2009). Il existe une variété de mécanismes par lesquels des seiches peuvent être générées, notamment :

- la génération directe de longues vagues par les fluctuations de la pression atmosphérique ou le vent agissant à la surface de la mer ou du lac;
- le transfert d'énergie à très basse fréquence (p. ex. ondes de tempête) vers des fréquences légèrement plus élevées par des effets topographiques et météorologiques;
- le transfert de l'énergie des vagues de houle vers des mouvements à grande échelle et à plus basse fréquence en raison de la dispersion de fréquence non linéaire (p. ex. ondes d'infragravité et battement de déferlement).
- Tsunamis (incluant les météotsunamis).

Le potentiel d'oscillation peut être établi par une variété de méthodes, y compris des observations directes, l'analyse des indicateurs de niveau de l'eau ou des mesures de vitesse à proximité (Abraham, 1997; Forbes et al., 2009), ou en estimant les fréquences naturelles (modes fondamental et harmonique) du lac/de la baie/du port et en les comparant aux fréquences associées aux phénomènes de forçage naturel (comme les ondes de longue période) pour estimer la réponse d'excitation. Cette dernière analyse peut être entreprise en utilisant des solutions analytiques pour les fréquences propres de bassins représentatifs de forme géométrique simple, une modélisation hydrodynamique numérique détaillée (Kofoed-Hansen et al., 2005) ou une modélisation physique pour les petites baies et les ports (Kofoed-Hansen et al., 2001).

#### 8.4.1.6 Niveaux d'eau combinés

Pour les risques d'inondation côtière, les contributions combinées des marées et des ondes de tempête aux niveaux d'eau extrêmement élevés sont des paramètres d'intérêt clés. Cette section donne un aperçu des types d'analyses qui pourraient être entreprises pour différents niveaux de détail de l'étude.

## **Établissement de la portée et évaluations de haut niveau**

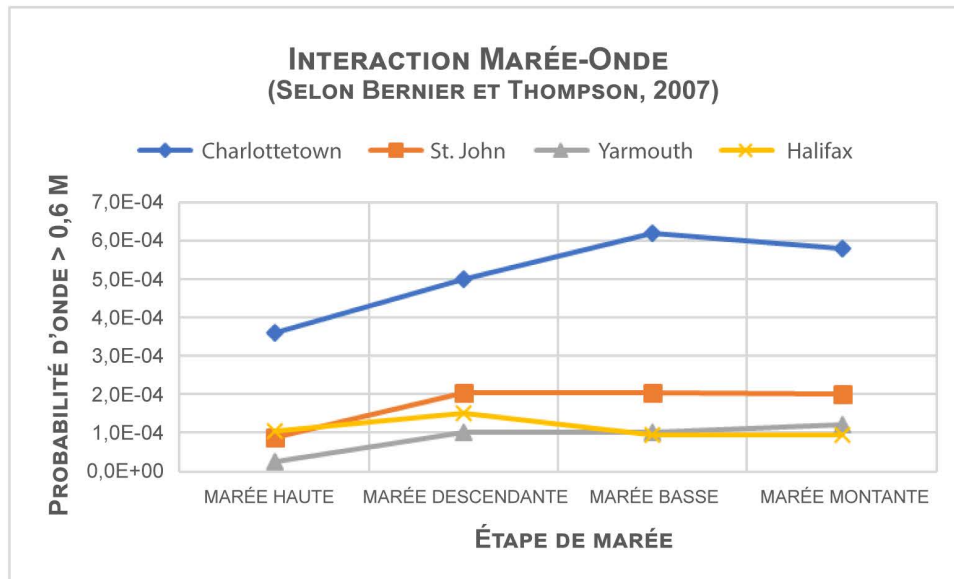
Pour les études de portée et d'autres analyses à un niveau de détail relativement faible, les niveaux d'eau extrêmement élevés seraient généralement basés sur des méthodes simplifiées ou des valeurs régionales fournies dans des documents d'orientation provinciaux publiés (p. ex. Daigle, 2017; MRNO; 2001), dont certains utilisent l'hypothèse prudente selon laquelle l'onde de tempête maximale se produit simultanément avec la marée astronomique maximale. Pour la côte Est, des estimations préliminaires des niveaux d'eau combinés des marées et des ondes de marée ont été élaborées pour de nombreuses collectivités (Daigle, 2017) en combinant les valeurs des stations marégraphiques du SHC des pleines mers supérieures, grandes marées (PMSGM) avec des statistiques sur les ondes de tempête basées sur une prévision a posteriori sur 40 ans pour l'Atlantique Nord-Ouest (Bernier et Thompson, 2006). Pour la côte Ouest, les lignes directrices de la Colombie-Britannique fournissent des statistiques sur les ondes de tempête pour huit marégraphes à long terme dans les eaux de la Colombie-Britannique (Ausenco-Sandwell, 2011). À l'instar de l'approche de la côte Est, l'approche la plus simple pour estimer les niveaux d'eau totaux décrite dans les lignes directrices de la Colombie-Britannique utilise la somme des PMSGM et une valeur d'onde de tempête correspondant à la PDA de la « tempête désignée » (« méthode combinée »). Murphy et Khaliq (2017) donnent un résumé non exhaustif d'autres lignes directrices régionales sur l'évaluation des niveaux d'eau côtière au Canada.

## **Analyses détaillées**

Des analyses plus détaillées des statistiques sur les ondes de tempête et le niveau de l'eau comprendraient généralement une évaluation des probabilités conjointes des ondes de tempête et des marées. Cela pourrait être obtenu directement par une analyse statistique des niveaux d'eau combinés marée-onde à partir des marégraphes disponibles les plus proches. Lorsqu'il n'y a pas de marégraphes à long terme suffisamment proches, ou lorsque les conditions de marée sur le site d'intérêt diffèrent considérablement de celles de la station hydrométrique la plus proche, une estimation des niveaux d'eau totaux combinés doit être élaborée. Cela peut se faire par la reconstruction des signaux de tempête, en utilisant des enregistrements d'ondes de tempête extraits du marégraphe à long terme le plus proche, combinés à des estimations locales des niveaux de marée basées sur la modélisation régionale des marées ou sur les composantes harmoniques des marées publiées. Cela peut aussi se faire de manière probabiliste en déterminant les distributions de probabilité à une variable (marginales) pour la marée et pour l'onde afin de créer une distribution de probabilité conjointe à deux variables des niveaux d'eau totaux. La corrélation entre marée haute et onde de tempête peut être décrite par un facteur de marée régional (Pugh, 1987) qui relie le niveau de l'eau combiné extrême attendu à une statistique de marée astronomique.

**Étude de cas : Île-du-Prince-Édouard (Coldwater, sous presse)**

Des études récentes sur les risques d'inondation côtière à l'Île-du-Prince-Édouard (Coldwater, sous presse) relient le niveau de l'eau maximal prévu à la marée astronomique la plus haute (MAPH) par  $\beta_{100}$ , un facteur de corrélation régional pour les probabilités conjointes de marées et d'ondes. En l'absence d'analyse propre au site,  $\beta_{100} = 1$  fournit une estimation prudente du niveau de l'eau élevé avec PDA de 1 %, en supposant que l'onde de tempête avec PDA de 1 % se produit en combinaison avec la MAPH. Par exemple, autour de l'Île-du-Prince-Édouard, les valeurs de  $\beta_{100}$  varient entre 0,44 et 0,72. Ces coefficients relativement faibles sont liés à des interactions marée-onde non linéaires. Bernier et Thompson (2007) ont démontré à l'aide d'une modélisation de circulation à grande échelle que les ondes de tempête dans le détroit de Northumberland sont presque deux fois plus susceptibles de se produire à marée basse qu'à marée haute (Figure 21).



**Figure 21. Interaction marée-onde à Charlottetown (selon Bernier et Thompson, 2007).**

Pugh (1987) décrit trois approches pour analyser les niveaux d'eau extrêmes dus aux effets combinés des marées et des ondes de tempête.

- 1) Lorsque des mesures de marégraphes raisonnablement longues sont disponibles, l'analyse des valeurs extrêmes des niveaux d'eau maximaux annuels est indiquée afin de fournir des estimations d'événements extrêmes. Il convient de prendre note qu'en règle générale, l'extrapolation devrait être limitée à pas plus de quatre fois la période des maxima annuels disponibles à des fins d'analyse (p. ex. une durée minimale d'enregistrement de 25 ans est nécessaire pour estimer l'événement de PDA de 1 %). À des fins pratiques, toute tendance ou autre forme de non-stationnarité dans les données est généralement supprimée avant les analyses de valeurs extrêmes (Hawkes et al., 2008). Si désiré, il est possible d'effectuer une analyse non stationnaire des valeurs extrêmes (Coles, 2013; Mudersbach et Jensen, 2010), mais cela ajoute de la complexité à l'analyse et est souvent peu pratique. Des conseils supplémentaires sur l'analyse des valeurs extrêmes des niveaux d'eau pour les zones côtières et les grands lacs y compris la longueur des enregistrements, la préparation des données, l'analyse statistique et l'analyse de

sensibilité sont fournis par Murphy et Khaliq (2017). Mazas (2019) donne une évaluation rigoureuse des concepts clés sous-jacents et des prolongements pratiques des différentes approches de l'analyse des valeurs extrêmes.

- 2) L'analyse régionale peut être utilisée pour étendre les statistiques d'onde mesurées à partir d'un marégraphe de référence local aux sites voisins. En supposant que les statistiques régionales des ondes montrent moins de variation spatiale que les statistiques des marées, un facteur régional,  $\alpha_{100}$ , peut être défini comme étant :

$$\alpha_{100} = \frac{\eta_{100}}{HAT + S_{100}}$$

où  $\eta_{100}$  est le niveau des eaux de ruissellement pour une PDA de 1 %, la MAPH est la marée astronomique la plus élevée et  $S_{100}$  est l'onde pour une PDA de 1 % (résiduel de la marée).

- 3) Une troisième approche décrite dans Pugh (1987) et Pugh et Vassie (1980) est la méthode de probabilité conjointe (MPC), qui requiert l'élaboration de distributions de probabilité marginales pour les niveaux d'onde et de marée, puis crée une matrice de probabilité conjointe par convolution. Cette approche peut fournir une image complète des probabilités combinées d'onde et de marée en supposant que toute interaction marée-onde est négligeable. Ces approches présentent un défi en ce que la délimitation précise de la queue supérieure des distributions de probabilité (en particulier pour l'onde) nécessite l'ajustement à une valeur extrême généralisée (VEG), Pareto ou une fonction de valeur extrême similaire, qui ne représente pas nécessairement l'essentiel de la distribution.

Une analyse plus détaillée des niveaux des eaux de ruissellement peut nécessiter une modélisation numérique régionale des ondes de tempête, des marées et/ou des vagues. Cela peut nécessiter des retombées à long terme, ou une étude de scénarios réels ou hypothétiques pour capturer un large éventail de tempêtes déterministes ou probabilistes ou d'événements combinés.

### L'outil canadien d'adaptation aux niveaux d'eau extrêmes (OCANEE)

Zhai et al. (2014, 2015) fournissent des recommandations pour les hauteurs d'élévations ou les changements d'élévation des bâtiments côtiers ou des infrastructures nécessaires pour maintenir la même probabilité d'inondations futures qu'un site a connu dans un passé récent (c.-à-d. maintenir le statu quo). Les hauteurs sont déterminées à partir des statistiques des marées et des ondes de tempête historiques (basées sur les données des marégraphes) et des projections régionales de l'élévation du niveau de la mer et de l'incertitude associée présentées dans James et al. (2014). Ces hauteurs et les projections d'élévation relative du niveau de la mer sont disponibles dans le cadre de l'Outil canadien d'adaptation aux niveaux d'eau extrêmes (OCANEE) (<http://www.bio.gc.ca/science/data-donnees/can-ewlatt>). Les hauteurs d'élévations fournies par l'OCANEE sont basées sur des enregistrements historiques et n'intègrent pas les futurs changements potentiels de la variabilité climatique ou de la fréquence et de l'intensité des tempêtes, la modification des ondes de tempête et des marées dues aux changements de profondeur de l'eau, ou la modulation nodale des marées sur des échelles de temps décennales (voir les références ci-dessus).

La marge verticale présentée dans l'OCANEE est basée sur les travaux de Hunter (2012). La hauteur est calculée en analysant les enregistrements de niveau de l'eau à long terme disponibles (ou en utilisant les résultats de la modélisation des ondes de tempête dans certains cas) pour déterminer les paramètres d'échelle et d'emplacement de la distribution des valeurs extrêmes de Gumbel. Le rapport des variances de l'incertitude estimée dans l'estimation de l'élévation relative du niveau de la mer au paramètre d'échelle donne le terme de sensibilité à ajouter à l'estimation de l'élévation relative du niveau de la mer. L'OCANEE fournit un point de départ utile pour déterminer les niveaux d'eau extrêmes à divers endroits au Canada.

## 8.4.2 Vagues

La remontée et le débordement de la vague peuvent être des contributeurs majeurs aux inondations côtières et peuvent conduire à la rupture des barrières côtières. Les forces générées par l'action des vagues sur les structures, ainsi que les impacts des débris portés par les vagues, peuvent ajouter de fortes composantes de charge dynamique aux conditions d'inondations côtières. L'évaluation des effets des vagues nécessite une compréhension des conditions des vagues au large (en eau libre), des processus de propagation/transformation des vagues dans les zones sublittorales et des interactions avec les caractéristiques et les structures côtières. Les bâtiments et les infrastructures situés à proximité du rivage (c.-à-d. dans la première ligne de défense) sont généralement exposés à des risques de vagues plus élevés que ceux situés plus à l'intérieur des terres.

### 8.4.2.1 Sélection de l'approche d'analyse

L'évaluation de la climatologie des vagues et l'analyse de la transformation des vagues peuvent être des entreprises difficiles et longues. Plusieurs niveaux d'analyse peuvent être entrepris. Pour les situations à faible risque, ou dans le cadre d'une étude de cadrage, des techniques empiriques peuvent être suffisantes, et lorsqu'une analyse plus détaillée est nécessaire, ces techniques empiriques peuvent aider à guider le choix des conditions et des méthodologies d'analyse.

Les statistiques récapitulatives des vagues au large à partir des simulations rétrospectives des vagues régionales et les données des bouées houlomotrices à proximité peuvent fournir une évaluation rapide de l'état des vagues au large. Les séries chronologiques des vagues, qu'elles proviennent de modèles numériques de simulations rétrospectives (p. ex. SMC 50) ou de mesures de bouées houlomotrices (section 6.4), offrent toutes deux des résumés statistiques similaires sur une base horaire du vent et de la direction et de l'intensité des vagues. Ces ensembles de données peuvent constituer un point de départ pour une évaluation de l'état des vagues au large. Il faut prendre soin d'évaluer les effets des caractéristiques spectrales des ondes, y compris les spectres de fréquence et directionnels, car une

caractérisation appropriée des caractéristiques spectrales peut être essentielle pour identifier les rôles de la houle et de l'étalement directionnel dans la transformation des ondes sublittorales.

Les statistiques récapitulatives utiles des conditions des vagues en mer peuvent inclure :

- des valeurs de retour sur la hauteur de vague significative ( $H_s$ ) et les paramètres d'état de la mer associés (p. ex. période du pic des vagues,  $T_p$ ), triés par secteur directionnel;
- des diagrammes de dispersion  $H_s$ - $T_p$  conjoints;
- des tableaux de persistance des vagues (durée des combinaisons hauteur-période des vagues par direction);
- des roses des vagues (tracés directionnels/compas de la fréquence d'occurrence des classes de hauteur des vagues).

Selon le niveau de détail requis, l'analyse de la transformation des vagues sublittorales peut être basée sur la modélisation au cas par cas de certaines conditions de vagues en mer afin de développer des conditions de vagues sublittorales équivalentes. Une matrice des conditions de vagues au large représentant le régime complet des hauteurs, des périodes et des directions des vagues peut être exécutée au moyen de l'analyse de transformation des vagues pour obtenir une matrice sublittorale équivalente, maintenant ainsi la distribution de probabilité complète des conditions de vagues. La totalité, ou certaines parties, des séries chronologiques des vagues au large peuvent être entrées comme conditions d'entrée dans l'analyse de transformation des vagues afin d'obtenir des séries chronologiques des vagues sublittorales transformées (simulation rétrospective). Pour les grands domaines, ces matrices et techniques de simulation rétrospective peuvent devenir chronophages et gourmandes en données, en particulier si plusieurs scénarios de changements climatiques sont également nécessaires dans le cadre de la modélisation de la transformation des vagues. L'ampleur et le niveau d'effort mis sur la modélisation de la transformation des vagues reposent sur le jugement du professionnel qui mène l'analyse. Dans certaines situations, les vagues sublittorales sont entièrement limitées en profondeur. Dans ce cas, les hauteurs des vagues sublittorales sont presque entièrement contrôlées par la profondeur de l'eau, ce qui permet un assouplissement potentiel de certaines des exigences de modélisation de la transformation des vagues. La zone de déferlement des vagues, le battement de déferlement et d'autres processus non linéaires peuvent encore nécessiter une analyse détaillée.

Les outils de caractérisation des conditions de vagues sublittorales vont des équations paramétriques aux modèles de transformation numérique des vagues 1D et 2D. Ceux-ci peuvent être utilisés pour simuler des événements uniques, une gamme d'événements pour couvrir une bande de probabilités, ou comme outil de simulation rétrospective pour générer des séries chronologiques de conditions sublittorales. Les paramètres de sortie de ce processus peuvent inclure les hauteurs, les périodes, les directions, les formes spectrales des vagues sublittorales et les changements des niveaux d'eau moyens (hausse et baisse). De plus, la modélisation de l'interaction vague-courant peut déterminer les effets des courants (de marée, fluviaux ou éoliens) sur les conditions de vagues, ainsi que les effets des conditions de vagues sur les courants sublittoraux. La modélisation physique peut également être utilisée pour évaluer les transformations des vagues et les interactions vague-courant, généralement à petite échelle (jusqu'à quelques kilomètres).

#### **8.4.2.2 Modélisation de la transformation des ondes sublittorales**

Une fois que les conditions de vagues au large ont été établies (soit à partir d'une analyse rétrospective en eau libre ou à partir de données de vagues au large), celles-ci doivent être transformées en conditions sublittorales. Cela est généralement réalisé en utilisant des modèles d'ondes spectrales de troisième génération, tels que le SWAN, pour *Simulating WAVes Nearshore* (The SWAN Team, 2009), le CMS-Wave

(Lin et al., 2008; Sanchez et al., 2014), MIKE21 SW (DHI, 2017) ou le TOMAWAC (Benoit et al., 1996). Il s'agit de modèles à moyenne de phase qui simulent l'amplification, l'amortissement et la transformation des vagues de vent et de la houle dans les zones extracôtières et côtières grâce à la solution de l'équation d'équilibre de l'action des vagues. De tels modèles capturent généralement des processus tels que la génération des vagues par le vent, la réfraction de la houle, la levée, la formation de moutons, le déferlement, les interactions vague-vague, les interactions vague-courant et la dissipation d'énergie. En règle générale, ces modèles ne simulent pas explicitement la diffraction des vagues. La plupart des modèles d'ondes spectrales de troisième génération donnent une approximation des effets de diffraction grâce à une approche de diffraction-réfraction à découplage de phases. Tous ces modèles peuvent éventuellement être couplés à des modèles de circulation sublittorale de façon à inclure les effets des marées et des courants (Manson et al., 2016b).

L'analyse de transformation d'onde peut souvent nécessiter une procédure imbriquée. Le domaine externe peut utiliser un modèle à relativement grande échelle (p. ex. un modèle d'onde spectrale de troisième génération, tel que SWAN, MIKE21 SW, CMS-Wave ou TOMAWAC) pour transformer les vagues d'eau profonde en une profondeur intermédiaire, en tenant compte de l'augmentation vent-vague locale, l'interaction vague-vague, la levée, la réfraction et le déferlement. Les résultats de cette analyse peuvent ensuite être transmis à des modèles à plus petite échelle (généralement à résolution de phase) avec des grilles bathymétriques de densité plus élevée et la possibilité d'inclure des éléments physiques plus détaillés (voir les exemples dans la section 8.4.2.4).

Le couplage des modèles de vagues et de circulation peut être essentiel pour capturer l'amplification locale des vagues de vent en présence de courants, ainsi que pour capturer les interactions vagues-courant.

L'analyse des conditions sublittorales peut être basée sur une analyse statistique des conditions au large et sur la transformation stationnaire (en régime permanent) d'états de la mer spécifiques au littoral, ce qui aboutit à une reconstruction par échelon des statistiques des vagues sublittorales. Une deuxième approche consiste à étendre la période de prévision rétrospective aux conditions sublittorales grâce à une simulation heure par heure de l'amplification couplée des vagues de vent, de la transformation des vagues et des interactions de circulation. Ces derniers peuvent nécessiter des transformations de vagues instables (non stationnaires) ou quasi stationnaires, où des simulations stationnaires séquentielles sont utilisées pour capturer les changements des conditions de vagues dans le temps. L'utilisation de simulations stationnaires pour estimer approximativement les conditions de vagues variant dans le temps requiert que le temps nécessaire aux vagues pour se propager du large au littoral soit inférieur au temps nécessaire pour que des changements importants des conditions de vagues au large se produisent.

#### **8.4.2.3 Zone de déferlement des vagues**

La zone de déferlement des vagues est l'augmentation moyenne du niveau de l'eau à la rive nécessaire pour équilibrer les gradients à terre du flux de quantité de mouvement lié à la présence des vagues, généralement associée au déferlement des vagues. La zone de déferlement des vagues est généralement de 3 à 10 % de la hauteur des vagues au large (Dean, 2005), et peut représenter une contribution importante aux niveaux d'eau sublittoraux, permettant aux eaux de crue et à l'action des vagues de se rendre plus loin à l'intérieur des terres. Dans le golfe du Saint-Laurent et les Grands Lacs, des hauteurs de vagues importantes au large de 5 m entraîneraient une zone de déferlement des vagues de 0,15 m à 0,5 m. Les rivages plus exposés, comme l'ouest de l'île de Vancouver ou le sud de la Nouvelle-Écosse, sont exposés à des hauteurs de vagues au large de plus de 10 m, ce qui pourrait générer une zone de déferlement des vagues de 0,3 à 1 m. Les vagues d'infragravité et les battements de déferlement peuvent fortement influencer la zone de déferlement des vagues et les oscillations à basse fréquence sur les niveaux d'eau dans la zone de langue d'écume. Des conseils sur l'évaluation de la zone de déferlement

des vagues dans les zones côtières sont fournis dans un certain nombre de publications internationales, notamment le Coastal Engineering Manual (US Army Corps of Engineers, 2002), le Rock Manual (CIRIA et al., 2007) et la FEMA (2015).

#### 8.4.2.4 Remontée et débordement de la vague

Comme expliqué dans la FEMA (2005), la remontée de la vague est un phénomène complexe qui dépend du niveau de l'eau local (y compris les effets du battement de déferlement ou d'infragravité des vagues), des conditions de vagues incidentes (hauteur, période, cambrure, direction) et des caractéristiques du rivage (pente, réflectivité, hauteur, perméabilité, rugosité). Lorsque la remontée de la vague dépasse l'élévation de la crête d'une berme ou d'une barrière côtière, l'eau coule sur la crête (débordement de paquets de mer), ce qui peut entraîner des coups d'eau et des inondations côtières. Une autre forme de débordement de la vague peut se produire lorsque les vagues se brisent sur la face d'une structure côté mer, entraînant le transport de gouttelettes d'éclaboussures au-dessus de la crête par leur propre élan ou l'effet du vent (EurOtop, 2007). L'évaluation de la remontée et du débordement de la vague peut être l'élément le plus complexe du point de vue technique d'une évaluation des risques d'inondation côtière.

L'élévation verticale atteinte par la remontée de la vague peut être un facteur critique pour définir le potentiel de dommages près de la rive. La remontée de la vague varie en fonction de la hauteur importante des vagues,  $H_s$ , de la période des vagues,  $T_p$ , et de la pente sur laquelle les vagues se brisent (cela peut être la pente de la plage ou la pente de la structure en fonction de la situation - ou cela peut être une combinaison des deux pentes). La remontée de la vague est fortement influencée par la pente - une large plage de sable dissipera l'énergie des vagues, ce qui entraînera une remontée de la vague qui correspond généralement à 4 à 7 % de la hauteur des ondes incidentes. Pour les structures en eau relativement profonde, ou celles exposées à des vagues non déferlantes, la remontée de la vague augmente avec le degré d'inclinaison de la pente et peut être compris entre 1,5 et 3 fois la hauteur de la vague incidente.

Pour les plages, où l'énergie des vagues est progressivement dissipée par déferlement des vagues, l'étendue verticale de la remontée de la vague,  $R_u$ , est généralement proportionnelle à la hauteur des vagues incidentes,  $H_s$ , et au paramètre de similarité au déferlement,  $\xi_b$ .

$$\frac{R_u}{H_s} = f(\xi_b)$$

$$\xi_b = \frac{m}{\sqrt{H_s/L_o}}$$

Ici,  $m$  est la pente cotangente,  $H_s$  est la hauteur significative des vagues et  $L_o$  est la longueur d'onde en eau profonde,  $L_o = gT^2/(2\pi)$ .

Le paramètre de similarité au déferlement fournit un modèle heuristique pour la zone de déferlement, le déferlement des vagues et pour l'interaction vague-structure (Battjes et Janssen, 1978). Pour les plages de sable/gravier types avec des pentes inférieures à 0,01 (valeurs de  $\xi_b$  inférieures à 0,5), la zone de déferlement est large et le processus de déferlement des vagues est dissipatif avec des vagues de déferlement qui débordent, et les niveaux d'eau sublittoraux sont dominés par la zone de déferlement des vagues et les actions des vagues d'infragravité et du battement de déferlement. Au fur et à mesure que  $\xi_b$  augmente (plages plus abruptes et/ou pentes des vagues plus faibles), la zone de déferlement devient plus étroite et moins dissipative, et le déferlement des vagues devient plus intense, allant de déferlements plongeants à des déferlements en volute ou à gonflement. Dans ces conditions, la rive devient plus

réfléchissante et les niveaux d'eau sont dominés par les processus de remontée de la vague. Ces changements dans le comportement des plages contrôlent la remontée de la vague : les plages  $\xi_b$  basses sont dominées par la zone de déferlement tandis que les rives plus escarpées, avec des déferlements en volute ou à gonflement, sont dominées par la remontée de la vague.

Les formules empiriques, la modélisation numérique et la modélisation physique peuvent toutes être utilisées pour fournir des estimations de la remontée et du débordement de la vague sur les sites côtiers (Murphy et Khaliq, 2017). Un examen des techniques d'estimation de la remontée de la vague est présentée dans Melby (2012) et Melby et al. (2012) ainsi qu'un examen critique de l'efficacité des prédicteurs disponibles. Les méthodes empiriques utilisent une représentation simplifiée de la physique du processus de remontée débordement de la vague présentée dans des équations (généralement sans dimension) pour relier les principaux paramètres de réponse (élévation de la remontée de la vague de 2 %, débit de débordement moyen, etc.) à la vague et à la structure clés ou aux paramètres du rivage (EurOtop II, 2017; FEMA, 2018b). Les coefficients et constantes empiriques utilisés dans les formules ont généralement été dérivés d'essais sur maquette physiques ou de mesures sur le terrain. Les formules empiriques sont sujettes à l'incertitude et à l'inexactitude si elles sont utilisées pour extrapoler au-delà des limites des paramètres et des conditions pour lesquels elles ont été élaborées (EurOtop II, 2018; FEMA, 2005; FEMA, 2018b; U.S. Army Corps of Engineers, 2002). On doit considérer celles-ci comme fournissant uniquement des approximations d'ordre de grandeur (EurOtop, 2007; ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, 2001) et elles devraient être utilisées avec prudence par les praticiens expérimentés connaissant l'origine, les limites et l'applicabilité des formules, compte tenu des conditions environnementales locales (Didier et al., 2020). Il convient de tenir dûment compte du niveau d'analyse approprié pour soutenir les objectifs de l'évaluation des risques (section 7), afin de décider si des techniques plus sophistiquées (p. ex. la modélisation physique numérique) peuvent être nécessaires.

#### **EurOtop II (2018)**

Les directives révisées d'EurOtop pour le débordement des structures côtières fournissent un aperçu important du rôle des hauteurs de vagues et des débits de débordement générés par les vagues individuelles. Le rapport EurOtop original (2007) reflétait la pratique courante à ce moment-là consistant à caractériser le débordement de la vague par le débit moyen de décharge,  $q$  (l/s/m). Dans de nombreux cas, l'intensité du taux de débordement de pointe est plus critique que la moyenne à long terme. En reconnaissance de cela, EurOtop II (2018) a introduit le concept selon lequel le taux de débordement moyen devrait être couplé à la hauteur des vagues provoquant cette décharge. Le volume de débordement maximal,  $V_{max}$ , capture l'intensité des débordements par rapport à leur potentiel à générer des forces élevées, une érosion et des dommages structurels. Les taux de débordement admissibles révisés sont présentés dans EurOtop II (2018) qui utilisent à la fois le taux de dépassement moyen,  $q$ , et la hauteur de vague incidente,  $H_s$ , pour capturer l'intensité des débits de débordement.

Les taux de débordement admissibles ou tolérables (en termes de  $q$  et de volume maximal,  $V_{max}$ ) sont prévus pour les pentes gazonnées et les structures de talus, les propriétés et les opérations derrière les défenses côtières, ainsi que pour les personnes et les véhicules.

Des résumés des différents types de modèles numériques utilisés pour évaluer la remontée et le débordement de la vague sont fournis dans FEMA (2005), EurOtop II (2018) et Murphy et Khaliq (2017). Capturer la complexité des processus de remontée et de débordement de la vague nécessite des modèles de résolution de phase qui sont exigeants en termes de calcul, ce qui limite généralement les échelles temporelles et spatiales sur lesquelles ils peuvent être appliqués. La plupart des modèles numériques utilisés pour évaluer la remontée et le débordement de la vague utilisent les informations des modèles de

transformation des vagues sublittorales à leurs limites en eaux libres. Trois catégories de modèles numériques à résolution de phase utilisés pour simuler la remontée et le débordement de la vague sont définies comme suit (plus de détails sont fournis dans Murphy et Khaliq, 2017) :

- les modèles d'équations pour eaux peu profondes non-linéaires (EPPNL), y compris les modèles de Boussinesq, tels que BOUSS-2D (Nwogu et Demirebilek, 2001), MIKE21 BW et FUNWAVE (Kirby et al., 1998);
- les modèles non hydrostatiques, qui résolvent les équations EPPNL avec l'ajout d'une équation de moment vertical et d'un terme de pression non hydrostatique dans les équations de moment horizontal, comme le modèle SWASH (Zijelma et al., 2011);
- les solveurs de dynamique des fluides numérique (DFN), tels que OpenFOAM et DualSPHysics (Crespo et al., 2015). En raison de la forte demande de calcul, les solveurs de DFN ont généralement été limités aux applications de recherche, mais sont de plus en plus largement utilisés avec les progrès des technologies informatiques.

### 8.4.3 Tsunamis

Les tsunamis sont des événements naturels destructeurs et mortels (Nistor et al., 2017). En eau peu profonde, les tsunamis peuvent atteindre des hauteurs de 30 m ou plus (Clague et al., 2003) et générer des charges extrêmes sur les bâtiments et les infrastructures, y compris des charges hydrodynamiques et des charges de débris. Les risques de tsunami peuvent inclure ceux associés aux inondations, aux flux à grande vitesse (et au potentiel d'érosion associé), aux forces exercées par les inondations et le recul des vagues, à la résonance et à l'amplification des vagues dans les ports et les goulets, aux charges d'impact des débris portés par les eaux (y compris les navires) et à la dispersion des contaminants, comme le mazout et l'essence (Clague et al., 2003).

L'évaluation préliminaire des risques de tsunami pour le Canada par Leonard et al. (2012, 2014) fournit une base initiale utile pour évaluer les risques de tsunami régionaux, résumant les sources de tsunamis générés par les tremblements de terre et les glissements de terrain qui peuvent menacer les côtes canadiennes. Leonard et al. (2014) font remarquer qu'en plus de la menace posée par les tsunamis en champ lointain, de grands tsunamis provoqués par le séisme de méga-chevauchement  $M \approx 9$  de Cascadia ont touché la côte de la Colombie-Britannique en moyenne une fois tous les 500 ans, mais peuvent se produire plus fréquemment. Le Canada atlantique et l'estuaire du Saint-Laurent sont également sujets aux tsunamis générés par des glissements de terrain, particulièrement près de la zone sismique de Charlevoix et le long des Grands Bancs. Bien que l'on en sache moins sur les risques de tsunami dans l'Arctique en général, les tsunamis générés par les glissements de terrain sont de plus en plus reconnus comme un danger important pour les collectivités côtières vivant sur les côtes des fjords de l'est du Nunavut (Forbes et al., 2018; Gosse et al., 2020).

Leonard et al. (2012) fournissent des cartes probabilistes de risques de tsunami pour des hauteurs de remontée de la vague de  $\geq 1,5$  m et  $\geq 3$  m avec un niveau de PDA de 2 %. Les cartes illustrent (Figure 22) qu'une grande partie de la côte ouest du Pacifique est vulnérable à une remontée de la vague de 3 m ou plus générée par le tsunami avec une probabilité d'occurrence de 10 à 40 % dans une fenêtre temporelle de 50 ans. Cela baisse à 2 à 10 % dans les eaux intérieures du détroit de Géorgie. Sur la côte est du Canada, la probabilité d'un événement à la baie de Fundy, au littoral atlantique de la Nouvelle-Écosse et dans le sud-est de Terre-Neuve est de 2 à 10 %, tandis que la probabilité pour le reste du littoral canadien est inférieure à 2 %. Le rapport de danger cartographie également les zones vulnérables aux vagues locales dues aux glissements de terrain subaériens ou sous-marins ou au vèlage glaciaire (Figure 23).

Bien que le risque soit le plus élevé sur la côte du Pacifique, des tsunamis peuvent survenir et se sont produits dans toutes les eaux côtières du Canada. En 1929, un tsunami a frappé la péninsule de Burin à Terre-Neuve, causé par une rupture de talus sous-marin déclenchée par un tremblement de terre de magnitude 7,2. On estime que des vagues de 10 m de hauteur ont causé 28 décès (Fine et al., 2005). Le tsunami de Burin a été analysé dans le cadre d'un exercice de cartographie du déclenchement du tsunami mené pour le compte de Protection civile Canada (Ruffman, 1997). En 1964, Port Alberni, en Colombie-Britannique, a été frappé par un tsunami déclenché par un tremblement de terre de magnitude 9,2 en Alaska, qui tua plus de 100 personnes alors qu'il se déplaçait le long de la côte ouest des États-Unis. Environ 260 maisons à Port Alberni ont été détruites, avec des dommages économiques estimés à 10 millions de dollars (Clague et al., 2003).

En plus des tsunamis dus aux tremblements de terre, les tsunamis peuvent être déclenchés par des éboulements (p. ex. événement de 1964 en Alaska), des explosions (événement du port de Halifax en 1917) et des événements météorologiques (météotsunamis) (Thomson et al., 2009). Le terme « météotsunami » a également été adapté pour être utilisé dans les Grands Lacs pour décrire les vagues de crue provoquées par les seiches (Bechle, et al., 2016).

Un rapport sur les glissements de terrain tsunamigènes au Québec (Locat et al., 2015) décrit le glissement de terrain à Notre-Dame-de-la-Salette de 1908 dans la rivière Lièvre au nord d'Ottawa, qui a fait 34 morts, le glissement de terrain de la rivière La Grande en 1987, qui a généré une remontée de la vague de 14 m de haut et un important éboulement à Cap Trinité dans le fjord du Saguenay en 1870.

La fonte des glaciers peut générer d'énormes tsunamis, du fait du vêlage des glaciers ou des éboulements connexes. Le tsunami dans le fjord Taan en Alaska en 2015 a généré un tsunami avec une remontée de la vague verticale de 193 m qui a dévasté le paysage local. Une analyse des tsunamis qui ont généré une remontée de la vague de 50 m ou plus au cours du siècle dernier a montré que 10 de ces 14 événements résultaient de glissements de terrain subaériens dans des fjords ou des lacs de montagnes glaciaires, tandis qu'un seul (le tsunami indonésien de 2004) a été déclenché par un tremblement de terre (Higman et al., 2018). Plus récemment, en 2017, un glissement de terrain dans le fjord de Karrat au Groenland a déclenché un tsunami de 100 m de haut qui a emporté 11 maisons, tuant 3 personnes (Schiermeier, 2017). Le plus grand tsunami provoqué par un glissement de terrain enregistré est le glissement de Lituya Bay de 1958, qui a généré une remontée de la vague de 524 m (Miller, 1960). Ces événements au Groenland et en Alaska illustrent le type de risque de tsunami qui peut exister dans des environnements semblables à des fjords dans le nord du Canada.

Les enregistrements des marégraphes et les preuves sur le terrain (Leonard et al., 2014) des tsunamis anciens, ainsi que la modélisation numérique des tsunamis préhistoriques (p. ex. Cherniawsky et al., 2007; Fine et al., 2008) ont montré une spécificité importante du site et la variabilité de la réponse aux tsunamis dans les eaux côtières. La variabilité est la plus prononcée dans les réseaux de goulets et les fjords qui sont des caractéristiques physiques prédominantes de nombreux environnements côtiers canadiens (comme en Colombie-Britannique). Les géomorphologies complexes et les conditions macrotidales (comme celles de certaines parties de la côte de la Colombie-Britannique et du Canada atlantique) ont une influence importante sur l'exposition relative et la vulnérabilité de sites individuels aux risques de tsunami provenant de différentes sources.

En octobre 2015, l'Association canadienne de normalisation a publié la première édition d'un document express (CSA EXP276.1-2015) destiné à fournir des conseils consultatifs et des exigences minimales pour la conception des structures marines associées aux installations de gaz naturel liquéfié (GNL). Tel que résumé dans Murphy et al. (2016), le CSA EXP276.1-2015 recommande que les risques de tsunami aux

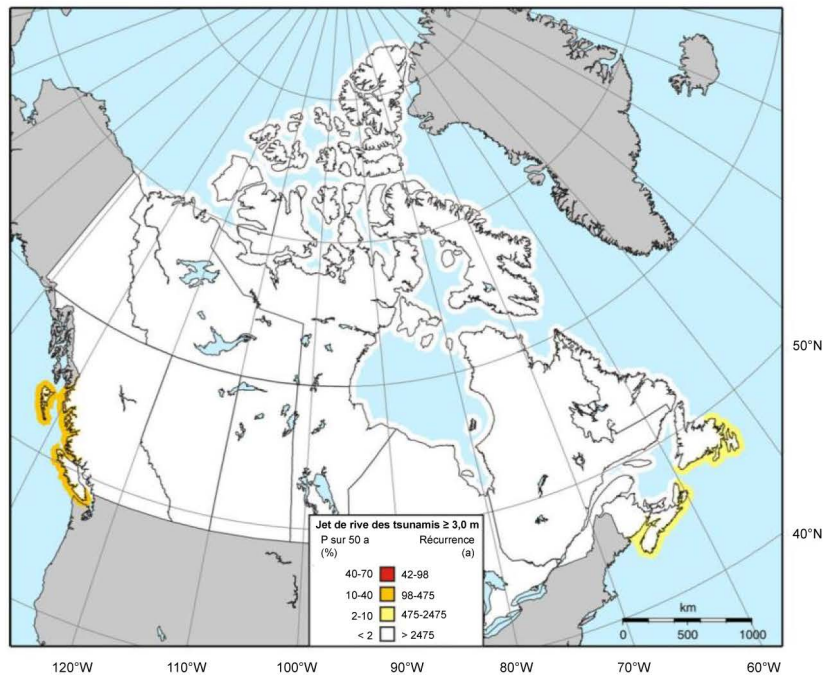
emplacements des installations maritimes de GNL soient évalués en deux phases. Au début de l'élaboration d'un projet, une évaluation générale de l'ampleur du risque de tsunami doit être réalisée pour appuyer la sélection du site et l'élaboration de la configuration. Cela nécessiterait généralement une revue de la littérature, des catalogues de tsunamis, de la topographie locale et de la bathymétrie extracôtère. Au cours de la phase de conception, une évaluation plus détaillée du tsunami est requise pour identifier les exigences d'atténuation. Le CSA EXP276.1-2015 indique que cela devrait inclure l'estimation des périodes de récurrence pour les sources de tsunami crédibles, la simulation numérique, la prise en compte de la probabilité d'occurrence conjointe avec d'autres événements du niveau de l'eau (p. ex. marées, ondes de tempête, seiches et élévation du niveau de la mer), et prise en compte de la possibilité d'un affaissement ou d'un soulèvement induit par la cosismicité. Dans la mesure du possible, les lignes directrices recommandent de concevoir en tenant compte de l'événement de tsunami le plus crédible possible ou pour une période de récurrence de 2 475 ans. L'approche à plusieurs niveaux de l'évaluation des risques de tsunami décrite dans le CSA EXP276.1-2015 ci-dessus est conforme à la discussion et aux idées présentées dans la section 7.

Des méthodes plus détaillées d'évaluation des risques de tsunami peuvent inclure des études probabilistes des risques de tsunami (EPRT). Ces méthodes probabilistes reconnaissent que les enregistrements historiques à eux seuls ne fournissent pas un indicateur adéquat du danger potentiel (Chock, 2016) et ont un avantage sur les méthodes déterministes en permettant d'évaluer la probabilité et l'incertitude des différentes conditions (Geist, 2005; Geist et Parsons, 2006), conformément aux approches fondées sur les risques. Cependant, les difficultés de caractérisation de la variabilité aléatoire des niveaux de risque de tsunami, en particulier l'incertitude relative à la variabilité naturelle du processus de génération de tremblement de terre/tsunami, demeurent un défi important et la cause d'un débat sur l'avenir des EPRT au sein de la collectivité scientifique (Yeh et al., 2005; Geist, 2005). Malgré ce débat, le sous-comité des charges et effets des tsunamis de l'American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute (ASCE/SEI) 7 Standards Committee a développé un nouveau chapitre sur « Tsunami Loads and Effects » dans l'édition 2016 de la norme ASCE intitulée « Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures » (ASCE 7-16), qui fait référence à des cartes de danger de tsunami élaborées à l'aide d'une approche basée sur les EPRT. Les étapes de base du processus d'EPRT utilisé pour le document ASCE 7-16 (Chock, 2016), qui se concentrait sur les tsunamis générés par des tremblements de terre, sont résumées comme suit :

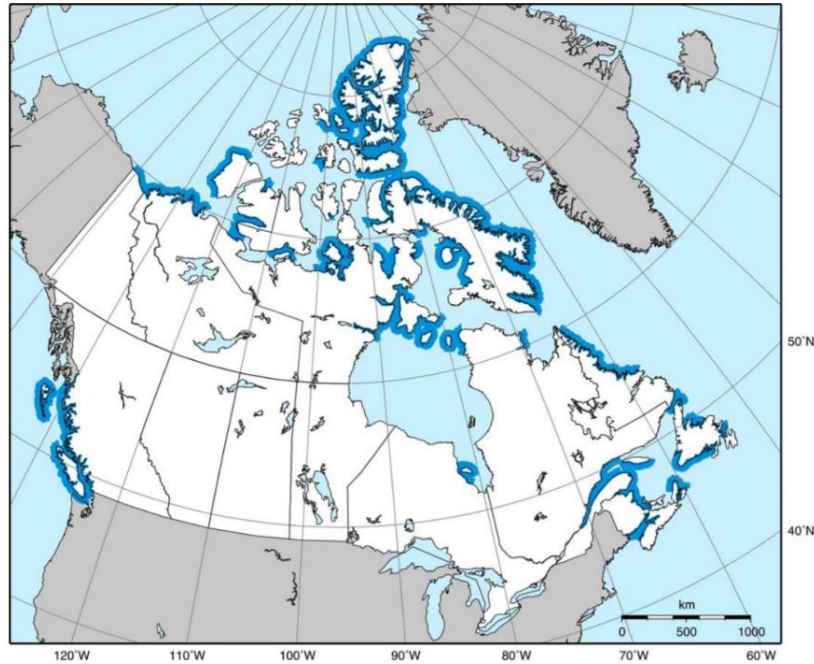
1. Caractérisation des sources : évaluation des caractéristiques de plusieurs sources, y compris la magnitude du moment et le glissement, les emplacements des sources et la récurrence basée sur la sismologie;
2. Génération : génération de forme de vague de tsunami modélisée en fonction des caractéristiques de la source.
3. Propagation : simulations numériques de la propagation des tsunamis depuis les régions sources vers les eaux du large (100 m de profondeur) à l'aide de modèles de déferlement sur haut fond. Amplitudes et périodes des vagues associées à l'intervalle moyen de récurrence de 2 475 ans (tsunami maximum considéré ou « TMC ») évaluées pour une courbe bathymétrique de 100 m.
4. Inondation : limites d'inondation et élévations de la remontée de la vague pour le TMC déterminées par des modèles de propagation des vagues non linéaires.
5. Cartographie : élaboration de cartes probabilistes (intervalle de récurrence moyen de 2 475 ans) de l'amplitude des vagues au large, des limites d'inondation et de la remontée de la vague pour chaque région.

Le TMC ayant un intervalle de récurrence moyen de 2 475 ans est basé sur le niveau de danger (pour une courbe bathymétrique de 100 m de profondeur au large) avec une probabilité de 2 % d'être dépassé sur

une période de 50 ans, et est cohérent avec le séisme maximal envisagé dans les dispositions de conception sismique du document ASCE 7 (Chock, 2016). Le document ASCE 7-16 comprend des lignes directrices sur deux méthodes d'évaluation des profondeurs et des vitesses d'écoulement locales générées par les tsunamis sur la base des données fournies par les cartes probabilistes des risques de tsunami (amplitude au large, période ou limite de la remontée de la vague/l'inondation). Celles-ci incluent une approche simpliste (mais conservatrice) basée sur un transect (appelée analyse de ligne de qualité énergétique) et une méthode basée sur la simulation numérique bidimensionnelle (Chock, 2016). Les profondeurs et vitesses d'inondation qui en résultent fournissent des données clés pour l'évaluation des charges sur les structures (hydrostatiques, hydrodynamiques et débris) et la conception des fondations. Le chargement de débris représente un élément important des considérations de conception pour les structures résistantes aux tsunamis (Chock, 2016; Nistor et al., 2017).



**Figure 22. Carte probabiliste des risques de tsunami pour le Canada (remontée de la vague de plus de 3 m en 50 ans) pour un dépassement sur une remontée de la vague  $\geq 3$  m (figure 18 de Leonard et al., 2012).**



**Figure 23. Les côtes canadiennes (bleues) sensibles aux vagues locales déclenchées par des glissements de terrain subaériens ou sous-marins ou par le vêlage glaciaire (figure 19 de Leonard et al., 2012).**

#### 8.4.4 Glace

Comme discuté dans la section 6.3, les effets de la glace de mer et de lac peuvent avoir une incidence sur les risques d'inondation côtière en raison de leur influence sur l'hydrodynamique côtière sublittorale, en particulier en modifiant les distances de fetch en eau libre et en atténuant les vagues et les ondes de tempête (Manson et al., 2016a; Provan et al., sous presse; Kim et al., sous presse), ainsi que les effets plus directs de l'empilement et du chevauchement de la glace sur les berges (Barker et Timco, 2017; Kovacs et Sodhi, 1980; Forbes et Taylor, 1994; Forbes et al., 2004, 2018). La possibilité que la glace ait une incidence sur les risques d'inondation sur un site côtier doit être prise en compte en examinant les données historiques disponibles (section 6.3) et les changements futurs prévus dans les conditions de la glace (section 6.8.2). Par exemple, le déclin de la couverture de glace de mer et l'allongement des saisons des eaux libres observés dans les régions côtières du Canada au cours du dernier demi-siècle devraient se poursuivre au 21<sup>e</sup> siècle et entraîneront probablement une exposition accrue aux vagues et aux ondes de tempête (Greenan et al., 2018). Des modèles hydrodynamiques intégrant la physique des interactions air-glace-eau peuvent être utilisés pour explorer les scénarios, les sensibilités et les impacts potentiels du changement de la couverture de glace sur les ondes de tempête et les marées (Provan et al., sous presse; Kim et al., sous presse). Il est également possible qu'une couverture de glace plus mince à l'avenir soit plus mobile et intensifie les risques d'inondation. Des données de simulations rétrospectives pour des années où la couverture de glace est relativement faible et élevée peuvent être utilisées pour créer des scénarios de remplacement afin d'étudier les effets de l'évolution de la couverture de glace sur les risques d'inondation côtière. Cependant, il convient de se demander si les ondes de tempête historiques coïncidant avec des périodes de couverture de glace étendue peuvent avoir été atténuées par la glace. La possibilité que des événements similaires se produisent pendant les périodes de couverture de glace réduite ou en eau libre dans le cadre de futurs scénarios de changements climatiques peut être une considération.

### 8.4.5 Écoulements fluviaux (zones estuariennes)

Pour les tempêtes côtières associées à des précipitations importantes (p. ex. les événements fluviaux atmosphériques sur la côte du Pacifique), les sources côtières et fluviales de risque d'inondation peuvent se combiner pour augmenter les inondations et autres risques près de l'embouchure des rivières (FEMA, 2005). Par exemple, des niveaux d'eau côtiers élevés (p. ex. en raison d'une onde de tempête ou d'une élévation du niveau de la mer) peuvent augmenter les effets de remous dans les estuaires, entraînant des inondations. Dans les zones estuariennes, les effets combinés des inondations fluviales et côtières doivent donc être pris en compte. Le type d'analyse peut varier en complexité, allant d'analyses séparées (univariées) des risques d'inondation fluviales et côtières, à une modélisation entièrement intégrée et à la prise en compte de la probabilité conjointe des niveaux extrêmes des eaux côtières et des écoulements fluviaux. Le choix de l'analyse dépendra de l'importance relative des sources côtières et fluviales des risques d'inondation, des données disponibles et du niveau d'analyse approprié pour l'étude. Des approches suggérées pour évaluer les risques d'inondation fluviales et côtières combinées sont fournies par FEMA (2005).

### 8.4.6 Probabilités conjointes/analyse multivariée

La transformation des vagues sublittorales, la remontée de la vague et les risques côtiers ont tendance à être des problèmes complexes et à plusieurs variables. L'établissement d'un scénario de tempête représentatif (p. ex. PDA de 1 %) est difficile car il existe de nombreuses combinaisons de marées, d'onde de tempête, de vagues au large et de facteurs saisonniers, interannuels et intradécennaux qui peuvent se combiner pour créer des écoulements de surface et des dangers extrêmes.

Il existe quatre approches fondamentalement différentes utilisées dans l'analyse statistique des inondations côtières :

1. l'analyse paramétrique à une variable;
2. les méthodes de probabilités et statistiques à plusieurs variables conjointes;
3. la simulation rétrospective;
4. les méthodes stochastiques-déterministes.

L'analyse paramétrique à une variable utilise des ajustements paramétriques aux données historiques sur les ondes (ou vagues) pour élaborer des distributions de probabilité pour les événements extrêmes (p. ex. Muir et El-Shaarawi, 1986). Cette approche est généralement basée sur des ensembles de données mesurées à partir de marégraphes (ou d'enregistreurs de vagues), éventuellement combinées à des simulations numériques forcées par des reconstructions de champs de vent historiques. Cette approche utilise les niveaux d'eau records issus des relevés annuels ou des simulations rétrospectives combinées à des techniques d'ajustement paramétrique, généralement basées sur la position de tracé par ordre de rang (Makkonen, 2005), pour estimer la probabilité de dépassement annuelle (PDA),

$$AEP(z) = 1 - F(z)$$

où  $z$  est la hauteur de l'onde à un endroit donné et  $F(z)$  est la fonction de distribution cumulative (FDC). La PDA doit être considérée en termes de fréquence de dépassement, plutôt qu'en termes d'intervalle fixe entre les dépassements, puisque l'intervalle entre les dépassements est une quantité aléatoire. Deux approches sont généralement utilisées pour sélectionner les événements extrêmes : l'approche des maxima en bloc (p. ex. le niveau de l'eau maximal annuel) ou l'approche des dépassements incomplets (p. ex. Bernardara et al., 2014). Les deux méthodes utilisent les paramètres de l'ajustement optimal pour interpoler et extrapoler les distributions de probabilité paramétrées pour estimer les valeurs aux PDA souhaitées. Étant donné que de nombreuses estimations dépassent la longueur de l'enregistrement

historique, ces méthodes reposent fortement sur des hypothèses d'indépendance de l'échantillon et sur l'existence d'une population homogène sur l'ensemble de données observé. Un examen de diverses méthodes d'analyse à une variable pour évaluer les niveaux d'eau extrêmes dans les zones côtières et les grands lacs est présenté dans Murphy et Khaliq (2017). Les méthodes d'analyse des valeurs extrêmes à une variable pour les vagues sont décrites dans Goda (2010) et Mazas et Hamm (2011).

Les méthodes de probabilité conjointes utilisent une paramétrisation d'au moins deux variables de risque d'inondation pour créer une distribution à plusieurs variables qui représente un ensemble de tempêtes, ou réponses, qui pourraient se produire dans une zone. La section 8.4.1.5 décrit une discussion de la méthode de probabilité conjointe des marées et des ondes de tempête par Pugh (1987). L'approche JOIN-SEA élaborée au Royaume-Uni (HR Wallingford, 1998) a été suivie d'un guide des pratiques exemplaires pour aborder les méthodes de probabilité conjointe dans la gestion des crues (Hawkes, 2008). Une analyse de probabilité conjointe directe des niveaux d'eau et des vagues appliquée au débordement de digues a été menée par Liu et al. (2010) pour Richmond, en Colombie-Britannique. Pour les problèmes bivariés, la modélisation des copules est souvent utilisée pour générer des descriptions statistiques bivariées des conditions d'incident (Masina et al., 2015; Couason et al., 2018; Mazas et Hamm, 2016, 2017). Le nombre de variables prises en compte dans une analyse de probabilité conjointe doit être cohérent avec les processus du système naturel. L'intensité des tempêtes, la trajectoire des tempêtes, le niveau des marées, le niveau relatif de la mer, la couverture de glace, la hauteur des vagues, la forme spectrale et la direction des vagues peuvent tous jouer un rôle important dans la détermination de l'étendue et de l'intensité des risques d'inondation côtière.

Bien qu'une analyse de probabilité conjointe soit fréquemment utilisée pour examiner les effets combinés de deux ou trois paramètres (p. ex. onde de tempête et marées, ou niveaux des vagues et de l'eau), une évaluation complète de tous les paramètres contribuant aux risques d'inondation côtière est généralement peu pratique ou trop incertaine pour en valoir la peine.

Une approche alternative est une analyse basée sur le processus physique dans laquelle les transformations des vagues sublittorales sont modélisées ou analysées pour un large éventail de conditions extracôtières, afin d'élaborer une description statistique des conditions à terre, telles que les profondeurs des inondations ou les élévations des jets de rive. Cette analyse peut être effectuée par regroupement statistique des conditions extracôtières afin de bâtir une description statistique transformée des conditions sublittorales (p. ex. Cornett et Zhang, 2008), ou par analyse rétrospective, où des séries chronologiques d'événements extracôtiers sont exécutées pour créer des séries chronologiques de paramètres transformés, tels que la profondeur des inondations ou la hauteur des jets de rive.

Les méthodes de suivi stochastique-déterministe utilisent une combinaison de modèles physiques et de comportement de trajectoire de tempête stochastique pour créer un grand ensemble de tempêtes synthétiques. Resio et al. (2017) décrivent les approches adoptées pour la simulation rétrospective paramétrique, l'analyse de probabilité conjointe et les méthodes de suivi stochastique-déterministe pour les études sur les inondations côtières aux États-Unis. La cartographie récente des inondations côtières à Boston (Douglas et al., 2016) démontre l'utilisation de méthodes stochastiques-déterministes pour la modélisation couplée des vagues et des ondes de tempête à l'aide de SWAN et d'ADCIRC.

Pour les événements peu fréquents, tels que les ouragans, une meilleure image du risque d'inondation peut être obtenue en examinant un large éventail de trajectoires de tempêtes possibles, s'étendant au-delà de la période des observations disponibles ou des données de simulations rétrospectives. Cela se fait généralement à l'aide de simulations de Monte Carlo des trajectoires de tempête qui sont ensuite modélisées à l'aide d'un modèle de circulation côtière pour simuler l'onde associée à un scénario de

tempête donné. La modélisation de plusieurs trajectoires de tempêtes tout en tenant compte des interactions entre les vagues et les marées nécessite beaucoup de calculs et n'est pas couramment entreprise pour les eaux canadiennes, bien que la pratique soit bien établie dans les régions où les ouragans sont plus fréquents et plus graves.

## 8.5 Effets des changements climatiques et non-stationnarité

La plupart des évaluations probabilistes des risques d'inondation côtière reposent sur une hypothèse de stationnarité, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de tendances ou de sauts/changements importants dans les données au fil du temps (Murphy et Khaliq, 2017). Cette hypothèse peut être remise en question à la fois pour la période de données historiques disponibles et, à l'avenir, pour la durée de vie théorique des bâtiments et des infrastructures. Les analyses de valeurs extrêmes non stationnaires peuvent être effectuées sur des ensembles de données sur les dangers non stationnaires (p. ex. section 8.4.1), mais sont des entreprises relativement complexes, et il existe peu d'exemples connus dans la pratique.

### 8.5.1 Scénarios de changements climatiques

Les scénarios de trajectoire de concentration représentative (RCP) ont été développés pour la collectivité de la modélisation du climat afin d'intégrer les travaux réalisés par les organismes de recherche du monde entier. Les quatre scénarios sont représentés graphiquement dans la Figure 24 et peuvent être résumés comme suit (van Vuuren et al., 2011) :

- Le **RCP 2.6** est un scénario de réduction dans lequel les concentrations d'émissions mondiales culminent vers le milieu du siècle, puis tombent à de faibles niveaux d'ici 2100. Il a été élaboré en se basant sur environ 20 scénarios publiés.
- Le **RCP 4.5** est un scénario de stabilisation dans lequel les concentrations d'émissions mondiales sont stabilisées peu après 2100, sans dépasser les objectifs à long terme. Il adopte une approche intermédiaire à la fois des émissions et des efforts d'atténuation.
- Le **RCP 6** est un scénario de stabilisation dans lequel les concentrations d'émissions mondiales sont stabilisées peu après 2100, sans dépasser les objectifs à long terme. Il est très similaire au RCP 4.5 mais suppose des efforts d'atténuation différents. Il a été élaboré en se basant sur environ 10 scénarios publiés.
- Le scénario **RCP 8.5** est basé sur l'augmentation des émissions mondiales au fil du temps et est un scénario d'émissions élevées. Il a été élaboré en se basant sur environ 40 scénarios publiés.

Les émissions récentes suivent de près le RCP 8.5 (Zhai et al. 2014) et les projections (p. ex. pour l'élévation du niveau de la mer) basées sur la fourchette supérieure des projections du RCP 8.5 (section 6.8) peuvent être plus pertinentes pour une application aux zones côtières (Forbes et al., 2009; James et al., 2014). Certains territoires de compétence canadiens ont adopté le RCP 8.5, appelé scénario du « maintien du statu quo », pour la planification/la conception d'infrastructures essentielles (Metro Vancouver, 2018) sur la base qu'il est prudent de planifier un futur RCP 8.5 jusqu'à ce qu'il y ait des changements importants dans le climat mondial. Des scénarios d'élévation du niveau de la mer plus extrêmes sont mentionnés dans la littérature (p. ex. James et al., 2014; Han et al., 2016; Sweet et al., 2017), et sont généralement présentés comme des « limites supérieures » des projections. Les différences dans les projections pour divers scénarios d'émissions ont tendance à être moins importantes à des horizons temporels relativement courts (avant le milieu du siècle), mais divergent au milieu du siècle.

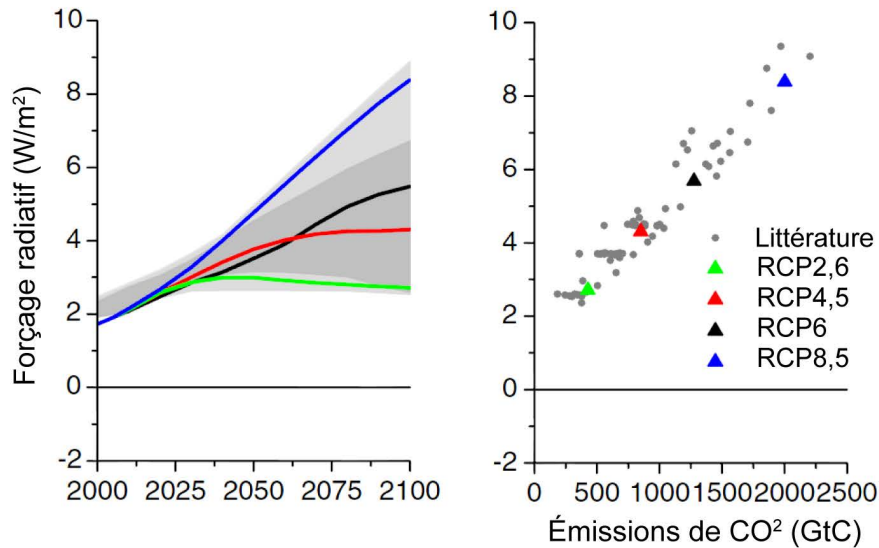


Figure 24. Caractéristiques des quatre scénarios RCP (van Vuuren et al., 2011).

### 8.5.2 Gérer l'incertitude dans les projections

L'intégration des futurs niveaux relatifs de la mer dans une analyse des risques d'inondation est un problème non négligeable. Il existe une incertitude considérable quant à la vitesse à laquelle le niveau de la mer répondra aux changements climatiques. L'analyse des risques liés aux événements extrêmes repose généralement sur l'hypothèse de la stationnarité, ce qui suppose que les propriétés statistiques des extrêmes dans le futur seront similaires à celles d'observations récentes. Des articles récents ont fait remarquer que les changements climatiques remettent en question cette hypothèse (Milly et al., 2008).

Les effets futurs des changements climatiques sur les risques d'inondation côtière pour les bâtiments et les infrastructures sont obscurcis par des niveaux élevés d'incertitude concernant, par exemple, les taux d'élévation relative du niveau de la mer, les changements dans les trajectoires et l'intensité des tempêtes, les changements dans la couverture de glace de mer et de lac et les durées des saisons des eaux libres, les changements morphologiques des côtes et les actions/comportements futurs de la société. Il existe diverses approches qui peuvent être adoptées pour faire face à l'incertitude. L'approche privilégiée dépendra de la philosophie de conception, des tolérances au risque et de la capacité à adapter la conception aux changements futurs ou aux projections améliorées.

#### 8.5.2.1 Voies d'adaptation

L'approche des « voies d'adaptation » fournit un cadre analytique pour explorer et séquencer des actions dans un avenir incertain basé sur des développements externes alternatifs au fil du temps (Haasnoot et al., 2012, 2013). Cette approche a été appliquée aux Pays-Bas pour faire face à l'incertitude des projections d'élévation du niveau de la mer et des risques d'inondation associés, et a depuis été adaptée et testée pour d'autres applications et sites, notamment l'Australie et le Canada (Coulter, 2019). L'approche décrite par Coulter (2019) comporte cinq étapes fondamentales :

- définir les buts et les objectifs;
- analyser la situation actuelle;
- évaluer les futurs possibles;

- développer des voies;
- mettre en œuvre, surveiller et apprendre.

Si elle est adoptée dans le cadre de la philosophie de conception, l'approche des voies d'adaptation peut être intégrée dans une évaluation des dangers et des risques d'inondation côtière (voir également la section 5.3.7).

### 8.5.2.2 Méthode d'observation

Des leçons peuvent peut-être être tirées du domaine de l'ingénierie géotechnique, où la conception est souvent remise en question par les incertitudes des conditions naturelles du sol. La méthode d'observation a été développée à l'origine pour l'ingénierie géotechnique afin de tenir compte des incertitudes des conditions du sol (Peck, 1969). Comme indiqué dans Spross et Johansson (2017), une approche similaire connue sous le nom de « conception active » a été appliquée avec succès en Suède dans les années 1980. Aujourd'hui, la méthode d'observation est - avec quelques modifications par rapport à la version originale de Peck - une approche de conception acceptée dans l'Eurocode 7 (CEN, 2004), qui est la norme européenne pour la conception des structures géotechniques.

La méthode d'observation est en fait un cadre de conception adaptative. La conception préliminaire est basée sur ce qui est connu à l'époque, un plan de surveillance est utilisé pour suivre le rendement de la structure et des plans d'urgence sont mis en œuvre en cas de dépassement des limites définies de comportement acceptable. Pour que cela fonctionne, la conception préliminaire doit avoir une probabilité suffisamment élevée d'éviter des mesures d'urgence coûteuses et complexes. La conception doit également pouvoir s'adapter à la gamme des mesures d'adaptation prévues. L'un des défis de la mise en œuvre de la méthode d'observation est de s'assurer que la fiabilité de la structure résultante est à la fois acceptable et convenablement quantifiée.

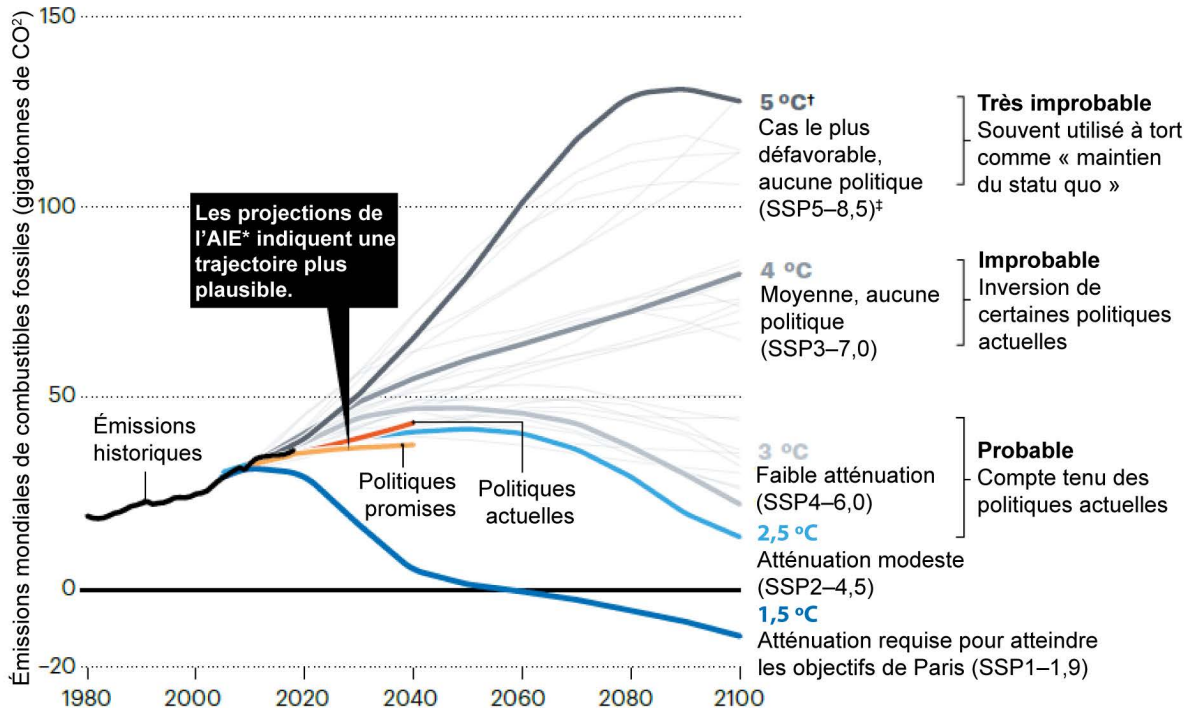
Récemment, l'American Society of Civil Engineers (ASCE) a élaboré un « manuel de pratique » pour les infrastructures résilientes au climat intitulé : Adaptive Design and Risk Management (MOP 140) (ASCE, 2018b), qui explore l'adaptation des techniques de méthode d'observation au problème des changements climatiques côtier. L'adaptation proposée par l'ASCE de la méthode d'observation à la conception d'une infrastructure résiliente au climat est la suivante :

1. La conception du projet est basée sur les conditions météorologiques ou climatiques les plus probables plutôt que sur les plus défavorables. Les écarts défavorables les plus crédibles par rapport aux conditions les plus probables sont identifiés.
2. Un plan d'action ou une modification de conception est conçu (à l'avance) pour chaque condition météorologique défavorable prévisible ou tout écart climatique par rapport à la ou aux conditions les plus probables.
3. La réalisation du projet est observée au fil du temps (à l'aide de quantités présélectionnées) et la réponse du projet aux changements observés est évaluée.
4. Des modifications de conception et de construction (identifiées précédemment) peuvent être mises en œuvre en réponse aux changements observés.

La définition des conditions météorologiques ou climatiques « les plus probables » et des écarts défavorables « les plus crédibles » permet d'intégrer les scénarios climatiques largement acceptés comme des scénarios réalistes tout en permettant de prendre en compte les valeurs maximales crédibles considérées comme physiquement possibles. Les valeurs maximales crédibles de l'élévation relative du niveau de la mer pourraient, par exemple, inclure la prise en compte des 0,65 m supplémentaires d'élévation du niveau de la mer suggérés dans James et al. (2014) pour tenir compte d'une réduction plus

rapide de la masse de l'inlandsis de l'Antarctique occidentale (prévoyant 1,39 m d'élévation du niveau de la mer en 2100). La National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) des États-Unis prévoit des augmentations moyennes mondiales « élevées » et « extrêmes » du niveau de la mer de 2,0 m et 2,5 m d'ici 2100 (Sweet et al., 2017) et fait remarquer que ces scénarios visent à « vérifier les plans et les politiques par rapport aux cas extrêmes avec une faible probabilité d'occurrence mais ayant des conséquences graves s'ils se réalisent ». Les scénarios de la NOAA reposent en partie sur une méthode de projection du niveau de la mer que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a jugé comme étant peu fiable (Church et al., 2013).

Le scénario RCP 8.5 à émissions élevées a été qualifié de scénario « maintien du statu quo », mais l'augmentation des émissions mondiales de carbone ralentit et un scénario d'émission intermédiaire (RCP 4.5 ou RCP 6) peut désormais être un scénario d'émissions « le plus probable » (Hausfather et Peters, 2020) (Figure 25). En conséquence à cette évolution, si elle se poursuit et que les politiques mondiales d'émissions de carbone continuent de ralentir l'augmentation des émissions de carbone, les estimations d'élévation mondiale « extrême » du niveau de la mer sur la base de scénarios d'émissions intermédiaires peuvent être intéressantes, tandis que des estimations extrêmes basées sur de plus grandes quantités d'émissions mondiales de carbone peuvent surestimer le changement projeté du niveau de la mer.



**Figure 25. Trajectoires des émissions de carbone et changement de température mondiale au cours du 21<sup>e</sup> siècle pour une gamme de scénarios d'émissions (Hausfather et Peters, 2020). Les politiques d'émissions de carbone promises (ligne jaune) et la trajectoire projetée actuelle basée sur les politiques actuelles (ligne rouge) jusqu'en 2040 sont illustrées, où il est indiqué qu'un scénario d'émissions intermédiaires peut convenir comme scénario « le plus probable ».**

L'identification des plans d'action pour les écarts par rapport aux conditions les plus probables nécessite la prise en compte d'un large éventail de scénarios possibles. Par exemple, l'élévation du niveau de la mer pourrait s'approcher des estimations de la limite supérieure, les tempêtes pourraient réduire

considérablement la PDA associée à un événement de tempête théorique donné, les changements morphologiques (érosion ou sédimentation) pourraient modifier l'exposition du site et la transformation des vagues sublittorales. Idéalement, une modification de conception pratique ou une autre ligne de conduite serait développée pour chacun de ces scénarios, bien qu'en pratique, les contraintes de ressources et de connaissances puissent limiter un traitement global.

## 8.6 La cartographie des risques

Il est généralement nécessaire de cartographier les risques d'inondation pour illustrer le niveau de danger sur le site, ainsi que les interdépendances et les liens avec les zones environnantes et les dangers.

La cartographie des risques d'inondation côtière à des fins de planification et de réglementation de l'utilisation des terres au Canada a traditionnellement été « basée sur l'altitude » ou « basée sur le profil », dans laquelle les élévations associées aux niveaux d'eau extrêmes et aux effets des vagues sont combinées pour fournir une élévation représentative des crues et traduites aux profils topographiques représentatifs du littoral. Cette analyse fournit des élévations minimales ou des distances de recul latérales pour éviter les risques d'inondation pour des événements désignés ou des scénarios probabilistes, par exemple, en Ontario (ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, 2001), en Colombie-Britannique (BC Ministry of Environment, 2012), la Flood and Emergency Management Administration des États-Unis (FEMA, 2018).

La nature du risque d'inondation peut changer considérablement en se déplaçant vers l'intérieur des terres, loin du bord de l'eau. À une certaine distance en retrait de la portée de l'attaque de la houle, le risque d'inondation peut être réduit à celui associé soit au niveau statique de la mer/du lac ou au débit des eaux de débordement, ou des pentes abruptes peuvent exacerber les débits de crue et contribuer au danger. Il n'est pas toujours approprié qu'une élévation représentative combinant les niveaux d'eau et les effets des vagues sur le rivage soit cartographiée directement sur la région terrestre.

La cartographie statique du niveau d'inondation, ou « cartographie de la baignoire », comprend des informations supplémentaires sur la topographie locale. Les effets extrêmes du niveau de l'eau et des vagues sont à nouveau combinés pour fournir une élévation représentative des crues, qui est cartographiée sur des modèles numériques d'élévation (MNE). Toutes les terres situées sous le niveau des crues sont généralement traitées comme inondées. Cette approche ne prend pas en compte la dynamique de propagation des eaux de crue ni les trajectoires vers les inondations, et ne fournit généralement que des informations sur les inondations/les profondeurs de l'eau (c'est-à-dire, ni les vitesses, ni l'action des vagues, ni la durée des crues ni d'autres paramètres de risque).

La cartographie à conditionnement hydrologique est un raffinement de la cartographie du niveau d'inondation statique où le MNE est modifié pour inclure les connexions hydrauliques qui ne sont pas capturées dans le MNE d'origine. Par exemple, les ponceaux et les ponts sont modifiés pour renforcer la connexion hydraulique sur toute la barrière. Des cartes d'inondations sont ensuite préparées à l'aide d'algorithmes qui propagent les niveaux d'inondation du large à l'étendue intérieure des inondations (Webster et al., 2004).

La modélisation hydrodynamique peut être utilisée pour développer des cartes détaillées des risques d'inondation grâce à la simulation des processus physiques de propagation des crues et d'écoulement de surface. Les modèles hydrodynamiques utilisés sont généralement des modèles d'écoulement non permanent bidimensionnels ou tridimensionnels, tels que CMS, ADCIRC, Delft3d, MIKE 21/3, POM ou

TELEMAC, qui peuvent éventuellement être combinés à des modèles de transformation des vagues, tels que CMS-Wave, SWAN, MIKE21 SW ou TOMAWAC. En fonction des trajectoires menant à l'inondation côtière (p. ex. inondation directe ou débordement), les conditions aux limites des modèles d'écoulement de surface sont généralement fournies par des modèles de vagues ou hydrodynamiques sublittorales ou des calculs des débits de débordement de la vague.

Pour les rives sablonneuses, il est parfois nécessaire de tenir compte des effets de l'érosion des plages et des dunes induite par les tempêtes. La FEMA a adopté une approche simplifiée de l'érosion des dunes à inclure dans les évaluations des risques d'inondation côtière basées sur les profils. La modélisation morphologique plus détaillée de l'érosion des plages est toujours un domaine de recherche active. XBeach (Roelvink et al., 2018) a récemment été appliqué avec succès pour reproduire les processus combinés d'érosion et d'inondation générés par l'ouragan Sandy (de Vet et al., 2015). Dans les eaux canadiennes, XBeach a récemment été appliqué à la simulation des processus d'érosion et d'inondation à Maria, près de la Ville de Gaspé au Québec (Didier et al., 2019).

Les cartes des risques d'inondation peuvent afficher une variété d'informations, telles que les zones inondées lors d'un événement de PDA précis (Figure 26), les profondeurs d'inondation pour différentes utilisations des terres ou classements d'infrastructure (Figure 27), les vitesses, les conditions des vagues (hauteurs, périodes) ou la limite terrestre des risques d'inondation, de vagues et d'érosion (Figure 28).

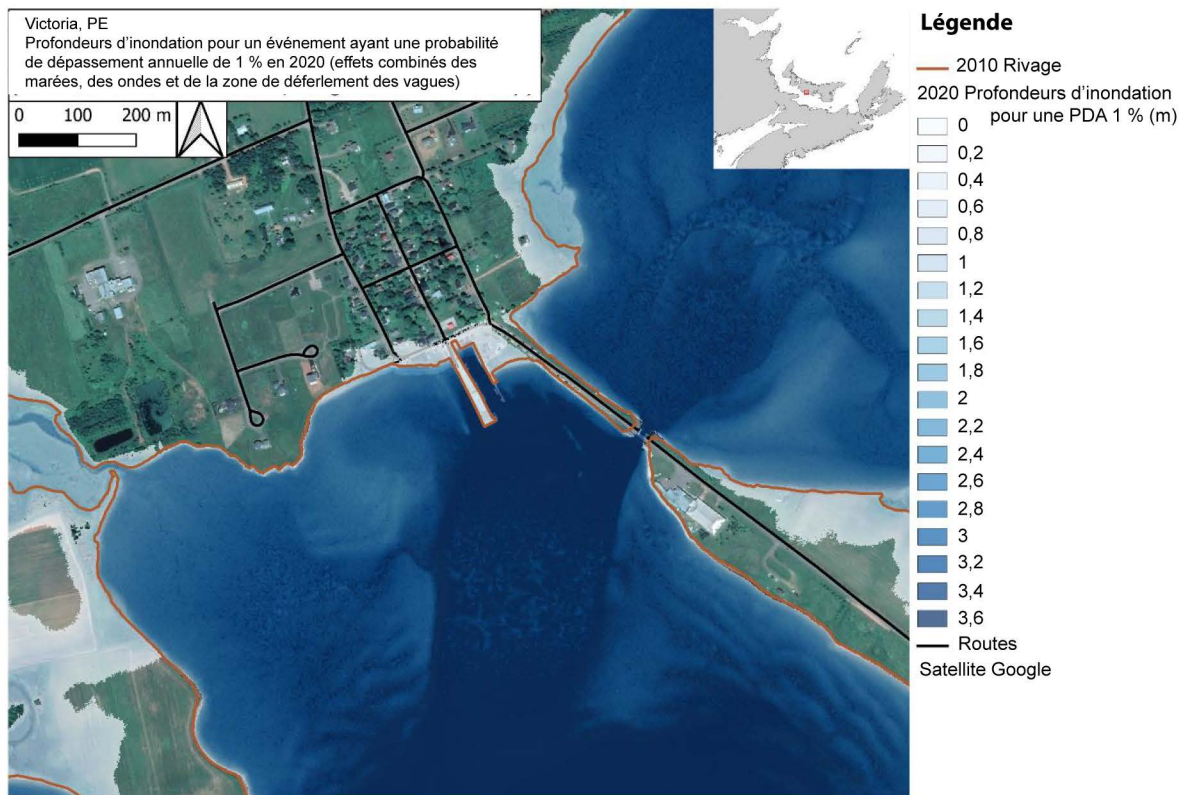


Figure 26. Exemple de carte d'inondation pour Victoria, Île-du-Prince-Édouard (photo : M. Davies, 2019).

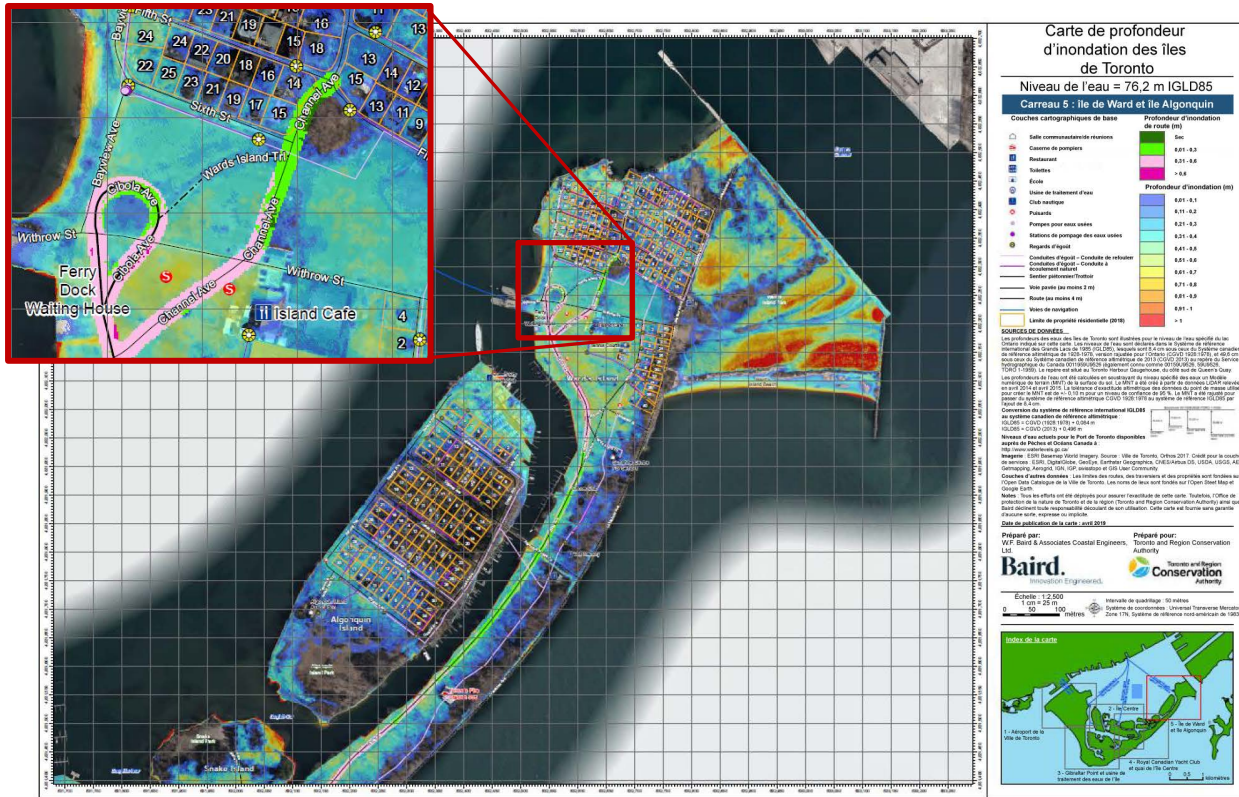


Figure 27. Exemple de carte de profondeur d'inondation pour les îles de Toronto (photo : Baird, 2019).



Figure 28. Exemple de carte montrant les limites de risque d'inondation (ligne bleue continue), les limites de risque d'érosion (ligne jaune continue) et le niveau d'inondation pour une PDA de 1 % (ligne bleue en pointillés) (photo : Baird, 2019).

## 9 Évaluation de la vulnérabilité et des conséquences

Comme expliqué dans la section 2.1, les **conséquences** d'une inondation côtière sont fonction des caractéristiques du danger (p. ex. étendue et gravité), de l'**exposition** d'un système (p. ex. un bâtiment, une infrastructure, une collectivité) au danger, et de la **vulnérabilité** du système (c.-à-d. sa capacité à résister, à récupérer et à atténuer les dommages pouvant résulter de ces dangers). La vulnérabilité reflète la **susceptibilité** ou la **fragilité** d'un bâtiment ou d'une infrastructure à un danger. Pour le même niveau d'exposition, un bâtiment en béton armé peut être plus robuste qu'un bâtiment en bois et, par conséquent, potentiellement moins vulnérable aux dommages dus aux inondations côtières, aux impacts des vagues et aux tsunamis.

Une évaluation des conséquences destinée à soutenir ou à éclairer la conception de bâtiments ou d'infrastructures consiste à combiner des informations dérivées de l'évaluation des dangers (section 8), qui détermine l'exposition aux risques d'inondation côtière, avec des informations sur la sensibilité (p. ex. les courbes profondeur-dommages) pour déterminer les conséquences des inondations.

### 9.1 Rôle de l'évaluation de la vulnérabilité et des conséquences dans la pratique de conception

Lorsqu'il y a exposition à des risques d'inondation côtière (dans des scénarios actuels ou futurs), le processus de conception des bâtiments et des infrastructures représente une opportunité d'intégrer des mesures qui peuvent aider à prévenir ou à atténuer les dommages résultant des inondations côtières et, ce faisant, à réduire le risque. La plupart des méthodologies de conception intègrent certains éléments d'évaluation de la vulnérabilité ou des conséquences, de façon implicite ou explicite. Par exemple, le Code canadien sur le calcul des ponts routiers (Groupe CSA, 2019) inclut un « facteur de conséquence » pour la conception des fondations et des systèmes géotechniques, qui ajuste la fiabilité cible en fonction des conséquences de la défaillance, et un « facteur de résistance », qui prend en compte la variabilité des matériaux, la qualité de l'exécution, le mode de défaillance et l'incertitude (qui ont tous une incidence sur la vulnérabilité du système). Les données sur la vulnérabilité des bâtiments et des infrastructures, telles que les courbes profondeur-dommages, fournissent un moyen d'évaluer les conséquences des inondations pour une configuration de système donnée (c.-à-d. conception de bâtiments ou d'infrastructures). Cela permet d'intégrer des informations sur la résistance, la résilience et la réparabilité des bâtiments et des infrastructures (c'est-à-dire la vulnérabilité) dans une évaluation des risques d'inondation côtière (sections 6.10 et 10.3) pour éclairer les décisions de conception.

Les résultats d'une évaluation des conséquences sont intégrés à l'évaluation des risques (section 10). En fonction des résultats de l'évaluation des risques, des besoins de mesures supplémentaires pour réduire la vulnérabilité peuvent être identifiés. Celles-ci peuvent inclure des mesures de conception de bâtiments et d'infrastructures (qui n'influent généralement pas sur l'exposition mais améliorent la capacité de résister aux dommages, d'en récupérer et de les atténuer) ou d'autres mesures de réduction des risques d'inondation (p. ex. l'aménagement du territoire, les programmes communautaires de protection contre les inondations ou des infrastructures naturelles visant à réduire l'exposition). Les avantages et les coûts des différentes mesures peuvent être intégrés dans les itérations des évaluations des conséquences et des risques, pour soutenir une conception robuste et économique.

## 9.2 Approche générale

L'approche globale de l'évaluation de la vulnérabilité peut aller de qualitative à quantitative, en fonction de divers facteurs (voir le Tableau 5 de la section 7.3). Dans certains cas, il peut être approprié d'utiliser l'exposition comme indicateur supplétif de la vulnérabilité, au cas où la sensibilité à différents niveaux de danger serait difficile à déterminer de manière fiable. Bien que les mesures quantitatives soient généralement considérées comme plus robustes, il n'est pas toujours possible de trouver les données appropriées pour étayer ce type d'évaluation.

Les évaluations qualitatives de la vulnérabilité peuvent nécessiter des discussions avec les résidents locaux pour mieux comprendre quels bâtiments et systèmes d'infrastructure ont été exposés à des inondations dans le passé, et comment ils ont réagi ou résisté à ces événements. Cette approche par l'expérience peut éclairer la conception de nouveaux bâtiments ou guider les choix de modernisation, mais peut passer à côté de vulnérabilités importantes dans le contexte de l'évolution des profils de risque (section 2.3) et, par conséquent, il est préférable d'inclure également des approches quantitatives, lorsque cela est possible.

Les évaluations quantitatives de la vulnérabilité des bâtiments et des systèmes d'infrastructure requièrent généralement l'utilisation de fonctions de dommages (les autres termes utilisés incluent les courbes de vulnérabilité, les courbes de susceptibilité, les courbes de fragilité ou les courbes profondeur-dommages - voir la section 6.10). Ces fonctions quantifient les dommages attendus pour une mesure d'exposition aux dangers donnée (p. ex. la profondeur de l'eau). Les fonctions de dommages aux bâtiments et aux infrastructures peuvent être utilisées pour estimer le pourcentage de dommages et/ou les dommages financiers à la structure et au contenu, ou la probabilité d'un niveau spécifié de dommages (p. ex. des dommages mineurs, un effondrement de bâtiment, etc.) pour la profondeur de l'eau (ou hauteur, vitesse, flux de quantité de mouvement des vagues, etc.) à l'emplacement du bâtiment ou de l'infrastructure. Les dommages financiers devraient être combinés avec d'autres indicateurs de conséquences (section 9.5.5) pour donner une image plus globale des conséquences des inondations.

## 9.3 Évaluation de l'exposition

L'exposition décrit ce qui se trouve dans une zone de risque d'inondation et doit être évaluée pour plusieurs scénarios de risques d'inondation. L'exposition des bâtiments et infrastructures proposés ou existants aux risques d'inondation côtière peut être déterminée à partir de la cartographie des risques d'inondation côtière existante ou des évaluations des risques spécifiques au site (voir la section 8). La cartographie des dangers devrait, au minimum, délimiter la région inondée par des PDA d'événements d'inondation spécifiques et peut inclure des informations sur les profondeurs d'inondation, la vitesse de l'eau et/ou les conditions des vagues (p. ex. hauteur des vagues, période, forces, élévations de jets de rive, débits de débordement de la vague). Pour les études sur les tsunamis, les zones d'inondation (basées sur les élévations maximales de la remontée de la vague), les profondeurs ou le flux de quantité de mouvement (ou les vitesses induites par le tsunami) peuvent être utilisés comme paramètres de risque (section 8). Les dangers évalués peuvent ensuite être classés et comparés à l'emplacement (existant ou proposé) des bâtiments, des infrastructures et d'autres récepteurs pour déterminer l'exposition. L'exposition est ensuite généralement évaluée en superposant l'étendue des risques d'inondation (et potentiellement d'autres caractéristiques de danger) avec l'emplacement des surfaces au sol de bâtiments/d'infrastructures existants ou proposés et d'autres ensembles de données socioculturelles et environnementales. Pour les évaluations des risques initiales et de haut niveau (voir la section 7.3), ou si aucune donnée détaillée sur la vulnérabilité des bâtiments/infrastructures n'est disponible, l'évaluation de l'exposition à elle seule peut fournir des

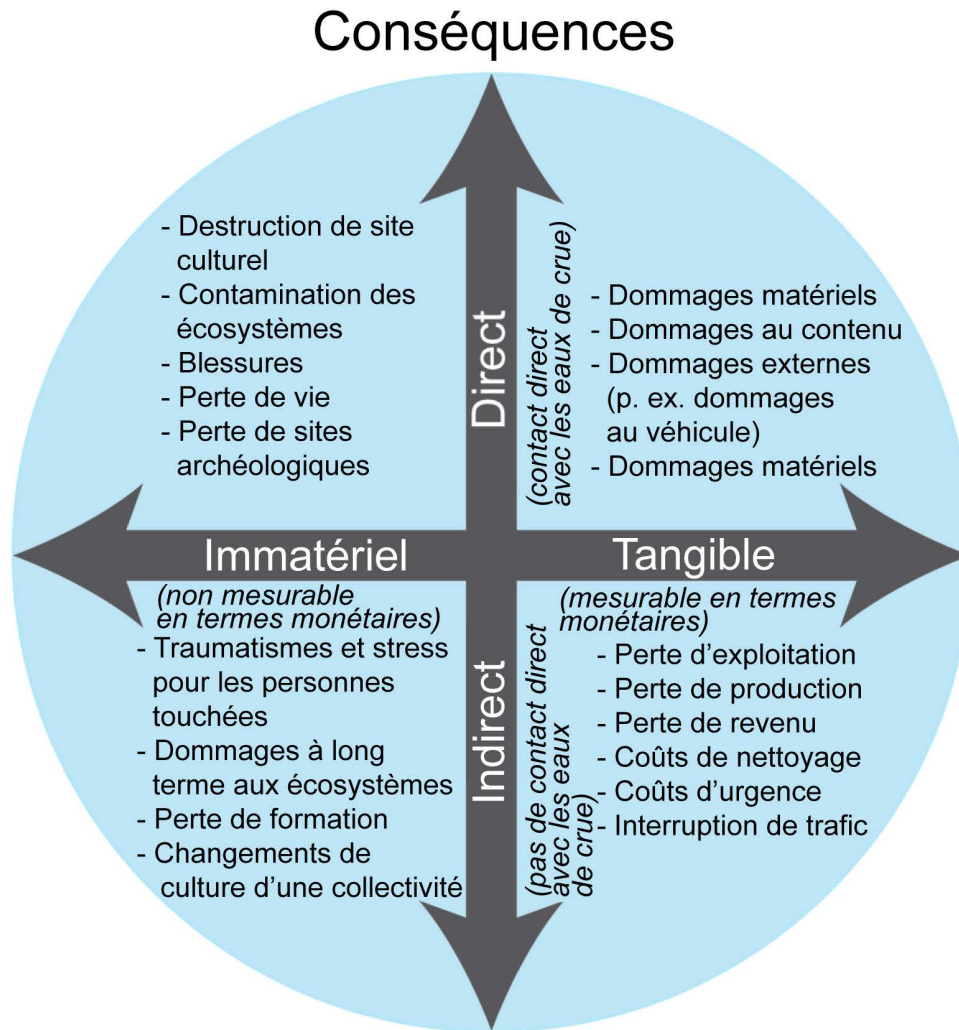
informations précieuses sur les risques d'inondation côtière. Elle fournit des estimations des impacts totaux (p. ex. le nombre total de bâtiments ou d'infrastructures touchés - ou le nombre total de personnes touchées - dans une zone inondable).

## 9.4 Évaluation de la vulnérabilité (ou de la fragilité)

La fragilité des bâtiments et des infrastructures proposés ou existants face aux risques d'inondation côtière peut être caractérisée par des fonctions de dommages existantes dérivées de levés post-inondation (voir la section 6.10), d'études ou de levés spécifiques au site, ou de fonctions de fragilité déterminées par l'expérience ou l'analyse. Les fonctions de dommages aux bâtiments et aux infrastructures peuvent être utilisées pour estimer le pourcentage de dommages et/ou les dommages financiers à la structure et au contenu, ou la probabilité d'un niveau spécifié de dommages (p. ex. des dommages mineurs, un effondrement de bâtiment, etc.) pour la profondeur de l'eau (ou hauteur, vitesse, flux de quantité de mouvement des vagues, etc.) à l'emplacement du bâtiment ou de l'infrastructure.

## 9.5 Évaluer les conséquences

Les conséquences (ou répercussions) des inondations peuvent être décrites comme tangibles (des valeurs monétaires peuvent être attribuées) ou intangibles (plus difficiles à attribuer des valeurs monétaires), et directes (résultant directement de l'exposition aux risques d'inondation) ou indirectes (se produisant comme un résultat secondaire d'un événement d'inondation). À titre d'exemple de conséquences tangibles et directes, mentionnons le coût de la réparation et de la restauration des objets endommagés (dommages au contenu) et des systèmes physiques (dommages physiques). À titre d'exemple de conséquences tangibles et indirectes, mentionnons les coûts encourus à la suite de l'interruption des activités, de la perte de productivité et du nettoyage après les inondations. Les conséquences immatérielles peuvent être directes (p. ex. la perte de sites archéologiques en raison d'inondations ou la contamination des écosystèmes par contact direct avec des eaux de crue contaminées) et indirectes (p. ex. un traumatisme résultant d'inondations).



**Figure 29. Types de conséquences des inondations (adapté de l'UNDRR avec des contributions supplémentaires de Messner et al., 2006, et de RNCAN, 2017).**

### 9.5.1 Inondations de tempête côtière

Pour les zones côtières exposées à des ondes de tempête ou à des inondations de marée où la profondeur des crues est faible (ce qui est indicateur de faibles hauteurs de vagues) ou l'exposition aux vagues est limitée (p. ex. l'inondation peut être utilisée s'il n'existe pas d'autres courbes de fragilité plus pertinentes localement. Les courbes profondeur-dommages de RNCAN (2017) supposent une faible capacité de récupération, avec un remplacement complet du revêtement de sol et des murs (cloisons sèches, isolant, etc.) pour toute profondeur d'inondation. Les dommages supplémentaires pouvant résulter de petites vagues, de la contamination par l'eau salée, d'un temps d'avertissement minimal, etc. peuvent être insignifiants par rapport aux durées d'inondation plus longues et à la teneur en boue plus élevée typique des inondations fluviales. Pour les zones côtières exposées à de grandes hauteurs de vagues, la possibilité de dommages importants aux bâtiments et d'effondrement doit être envisagée. Les inspections de bâtiments post-ouragan sur la côte américaine du golfe du Mexique ont signalé une destruction complète des murs à ossature de bois et des murs de maçonnerie non renforcée sous l'élévation de la crête des

vagues (voir par exemple FEMA, 2006, 2009, 2011). Dans certaines régions côtières, les débris portés par les eaux peuvent être un facteur important influant sur les dommages lors des inondations côtières, touchant en particulier les bâtiments et les infrastructures situés près du rivage. Cependant, il existe actuellement peu de données disponibles pour évaluer les dommages potentiels associés aux débris portés par les eaux. La littérature sur les répercussions des débris sur les infrastructures côtières se limite principalement aux tsunamis (Nistor et al., 2017) et aux environnements intérieurs (fluviaux), où les échelles et les processus moteurs sont très différents des conditions de tempête dans les eaux côtières.

Pour les inondations dues aux ondes de tempête côtières (hauteurs de vagues limitées), les dommages directs peuvent être estimés à partir des informations suivantes propres à chaque bâtiment (voir RNCan, 2017) :

- **Niveau d'inondation** : Élévation de la surface de l'eau de l'événement de PDA spécifié.
- **Classement d'un immeuble** : Qualité de la construction et nombre d'étages. La valeur évaluée ou des photographies peuvent être utilisées pour classer le bâtiment.
- **Usage d'un immeuble** : Usage résidentiel, commercial, institutionnel.
- **Présence de parcs de stationnement étagés au sous-sol ou sous le niveau du sol** : Des dommages importants peuvent survenir dans le cas de sous-sols finis.
- **Élévation du rez-de-chaussée** : La profondeur de l'inondation (sous-sol et rez-de-chaussée) est calculée par rapport à l'élévation du rez-de-chaussée.
- **Superficie du rez-de-chaussée** : Le total des dommages au bâtiment est calculé à partir du taux unitaire des dommages (\$/m<sup>2</sup>) et de la superficie du rez-de-chaussée.

### 9.5.2 Tsunamis

Jusqu'à ce que des courbes de fragilité soient élaborées pour des applications canadiennes, les courbes de fragilité du tsunami élaborées à partir du tremblement de terre et du tsunami de Tohoku en 2011 pour le Japon (Suppasri et al., 2012) sont recommandées, tout en notant qu'elles peuvent ne pas refléter fidèlement la conception des bâtiments et des infrastructures au Canada (section 6.10.1). De plus, les courbes de fragilité sont des courbes empiriques dérivées de levés d'évaluation post-catastrophe, et sont donc spécifiques au tsunami japonais de 2011, et les dommages associés peuvent varier fortement lorsqu'ils sont appliqués au Canada (Rossetto et al., 2019). Dans les cas où il est possible qu'un tsunami soit généré par un tremblement de terre proximal, les conséquences sismiques induites (comme les dommages aux bâtiments/infrastructures) du tremblement de terre précédant le tsunami doivent être prises en compte.

Pour les inondations dues au tsunami, la probabilité d'un niveau spécifié de dommages à un bâtiment peut être estimée à partir de Suppasri et al. (2012) :

- **Type de matériau de construction** : Béton armé, acier, bois ou maçonnerie.
- **Nombre d'étages** : Pour les bâtiments en béton armé et en bois uniquement.
- **Profondeur de l'eau** : Les courbes ont été élaborées pour des profondeurs d'eau de 0,5 à 20 m.

Les dommages directs dus à un tsunami peuvent être estimés à partir de la valeur estimée du bâtiment et du niveau de dommage (voir par exemple, Wiebe et Cox, 2014).

### 9.5.3 Dommages directs aux bâtiments

Le niveau de dommages physiques subis par les bâtiments lors d'une inondation est généralement lié aux caractéristiques du bâtiment (p. ex. matériaux, qualité du bâtiment, nombre d'étages, etc.), tandis que le

niveau de dommages au contenu est généralement lié à l'utilisation du bâtiment et à l'élévation des services publics et autres éléments. Par exemple, un bâtiment avec des services publics surélevés est moins susceptible d'être endommagé qu'un bâtiment avec des services publics à un niveau inférieur (p. ex. sous-sol). Une fois que l'exposition d'un bâtiment aux risques d'inondation côtière a été établie, les dommages potentiels peuvent être évalués pour une gamme de scénarios.

Comme indiqué dans la section 6.10, les courbes de dommages en profondeur pour les bâtiments exposés aux inondations sont fournies dans RNCan (2017). Bien que ce rapport soit en cours de révision, les courbes profondeur-dommages représentent une base pour évaluer les dommages aux composants physiques et au contenu des bâtiments dans divers scénarios de risque d'inondation côtière et pour différents types de bâtiments. Ces fonctions de fragilité peuvent être utilisées pour estimer la quantité (ou la probabilité) des dommages pour un paramètre d'inondation spécifié (p. ex. la profondeur de l'eau). Les courbes peuvent être facilement modifiées pour évaluer l'impact de l'élévation de certains services publics (p. ex. fournaise, chauffe-eau, panneau électrique) ou en utilisant des matériaux plus résistants aux inondations (p. ex. un plancher en béton). Au fil du temps, il est prévu que des ensembles de données supplémentaires deviendront disponibles pour mieux caractériser les répercussions des différents types de dangers (p. ex. les vagues), des types de bâtiments ou des mesures de résilience au niveau des bâtiments sur les niveaux de dommages, ou pour mieux refléter les différentes conditions locales.

#### **9.5.4 Dommages directs aux infrastructures**

Pour les infrastructures telles que les routes et autres infrastructures de transport, les taux unitaires de dommages directs peuvent être basés sur les coûts antérieurs de réparation et de remplacement. RNCan (2017) fait remarquer que les routes et les ponts sont les éléments les plus importants en matière de dommages aux infrastructures publiques et que les municipalités disposent généralement d'informations fiables sur ces coûts.

Les fonctions de dommages aux infrastructures ne sont pas largement disponibles et doivent être estimées en fonction des conditions spécifiques au site (durée des crues, profondeur de l'eau, vitesse de l'eau, vagues, affouillement) lorsque cela est possible. Les infrastructures publiques situées dans les zones côtières inondables peuvent inclure : les routes et les infrastructures de transport (ponts, lampadaires, etc.); les parcs et les installations récréatives (sentiers, bancs, stationnements, toilettes, etc.); les réseaux d'aqueduc, d'assainissement et d'égouts pluviaux; les systèmes de distribution d'énergie électrique; les réseaux de communication. Les dommages directs possibles aux infrastructures peuvent inclure les ponts, ponceaux et routes détruits; les réseaux d'égouts sanitaires inondés; les stations de pompage endommagées; les systèmes d'eau potable contaminés; les systèmes électriques endommagés; les commandes d'éclairage public et de feux de circulation endommagées; etc.

Le coût de réparation et de remplacement des routes et des ponts à la suite d'inondations est un élément important des dommages aux infrastructures publiques (RNCan, 2017). Les dommages aux infrastructures comprennent les coûts de réparation initiaux et la durée de vie réduite (ce qui est difficile à quantifier). Les coûts unitaires de remplacement dérivés des coûts réels du projet (p. ex. le coût par kilomètre de route) peuvent être utilisés pour estimer les dommages causés aux infrastructures existantes ou aux nouvelles infrastructures exposées à des risques similaires, à condition qu'il y ait suffisamment d'informations disponibles sur le danger (p. ex. profondeurs, vitesses, etc.). À mesure que les évaluations quantitatives des risques se répandent, il est prévu que des ensembles de données supplémentaires sur les dommages deviendront disponibles pour différents types d'infrastructure et de mesures de résistance/résilience aux inondations, et soutiendront une meilleure prise de décision par les concepteurs.

### 9.5.5 Conséquences socio-culturelles, environnementales et économiques indirectes

Pour les bâtiments et les infrastructures exposés aux inondations, il peut y avoir de nombreuses conséquences au-delà des dommages physiques. Celles-ci peuvent inclure un large éventail de conséquences économiques, sociales, culturelles et environnementales potentielles, qui devraient être évaluées afin d'avoir une image plus globale du risque d'inondation. Une approche holistique des évaluations des risques est recommandée par les pratiques exemplaires internationales (SIPC, 2015; Nations Unies, 2016) et au Canada par le biais du concept de « l'ensemble de la société » dans la Stratégie de sécurité civile pour le Canada (Sécurité publique Canada, 2019b). Les conséquences holistiques informent le risque global associé aux dommages causés par les inondations à un bâtiment ou une infrastructure, où des conséquences potentielles plus élevées requièrent des niveaux plus élevés de conception résiliente aux inondations.

Pour quantifier et résumer ces diverses conséquences de manière cohérente, des indicateurs sont généralement utilisés. Ceux-ci peuvent être basés sur le document des Nations Unies sur les « Indicateurs pour la réduction des risques de catastrophe » (Nations Unies, 2016; SIPC, 2016), qui englobe les objectifs de réduction des risques de catastrophe tels que formulés dans le Cadre d'action de Sendai (SIPC, 2015), les lignes directrices d'évaluation du risque de l'Australie (AIDR, 2015) et le profil de risques canadien révisé (Stantec Consulting Ltd. et Ebbwater Consulting, 2017). Sur la base de ces ressources, les 6 catégories d'indicateurs différentes suivantes sont recommandées pour l'évaluation :

- 1) personnes touchées;
- 2) mortalité;
- 3) économie;
- 4) infrastructure essentielle et interruption des services de base;
- 5) environnement;
- 6) culture.

Étant donné que les conséquences des inondations peuvent être variées, allant des conséquences directes aux conséquences indirectes, et du plus tangible à l'immatériel (Messner et al., 2006) (Figure 29), il peut être difficile de les quantifier et de les mesurer. Par conséquent, les approximations sont généralement utilisées pour décrire les conséquences mesurables pour chacun des indicateurs lorsque les données directes ne sont pas disponibles. Des approximations peuvent être évaluées quantitativement pour différents scénarios d'inondation (p. ex. le nombre de personnes dans une zone inondable ou la valeur économique des bâtiments dans une zone inondable). Bien que ces approximations ne puissent généralement pas saisir pleinement toutes les conséquences des inondations sur une collectivité et sur les écosystèmes, ils constituent toujours un bon point de départ pour l'examen et la discussion, d'autant plus que la plupart des conséquences indirectes et intangibles sont difficiles à quantifier et à monétiser.

Les dommages indirects (p. ex. perte de productivité, déplacement, nettoyage, etc.) dépendent de nombreux facteurs, tels que la gravité de l'inondation et la disponibilité des ressources à réparer et à reconstruire. Les dommages indirects résidentiels sont généralement estimés en pourcentage des dommages directs, tandis que les dommages indirects commerciaux et institutionnels peuvent être estimés en fonction de l'utilisation du bâtiment. Les fonctions d'interruption des activités fournies dans RNCan (2017) peuvent être utilisées pour estimer la perte de productivité et la durée des perturbations liées à l'utilisation du bâtiment (p. ex. bureau, commerce de détail, etc.) et la profondeur des inondations. RNCan (2017) conseille que les durées de déplacement résidentiel soient estimées en fonction des conditions locales en tenant compte de problèmes tels que la disponibilité des entrepreneurs, des inspecteurs et de l'équipement.

La disponibilité des données est une limitation majeure même lors de la définition des approximations (section 6.11). Par exemple, les données nécessaires pour une évaluation spatialement détaillée ne sont souvent pas disponibles avec une résolution suffisante (p. ex. la population du recensement est généralement signalée dans les aires de diffusion, qui sont relativement petites pour les centres-villes, mais s'étendent souvent sur plusieurs kilomètres carrés dans les zones rurales). Des hypothèses sont généralement requises, ce qui ajoute un degré d'incertitude. Des niveaux de confiance peuvent être attribués pour quantifier l'incertitude et l'inclure dans l'évaluation des risques (AIDR, 2015).

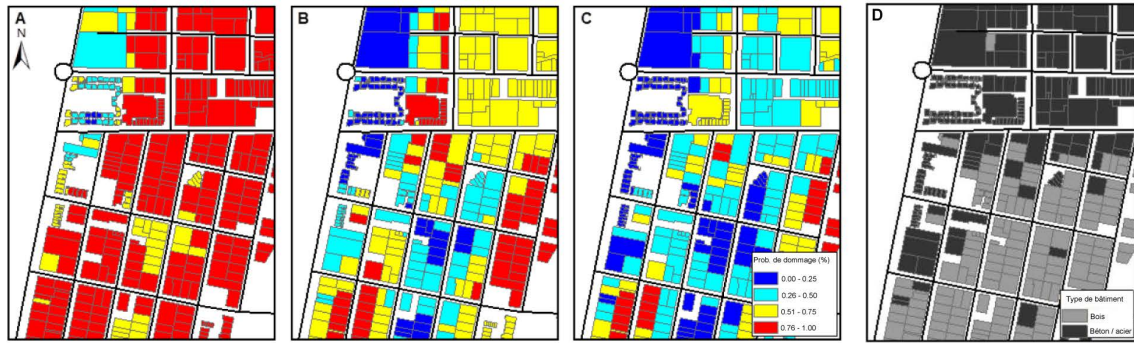
Les estimations des conséquences immatérielles doivent être éclairées par les valeurs et le contexte locaux. Par exemple, dans une collectivité, les gens peuvent se soucier profondément de l'environnement sensible qui les entoure, ce qui indique qu'une évaluation des risques d'inondation devrait tenir compte des conséquences environnementales éventuelles des dommages aux bâtiments liés aux inondations (p. ex. le rejet de matières dangereuses) avec plus de détails. La prise en compte des valeurs locales favorisera également l'acceptation d'un projet de construction ou d'infrastructure dans la collectivité locale. La participation des intervenants (y compris les partenaires, le grand public et les autres parties intéressées ou touchées), tel que discuté dans la section 4, est d'une importance capitale pour comprendre ces valeurs locales, cibler une évaluation des risques d'inondation sur les besoins locaux et éclairer la sélection des approximations pour l'évaluation quantitative des risques. Elle peut également ajouter une composante plus qualitative à l'évaluation quantitative des risques, ce qui peut aider à comprendre les conséquences les plus intangibles et indirectes.

Les répercussions intangibles sur la santé humaine dépendent fortement de l'âge, des conditions médicales existantes, du revenu, du soutien familial et communautaire, de l'état de préparation et d'autres facteurs (RNCAN, 2017). Le simple fait d'estimer le nombre de personnes touchées dans différents scénarios de PDA ainsi que d'autres informations démographiques peut être informatif.

## 9.6 Présentation d'informations sur la vulnérabilité et les conséquences

La cartographie est un moyen efficace de communiquer la probabilité ou le niveau de dommages que les bâtiments ou les systèmes d'infrastructure peuvent subir pour un risque donné (p. ex. inondations dues aux ondes de tempête, tsunamis) et la PDA. Alors que les cartes des dangers délimitent l'étendue géographique du danger pour une PDA donnée, les cartes de vulnérabilité intègrent des informations supplémentaires sur la capacité des différents types de bâtiments et d'infrastructures à résister ou se remettre des risques d'inondation.

La Figure 30 donne un exemple de carte de vulnérabilité de bâtiment pour la ville de Seaside, en Oregon. Les cartes montrent que la probabilité de subir des dommages modérés est similaire pour presque tous les bâtiments (panneau A), mais que la probabilité de dommages importants ou complets (panneaux B et C) varie selon le type de matériau de construction et l'exposition au risque de tsunami.



Les panneaux A, B et C montrent la probabilité de dommages modérés, importants et complets, respectivement, pour un événement de tsunami pour une PDA spécifiée en fonction du type de matériau de construction (le panneau D montre les bâtiments en bois en gris clair et les bâtiments en béton ou en acier en gris foncé) et paramètres de risque de tsunami (profondeurs de l'eau et flux de quantité de mouvement) dérivés de la modélisation numérique.

**Figure 30. Exemple de création de cartes de vulnérabilité (adapté de Wiebe et Cox, 2014).**

Les informations sur la vulnérabilité peuvent également être présentées dans des tableaux ou des diagrammes qui permettent de comparer les performances relatives de différents types de bâtiments ou de composants de système d'infrastructure avec l'exposition à un danger.

## 10 Évaluation du risque

Comme indiqué dans la section 2, le **risque** est fonction de la **probabilité** qu'un événement se produise et des **conséquences** si cet événement se produit. Une fois les évaluations des dangers et des conséquences réalisées, l'évaluation des risques est réalisée en multipliant la probabilité d'événements de risque d'inondation côtière par les conséquences (p. ex. les dommages) de chaque événement. L'évaluation des risques peut être à un niveau relativement élevé (p. ex. en comptant le nombre d'actifs touchés) ou peut être plus détaillée, lorsque les dommages directs, indirects, tangibles et intangibles sont estimés pour une gamme de scénarios de PDA. Une considération clé est de savoir comment communiquer efficacement les informations sur les risques qui en résultent aux intervenants et éclairer la prise de décision. Les sections suivantes décrivent plusieurs exemples d'indicateurs de risque et de méthodes de communication des risques.

### 10.1 Dommages annuels moyens

Pour les évaluations quantitatives des risques, les dommages annuels moyens sont un indicateur de risque utile et peuvent être utilisés pour soutenir les évaluations comparatives et la priorisation des solutions de remplacement d'atténuation, ou pour évaluer le rendement du capital investi pour différentes stratégies de gestion des risques d'inondation (comme le renforcement des mesures de résilience). Les dommages annuels moyens (DAM), ou dommages annuels prévus, expriment les coûts monétisés des dommages auxquels on peut s'attendre au cours d'une année donnée, en moyenne sur plusieurs années. Compte tenu de la nature stochastique des inondations, les coûts réels des dommages au cours d'une année donnée peuvent être beaucoup plus élevés ou inférieurs au DAM. Si les dommages associés à plusieurs événements de PDA peuvent être monétisés (Figure 31, panneau de gauche) comme résultats des évaluations des dangers et de la vulnérabilité, les relations qui en résultent peuvent être utilisées pour extrapoler et interpoler les dommages pour d'autres événements (Olsen et al., 2015). En règle générale, les dommages augmentent avec l'augmentation de la période de récurrence (PDA décroissante), comme indiqué dans la Figure 31 (panneau de gauche). L'intégrale de cette courbe de probabilité des dommages sur toutes les PDA donne une estimation des DAM (p. ex. Messner et al., 2006; Meyer et al., 2009). Ainsi, la mesure des DAM fournit une image complète du risque pour de nombreuses probabilités de dangers - des événements petits mais fréquents aux événements catastrophiques rares, et de leurs conséquences cumulatives au fil du temps. Cependant, les événements graves qui entraînent des dommages importants ont une probabilité d'occurrence plus faible, et donc un poids moindre en termes de contribution aux DAM. Ceci est illustré par la courbe de densité de risque, qui est obtenue en multipliant la probabilité de chaque événement par les dommages associés (Figure 31, panneau de droite). Cette courbe est utile pour identifier les événements qui contribuent le plus au risque global.

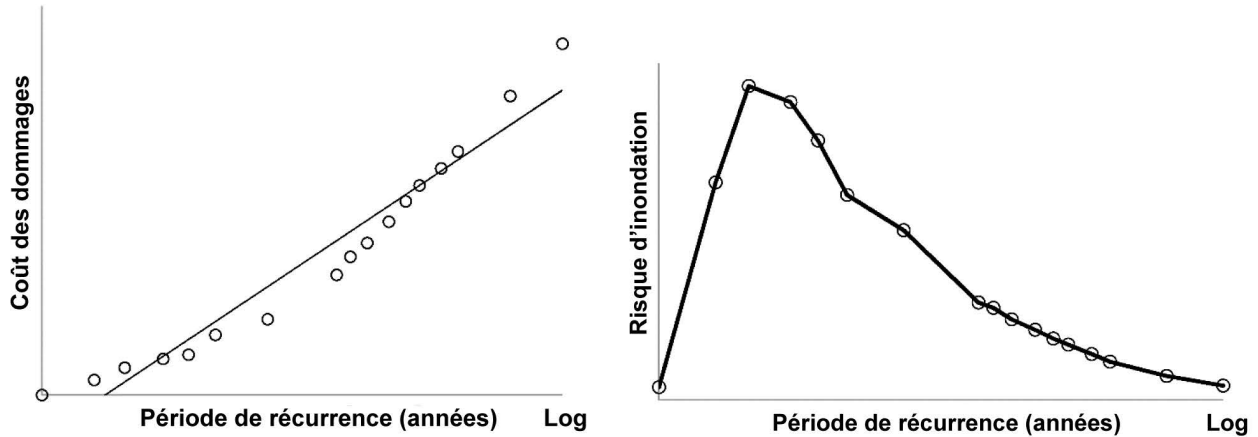


Figure 31. Relation entre la PDA et les dommages (à gauche) et la courbe de densité des risques d'inondation (à droite) (source : Olsen et al., 2015).

## 10.2 Cartes, tableaux et figures des risques

Les informations sur les risques d'inondation peuvent être présentées sous forme de cartes, de tableaux et de figures. Les estimations des dommages dus aux inondations et les informations quantitatives sur les risques peuvent être présentées pour des bâtiments et des actifs d'infrastructure individuels, ou agrégées (p. ex. pour protéger la vie privée des résidents et des entreprises dans le cas des évaluations des risques pour la collectivité). Les études de cas de Tofino, en Colombie-Britannique, et des îles de Toronto, en Ontario, ci-dessous donnent des exemples de différentes méthodes de présentation de l'information sur les risques. De plus en plus, des technologies telles que la réalité virtuelle sont utilisées pour améliorer la présentation et la diffusion des informations sur les risques d'inondation (Solinska-Novak et al., 2018).

### Étude de cas : Tofino, en Colombie-Britannique

Des cartes de risques spatiales ont été élaborées à l'aide d'une approche d'évaluation des risques à scénarios multiples pour une évaluation des risques d'inondation côtière réalisée pour le district de Tofino, en Colombie-Britannique (Ebbwater, 2019). Le risque d'inondation a été évalué pour un ensemble d'indicateurs, notamment les personnes, l'économie, les infrastructures essentielles, l'environnement et la culture. Pour chaque indicateur, les conséquences des inondations dues aux tempêtes côtières ont été évaluées pour cinq PDA (6,7 %, 2 %, 1 %, 0,5 % et 0,2 %) et trois scénarios d'élévation relative du niveau de la mer. En utilisant les résultats des conséquences, des courbes de probabilité de dépassement ont été élaborées et le risque total a été calculé en intégrant la zone sous la courbe de densité du risque d'inondation. Le risque total représentait donc la moyenne à long terme approximative des conséquences des inondations sur une base annuelle (p. ex. dommages annuels moyens). Des cartes des risques spatiales (dommages annuels moyens) ont été produites pour chaque indicateur sur une grille de 50 m x 50 m. La grille a été appliquée pour donner une image cohérente du risque, mais aussi pour gérer la perception du public en réduisant le plus possible la probabilité qu'une propriété individuelle soit identifiée comme à haut risque. Les cartes qui en résultent mettent en évidence les zones à haut risque d'inondations dues aux tempêtes côtières, intégrant à la fois la probabilité d'occurrence et les conséquences associées, et tenant donc compte à la fois des effets cumulatifs des petites mais fréquentes inondations et des rares inondations catastrophiques. La carte des risques pour l'économie (valeur totale du bâtiment) pour le scénario d'élévation relative du niveau de la mer de 1 m est présentée dans la Figure 32.

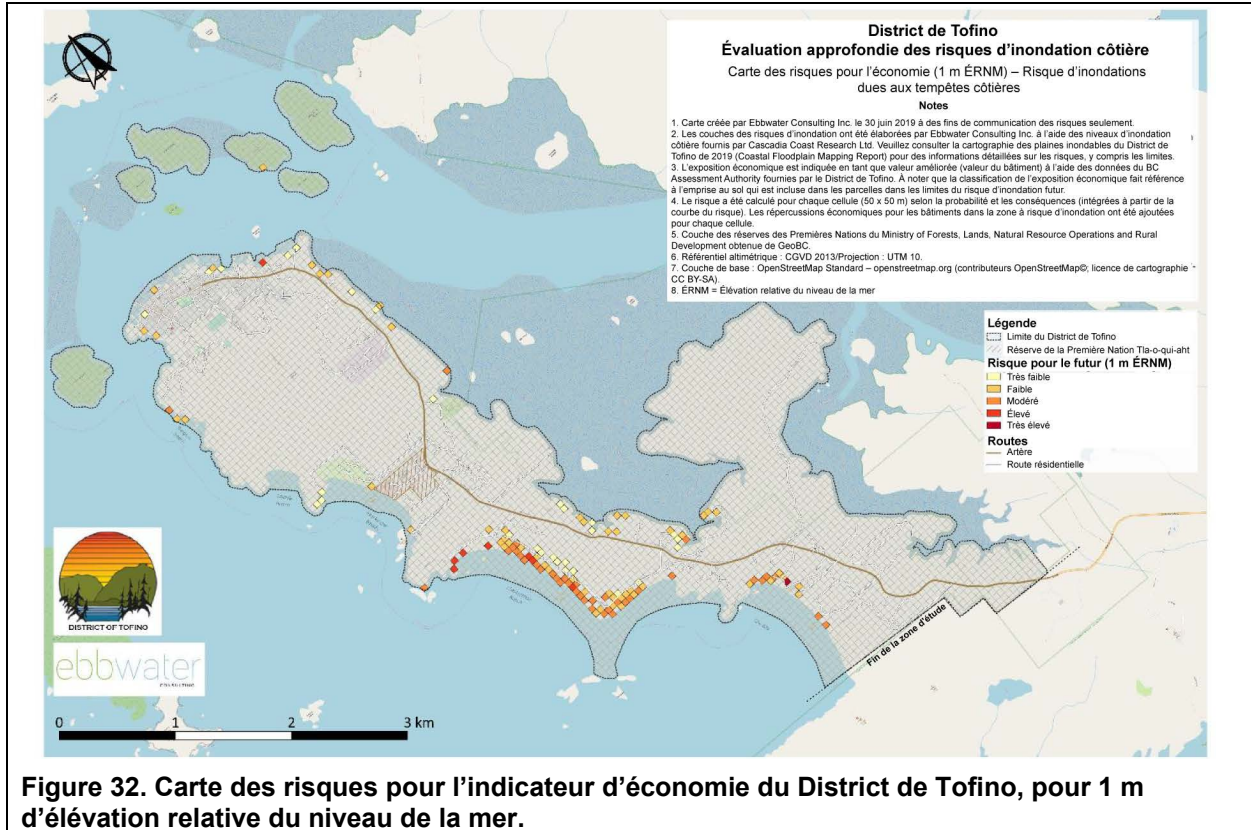


Figure 32. Carte des risques pour l'indicateur d'économie du District de Tofino, pour 1 m d'élévation relative du niveau de la mer.

### Étude de cas : Îles de Toronto, en Ontario

Une évaluation des risques d'inondation côtière a été réalisée pour les îles de Toronto (lac Ontario) afin de comprendre les risques pour les bâtiments et les infrastructures des îles et pour soutenir l'élaboration de solutions de rechange conceptuelles pour l'atténuation des inondations (Baird, 2019). Le nombre de bâtiments résidentiels touchés par différents événements d'inondation de PDA est indiqué dans le Tableau 6, ce qui indique que les vides sanitaires de 51 maisons sont sujets à des inondations fréquentes (> 10 % PDA) et que la majorité d'entre eux sont situés sur l'île Ward. Ces informations aident à transmettre la répartition spatiale des risques, qui peut être utilisée pour appuyer les décisions sur les domaines où l'atténuation temporaire et à long terme devrait être dirigée et pour éclairer les interventions d'urgence (c'est-à-dire les seuils de niveau de l'eau pour l'évacuation).

**Tableau 6. Nombre estimé de maisons sur les îles de Toronto inondées à des niveaux d'eau de PDA spécifiés.**

PDA	50 %	20 %	10 %	4 %	2 %	1 %	0,5 %	0,2 %
Île Ward	6	6	45	111 (1)	133 (5)	134 (16)	139 (38)	139 (77)
Île Algonquin	0	0	6	25	46	54	62	74 (11)
Total	6	6	51	136 (1)	179 (5)	188 (16)	201 (38)	213 (88)
% de toutes les maisons	2 %	2 %	20 %	53 %	69 %	73 %	78 %	83 %

\*Nombre estimé de bâtiments résidentiels avec inondation au rez-de-chaussée indiqué entre parenthèses

Les dommages directs et indirects aux bâtiments des îles de Toronto ont été estimés par Baird (2019) selon les procédures de RNCan (2017). Les estimations incluent les dommages physiques et de contenu, et les dommages indirects, y compris les perturbations et le nettoyage des affaires (Figure 33). La figure indique que les dommages sont concentrés sur l'île Ward (résidentielle) mais sont de plus en plus importants sur l'île Algonquin (résidentielle) et les autres îles (commerciales) ayant des PDA inférieures. Les dommages liés à la perturbation des activités deviennent substantiels aux PDA à plus faible fréquence. Les dommages annuels moyens pour les bâtiments résidentiels et commerciaux ont été estimés à 492 000 \$ par année.

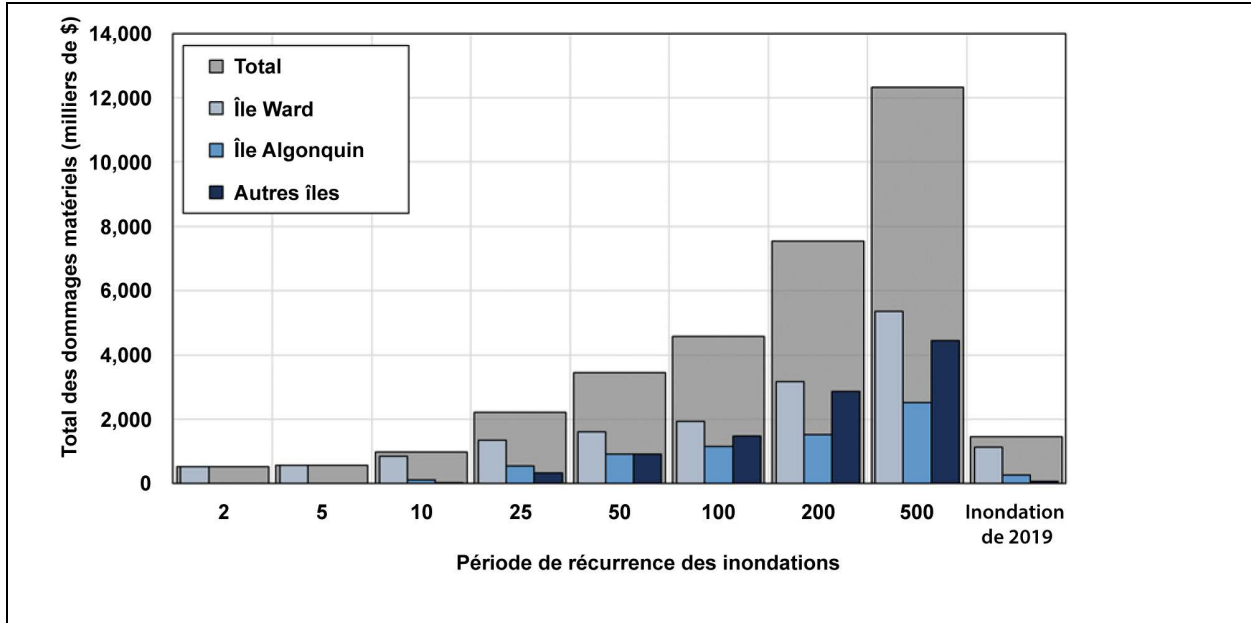


Figure 33. Estimation du total des dommages financiers à différentes PDA des îles de Toronto.

### 10.3 Grilles des risques

Les résultats des évaluations qualitatives ou semi-quantitatives des risques d'inondation peuvent être communiqués à l'aide d'une matrice des risques, qui est un tableau répertoriant les informations sur les risques identifiés (Figure 34). La matrice des risques peut utiliser une échelle relative pour noter les conséquences (p. ex. faible à élevée) et la probabilité d'un événement (p. ex. peu probable à probable). La cote de risque est le produit de la cote des conséquences et de la cote de vraisemblance. Les cotes de risque peuvent être liées à des critères de tolérance au risque (section 5). Les matrices de risques sont relativement faciles à comprendre et sont donc des outils utiles permettant de faire participer les intervenants dans les évaluations des risques, mais elles présentent certains inconvénients en termes de résolution (c'est-à-dire d'attribuer potentiellement la même cote de risque à des risques quantitativement très différents), de subjectivité et d'ambiguïté; par conséquent, ils s'appliquent principalement aux évaluations des risques qualitatifs ou semi-quantitatifs.

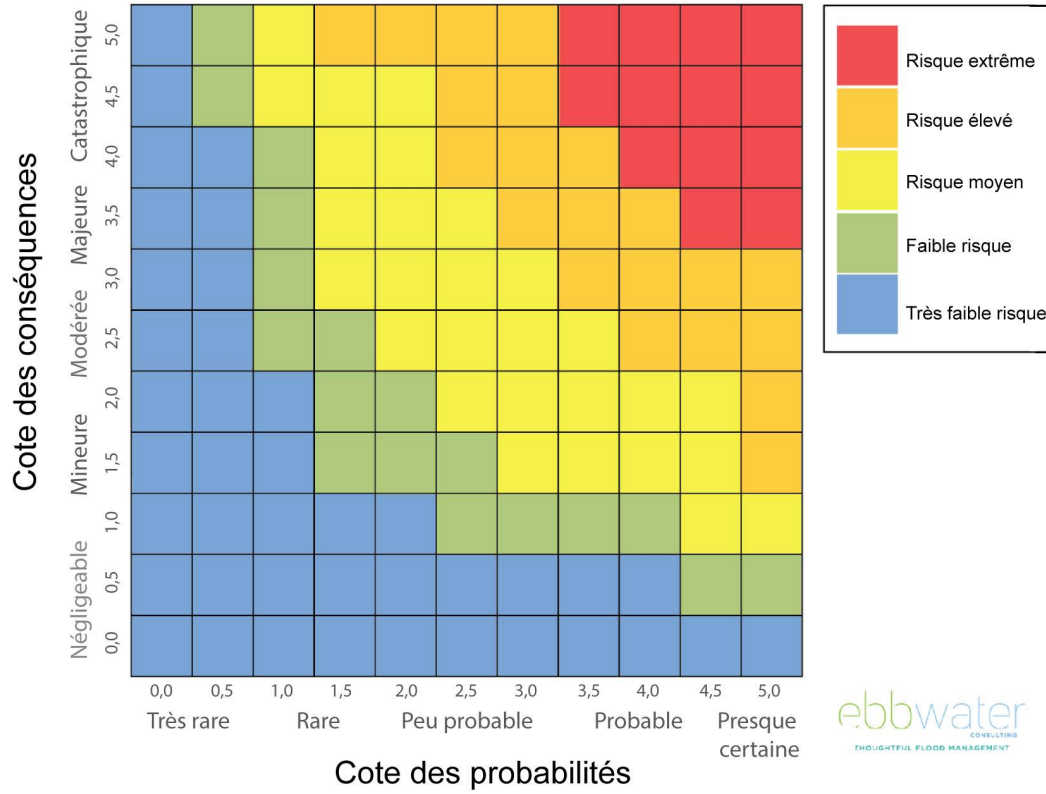


Figure 34. Exemple de matrice de risque d’inondation (Ebbwater Consulting Inc., 2019, CC BY-NC-ND).

## 11 Gestion, atténuation et adaptation des risques

Une fois que les risques d'inondation des bâtiments et des infrastructures côtières sont bien compris ou quantifiés, des mesures appropriées peuvent être prises, ou des stratégies peuvent être mises en œuvre, pour gérer ces risques. Comme expliqué dans la section 1.4.4, le but des présentes lignes directrices n'est pas d'identifier des mesures spécifiques pour la gestion, l'atténuation ou l'adaptation des risques d'inondation côtière. Cependant, cette section fournit des informations contextuelles sur les approches stratégiques de la gestion des risques d'inondation côtière, pour illustrer comment les informations dérivées d'une évaluation des risques d'inondation côtière peuvent être utilisées pour soutenir la prise de décision pour la gestion, l'atténuation et l'adaptation aux risques d'inondation des bâtiments et des infrastructures côtiers.

La réflexion actuelle entourant les stratégies de gestion des risques d'inondation est que l'évitement est généralement l'option privilégiée pour les nouveaux bâtiments et les nouvelles infrastructures (Bowker et al., 2007; Proverbs et Lamond, 2017). Ce type de stratégie peut être mis en œuvre au moyen d'outils de planification et de réglementation qui limitent le développement dans les zones exposées à des risques d'inondation modérés ou élevés (p. ex. en situant les bâtiments et les infrastructures au-dessus des niveaux d'inondation ou en prescrivant des distances de recul). Les programmes de protection contre les inondations à l'échelle des collectivités (p. ex. en intégrant des digues, des ouvrages de protection longitudinaux, des défenses naturelles ou en exploitant des structures naturelles) sont également couramment utilisés pour atténuer les risques. Ce sont traditionnellement les principales stratégies adoptées par les gouvernements provinciaux et municipaux pour gérer les risques d'inondation au Canada. Cependant, l'évitement peut ne pas être une stratégie viable dans des circonstances où il n'y a pas d'autre choix raisonnable que de construire de nouveaux bâtiments ou de nouvelles infrastructures en zone inondable (p. ex. les ponts), où les avantages de la construction dans des zones sujettes aux inondations l'emportent sur les risques, ou là où des bâtiments et des infrastructures existants sont exposés aux risques d'inondation. Même dans ce dernier cas, le réalignement ou le retrait planifié/géré est de plus en plus considéré comme une mesure d'évitement potentielle.

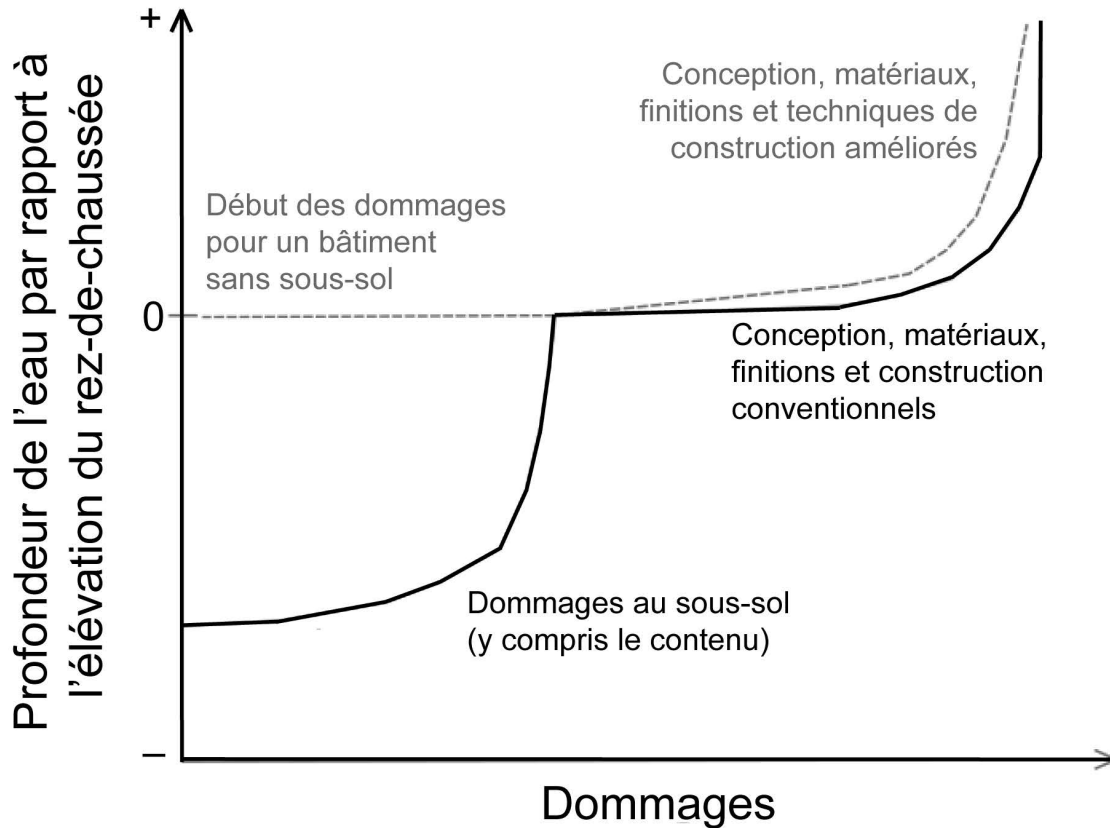
Aucune stratégie de gestion n'élimine complètement le risque d'inondation sur un site donné - il y a toujours un risque résiduel (Bowker et al., 2007). Un événement de tempête avec une probabilité d'occurrence plus faible que celle choisie comme base pour la conception d'une digue (ou pour la prescription des distances de recul des bâtiments) peut entraîner des inondations dommageables ou nuisibles. En outre, on peut s'attendre à ce que les conditions climatiques changeantes ou la détérioration structurelle entraînent des changements dans le risque d'inondation au fil du temps sur un site donné (p. ex. l'élévation relative du niveau de la mer peut entraîner une augmentation des risques d'inondation sur certains sites côtiers), et des inondations occasionnelles peuvent se transformer en inondations chroniques ou plus graves. En tant que telle, la gestion adaptative doit être considérée comme un élément important de toute stratégie efficace de gestion des risques d'inondation, à la fois à l'échelle des bâtiments/infrastructures et à des échelles plus larges sur l'ensemble du système.

Il peut être nécessaire d'envisager une variété ou une combinaison de stratégies pour ramener le risque résiduel d'inondation côtière à des niveaux acceptables. Comme décrit dans la section 5.3.6, ceux-ci peuvent être classés comme suit (Bowker et al., 2007) :

1. Évitement - construire loin ou au-dessus de zones connues d'exposition aux risques d'inondation, ou empêcher les eaux de crue d'atteindre le site d'un bâtiment ou d'une infrastructure.

2. Résistance - l'utilisation de mesures locales pour résister aux effets des inondations sur un site et préserver l'intégrité structurelle, y compris l'utilisation de barrières locales contre les inondations, de systèmes de pompage, de conception résistante à l'eau, de renforcement structurel, de protection contre l'affouillement, etc.
3. Résilience - l'utilisation de matériaux, de techniques de construction et de finitions pour réduire le risque de dommages et accélérer la récupération, la réparation et la remise en service.
4. Facilité de réparation - l'utilisation de matériaux, de techniques de construction et de finitions pour accélérer et réduire les coûts de réparation après une inondation dommageable.

Comme indiqué dans la section 5.3.6, les points 2 à 4 ci-dessus s'appliquent aux interventions au niveau des bâtiments et des infrastructures et sont donc facilement guidés par les codes du bâtiment, les normes de conception des infrastructures et les directives de construction. Les codes et normes peuvent prescrire des mesures spécifiques à appliquer en fonction du risque résiduel sur un site donné. Le principal effet de ces mesures serait de réduire la vulnérabilité des bâtiments et des infrastructures. Par exemple, la ligne grise en pointillé dans la Figure 35 illustre (qualitativement) l'effet potentiel de l'élimination des sous-sols et de l'intégration de la conception, des matériaux, des finitions et des techniques de construction améliorés sur la courbe profondeur-dommages pour un immeuble résidentiel d'un étage. Ces mesures de résistance, de résilience et de réparabilité, ainsi que d'autres, peuvent modifier les courbes profondeur-dommages (ou d'autres fonctions de vulnérabilité), retarder le début des dommages et réduire les impacts des inondations fréquentes (ou moins graves). À son tour, cela abaisse la courbe de probabilité de dommages dans les régions PDA plus élevées (section 10.1) et réduit les paramètres de risque globaux, tels que les DAM. Cet exemple illustre à un niveau conceptuel comment les effets des interventions de conception au niveau des bâtiments et des infrastructures peuvent avoir une incidence sur le risque d'inondation global, et comment les évaluations des risques peuvent éclairer le processus de conception. Cependant, des recherches sont requises pour obtenir une compréhension quantitative des effets des améliorations aux bâtiments ou aux infrastructures sur la vulnérabilité aux risques d'inondation, afin que les pratiques de conception et d'évaluation des risques puissent être intégrées efficacement.



**Figure 35. Effet potentiel des mesures de conception des bâtiments sur la vulnérabilité d'un bâtiment résidentiel d'un étage (courbe profondeur-dommages adaptée de RNCAN, 2017).**

Lorsque des mesures de résistance, de résilience et de réparabilité sont envisagées, la compatibilité des solutions avec la nature des risques d'inondation anticipés et les effets nuisibles potentiels sur les risques d'inondation dans les zones environnantes doivent être évalués. Par exemple, les stratégies de résilience ou de réparabilité peuvent ne pas être efficaces dans les zones exposées à des risques d'inondation fréquents ou graves. C'est la prémisse de la hiérarchie des stratégies de gestion des risques d'inondation illustrée dans la Figure 36, qui indique que l'évitement est l'option privilégiée. Cependant, les stratégies ne s'excluent pas mutuellement et peuvent être appliquées en combinaison dans le cadre d'un portefeuille d'outils de gestion des risques d'inondation côtière. En effet, il est reconnu que des stratégies à plusieurs niveaux et des « lignes de défense » sont souvent nécessaires ou préférables pour réduire les risques d'inondation à des niveaux acceptables (p. ex. Green, 2010; Lopez, 2009).

Lors de l'élaboration et de l'évaluation des options de gestion des risques d'inondation sur le site d'un bâtiment ou d'un actif d'infrastructure nouveau ou existant, les effets des mesures sur la vulnérabilité et le risque doivent être évalués, pour voir si les critères de tolérance au risque sont satisfaits pour la conception ou la durée de vie prévue de la structure/du bien. Cela peut nécessiter quelques itérations pour arriver à des solutions qui réduisent les risques à des niveaux acceptables, comme indiqué dans la Figure 8.

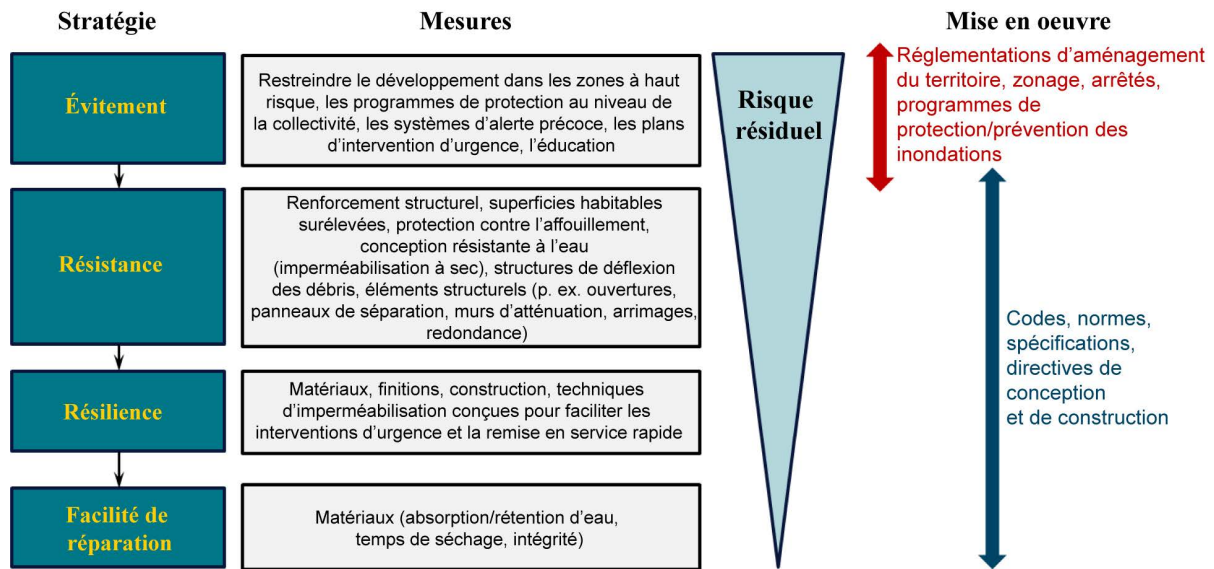


Figure 36. Hiérarchie des stratégies de gestion des risques d'inondation et mise en œuvre (adapté de Bowker et al., 2007).

## 12 Mot de la fin

Les présentes lignes directrices fournissent un cadre possible et une référence technique pour la réalisation d'évaluations des risques d'inondation côtière, en particulier pour l'application à la conception (et à la modernisation) de bâtiments et d'infrastructures au Canada afin d'améliorer la résistance aux inondations et la résilience. L'évaluation des risques n'est qu'une première étape, bien que cruciale, vers la gestion des risques d'inondation côtière; appliquer cette compréhension du risque pour améliorer la conception des bâtiments et des infrastructures en est une autre, et dépasse le cadre de la ligne directrice. Des travaux sont requis pour intégrer les concepts et principes de gestion des risques d'inondation dans les codes, normes et pratiques de conception des bâtiments et des infrastructures. Cependant, l'amélioration des pratiques de conception des bâtiments et des infrastructures n'est pas une panacée pour les risques d'inondation. De manière plus générale, il est nécessaire de continuer à renforcer les connaissances et les pratiques de gestion stratégique des risques d'inondation partout au Canada afin de mieux répondre aux besoins de la société, qui doivent être motivés par la contribution de multiples intervenants et disciplines techniques. Les concepteurs et les promoteurs de projets d'immeubles et d'infrastructures doivent participer et jouer un rôle de premier plan dans un tel processus pour qu'il réussisse.

## 13 Références

- Abraham, E.R. (1997). Seiche modes of Wellington Harbour, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 31(2), p. 191 à 200.
- AECOM. (2013). *Modelling of Potential Tsunami Inundation Limits and Run-Up – Capital Regional District*. <https://www.crd.bc.ca>
- Alberta Infrastructure. (2017). *Flood Risk Management Guidelines for Location of New Facilities*. Alberta Infrastructure. <http://www.infrastructure.alberta.ca/Content/docType486/Production/FloodRiskMgmt.pdf>
- ASCE/SEI. (2016). *ASCE 7-16 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers; Structural Engineering Institute. <https://doi.org/10.1061/9780784400920>.
- ASCE. (2015). *Highlights of ASCE 24-14 Flood Resistant Design and Construction*. American Society of Civil Engineers.
- . (2018). *ASCE 7-16 Tsunami Design Geodatabase*. American Society of Civil Engineers. <https://asce7tsunami.online/>. Consulté le 2019-05-08.
- . (2018b). *Climate-resilient infrastructure: adaptive design and risk management* (Ayyub, B.M., éditeur). Reston, VA: ASCE. doi:ISBN 9780784481922
- Atkinson, D.E., Forbes, D.L., James, T.S. (2016). Un littoral dynamique dans un contexte de climat en mutation. Chapitre 2 du document : *Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat* (Lemmen, D.S., Warren, F.J., James, T.S. et Mercer Clarke, C.S.L., éd.). Gouvernement du Canada, Ottawa, p. 27 à 68.
- Ausenco-Sandwell. (2011). *Sea Dike Guidelines*. BC Ministry of Environment Project 143111.
- Australian Institute for Disaster Resilience. (2009). *Australian Disaster Resilience Handbook 20 Flood Preparedness*. Australian Institute for Disaster Resilience, Australian Government Attorney-General's Department.
- . (2014). *Australian Disaster Resilience Handbook 7 Managing the Floodplain: A Guide to Best Practice in Flood Risk Management in Australia*. Australian Institute for Disaster Resilience, Australian Government Attorney-General's Department.
- . (2015). *Handbook 10: National Emergency Risk Assessment Guidelines. 2nd Edition*. Australian Institute for Disaster Resilience, Australian Government Attorney-General's Department.
- Baird. (2019). *Toronto Islands Flood Characterization and Risk Assessment Project*. 5 Volumes. <https://trca.ca/toronto-islands-flood-characterization-risk-assessment/>
- Barker, A. et Timco, G.W. (2017). Maximum pile-up heights for grounded ice rubble. *Cold Regions Science and Technology*, 135, 62-75.

- Barnard, P.L., van Ormondt, M., Erikson, L.H., Eshleman, J., Hapke, C., Ruggiero, P., Adams, P.N. et Foxgrover, A.C. (2014). Development of the Coastal Storm Modeling System (CoSMoS) for predicting the impact of storms on high-energy, active-margin coasts. *Natural Hazards*, 74(2), 1095-1125.
- Barnard, P.L., Short, A.D., Harley, M.D., Splinter, K.D., Vitousek, S., Turner, I.L., Allan, J., Banno, M., Bryan, K.R., Doria, A. et Hansen, J.E. (2015). Coastal vulnerability across the Pacific dominated by El Niño/Southern Oscillation. *Nature Geoscience*, 8(10), 801-807.
- Battjes, J. et J. Janssen. (1978). Energy Loss and Set-up Due to Breaking of Random Waves. *Proc. International Conference on Coastal Engineering*, 569-587, Hamburg.
- BC Ministry of Environment. (2009). *Manual of British Columbia Hydrometric Standards. Version 1.0*, 12 mars 2009.
- <http://www.env.gov.bc.ca/fia/documents/Manual%20of%20British%20Columbia%20Hydrometric%20Standards%20V1.0,%20March%202012,%202009.pdf>
- . (2012). *Flood hazard area land use management guidelines*. Victoria: [eng.gov.bc.ca/wsd/public\\_safety/flood/fhm-2012](http://eng.gov.bc.ca/wsd/public_safety/flood/fhm-2012).
- BC Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development. (2018). Amended flood hazard area land use management guidelines.
- [https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/integrated-flood-hazard-mgmt/flood\\_hazard\\_area\\_land\\_use\\_guidelines\\_2017.pdf](https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/integrated-flood-hazard-mgmt/flood_hazard_area_land_use_guidelines_2017.pdf)
- Bechle, A., Wu, C., Kristovich, D., Andersen, E., Schwab, D. et Rabinovich, A. (2016). Meteotsunamis in the Laurentian Great Lakes. *Nature Scientific Reports*, 6, 37832, doi:10.1038/srep37832.
- Bell, T., Briggs, R., Bachmayer, R., Shuo, L. (2014). Augmenting Inuit knowledge for safe sea-ice travel – the SmartICE information system. *Oceans 2014*, St. John's, IEEE, <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2014.7003290>
- Benoit, M., Marcos, F. et Becq, F. (1996). Development of a third-generation shallow-water wave model with unstructured spatial meshing. *Proc. International Conference on Coastal Engineering*, 465-478, Orlando.
- Bernardara, P., Mazas, F., Kergadallan, X. et Hamm, L. (2014). A two-step framework for over-threshold modelling of environmental extremes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(3), 635-647.
- Bernier, N. (2005). *Annual and seasonal extreme sea levels in the Northwest Atlantic: Hindcasts over the past 40 years and projections for the next century*. Ph.D. Thesis, Dalhousie University, Halifax.
- Bernier, N. et Thompson, K. (2006). Predicting the frequency of storm surges and extreme sea levels in the northwest Atlantic. *J. Geophysical Research*, C1009.
- Bernier, N.B., Thompson, K.R., Ou, J. et Ritchie, H. (2007). Mapping the return periods of extreme sea levels: allowing for short sea level records, seasonality, and climate change. *Global and Planetary Change*, 57, 139-150, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.027>
- Bode, L. et Hardy, T.A. (1997). Progress and recent developments in storm surge modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(4), 315-331.

- Bowker, P, M Escarameia et A Tagg. (2007). *Improving the Flood Performance of New Buildings*. Department for Environment, Food and Rural Affairs, Environment Agency, UK. [http://www.planningportal.gov.uk/uploads/br/flood\\_performance.pdf](http://www.planningportal.gov.uk/uploads/br/flood_performance.pdf).
- Bridges, T.S., Burks-Copes, K.A., Bates, M.E., Collier, Z.A., Fischenich, J.C., Piercy, C.D., Russo, E.J., Shafer, D.J., Suedel, B.C., Gailani, J.Z. et Rosati, J.D. (2015). *Use of natural and nature-based features (NNBF) for coastal resilience*. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Environmental Laboratory, Coastal and Hydraulics Laboratory.
- BSI. (2015). *BS 85500 : 2015, Flood Resistant and Resilient Construction – Guide to Improving the Flood Performance of Buildings – Core Document*. British Standards Institute, <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=00000000030299686>.
- Bush, E. et Lemmen, D.S., éditeurs. (2019). Rapport sur les changements climatiques au Canada. Gouvernement du Canada, Ottawa, p. 444
- Casas-Prat, M. et Wang, X.L. (2019). Projections of extreme ocean waves in the Arctic and potential implications for coastal inundation and erosion. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. doi: 10.1029/2019JC015745.
- CEN. (2004). *Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules*. European Committee for Standardisation, Brussels.
- Cheng, Chad Shouquan, Edwina Lopes, Chao Fu et Zhiyong Huang. (2014). Possible Impacts of Climate Change on Wind Gusts under Downscaled Future Climate Conditions: Updated for Canada. *Journal of Climate* 27 (3): 1255-70. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00020.1>.
- Cherniawsky, Titov, Wang et Li. (2007). Numerical simulations of tsunami waves and currents for southern Vancouver Island from a Cascadia Megathrust Earthquake. *Pure App. Geophys.* 164, 1-28.
- Chock, G.Y. (2016). Design for tsunami loads and effects in the ASCE 7-16 standard. *Journal of Structural Engineering*, 142(11), 04016093.
- Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer et A.S. Unnikrishnan. (2013). Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- CIRIA, CUR, CETMEF. (2007). *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*. C683, CIRIA, London.
- City of White Rock. (2019). *Pier and East Beach Storm Repair Schedule and Repair Strategies*. Corporate Report, January 28, Director of Engineering and Municipal Operations, The Corporation of the City of White Rock.
- Clague, J.J., Bobrowsky, P.T. et Hutchinson, I. (2000). A review of geological records of large tsunamis at Vancouver Island, British Columbia, and implications for hazard. *Quaternary Science Reviews*, 19(9), 849-863.

- Clague, J.J., Munro, A. et Murty, T. (2003). Tsunami hazard and risk in Canada. *Natural Hazards*, 28(2-3), 435-463.
- Codiga, D.L. (2011). *Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions*. Technical Report 2011-01. Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, RI. 59pp. <ftp://www.po.gso.uri.edu/pub/downloads/codiga/pubs/2011Codiga-UTide-Report.pdf>
- Coles, S. (2013). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer, Bristol.
- Conger, T. (2018). Coastal Green Infrastructure As a Sea Level Rise Adaptation Measure: Assessing Environmental, Local and Institutional Contexts. Ph.D. thesis, University of British Columbia, Vancouver.
- Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). *ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate*. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), accessed 14 July 2020. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Cornell, S. (2006). "Improving Stakeholder Engagement in Flood Risk Management Decision Making and Delivery." Environment Agency Report, Bristol, United Kingdom. ISBN : 1844325547.
- Cornett, A. et Zhang, J. (2008). *Nearshore wave energy resources, Western Vancouver Island, BC*. Canadian Hydraulics Centre, Technical Report CHC-TR-51, Ottawa.
- <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/canmetenergy/files/pubs/CHC-TR-051.pdf>
- Couasnon, A., Sebastian, A. et Morales-Nápoles, O. (2018). A Copula-based bayesian network for modeling compound flood hazard from riverine and coastal interactions at the catchment scale: An application to the houston ship channel, Texas. *Water*, 10(9), 1-19.
- Coulter, L. (2019). *Climate Change Adaptation Pathways Framework: Supporting Sustainable Local Food in B.C.* Prepared for the B.C. Ministry of Agriculture through the 2018-19 Mitacs Science Policy Fellowship. Victoria.
- <https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/agriculture-and-seafood/agricultural-land-and-environment/climate-action/cc-adaptation-pathways-framework.pdf>
- Crawford, W.R. (1982). Analysis of fortnightly and monthly tides. *The International Hydrographic Review*, 59(1).
- Crespo, A.J., Domínguez, J.M., Rogers, B.D., Gómez-Gesteira, M., Longshaw, S., Canelas, R.J.F.B., Vacondio, R., Barreiro, A. et García-Feal, O. (2015). DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). *Computer Physics Communications*, 187, 204-216.
- CSA Group. (2019). *S6-19. Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. Association canadienne de normalisation, Ontario, Canada.
- . (2015). *EXP276.1-2015 Design Requirements for Marine Structures Associated with LNG Facilities (DRMS)*. Association canadienne de normalisation, Ontario, Canada.
- . (2018). *CSA Z800-18 Ligne directrice sur la protection contre les inondations de sous-sol et la réduction des risques*. Association canadienne de normalisation, Ontario, Canada.

- . (2019). *CSA W204 Conception résiliente aux inondations pour les nouvelles communautés résidentielles*. Association canadienne de normalisation, Ontario, Canada.
- . (2019b). *CSA W205-19 Gestion de l'érosion et de la sédimentation pour l'infrastructure des collectivités nordiques*. Association canadienne de normalisation, Ontario, Canada.
- Daigle, R. (éd.). (2006). *Impacts de l'élévation du niveau de la mer et du changement climatique sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick*. Environnement Canada, Ottawa.
- <https://www2.snb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Climate-Climatiques/Presentationsf/ImpactsSocioeonomiques.pdf>
- . (2017). *Estimations de l'élévation du niveau de la mer et des inondations pour les secteurs côtiers du Nouveau-Brunswick* R.J. Daigle Enviro, Moncton.
- Dean, R. (2005). *Wave Setup*. FEMA Coastal Flood Hazard Analysis and Mapping Guidelines, Focussed Study Report.
- Derksen, C., Burgess, D., Duguay, C., Howell, S., Mudryk, L., Smith, S., Thackeray, C. et Kirchmeier-Young, M. (2018). Évolution de la neige, de la glace et du pergélisol à l'échelle du Canada; chapitre 5 dans le *Rapport sur le climat changeant du Canada*, (éd.) E. Bush et D.S. Lemmen; Gouvernement du Canada, Ottawa, 194–260.
- de Vet, P.L.M., McCall, R.T., den Bieman, J.P., Stive, M.J. et van Ormondt, M. (2015). Modelling dune erosion, overwash and breaching at Fire Island (NY) during Hurricane Sandy. In *Proceedings of Coastal Sediments 2015*.
- de Vries, H., Breton, M., de Mulder, T., Krestinitis, Y., Ozer, J., Proctor, R., Ruddick, K., Salomon, J.C. et Voorrips, A. (1995). A comparison of 2D storm surge models applied to three shallow European seas. *Environ. Software*, 10(1), 23–42, doi:10.1016/0266-9838(95)00003-4.
- DHI. (2017). *Mike 21 SW Scientific Documentation*.
- [http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast\\_and\\_Sea/M21SW\\_Scientific\\_Doc.pdf](http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/M21SW_Scientific_Doc.pdf)
- Dias, W.P.S. et Edirisooriya, U. (2019). Derivation of tsunami damage curves from fragility functions. *Natural Hazards*, 1-14.
- Didier, D., Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., Lambert, A., Fraser, C., Barnett, R.L. et Van-Wiersts, S. (2015). Coastal flood assessment based on field debris measurements and wave runup empirical model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 3(3), 560-590.
- Didier, D., Baudry, J., Bernatchez, P., Dumont, D., Sadegh, M., Bismuth, E., Bandet, M., Dugas, S. et Sévigny, C. (2019). Multihazard simulation for coastal flood mapping: Bathtub versus numerical modelling in an open estuary, Eastern Canada. *Journal of Flood Risk Management*, 12, e12505.
- Didier, D., Caulet, C., Bandet, M., Bernatchez, P., Dumont, D., Augereau, E., Floc'h, F. et Delacourt, C., (2020). Wave runup parameterization for sandy, gravel and platform beaches in a fetch-limited, large estuarine system. *Continental Shelf Research*, 192, 104024.

- Douglas, E.M., Kirshen, P.H., Bosma, K., Watson, C., Miller, S. et McArthur, K. (2016). Simulating the impacts and assessing the vulnerability of the central artery/tunnel system to sea level rise and increased coastal flooding. *Journal of Extreme Events*, 3(04), 1650013.
- Dugan, J.P., Morris, W.D., Vierra, K.C., Piotrowski, C.C., Farruggia, G.J. et Campion, D.C. (2001). Jetski-based nearshore bathymetric and current survey system. *Journal of Coastal Research*, 17(4).
- Ebbwater Consulting, and Compass Resource Management. (2018). *City of Vancouver Sea Level Rise Planning Framework Final Report*. Prepared for the City of Vancouver.
- Ebbwater Consulting Inc. (2019). *Comprehensive Coastal Flood Risk Assessment – Final Report*. Prepared for the District of Tofino.
- Edelensbos, Jurian, Arwin Van Buuren, Dik Roth et Madeline Winnubst. (2017). Stakeholder Initiatives in Flood Risk Management: Exploring the Role and Impact of Bottom-up Initiatives in Three ‘Room for the River’ Projects in the Netherlands. *Journal of Environmental Planning and Management*, 60(1), 47–66. <https://doi.org/10.1080/09640568.2016.1140025>.
- Egbert, G.D. et S.Y. Erofeeva. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183-204.
- Engineers and Geoscientists British Columbia. (2016). *Flood Mapping in BC: Professional Practice Guidelines*. <https://www.egbc.ca/getmedia/8748e1cf-3a80-458d-8f73-94d6460f310f/APEGBC-Guidelines-for-Flood-Mapping-in-BC.pdf.aspx>
- . (2018). *Legislated flood assessments in a changing climate in BC*. <https://www.egbc.ca/getmedia/f5c2d7e9-26ad-4cb3-b528-940b3aaa9069/Legislated-Flood-Assessments-in-BC.pdf.aspx>
- EurOtop. (2007). *EurOtop wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual*.
- EurOtop II. (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. European Overtopping Manual.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2001). *State and local mitigation planning how-to guide: understanding your risks, identifying hazards and estimating losses*.
- . (2003). *Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners. Appendix D: Guidance for Coastal Flooding Analyses and Mapping*.
- . (2005). *Wave Runup and Overtopping*. FEMA Coastal Flood Hazard Analysis and Mapping Guidelines – Focused Study Report.
- . (2006). *Hazus - MH Flood Technical Manual*. US Department of Homeland Security, Washington, DC.
- . (2009). *Hurricane Ike Recovery Advisories*, Mitigation Assessment Team Report. Washington, D.C., U.S.A.
- . (2011). *Coastal Construction Manual*, FEMA P-55. Fourth Edition, Washington, D.C., U.S.A.

- . (2015). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping – Coastal Wave Setup*. Federal Emergency Management Agency Guidance Document Guidance Document 44. First Edition, Washington, D.C., U.S.A.
- . (2016). *Guidance for Stakeholder Engagement - Planning for Mitigation Action Phase*. Federal Emergency Management Agency.
- . (2016b). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping – Coastal Water Levels*. Federal Emergency Management Agency Guidance Document 67, May 2016.
- . (2018). *Coastal Floodplain Mapping*. Washington, DC: U.S. Federal Emergency Management Administration.
- . (2018b). *Coastal Wave Runup and Overtopping*. Washington, DC: U.S. Federal Emergency Management Agency.
- Fine, Cherniawsky, Rabinovich et Stephenson. (2008). Numerical modelling and observations of tsunami waves in Alberni Inlet and Barkley Sound, British Columbia. *Pure appl. geophys.*, 165, 2019-2044.
- Fine, I., Rabinovich, A., Bornheld, B., Thomson, R. et Kulikov, E. (2005). The Grand Banks landslide-generated tsunami of November 18, 1929: Preliminary analysis and numerical modelling. *Marine Geology*, (215), 45-57.
- Fine, I.V., Cherniawsky, J.Y., Thomson, R.E., Rabinovich, A.B. et Krassovski, M.V. (2015). Observations and numerical modeling of the 2012 Haida Gwaii tsunami off the coast of British Columbia. *Pure and Applied Geophysics*, 172(3-4), 699-718.
- Flannigan, M. D., B. M. Wotton, G. A. Marshall, W. J. de Groot S., J. Johnston, N. A. Jurko et A. S. Cantin. (2015). Fuel Moisture Sensitivity to Temperature and Precipitation: Climate Change Implications. *Climatic Change*, 134(1–2), 59–71. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1521-0>.
- Flato, G., Gillett, N., Arora, V., Cannon, A. et Anstey, J. (2019). Modélisation des changements climatiques à l'avenir; chapitre 3 dans le *Rapport sur le climat changeant du Canada*, (éd.) E. Bush et D.S. Lemmen; Gouvernement du Canada, Ottawa, 74–111.
- FLOODsite. (2009). *FLOODsite Work Programme - Research, Technological Development and Innovation Activities*. FLOODsite Project. <http://www.floodsite.net>.
- Forbes, D.L. et Taylor, R.B. (1994). Ice in the shore zone and the geomorphology of cold coasts. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 18, 59-89, <https://doi.org/10.1177/030913339401800104>.
- Forbes, D.L., Parkes, G.S., Manson, G.K. et Ketch, L.A. (2004). Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Geology*, 210(1-4), 69-204.
- Forbes, D.L., Manson, G.K., Charles, J., Thompson, K.R., Taylor, R.B. (2009). *Halifax Harbour extreme water levels in the context of climate change: scenarios for a 100-year planning horizon*. Comité des collections de la Commission géologique du Canada, Dossier ouvert 6346, 21 pages, <https://doi.org/10.4095/248196>.

- Forbes, D.L., Whalen, D., Jacobson, B., Fraser, P., Manson, G., Couture, N., Simpson, B. (2013). Co-design of coastal risk analysis for subsistence infrastructure in the Inuvialuit Settlement Region, western Arctic Canada. *ArcticNet*, Annual Scientific Meeting 2013, poster.
- Forbes, D.L., Bell, T., Manson, G.K., Couture, N.J., Cowan, B., Deering, R.L., Hatcher, S.V., Misiuk, B. et St-Hilaire-Gravel, D. (2018). Coastal environments and drivers. In: Bell, T. et Brown, T.M. (éditeurs). *De la science aux politiques publiques dans la région arctique de l'Est du Canada : une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation*. ArcticNet, Québec, 210-249, [http://www.arcticnet.ulaval.ca/pdf/media/29170\\_IRIS\\_East\\_full%20report\\_web.pdf](http://www.arcticnet.ulaval.ca/pdf/media/29170_IRIS_East_full%20report_web.pdf).
- Foreman, M. (1977). *Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction*. Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Victoria.
- Gao, D., Wang, K., Insua, T.L., Cypus, M., Riedel, M. et T. Sun. (2018). Defining megathrust tsunami source scenarios for northernmost Cascadia. *Natural Hazards*, 94, 445–469. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3397-6>
- Geist. (2005) *Local Tsunami Hazards in the Pacific Northwest from Cascadia Subduction Zone Earthquakes*. Professional Paper 1661-B, United States Geological Survey.
- Geist et Parsons. (2006). Probabilistic Analysis of Tsunami Hazards. *Natural Hazards*, 37, 277-314.
- GFDRR. (2016). *The Making of a Riskier Future: How Our Decisions Are Shaping Future Disaster Risk*. Global Facility for Disaster Reduction and Recovery [https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/Riskier\\_Future.pdf](https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/Riskier_Future.pdf)
- Goda, Y. (2010). *Random seas and design of maritime structures*. World Scientific, Singapore.
- Gosse, J.C., Tremblay, T., Broom, L.A., Campbell, C., Wenzel, G., Nedimović, M.R., Forget-Brisson, L. (2020). Initial results from the ULINNIQ seismicity and tsunami hazard project, northeastern Baffin Island, Nunavut. Dans le *Sommaire des activités 2019*, Bureau géoscientifique Canada-Nunavut, Iqaluit, sous presse, <http://cngo.ca/summary-of-activities/>
- Gouvernement du Québec. (2019). *Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables, chapitre Q-2, r. 35*. Mise à jour du 1<sup>er</sup> novembre 2019, Loi sur la qualité de l'environnement (chapitre Q-2, s. 2.1). <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2035/>
- Gouvernement du Canada. (2009). *Stratégie nationale sur les infrastructures essentielles*. Ottawa.
- Gouvernement du Nouveau-Brunswick. (2019). *Une politique de protection des zones côtières pour le Nouveau-Brunswick* Version 2.0, 31 mars 2019. <https://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Water-Eau/CoastalAreasProtectionPolicy.pdf>
- Green, C. (2010). Towards sustainable flood risk management. *International Journal of Disaster Risk Science*, 1(1), 33-43.
- Greenan, B.J.W., James, T.S., Loder, J.W., Pepin, P., Azetsu-Scott, K., Ianson, D., Hamme, R.C., Gilbert, D., Tremblay, J-E., Wang, X.L. et Perrie, W. (2018). Changements touchant les océans qui bordent le Canada; chapitre 7 dans (éd.) Bush et Lemmen, *Rapport sur les changements climatiques au Canada*. Gouvernement du Canada, Ottawa, p. 343 à 423.

- Greenberg, D.A., Blanchard, W., Smith, B. et Barrow, E. (2012). Climate change, mean sea level and high tides in the Bay of Fundy. *Atmosphere-Ocean*, 30(3), 261-276.
- Grilli, S.T., Guérin, C.A., Shelby, M., Grilli, A.R., Moran, P., Grosdidier, S. et Insua, T.L. (2017). Tsunami detection by high frequency radar beyond the continental shelf: ii. extension of time correlation algorithm and validation on realistic case studies. *Pure and Applied Geophysics*, 174(8), 3003-3028.
- Gronewold, A.D., Fortin, V., Lofgren, B., Clites, A., Stow, C.A. et Quinn, F. (2013). Coasts, water levels, and climate change: A Great Lakes perspective. *Climatic Change*, 120(4), 697-711.
- Haasnoot, M., Middelkoop, H., Offermans, A., Van Beek, E. et Van Deursen, W.P. (2012). Exploring pathways for sustainable water management in river deltas in a changing environment. *Climatic Change*, 115(3-4), 795-819.
- Haasnoot, M., Kwakkel, J.H., Walker, W.E. et ter Maat, J. (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global environmental change*, 23(2), 485-498.
- Haigh, I., Wadey, M., Wahl, T., Ozsoy, O., Nicholls, R., Brown, J., Horsburgh, K. et Bouldby, B. (2016). Spatial and temporal analysis of extreme sea level and storm surge events around the coastline of the UK. *Nature (Scientific Data)*, 3, 160107, doi:10.1038/sdata.2016.107.
- Han, G., Ma, Z., Chen, N., Thomson, R. et Slangen, A. (2015) Changes in Mean Relative Sea Level around Canada in the Twentieth and Twenty-First Centuries, *Atmosphere-Ocean*, 53(5), 452-463, doi:10.1080/07055900.2015.1057100
- Han, G., Ma, Z., Zhai, L., Greenan, B. et Thomson, R. (2016). *Twenty-first century mean sea level rise scenarios for Canada*. Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences 313, Fisheries and Oceans Canada, St. John's.
- Harper, J.R., Henry, R.F. et Stewart, G.G. (1988). Maximum storm surge elevations in the Tuktoyaktuk region of the Canadian Beaufort Sea. *Arctic*, 48-52.
- Hausfather, Z. et Peters, G. (2020). Emissions—The 'business as usual' story is misleading. *Nature*, 577, 618–620.
- Hawkes, P.J., 2008. Joint probability analysis for estimation of extremes. *Journal of Hydraulic Research*, 46(S2), 246-256.
- Hawkes, P.J., Gonzalez-Marco, D., Sánchez-Arcilla, A. et Prinos, P. (2008). Best practice for the estimation of extremes: A review. *Journal of Hydraulic Research*, 46(S2), 324-332.
- Higman, B., Shugar, D.H., Stark, C.P., Ekström, G., Koppes, M.N., Lynett, P., Dufresne, A., Haeussler, P.J., Geertsema, M., Gulick, S. et Mattox, A. (2018). The 2015 landslide and tsunami in Taan Fiord, Alaska. *Scientific reports*, 8(1), 1-12.
- Horsburgh, K.J. et Wilson, C. (2007). Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112, C08003.
- Houston, J.R. et Dean, R.G., 2011. Accounting for the nodal tide to improve estimates of sea level acceleration. *Journal of Coastal Research*, 27(5), 801-807.

- HR Wallingford. (1998). *The Joint Probability of Waves and Water Levels: JOIN-SEA. A rigorous but practical new approach*. Report SR 537, November 1998 (Re-issued with minor amendments May 2000).
- Hunter, J. (2012). A simple technique for estimating an allowance for uncertain sea-level rise. *Climatic Change*, 113(2), 239-252.
- IBI Group and Golder Associates. (2015). *Provincial Flood Damage Assessment Study*. Government of Alberta, Environment and Sustainable Resource Development, Calgary.
- IHO. (2011). *Manual on Hydrography*, IHO Publication C-13, International Hydrographic Organization, Monaco.
- . (2008). *IHO Standards for Hydrographic Surveys (5<sup>th</sup> Edition)*. Special Publication No. 44. International Hydrographic Bureau, Monaco.
- International Joint Commission. (2014). *Lake Ontario – St. Lawrence River Plan 2014. Protecting against extreme water levels, restoring wetlands and preparing for climate change*. Juin 2014. [https://legacyfiles.ijc.org/tinymce/uploaded/LOSLR/IJC\\_LOSR\\_EN\\_Web.pdf](https://legacyfiles.ijc.org/tinymce/uploaded/LOSLR/IJC_LOSR_EN_Web.pdf)
- IOOS. (2015). *Manual for Real-Time Quality Control of In-Situ Surface Wave Data - A Guide to Quality Control and Quality Assurance of In-Situ Surface Wave Observations*. U.S. Integrated Ocean Observing System. Version 2.0, August 2015.
- IPCC. (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ISO. (2009). *ISO Guide 73:2009 - Risk Management Vocabulary*. Organisation internationale de normalisation.
- James, T., Henton, J., Leonard, L., Darlington, A., Forbes, D. et Craymer, M. (2014). *Relative Sea-level Projections in Canada and the Adjacent Mainland United States*. Comité des collections de la Commission géologique du Canada, Dossier public 7737, 72 pages, : 10.4095/ 295574.
- . (2015). *Tabulated values of relative sea-level projections in Canada and the adjacent mainland United States*. Comité des collections de la Commission géologique du Canada, Dossier public 7942, 81 pages, : 10.4095/ 297048.
- Jeong, Dae Il et Laxmi Sushama. (2018). “Projected Changes to Extreme Wind and Snow Environmental Loads for Buildings and Infrastructure across Canada.” *Sustainable Cities and Society*, 36, 225–36. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.004>.
- Jeong, Dae Il, Laxmi Sushama, Michael J.F. Vieira et Kristina A. Koenig. (2018). « Projected Changes to Extreme Ice Loads for Overhead Transmission Lines across Canada. » *Sustainable Cities and Society*, 39, 639–49. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.03.017>.
- Jongejan, R.B. et Maaskant, B. (2015). Quantifying flood risks in the Netherlands. *Risk Analysis*, 35(2), 252-264.

- Journey, M, Talwar, S, Brodaric, B et Hastings, N L. (2015). *Disaster resilience by design: a framework for integrated assessment and risk-based planning in Canada*. Comité des collections de la Commission géologique du Canada, Dossier public 551, pp. 336, <https://doi.org/10.4095/296800> (accès ouvert).
- Journey, M, Chow, W et Wagner, C (2020). *Patterns of Human Settlement in Canada*. Natural Resources Canada (publication status: unpublished, pending updates and peer review).
- Kim, J., Murphy, E., Nistor, I., Ferguson, S. et Provan, M. (sous presse). On the use of the ERA5 Reanalysis and Driftwood Line Survey Data for Numerical Investigation of Storm Surges in the Beaufort Sea. *Arctic Change 2020*.
- Kirby, J.T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A. et R. Dalrymple (1998). *FUNWAVE 1.0 Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model Documentation and User's Manual*. Research Report No. CACR-98-06, Centre for Applied Coastal Research, University of Delaware.
- Kofoed-Hansen, H., Sloth, P., So/rensen, O.R. et Fuchs, J. (2001). Combined numerical and physical modelling of seiching in exposed new marina. In *Coastal Engineering 2000*, 3600-3614.
- Kofoed-Hansen, H., Kerper, D.R., Sørensen, O.R. et Kirkegaard, J. (2005). Simulation of long wave agitation in ports and harbours using a time-domain Boussinesq model. In *Proceedings of the fifth international symposium on ocean wave measurement and analysis (WAVES)*, Madrid, Spain.
- Kovacs, A. et Sodhi, D.S. (1980). Shore ice pile-up and ride-up: Field observations, models, theoretical analyses. *Cold Regions Science and Technology*, 2, 210-288.
- Lamoureux, S., Forbes, D.L., Bell, T., Manson, G.K., Rudy, A.C.A., Lalonde, J., Brown, M., Smith, I.R., James, T.S., Couture, N.J., Whalen, D.J.R. et Fraser, P. (2015). The impact of climate change on infrastructure in the western and central Canadian Arctic. In: *From Science to Policy in the Western and Central Canadian Arctic: an Integrated Regional Impact Study (IRIS) of Climate Change and Modernization* (Stern, G.A. et Gaden, A., éditeurs). *ArcticNet*, Québec, 300-341, [http://www.arcticnet.ulaval.ca/pdf/media/IRIS\\_FromScience\\_ArcticNet\\_lr.pdf](http://www.arcticnet.ulaval.ca/pdf/media/IRIS_FromScience_ArcticNet_lr.pdf).
- Lemmen, D.S., Warren, F.J., James, T.S. et Mercer Clarke, C.S.L. éditeurs. (2016). Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat. Gouvernement du Canada, Ottawa, p. 274
- Leonard, L.J. et Bednarski, J.M. (2014). Field survey following the 28 October 2012 Haida Gwaii tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 171(12), 3467-3482.
- Leonard, L.J., Rogers, G.C. et Mazzotti, S. (2012). *A preliminary tsunami hazard assessment of the Canadian coastline*. Comité des collections de la Commission géologique du Canada, Dossier ouvert 7201, 126 pages,
- . (2014). Tsunami hazard assessment of Canada. *Natural Hazards*, 70(1), 237-274.
- Lin, L., Demirbilek, Z., Mase, H., Zheng, J. et Yamada, F. (2008). *CMS-Wave: A Nearshore Spectral Wave Processes Model for Coastal Inlets and Navigation Projects*. USACE ERDC/CHL, Vicksburg.
- Lintern, G., Blais-Stevens, A., Stacey, C., Shaw, J., Bobrowsky, P., Conway, K., Huntley, D., Mackillop, K., Overeem, I. et Scherwath, M. (2019). Providing multidisciplinary scientific advice for coastal planning in Kitimat Arm, British Columbia. *Geological Society Special Publications*, 477, SP477-40.

- Liu, J. C., Lence, B. J. et Isaacson, M. (2010). Direct Joint Probability Method for Estimating Extreme Sea Levels. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 136(1), 66-76.
- Locat, J., Turmel, D. et Leblanc, J. (2015). Tsunamigenic landslides in Quebec. *Proc. 68th Canadian Geotechnical Conference*, 782, La Société canadienne de géotechnique, Québec.
- Lofgren, B. et Gronewold, A. (2014). Water resources. In: *Climate Change in the Midwest: A Synthesis Report for the National Climate Assessment*, J.A. Winkler, J.A. Andresen, J.L. Hatfield, D. Bidwell et D. Brown, éd., Island Press, 224-237.
- Lopez, J.A., 2009. The multiple lines of defense strategy to sustain coastal Louisiana. *Journal of Coastal Research*, 54, 186-197.
- Lyle, T.S. et Hund, S.V. (2017). *Way forward for risk assessment tools in Canada*. Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada, Dossier ouvert 8255, 103 pages, <https://doi.org/10.4095/302773>.
- Makkonen, L. (2005). Plotting positions in extreme value analysis. *J. Applied Meteorology and Climatology*, 45, 334-340.
- Manson, G.K., Davidson-Arnott, R.G.D., Ollerhead, J. (2016a). Attenuation of wave energy by nearshore sea ice: Prince Edward Island, Canada. *Journal of Coastal Research*, 32 (2), 253-263, <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00207.1>
- Manson, G.K., Davidson-Arnott, R.G.D. et Forbes, D.L. (2016b). Modelled nearshore sediment transport in open-water conditions, central North Shore of Prince Edward Island, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 53(1), 101-118, <https://doi.org/10.1139/cjes-2015-0090>
- Masina, M., Lamberti, A. et Archetti, R., 2015. Coastal flooding: A copula based approach for estimating the joint probability of water levels and waves. *Coastal Engineering*, 97, pages 37 à 52.
- Mazas, F. (2019). Extreme events: a framework for assessing natural hazards. *Natural Hazards*, 1-26.
- Mazas, F. et Hamm, L. (2011). A multi-distribution approach to POT methods for determining extreme wave heights. *Coastal Engineering*, 58(5), 385-394.
- . (2016). An event-based approach for extreme joint probabilities of waves and sea levels. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(35), 20.
- . (2017). An event-based approach for extreme joint probabilities of waves and sea levels. *Coastal Engineering*, 122, 44-59.
- Metro Vancouver. (2018). *Climate change impacts on precipitation and stormwater for 2050 and 2100 – Full Report*. Rapport préparé par GHD. <http://www.metrovancouver.org/services/liquid-waste/LiquidWastePublications/TMs-GHD-StudyImpacts-ClimateChangePrecipitationStormwater-2018.pdf>
- McNeil, D. (2019). *An Independent Review of the 2019 Flood Events in Ontario*. A Report by Ontario's Special Advisor on Flooding Report to Government to the Hon. John Yakabuski, Minister of Natural Resources and Forestry.

- Meindl, A. (1996). *Guide to Moored Buoys and Other Ocean Data Acquisition Systems*. Intergovernmental Oceanographic Commission and World Meteorological Organization, Data Buoy Cooperation Panel Technical Document No. 8.
- Melby, J.A. (2012). *Wave runup prediction for flood hazard assessment*. ERDC. CHL TR-12-24 Technical Report. Coastal and Hydraulics Laboratory, US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg. <https://erdc-library.erdcdren.mil/jspui/bitstream/11681/7355/1/ERDC-CHL-TR-12-24.pdf>
- Melby, J.A., Nadal-Caraballo, N.C. et Kobayashi, N. (2012). Wave runup prediction for flood mapping. *Coastal Engineering Proceedings*, 33: 1-15.
- Messner, F., E. Penning-Rowsell, C. Green, V. Meyer, S. Tunstall et A. van der Veen. (2006). *Guidelines for Socio-Economic Flood Damage Evaluation*. FLOODsite, HR Wallingford, R.-U.
- Meyer, V., Haase, D. et Scheuer, S. (2009). Flood risk assessment in European river basins—concept, methods, and challenges exemplified at the Mulde river. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 5(1), 17-26.
- Miller, D.J. (1960). The Alaska earthquake of July 10, 1958: giant wave in Lituya Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 50(2), 253-266.
- Milly, P., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R., Kundzewicz, Z. et Lettenmaier, D. (2008). Stationarity is Dead: Whither Water Management? *Science*, DOI: 10.1126/science.1151915 319(5863) 573-574.
- Ministry of Municipal Affairs and Housing. (2014). *Provincial Policy Statement*. Toronto.
- Mudersbach, C. et Jensen, J., 2010. Nonstationary extreme value analysis of annual maximum water levels for designing coastal structures on the German North Sea coastline. *Journal of Flood Risk Management*, 3(1), 52-62.
- Muir, L.R. et El-Shaarawi, A.H. (1986). On the calculation of extreme wave heights: a review. *Ocean Engineering*, 13(1), 93-118.
- Muis, S., Verlaan, M., Winsemius, H.C., Aerts, J.C. et Ward, P.J. (2016). A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. *Nature communications*, 7.
- Murphy, E., Osborne, P. et D. Clohan. (2016). Water level and tsunami design criteria for LNG marine terminals in BC. *Proc. 14<sup>th</sup> Triennial International Ports Conference*, American Society of Civil Engineers, Nouvelle-Orléans.
- Murphy, E., Khaliq, M. N. (2017). *Input to Canadian national guideline for flood hazard mapping: coasts & lakes*. Rapport technique OCRE-TR -2017-005. Conseil national de recherches Canada, Génie océanique, côtier et fluvial. <https://doi.org/10.4224/40000374>
- Murphy, E., Pilechi, V., Barrette, P, Khaliq, M.N. et H. Almansour. (2018). Review of Bridge Design Practice for Water Loads, Scour and Ice Action: Opportunities for Climate Resilience. *Proc. CSCE National Conference*, Fredericton, 13 au 16 juin.
- Murphy, E., Cousineau, J. et Cornett, A. (2020). Predicting Future Storm Surges and Waves in British Columbia Coastal Waters to Support Climate Risk Assessment and Coastal Infrastructure Adaptation. *Canadian Meteorological and Oceanographic Society Congress*, 15 juin.

- Narayan, S., Hanson, S., Nicholls, R.J., Clarke, D., Willems, P., Ntegeka, V. et Monbaliu, J. (2012). A holistic model for coastal flooding using system diagrams and the Source–Pathway–Receptor (SPR) concept. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(5), pages 1431 à 1439.
- Natural Resources Canada. (2017). Canadian Guidelines and Database of Flood Vulnerability Functions (ÉBAUCHE, DOCUMENT NON PUBLIÉ). Mars 2017.
- . (2019). *Cadre fédéral de la cartographie des zones inondables* (6 volumes) <https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/mrgnc-mngmnt/dsstr-prvntn-mtgn/ndmp/fldpln-mppng-fr.aspx>
- Nicholls, R., Mokrech, M., Richards, J., Bates, P., Dawson, R., Hall, J., Walkden, M., Dickson, M., Jordan, A. et Milligan, J. (2005). Assessing coastal flood risk at specific sites and regional scales: regional assessment of coastal flood risk. *Tyndall Research Project*, 2, 1-81.
- Nistor, I., Goseberg, N. et Stolle, J. (2017). Tsunami-driven debris motion and loads: A critical review. *Frontiers in Built Environment*, 3, 2.
- Nwogu, O.G. et Demirbilek, Z. (2001). *BOUSS-2D: A Boussinesq wave model for coastal regions and harbors*. Report No. ERDC/CHL-TR-01-25, Engineer Research and Development Centre, Vicksburg. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a400294.pdf>
- Olsen, A.S., Zhou, Q., Linde, J.J. et Arnbjerg-Nielsen, K., 2015. Comparing methods of calculating expected annual damage in urban pluvial flood risk assessments. *Water*, 7(1), 255-270.
- Ministère des Richesses naturelles et des Forêts de l'Ontario (MRNFO) (2001). *Great Lakes – St. Lawrence River System and Large Inland Lakes Technical Guide for Flooding, Erosion and Dynamic Beaches* [computer file] Watershed Science Centre, ISBN 0-9688196-1-3.
- . (2001b). *Understanding natural hazards: An introductory guide for public health and safety policies*. Provincial Policy Statement, 40 pages. ISBN 0-7794-1008-4.
- . (2002). *Technical guide: River & stream systems: flooding hazard limit*. Ministère des Richesses naturelles et des Forêts de l'Ontario, Peterborough, 88 pages.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B. et Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8), 929-937.
- Peck, R. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique*, 19, 171-187.
- Peng, D., Hill, E.M., Meltzner, A.J. et Switzer, A.D. (2019). Tide gauge records show that the 18.61-year nodal tidal cycle can change high water levels by up to 30 cm. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(1), 736-749.
- Peters, R., Jaffe, B., Gelfenbaum, G. et Peterson, C. (2003). *Cascadia tsunami deposit database*. U.S. Geological Survey Open-File Report, 3-13.
- Provan, M., Ferguson, S. et E. Murphy. (sous presse). Storm Surge Contributions to Flood Hazards on Canada's Atlantic Coast. *FLOODrisk 2020 – 4th European Conference on Flood Risk Management* (sous presse).

- Proverbs, D. et Lamond, J. (2017). Flood Resilient Construction and Adaptation of Buildings. *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*.
- <https://oxfordre.com/naturalhazardscience/view/10.1093/acrefore/9780199389407.001.0001/acrefore-9780199389407-e-111>.
- Sécurité publique Canada. (2012). *Lignes directrices sur la méthodologie d'évaluation tous risques 2012-2013* <https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrscs/pblctns/ll-hzrds-sssmnt/index-fr.aspx>.
- . (2019). *Base de données canadienne sur les catastrophes* <https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrscs/cndn-dsstr-dtbs/index-fr.aspx>. Consulté en août 2019.
- . (2019b). *Stratégie de sécurité civile pour le Canada : Vers un 2030 marqué par la résilience*. Sécurité publique Canada. <https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrscs/pblctns/mrgncy-mngmnt-strtg/index-fr.aspx>.
- Pugh, D. T. (1987). *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons Ltd. ISBN 0 471 91505 X.
- Pugh, D.T. et Vassie, J.M. (1980). Applications of the joint probability method for extreme sea level computations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 69(4), 959-975.
- Rabinovich, A. (2009). Seiches and Harbor Oscillations. In *Handbook of Coastal and Ocean Engineering* (éd. Y. Kim), World Scientific, Singapore.
- Radić, Valentina, Alex J. Cannon, Brian Menounos et Nayeob Gi. (2015). Future Changes in Autumn Atmospheric River Events in British Columbia, Canada, as Projected by CMIP5 Global Climate Models. *Journal of Geophysical Research*, 120, 1751–62. <https://doi.org/10.1002/2014JD022963.Received>.
- Reeve, D., Horillo-Caraballo, J., Fox, A., Simmonds, D., Kwan, S., Pan, S. et Greaves, D. (2012). Coastal defence evaluation: An SPRC approach. *Proc. 33rd Int. Conf. on Coastal Engg.*, Santander.
- Resio, D., Asher, T. et Irish, J. (2017). The effects of natural structure on estimated tropical cyclone surge extremes. *Natural Hazards*, 88, 1609-1637.
- Resio, D.T. et Westerink, J.J. (2008). Modeling the physics of storm surges. *Physics Today*, 61(9).
- Richards, W. et Daigle, R. (2011). *Scenarios and Guidance for Adaptation to Climate Change and Sea-Level Rise - NS and PEI Municipalities*. Atlantic Canada Adaptations, Dartmouth. [https://www.princeedwardisland.ca/sites/default/files/publications/scenarios\\_and\\_guidance\\_for\\_adaptation\\_to\\_climate\\_change\\_and\\_sea\\_level\\_rise\\_-\\_ns\\_and\\_pei\\_municipalities.pdf](https://www.princeedwardisland.ca/sites/default/files/publications/scenarios_and_guidance_for_adaptation_to_climate_change_and_sea_level_rise_-_ns_and_pei_municipalities.pdf)
- Robin, C., Nudds, S., MacAulay, P., Godin, A., De Lange Boom, B. et Bartlett, J. (2016). Hydrographic vertical separation surfaces (HyVSePs) for the tidal waters of Canada. *Marine Geodesy*, 39(2), 195-222.
- Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K. et Dastgheib, A. (2018). Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band runup. *Coastal Engineering*, 134, 103-123.

- Rossetto, T., Robinson D, Baiguera M. (2019). Critical Review of Tsunami Risk, Mitigation, and Preparedness for Tofino. Chapter in *Comprehensive Coastal Flood Risk Assessment* by Ebbwater Consulting Inc. Prepared for the District of Tofino.
- Ruffman, A. (1997). *Cartographie du jet de rive des tsunamis et guide de planification des mesures d'urgence : le tsunami de 1929 à St. Lawrence, Terre-Neuve : volume 1*. Mesures d'urgence Canada, Ottawa.
- Safer, A. (2016). SmartICE for Arctic mapping. Real-time sea ice data to facilitate travel in northern Canada. *Sea Technology*, 15-18.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D. et Liu, H. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1058.
- Sanchez, A., Li, H., Brown, M., Rosati, J., Demirbilek, Z., Wu, W. et Reed, C. (2014). *Coastal Modelling System: Mathematical Formulations and Numerical Methods*. U.S. Army Corps Of Engineers, Coastal Inlets Research Program ERDC/CHL TR-14-2, Vicksburg.
- Sayers, P., G. Galloway, E. Penning-Rowsell, L. Yuanyuan, S. Fuxin, C. Yiwei, W. Kang, T. Le Quesne, L. Wang et Y. Guan. (2014). Strategic Flood Management: Ten 'Golden Rules' to Guide a Sound Approach. *International Journal of River Basin Management*, 1–15.
- Sayers, P., Y. Li, G. Galloway, E. Penning-Rowsell, F. Shen, K. Wen, Y. Chen et T. Le Quesne. (2013). Flood Risk Management: A Strategic Approach. UNESCO, Paris. <http://www.sayersandpartners.co.uk/uploads/6/2/0/9/6209349/flood-risk-management-web.pdf>.
- Schiermeier, Q. (2017) Huge landslide triggered rare Greenland mega-tsunami. *Nature News*, July 31, 2017, doi: 10.1038/nature.2017.22374
- Schindelegger, M., Green, J.A.M., Wilmes, S.B. et Haigh, I.D. (2018). Can we model the effect of observed sea level rise on tides? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(7), 4593-4609.
- Smith, G. P. et P.F. Rahman. (2016). *Approaches for Estimating Flood Fatalities Relevant to Floodplain Management*. Water Research Laboratory Technical Report, University of New South Wales; Prepared for the NSW Office of Environment and Heritage.
- Solinska-Nowak, A., Magnuszewski, P., Curl, M., French, A., Keating, A., Mochizuki, J., Liu, W., Mechler, R., Kulakowska, M. et Jarzabek, L. (2018). An overview of serious games for disaster risk management—Prospects and limitations for informing actions to arrest increasing risk. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 1013-1029.
- Spross, J. et Johansson, F. (2017). When is the observational method in geotechnical engineering favourable? *Structural Safety*, 66, 17-26. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.01.006
- Stantec Consulting Ltd. et Ebbwater Consulting Inc. (2017). *ÉBAUCHE Outils d'évaluation nationale du risque global et de la résilience et du rendement du capital investi*. Rapport préparé pour Sécurité publique Canada.
- Struik, L.C., L.D. Pearce, F. Dercole, J. Shoubridge, S. van Zijll de Jong, J.D. Allan, N.L. Hastings et J.J. Clague. (2015). *Guide d'utilisation des terres axée sur les risques : Utilisation sécuritaire des terres*

*fondée sur une évaluation des risques de dommages Annexes.* Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada, Dossier ouvert 7772.

- Suppasri, A., Mas, E., Koshimura, S., Imai, K., Harada, K. et Imamura, F. (2012). Developing tsunami fragility curves from the surveyed data of the 2011 Great East Japan tsunami in Sendai and Ishinomaki Plains. *Coastal Engineering Journal*, 54(1), 1250008-1.
- Swail, V., Cardone, V., Ferguson, M., Gummer, D., Harris, E., Orelup, E. et Cox, E. (2007). The MSC50 wind and wave reanalysis. *9th International Wave Workshop on Hindcasting and Forecasting*.
- Sweet, W., Kopp, R., Weaver, C., Obeysekera, J., Horton, R., Thieler, E. et Zervas, C. (2017). *Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States*. NOAA.
- Tagg, A., K. Laverty, M. Escarameia, S. Garvin, A. Cripps, R. Craig et A. Clutterbuck. (2016). A New Standard for Flood Resistance and Resilience of Buildings, New Build and Retrofit. *European Conference on Flood Risk Management*, 13004, 2–7.
- Tagg, A. (2017). Developments in Property Resistance and Resilience. *Flood & Coast Conference*, Telford.
- Talke, S.A., Kemp, A.C. et Woodruff, J. (2018). Relative sea level, tides, and extreme water levels in Boston Harbor from 1825 to 2018. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(6), 3895-3914.
- The SWAN Team. (2009). *SWAN User Manual*. Delft University of Technology, Delft.
- Thomson, R. E., Rabinovich, A. B., Fine, I. V., Sinnott, D. C., McCarthy, A., Sutherland, N. A. S. et Neil, L. K. (2009). Meteorological tsunamis on the coasts of British Columbia and Washington. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34, 971–988. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.10.003>.
- Thomson, R., Fine, I., Rabinovich, A., Mihály, S., Davis, E., Heesemann, M. et Krassovski, M. (2011). Observation of the 2009 Samoa tsunami by the NEPTUNE-Canada cabled observatory: Test data for an operational regional tsunami forecast model. *Geophysical Research Letters*, 38(11).
- Assemblée générale des Nations Unies. (2007). Déclaration sur les droits des peuples autochtones [https://www.un.org/development/desa/indigenouspeoples/wp-content/uploads/sites/19/2018/11/UNDRIP\\_F\\_web.pdf](https://www.un.org/development/desa/indigenouspeoples/wp-content/uploads/sites/19/2018/11/UNDRIP_F_web.pdf).
- SIPC. (2009). *Terminologie pour la prévention des risques de catastrophe (UNISDR)* Stratégie internationale de la prévention des catastrophes des Nations Unies. [https://www.unisdr.org/files/7817\\_UNISDRTerminologyFrench.pdf](https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyFrench.pdf)
- . (2015). *Cadre de Sendai pour l'atténuation des risques de catastrophes 2015- 2030*. Stratégie internationale de la prévention des catastrophes des Nations Unies. [https://www.unisdr.org/files/24695\\_5frenchversiondisasterriskreduction.pdf](https://www.unisdr.org/files/24695_5frenchversiondisasterriskreduction.pdf).
- . (2016). *Collection technique de notes conceptuelles sur les indicateurs pour les sept objectifs mondiaux du Cadre de Sendai pour l'atténuation des risques de catastrophes*. Le Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophe. [http://www.preventionweb.net/documents/oiewg/Technical\\_Collection\\_of\\_Concept\\_Notes\\_on\\_Indicators.pdf](http://www.preventionweb.net/documents/oiewg/Technical_Collection_of_Concept_Notes_on_Indicators.pdf).

- . (2017). *Words into Action Guidelines: National Disaster Risk Assessment Hazard Specific Risk Assessment. 7. Coastal Erosion Hazard and Risk Assessment. Vol. 3.* <http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-4123-2>.
- Nations Unies. (2016). *Working Text on Indicators Based on Negotiations during the Second Session of the Open-Ended Inter-Governmental Expert Working Group on Indicators and Terminology Relating to Disaster Risk Reduction.* Genève, Suisse. Les 10 et 11 février 2016.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2002). *Coastal Engineering Manual (CEM)*, Engineer Manual 1110-2-1100. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC (6 volumes).
- van Alphen, J., Bourget, L., Elliott, C., Fujita, K.-i., Riedstra, D., Rooke, D. et Tachi, K. (2011). *Flood Management Approaches. As Being Practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom and United States.* Institute for Water Resources Report No: 2011-R-08. U.S. Army Corps of Engineers, Alexandria.
- van der Most, H., Táncczos, I., de Bruijn, K. M. et D. Wagenaar. (2014). New, risk-based standards for flood protection in the Nethwelands. *6th International Conference on Flood Management*, Rio de Janeiro.
- van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. et Masui, T. (2011). « The representative concentration pathways: an overview ». *Climatic Change*, 109, 5–31.
- Venturato, A.J., Arcas, D. et Kanoglu, U. (2007). *Modelling Tsunami inundation from a Cascadia Subduction Zone earthquake for Long Beach and Ocean Shores, Washington.* NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-137, Seattle.
- Wahl, T. et Chambers, D. (2015). Evidence for multidecadal variability in U.S. extreme sea level records. *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 1527–1544, doi:10.1002/2014JC010443.
- Walker, J., Murphy, E., Ciardulli, F. et Hamm, L. (2014). On the reliance on modelled wave data in the Arabian Gulf for coastal and port engineering design. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), 28.
- Ward, P. J., De Moel, H. et Aerts, J. C. J. H. (2011). How are flood risk estimates affected by the choice of return-periods? *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(12), 3181–3195. doi: 10.5194/nhess-11-3181-2011.
- Webster, T.L., Forbes, D.L., Dickie, S. et Shreenan, R. (2004). Using topographic LiDAR to map flood risk from storm-surge events for Charlottetown, Prince Edward Island, Canada. *Revue canadienne des sciences de la Terre*, 30(1), 64-76, <https://doi.org/10.5589/m03-053>
- Williams, J., Horsburgh, K., Williams, J. et Proctor, R. (2016). Tide and skew surge independence: New insights for flood risk. *AGU Geophysical Research Letters*, 43, 6410-6417, doi:10.1002/2016GL069522.
- Wilson, G.W., Özkan-Haller, H.T., Holman, R.A., Haller, M.C., Honegger, D.A. et Chickadel, C.C. (2014). Surf zone bathymetry and circulation predictions via data assimilation of remote sensing observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(3), 1993-2016.
- Wiebe, D.M. et Cox, D.T. (2014). Application of fragility curves to estimate building damage and economic loss at a community scale: a case study of Seaside, Oregon. *Natural Hazards*, 71(3), 2043-2061.

- Banque mondiale. (2017). *Implementing Nature Based Flood Protection - Principles and Implementation Guidance*. Banque mondiale, Washington. <https://doi.org/10.1596/28837>
- Wotton, B.M., M.D. Flannigan et G.A. Marshall. (2017). Potential Climate Change Impacts on Fire Intensity and Key Wildfire Suppression Thresholds in Canada. *Environmental Research Letters*, 12. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa7e6e/pdf>.
- Yeh, H., Robertson, I.N. et Preuss, J. (2005). *Development of design guidelines for structures that serve as tsunami vertical evacuation sites*. Washington Division of Geology and Earth Resources, Open File Report 2005-4.
- Zhai, L., Greenan, B., Hunter, J., James, T., Han, G. et Thomson, R. et MacAulay, P. (2014). *Estimating Sea-level Allowances for the Coasts of Canada and the Adjacent United States Using the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Rapport technique canadien sur l'hydrographie et les sciences océaniques 300, Pêches et Océans Canada, Dartmouth.
- Zhai, L., Greenan, B., Hunter, J., James, T.S., Han, G., MacAulay, P. et Henton, J.A. (2015). Estimating sea-level allowances for Atlantic Canada using the Fifth Assessment Report of the IPCC. *Atmosphere-Ocean*, 53(5), 476-490.
- Zhai, L., Greenan, B., Thomson, R. et Tinis, S. (2019). Use of Oceanic Reanalysis to Improve Estimates of Extreme Storm Surge. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 36(11), 2205-2219.
- Zijlema, M., Stelling, G. et Smit, P., 2011. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58(10), 992-1012.

Conseil national de recherches Canada  
1200, chemin de Montréal  
Ottawa (Ontario) K1A 0R6