



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada



RESSOURCES NATURELLES CANADA PRODUIT D'INFORMATION GÉNÉRALE 152f

Évaluation des aléas d'inondation côtière pour une analyse basée sur le risque sur les côtes marines du Canada

Version 1.0

Ressources naturelles Canada

2025

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre des
Ressources naturelles, 2025

Pour obtenir des renseignements sur les droits de reproduction, veuillez
communiquer avec Ressources naturelles Canada à l'adresse
copyright-droitdauteur@nrcan-rncan.gc.ca.

On peut télécharger cette publication gratuitement à partir du Dépôt
ouvert des sciences et technologie de RNCAN : [https://ostrnrcan-
dostrnrcan.canada.ca/](https://ostrnrcan-dostrnrcan.canada.ca/)

ISBN 978-0-660-76607-2
N° de catalogue M45-152/2025F-PDF

<https://doi.org/10.4095/331976>

Canada



Évaluation des aléas d'inondation côtière pour une analyse basée sur le risque sur les côtes marines du Canada

Version 1.0

2025

Ressources naturelles Canada

Produit d'information générale 152f

Ressources naturelles Canada

Sécurité publique Canada

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre des Ressources naturelles, 2025

Lien permanent : <http://doi.org/10.4095/331976>

Pour obtenir des renseignements sur les droits de reproduction, veuillez communiquer avec
Ressources naturelles Canada à copyright-droitdauteur@nrcan-rncan.gc.ca.



Gouvernement
du Canada

Government
of Canada

Canada

Révisé par

Sean Ferguson
Conseil national de recherches Canada

Nicky Hastings
Ressources naturelles Canada

Julie Van de Valk
Ressources naturelles Canada

Enda Murphy
Conseil national de recherches Canada

Joseph Kim
Université d'Ottawa

Citation recommandée

Ferguson, S., Hastings, N. L., Van de Valk, J., Murphy, E. et Kim, J. éditeurs (2025). *Évaluation des aléas d'inondation côtière pour une analyse basée sur le risque sur les côtes marines du Canada*. Gouvernement du Canada.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	4
Avis	4
Contexte	5
Cadre fédéral de la cartographie des zones inondables	6
Série « guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables »	7
Résumé des guides d'orientation	7
Abréviations et acronymes	10
1.0 Introduction.....	13
1.1. Objectif et portée.....	14
1.2. Applicabilité et exclusions	14
1.3. Public cible.....	15
1.4. Élaboration du guide d'orientation	16
1.5. Orientation connexe	16
1.6. Remarque sur la terminologie	17
1.7. Cadre d'évaluation des aléas d'inondation côtière pour une analyse basée sur le risque sur les côtes marines du Canada	20
1.8. Références	22
2.0 Définition préliminaire des objectifs, des scénarios et des aléas	24
2.1. Introduction	25
2.2. Caractérisation des objectifs	25
2.3. Élaboration de scénarios et d'événements.....	26
2.4. Examen du contexte	33
2.5. Établir la portée du projet	37
2.6. Références	38
3.0 Mobilisation des communautés et des partenaires.....	39
3.1. Introduction	40
3.2. Ce qu'il faut savoir avant de mobiliser	40
3.3. Principes de partenariat et de mobilisation des communautés	41
3.4. Qui inclure et comment le faire.....	42
3.5. La gouvernance pour une mobilisation réussie	44
3.6. Plan de mobilisation	45
3.7. Transition à la fin du projet.....	46
3.8. Références	46

4.0	Collecte des données	48
4.1.	Introduction	49
4.2.	Données d'élévation : Bathymétrie et topographie	49
4.3.	Données communautaires et observations locales	54
4.4.	Données météorologiques	56
4.5.	Données sur le niveau de l'eau	60
4.6.	Vagues	63
4.7	Sources d'aléas de tsunami.....	64
4.8.	Données sur la glace de mer	68
4.9.	Couverture du sol et rugosité	69
4.10.	Bâtiments, infrastructures et protection contre les inondations	70
4.11.	Projections face aux changements climatiques	70
4.12.	Changement du niveau de la mer dans les océans entourant le Canada	71
4.13.	Références.....	72
5.0	Modélisation et analyse des aléas d'inondation côtière	80
5.1.	Introduction	81
5.2.	Recensement et conceptualisation des aléas	81
5.3.	Mesures et indicateurs de risques.....	91
5.4.	Méthodes de modélisation et d'analyse	91
5.5.	Modélisation des risques de tsunamis.....	113
5.6.	Effets des changements climatiques	121
5.7.	Références	125
6.0	Communiquer les résultats de l'évaluation des risques.....	135
6.1.	Introduction	136
6.2.	Processus de communication	136
6.3.	Interprétation des résultats.....	137
6.4.	Outils de communication.....	140
6.5.	Définir le public cible	145
6.6.	Autres facteurs de communication à considérer.....	149
6.7.	Références	150

Remerciements

La série « [Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables](#) » (GOF CZI) a été élaborée sous la direction du Comité de la cartographie des zones inondables, un partenariat entre Ressources naturelles Canada, Sécurité publique Canada et les membres des ministères et organismes fédéraux intéressés à la cartographie des zones inondables.

Les contributions à l'élaboration de ces lignes directrices comprennent le soutien financier du Programme canadien pour la sûreté et la sécurité de Recherche et développement pour la défense Canada (RDDC) et des partenaires directement impliqués dans le projet d'atténuation des inondations côtières du Canada, notamment le Programme Géoscience de la sécurité publique de Ressources naturelles Canada, le Conseil national de recherches Canada (CNRC), le ministère des Pêches et des Océans, l'Université de Victoria et Ocean Networks Canada. Le document a été examiné par un groupe de travail technique composé de représentants clés des compétences fédérale, provinciales, territoriales et municipales, des communautés autochtones, du secteur privé et du milieu universitaire. La contribution de groupes de travail bénévoles possédant une expertise reconnue en la matière, ainsi que des rapports et des études de contrat ont été cruciaux dans l'élaboration de ces lignes directrices. De plus, des représentants des gouvernements provinciaux et territoriaux ont fourni des commentaires essentiels pour cette publication. Grant Lamont de Northwest Hydraulics Consultants et Joshua Wiebe ont fourni des commentaires et des suggestions utiles pour améliorer diverses sections du guide d'orientation. Ce document a été édité par Sarah MacKinnon d'Interwoven Editing.

Avis

Exonération de responsabilité

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

Renseignements supplémentaires

Pour plus de renseignements à propos de ce document, veuillez communiquer avec le Centre canadien de cartographie et d'observation de la Terre de Ressources naturelles Canada à l'adresse suivante : geoinfo@nrcan-rncan.gc.ca.

Contexte

Une communauté atteint un niveau élevé de résilience lorsque ses risques sont gérés de manière proactive, qu'elle est préparée de manière adéquate aux catastrophes connues et potentielles et qu'elle démontre sa capacité à se rétablir après de tels événements. Pour devenir résiliente, les planificateurs des mesures d'atténuation d'une communauté doivent d'abord comprendre les risques et s'assurer de leur capacité à gérer ces risques.

Les inondations sont les aléas naturels les plus communs au Canada et représentent la plus grande partie des coûts de rétablissement après une catastrophe sur une base annuelle (Sécurité publique Canada, 2022). L'atténuation des risques d'inondation est donc essentielle pour accroître la résilience des collectivités touchées. En investissant de manière proactive dans des mesures d'atténuation des risques d'inondation, une collectivité a un impact positif sur sa croissance et sa prospérité futures, en réduisant le risque de coûts importants de rétablissement à la suite d'une catastrophe, de pertes de productivité, de pertes économiques, de destruction de biens culturels non monétaires, de dommages environnementaux, de blessures et de décès.

Une inondation est une submersion temporaire par l'eau de terres normalement sèches et peut se produire sur les côtes marines et lacustres, le long des rivières et dans les zones de faible altitude. Les inondations sont causées par des précipitations extrêmes, la fonte rapide des neiges, des glaces ou des glaciers, des vents violents (ondes de tempête et vagues), l'obstruction des cours d'eau par des embâcles ou des débris, la défaillance d'ouvrages de génie civil, y compris les barrages, les mauvaises caractéristiques de drainage, le niveau élevé des eaux souterraines et d'autres sources. Une cartographie des zones inondables décrivant avec précision les aléas de l'inondation, y compris ceux liés aux conditions futures dues au développement prévu ou aux changements climatiques projetés, est la condition préalable aux mesures d'atténuation et constitue la première étape pour accroître la résilience des communautés face aux inondations. L'établissement d'une approche nationale de la cartographie des zones inondables facilitera l'adoption d'une meilleure pratique nationale commune et augmentera le partage et l'utilisation des informations sur les aléas de l'inondation, améliorant ainsi la base à partir de laquelle d'autres efforts d'atténuation des risques d'inondation peuvent être initiés.

Cadre fédéral de la cartographie des zones inondables

Le cadre fédéral de la cartographie des zones inondables est composé de tous les éléments du processus d'atténuation des inondations, depuis le recensement des aléas d'inondation jusqu'à la mise en œuvre d'interventions visant à atténuer les inondations. La [Figure 1](#), illustre la relation entre ces différentes composantes.

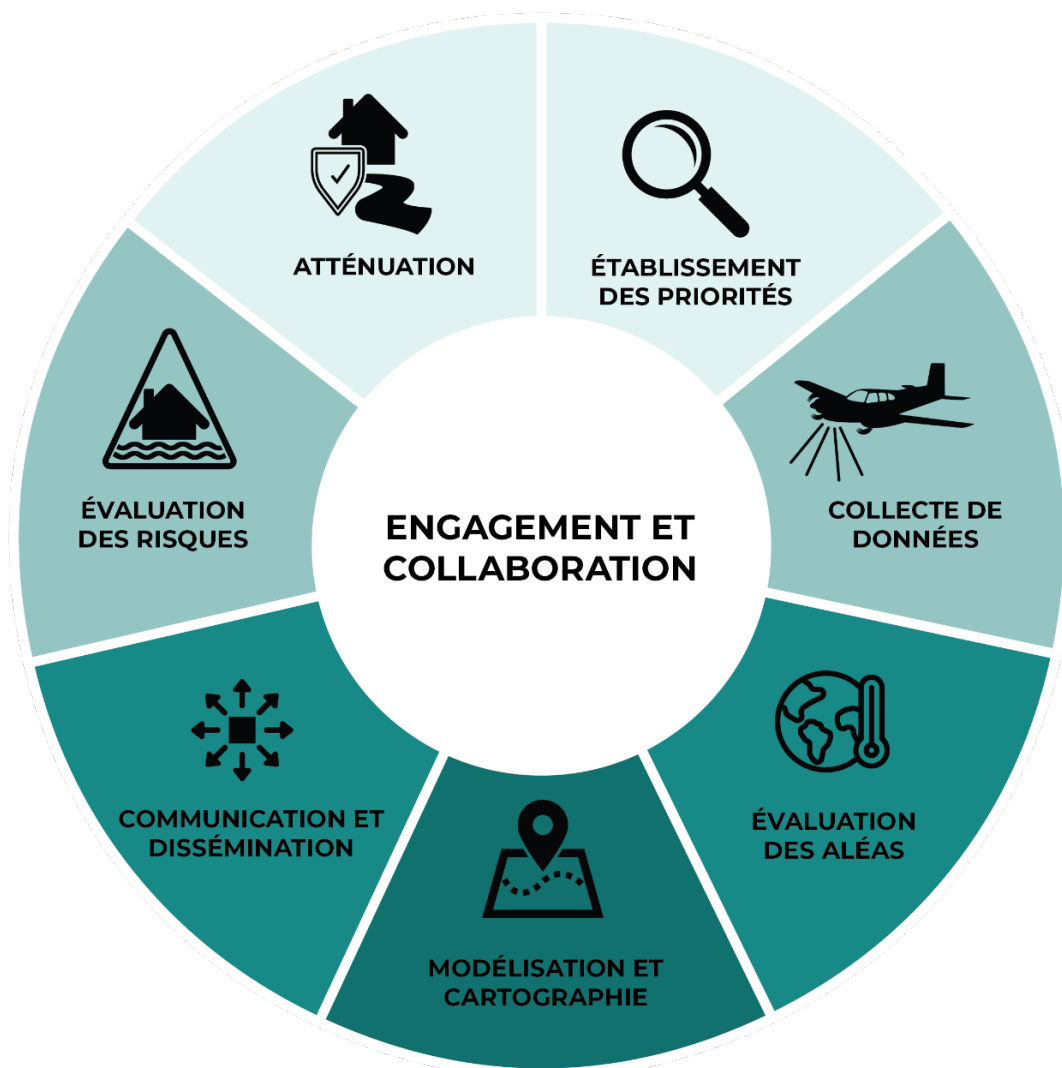


Figure 1. Cadre de la cartographie des zones inondables.

Série « guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables »

Les documents suivants sont des sources d'information à l'intention de toute personne ou organisation participant à la gestion des zones inondables au Canada.

1. Cadre fédéral de la cartographie des zones inondables
2. Guide d'orientation fédéral sur le recensement des aléas d'inondation et établissement des priorités
3. Guide d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par lidar aéroporté
4. Études de cas sur les changements climatiques en cartographie des plaines inondables
5. Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables
- 6. Évaluation des aléas d'inondation côtière pour une analyse basée sur le risque sur les côtes marines du Canada**
7. Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables
8. Guide d'orientation fédéral pour l'évaluation des risques d'inondation
9. Guide d'orientation fédéral sur l'estimation des dommages causés aux bâtiments et aux infrastructures par les inondations
10. Guide d'orientation fédéral de l'aménagement du territoire dans les zones à risque d'inondation
11. Bibliographie des meilleures pratiques et des références concernant l'atténuation des inondations

Résumé des guides d'orientation

La liste ci-dessus de la série de guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables est résumée comme suit :

1. Cadre fédéral de la cartographie des zones inondables

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

2. Guide d'orientation fédéral sur le recensement des aléas d'inondation et établissement des priorités

Ce document présente les méthodes permettant de déterminer où réaliser la cartographie des zones inondables et comment prioriser les projets de cartographie des zones inondables.

3. Guide d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par Lidar aéroporté

Ce document est une ressource pour l'acquisition de données d'élévation de base à partir de données lidar aéroportées entreprises à travers le Canada. Ces lignes directrices fournissent des caractéristiques techniques aux ministères fédéraux, provinciaux et territoriaux, ainsi qu'aux personnes et aux organisations au Canada qui ont besoin d'information pour comprendre et planifier l'acquisition de données lidar aéroportées.

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

Cette collection de documents décrit des projets au Canada où les changements climatiques ont été intégrés au processus de cartographie des zones inondables. Elle fournit des exemples dont les spécialistes peuvent s'inspirer et tirer des leçons de l'expérience des autres et complète les informations et les ressources liées aux changements climatiques incluses dans le document « Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des risques d'inondation ».

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

Ce document fournit des conseils aux organismes municipaux, provinciaux et territoriaux et aux communautés autochtones qui travaillent à la production de cartes des zones inondables. Il fournit des informations techniques sur les types d'inondations fluviales et lacustres, les pratiques générales, les procédures d'analyses hydrologiques et hydrauliques, les procédures d'intégration des changements climatiques et les bonnes pratiques en matière de rapports.

6. Évaluation des aléas d'inondation côtière pour une analyse basée sur le risque sur les côtes marines du Canada

Ce document fournit des conseils sur les méthodologies d'évaluation des aléas d'inondation côtière en utilisant des approches axées sur le risque.

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

Ce document contient des informations sur les différents types de cartes de zones inondables et décrit les caractéristiques techniques à prendre en compte lors de l'acquisition, de la gestion et de la diffusion de ces cartes et de leurs données géospatiales associées.

8. Guide d'orientation fédéral pour l'évaluation des risques d'inondation

Ce document offre de l'orientation technique sur le déroulement des évaluations des risques d'inondation au Canada.

9. Guide d'orientation fédéral sur l'estimation des dommages causés aux bâtiments et aux infrastructures par les inondations

Ce document fournit des conseils sur la manière d'évaluer les pertes économiques potentielles encourues à la suite d'une inondation, en mettant l'accent sur les bâtiments et les infrastructures.

10. Guide d'orientation fédéral de l'aménagement du territoire dans les zones à risque d'inondation

Ce document fournit des conseils aux communautés pour l'utilisation de méthodologies basées sur le risque aux fins de l'aménagement du territoire en tenant compte des zones inondables.

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

Ce document contient des listes de références et d'études de cas canadiennes et internationales portant sur l'hydrologie et l'hydraulique, les changements climatiques, l'évaluation des risques et la cartographie des zones inondables. L'objectif de ce document est de fournir une liste d'ouvrages de référence destinés à servir de ressources supplémentaires aux spécialistes impliqués dans la cartographie des zones inondables.

Abréviations et acronymes

2DH	Bidimensionnel horizontal
AAC	Archipel arctique canadien
AIG	Ajustement isostatique glaciaire
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
BDOB	Base de données ouverte sur les bâtiments
BMIGM	Basse mer inférieure, grande marée
BNURRC	Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophes
CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
CGIPN	Centre de gouvernance de l'information des Premières Nations
CGVD	Système canadien de référence altimétrique
CGVD2013	Système canadien de référence altimétrique 2013
CGVD28	Système canadien de référence altimétrique 1928
CMIP5	Projet de comparaison de modèles couplés — Étape 5
CNRC	Conseil national de recherches Canada
COMCOT	Modèle couplé tsunami-multimailles de Cornell
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
COULWAVE	<i>Cornell University Long and Intermediate Wave Model</i> (modèle de vagues longues et intermédiaires de l'Université de Cornell)
DART	Détection et relevés de tsunamis
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
ECMWF	Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme
EMNM	Élévation mondiale du niveau de la mer
ENSO	Oscillation australe El Niño–La Niña
ERA5	Réanalyse ECMWF de 5 ^e génération
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i> (Institut de recherche sur les systèmes environnementaux)
ESV	Équations de Saint-Venant
ESW	Élévation de Stillwater
FEMA	<i>Federal Emergency Management Agency</i>
FME	<i>Feature Manipulation Engine</i> (dispositif de manipulation des éléments)

GDAL	<i>Geospatial Data Abstraction Library</i> (base d'abstraction de données géospatiales)
GEBCO	Carte générale bathymétrique des océans
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GOFCZI	Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables
GPA	Glacé de plusieurs années
IRA	Intervalle de récurrence annuel
ISM	Institut des sciences de la mer
LAMV	Limite de l'action modérée des vagues
LGC	Levés géodésiques du Canada
LIDAR	Détection et télémétrie par ondes lumineuses
MNE	Modèle numérique d'élévation
MNEHR	Modèle numérique d'élévation de haute résolution
MNHV	Modèle non hydrostatique des vagues
MNS	Modèle numérique d'élévation
MNT	Modèle numérique de terrain
MOST	<i>Method of Splitting Tsunami</i> (méthode de division de tsunami)
MPO	Pêches et Océans Canada
NCEI—SMD	<i>National Centers for Environmental Information</i> (Centres nationaux d'information sur l'environnement) — Système mondial de données
NEOWAVE	Évolution non hydrostatique des vagues marines
NMM	Niveau moyen de la mer
NMGM	Niveau moyen global de la mer
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NONNA	Non navigationnelles
NSIDC	<i>National Snow and Ice Data Center</i> (Centre national de données sur la neige et la glace)
NTHMP	<i>National Tsunami Hazard Mapping Program</i> (Programme national de cartographie des dangers liés aux tsunamis)
OCANEE	Outil canadien d'adaptation aux niveaux d'eau extrêmes
OMM	Organisation météorologique mondiale
ONC	<i>Ocean Networks Canada</i>

PCAP	Propriété, contrôle, accès et possession (principes des Premières Nations)
PDA	Probabilité de dépassement annuelle
PMA	Peaufinement du maillage adaptatif
PMSGM	Pleine mer supérieure, grande marée
PMSM	Pleine mer supérieure moyenne
PMSMM	Pleine mer supérieure, marée moyenne
PPB	Ports pour petits bateaux
RNCan	Ressources naturelles Canada
RTK GPS	Système mondial de localisation cinématique en temps réel
SCG	Service canadien des glaces
SD	Écart-type
SDMM	Section des données sur le milieu marin
SEP	Surfaces de séparation
SHC	Service hydrographique du Canada
SSVHy	Surfaces de séparation verticales hydrographiques
TUNAMI	<i>Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation</i> (modèle d'analyse numérique de la Tohoku University pour la recherche)
ZC	Zéro des cartes
ZSC	Zone de subduction de Cascadia

1.0 Introduction

Auteurs principaux

Sean Ferguson (Conseil national de recherches Canada), Nicky Hastings (Ressources naturelles Canada), Julie Van de Valk (Sécurité publique Canada), Nicky Hastings (Ressources naturelles Canada), Enda Murphy (Conseil national de recherches Canada) et Joseph Kim (Université d'Ottawa).

Contributeurs

Sheila Ball (Environnement et Changement climatique Canada), Lisa Landon-Roy (Ressources naturelles Canada), Sylvain Vallières (Ressources naturelles Canada) et Zheng Ki Yip (Ressources naturelles Canada).

Citation recommandée

Ferguson, S., Hastings, N. L., Van de Valk, J., Murphy, E. et Kim, J. (2025). Introduction. Dans *Évaluation des aléas d'inondation côtière pour l'analyse fondée sur le risque concernant les côtes marines du Canada*. Éditeurs Ferguson, S., Hastings, N. L., Van de Valk, J., Murphy, E. et Kim, J. Gouvernement du Canada.

1.1 Objectif et portée

Ce document présente une orientation sur l'évaluation des aléas d'inondation actuels et futurs sur les côtes maritimes pour étayer l'analyse basée sur le risque et la prise de décision fondée sur des données probantes. Les lignes directrices définissent :

- Un cadre et une méthodologie pour effectuer l'évaluation des aléas d'inondation côtière afin de fournir des renseignements de qualité appropriée pour les analyses basées sur les risques.
- Des directives pour établir les objectifs de l'évaluation des aléas et la portée du projet.
- Des directives pour collaborer avec les communautés, les partenaires, les parties prenantes et les titulaires de droits.
- Les besoins en données, les sources de données et les informations pour étayer l'évaluation des aléas d'inondation côtière.
- Des procédés techniques d'évaluation des aléas d'inondation côtière.
- Des directives pour communiquer les conclusions et des résultats des évaluations de aléas.
- Des encadrés bleus figurent dans le document et sont destinés à présenter des exemples du contenu technique.

1.2 Applicabilité et exclusions

Ce guide fournit une orientation technique non prescriptive sur l'évaluation des aléas d'inondation côtière actuels et futurs, ce qui constitue une composante essentielle de l'analyse basée sur le risque (voir le [chapitre 2](#)). L'orientation fournie dans ce document reflète les meilleures pratiques et les procédures pour faciliter la production de renseignements sur les aléas de haute qualité qui serviront à des tâches ultérieures d'évaluation des risques.

Ce document porte spécialement sur une évaluation des aléas d'inondation côtière (voir la Figure 1.1. Élaboration d'une évaluation des aléas d'inondation côtière dans le cadre du processus de la cartographie des zones inondables. Les renseignements de sortie de cette évaluation sont destinés à guider les tâches ultérieures d'évaluation des risques (telles que l'évaluation de l'exposition et de la vulnérabilité, l'estimation des dommages et l'étude des mesures d'atténuation), mais ce guide ne s'attarde pas à ces sujets, au-delà d'une description pour des besoins de renseignements et du lien avec l'évaluation des aléas. Les lecteurs doivent se reporter à d'autres publications fédérales (voir la [section 1.5](#)) pour obtenir une orientation sur les autres composantes de l'évaluation des risques.

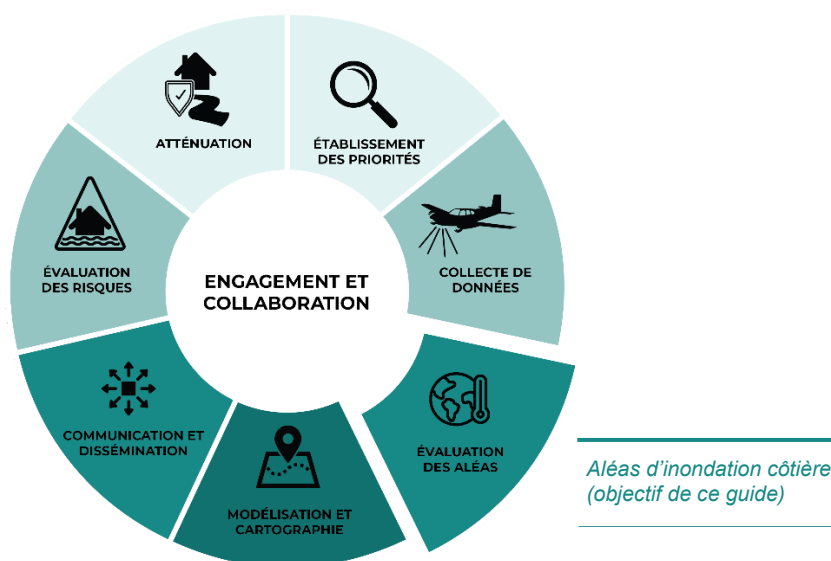


Figure 1.1. Élaboration d'une évaluation des aléas d'inondation côtière dans le cadre du processus de la cartographie des zones inondables.

Le Canada est signataire du Cadre international d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe (UNISDR, 2015), qui met l'accent sur des approches multi-aléas pour évaluer et gérer les risques de catastrophe. Cette ligne directrice s'accorde sur les principes clés de Sendai et présente les meilleures pratiques à adopter dans le cadre de l'évaluation des aléas d'inondation côtière pour étayer une analyse basée sur le risque. Les aléas en cascade ou interdépendants (p. ex., les incendies de forêt, les tremblements de terre ou les glissements de terrain) ne sont pas pris en compte ni abordés, au-delà du fait que les aléas d'inondation côtière proviennent de sources multiples. Cependant, les renseignements présentés dans ce guide serviront de base précieuse sur la façon dont les aléas d'inondation côtière peuvent être caractérisés dans le cadre des évaluations des risques multi-aléas. L'érosion côtière et le transport sédimentaire ne sont pas abordés dans ce guide. Les prochains guides de la série traiteront de cet aléa côtier.

1.3 Public cible

Ce guide présente des directives techniques aux spécialistes canadiens chargés d'effectuer une évaluation des aléas d'inondation côtière pour étayer une analyse fondée sur le risque. Des renseignements de référence sont également fournis aux représentants des communautés et aux décideuses et décideurs qui cherchent à évaluer les aléas d'inondation côtière et à effectuer une analyse basée sur l'évaluation des risques pour leur communauté ou leur communauté. En particulier, le [chapitre 2](#) est principalement destiné à aider les décideurs à comprendre et à établir la portée d'une évaluation des aléas d'inondation côtière, tandis que les chapitres [4](#), [5](#) et [6](#) sont principalement destinés à aider les spécialistes techniques à préparer, à exécuter et à communiquer des analyses techniques. Cependant, les publics techniques et non techniques peuvent tirer des leçons précieuses de tous les chapitres. Par exemple, les spécialistes techniques peuvent se reporter au [chapitre 2](#) pour mieux comprendre les facteurs qui influencent la portée des projets, et les décideurs non techniques peuvent se reporter au [chapitre 5](#) pour comprendre et anticiper l'effort de modélisation nécessaire. Le [chapitre 3](#) fournit

une orientation sur la mobilisation des communautés et des partenaires qui s'adresse largement aux publics techniques et non techniques.

1.4 Élaboration du guide d'orientation

Ce guide a été élaboré par une équipe de chercheurs et de spécialistes possédant des connaissances et des expertises diverses liées à l'ingénierie des ressources en eau et côtières, aux aléas naturels, à l'évaluation des risques, à la géologie, aux sciences de la terre et à la mobilisation des communautés.

L'expérience des parties impliquées et les leçons apprises directement des études menées dans trois communautés côtières canadiennes du Pacifique, de l'Arctique et de l'Atlantique ont permis d'élaborer ce guide (Ferguson et coll., 2022, Kim et coll., 2024 et Rabinovich et coll., 2023). Chaque étude de cas a été menée en partenariat avec des spécialistes locaux et des représentants des communautés afin de définir et d'aborder les préoccupations locales et régionales. Les partenariats entre l'équipe de recherche principale, les spécialistes locaux et les membres de la communauté ont favorisé les possibilités de partage de données et de recherche collaborative afin d'améliorer les résultats de l'étude et de faire progresser les connaissances sur les risques et les aléas d'inondation côtière au Canada. Le processus d'élaboration des directives est illustré dans la [Figure 1.2](#).

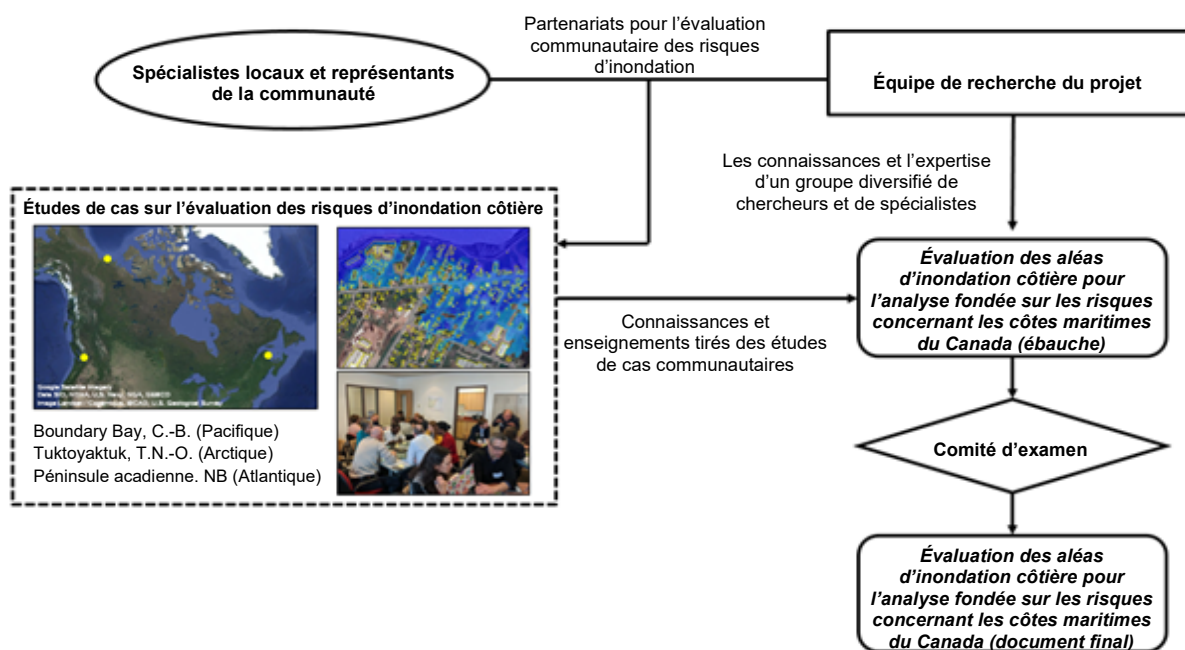


Figure 1.2. Processus d'élaboration des lignes directrices. Source : Shippagan, NB (2025-001)

1.5 Orientation connexe

Ce guide a été rédigé de manière à s'accorder aux lignes directrices canadiennes applicables à l'évaluation d'aléa d'inondation côtière. Une série complète et en cours d'élaboration de lignes directrices est fournie dans la série « [Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des](#)

[zones inondables](#) » (GOFCCI) et comprend des lignes directrices sur l'acquisition de données par Lidar, les procédures hydrologiques et hydrauliques, la géomatique, l'estimation des dommages et l'évaluation des risques. Ce document présente des directives sur l'évaluation d'aléa d'inondation côtière pour étayer des analyses fondées sur les risques au sujet des côtes maritimes du Canada en s'appuyant sur la description d'aléa d'inondation côtière fournie dans les Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables des GOFCCI. Les lecteurs sont invités à consulter les GOFCCI pour obtenir de l'orientation sur l'estimation des dommages et l'évaluation des risques.

Des renseignements et des directives supplémentaires propres à la conception des bâtiments et des infrastructures se trouvent dans les Lignes directrices pour l'évaluation des aléas d'inondation côtière pour les applications de conception de bâtiments et d'infrastructures, publiées par Conseil national de recherches Canada (CNRC) (Murphy et coll., 2020). Murphy et coll. (2020) fournissent une orientation propre à l'évaluation des risques et des aléas pour les bâtiments et les infrastructures, tandis que les présentes lignes directrices s'appliquent plus largement à l'évaluation d'aléa d'inondation dans les zones côtières marines pour étayer l'analyse basée sur le risque.

La prise en compte de la hausse future du niveau de la mer est un aspect essentiel de l'évaluation d'aléa d'inondation côtière dans un contexte d'incertitude liée aux changements climatiques. Des cartes nationales et régionales et des fichiers de données sur les changements prévus du niveau de la mer au Canada sont fournis par James et coll. (2021).

En plus des lignes directrices fédérales et des références internationales, il existe des lignes directrices provinciales et territoriales établies par plusieurs compétences ainsi que des documents d'orientation émanant d'organisations professionnelles. Ces directives fédérales visent à soutenir les compétences qui n'ont pas de directives ou à servir de référence supplémentaire aux communautés qui en ont établi. Elles ne visent pas à remplacer l'orientation locale, mais plutôt à compléter les normes de pratique ou l'orientation existante.

1.6 Remarque sur la terminologie

Le concept de risque est souvent mal utilisé. Dans le cadre d'une évaluation d'aléa, le risque est évalué en fonction de la probabilité d'une inondation. La probabilité d'une inondation est généralement exprimée par une période de récurrence ou une probabilité de dépassement annuelle (PDA). La [section 2.3.4](#) décrit en détail la vraisemblance d'un événement. Par exemple, une période de récurrence de 1 sur 100 ans peut souvent être interprétée à tort comme signifiant qu'un événement ne se produit qu'une fois en 100 ans. En réalité, il y a 1 % de chance qu'un événement ayant une PDA de 1 sur 100 se produise au cours d'une année donnée. Dans cette ligne directrice, la PDA est utilisée pour décrire la probabilité d'inondation.

Le risque d'inondation côtière englobe la probabilité d'une inondation et ses conséquences en fonction de la vulnérabilité, de la proximité ou de l'exposition (RNCAN, 2022). Dans les meilleures pratiques, la prise de décision en matière de réduction des risques est basée sur des événements ayant des probabilités différentes (par opposition à un seul événement ayant une probabilité unique) et une compréhension de leurs répercussions. De plus amples renseignements sur l'évaluation des risques se trouvent dans Murphy et coll. (2020). La

compréhension du risque dans la perspective de divers événements permet de prendre des décisions pour le réduire efficacement. Le risque est dynamique et évolue dans le temps en raison des changements de l'utilisation des terres, du changement relatif du niveau marin et de l'érosion côtière, entre autres facteurs.

Lorsqu'une évaluation détaillée des aléas d'inondation côtière est effectuée, les résultats doivent orienter l'évaluation des risques et, par la suite, les décisions sur les priorités présentes et futures en matière de mesures d'atténuation des catastrophes et d'adaptation (voir RNCAN, 2022).

Les définitions suivantes sont fournies pour des termes techniques et non techniques afin de clarifier leur définition prévue dans cette directive et d'éviter toute erreur d'interprétation. Les définitions s'efforcent d'utiliser un langage courant et une description adéquate pour permettre une compréhension approfondie. Pour favoriser l'uniformité de la terminologie, les définitions fournies ci-dessous ont été recueillies à partir des principales sources liées à l'évaluation des inondations côtières, y compris l'orientation fournie dans les GOFCCI (RNCAN, 2024) et par la FEMA (s.d.).

Aléas : Un événement physique, un phénomène ou une activité anthropique potentiellement dommageable qui peut causer la perte de vies humaines, des blessures, des dommages matériels, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement.

Cartographie des zones inondables : La délimitation de l'étendue et de l'élévation des crues sur une carte de base. Cette carte se présente habituellement sous forme de repères de crue qui indiquent la zone recouverte d'eau ou la hauteur que pourrait atteindre l'eau dans l'éventualité d'une inondation. Dans le cas de scénarios plus complexes, les données indiquées sur les cartes peuvent aussi indiquer les vitesses d'écoulement, la hauteur de l'eau, d'autres paramètres de risques et des vulnérabilités (RNCAN, 2021).

Conséquence : Les conséquences représentent « des effets, comme des dommages ou des améliorations sur les plans économique, social ou environnemental qui peuvent résulter d'une inondation. Elles peuvent être exprimées de manière quantitative (p. ex. valeur pécuniaire), par catégorie (p. ex. élevée, modérée, faible) ou de manière descriptive » [traduction libre] (Zevenbergen et coll., 2010).

Le terme « impact » peut également être utilisé comme terme générique pour « effet », tandis que les conséquences renvoient plus précisément aux aléas.

Débordement des vagues : « Le débordement des vagues se produit lorsque le déferlement d'ondes atteint le sommet de la dune ou de la falaise et ruisselle ou éclabousse la zone située derrière. En raison de ces phénomènes, les propriétés situées à des altitudes relativement élevées au-dessus du niveau d'équilibre total ou derrière des structures de protection peuvent être exposées à un risque d'inondation côtière » (FEMA, s.d.).

Déferlement d'ondes : « Dans les régions où la terre ferme est élevée et la ligne de rivage abrupte, les vagues se brisent sur la ligne de rivage et l'eau recouvre la face de la plage, de la dune, de la falaise ou de la structure qu'elle rencontre. Cette montée d'eau est appelée un déferlement d'ondes » (FEMA, s.d.).

Évaluation des risques d'inondation : Une méthode d'évaluation de la nature et de l'étendue de l'aléa d'inondation, qui pourrait avoir un impact négatif sur les personnes et les infrastructures, par le biais d'une analyse de l'aléa et de la vulnérabilité.

Événement : La réalisation ou l'occurrence d'une source potentiellement génératrice d'inondations (ou plusieurs sources, dans le cas d'événements composés) qui s'est produite antérieurement (événement historique) ou qui pourrait se produire (événement hypothétique). Les événements ne sont liés qu'à des processus naturels (sources) et peuvent être caractérisés par leur ampleur ou par leur intensité (et la fréquence ou la probabilité de fréquence connexe) ainsi que par leur répartition spatiale ou temporelle. En effet, les approches de modélisation des inondations « basées sur les événements » (p. ex. Conner et coll., 2011) diffèrent des approches « basées sur les répercussions » dans la mesure où la probabilité se rapporte à la source de l'aléa, par opposition à la probabilité associée à la conséquence entraînée par l'événement (p. ex. la hauteur d'une inondation dans la communauté). Voici des exemples d'inondations : l'inondation provoquée par une tempête le 6 décembre 2010 dans la péninsule acadienne, au Nouveau-Brunswick (événement historique); un événement extrême ayant une PDA de 1 % pour le niveau d'eau à Belledune, au Nouveau-Brunswick (événement hypothétique).

Exposition : La présence d'actifs de valeur dans une zone sujette aux aléas (Nations Unies, 2016) ou l'ampleur d'un événement subi par un actif.

Inondation : Le recouvrement temporaire par l'eau de terres normalement sèches (RNCAN, 2021).

Intervalle de récurrence annuel (IRA) : Également appelé « période de récurrence », il s'agit de l'inverse de la PDA, exprimé en nombre d'années (RNCAN, 2022).

Onde de tempête : Augmentation (ou diminution) du niveau en eau calme dans une zone côtière en raison des conditions météorologiques. Les ondes de tempête peuvent inclure la dénivellation due au vent et la dénivellation due à la pression atmosphérique (Murphy et coll., 2020).

Période de récurrence : Un équivalent de l'intervalle de récurrence annuelle (IRA), il s'agit de l'inverse de la PDA, exprimé en nombre d'années (RNCAN, 2022).

Probabilité de dépassement annuel (PDA) : La probabilité, exprimée en pourcentage, qu'un débit de crue ou un niveau d'eau donné se produise ou soit dépassé au cours d'une année donnée. Les inondations sont généralement exprimées en termes de probabilité de dépassement annuel (PDA) ou de période de retour. Par exemple, une inondation de 1 % PDA et une inondation qui présente une récurrence de 100 ans sont équivalentes. Cependant, le concept de période de retour est parfois mal interprété par un public non spécialisé, qui y voit une période de temps entre deux événements (p. ex., 100 ans jusqu'à la prochaine inondation centennale) plutôt qu'une probabilité annuelle (RNCAN, 2023).

Propagation des vagues en surface : « Le long des côtes de faible altitude, des terres habituellement sèches peuvent être recouvertes d'eau lors d'un événement pluviohydrologique. Les vagues se déplacent le long de la surface de l'eau selon un processus appelé propagation

des vagues en surface. Au fur et à mesure que les vagues se déplacent sur la terre ferme, des éléments tels que le sol surélevé, les arbres et les bâtiments font rapetisser les vagues. Si les vagues traversent un espace ouvert, comme un étang ou un terrain de golf, et sont alimentées à nouveau par des vents forts, elles peuvent s'amplifier » (FEMA, s.d.).

Risque d'inondation : Conséquence d'un aléa précis, exprimée en termes de probabilité et basée sur des considérations de vulnérabilité et d'exposition.

Scénario : « Descriptions plausibles de la manière dont le système et ses forces de changement peuvent se développer [...] sur la base d'un ensemble cohérent d'hypothèses portant sur les relations clés et les forces de changement » (Walker et coll., 2003).

Surélévation de la surface libre : « Les vagues qui se brisent sur le littoral poussent l'eau vers l'avant et vers le haut, ce qui fait augmenter le niveau de l'eau sur la côte. C'est ce que l'on appelle la surélévation de la surface libre. La surélévation de la surface libre augmente le niveau de l'eau, c'est pourquoi la combinaison d'une surélévation de la surface libre et d'une onde de tempête s'appelle le niveau d'équilibre total » (FEMA, s.d.).

Vulnérabilité : Les conditions résultant de facteurs ou de processus physiques, sociaux, économiques et environnementaux qui prédisposent un individu, une communauté, des actifs de valeur ou des systèmes à subir les effets néfastes des aléas (UNISDR, 2021).

1.7 Cadre d'évaluation des aléas d'inondation côtière pour une analyse basée sur le risque sur les côtes marines du Canada

Un cadre d'évaluation des aléas d'inondation côtière pour étayer les analyses basées sur le risque est présenté à la [Figure 1.3](#). Le cadre se compose de cinq éléments clés qui contribuent à mener une évaluation solide des aléas d'inondation côtière sur les côtes maritimes du Canada. Le cadre illustre également la structure de cette ligne directrice qui prévoit un chapitre pour chacune des cinq composantes. Une brève description de chaque composante ou chapitre est présentée ci-dessous.

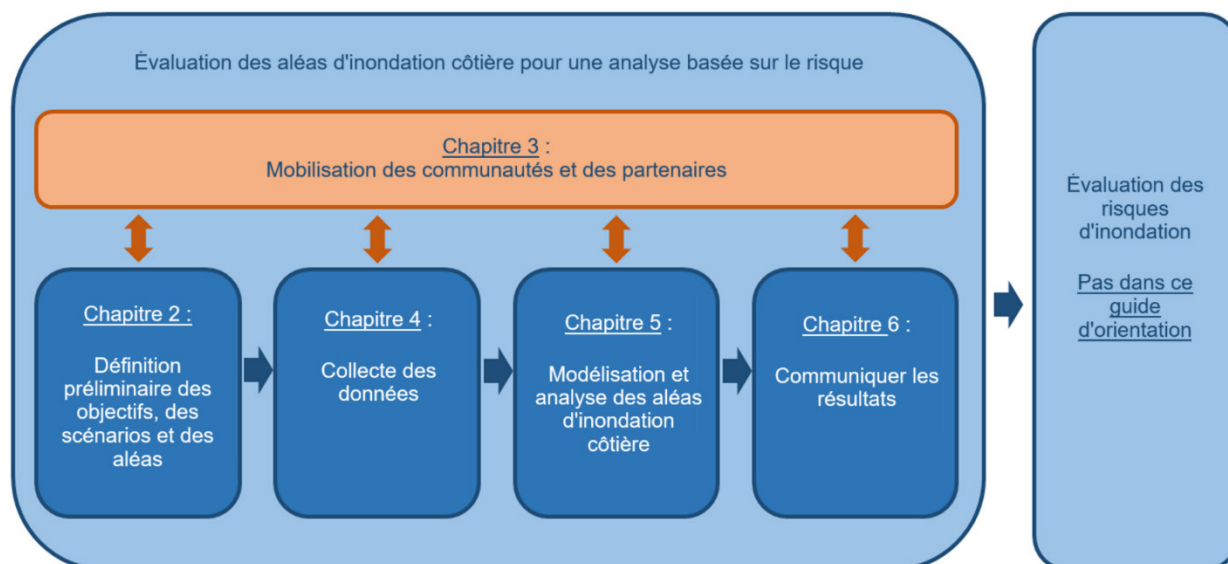


Figure 1.3. Cadre d'évaluation des aléas d'inondation côtière pour l'analyse basée sur le risque.

Chapitre 2 — Définition préliminaire des objectifs, des scénarios et des aléas

Ce chapitre est destiné à aider les personnes ayant des rôles techniques et non techniques à comprendre et à définir la portée des évaluations des aléas d'inondation côtière. Le chapitre résume les directives sur :

- Établir les objectifs, le public et la portée.
- Déterminer les aléas d'inondation côtière, élaborer des scénarios d'aléas préliminaires et prendre en compte les changements climatiques.
- Examen des renseignements de base pour s'appuyer sur les travaux existants.
- Établir la portée du projet pour répondre aux objectifs de l'évaluation.

Chapitre 3 — Mobilisation des communautés et des partenaires

Ce chapitre offre des directives pour favoriser la participation significative des communautés et des partenaires pour : établir les priorités et la portée, établir la confiance, établir les possibilités de collaboration, améliorer la robustesse de l'étude et assurer que les résultats apportent une contribution significative à la gestion des risques de catastrophe. La mobilisation de la communauté et des partenaires doit avoir lieu pendant toute la durée du projet et ne doit pas être cloisonnée à une étape particulière.

Chapitre 4 — Collecte des données

Ce chapitre présente des directives sur l'identification et l'acquisition des données généralement nécessaires à l'évaluation des aléas d'inondation côtière, notamment un résumé des ressources de données actuellement à la disposition des spécialistes.

Chapitre 5 — Modélisation et analyse des aléas d'inondation côtière

Ce chapitre résume les directives techniques pour établir des scénarios des aléas et modéliser les aléas d'inondation côtière. Les directives relatives à la modélisation des ondes de tempête, des tsunamis et des vagues sont présentées, dont les facteurs à considérer quant aux effets de la glace de mer, des infrastructures et des changements climatiques.

Chapitre 6 — Communiquer les résultats

Ce chapitre résume les principes de la communication, les types d'outils de communication et les besoins de communication pour des publics en particulier. Les questions clés permettant de comprendre les hypothèses et les limites de la modélisation sont abordées pour que les auteurs puissent les formuler et que les utilisateurs et utilisatrices puissent les poser. On y fournit également des directives sur la communication des résultats de l'évaluation des aléas pour étayer les besoins des évaluations de risques et pour adapter la communication à des publics précis.

Évaluation du risque d'inondation

Cette composante ne fait pas partie des présentes lignes directrices, mais elle constitue l'étape suivante afin d'identifier les personnes et les éléments exposés au risque d'inondation côtière.

1.8 Références

Conner, K. L. C., Kerper, D. R., Winter, L. R., May, C. L. et Schaefer, K. (2012). *Coastal flood hazards in San Francisco Bay: A detailed look at variable local flood responses*. Dans Wallendorf, L. A., Jones, C., Ewing, L., Battalio, B. (Eds.), *Solutions to Coastal Disasters 2011* (pp. 448-460). American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/41185\(417\)40](https://doi.org/10.1061/41185(417)40)

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (s.d.). *An Introduction to FEMA Coastal Floodplain Mapping*. <https://fema.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=89d2e393f2c64d7cae07264f4d00c19d>

Ferguson, S., Provan, M., Murphy, E. et Kim, J. (2022). *Numerical Simulation of Coastal Flood Hazard in the Acadian Peninsula Region of New Brunswick* (NRC-OCRE-2021-TR-060). Conseil national de recherches Canada.

James, T. S., Robin, C., Henton, J. A. et Craymer, M. (2021). *Relative Sea-level Projections for Canada based on the IPCC Fifth Assessment Report and the NAD83v70VG National Crustal Velocity Model*. Ressources naturelles Canada. <https://doi.org/10.4095/327878>

Kim, J., Murphy, E., Ferguson, S., Provan, M., & Nistor, I. (2024). *Numerical simulation of storm surges in the Beaufort Sea and coastal flood hazards in the Hamlet of Tuktoyaktuk, Northwest Territories* (NRC-OCRE-2022-TR-015). Conseil national de recherches du Canada. <https://doi.org/10.4224/40003267>

Murphy, E., Lyle, T., Wiebe, J., Hund, S. V., Davies, M. et Williamson, D. (2020). *Lignes directrices pour l'évaluation des risques d'inondation côtière pour les applications de conception*

de bâtiments et d'infrastructures (CRBCPI-Y5-R2). Conseil national de recherches Canada. <https://doi.org/10.4224/40002045>

Nations unies. (2016). *Rapport du groupe de travail intergouvernemental de spécialistes à composition non limitée sur la terminologie et les indicateurs relatifs à la réduction des risques de catastrophe*. https://www.preventionweb.net/files/50683_oiewgreportenglish.pdf

Rabinovich, A., Thomson, R. et Hastings, N. (2023). *Natural hazards in the Boundary Bay region of the Strait of Georgia: A compilation and summary of observations and numerical modeling studies* (Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences 366). Pêches et Océans Canada.

Ressources naturelles Canada. (2021). *Guide d'orientation fédéral sur l'estimation des dommages causés aux bâtiments et aux infrastructures par les inondations* (version 1.0). Gouvernement du Canada. <https://doi.org/10.4095/327002>

Ressources naturelles Canada. (2022). *Guide d'orientation fédéral de l'aménagement du territoire dans les zones à risque d'inondation*. Gouvernement du Canada. <https://doi.org/10.4095/328956>

Ressources naturelles Canada. (2023). *Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables* (version 2.0). Gouvernement du Canada. <https://doi.org/10.4095/332157>

Ressources naturelles Canada. (2024). *Série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables »*. <https://ressources-naturelles.canada.ca/science-et-donnees/science-et-recherche/dangers-naturels/cartographie-des-inondations/les-guides-dorientation-federaux-sur-la-cartographie-des-zones-inondables/25215>.

Sécurité publique Canada. (2022). *Inondations*. <https://www.publicsafety.gc.ca/cnt/mrgnc-mngmnt/ntrl-hzrds/fld-fr.aspx>

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2021). *Disaster risk reduction terminology*. <https://www.undrr.org/terminology>

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. United Nations. <https://www.undrr.org/quick/11409>

Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J. P., van Asselt, M. B. A., Janssen, P. et Kreyer von Krauss, M. P. (2003). *Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support*. Integrated Assessment, 4(1), 5–17. <https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466>

Zevenbergen, C., Cashman, A., Evelpidou, N., Pasche, E., Garvin, S. et Ashley, R. (2010). *Urban Flood Management*. CRC Press.

2.0 Définition préliminaire des objectifs, des scénarios et des aléas

Auteurs principaux

Julie Van de Valk (Ressources naturelles Canada) et Nicky Hastings (Ressources naturelles Canada)

Contributeurs

Sean Ferguson (Conseil national de recherches Canada) et Enda Murphy (Conseil national de recherches Canada)

Citation recommandée

Van de Valk, J. et Hastings, N. L. (2025). Définition préliminaire des objectifs, des scénarios et des risques. Dans *Évaluation des aléas d'inondation côtière pour l'analyse fondée sur les risques concernant les côtes marines du Canada*. Éditeurs Ferguson, S., Hastings, N. L., Van de Valk, J., Murphy, E. et Kim, J. Gouvernement du Canada.

2.1 Introduction

Avant de commencer un projet sur les aléas d'inondations côtières, il faut bien comprendre les objectifs du travail à entreprendre et le contexte dans lequel il s'inscrit. Ce chapitre est destiné à aider les personnes ayant ou non une formation technique à comprendre et à établir la portée des études d'évaluation des aléas d'inondation côtière. Ce chapitre a également pour but d'aider aux étapes préliminaires d'un projet, d'identifier les données à recueillir et les analyses à mener pour répondre aux besoins d'évaluation des aléas d'inondation côtière de la communauté. Alors que les experts techniques, les firmes d'ingénierie ou les spécialistes internes se chargent souvent des détails des projets relatifs aux aléas d'inondation côtière, le présent document peut également aider les représentants des communautés ayant moins d'expérience et de connaissances techniques à planifier l'établissement de la portée (objectifs, scénarios, aléas) afin de favoriser une évaluation des aléas côtiers pour leur communauté. Ce chapitre a pour but d'aider à définir les objectifs, les scénarios et les aléas pour les preneurs et preneuses de décisions afin de faciliter l'évaluation des aléas côtiers dans leur communauté.

2.2 Caractérisation des objectifs

Afin d'atteindre les objectifs du projet, il faut d'abord les définir. Les objectifs du projet déterminent de nombreux aspects de la portée du projet; cette section traite des objectifs courants et de leurs implications sur la portée du projet.

Les questions directrices pour caractériser les objectifs sont :

- **Qui doit participer à la caractérisation des objectifs?** Selon le projet, il faut probablement impliquer les nations autochtones, les gouvernements locaux, les titulaires de droits et les membres de la communauté dans la définition des objectifs. Les valeurs et les préférences de la communauté peuvent définir la vision et l'intention générale des objectifs du projet. Quels sont les sujets de préoccupation de la communauté et comment influencent-ils les seuils de tolérance au risque et les mesures d'atténuation et d'adaptation de la communauté?
- **Qui utilisera les renseignements que le projet aura générés?** Le public cible a-t-il une formation technique ou non technique? Quelles ressources devez-vous développer pour communiquer avec votre public?
- **À quoi serviront les renseignements?** Seront-ils utilisés pour la gestion des urgences, la conception technique, l'aménagement du territoire, la planification régionale à long terme, l'évaluation des risques pour la communauté, l'évaluation des risques financiers ou en tant que renseignements généraux? Quels résultats du projet sont nécessaires pour ces utilisations?
- **Où se trouve la zone d'étude?** L'étude est-elle propre à un endroit, au niveau du quartier, pour un bassin versant ou une autre étendue limitée naturellement et pour un territoire autochtone ou une région administrative comme une ville, une province ou une nation? Pour les évaluations d'inondation propres à un endroit, consulter Murphy et coll. (2020).
- **Quelles sources contribuent aux aléas d'inondation?** Quels aléas d'inondation sont possibles dans la zone d'intérêt (p. ex., aléas de tsunami, de tempête, de vagues, d'élévation du niveau de la mer ou une combinaison de ces aléas)? De plus amples renseignements sur l'élaboration de scénarios sont fournis à la [section 2.3](#).

- **Quel horizon temporel faut-il envisager?** Les changements climatiques sont un facteur clé des inondations côtières et leurs effets varient dans le temps. La durée de vie des infrastructures concernées peut également dicter les horizons temporels à prendre en considération, tout comme le calendrier de la planification de routine municipale. Le type de question qui motive l'évaluation des aléas d'inondation côtière doit être cohérent avec les échéances évaluées dans le cadre du projet.
- **Quelles seront les ressources et les échéances du projet?** La complexité analytique du projet déterminera les ressources nécessaires.
- **L'analyse devra-t-elle être conforme aux lignes directrices ou aux exigences de programmes de financement?** En plus de ces lignes directrices fédérales, de nombreuses provinces ont des lignes directrices et des programmes de financement comportant des exigences, telles que la prise en compte des répercussions de l'élévation du niveau de la mer dans les analyses.
- **Quels sont les rôles de l'organisme de réglementation, du personnel communautaire et des spécialistes qualifiés?** L'analyse peut-elle être effectuée avec des ressources qui font déjà partie de l'organisation principale ou devra-t-on établir des contrats externes?
- **Quelles sont les données de sortie exigées?** Quels sont les besoins en matière de données de sortie? Le [chapitre 6](#) s'attarde plus en détail à ces questions, et la portée du projet doit en tenir compte.

Ces questions d'orientation visant à définir les objectifs du projet et à établir l'énoncé de problème du projet mènent à l'élaboration de scénarios, comme indiqué dans la [section 2.3](#).

2.3 Élaboration de scénarios et d'événements

Le concept de scénario a des significations différentes selon les personnes et les disciplines. Pour les gestionnaires de situations d'urgence, un scénario est un événement précis et hypothétique utilisé à des fins de planification. Pour les responsables communautaires, l'élaboration de scénarios est un outil de prise de décision permettant d'envisager de futurs modèles de développement ou d'implantation. Dans cette ligne directrice, un scénario est une situation modélisée caractérisée par un ensemble de paramètres qui représentent l'aléa naturel ainsi que le contexte tel qu'on l'envisage (comme les hypothèses sur la couverture terrestre). Les scénarios sont utilisés pour guider la planification de la réduction des risques futurs en décrivant plusieurs événements qui peuvent se produire et la probabilité qu'ils se produisent. On conçoit les événements comme étant une combinaison de sources potentielles d'inondation caractérisées par leur étendue, leur ampleur et leur intensité. Les événements ne sont pas nécessairement des prévisions, mais ils aident à conceptualiser les événements futurs possibles de ce type. Les événements d'inondation font référence aux conditions hydriques particulières représentées dans le scénario élargi. Les renseignements de base et les besoins et préoccupations des communautés guident le choix des événements appropriés pour orienter les décisions qui permettent la hiérarchisation des priorités et la prise de décisions intelligentes en matière de réduction des risques.

2.3.1. Choix des événements d'aléa

Les aspects suivants sont à prendre en compte dans la sélection d'un événement d'aléa :

- **Travaux existants dans la région** : Des études ou travaux antérieurs dans les communautés voisines peuvent avoir permis de caractériser les événements; il faut tenir compte des paramètres pour assurer la cohérence ou pour élargir la portée des travaux. Cela peut comprendre un examen de la littérature didactique et gouvernementale ainsi que les politiques et mesures entreprises par les communautés et les régions, y compris toute information sur la tolérance aux risques des communautés.
- **Objectifs du projet** : Des objectifs différents exigent de modéliser des événements différents. Par exemple, la planification d'urgence s'intéresse généralement aux événements peu probables pouvant avoir de fortes conséquences, l'évaluation des risques nécessite plusieurs événements et la conception technique peut s'attarder à un seul événement en particulier. Une orientation sur la coordination du choix d'événements avec les objectifs du projet est fournie à la [section 2.3.5](#).
- **Événements et conditions historiques** : Les membres de la communauté peuvent avoir connu des événements historiques. Par conséquent, sélectionner ces événements pour les analyser ou les mettre en relation avec les événements modélisés peut faciliter la communication des aléas.
- **Période d'intérêt** : La période allouée à la planification et à la prise de décisions doit guider la sélection des événements dangereux.
- **Recensement des aléas et événements préoccupants** : Établir des priorités en comparant les types d'aléas et les systèmes en jeu dans les zones géographiques concernées. Les sources d'aléas doivent-elles être intentionnellement *exclues* et pourquoi (p. ex. elles sont ou seront traitées dans le cadre d'études complémentaires)?
- **Le nombre d'événements d'aléa** : Le budget et les ressources du projet peuvent influencer le nombre d'événements qu'il est possible d'analyser. Les événements doivent être classés par ordre de priorité en fonction des objectifs.
- **Mise à jour des événements** : Il faut mettre à jour la définition des événements au fur et à mesure de l'avancement de la science et des connaissances, de l'acquisition de connaissances à partir d'événements réels et de l'amélioration des modèles de changements climatiques.

Les scénarios et les événements ne doivent pas tous être déterminés avant le début du projet, mais il est important d'en tenir compte pour délimiter correctement la portée du projet. Lors de la description d'un événement d'aléa pour la portée d'un projet, il est recommandé de communiquer les aspects suivants. Il n'est pas nécessaire de définir tous les paramètres dans la portée du projet, mais communiquer les attentes relatives aux éléments suivants aidera l'équipe du projet à établir ses objectifs et à les atteindre. Dans le cadre d'une évaluation des aléas d'inondation côtière, les quatre aspects d'un scénario d'aléa doivent tenir compte de ce qui suit :

- **Zone d'intérêt** : Zone d'étude.
- **Sources et différents composants des aléas** : Quelles sources contribuent potentiellement aux aléas d'inondation? Prend-on en compte les ondes de tempête, les marées, l'effet des vagues, les tsunamis, la glace de mer et/ou l'élévation du niveau de la mer? Comment calcule-t-on la probabilité de l'événement? La probabilité de contribution

des sources est-elle corrélée ou indépendante? En quoi cela influence-t-il l'interprétation des résultats?

- **Zones côtières reliées** : Est-il nécessaire de comprendre ou de définir la propagation des aléas d'inondation reliés (p. ex. ceux qui remontent les rivières et les estuaires)?
- **Probabilité des événements** : Quelle est la probabilité d'un événement d'inondation précis (onde de tempête, tsunami, etc.) dont il faut tenir compte?
- **Éventail d'événements et de scénarios** : Quel est l'éventail d'événements et de scénarios à prendre en compte, des petites inondations relativement probables aux inondations majeures moins probables?
- **Niveau d'analyse approprié** : Quelle résolution de modélisation faut-il utiliser (basse ou haute)?
- **Examen du contexte** (voir la [section 2.4](#)).
- **Changements climatiques** : Quelle est l'incertitude? Prend-on en compte les changements du régime des tempêtes, de l'état des glaces ou de l'intensité? Inclut-on l'élévation du niveau de la mer? En quoi cela influence-t-il l'interprétation des résultats?
- **Topographie** : Qu'est-ce qui est représenté dans le modèle numérique d'élévation (MNE)? Inclut-on les structures dans la topographie ou les en retire-t-on? Quelle est la résolution attendue de la topographie et de la bathymétrie? En quoi cela influence-t-il l'interprétation des résultats?
- **Lutte contre les inondations** : Comment traite-t-on les mesures de lutte contre les inondations? Inclut-on les digues dans la topographie ou les en exclut-on? Des structures qui ne sont pas conçues à cet effet servent-elles de mesures de lutte contre les inondations (p. ex. un grand bâtiment commercial détourne l'écoulement d'une zone qui, autrement, serait inondée)? En quoi cela influence-t-il l'interprétation des résultats? Que se passe-t-il lorsque l'on dépasse la capacité des ouvrages de protection? Par exemple, une digue qui reste intacte en cas de débordement important par rapport à une digue qui se rompt.
- **Géomorphologie** : Le littoral change-t-il? Existe-t-il des aléas géomorphologiques parallèlement aux aléas d'inondation (p. ex. érosion et sédimentation)? En quoi cela influence-t-il l'interprétation des résultats? Comment ces considérations seront-elles alignées ou exprimées à l'horizon des scénarios de changements climatiques?
- **Autres** : Cycle saisonnier, débits fluviaux dans les modèles côtiers? Soulèvement ou affaissement, revanche? Autres types de changements dans la communauté, comme l'utilisation des terres actuelle et ultérieure et la couverture terrestre? Relaxation et affaissement post sismiques affectant les zones côtières.

Comprendre ces renseignements aidera l'équipe du projet à déterminer les techniques ou les outils d'analyse appropriés, qui, s'ils sont connus, doivent être décrits dans la portée du projet.

2.3.2. Identifier la zone d'étude

Lors de la définition de la portée du projet, il faut déterminer une zone d'étude claire. La zone d'étude doit englober la zone d'intérêt et peut s'étendre pour inclure :

- Les infrastructures et les zones d'importance culturelle qui peuvent se trouver en dehors des limites administratives. Il peut y avoir des possibilités de partenariats intercommunautaires et de gains d'efficacité.

- La modélisation de la région est nécessaire pour obtenir des paramètres côtiers locaux. Des modèles régionaux peuvent exister dans certaines zones grâce à d'autres projets, mais si ce n'est pas le cas, il peut être nécessaire de développer un modèle régional pour établir les paramètres d'un modèle local à plus haute résolution. Les modèles régionaux ont généralement une résolution inférieure à celle de la zone d'intérêt de l'étude principale.
- Les sources lointaines d'aléas pour les tsunamis, comme les glissements de terrain ou les tremblements de terre, peuvent être éloignées des communautés. Les sources et les zones d'impact des tsunamis doivent être incluses dans la zone de modélisation à une certaine résolution. Si les sources d'aléas se trouvent en dehors de la zone d'intérêt de l'étude, il est possible d'utiliser des approches de modélisation emboîtée avec de grands modèles ayant une résolution plus faible.
- Les lieux d'étalonnage et de validation qui peuvent se trouver en dehors de la zone d'étude principale.

2.3.3. Déterminer les sources et les éléments d'aléa

Les aléas d'inondation côtière émergent de sources variées et interagissent avec divers éléments. Les sources d'aléa peuvent être uniques ou multiples, jumelées ou composées. La plupart des aléas seront modifiés par les changements climatiques, qui doivent être pris en compte dans toute analyse. La Figure 2.1 montre les sources d'inondations côtières.

Niveau de l'eau	Effets des vagues	Tsunamis
☐ Niveau moyen de la mer	☐ Surélévation de la surface libre	☐ Sources sismiques lointaines
☐ Changement relatif du niveau de la mer	☐ Action des vagues	☐ Sources sismiques proches du rivage
☐ Marées	☐ Déferlement d'ondes	☐ Source de glissements de terrain
☐ Onde de tempête		☐ Météotsunamis

Figure 2.1. Sources d'inondations côtières.

Ces sources peuvent être autonomes ou combinées pour générer des inondations côtières. Les événements qui comptent plusieurs sources d'aléa auront une probabilité d'occurrence représentative des probabilités combinées des sources d'aléas individuelles. L'identification des sources d'aléas (et de leurs combinaisons possibles) aux fins d'analyse est essentielle à l'élaboration détaillée des événements, comme il est décrit dans le [chapitre 5](#). Cependant, pour une définition préliminaire, les aléas d'intérêt qui touchent la zone d'étude doivent être définis dans la portée du projet.

Les changements climatiques influencent plusieurs de ces sources d'aléas. Il est assez facile de comprendre les effets des changements climatiques sur l'élévation du niveau de la mer pour

des voies socio-économiques ou des scénarios d'émissions communs donnés, bien que de l'incertitude demeure quant au moment où ces futurs changements du niveau de la mer auront lieu. Le lien entre les changements climatiques et le changement de fréquence des activités orageuses est plus incertain encore (Greenan et coll., 2018). L'ampleur de la modification du niveau de la mer due aux changements climatiques dépend de l'emplacement, de l'horizon de planification et du scénario d'émissions global. Il est possible de définir ces éléments dans la portée du projet ou d'en tenir compte dans le cadre de futurs travaux sur la définition détaillée des événements.

Les sources d'aléas (telles que celles décrites précédemment) représentent les caractéristiques des processus naturels et moteurs qui contribuent aux conditions dangereuses. Les voies de propagation des aléas représentent le lien entre les conditions dangereuses et un site récepteur vulnérable (p. ex. une communauté côtière). Comme il est décrit par Murphy et coll. (2020), les voies de propagation comptent l'inondation directe, l'érosion, le débordement d'une digue et le contournement de celle-ci.

2.3.4. Probabilité d'un événement

Chaque événement est associé à une probabilité. La probabilité d'un événement découle généralement de la probabilité combinée de plusieurs éléments d'aléas et est généralement représentée par une période de récurrence ou une probabilité de dépassement annuelle (PDA). Une plage de probabilités est nécessaire pour l'évaluation des risques et est recommandée à des fins de planification d'urgence. De nombreuses compétences ont également un niveau désigné des inondations aux fins de conception et d'aménagement du territoire. Toutefois, l'orientation moderne préconise généralement une approche basée sur les risques, qui utilise des événements de probabilités différentes pour les utilisations des terres, en fonction des conséquences de l'inondation.

- Les événements dont la PDA dépasse 10 % sont généralement considérés comme ayant une probabilité élevée et sont parfois appelés inondations nuisibles.
- Les événements ayant une PDA de 10 % à 2 % sont typiquement considérés comme des événements de probabilité moyenne.
- Les événements ayant une PDA de 2 % à 1 % sont considérés comme des événements de probabilité moyenne à faible.
- Les événements ayant une PDA de 1 % à 0,2 % sont largement utilisés au Canada comme niveau désigné des inondations.
- Les événements ayant une PDA de 0,1 % (ou moins) sont considérés comme étant des événements à faible probabilité sur une base annuelle et sont rarement utilisés pour guider la gestion des risques d'inondation au Canada, mais sont pris en compte pour d'autres aléas naturels (p. ex., les tsunamis ou les tremblements de terre) et dans d'autres compétences à travers le monde.

Il est souvent difficile de communiquer la probabilité des événements de manière compréhensible pour le grand public. Deux méthodes couramment utilisées pour présenter ces probabilités figurent dans les deux premières colonnes du [Tableau 2.1](#) et de façon plus générale à la [Figure 2.1](#). Le [Tableau 2.1](#) indique également la probabilité que ces événements se produisent sur une période donnée, ce qui constitue une stratégie de communication supplémentaire.

Tableau 2.1. Définir et décrire la probabilité.

Période de récurrence ¹ (années)	Probabilité de dépassement annuelle ² (%)	Risque de dépassement sur 25 ans ³ (%)	Risque de dépassement sur 50 ans ³ (%)
1 sur 5	20	100 ⁴	100 ⁴
1 sur 10	10	93	99
1 sur 20	5	72	92
1 sur 50	2	40	64
1 sur 100	1	22	39
1 sur 200	0,5	12	22
1 sur 500	0,2	5	10
1 sur 1 000	0,1	2	5

¹ La probabilité que l'événement d'intérêt se produise au cours d'une année donnée, exprimée sous forme de période de récurrence. Le fait qu'un événement se produise ne change pas la probabilité qu'il se reproduise au cours d'une année ultérieure.

² La probabilité que l'événement en question ou un événement plus important se produise au cours d'une année donnée.

³ La probabilité qu'un événement de la même ampleur que l'événement d'intérêt ou d'une plus grande ampleur se produise au cours d'une période donnée, en supposant que la probabilité reste la même.

⁴ Bien que la probabilité statistique soit de 100 %, il n'est pas garanti que l'événement ou un événement plus important se produise.

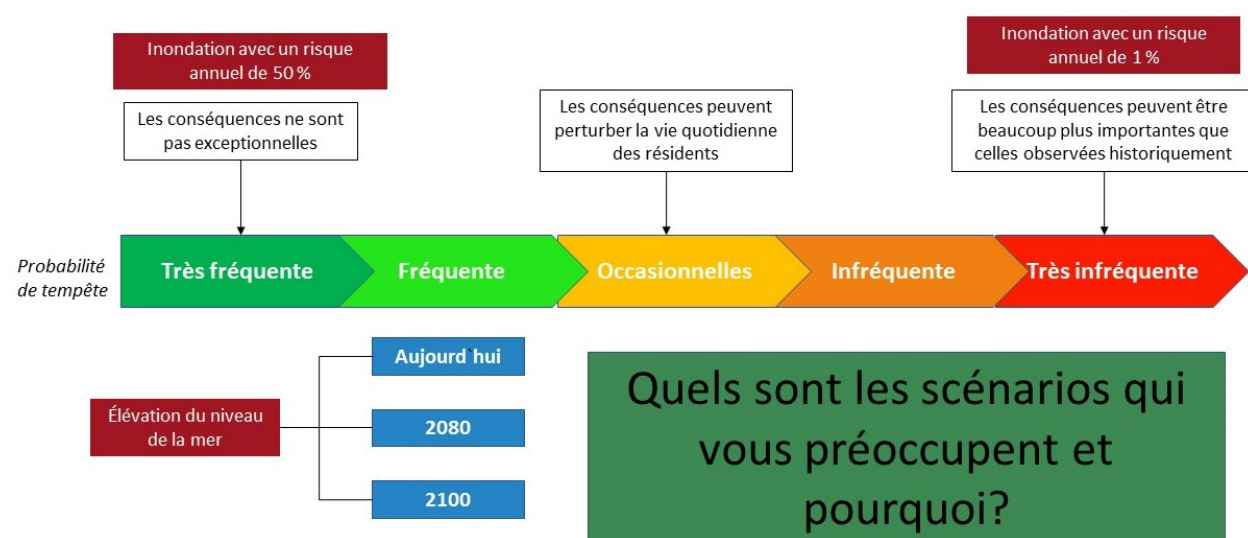


Figure 2.1. Communiquer la probabilité des inondations au public.

Pour la modélisation des tsunamis, il faut explorer les scénarios les plus pessimistes, tandis que pour la modélisation des aléas de tempête, les scénarios à plus forte probabilité seront probablement plus intéressants et plus utiles. La probabilité d'un tsunami présente souvent beaucoup d'incertitude.

2.3.5. Nombre d'événements et de scénarios

Lorsque l'on combine les sources d'aléas, les probabilités d'événements, les voies potentielles d'inondations (p. ex. des brèches dans les digues, une inondation directe), les scénarios de gestion des risques, les scénarios climatiques futurs et d'autres facteurs, on obtient un nombre presque infini de scénarios. Une évaluation des risques peut prendre en compte la probabilité de plusieurs ondes de tempête dans le cadre de différentes projections d'élévation du niveau de la mer pour estimer les dommages annuels potentiels futurs. Par exemple, pour les études de cas de l'Atlantique et de l'Arctique, on a évalué six ondes de tempête ayant une PDA unique dans les conditions du niveau de la mer actuel ainsi que dans trois scénarios d'élévation relative du niveau de la mer. Murphy et coll. (2020) et RNCan (2021) décrivent l'importance des approches basées sur plusieurs événements et scénarios qui tiennent compte d'un éventail de probabilité et de résultats des dommages potentiels pour quantifier adéquatement le risque. Le nombre d'événements et de scénarios exigés variera en fonction de l'objectif de l'évaluation des risques (p. ex., préliminaire ou détaillée), du nombre et des types d'aléas dans la zone, des points de basculement potentiels des conséquences (p. ex., le débordement d'une digue), du nombre de stratégies ou de mesures de gestion des risques envisagées, des calendriers de planification de la gestion des risques et d'une multitude d'autres facteurs. Le choix des PDA des événements peut avoir une incidence sur les résultats. Par exemple, Ward et coll. (2011) ont constaté que le fait d'utiliser seulement trois PDA entraînait une surestimation du risque annuel allant de 33 % à 100 %.

2.3.6. Déterminer le niveau de détail approprié pour l'analyse

Diverses méthodes analytiques peuvent être utilisées pour modéliser les aléas et effectuer d'autres tâches techniques, avec des niveaux de détails variables. Le niveau de détails analytique exigé dépendra de l'objectif de l'évaluation des aléas ou des risques; les méthodes doivent être choisies en conséquence. Pour les évaluations de risques couvrant une vaste zone géographique, un faible niveau de détail analytique est peut-être acceptable afin d'équilibrer la demande en calcul et la nécessité d'obtenir des résultats généraux. Pour l'évaluation de risques de petites zones ou de propriétés et d'infrastructures en particulier, il faut un niveau de détail beaucoup plus élevé. Une modélisation plus détaillée exige que l'on consacre plus d'efforts aux données d'entrée, à une résolution plus élevée du modèle et à une modélisation plus sophistiquée et plus intensive sur le plan informatique, entre autres choses. La description précise du niveau de détail exigé pour l'analyse est un élément clé de la portée d'un projet puisqu'elle permet de vérifier qu'on obtient des réponses comparables aux offres de projets potentiels. La liste suivante résume certains facteurs de modélisation à considérer qui influencent le niveau de détail :

- **Complexité du modèle** : Des techniques de modélisation simplifiées (p. ex. modélisation de bassins, voir la [section 5.4.4](#)) peuvent convenir pour obtenir une estimation approximative des aléas d'inondation d'après l'élévation de l'eau seulement. Cependant, des techniques de modélisation plus complexes (p. ex., la modélisation hydrodynamique bidimensionnelle) peuvent fournir une représentation plus réaliste de

l'aléa d'inondation et des renseignements supplémentaires sur la vitesse de ruissellement, la propagation de l'inondation et sa durée. Le niveau de détail de la modélisation influencera les besoins en données, l'effort analytique et la demande de calcul.

- **Modélisation des vagues et estimation des vagues** : Si les vagues constituent un aléa important dans la zone d'étude, l'analyse des effets des vagues sera plus importante. Pour certaines zones, les vagues représentent des aléas relativement mineurs, auquel cas des estimations généralisées des effets des vagues sont adéquates. Dans d'autres zones, l'aléa lié aux vagues est important et il faut effectuer une modélisation dynamique localisée des vagues. Une modélisation des vagues de haute qualité comprend l'analyse de la direction du vent local, la collecte de profils de lignes de rivage localisés ou un modèle numérique d'élévation (MNE) bathymétrique maillé ainsi qu'une modélisation hydrodynamique précise.
- **Résolution du modèle** : La résolution spatiale (ainsi que la résolution temporelle pour les modèles hydrodynamiques) influencera le niveau de détail de la modélisation et la demande de calcul. Les résolutions spatiale et temporelle sont quelque peu limitées par la résolution et par la précision des données sous-jacentes. Par exemple, pour éviter les imprécisions d'interpolation, il faut avoir accès à des données topographiques à haute résolution pour étayer une modélisation à haute résolution spatiale. La résolution exigée du modèle (spatiale et temporelle) dépend des objectifs de l'évaluation des aléas ou des risques.
- **Précisions horizontale et verticale** : Des attentes et des limites claires concernant les précisions horizontale et verticale doivent être déterminées lors de la planification du projet. L'étalonnage et la validation permettront de démontrer la précision du modèle, ce qui doit correspondre à l'utilisation prévue du modèle.

2.4 Examen du contexte

Il est important d'étudier les données disponibles lors de l'élaboration de la portée d'un projet, car il faut recueillir certains renseignements clés avant de réaliser une évaluation des aléas ou les intégrer au projet. Déterminer les renseignements pertinents et disponibles est essentiel pour définir la portée d'un projet réalisable. Le fait de fournir ces renseignements dans la portée du projet permet d'élaborer un plan de projet précis et raisonnable.

2.4.1. Identification des partenaires, des parties prenantes et des titulaires de droits

Dès les premières étapes du projet, les partenaires, les parties prenantes de la communauté et les titulaires de droits autochtones doivent faire partie du processus de planification du projet. Ils peuvent fournir des données essentielles pour déterminer les objectifs, élaborer les scénarios et fournir des renseignements. Le [chapitre 3](#) détaille davantage la mobilisation des communautés et des partenaires et comprend une orientation pour identifier les communautés et les partenaires et favoriser la collaboration.

2.4.2. Études antérieures et initiatives de gestion des risques d'inondation

De nombreuses communautés côtières se sont intéressées aux aléas d'inondation côtière lors d'études antérieures. Pour travailler efficacement et s'appuyer sur les connaissances existantes, les études antérieures et les initiatives de gestion des risques d'inondation doivent être identifiées dès le début du processus de planification du projet. Les sources d'informations

peuvent inclure des articles de revues universitaires, des rapports de consultation et des rapports ou des études de plusieurs paliers de gouvernement. Un examen complet doit être effectué avant l'achèvement du projet et les renseignements pertinents doivent être répertoriés dans la portée du projet. Il peut être utile d'entrer en contact avec des chercheurs, des spécialistes, des organisations communautaires et des porte-paroles gouvernementaux locaux pour trouver toutes les informations pertinentes, qui peuvent ne pas être répertoriées dans les bases de données en ligne. Les études antérieures et les initiatives de gestion des risques d'inondation côtière concernant les aléas d'inondation côtière pourraient inclure :

- Des évaluations de la géomorphologie côtière.
- Des analyses de la fréquence des marées ou des ondes de tempête.
- Des évaluations d'aléa d'inondation côtière antérieures, régionales ou voisines.
- Des études antérieures, régionales ou voisines sur les tsunamis.
- Des évaluations biologiques et écosystémiques dans la région.
- Des évaluations de l'impact environnemental.
- L'évaluation des aléas liés aux cours d'eau.
- Des études qui ont permis de concevoir des infrastructures côtières.
- Les détails de projets antérieurs de gestion des risques d'inondation, tels que le remblayage de plages, le dragage de ports et l'endiguement de côtes.

2.4.3. Inondations antérieures

Les renseignements sur les inondations antérieures sont essentiels pour calibrer et valider les modèles d'aléas d'inondation côtière. La mise en place d'un programme de collecte des données après une inondation présente de nombreux avantages à long terme. Il faut déterminer quelles inondations antérieures ont été considérées lors de la phase d'élaboration des scénarios. Les inondations antérieures peuvent être identifiées à partir d'études antérieures, d'archives historiques de la communauté, de photos, de relevés de niveaux d'eau ou de conditions météorologiques, du savoir autochtone, d'archives sédimentaires, d'autres indicateurs physiques d'inondations ou de niveaux d'eau élevés et de données spatiales représentant les inondations antérieures.¹ Le [chapitre 4](#) comprend plus de détails sur ces sources de données qui permettent une collecte détaillée une fois que les projets sont en cours. Pour établir la portée d'un projet, il faut avoir une compréhension des données disponibles sur les inondations antérieures; si aucune information n'est immédiatement disponible, il faudra consacrer des efforts supplémentaires à la collecte de données pour l'étalonnage et la validation.

2.4.4. Données d'entrée du modèle

Les données d'entrée disponibles pour le modèle doivent être identifiées et examinées dans le cadre de la définition de la portée du projet afin de garantir une portée précise qui permet de recueillir des données supplémentaires, si nécessaire. Le [chapitre 4](#) comprend d'autres renseignements sur la collecte des données. La liste ci-dessous résume les données d'entrée généralement exigées pour la modélisation des risques d'inondation côtière ainsi que des

¹ La base de données nationale « Inondations au Canada » pourrait servir à déterminer l'étendue spatiale des grandes inondations historiques <https://open.canada.ca/data/fr/dataset/08b810c2-7c81-40f1-adb1-c32c8a2c9f50>.

aspects essentiels pour chaque type de données. La liste peut être utilisée pour établir la portée et identifier les lacunes dans les données, mais doit être considérée comme étant préliminaire et non exhaustive. Il faut demander l'avis et la contribution de spécialistes pour identifier les besoins et les lacunes en matière de données et pour veiller à ce que les jeux de données disponibles soient adéquats pour étayer l'évaluation des risques. On ne découvre souvent les lacunes dans les données qu'après un examen, une analyse et des contrôles de qualité approfondis. Par conséquent, il peut être prudent d'intégrer des imprévus dans le budget et le calendrier au début d'une évaluation des risques afin de soutenir l'acquisition de données, si nécessaire.

Les données exigées pour la modélisation dépendent des objectifs du projet et des scénarios identifiés comme on le décrit dans les sections 2.2 et 2.3.

Données d'élévation : Toute modélisation des aléas d'inondation côtière nécessite des données topographiques et bathymétriques. La résolution des données doit correspondre à la résolution souhaitée du modèle. L'étendue des données doit inclure la totalité de l'étendue du modèle, y compris les zones côtières où peuvent se produire des inondations ou des déferlements et les zones de sources d'aléas au large. Les informations sur l'élévation de la zone côtière et de la zone intertidale sont particulièrement importantes si on prévoit d'effectuer une analyse du déferlement d'ondes. Les Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables fournissent des informations sur la collecte de données lidar et sur la conception d'un modèle numérique d'élévation (MNE). Les régions côtières étant dynamiques, les données d'élévation doivent être relativement récentes pour représenter précisément les conditions actuelles. S'il n'existe pas d'informations topographiques ou bathymétriques d'une qualité et d'une récence appropriées, elles devront être collectées avant de commencer l'évaluation des aléas d'inondation, ce qui peut ajouter des dépenses et du temps considérables à un projet et doit être confirmé avant de définir la portée d'un projet d'inondation. Les renseignements sur les changements géomorphologiques le long du littoral sont également pertinents pour l'analyse et doivent être identifiés lorsqu'ils sont accessibles. De plus, il est souvent utile d'obtenir des données altimétriques historiques pour soutenir l'étalonnage et la validation. Il faut entreprendre le processus d'étalonnage et de validation en utilisant des données topographiques et bathymétriques qui correspondent physiquement aux conditions dans lesquelles l'étalonnage (ou la validation) a eu lieu. Par exemple, si l'érosion ou l'accrétion côtière ont considérablement modifié l'estran depuis l'étalonnage, un processus qui ajuste le modèle actuel par rapport aux niveaux d'eau historiques rendrait le modèle « adéquat pour de mauvaises raisons ».

Renseignements sur les marées : Les informations sur les niveaux de marée sont importantes comme niveau d'eau de départ dans la modélisation. Elles sont généralement disponibles sur les cartes marégraphiques locales.

Informations sur les niveaux d'eau liés aux tempêtes : Si les scénarios d'intérêt incluent l'analyse des répercussions des tempêtes, on peut avoir besoin des relevés d'indicateur de niveau d'eau et de météorologie. Lors de la définition de la portée de l'étude, il faut colliger des renseignements sur les stations marégraphiques et météorologiques, y compris : l'emplacement de la station, la période sur laquelle s'étendent les relevés et les paramètres mesurés. Pour une analyse de qualité, il faut des informations très localisées. Si on n'a pas accès à des données locales dans toute la zone d'étude, il faudra inclure dans la portée du projet la collecte ou la

simulation de ces données. La période sur laquelle s'étendent les relevés est également importante, notamment pour estimer les événements à faible probabilité. Si les événements à faible probabilité sont intéressants, mais que les données sont relevées sur une période relativement courte, il faudra prévoir un effort supplémentaire dans la portée du projet pour synthétiser les données disponibles pour de longues périodes. Le [chapitre 4](#) fournit plus de détails à propos de la collecte des données sur les niveaux d'eau liés aux tempêtes.

Renseignements sur les sources de tsunami : Si les aléas de tsunami font partie de l'analyse, il faut utiliser des modèles de sources. Les modèles de sources peuvent inclure des sources sismiques, des sources de glissements de terrain terrestres et sous-marins et le forçage météorologique. La portée du projet s'articule autour des différentes sources d'informations qu'il faut identifier pour qu'elles correspondent aux scénarios sélectionnés; si ces sources ne sont pas disponibles dans la région, il faudra fournir des efforts supplémentaires pour les modéliser. Si les données disponibles sont conformes aux scénarios, le projet nécessite moins d'efforts.

Changement relatif du niveau de la mer : En bref, l'élévation relative du niveau de la mer est déterminée par les changements du niveau moyen de la mer et de l'élévation de la terre ferme. Les changements du niveau moyen de la mer dus à l'élévation du niveau de la mer varient le long des côtes canadiennes. Dans les zones visées par une forte influence sismique, les effets du soulèvement ou de l'affaissement du sol à la suite de tremblements de terre importants peuvent influencer sur les projections du niveau haut mer. Toutefois, à l'heure actuelle, il n'est pas possible de fournir une orientation sur la manière d'intégrer ces effets. Il est possible d'accéder aux projections relatives de l'élévation du niveau de la mer par l'intermédiaire d'une ressource de RNCAN : Relative sea-level projections for Canada based on the IPCC Fifth Assessment Report and the NAD83v70VG National Crustal Velocity Model (James et coll., 2021). Les prévisions sont fournies pour une variété d'horizons temporels et de scénarios climatiques potentiels et intègrent les différences régionales de changement d'élévation des terres. On a révisé ces projections pour intégrer les nouvelles projections du niveau de la mer à l'échelle mondiale issues du sixième rapport d'évaluation du GIEC.

Autres données d'entrée pour la modélisation : L'étendue et l'épaisseur de la glace de mer constituent des renseignements importants dans les régions qui connaissent des gels hivernaux le long des côtes. Ces renseignements sont généralement accessibles grâce à la surveillance régionale. Les renseignements sur l'utilisation des terres et la couverture terrestre sont importants pour définir la rugosité de la surface dans la modélisation hydrodynamique. Les jeux de données spatiales régionales renferment généralement ces renseignements. Les structures bâties de la zone sont importantes pour la modélisation détaillée puisqu'elles influencent les vagues et les niveaux d'eau et on peut souvent trouver les informations dans des inventaires de bâtiments locaux ou de sources ouvertes. Là où les rivières débouchent sur les côtes, il peut également y avoir des inondations supplémentaires dues au débit important ou aux inondations de surface provenant de sources fluviales le long des côtes. Les données ayant trait aux aléas d'inondation riveraine peuvent être issues d'études sur les inondations fluviales et doivent être intégrées le cas échéant.

2.4.5. Examen du contexte communautaire et de l'historique

Les phases préliminaires d'un projet doivent s'attarder aux renseignements généraux sur le contexte communautaire. Les connaissances générales sur une communauté qui sont pertinentes pour articuler la portée d'une étude comprennent les modèles historiques de l'occupation humaine, la démographie, les caractéristiques physiques de l'environnement bâti et les compétences administratives. Lorsque les scénarios incluent des horizons temporels futurs, comme 2050 ou 2100, le contexte communautaire (p. ex., l'emplacement et la densité du lotissement et de la population, les infrastructures, la hauteur des digues) est également susceptible de changer au cours de la même période. Pour l'évaluation des risques, si des prévisions concernant l'évolution de la communauté sont disponibles, elles peuvent être intégrées et modifier la zone d'étude (p. ex., il peut être intéressant d'inclure, dans la zone d'étude du modèle, les sites potentiels de retrait ou de déplacement de la communauté).

2.5 Établir la portée du projet

Il est possible d'établir la portée du projet sur la base des objectifs, des scénarios d'aléas et des renseignements disponibles, qui doit comprendre un plan clair pour atteindre les objectifs du projet. Cette portée, englobant tous les éléments énumérés précédemment, peut être utilisée pour planifier le projet, dont les demandes de propositions, les plans de travail, l'estimation précise des coûts et la sélection de spécialistes dûment qualifiés. En bref, des informations claires et précises doivent être fournies sur les aspects suivants :

- Introduction au projet
- Objectifs du projet
- Paramètres d'analyse
 - Étendue spatiale de la zone d'étude
 - Résolution exigée
 - Exigences méthodologiques
- Scénarios pour l'analyse
 - Sources d'aléas pour l'analyse
 - Nombre de scénarios
 - Probabilité souhaitée des scénarios
 - Prise en compte des changements climatiques
- Renseignements généraux disponibles
 - Partenaires, parties prenantes et titulaires de droits du projet
 - Études antérieures ou pertinentes
 - Informations sur les inondations antérieures
 - Données d'entrée disponibles pour le modèle
 - Renseignements sur le contexte communautaire
- Attentes en matière de mobilisation des communautés (voir le [chapitre 3](#))
- Données de sortie exigées
 - Résultats cartographiés
 - Données de sortie
 - Fichiers de configuration des modèles
 - Documentation technique du projet

- Matériel de communication du projet

D'autres renseignements souvent fournis dans le cadre d'un projet comptent les échéances, les budgets, les exigences administratives et contractuelles, les exigences en matière de soumission et d'autres facteurs à considérer dictés par la politique d'acquisition.

2.6 Références

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., & Perrie, W. (2019). *Changes in oceans surrounding Canada*. Dans Bush, E., Lemmen, D.S. (Eds.) *Canada's Changing Climate Report* (pp. 343–423). Government of Canada. <https://changingclimate.ca/CCCR2019/>

James, T. S., Robin, C., Henton, J. A., & Craymer, M. (2021). *Relative Sea-level Projections for Canada based on the IPCC Fifth Assessment Report and the NAD83v70VG National Crustal Velocity Model*. Ressources naturelles Canada. <https://doi.org/10.4095/327878>

Murphy, E., Lyle, T., Wiebe, J., Hund, S. V., Davies, M. et Williamson, D. (2020). *Lignes directrices pour l'évaluation des risques d'inondation côtière pour les applications de conception de bâtiments et d'infrastructures* (CRBCPI-Y5-R2). Conseil national de recherches Canada.

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 Sciences*, 11(12), 3181–3195. <http://doi.org/10.5194/nhess-11-3181-2011>.

3.0 Mobilisation des communautés et des partenaires

Auteurs principaux

Nicky Hastings (Ressources naturelles Canada) et Julie Van de Valk (Ressources naturelles Canada)

Contributeurs

Mike Ellerbeck (Ressources naturelles Canada), Zheng Ki Yip (Ressources naturelles Canada) et Brent Baron (Services aux Autochtones Canada)

Citation recommandée

Hastings, N. L. et Van de Valk, J. (2025). Mobilisation des communautés et des partenaires. Dans *Évaluation des aléas d'inondation côtière pour l'analyse fondée sur les risques concernant les côtes marines du Canada*. Éditeurs Ferguson, S., Hastings, N. L., Van de Valk, J., Murphy, E. et Kim, J. Gouvernement du Canada.

3.1 Introduction

La mobilisation des communautés est essentielle à tout projet, car les communautés ont une relation unique avec leur région et en ont une compréhension particulière. Les parties ayant des liens directs avec le littoral seront les plus touchées par les inondations et les projets de réduction des risques d'inondation. En général, les communautés locales, les nations et les titulaires de droits autochtones et les autres parties prenantes sont ces parties. Les membres de la communauté peuvent avoir vécu des inondations historiques et ont un lien étroit avec la région. En particulier, le point de vue des communautés autochtones locales est essentiel pour offrir une vision holistique et élargie de la région. La participation de la communauté, des partenaires et des titulaires de droits tout au long d'une évaluation des aléas d'inondation côtière aide à ce que les études répondent aux besoins de la communauté et que celle-ci comprenne mieux les inondations. En fonction du projet, la participation peut cibler le public ou un groupe plus restreint de parties prenantes et de titulaires de droits. Cette section détaille les principes de mobilisation et les personnes à inclure.

3.2 Ce qu'il faut savoir avant de mobiliser

Avant de mobiliser les communautés, les parties prenantes ou les titulaires de droits, il faut recueillir des renseignements sur le contexte communautaire. La liste suivante résume les éléments clés à prendre en compte avant de mobiliser les communautés et les partenaires :

- Quelle est la durée du projet et combien de participants seront impliqués? Y a-t-il des contraintes de temps qui pourraient avoir une incidence sur le projet?
- Quel est l'objectif du projet? Permettra-t-il l'élaboration de renseignements techniques objectifs en vue d'une utilisation ultérieure ou fait-il partie d'un projet plus vaste qui permettra la prise de décisions pour les communautés locales en matière d'utilisation des terres et de lutte contre les inondations?
- Y a-t-il eu récemment des inondations côtières majeures ou nuisibles dans la communauté?
- Y a-t-il des études antérieures ou en cours sur les inondations côtières dans la région et, si oui, qui est impliqué ou l'a été?
- Y a-t-il des questions politiques délicates au sein des communautés ou entre elles que les résultats du projet pourraient toucher?
- Quelles sont les répercussions potentielles des travaux sur la communauté?
- Y a-t-il d'autres grands projets en cours dans la région?
- Y a-t-il eu une couverture médiatique sur la communauté ou sur des sujets liés aux travaux du projet proposé?
- Y a-t-il eu des signes d'inquiétude dans la communauté concernant le projet proposé ou des questions connexes?

La liste suivante résume les éléments supplémentaires qui doivent être compris avant de mobiliser les communautés autochtones :

- Existe-t-il des traités, des négociations de traités, des affirmations, des plans d'aménagement du territoire ou d'autres documents qui peuvent avoir des exigences en matière de mobilisation?
- Quelles sont les structures de gouvernance de la communauté? La gouvernance repose-t-elle sur un conseil, un ou une chef héréditaire, des Assemblées de nations, etc.?
- Existe-t-il un risque de répercussions négatives sur les droits ancestraux et issus de traités garantis par l'article 35 (c.-à-d. des répercussions négatives sur les activités traditionnelles de la communauté : chasse, pêche, cérémonies, etc.)?
- Quelles répercussions passées et présentes sont-elles dues à la politique coloniale dans la région? Existe-t-il des antécédents de colonisation, de litige sur l'utilisation et la propriété des terres, de projets industriels ou d'infrastructures dans la région qui pourraient être pertinents dans le cadre du projet sur les aléas d'inondation côtière?
- Quels sont les noms autochtones utilisés pour un endroit et que peut-on faire pour respecter les noms autochtones des lieux?
- Les terres de réserve autochtones sont-elles protégées par des mesures de lutte contre les inondations sur des terres autochtones ou non autochtones et, dans l'affirmative, quels sont l'historique associé et le point de vue actuel des Premières Nations?

3.3 Principes de partenariat et de mobilisation des communautés

Les quatre principes clés du partenariat et de la mobilisation des communautés sont :

- **Accroître la sensibilisation aux communautés et la compréhension de celles-ci** : tenir compte de la culture de la communauté, des conditions économiques, des réseaux sociaux, des structures politiques, des normes et des valeurs, des tendances démographiques, de l'histoire, des aléas, des risques et des expériences antérieures en matière de participation. Une analyse de la documentation et de l'actualité constitue une excellente première étape pour mieux comprendre la communauté.
- **Aller vers la communauté** : établir des relations, instaurer la confiance, travailler avec les chefs formels et informels, rechercher l'engagement des organisations et des chefs communautaires pour créer des processus de mobilisation de la communauté.
- **Partenariat** : établir une relation de confiance; communiquer et collaborer régulièrement pour tenir tous les partenaires au courant des priorités au sein des institutions respectives. La documentation du partenariat, qui peut comprendre des accords, peut aider à maintenir la recherche lorsque le personnel de l'organisation communautaire change.
- **Communication** : adapter la communication au public cible. Il faut peut-être simplifier les concepts et les renseignements techniques et scientifiques pour faciliter la communication avec des publics non techniques.

En plus de ces principes, la liste suivante résume les principes recommandés propres à la participation des communautés autochtones :

- **Abus historiques** : reconnaître la probabilité de sévices dans le passé de la communauté et d'une éventuelle méfiance envers les équipes de recherche et les scientifiques. Écouter les commentaires de la communauté sur le projet. Utiliser plusieurs stratégies de participation. Prévoir une marge de temps pour établir des relations interpersonnelles et de la confiance. Intégrer les coutumes locales aux interventions. Faire preuve de respect et d'inclusion dans la mesure du possible.
- **Prévoyez suffisamment de temps pour la mobilisation** : De nombreuses communautés autochtones sont inondées de demandes de participation et peuvent être confrontées à des problèmes communautaires plus urgents.
- **Envisagez une perspective d'interconnexion** : Les peuples autochtones peuvent adopter le point de vue selon lequel le territoire est un être vivant et tout est interconnecté. Les plantes et les animaux peuvent être considérés comme étant des guides et des sources d'information sur le territoire et les changements liés aux inondations, tels que les changements climatiques.
- **Contes** : De nombreuses communautés utilisent les contes comme un outil puissant de partage des connaissances pour comprendre et transmettre des connaissances sur le territoire. Toute connaissance orale ou traditionnelle partagée ne doit l'être qu'avec l'autorisation expresse et la reconnaissance de la personne ayant partagé ses connaissances.
- **Consultation** : Il est essentiel de consulter les aînés et aînées, les jeunes, les associations de chasse et de trappe, les entités communautaires, les chefs héréditaires et les élus.

Se reporter à la [section 6.2](#) pour connaître les principes de communication.

3.4 Qui inclure et comment le faire

Une évaluation des aléas d'inondation côtière solide nécessite souvent une approche multidisciplinaire impliquant une collaboration entre les spécialistes, les experts en la matière et d'autres représentants. Les opinions de tous sont importantes et doivent être entendues, mais toutes n'auront pas le même niveau d'importance dans le processus. Par exemple, on devrait généralement accorder plus d'importance à la contribution des Premières Nations dans les discussions et les décisions qu'à celle d'un petit groupe d'intérêt spécial dont l'implication est plus marginale dans le projet.

Les océans et les zones côtières sont gérés par un large éventail de juridictions gouvernementales. West Coast Environmental Law a développé une infographie décrivant les juridictions responsables de chaque zone côtière en Colombie-Britannique. Cette infographie peut être utile pour comprendre quels partenaires gouvernementaux peuvent jouer un rôle dans l'évaluation (WCEL, 2018).

La liste suivante résume les groupes généraux qui peuvent contribuer à l'évaluation des aléas d'inondation côtière :

- **Partenaires** : Les partenaires participent aux travaux. Ils doivent comprendre ceux et celles qui génèrent des connaissances scientifiques et traditionnelles et les preneurs et

preneuses de décisions, qui utiliseront les résultats pour guider des mesures d'atténuation et d'adaptation et pour sensibiliser le public. Il peut s'agir d'un éventail de partenaires allant des universitaires aux équipes-conseils, en passant par le personnel de la communauté et les organisations à but non lucratif. Définissez clairement qui produit les données, qui les consomme, qui les compile et qui finance le projet.

- Des accords de partage de données peuvent être mis en place avec les partenaires pour établir des ententes officielles qui détaillent les données partagées et leur utilisation appropriée.
 - Des chartes et des plans de projet complets, approuvés par les membres de l'équipe, permettent de définir les objectifs, le budget, la portée, les attentes, les résultats, les échéances et les risques associés au projet.
- **Comité directeur ou groupe consultatif** : Selon la portée et l'ampleur de l'évaluation, il peut être nécessaire d'établir un comité directeur ou un groupe consultatif. Les groupes consultatifs apportent du contexte et de la valeur au projet et leur participation au comité leur permet de se familiariser avec celui-ci. Il existe différents types de groupes consultatifs, notamment les groupes consultatifs techniques et les groupes consultatifs généraux. Il est possible de rédiger un mandat pour établir les rôles, les responsabilités et la gouvernance. Un groupe consultatif partage les connaissances du projet et permet aux membres du comité de contribuer, de comprendre et d'utiliser les résultats du projet une fois celui-ci terminé. Le comité ou le groupe consultatif peut être un groupe existant ou un nouveau groupe. En mettant ce groupe sur pied, pensez clairement à celles et ceux qui génèrent des connaissances (scientifiques et traditionnelles) et qui prennent des décisions.
- **Représentants de la communauté** : Il s'agit d'un groupe potentiellement large de personnes, y compris le public, qui sont intéressées par le travail et qui peuvent être affectées par, ou peuvent affecter, l'aléa. Il peut inclure des résidents vivant dans une zone d'inondation côtière, de communautés voisines ou de propriétaires et d'exploitants d'infrastructures dans la région. Les connaissances locales des représentants des communautés peuvent souvent être utilisées pour compléter les données et améliorer les analyses techniques (voir la [section 4.3](#)).
- **Titres de propriété et détenteurs de droits** - Les nations autochtones ayant un lien avec le territoire devraient être considérées comme des détenteurs de droits dans les projets et c'est à elles qu'il convient de demander des orientations pour le projet.
 - Soyez prêt à prévoir des honoraires lors de la consultation des parties prenantes. Plusieurs de ces groupes possèdent des connaissances inestimables sur la région et devraient être compensés pour le partage de ces savoirs. Par exemple, c'est particulièrement important lorsqu'on engage un dialogue avec les aînés et aînées de la communauté.
 - La référence aux connaissances autochtones doit être faite avec des conseils sur la manière dont les connaissances traditionnelles peuvent être publiées et sur la nature de ces connaissances.
 - L'organisation pour laquelle vous travaillez peut influencer le type d'engagement avec une communauté, en raison de l'historique des interactions passées et des pratiques coloniales antérieures.

Encadré 3-1

Cette guide s'appuie sur les enseignements tirés de trois études de cas menées en collaboration. Le tableau suivant résume les groupes participants, y compris les partenaires du projet, les comités de pilotage, les conseillers et les représentants de la communauté :

Tableau 3.1. Partenaires pour trois études communautaires sur les inondations côtières.

Étude de cas pour l'Atlantique (Péninsule acadienne, NB)	Étude de cas pour l'Arctique (Tuktoyaktuk, T.N.-O)	Étude de cas pour le Pacifique (Première nation Semiahmoo, C.-B.)
- Province du Nouveau-Brunswick - Valorès - Université de Moncton - Ressources naturelles Canada - Conseil national de recherches Canada - Recherche et développement pour la défense Canada	- Hameau de Tuktoyaktuk - Société communautaire de Tuktoyaktuk - Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest, Affaires municipales et communautaires - Comité de chasseurs et de trappeurs de Tuktoyaktuk - Ressources naturelles Canada - Conseil national de recherches Canada - Recherche et développement pour la défense Canada	- Première nation de Semiahmoo - Gouvernement de la Colombie-Britannique — Gestion des urgences de la Colombie-Britannique - Services aux Autochtones Canada - Ressources naturelles Canada - Pêches et Océans Canada <i>Ocean Networks Canada</i> - University of Victoria - Recherche et développement pour la défense Canada

3.5 La gouvernance pour une mobilisation réussie

- **L'obligation de consulter les communautés autochtones** : L'article 19 de la Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones (Nations Unies, 2007) stipule que : « Les États se concertent et coopèrent de bonne foi avec les peuples autochtones intéressés — par l'intermédiaire de leurs propres institutions représentatives — avant d'adopter et d'appliquer des mesures législatives ou administratives susceptibles de concerner les peuples autochtones, afin d'obtenir leur consentement préalable, donné librement et en connaissance de cause. ».
- **Responsabilité** : Désignez clairement une personne responsable de la mobilisation de la communauté afin de garantir que la communication et la mobilisation ont lieu et font partie du projet.
- **Clarté des rôles** : Les rôles et les responsabilités de chacune des parties sont-ils clairement définis? Une charte de projet pour les partenaires du projet ou un mandat pour les membres des comités peuvent être utiles pour définir clairement les rôles et les attentes.
- **Pouvoir** : Un mécanisme prédéterminé doit permettre d'inclure et de traiter tous les commentaires recueillis dans le cadre du projet. Il convient d'établir un point de contact central pour le projet afin que les commentaires soient pris en compte.

- **Transparence** : Les résultats du projet doivent être ouverts, transparents et communiqués aussi largement que possible en temps utile.
- **Engagement** : Pour garantir le succès du projet, les partenaires et les membres du comité doivent être en mesure de consacrer le temps nécessaire à la réussite du projet. Pour cela, il est essentiel de définir le temps nécessaire par le biais d'une charte de projet ou du mandat d'un comité.

3.6 Plan de mobilisation

Dans le cas d'un projet de longue haleine, l'élaboration d'un plan de mobilisation peut contribuer à garantir le succès et l'adoption du projet. Mobiliser les parties prenantes demande du temps et des ressources et doit être pris en compte dans le plan global du projet. Un plan de mobilisation des parties prenantes du projet doit être élaboré avec elles et inclure :

- Des points de contact clairement définis entre les membres de l'équipe de projet et les porte-paroles de la communauté, sous la forme de réunions, de commentaires en ligne, de conversations individuelles, d'enquêtes ou d'autres options.
- Les dates et les durées des points de contact sont définies longtemps à l'avance et correspondent au calendrier de la communauté.
- Des objectifs exacts pour les points de contact qui sont définis en tenant compte des besoins des partenaires du projet et des plans de travail du projet.
- Objectifs de participation du public (Figure 3.1).

Informer	Consulter	Impliquer	Collaborer	Habiliter
• Fournir de l'information • Afin de comprendre le problème, les alternatives ou les solutions	• Obtenir de la rétroaction • Pour l'analyse, les alternatives et les prises de décisions	• Travailler directement avec des collaborateurs tout au long du processus • S'assurer que les préoccupations et les objectifs sont toujours compris et pris en considération	• S'associer avec des collaborateurs pour chaque élément de la prise de décision • Inclure le développement d'alternatives et de solutions préférées	• Les collaborateurs prennent la décision définitive

Figure 3.1. La participation du public [modifié d'après l'Association internationale pour la participation publique (IAP2, 2024)].

Le chapitre 5 du document *Nature-based infrastructure for coastal flood and erosion risk management : a Canadian design guide* (Murphy et al., 2024) du Conseil national de recherches Canada peut être consulté pour obtenir des ressources supplémentaires sur les principes clés d'un engagement efficace. Le guide contient une section qui met en évidence une gamme d'outils et de ressources tels que les promenades sur le littoral, le photovoix, les enquêtes, les dîners communautaires, les modes physiques, etc. qui permettraient d'améliorer le processus d'engagement.

3.7 Transition à la fin du projet

Dans la dernière ligne droite du projet, des décisions importantes doivent être prises pour assurer la transition et permettre aux travaux générés d'aider la modélisation des risques d'inondation et d'étayer la prise de décisions future.

- **Propriétaire de la propriété intellectuelle** : Une fois le projet terminé, il peut être possible de publier les résultats et de stocker les données et les modèles. Les plans à cet égard doivent être établis le plus tôt possible lors du projet afin de garantir la transparence avec les porte-paroles de la communauté et l'obtention des autorisations de partage de la propriété intellectuelle, le cas échéant. Comme l'exigent les principes PCAP, les communautés autochtones devraient avoir le contrôle de la façon dont les données et les informations concernant leurs populations sont partagées.
- **Formation et transfert de connaissances** : La formation et le transfert de connaissances exigent que l'équipe du projet donne à la communauté les moyens d'utiliser les renseignements développés dans le cadre du projet pour répondre à ses besoins. C'est un élément clé de la mobilisation de la communauté. Chaque communauté aura des capacités et des besoins différents qui peuvent inclure :
 - Réexécution du modèle avec des paramètres différents ou des scénarios supplémentaires.
 - Renforcement du modèle dans le cadre d'autres projets.
 - Utilisation des résultats du modèle pour la planification communautaire.
 - Utilisation des résultats du modèle pour l'évaluation des risques et la prise de décisions en matière de réduction des risques.
- **Documentation pour la répétabilité** : De nouveaux modèles d'aléas d'inondation côtière devront être générés au fil du temps à mesure que les conditions changent. Par exemple, l'altération des zones côtières peut modifier la façon dont les eaux de crue et les vagues réagissent au contact de la terre ferme. Lorsque seul un rapport est remis à la communauté, les résultats du modèle ne peuvent pas être réexécutés dans de nouvelles conditions ou exploités dans d'autres projets. Les modèles doivent être documentés et partagés avec les partenaires du projet. Le fait de veiller à ce que les modèles soient documentés et transmis aux bailleurs de fonds et aux partenaires des projets, comme il est indiqué au [chapitre 6](#), contribuera à garantir leur réutilisation à l'avenir.

3.8 Références

Association internationale pour la participation publique. (2024). *Advancing the practice of public participation*. <https://www.iap2.org/page/pillars#>

Centre de gouvernance de l'information des Premières Nations. (2021). *Les principes PCAP® des Premières Nations*. <https://fnigc.ca/fr/les-principes-de-pcap-des-premieres-nations/>

Nations Unies. (2007). *Déclaration des Nations Unies sur les Droits des peuples autochtones*.

Murphy, E., Cornett, A., Van Proodij, D., Mulligan, R.P. (2024). *Nature-based infrastructure for coastal flood and erosion risk management: a Canadian design guide*. National Research Council. 348p. <https://doi.org/10.4224/40003325>

West Coast Environmental Law (WCEL). (2018). *Jurisdiction in coastal BC*.
<https://www.wcel.org/sites/default/files/publications/2018-05-coastaljurisdiction-infographic-updated.pdf>

4.0 Collecte des données

Auteurs principaux

Sean Ferguson (Conseil national de recherches Canada), Nicky Hastings (Ressources naturelles Canada), Joseph Kim (Université d'Ottawa), Enda Murphy (Conseil national recherches Canada), Charles Papasodoro (Ressources naturelles Canada), Lucinda Leonard (University of Victoria), Blair Greenan (Pêches et Océans Canada), Thomas James (Ressources naturelles Canada), Kelin Wang (Ressources naturelles Canada), Gwyn Lintern (Ressources naturelles Canada) et Mark Rankin (Ocean Networks Canada).

Contributeurs

Fatima Nemati (University of Victoria), David Bélanger (Ressources naturelles Canada) et Guillaume Légaré-Couture (Ressources naturelles Canada)

Citation recommandée

Ferguson, S., Hastings, N. L., Kim, J., Murphy, E., Papasodoro, C., Leonard, L., Greenan, B., James, T., Wang, K., Lintern, G. et Rankin, M. (2025). Collecte des données. Dans *Évaluation des aléas d'inondation côtière pour l'analyse fondée sur les risques concernant les côtes maritimes du Canada*. Éditeurs Ferguson, S., Hastings, N. L., Van de Valk, J., Murphy, E. et Kim, J. Gouvernement du Canada.

4.1 Introduction

La collecte des données est un composant essentiel du processus d'évaluation des aléas d'inondation côtière. Le présent chapitre présente une orientation sur l'identification et l'acquisition des données généralement nécessaires à l'évaluation des aléas d'inondation côtière, notamment un résumé des ressources de données actuellement à la disposition des spécialistes.

4.2 Données d'élévation : Bathymétrie et topographie

Les données d'élévation sont un élément clé pour concevoir des modèles hydrodynamiques numériques et pour simuler des ondes de tempête. La qualité des données bathymétriques (c.-à-d. la résolution, la précision et l'âge ou la pertinence) est cruciale pour la génération et l'évolution de l'onde de tempête simulée dans le domaine modélisé. De même, des données topographiques de haute qualité sont essentielles pour permettre une estimation précise des inondations terrestres et de la propagation des inondations.

La résolution et la précision des données bathymétriques nécessaires pour la modélisation des ondes de tempête dépendent de l'objectif du modèle. Par exemple, des jeux de données bathymétriques grossières à l'échelle régionale ou mondiale, ou des données extraites de cartes de navigation peuvent suffire pour la modélisation des ondes de tempête à l'échelle régionale, axée sur la simulation de niveaux d'eau élevés sur une zone géographique étendue et avec peu de détails. Cependant, il peut être nécessaire d'acquérir des données bathymétriques à haute résolution pour permettre la simulation détaillée des ondes de tempête sur la côte, l'évaluation des aléas à l'échelle communautaire et la simulation des inondations terrestres. De même, des données à haute résolution peuvent être nécessaires pour permettre la modélisation des zones côtières proches de la zone d'intérêt, tandis que des ensembles de données à résolution grossière peuvent convenir à la modélisation des zones en eau profonde.

La résolution et la précision des données topographiques nécessaires dépendent des besoins ultérieurs en matière d'évaluation des risques et d'estimation des dommages. Les spécialistes doivent tenir compte de l'étendue spatiale des biens de la communauté (ou des communautés) d'intérêt pour laquelle ils ont l'intention de fournir des renseignements sur les aléas. Par exemple, si le ruissellement autour des bâtiments et d'autres obstacles doit être représenté dans le modèle, la résolution des données topographiques doit permettre ce type d'analyse.

4.2.1. Données

Des ressources de données bathymétriques et topographiques peuvent être accessibles pour étayer l'évaluation des aléas. Les Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables donnent des directives sur les données d'élévation topographique pour la cartographie des zones inondables. En outre, cette section résume partiellement les sources potentielles d'élévation plus propres aux inondations côtières. En fonction de la situation géographique et de la portée de l'évaluation des aléas, les spécialistes peuvent avoir besoin d'autres ensembles de données bathymétriques et topographiques pour étayer les analyses. Les spécialistes doivent savoir que des accords de partage de données peuvent être nécessaires et préciser les limites d'utilisation de ces données.

Le Service hydrographique du Canada (SHC) met à la disposition du public des données bathymétriques non navigationnelles (NONNA) qu'il est possible de télécharger par le biais d'un portail en ligne (SHC, 2018). Plus précisément, le produit NONNA-10 est un ensemble de données bathymétriques multisources qui intègre toutes les données gérées par le SHC, dont les ensembles de données bathymétriques lidar aéroportées et les échosondeurs à faisceau unique et multifaisceaux. La résolution spatiale du produit NONNA-10 varie en fonction de la latitude (SHC, 2018) :

- Au sud du 68° parallèle nord, les produits = 0,1° de latitude X 0,1° de longitude (0,0001 degré)
- Du 68° au 80° parallèle nord, les produits = 0,1° latitude X 0,2° longitude (0,0002 degré)
- À partir du 80° parallèle nord, les produits = 0,1° latitude X 0,4° longitude (0,0004 degré)

Les spécialistes sont encouragés à s'informer auprès du SHC pour obtenir des directives sur la disponibilité, la référence altimétrique, l'acquisition et le prix des meilleurs produits bathymétriques disponibles pour des lieux exacts.

L'organisation General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) fournit des données bathymétriques accessibles au public couvrant les océans du monde entier (GEBCO, 2020a). Les produits bathymétriques les plus récents publiés par la GEBCO en 2019 et 2020 offrent une couverture mondiale sur un maillage de 15 secondes d'arc (GEBCO, 2020b, 2020c).

Il est souvent difficile de trouver des ensembles de données bathymétriques des zones côtières où les eaux sont peu profondes en raison des limitations techniques et pratiques des équipements de détection et d'acquisition des données. L'eau des zones côtières peut être trop peu profonde pour permettre des levés bathymétriques par bateau. Toutefois, des technologies telles que le lidar topobathymétrique aéroporté visent à combler cette lacune en permettant la réalisation de levés bathymétriques en eaux peu profondes. Pour plus de détails sur le lidar topobathymétrique aéroporté, consultez l'annexe 5 du Guide d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par lidar aéroporté, version 3.0 (RNCAN, 2020).

Les spécialistes doivent être conscients de l'utilité, des limites et de la quantité de traitement associées aux ensembles de données topographiques obtenues par lidar. Par exemple, les modèles numériques de terrain (MNT) fournissent une représentation du sol nu de la surface terrestre (c.-à-d. sans végétation, bâtiments, ni autres structures) tandis que les modèles numériques de surface (MNS) représentent l'élévation de la surface du sol nu plus tout revêtement de surface (Zhou, 2017). Le modèle numérique d'élévation de haute résolution (MNEHR), qui est accessible sur le portail de données ouvertes du gouvernement du Canada, offre un accès libre aux données d'élévation à haute résolution actuellement disponibles dans tout le Canada et comprend des MNT et des MNS (RNCAN, 2019a). Le produit du MNEHR intègre des données lidar acquises par de multiples partenaires au pays et la couverture continuera d'évoluer en fonction de la production de nouvelles données lidar. Si les zones d'intérêt ne sont pas encore couvertes par le produit du MNEHR, les spécialistes sont encouragés à s'informer sur la disponibilité des données topographiques auprès des gouvernements provinciaux et territoriaux, des administrations municipales et des institutions de recherche locales, en particulier si des produits spécialisés (p. ex., des produits d'élévation hydro cohérents ou des données ponctuelles lidar) sont nécessaires.

4.2.2. Plan de référence

L'application d'un système de référence spatiale approprié et commun est cruciale pour l'intégrité de tout projet impliquant l'intégration de données géospatiales, notamment l'évaluation des aléas d'inondation côtière. Les jeux de données d'élévation topographique sont habituellement référencés par rapport à des systèmes d'altitude basés sur le géoïde ou le nivellement. (p. ex., CGVD2013 ou CGVD28 au Canada) tandis que les jeux de données bathymétriques côtières sont habituellement référencés au zéro des cartes (p. ex., la basse mer inférieure, grande marée, BMIGM). Les différences fondamentales entre les références altimétriques terrestres et océaniques renforcent la nécessité d'une conversion appropriée et précise.

Le document Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables (RNCAN, 2019b) fournit des recommandations pour les systèmes de référence verticaux et horizontaux des ensembles de données géospatiales utilisés dans la cartographie des zones inondables. Les recommandations sont basées sur les références de données et de géoïde les plus récentes définies par RNCAN. Les mêmes systèmes de référence sont recommandés pour l'évaluation des aléas d'inondation côtière.

RNCAN offre un éventail d'outils pour effectuer des conversions entre les systèmes de référence orthométriques, les systèmes ellipsoïdes et les époques (Gouvernement du Canada, 2021a). Parmi ces outils, le logiciel GPS-H est un outil pratique qui permet une telle conversion altimétrique sur des coordonnées ponctuelles (Gouvernement du Canada, 2021b). RNCAN fournit également plusieurs maillages de géoïde pour effectuer des transformations sur les matrices. Ces grilles comprennent le modèle du géoïde CGG2013a définissant le CGVD2013, les modèles hybrides du géoïde HTv2.0 pour les époques 1997, 2002 et 2010, ainsi que les grilles de conversion entre le CGVD28 et le CGVD2013 pour les trois mêmes époques. Ces maillages peuvent être téléchargés et rééchantillonnés pour obtenir l'espacement approprié entre les pixels (p. ex., en utilisant des outils tels que `gdal_warp`), puis être utilisés pour les transformations. Les outils géodésiques et les informations sur le système de référence de RNCAN sont accessibles sur : (<https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-et-publications/systemes-reference-geodesiques/18768>)

Pour les conversions du zéro des cartes à l'ellipsoïde ou aux systèmes de référence orthométriques, on encourage les spécialistes à utiliser les processus décrits dans le processus *Canadian Continuous Vertical Datum for Canadian Waters* (Robin et coll., 2016) élaboré par l'AER et RNCAN et les surfaces de séparation verticales hydrographiques (HYVSEP/SEP) applicables à la zone de levé. Les données HyVSEP/SEP sont disponibles pour toutes les eaux à marée du Canada et de l'Europe et peuvent être obtenues sur demande auprès du SHC (chsinfo@dfo-mpo.gc.ca). Les surfaces de séparation sont généralement fournies sous forme de points et peuvent ensuite être converties en matrices interpolées pour faciliter la transformation verticale d'autres matrices.

Consulter Murphy et coll. (2020) pour un résumé détaillé des systèmes de référence altimétrique utilisés au Canada.

4.2.3. Création d'un Modèle numérique d'élévation

La création d'un ensemble de données d'élévation topographiques et bathymétriques continues constitue souvent une base de référence essentielle pour l'utilisation relative aux aléas

d'inondation côtière. Un flux de travail typique pour générer des MNE topobathymétriques de haute qualité devrait inclure les étapes suivantes :

- Obtenir toutes les données topographiques et bathymétriques exactes disponibles pour le territoire d'intérêt. Privilégier les jeux de données récents temporellement rapprochés afin de représenter les conditions actuelles et d'éviter les changements morphologiques importants.
- Analyser individuellement chaque ensemble de données pour détecter les anomalies ou les limites du produit et éventuellement ignorer ou corriger les ensembles de données présentant des problèmes majeurs (p. ex., artefacts, données manquantes).
- Convertir les différents produits en un format vectoriel ou de trame commun (p. ex. GeoTIFF, .xyz).
- Comme l'expliquent Murphy et coll. (2020), il faut parfois procéder à un découpage pour que les jeux de données topographiques comptent uniquement les terres au-dessus de la surface de l'eau et que les ensembles de données bathymétriques couvrent uniquement celles en dessous de la surface de l'eau. Par exemple, les données lidar non bathymétriques capturent généralement la surface de l'eau (détectable comme une surface plate ou presque plate), qu'il faut retirer pour éviter de l'interpréter à tort comme étant une zone intertidale.
- Analyser les métadonnées du produit pour obtenir des renseignements sur les systèmes de référence des coordonnées.
- Prévoir la conversion des données de références altimétriques dans des systèmes de référence communs. Consulter la section [4.2.2](#) pour connaître les systèmes de référence recommandés pour la cartographie des aléas d'inondation côtière et les méthodes de conversion.
- Fusionner les ensembles de données vectorielles et rasters en un produit homogène. Si l'on utilise un format raster, la résolution des pixels choisie doit être un compromis entre la résolution des données d'entrée et l'usage auquel le produit est destiné. Lors de l'agglomération des données, une méthode de rééchantillonnage bilinéaire ou cubique est préférable. Plusieurs outils commerciaux (p. ex., Raster Mosaiker de FME, les fonctions *Merge Raster* d'ESRI) et outils ouverts (p. ex., *gdal_merge* de GDAL) sont adaptés à cette opération.
- Il faut toujours effectuer un contrôle de la qualité du produit final. Ceci doit toujours inclure des contrôles visuels et l'utilisation de points de contrôle répartis uniformément dans la zone d'intérêt pour vérifier l'exactitude du produit. Une vérification visuelle du littoral est également fortement recommandée pour garantir que le produit est cohérent avec les autres sources (p. ex., l'imagerie satellitaire et aérienne). Si les données peuvent être utilisées pour l'aménagement du territoire ou pour assurer la sécurité publique, il faut effectuer des visites sur place et des levés de contrôle à l'aide du système mondial de localisation cinématique en temps réel (RTK GPS) pour confirmer la précision du MNE, afin de vérifier la précision des emplacements clés du MNE.
- Il arrive couramment que certaines données ne soient pas disponibles, en particulier dans la partie bathymétrique du jeu de données. Dans de tels cas, pour des manques relativement petits, on peut utiliser des méthodes d'interpolation, mais des valeurs simulées seront ajoutées dans l'ensemble de données. L'interpolation peut être une source d'erreur importante dans les MNE utilisés pour la modélisation des inondations et aucune technique d'interpolation ne fournit la meilleure solution pour toutes les

utilisations. Les interpolations doivent être analysées, vérifiées sur place ou éditées manuellement pour garantir que la surface résultante représente (modélise) fidèlement la topographie ou la bathymétrie.

- À l'ère des ensembles de données à haute résolution (provenant par exemple de sources comme le lidar), il faut parfois réduire la quantité d'échantillons pour réduire la charge de calcul, ce qui peut inclure l'interpolation d'ensembles de données à haute résolution vers des maillages de calcul à résolution plus grossière. Il convient d'étudier les implications de la technique de sous-échantillonnage pour la modélisation. Par exemple, puisque le sous-échantillonnage entraîne souvent le lissage des données topographiques ou bathymétriques, il faut parfois utiliser des méthodes de compensation dans la modélisation hydrodynamique (p. ex., l'amélioration des coefficients de rugosité ou de frottement).
- Pour certaines applications hydrologiques avancées, un traitement supplémentaire d'amélioration hydrologique pourrait être effectué sur la partie terrestre des données (p. ex., un MNE hydro cohérent) afin d'assurer la continuité hydrologique dans tout le jeu de données.

Consulter les directives géomatiques fédérales sur la cartographie des zones inondables pour plus de détails sur les différents types et processus de création de jeux de données d'élévation topographique. En outre, Murphy et coll. (2020) apportent d'autres facteurs à considérer pour l'intégration des sources de données bathymétriques et topographiques. Il est possible de trouver d'autres flux de travail dans Eakins et Grothe (2014) et Eakins et coll. (2015).

Encadré 4-2

Dans l'étude de cas de la côte Pacifique, un atelier en deux parties a rassemblé des spécialistes et des fonctionnaires pour créer un ensemble de données altimétriques topobathymétrique unique à utiliser dans toute la région. Cette démarche a permis de garantir une approche standardisée et a présenté une occasion d'apprentissage. Cette méthode de préparation de mosaïques de MNE, inspirée par l'approche de la NOAA, a été utilisée comme approche de base pour créer le MNE de la zone d'étude. Cependant, les approches hautement automatisées pour générer des MNE peuvent toujours créer des artefacts artificiels ou des représentations erronées; les MNE doivent donc toujours être vérifiés dans ce sens. En outre, la génération de MNE doit toujours être entreprise dans l'optique des utilisations et des objectifs prévus, de sorte à garantir que les efforts et l'attention aux détails visent les bons domaines. Par exemple, les modèles d'ondes éoliennes côtières exigent souvent une topographie et une bathymétrie de haute qualité et de haute résolution dans les zones côtières, en particulier dans les zones à fort gradient, alors qu'une qualité et une résolution inférieures peuvent être acceptables dans les zones océaniques profondes et plates. Cependant, une bathymétrie très précise dans les zones profondes peut être importante pour la modélisation des aléas des tsunamis puisque les ondes sont plus importantes. La génération de MNE doit donc être menée par les utilisateurs pour que leurs besoins et limites soient adéquatement comprises, ou bien en étroite consultation avec eux.

4.3 Données communautaires et observations locales

Une évaluation robuste des aléas d'inondation côtière peut nécessiter la connaissance de facteurs particuliers influençant la formation et la propagation des inondations, qui ne sont pas forcément évidents à extrapoler à partir de sources de données conventionnelles ou accessibles au public. Par exemple, une évaluation robuste à l'échelle de la communauté peut nécessiter une connaissance des formes de relief côtières locales ou des influences anthropogéniques (p. ex., le remplissage et l'excavation) qui peuvent ne pas être diffusées publiquement ou immédiatement évidentes pour les spécialistes externes. De même, les relevés de données conventionnelles peuvent ne pas fournir suffisamment de renseignements pour illustrer la gravité des inondations antérieures dans les zones d'intérêt. Par exemple, les relevés de données conventionnelles (telles que celles obtenues à partir des marégraphes) ne représentent qu'une indication ponctuelle des niveaux d'eau extrêmes, offrant peu d'information sur la répartition des aléas d'inondation à l'échelle de la communauté. Cependant, les preuves non conventionnelles ou non techniques des niveaux d'eau et des étendues d'inondations ([Tableau 4.1](#)) peuvent être des ressources inestimables pour évaluer le modèle (c.-à-d. l'étalonnage et la validation), en particulier dans les endroits où les preuves conventionnelles et quantitatives n'existent pas. L'accès aux connaissances et aux données de la communauté devient de plus en plus important à mesure que les résolutions nécessaires à l'évaluation deviennent plus fines. L'évaluation des aléas à l'échelle régionale à résolution grossière ne nécessite pas une connaissance approfondie des facteurs liés aux inondations à l'échelle de la communauté. Cependant, les connaissances locales et les données de la communauté peuvent être essentielles pour mener l'évaluation des aléas à l'échelle de la communauté à résolution fine.

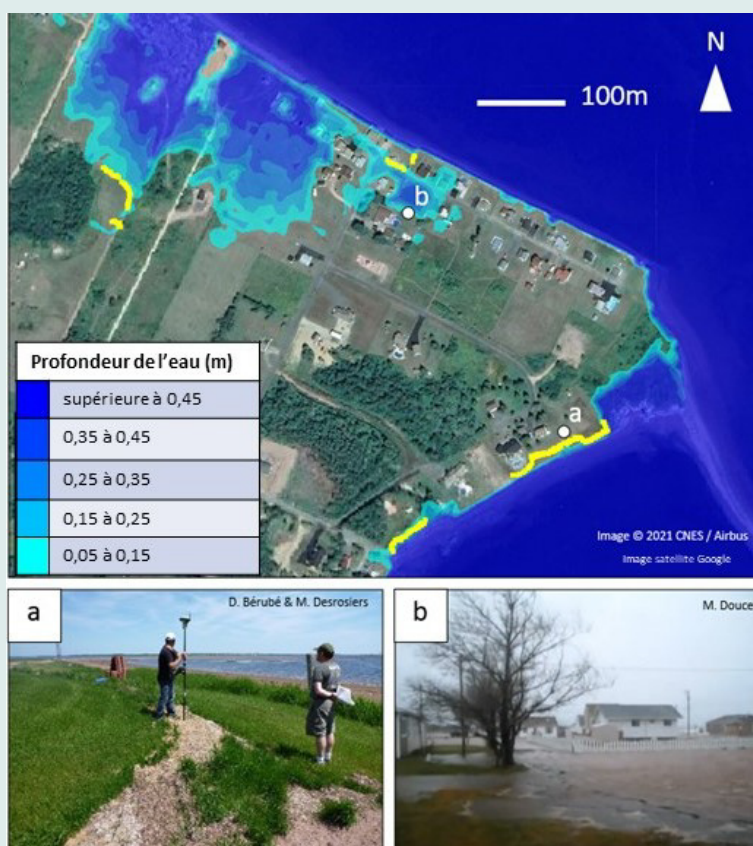
Lors de l'évaluation des aléas d'inondation côtière, les spécialistes doivent enquêter sur la disponibilité des sources de données communautaires, dont les preuves photographiques ou les vidéos des inondations antérieures, les observations des citoyens, les articles de presse et le savoir traditionnel et local. Les discussions avec les spécialistes locaux et les représentants des communautés (p. ex., les parlementaires municipaux, les groupes à but non lucratif et les équipes de recherche) peuvent révéler des renseignements importants qui doivent être pris en compte dans l'évaluation des aléas et qui peuvent favoriser les possibilités de partage de données et de collaboration.

Tableau 4.1. Sources potentielles de données communautaires pour évaluer le modèle.

Type de données	Exemples de sources de données
Photos, vidéo ou relevés d'inondations antérieures	Gouvernement local, associations communautaires, médias
Médias sociaux	Facebook, Instagram, LinkedIn, X (anciennement Twitter)
Connaissances traditionnelles (Chapitre 3)	Histoires transmises oralement
Dépôts de paléotsunami (Section 4.8.4)	Publications officielles (https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/)
Renseignements archéologiques	Publications ou rapports officiels

Encadré 4-3

Les relevés de marégraphes conventionnels n'étaient pas disponibles pour étayer l'évaluation du modèle à l'échelle communautaire pour l'étude de cas de l'Atlantique. Le modèle a été évalué en comparant les résultats de celui-ci pour les événements historiques aux données d'observation de débris fournis par les spécialistes locaux du gouvernement du Nouveau-Brunswick. En outre, les résultats du modèle ont été comparés aux preuves photographiques fournies par des membres du gouvernement du Nouveau-Brunswick et de l'Université de Moncton et aux preuves vidéo fournies par un résident (Figure 4.1. Évaluation du modèle à l'échelle communautaire pour l'étude de cas de l'Atlantique près de Pointe-Brûlée, au Nouveau-Brunswick. La figure précédente illustre les résultats du modèle pour l'onde de tempête du 21 décembre 2010. Les points jaunes identifient les lieux d'observation de débris. Les photographies (a) et (b) correspondent aux endroits identifiés dans la figure du haut. La photo (a) montre l'échantillonnage des débris. La photo (b) montre les inondations observées pendant l'événement.).



4.4 Données météorologiques

Les phénomènes météorologiques, dont les vents de tempête, les fluctuations de la pression atmosphérique et les précipitations, sont des facteurs importants et souvent dominants des aléas d'inondations côtières. Dans les régions où la glace de mer est répandue, la température

de l'air et d'autres paramètres atmosphériques influencent la formation et la persistance de la glace, ce qui peut avoir des répercussions sur les vagues et les ondes de tempête.

Encadré 4-4

La modélisation régionale des ondes de tempête effectuée pour les études de cas de la côte atlantique et de la côte arctique a démontré le rôle important que la présence (ou l'absence) de glace de mer peut jouer en influençant le transport de la quantité de mouvement vent-mer et les ondes de tempête (Figure 4.2).

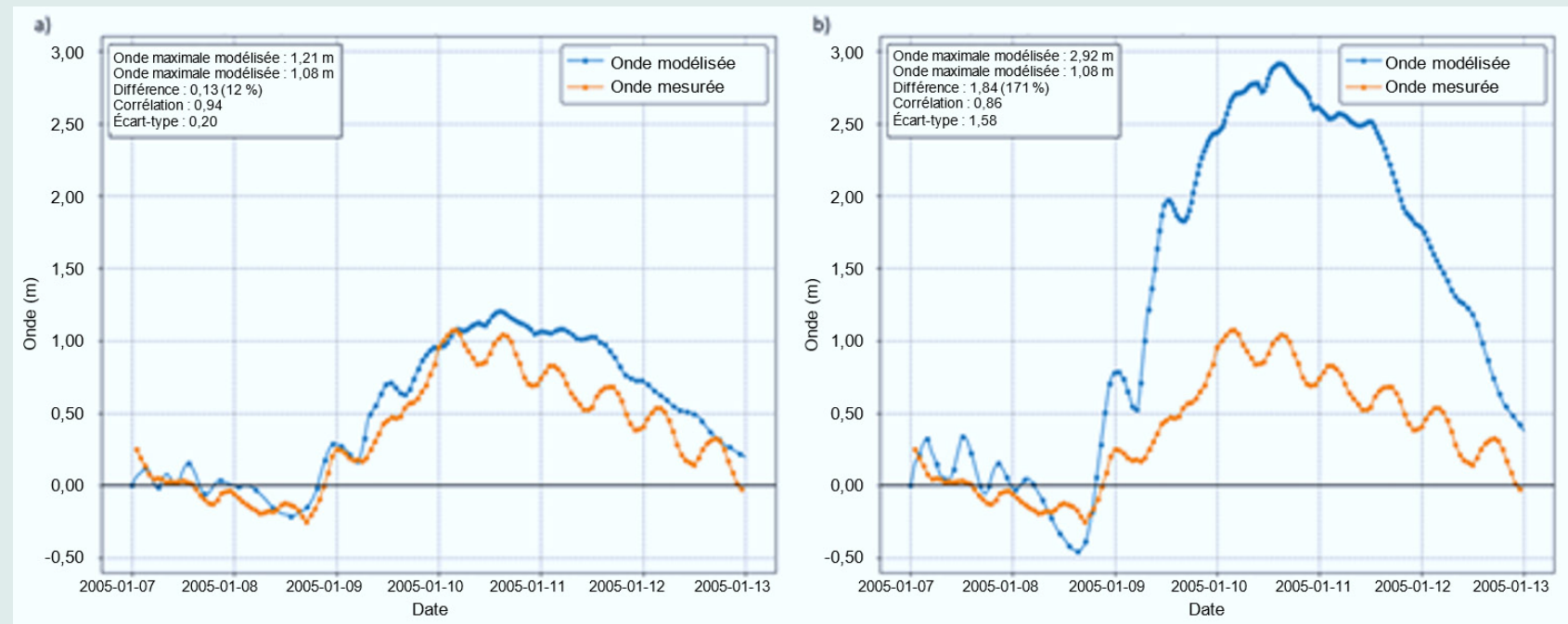


Figure 4.2. Comparaison des élévations modélisées et mesurées de l'onde de tempête à Tuktoyaktuk pour une onde de tempête de janvier 2005 entre (a) l'état des glaces actuelles et (b) un scénario hypothétique en mer libre. Source : Kim et coll. (2021).

Il est possible de télécharger des mesures météorologiques historiques fiables et à long terme à partir des archives en ligne d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) (Gouvernement du Canada, 2021 c) pour les stations de tout le pays. Comme il est expliqué dans Murphy et coll. (2020), il existe également une variété et un nombre croissant de données atmosphériques maillées disponibles auprès de diverses sources, qui peuvent comprendre des simulations rétrospectives, des réanalyses, des prévisions et des prévisions immédiates. Ces données maillées (basées sur des modèles) sont généralement utilisées lorsque les mesures à long terme ne sont pas disponibles ou pour fournir une couverture spatiale étendue (par exemple pour l'utilisation de modèles numériques d'ondes de tempête). Les prévisions et les prévisions immédiates intègrent le système à haute résolution de prévision déterministe d'ECCC, pour lequel des données archivées sont disponibles à une résolution spatiale de 2,5 km (Gouvernement du Canada, 2014). Les réanalyses combinent des données de modèle et des données d'observation, et fournissent donc généralement des relevés multidécennaux plus fiables que les simulations rétrospectives, les prévisions ou les prévisions immédiates, nécessaires afin de saisir les événements pluviohydrologiques extrêmes pour les analyses basées sur le risque. Cependant, les compromis quant à la résolution temporelle et spatiale des données disponibles peuvent influencer le choix des données atmosphériques selon les différentes applications. Des résolutions temporelles et spatiales plus élevées sont préférables pour refléter les gradients importants des paramètres atmosphériques associés aux tempêtes intenses. La réduction de la fiabilité des prévisions modélisées associée aux données atmosphériques près des interfaces terre-mer est un artefact commun des ensembles de données maillées, que des résolutions spatiales plus élevées peuvent aider à résoudre. Parce que certains ensembles de données maillées sont plus fiables que d'autres dans différentes régions, il est toujours nécessaire et d'une importance cruciale de valider localement les jeux de données maillées en utilisant des données d'observation (p. ex., Kim et coll., 2021), ce qui peut guider les choix de données pour différentes applications. Parmi les exemples d'ensembles de données de réanalyse, citons le Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) de la NOAA (Saha et coll., 2010) et l'ERA5 du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (Hersbach et coll., 2017).

Une approche alternative (ou complémentaire) à l'utilisation de données atmosphériques maillées pour la simulation numérique des vagues et des ondes de tempête consiste à simuler des champs de vents cycloniques (p. ex., Hardy et coll., 2010). Cette méthode était traditionnellement exigée pour refléter des gradients importants dans les champs de vent et de pression atmosphérique associés à d'intenses tempêtes tropicales, les tempêtes simulées étant souvent fusionnées avec des ensembles de données maillées à plus faible résolution ou insérées dans ceux-ci. Comme la résolution spatiale et temporelle des données de réanalyse continue d'augmenter, il se peut que ces techniques ne soient pas nécessaires pour les applications canadiennes. Cependant, les simulations de tempêtes modélisées permettent d'étendre les données historiques et d'étayer des analyses statistiques des valeurs extrêmes pour des types d'événements particulièrement rares ou peu fréquents (p. ex., les tempêtes post-tropicales au Canada atlantique).

4.5 Données sur le niveau de l'eau

La disponibilité des données sur les niveaux d'eau et l'accès à celles-ci sont des conditions préalables essentielles à l'évaluation des aléas d'inondation côtière. Les relevés à long terme des niveaux d'eau provenant des marégraphes, par exemple, sont nécessaires pour étayer les analyses statistiques nécessaires pour estimer les niveaux d'eau extrêmes et leur attribuer des probabilités. Dans le contexte de l'évaluation basée sur le risque des inondations dues aux ondes de tempête, les données sur les niveaux d'eau sont fondamentales pour élaborer un scénario des aléas. En outre, les données sur les niveaux d'eau sont nécessaires pour l'étalonnage et la validation du modèle pendant le processus d'évaluation des aléas. Comme il est décrit par Murphy et coll. (2020), « Idéalement, il existe des mesures à long terme au site ou à proximité de celui-ci où les risques sont évalués, ce qui permet de comprendre les fluctuations à court terme (p. ex., les marées, les ondes de tempête et les seiches), saisonnières (p. ex., en réponse aux cycles hydrologiques), interannuelles (p. ex., sous l'effet de la variabilité climatique) et à long terme (changement relatif du niveau de la mer) des niveaux d'eau. » Murphy et coll. (2020) décrivent en outre l'utilité des données semi-qualitatives, comme les photographies, les lignes des hautes eaux sur les bâtiments, les laisses de mer de billots et de débris et des renseignements anecdotiques sur l'étendue et la gravité des tempêtes et des tsunamis antérieurs pour étayer les analyses et compléter les données quantitatives (Didier et coll., 2015; Environnement Canada, 2006; Ferguson et coll., 2022; Forbes et coll., 2013; Harper et coll., 1988; Kim et coll., 2021; Leonard et Bednarski, 2014).

Murphy et coll. (2020) fournissent des directives récentes et complètes sur les ressources disponibles en matière de données sur les niveaux d'eau et sur l'acquisition de données et le contrôle de la qualité. Les lecteurs peuvent consulter Murphy et coll. (2020) pour de l'orientation détaillée. Toutefois, l'[encadré 4-5](#) ci-dessous résume les concepts clés.

Encadré 4-5

Ressources disponibles en matière de données sur les niveaux d'eau, adaptées de Murphy et coll. (2020)

Mesures du niveau de l'eau

- Le Service hydrographique du Canada (SHC) entretient un réseau d'instruments de mesure permanents du niveau de l'eau le long des côtes maritimes et des Grands Lacs du Canada.
- Des données archivées et en temps réel sur les niveaux d'eau sont disponibles en ligne (Pêches et Océans Canada, s.d.).
- Les données horaires sur les niveaux d'eau sont disponibles depuis les années 1960, avec des mesures plus fréquentes à partir des années 1980 (15 min) et 2000 (3 min ou 1 min).
- Des intervalles d'échantillonnage plus courts sont préférables pour éviter de découper les niveaux d'eau extrêmes.
- Les ensembles de données à long terme sont généralement prélevés à intervalles horaires, ce qui est suffisant pour la plupart des applications d'analyse des niveaux d'eau extrêmes.
- Des niveaux d'eau préliminaires (sans contrôle de qualité) peuvent être disponibles auprès des bureaux régionaux du SHC. Par exemple, le SHC Pacifique dispose de

données préliminaires pour 36 instruments de mesure (Pêches et Océans Canada, 2021).

Composantes de la marée

Les prévisions de niveaux d'eau générées à l'aide des composantes de la marée fournissent une estimation des contributions astronomiques au niveau d'eau total et ne représentent pas le forçage météorologique et les autres composantes qui contribuent également au niveau d'eau. Il existe deux principales composantes de la marée, soit les composantes lunaires (influencées par l'attraction gravitationnelle de la lune) et solaires (influencées par l'attraction du soleil). La durée de leur cycle est de 12 heures.

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

- **Service hydrographique du Canada (SHC) :** Il est possible d'obtenir les composantes officielles des marées pour les ports canadiens auprès du SHC moyennant des frais de licence minimales.
- **Bases de données :** Les bases de données sur les composantes de la marée sont également disponibles à partir de modèles régionaux ou mondiaux, qui peuvent intégrer ces données ou être ajustés ou validés à l'aide d'observations (dont des données altimétriques par satellite). Citons par exemple le modèle de prévision de marée WebTide (Institut océanographique de Bedford, 2020), qui fournit des prévisions de marées pour les eaux canadiennes, et TPXO, une série de modèles globaux (Egbert et Erofeeva, 2002). Ces bases de données peuvent fournir des représentations raisonnables des niveaux d'eau en utilisant un nombre limité de composantes sur le modèle. Dans les régions peu profondes et les régions dont la bathymétrie côtière est complexe, les données peuvent être grandement limitées.
- **Analyse des marées :** Les composantes de la marée peuvent être obtenues à partir des niveaux d'eau mesurés. Le progiciel d'analyse et de prévision des marées de Pêches et Océans Canada (Foreman, 1977) et les implémentations modernes des algorithmes, comme la boîte à outils MIKE21 (DHI, 2017), T_TIDE (Pawlowicz et coll., 2002) et UTide (Codiga, 2011) sont couramment utilisés pour l'analyse des harmoniques de marée.

Données sur les ondes de tempête simulées

Il existe plusieurs modèles de calcul utilisés qui fournissent des données sur les ondes de tempête. La plupart de ces modèles sont généralement appliqués à des fins de prévisions à court terme (c.-à-d. opérationnelles); leur utilité pour étayer l'évaluation des risques est donc limitée. Cependant, certaines simulations rétrospectives à long terme sont maintenant disponibles (Zhai et coll., 2019). Bernier (2005) et Zhang et Sheng (2013) ont eu recours à la modélisation numérique pour estimer les niveaux d'eau extrêmes du plateau continental oriental de l'Amérique du Nord, sur la base de simulations s'étendant sur plusieurs décennies. Les travaux de Bernier ont servi de base à un ensemble largement adopté de statistiques sur les ondes de tempête et le niveau d'eau total pour les eaux maritimes canadiennes élaboré par Richards et Daigle (2011).

Acquisition des données sur le niveau de l'eau

L'acquisition de données sur le terrain peut être nécessaire si des données sur les niveaux d'eau ne sont pas disponibles. La proximité des postes de marégraphie existants, la configuration du littoral, les données bathymétriques et d'autres renseignements doivent être examinés pour déterminer si les niveaux d'eau (tels que les marées, les seiches et les ondes

de tempête) sont susceptibles d'être similaires, amplifiés ou atténués par rapport à ceux d'un poste proche. Des mesures sur le terrain prises à court terme, durant un ou deux mois, peuvent être suffisantes pour développer une relation au niveau de l'eau entre deux sites proches. Des campagnes sur plusieurs années peuvent être nécessaires pour évaluer les niveaux d'eau extrêmes.

Des directives détaillées relatives au choix des sites marégraphiques, à l'installation, aux levés, au traitement des données et au contrôle de la qualité sont fournies dans le Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer (Commission océanographique intergouvernementale, 2016). Les normes, les lignes directrices et les manuels élaborés par les gouvernements provinciaux et locaux ou par les associations professionnelles peuvent également fournir des indications sur les exigences relatives à l'acquisition des données et aux levés (p. ex., Ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique, 2009).

Lorsque des mesures directes du niveau d'eau ne sont pas immédiatement disponibles (p. ex. pour des endroits éloignés), les données disponibles après l'événement ou les « substitutions », comme les dépôts de bois flotté ou la hauteur du varech, peuvent donner un aperçu utile des conditions antérieures de haut niveau d'eau (Didier et coll., 2015; Ferguson et coll., 2022; Forbes et coll., 2013; Harper et coll., 1988; Kim et coll., 2021; Leonard et Bednarski, 2014).

Contrôle de qualité des données de niveau d'eau

Le contrôle de qualité des données de niveau d'eau comporte de nombreux facteurs à considérer, tels que l'erreur de mesure et la façon dont les données sont présentées et citées. Voici un résumé de certains des problèmes les plus courants :

- **Examen des données** : Des fluctuations importantes et rapides du niveau d'eau peuvent se produire naturellement ou peuvent être le résultat d'une défaillance de l'instrument. Les mesures du niveau d'eau des levés précédentes ou subséquentes et des données corroborantes (telles que des événements météorologiques) peuvent souvent être utilisées pour accepter ou éliminer des données suspectes. Il est important de ne pas exclure toutes les valeurs extrêmes légitimes, puisque l'examen des données et le filtrage et l'élimination des fausses valeurs aberrantes sont des processus délicats.
- **Lacunes dans les données** : Les données sur les niveaux d'eau doivent être examinées pour identifier les lacunes dans la couverture temporelle. Il n'est pas rare que les instruments ne fonctionnent plus lors d'événements extrêmes et la vérification d'autres ensembles de données (comme les données sur le vent et les niveaux d'eau aux jauges voisines) permet de voir si un événement extrême a été raté. Il est également important de vérifier s'il existe des écarts saisonniers (p. ex. en hiver) et, le cas échéant, d'élaborer un plan pour y remédier.
- **Lieu** :
 - Le site de la jauge peut être ou non représentatif de la région d'intérêt.
 - La jauge pourrait être influencée par l'écoulement d'une rivière adjacente.
 - Les données peuvent avoir été collectées à un endroit légèrement différent, les jauges ayant souvent changé d'emplacement par le passé.
- **Références** : Les niveaux d'eau sont mesurés par rapport à une élévation de référence verticale, qui peut être le zéro des cartes locales, un autre plan basé sur le niveau de la mer ou les marées, un niveau de référence ou un repère terrestre, un niveau de référence altimétrique basé sur le géoïde (p. ex., le niveau de référence altimétrique géodésique canadien de 2013) ou une autre référence. De plus, les niveaux relevés peuvent nécessiter un ajustement pour tenir compte de la variation

locale du niveau relatif de la mer, corrélé avec le mouvement vertical du sol, résultant du soulèvement ou de l'affaissement isostatique, de la compaction des sédiments et d'autres facteurs. Le site web Réseaux de contrôle passifs de RNCAN (Gouvernement du Canada, 2021e) et l'outil GPS-H de RNCAN (Gouvernement du Canada, 2021b) peuvent aider à la conversion entre les niveaux de base. Il faut examiner et confirmer les données altimétriques historiques publiées pour les principaux repères afin de vérifier leur exactitude dans le système de référence rapporté. Par exemple, certaines des séries repères provinciales en Colombie-Britannique établies par nivellement à bulle et publiées dans le CGVD28 ne correspondent pas à l'altitude publiée lorsqu'elles sont mesurées par rapport au CGVD28 à l'aide de technologies du système mondial de navigation par satellite (GNSS), même s'il s'agit du même système de référence. Pour les études sur les inondations, il est essentiel que les niveaux d'inondation des bâtiments et les niveaux de crête des mesures de lutte contre les inondations soient établis par rapport au même système de référence nominal *et à la même origine* que ceux utilisés pour le levé du terrain qui a permis d'établir le niveau de crue nominale.

- **Durée de la période des relevés :** La période sur laquelle s'étendent les relevés est importante lors de l'évaluation de toute donnée mesurée, puisque des ensembles de données plus courts limiteront la possibilité de comprendre les statistiques et les tendances à long terme ou de saisir les événements extrêmes qui entraînent des inondations côtières.

4.6 Vagues

Les vagues peuvent contribuer de manière significative au développement d'aléas d'inondation côtière dans les zones où le littoral est exposé à la pleine mer. Une première étape pour comprendre comment des éléments peuvent potentiellement contribuer aux aléas consiste à étudier les données disponibles sur les vagues au large, qui peuvent être mesurées, observées ou simulées par des modèles.

Les données sur les vagues se basent sur les bouées d'enregistrement des vagues, disponibles dans les archives du Service des données sur le milieu marin (SDMM), mises à jour par Pêches et Océans Canada (Gouvernement du Canada, 2019). Des relevés pour 565 bouées existent pour les océans Pacifique, Atlantique et Arctique, certaines bouées enregistrant des données depuis les années 1970. Cependant, la période pour laquelle des relevés existent pour chacune des bouées est très variable. Des données maillées (simulées par des modèles) sur les vagues sont également disponibles, offrant une couverture spatiale et temporelle étendue. Les ensembles de données de réanalyse à l'échelle mondiale, comme l'ERA5 du Centre européen pour les prévisions à moyen terme (Hersbach et coll., 2017), peuvent fournir des mesures horaires des vagues sur un maillage ayant une résolution d'environ 30 km de 1979 à aujourd'hui. Des données nationales de simulations rétrospectives mises à jour par Pêches et Océans Canada, comme les simulations MSC50 Atlantic, Northeast Pacific GROW-Fine et Beaufort MSCB (Meteorological Service of Canada Beaufort), sont disponibles pour chacune des régions côtières marines du Canada (Gouvernement du Canada, 2020). La résolution spatiale et temporelle de ces données canadiennes, ainsi que la période sur laquelle s'étendent les relevés, varie selon les régions.

Les bouées d'enregistrement des vagues utilisées et entretenues par Pêches et Océans Canada sont dispersées dans les eaux au large du Canada et ne fournissent généralement pas de relevés continus à long terme (c.-à-d., pluridécennaux, voire pluriannuels). La courte durée des déploiements des bouées d'enregistrement des vagues signifie que les relevés ne parviennent souvent pas à refléter les événements extrêmes (événements pluviohydrologiques) pertinents pour l'évaluation des aléas d'inondation côtière. Ces bouées sont également situées en eaux plus profondes au large des côtes et ne fournissent donc souvent pas de données pertinentes pour caractériser le régime des vagues arrivant dans la zone côtière. Cependant, en l'absence d'ensemble de données sur les vagues arrivant dans la zone côtière, les données des bouées d'enregistrement des vagues au large peuvent s'avérer utiles pour étayer une partie de l'étalonnage et de la validation des modèles de vagues simulées (particulièrement les modèles régionaux de croissance et de transformation des vagues) et pour fournir des conditions aux limites des modèles de transformation des vagues (si au moins certains événements pluviohydrologiques sont captés). Étant donné que les vagues se transforment lorsqu'elles se propagent dans la zone côtière et sur terre (par des processus tels que l'exhaussement, la réfraction, la rupture, la diffraction, la dissipation par frottement et les interactions non linéaires), les données dans les zones côtières et sur la côte sont préférables pour vérifier localement et quantifier l'incertitude des modèles de vagues prévisionnels. Cependant, ceci peut nécessiter le déploiement de bouées d'enregistrement des vagues ou de capteurs de pression dans les zones côtières (idéalement dans la zone de déferlement pour capter la transformation des vagues) propres au projet ou des levés terrestres des hautes mers et des lignes de débris ou de ruine. Les deux approches d'acquisition de données dans la zone côtière ou sur terre peuvent s'avérer difficiles, longues (nécessitant de longues périodes de données pour saisir les événements pluviohydrologiques) et coûteuses (temps, travail et équipement). Lintern et coll. (2024) décrivent les méthodes et les instruments qu'il est possible d'utiliser pour assurer la surveillance des vagues d'un projet ainsi que les efforts et les dépenses prévus (voir le tableau 12.4-1 de la publication). Les coûts, les avantages et les répercussions sur le calendrier des campagnes d'acquisition de données de vagues propres à un projet doivent être évalués par rapport à l'apport attendu des vagues aux aléas globaux d'inondation côtière (c.-à-d. que les coûts et les avantages seraient plus élevés sur les côtes ouvertes et exposées), la confiance ou l'incertitude dans les modèles de vagues prédictifs, le but de l'évaluation des aléas et des risques et l'incertitude tolérable dans l'évaluation des aléas et des risques. Des techniques innovantes (p. ex., installations radar, télédétection et traitement des images basé sur l'apprentissage automatique) font leur apparition et pourraient contribuer à réduire le coût de l'acquisition de données sur les vagues dans les zones côtières à l'avenir.

Murphy et coll. (2020) fournissent des renseignements plus détaillés sur les données disponibles concernant les vagues dans les régions côtières du Canada.

4.7 Sources d'aléas de tsunami

Pour la plupart des communautés du Canada, les tsunamis sont peu fréquents et ne sont généralement pas aussi importants pour la cartographie des zones inondables que les aléas plus fréquents d'inondation fluviale et côtière qui motivent les décisions en matière d'aménagement du territoire et d'atténuation des risques d'inondation. Toutefois, des tsunamis

peuvent survenir dans les trois océans qui bordent le Canada et les lacs (seiches). Les présentes lignes directrices tiennent compte des tsunamis causés par des tremblements de terre (lointains ou locaux) et des glissements de terrain (tant subaériens que sous-marins). Les tsunamis peuvent également être générés par des éruptions volcaniques, le vélage ou le chavirement d'icebergs, des conditions atmosphériques (météotsunamis; Thomson et coll., 2009; Mercer et coll., 2002) et par des impacts d'astéroïdes (rare). Les vagues de tsunami, générées par le déplacement d'une masse d'eau, par le haut ou par le bas, peuvent se produire aussi bien dans les eaux marines que dans les eaux intérieures. Un des défis de la modélisation des tsunamis consiste à identifier et à délimiter l'occurrence, la fréquence, la taille et les caractéristiques des événements sources potentiels. En outre, à mesure que le climat change, les effets des conditions météorologiques extrêmes sont incertains. Par exemple, des ruptures de versant sur des pentes abruptes ou très abruptes pourraient augmenter l'ampleur et la fréquence des tsunamis. Sur les côtes de l'Arctique et de l'Atlantique, des vagues localement dommageables peuvent également être engendrées par des icebergs. Les régions prises par les glaces doivent tenir compte des effets des variations saisonnières des aléas dues à l'état changeant des glaces de mer.

Une évaluation préliminaire des aléas de tsunami (Leonard et coll., 2012) a été élaborée pour le Canada. Cette évaluation permet d'estimer la probabilité qu'un tsunami, déclenché par des séismes locaux et lointains et par des sources de glissement de terrain sous-marin de grande ampleur, dépasse une hauteur de déferlement d'ondes donnée pour une plage temporelle. Cette publication identifie les sources de tsunamis pour les régions côtières du Canada.

Une base de données mondiale sur les tsunamis antérieurs, élaborée par le National Geophysical Data Center, détaille les tsunamis enregistrés depuis 2100 avant notre ère jusqu'à aujourd'hui dans les océans Atlantique, Indien et Pacifique, dans la mer Méditerranée et dans la mer des Caraïbes (NOAA, 2021).

4.7.1. Sources déclenchées par les tremblements de terre

Les tsunamis déclenchés par des tremblements de terre peuvent être complexes. Par exemple, le récent tsunami de novembre 2016 en Nouvelle-Zélande a été causé par le séisme d'arrière-pays de magnitude (Mw) 7,8 qui a rompu de multiples failles sous terre et en mer; le déplacement du plancher océanique au large a provoqué un tsunami important (Power et coll., 2017). En outre, les variations dans la façon dont une faille se rompt peuvent entraîner une différence spectaculaire sur la montée du tsunami à la côte. Compte tenu du nombre de tremblements de terre relevés sur la côte Pacifique et autour de la ceinture du Pacifique, cette côte présente l'aléa le plus élevé de tsunami, suivie de la côte Atlantique et de la côte Arctique. Toutefois, à mesure que la couverture de glace sur les côtes de l'Atlantique et de l'Arctique évolue, les effets des tsunamis vont augmenter. Les tsunamis déclenchés par des séismes importants lointains (magnitude > 8) peuvent parcourir de longues distances et mettre des heures à atteindre le littoral. Pour ces types d'événements, on ne ressent pas toujours le tremblement de terre avant l'arrivée de la vague. Une série de vagues générées par ces événements peuvent avoir des longueurs d'onde de plusieurs centaines de kilomètres et se déplacer à grande vitesse. Le creux de la vague atteint d'abord la terre, laissant la zone intertidale dénudée d'eau. Après un certain temps, l'eau afflue vers l'intérieur des terres à l'arrivée de la crête. En revanche, un tsunami déclenché par une source locale de séisme crustal peut donner lieu à des vagues dévastatrices qui arrivent dans les minutes qui suivent la secousse sismique. Dans la région du littoral, les vagues de tsunami entraînent parfois des

ondes d'enneigement et des ressacs. En s'approchant de la côte, les vagues s'érodent et incorporent des sédiments. L'avancée de la vague peut générer des pressions hydrodynamiques importantes sur le plancher océanique, ce qui entraîne des mouvements de masse du sol et des instabilités de talus (Figure 4.3).

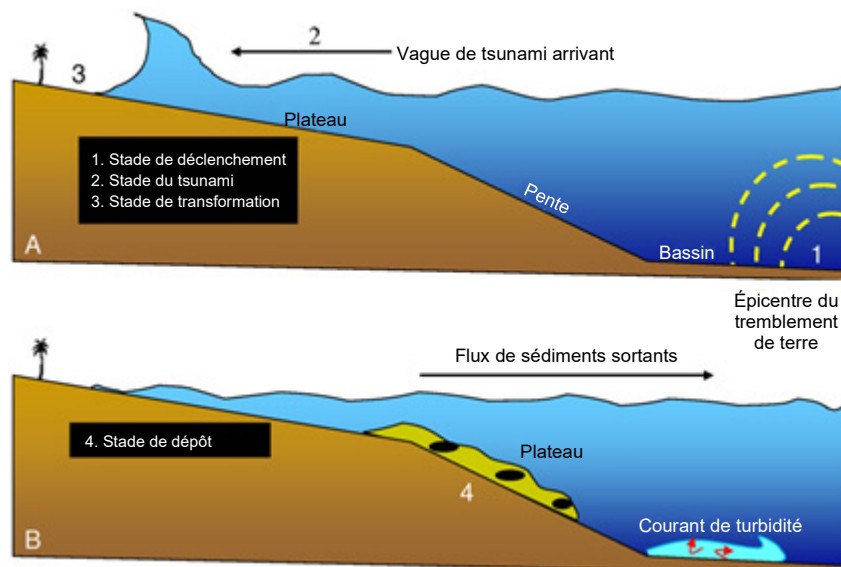


Figure 4.3. Ces manifestations, à leur tour, entraînent le dépôt de sédiments sur terre et au large par une variété de mécanismes, dont les glissements boueux, les courants de turbidité et les courants de fond (Shanmugam, 2021).

4.7.2. Séismes de compression (proches et lointains)

Trois grandes zones de failles de compression se trouvent le long de la côte Pacifique du Canada et constituent des sources potentielles de tsunamis par le biais du déplacement du plancher océanique. Il s'agit notamment de la zone de subduction de Cascadia qui s'étend du sud-ouest de la Colombie-Britannique au nord de la Californie, la marge sud de la Reine-Charlotte dans la région de Haida Gwaii et le bassin Winona au nord-est de l'île de Vancouver. La zone de subduction de Cascadia, notamment le segment Explorer, présente l'aléa de tsunami le plus élevé pour la côte du Pacifique, une probabilité de montée extrême le long du rivage extérieur sud de la Colombie-Britannique et un danger moindre pour les côtes intérieures du Pacifique de Juan de Fuca et des détroits de Géorgie. Le long de la côte nord de la Colombie-Britannique, la marge transpressive de la Reine-Charlotte compte pour une proportion importante de l'aléa de tsunami. Les géométries de rupture potentielles pour un tsunami causé par un mégaséisme de magnitude 9 dans la zone de subduction de Cascadia comptent des scénarios de rupture enfouie et de rupture de faille et de fosses océaniques présentés dans Gao et coll. (2018), comptant des mises à jour mineures pour la partie la plus méridionale de Cascadia dans le mémoire de Sypus (2019). La zone du bassin de Winona, juste au nord de la zone de subduction de Cascadia, détient également le potentiel de déclencher un séisme de compression tsunamigène; Sypus (2019) détaille des scénarios de rupture, mais en raison des difficultés à circonscrire les incertitudes dans la tectonique de la zone, cette probabilité n'a pas été intégrée dans les évaluations formelles des aléas. En 2012, un tremblement de terre de magnitude 7,8 survenu juste au large de la côte de Haida Gwaii a provoqué un important tsunami (Leonard et Bednarski, 2014; 2015; Fine et coll., 2015). Cet

événement a dévoilé la présence d'une mégaplaque de subduction jusqu'alors mal connue et mal restreinte (p. ex., Leonard et coll., 2012) ayant le potentiel de se rompre de manière tsunamigène. Des sources potentielles de tsunamis, comme des ruptures enterrées et des ruptures de fosses océaniques, ont été détaillées pour cette faille. Ces scénarios comptent de longues ruptures partantes entre Haida Gwaii et l'île de Vancouver jusqu'entre Haida Gwaii et l'extrémité sud de la péninsule d'Alaska, ainsi que des scénarios pour une rupture plus courte au nord et au sud de la rupture principale du séisme de 2012 (Sypus, 2019).

Les sources éloignées de la zone de subduction contribuent à l'aléa de tsunami sur la côte Pacifique et Atlantique. L'aléa de tsunami sur le littoral de l'Arctique reste toutefois mal restreint. Dans le Pacifique, les deux mégaséismes tsunamigènes les plus importants et les plus dommageables jamais enregistrés se sont produits en Alaska (Mw 9,2, 1964) et au Chili (Mw 9,5, 1960); le tsunami de 1964 a causé des dommages importants sur la côte ouest de l'île de Vancouver, dont à Port Alberni (White, 1966).

4.7.3. Tremblements de terre crustaux

La rupture de failles crustales sous-marines peut déclencher, par le déplacement cosismique du plancher océanique, des vagues localement dommageables. Les failles crustales sont liées à des tremblements de terre de plus faible magnitude que ceux qui se produisent aux limites des plaques et on peut s'attendre à ce qu'elles génèrent des vagues de tsunami plus petites. Pour ces types de tsunamis, l'atténuation des ondes peut être faible et les délais d'alerte courts entre le début des secousses au sol et l'arrivée des ondes dommageables. Par rapport aux sources de mégaséismes, l'intervalle de récurrence des événements tectoniques devrait être très long et les modèles de source présentent généralement de plus grandes incertitudes. Des modèles de source ont été développés pour certaines failles crustales dans la région du détroit de Géorgie qui ont récemment été identifiées comme étant actives (Caston, 2021).

4.7.4. Glissements de terrain

Les tsunamis déclenchés par des glissements de terrain peuvent être provoqués par la rupture de talus subaériens abrupts ou de fronts de deltas sous-marins, qui découlent de secousses sismiques, de pluies, de constructions ou d'autres facteurs. Dans certains cas, les ruptures peuvent se produire des mois ou des années après une activité sismique importante (p. ex. Goff et Sugawara, 2014). Les pentes de fjords très abruptes et la bordure des plaques des deltas sous-marins sont des zones particulièrement préoccupantes (p. ex., Mosher, 2009). Le mouvement du sol dû à un tremblement de terre influence le sol de manière cyclique et peut réduire la résistance au cisaillement du sol (Duncan & Wright, 2005).

Le déplacement de l'eau entraîné par un glissement de terrain peut provoquer des vagues de tsunami extrêmement importantes (p. ex., la vague de 525 m du tsunami de Lituya Bay en Alaska en 1958; Miller, 1960), mais les impacts sont généralement plus localisés que pour les tsunamis déclenchés directement par les déplacements du plancher océanique dus aux séismes. De nombreuses parties du littoral canadien sont susceptibles de subir des glissements de terrain pouvant générer des vagues dommageables, mais on connaît mal l'historique et les répercussions des événements antérieurs (p. ex., Leonard et coll., 2012). Parmi les exemples d'événements dommageables au Canada, mentionnons les tsunamis déclenchés par : une avalanche de roches subaériennes à Knight Inlet, en Colombie-Britannique, qui a détruit un village des Premières Nations dans les années 1600 (Bornhold et coll., 2007), une rupture

sous-marine à Kitimat Arm, en Colombie-Britannique, en 1975 (Skvortsov et Bornhold, 2007) et une rupture sous-marine du talus continental sur la côte de Grands Bancs, au large de Terre-Neuve, qui a causé 28 décès en 1929 (p. ex., Fine et coll., 2005). Les glissements de terrain se produisent généralement de manière répétée à des endroits particuliers, de sorte que la cartographie des dépôts de glissements de terrain peut aider à déterminer les aléas futurs; la compilation d'une base de données nationale des dépôts de glissements de terrain sous-marins est en cours (Lintern et coll., 2020).

4.7.5. Données sur les paléotunamis

L'âge et l'élévation relative des dépôts de tsunamis préservés dans les séquences de sédiments côtiers délimitent de manière importante la taille et la fréquence des événements antérieurs; la base de données Tsunami Deposit Database de NCEI/WDS (s.d.) compile des données globales utiles. Une mise en garde s'impose : la répartition des dépôts de tsunamis reflète rarement tous les effets d'un tsunami; les tsunamis ne laissent pas toujours des dépôts de sédiments, et les dépôts sont souvent mal conservés (p. ex., Szczucinski, 2011; Leonard et Bednarski, 2015). Les histoires orales des Premières Nations côtières (p. ex. Ludwin et coll., 2005) combinées à des études portant sur les paléotsunamis, la paléosismologie et/ou l'archéologie peuvent contribuer à fournir des limites supplémentaires. Goff et coll. (2020) compile et offrent une interprétation détaillée des données sur les paléotsunamis pour la côte pacifique du Canada. Un examen récent des dépôts de tsunamis dans l'ensemble du bassin de l'océan Atlantique (Costa et coll., 2021) ne comprend qu'un seul dépôt au Canada, celui provenant de l'événement des Grands Bancs de 1929.

Les études visant à faire correspondre les relevés de paléosources et de paléotunamis peuvent contribuer à valider les sources de séismes, de glissements de terrain et de tsunamis et à affiner les intervalles de récurrence moyens. Les preuves d'un changement brusque du niveau des terres côtières dû à la rupture d'une faille, comme on peut le relever par un changement entre les indicateurs d'eau douce et d'eau salée dans une séquence de sédiments, coïncident souvent avec un dépôt de tsunami (p. ex., Atwater et coll., 2005). L'étude des tsunamis dus à des paléoglislements de terrain peut s'appuyer sur la correspondance entre l'âge des dépôts de glissement de terrain sur le plancher océanique et les preuves d'inondation par tsunami sur terre, ou potentiellement des éléments d'érosion du plancher océanique (p. ex., Bornhold et coll., 2007; Greene et coll., 2018). La récurrence des mégaséismes de la subduction de Cascadia est principalement définie par les relevés des dépôts de turbidite au large : on déduit qu'ils sont causés par le déclenchement simultané de courants de turbidité à la tête des canyons sous-marins le long de la marge lors de fortes secousses sur une large région (p. ex., Goldfinger et coll., 2012).

4.8 Données sur la glace de mer

Le Service canadien des glaces (SCG), une branche d'Environnement et Changement climatique Canada, relève des données et produit des cartes régionales des glaces depuis 1968. Le récent état des glaces et les dernières données historiques sont disponibles en ligne (Gouvernement du Canada, 2021d). Les régions qui ont fait l'objet de relevés sont l'ouest et l'est de l'Arctique, la baie d'Hudson, le golfe du Saint-Laurent, les Grands Lacs, Terre-Neuve, le Haut-Arctique, les voies navigables et l'océan Arctique. Des cartes quotidiennes des glaces sont produites depuis 1999 tandis que des cartes hebdomadaires des glaces sont produites depuis 1968. Des cartes en noir et blanc et en couleur de l'OMM (Organisation mondiale de la

météorologie) existent. Les cartes des glaces du CIS sont des fichiers ESRI (Environmental Systems Research Institute), principalement des fichiers d'échange ArcInfo (e00), et leur utilisation nécessite une conversion dans un autre format de fichier. Les paramètres, tels que la concentration totale, l'état de développement, l'épaisseur de la glace et la forme de la glace, sont illustrés dans les cartes de glace du CIS. Le National Snow and Ice Data Center (NSIDC), géré par le Cooperative Institute of Research de la University of Colorado Boulder, fournit des données sur la glace de mer à l'échelle mondiale par le biais d'ensembles de données traitées (National Snow and Ice Data Center, 2019). Ces données sont souvent fournies dans des formats de fichiers courants (p. ex., shapefile ou GeoTIFF) et offrent un aperçu simple et rapide des tendances à long terme de la présence de glace de mer. Actuellement, il n'existe pas de données robustes et publiques de mesures pour les floes individuels. Ainsi, une analyse approfondie des échanges de quantité de mouvement air-glace-océan est difficile à effectuer lors de l'évaluation des aléas côtiers.

4.9 Couverture du sol et rugosité

Les modèles hydrodynamiques nécessitent des données sur la rugosité de la surface terrestre et du plancher océanique pour mener les processus computationnels permettant de simuler la friction entre les surfaces et l'eau. La rugosité dépend, en partie, du matériau de surface ainsi que de la végétation. Par exemple, les surfaces lisses, comme le béton ou l'asphalte pavés, exerceront moins de friction sur le ruissellement que les surfaces rugueuses composées de matériaux granulaires grossiers ou de terre végétalisée. La rugosité peut également varier à un endroit donné en raison des changements saisonniers des conditions de surface et de la végétation (Arcement et Schneider, 1989). La paramétrisation de la rugosité est comparativement plus importante aux endroits où des écoulements peu profonds sont prévus (p. ex. lorsque des inondations de surface sont prévues) et moins importante dans les régions extracôtières profondes, où la rugosité n'a qu'une faible influence sur l'hydraulique.

La rugosité est souvent représentée par le coefficient n de Manning (Arcement et Schneider, 1989; Chow, 1959). En général, les spécialistes doivent faire appel à leur jugement technique pour établir les estimations initiales des coefficients de rugosité en fonction de la connaissance de la couverture du sol et de la végétation. Une abondance de guides et de ressources d'ingénierie est disponible pour aider les spécialistes à sélectionner les coefficients de rugosité n de Manning (Arcement et Schneider, 1989; Chin, 2013; Chow, 1959; Houghtalen et coll., 2010). Souvent, les coefficients de rugosité sont considérés comme étant un paramètre d'étalonnage et sont ajustés pendant le processus d'étalonnage du modèle pour optimiser sa performance.

Des ressources sont disponibles pour aider les spécialistes à comprendre le type de couverture du sol à un endroit donné. Certaines compétences gardent des données géospatiales à jour (p. ex., des cartes ou des bases de données SIG) illustrant la répartition des informations pertinentes, comme l'aménagement du territoire ou le type de végétation. Par exemple, le gouvernement du Nouveau-Brunswick tient à jour des bases de données géospatiales illustrant la répartition des zones forestières, non forestières et humides et catégorise en outre les zones non forestières par type de végétation : aucune végétation, herbes, cultures ou autre, arbustes et arbres (Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux, 2019; Ministère des Ressources naturelles, 2019a, 2019b). Des données d'imagerie satellitaire, photographiques et vidéo peuvent également être utilisées pour mieux expliquer la couverture du sol; cependant, il

faut être attentif aux dates qui leur sont associées pour en évaluer la pertinence dans l'étude. Des visites sur place en personne peuvent également servir à évaluer la couverture du sol.

4.10 Bâtiments, infrastructures et protection contre les inondations

Dans les zones développées, les spécialistes doivent tenir compte des effets des infrastructures sur la propagation des eaux de crue et les voies de propagation des aléas (voir la [section 5.2.2](#)). Par exemple, les infrastructures, comme les bâtiments, les murs, les routes et les mesures de lutte contre les inondations, peuvent gêner le ruissellement et/ou atténuer l'effet des vagues, tandis que les infrastructures de drainage (p. ex. les ponceaux) peuvent faciliter la propagation des inondations dans des parcelles de terrain reliées. Selon le niveau de post-traitement des ensembles de données d'élévation, elles peuvent ou non refléter ces éléments dans la modélisation des inondations et les analyses connexes; en effet, les modèles numériques d'élévation (MNE) représentent souvent la surface du sol à nu tandis que les modèles numériques de surface (MNS) ou les données lidar brutes illustrent l'élévation de la surface du sol à nu plus tout revêtement de surface, comme les bâtiments ou la végétation (Zhou, 2017).

La Base de données ouverte sur les immeubles (BDOI) de Statistique Canada est une base de données ouvertes sur les bâtiments, principalement les empreintes des bâtiments, basées sur des sources de données municipales, régionales ou provinciales accessibles au public (Statistique Canada, 2020). La BDOI contient des données géospatiales décrivant les empreintes des bâtiments et des données d'attribut résumant les principales informations géospatiales et administratives, notamment les coordonnées géographiques, la zone, le périmètre, les prestataires de données, l'identificateur géographique de subdivision de recensement et le nom de la subdivision de recensement. Lorsque les données sur les bâtiments ne sont pas disponibles dans la BDOI, ou lorsqu'il faut des détails supplémentaires, on peut vérifier la disponibilité de ces données auprès des institutions ou des gouvernements municipaux, régionaux ou provinciaux. De même, les renseignements relatifs aux infrastructures de protection contre les inondations et de drainage peuvent nécessiter une demande spéciale auprès des institutions locales.

4.11 Projections face aux changements climatiques

4.11.1. Changements climatiques : Glace de mer

La couverture de glace de mer arctique a considérablement changé au cours des dernières décennies (Barber et coll., 2017). La glace de mer pérenne qui résiste à la fonte estivale est remplacée par une glace de mer saisonnière plus fine qui fond en été. La couverture de glace de mer en été (en particulier la glace pluriannuelle [GPA]) a diminué dans tout l'Arctique canadien de 5 % à 20 % par décennie (1968–2016, selon la région) et, dans l'est du Canada, de 7,6 % par décennie (1969–2016) (Derksen et coll., 2019). Il est très probable que l'augmentation des températures dans tous les scénarios d'émissions futures entraîne la réduction continue de la glace de mer d'été et d'automne dans l'Arctique canadien et de la glace de mer d'hiver dans les eaux de l'est du Canada. La plupart des régions marines de l'Arctique canadien pourraient être exemptes de glace de mer pendant au moins un mois en été d'ici 2050, selon les simulations issues des modèles CMIP5. Il est très probable que la région située au nord de l'archipel arctique canadien (AAC) et du Groenland sera la dernière où une GPA épaisse subsistera dans l'Arctique pendant l'été.

4.11.2. Changements climatiques : Vagues et vents marins

On n'a pas dégagé de tendance significative cohérente entre les vents, les activités orageuses et les vagues pour la plupart des eaux au large du Canada, en partie à cause du manque de données et des effets importants de la variabilité naturelle. Les données à long terme sont minimales, ont une résolution spatiale très grossière et ne couvrent pas les zones côtières. On a observé un léger déplacement vers le nord des trajectoires des tempêtes et une diminution de la vitesse du vent et de la hauteur des vagues au large de l'océan Atlantique canadien, et on projette un maintien de cette tendance. Au large de la côte pacifique, on a observé que la hauteur des vagues augmentait en hiver et diminuait en été et ces tendances devraient se poursuivre à l'avenir. La hauteur des ondes de surface et la durée de la saison des vagues dans l'Arctique canadien ont augmenté depuis 1970 et devraient continuer à augmenter au cours de ce siècle avec le déclin de la glace de mer. Au large de la côte est du Canada, les zones qui ont actuellement de la glace de mer saisonnière devraient également connaître une augmentation des vagues à l'avenir puisque la glace saisonnière subsiste moins longtemps (Greenan et coll., 2019).

4.12 Changement du niveau de la mer dans les océans entourant le Canada

Le changement du niveau moyen global de la mer (NMGM) se produit à des échelles temporelles et spatiales et menace les communautés côtières, les villes et les îles à faible altitude. Le NMGM a augmenté de 0,20 [0,15 à 0,25] m entre 1901 et 2018 (GIEC, 2021). Le taux moyen d'élévation du niveau de la mer était de 1,3 [0,6 à 2,1] mm par an⁻¹ entre 1901 et 1971, augmentant à 1,9 [0,8 à 2,9] mm par an⁻¹ entre 1971 et 2006 et augmentant encore à 3,7 [3,2 à 4,2] mm par an⁻¹ entre 2006 et 2018.

Il est pratiquement certain que le niveau moyen mondial de la mer continuera à s'élever au cours du XXI^e siècle (GIEC, 2021). Par rapport à la période 1995–2014, l'élévation probable du NMGM projeté pour 2100 est de 0,28 à 0,55 m selon le scénario d'émissions de gaz à effet de serre (GES) très faibles (SSP1-1.9), de 0,32 à 0,62 m selon le scénario d'émissions de GES faibles (SSP1-2.6), de 0,44 à 0,76 m selon le scénario d'émissions de GES moyennes (SSP2-4.5) et de 0,63 à 1,01 m selon le scénario d'émissions de GES très élevées (SSP5-8.5). Une élévation du NMGM au-delà de la plage probable — approchant 2 m d'ici 2100 et 5 m d'ici 2150 dans le cadre d'un scénario d'émissions de GES très élevées (SSP5-8.5) (confiance faible) — ne peut être exclue en raison de l'incertitude totale qui entoure les processus liés aux glaciers continentaux.

Dans les zones côtières, la variation du niveau de la mer par rapport à la terre ferme est appelée variation « relative » du niveau de la mer; elle peut différer de la variation absolue du niveau de la mer en raison des processus géophysiques et géologiques qui entraînent un déplacement de la terre vers le haut (« soulèvement ») ou vers le bas (« affaissement »). Les tendances à long terme du niveau relatif de la mer observées grâce aux marégraphes du Canada varient considérablement d'un endroit à l'autre. Une partie de la variabilité est due à des facteurs océanographiques altérant l'élévation absolue de la surface de la mer, mais un déterminant majeur de la variation relative du niveau de la mer au Canada est le mouvement vertical de la terre ferme. L'affaissement de la terre ferme augmente le niveau relatif de la mer tandis que le soulèvement de la terre ferme entraîne l'inverse. Dans la majeure partie du Canada, le soulèvement ou l'affaissement de la terre ferme est principalement dû aux effets différés de la dernière glaciation continentale (période glaciaire), appelés ajustement isostatique

glaciaire (AIG). L'AIG provoque encore le soulèvement de la croûte continentale nord-américaine dans les régions proches du centre des anciens glaciers continentaux, comme la baie d'Hudson, et son affaissement dans les régions situées en bordure des anciens glaciers continentaux, comme la partie sud du Canada atlantique. Sur la côte ouest, les plaques tectoniques actives et, dans le delta du Fraser, la consolidation des sédiments contribuent au mouvement vertical des sols. Dans les zones d'activité sismique, il serait possible d'envisager l'intégration du soulèvement tectonique pour réduire l'élévation relative du niveau de la mer dans les scénarios futurs, ainsi que de considérer le potentiel de relaxation postsismique dans certaines zones.

La projection des futurs changements du niveau relatif de la mer intègre les effets des changements de la perte de masse des glaciers et des glaciers continentaux, l'expansion thermique des océans, les changements dans les courants océaniques et les changements induits par les humains dans le stockage des eaux dans les sols. Le mouvement vertical du sol est un élément très important du changement relatif du niveau de la mer pour le littoral du Canada. James et coll. (2021) décrivent des projections relatives du niveau de la mer basées sur les projections du 5^e rapport d'évaluation du GIEC dans un modèle amélioré du mouvement du sol élaboré par les Levés géodésiques du Canada (Robin et coll., 2020; Levés géodésiques du Canada, 2019). Le modèle de LGC a été développé pour remplacer les valeurs du mouvement du sol moins précises utilisées dans le 5^e rapport d'évaluation du GIEC.

4.13 Références

- Arcement, G. J. et Schneider, V. R. (1989). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. Water-Supply Paper. U.S. Geological Survey
- Atwater, B. F., Musumi-Rokkaku, S., Satake, K., Tsuji, Y., Ueda, K., & Yamaguchi, D.K. (2005). *The orphan tsunami of 1700: Japanese clues to a parent earthquake in North America*. University of Washington Press.
- Barber, D. G., Meier, W. N., Gerland, S., Mundy, C. J., Holland, M., Kern, S., Li, Z., Michel, C., Perovich, D. K., Tamura, T., Berge, J., Bowman, J., Christiansen, J. S., Ehn, J. K., Ferguson, S., Granskog, M. A., Kikuchi, T., Kuosa, H., Light, B., ... Zhang, L. (2017). *Arctic Sea Ice; in Snow Water Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA)*, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norvège, 103–136.
- Bernier, N. (2005). *Annual and Seasonal Extreme Sea Levels in the Northwest Atlantic: Hindcasts Over the Last 40 Years and Projections for the Next Century*. [Thèse de doctorat, Dalhousie University]. DalSpace.
- Bornhold, B. D., Harper, J. R., McLaren, D., & Thomson, R. E. (2007). *Destruction of the First Nations village of Kwalate by a rock avalanche-generated tsunami*. *Atmosphere-Ocean*, 45(2), 123–128, <https://doi.org/10.3137/ao.450205>.
- Caston, M. (2021). *Tsunamigenic potential of crustal faults in the southern Strait of Georgia and Boundary Bay*. [Mémoire de maîtrise, University of Victoria].
- Chin, D. A. (2013). *Water Resources Engineering* (3^e édition). Pearson Education Inc.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company Inc.

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. <ftp://www.po.gso.uri.edu/pub/downloads/codiga/pubs/2011Codiga-UTide-Report.pdf>

UNESCO. (2016). *Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer, Volume V : Marégraphes radar* (Rapport technique de la JCOMM n° 89).

Costa P. J. M., Dawson, S., Ramalho, R. S., Engel, M., Dourado, F., Bosnic, I., & Andrade, C. (2021). *A review on onshore tsunami deposits along the Atlantic coasts*. Earth-Science Reviews, 212(103441), <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103441>

Derksen, C., Burgess, D., Duguay, C., Howell, S., Mudryk, L., Smith, S., Thackeray, C. & Kirchmeier-Young, M. (2019). *Évolution de la neige, de la glace et du pergélisol à l'échelle du Canada*. Dans Bush, E. & Lemmen, D.S. (Eds.), *Rapport sur le climat changeant du Canada* (pp. 194-260). Gouvernement du Canada. <https://changingclimate.ca/CCCR2019/>

DHI. (2017). *MIKE 21 Tidal Analysis and Prediction Module Scientific Documentation*.

Didier, D., Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., Lambert, A., Fraser, C., Barnett, R. et Van-Wierst, 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, <https://doi.org/10.3390/jmse3030560>

Duncan, J. M. et Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability* (1st ed.). Wiley.

Eakins, B. W. et Grothe, P. R. (2014). *Challenges in Building Coastal Digital Elevation Models*. Journal of Coastal Research, 297(5), 942–953. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-13-00192.1>

Eakins, B. W., Danielson, J. J., Sutherland, M. G., & Mclean, S. J. (2015). *A framework for a seamless depiction of merged bathymetry and topography along U.S. coasts*. [Conference]. U.S. HYDRO Conference Proceedings.

Egbert, G. D. et Erofeeva, S. Y. (2002). *Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides*. Journal of Atmospheric and Ocean Technology, 19, 183–204.

Environnement Canada. (2006). *Impacts de l'élévation du niveau de la mer et du changement climatique sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick*. <https://publications.gc.ca/site/fra/9.683399/publication.html>

Ferguson, S., Provan, M., Murphy, E., Bérubé, D., Desrosiers, M., Robichaud, A. & Kim, J. (2022). *Assessing numerical model skill at simulating coastal flooding using field observations of deposited debris and photographic evidence*. Water, 14(4), 589. <https://doi.org/10.3390/w14040589>

Fine, I. V., Cherniawsky, J. Y., Thomson, R. E., Rabinovich, A. B., & 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, 699-718. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-1012-7>.

Fine, I. V., Rabinovich, A. B., Bornhold, B. D., Thomson, R. E. & Kulikov, E. A. (2005). *The Grand Banks landslide-generated tsunami of November 18, 1929: preliminary analysis and numerical modeling*. Marine Geology, 215, 45–57.

Forbes, D. L., Whalen, D., Jacobson, B., Fraser, P., Manson, G., Couture, N. et Simpson, R. (2013). *Co-design of coastal risk analysis for subsistence infrastructure in the Inuvialuit Settlement Region, western Arctic Canada*. [Affiche]. Réunion scientifique annuelle d'ArcticNet, Halifax, NS.

Foreman, M. G. G. (1977). *Manual for tidal heights analysis and prediction* (Pacific Marine Science Report 77-10). Institute of Ocean Sciences.

Gao, D., Wang, K., Insua, T. L., Sypus, M., Riedel, M. & Sun, T. (2018). *Defining megathrust tsunami source scenarios for northernmost Cascadia*. Natural Hazards, 94, 445–469.
<https://doi.org/10.1007/s11069-018-3397-6>

GEBCO. (2020a). *GEBCO Overview*. https://www.gebco.net/about_us/overview/

GEBCO. (2020b). *GEBCO_2019 Grid*.
https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2019/gebco_2019_info.html

GEBCO. (2020c). *GEBCO_2020 Grid*.
https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2020/

IPCC. (2021). Summary for Policy makers. Dans Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Sous presse.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/>

Goff, J. & Sugawara, D. (2014). *Seismic driving of sand beach ridge formation in northern Honshu, Japan?* Marine Geology, 358, 138-149. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.04.005>

Goff, J., Bobrowsky, P., Huntley, D., Sawai, Y. et Tanagawa, K. (2020). *Paleotsunamis along Canada's Pacific coast*. Quaternary Science Reviews, 237(106309).
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106309>

Goldfinger, C., Nelson, C. H., Morey, A. E., Johnson, J. E., Patton, J. R., Karabanov, E. B., Gutierrez-Pastor, J., Eriksson, A. T., Gracia, E., Dunhill, G., Enkin, R. J., Dallimore, A. & Vallier, T. (2012). *Turbidite event history - Methods and implications for Holocene paleoseismicity of the Cascadia subduction zone*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1661-F.
<https://doi.org/10.3133/pp1661F>

Gouvernement du Canada. (2014). *Système de prédiction déterministe à haute résolution*.
<https://data.ec.gc.ca/data/weather/products/high-resolution-deterministic-prediction-system/?lang=fr>

Gouvernement du Canada. (2019). *Accès aux données nationales sur les vagues*. <https://meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/waves-vagues/index-fra.htm>

Gouvernement du Canada. (2020). *Simulation rétrospective des vents et des régimes de vagues MSC50*. <https://www.isdm-gdsi.gc.ca/isdm-gdsi/waves-vagues/MSC50-fra.html>

Gouvernement du Canada. (2021a). *Outils et données géodésiques*. <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-et-publications/systemes-reference-geodesiques/donnees/10924>

Gouvernement du Canada. (2021b). *GPS·H*. <https://webapp.csrsc-scrs.rncan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/gpsh.php>

Gouvernement du Canada. (2021c). *Données climatiques historiques*. https://climat.meteo.gc.ca/index_f.html

Gouvernement du Canada. (2021d). *Conditions des glaces les plus récentes*. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/previsions-observations-glaces/conditions-glaces-plus-recentes.html>

Gouvernement du Canada. (2021e). *Réseaux de contrôle passifs*. <https://webapp.csrsc-scrs.rncan-rncan.gc.ca/geod/data-donnees/passive-passif.php?locale=fr>

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. & Perrie, W. (2019). *Changes in oceans surrounding Canada*. In Bush, E. & Lemmen, D.S. (Eds.), *Canada's Changing Climate Report* (pp. 343-423). Government of Canada. <https://changingclimate.ca/CCCR2019/>

Greene, H. G., Barrie, J. V. & Todd, B. J. (2018). *The Skipjack Island fault zone: An active transcurrent structure within the upper plate of the Cascadia subduction complex*. *Sedimentary Geology*, 378, 61–79, <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.05.005>

Hardy T. A., Mason L. B. & McConochie J. D. (2010). *Generating Synthetic Tropical Cyclone Databases for Input to Modeling of Extreme Winds, Waves, and Storm Surges*. Dans Charabi Y. (Éd.) *Indian Ocean Tropical Cyclones and Climate Change*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3109-9_9

Harper, J. R., Henry, R. F. & Stewart, G. G. (1988). *Maximum storm surge elevations in the Tuktoyaktuk region of the Canadian Beaufort Sea*. *Arctic*, 41(1), 48–52.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., ... Thépaut, J-N. (2017). *Complete ERA5 from 1940: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate*. Copernicus Climate Change Service. <https://doi.org/10.24381/cds.143582cf>

Houghtalen, R. J., Akan, A. O. et Hwang, N. H. C. (2010). *Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems* (4^e éd.). Prentice Hall.

Institut océanographique de Bedford. (2020). *Modèle de prévision de marée WebTide*. <https://www.bio.gc.ca/science/research-recherche/ocean/webtide/index-fr.php>

James, T. S., Robin, C., Henton, J. A. & Craymer, M. (2021). *Relative Sea-level Projections for Canada based on the IPCC Fifth Assessment Report and the NAD83v70VG National Crustal Velocity Model*. Ressources naturelles Canada. <https://doi.org/10.4095/327878>

Kim, J., Murphy, E., Nistor, I., Ferguson, S. & Provan, M. (2021). *Numerical Analysis of Storm Surges on Canada's Western Arctic Coastline*. Journal of Marine Science and Engineering, 9(3), 326. <https://doi.org/10.3390/jmse9030326>

Leonard, L. J. & Bednarski, J. M. (2014). *Field survey following the 28 October 2012 Haida Gwaii Tsunami*. Pure and Applied Geophysics, 171, 3467–3482.

Leonard, L. J. et Bednarski, J. M. (2015). *The preservation potential of coastal coseismic and tsunami evidence observed following the 2012 Mw 7.8 Haida Gwaii thrust earthquake*. Bulletin of the Seismological Society of America, 105(2B), 1280–1289. <https://doi.org/10.1785/0120140193>

Leonard, L. J., Rogers, G. C. & Mazzotti, S. (2012). *A preliminary tsunami hazard assessment of the Canadian coastline* (Commission géologique du Canada, dossier public 7201). Ressources naturelles Canada. <https://doi.org/10.4095/292067>

Lintern, D. G., Rutherford, J., Hill, P. R., Campbell, C. et Normandeau, A. (2020). *Towards a national-scale assessment of the subaqueous mass movement hazard in Canada*. Geological Society, Londres, Special Publications, 500, p. 97–113, <https://doi.org/10.1144/SP500-2019-206>

Lintern, D. G., Van Proosdij, D., Manson, G., Mulligan, R., Côté, M. & Thurston, E. (2024). Chapter 12: Field Monitoring. Dans Murphy, E., Cornett, A., van Proosdij, D., & Mulligan, R. P. (Eds.) *Nature-Based Infrastructure for Coastal Flood and Erosion Risk Management – A Canadian Design Guide*. ISBN 978-0-660-71886-6.

Levés géodésiques du Canada. (2019). NAD83(SCRS), version 7. <https://webapp.csrscs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/nad83-docs.php>

Ludwin, R. S., Dennis, R., Carver, D., McMillan, A. D., Losey, R., Clague, J., Jonientz-Trisler, C., Bowechop, J., Wray, J. & James, K. (2005). *Dating the 1700 Cascadia earthquake: great coastal earthquakes in Native stories*. Seismological Research Letters, 76(2), 140–148.

Mercer, D., Sheng, J., Greatbatch, R. J. et Bobanovic, J. (2002). *Barotropic waves generated by storms moving rapidly over shallow water*. Journal of Geophysical Research, 107(C10), 3152, <https://doi.org/10.1029/2001JC001140>

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.

Mosher, D. C. (2009). *Submarine landslides and consequent tsunamis in Canada*. Geoscience Canada, 36(4), 179–190.

Ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique. (2009). *Manual of British Columbia Hydrometric Standards (Version 1.0)*.

Murphy, E., Cornett, D. Van Proosdij, D., & Mulligan, R.P. (2024). *Nature-based infrastructure for coastal flood and erosion risk management: a Canadian design guide*. Conseil national de

recherches Canada. Centre de recherche en génie océanique, côtier et fluvial, 348 p.

<https://doi.org/10.4224/40003325>

Murphy, E., Lyle, T., Wiebe, J., Hund, S. V., Davies, M. et Williamson, D. (2020). *Coastal Flood Risk Assessment Guidelines for Building and Infrastructure Design Applications* (CRBCPI-Y5-R2). Conseil national de recherches Canada.

Province du Nouveau Brunswick. (2019). *geonb_wetlands-terreshumides—ESRI Shape File*.

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

Province du Nouveau Brunswick. (2019a). *geonb_forest-foret—ESRI Shape File*.

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

Province du Nouveau Brunswick. (2019 b). *geonb_nonforest-nonforet—ESRI Shape File*.

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

National Snow and Ice Data Center. (2019). *Recherche dans les données scientifiques du NSIDC. Scientific Data Search—Sea Ice*.

<https://nsidc.org/data/search/#keywords=sea+ice/sortKeys=score.,desc/facetFilters=%257B%257D/pageNumber=1/itemsPerPage=25>

National Geophysical Data Center / World Data Service: NCEI/WDS. (s.d.). *Global Tsunami Deposit Database*. NOAA National Centers for Environmental Information.

<https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/deposit-search/>

National Geophysical Data Center/World Data Service: NCEI/WDS (2021). *Global Historical Tsunami Database, 2100 BC to Present*. NOAA National Centers for Environmental Information.

<https://data.noaa.gov/metaview/page?xml=NOAA/NESDIS/NGDC/MGG/Hazards/iso/xml/G02151.xml&view=getDataView> [10 août 2021]

Pawlowicz, R., Beardsley, B. & Lentz, S. (2002). *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE*. Computers & Geosciences, 28(8), 929–937.

Pêches et Océans Canada. (2021). *Pêches et Océans Canada dans la région du Pacifique*.

<https://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/index-fra.html>

Pêches et Océans Canada. (s.d.). *Marées, courants et niveaux d'eau*. Récupéré le

22 octobre 2024 de <https://www.marees.gc.ca/fr>

Power, W., Clark, K., King, D. N., Borrero, J., Howarth, J., Lane, E. M., Goring, D., Goff, J., Chagué-Goff, C., Willimas, J., Reid, C., Whittaker, C., Mueller, C., Williams, S., Hughes, M.W., Hoyle, J., Bind, J., Strong, D., Litchfield, N. & Denson, A. (2017). *Tsunami runup and tide-gauge observations from the 14 November 2016 M7.8 Kaikōura earthquake, New Zealand*. Pure and Applied Geophysics, 174, 2457-2473. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1566-2>

Richards, W., & Daigle, R. (2011). *Scenarios and Guidance for Adaptation to Climate Change and Sea-Level Rise—NS and PEI Municipalities*. Nova Scotia Department of Environment & Atlantic Canada Adaptation Solutions Association.

Ressources naturelles Canada. (2019a). *Modèle numérique d'élévation de haute résolution (MNEHR) — Série CanÉlévation Édition 1.3*.

Ressources naturelles Canada. (2019b). *Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables* (Produit d'information générale 114e)

Ressources naturelles Canada. (2020). *Guide d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par lidar aéroporté* (Version 3.0, Produit d'information générale 117e). Gouvernement du Canada

Robin, C., Nudds, S., MacAulay, P., Godin, A., De Lange Boom, B. & Bartlett, J. (2016). *Hydrographic vertical separation surfaces (HyVSEPs) for the tidal waters of Canada*. Marine Geodesy, 39, 195 à 222. <https://doi.org/10.1080/01490419.2016.1160011>

Robin, C. M. I., Craymer, M., Ferland, R., James, T. S., Lapelle, E., Piraszewski, M., & Zhao, Y. (2020). *NAD83v70VG: A new national crustal velocity model for Canada* (Geomatics Canada, Open File, 62, 70). Ressources naturelles Canada. <https://doi.org/10.4095/327592>

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.

Shanmugam, G. (2021). *Chapter 7: Triggering mechanisms of downslope processes*. Dans Shanmugam, G. Mass Transport, Gravity Flows, and Bottom Currents (pp. 273-307). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822576-9.00007-2>

SHC. (2018). *Données bathymétriques non navigationnelles (NONNA) du Service hydrographique du Canada*. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/d3881c4c-650d-4070-bf9b-1e00aabf0a1d>

Skvortsov, A. et Bornhold, B. (2007). *Numerical simulation of the landslide-generated tsunami in Kitimat Arm, British Columbia, Canada, 27 April 1975*. Journal of Geophysical Research, v. 112, F02028, doi:10.1029/2006JF000499.

Statistique Canada. (2020). *La Base de données ouvertes sur les immeubles*. <https://www.statcan.gc.ca/fr/ecdo/bases-donnees/bdoi>

Sypus, M. (2019). *Models of Tsunamigenic Earthquake Rupture Along the West Coast of North America*. [Master's thesis, University of Victoria]. <http://hdl.handle.net/1828/11436>

Szczucinski, W. (2011). *The post-depositional changes of the onshore 2004 tsunami deposits on the Andaman Sea coast of Thailand*. Natural Hazards, 60, 115–133, <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9956-8>

Thomson, R. E., Rabinovich, A. B., Fine, I. V., Sinnott, D. C., McCarthy, A., Sutherland, N. A. S. & Neil, L. K. (2009). *Meteorological tsunamis on the coasts of British Columbia and Washington*. Physics and Chemistry of the Earth, 34(17–18), 971–988. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.10.003>

White, W.R.H. (1966). *The Alaska earthquake - its effect in Canada*. Canadian Geographical Journal, 72(6), 210–219.

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.

Zhang, H. et Sheng, J. (2013). *Estimation of extreme sea levels over the eastern continental shelf of North America*. Journal of Geophysical Research, 118, 1–21.
<https://doi.org/10.1002/2013JC009160>

Zhou, Q. (2017). *Digital elevation model and digital surface model*. In Richardson, D., Castree, N., Goodchild, M. F., Kobayashi, A., Liu, W. & Marston, R. A. (Eds.). The International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology. Wiley.

5.0 Modélisation et analyse des aléas d'inondation côtière

Auteurs principaux

Enda Murphy (Conseil national de recherches Canada), Sean Ferguson (Conseil national de recherches Canada), Joseph Kim (Université d'Ottawa), Richard Thomson (Pêches et Océans Canada), Reza Amouzgar (Ocean Networks Canada), Thomas James (Ressources naturelles Canada), Isaac Fine (Pêches et Océans Canada) et Blair Greenan (Pêches et Océans Canada)

Contributeurs

Nicky Hastings (Ressources naturelles Canada) et Julie Van de Valk (Ressources naturelles Canada)

Citation recommandée

Murphy, E., Ferguson, S., Kim, J., Thomson, R., Amouzgar, R., James, T., Fine, I. et Greenan, B. (2025). Coastal Flood Hazard Modelling and Analysis. Dans Ferguson, S., Hastings, N. L., Van de Valk, J., Murphy, E. & Kim J. (Eds.) *Évaluation des aléas d'inondation côtière pour l'analyse fondée sur les risques concernant les côtes marines du Canada*. Gouvernement du Canada.

5.1 Introduction

Comprendre clairement la répartition de la fréquence (ou la probabilité) des événements entraînant des inondations côtières, et la sévérité (ou l'intensité) qui y est associée, est une condition préalable pour effectuer une évaluation des aléas. Les mesures et les relevés historiques saisissent rarement l'éventail complet de aléas potentiels pouvant générer des inondations; puisque l'intensité des aléas varie généralement dans l'espace et le temps, il faut généralement mener une modélisation ou une analyse pour évaluer les aléas d'inondation côtière dans la zone sur laquelle porte l'évaluation des risques. La sophistication de la modélisation souhaitée ou exigée dépend de divers facteurs (p. ex., l'évaluation initiale du risque global et de la tolérance au risque, les objectifs et les renseignements de sortie requis pour l'évaluation des risques, la disponibilité des données préalables, la complexité régionale et locale des processus générateurs d'inondations, le temps et les ressources disponibles pour effectuer la modélisation); la modélisation peut porter sur des calculs de base ou la cartographie des niveaux d'eau sur des modèles numériques d'élévation jusqu'à porter sur la modélisation numérique à forte intensité de calcul, voire à la modélisation physique (en laboratoire). Les réglementations provinciales existantes et les lignes d'orientations concernant les risques d'inondation pour les bâtiments et les infrastructures sont résumés dans Murphy et coll. (2020) et peuvent orienter l'approche analytique de modélisation des aléas. Quelle que soit l'approche choisie pour la modélisation des aléas, le processus global doit généralement comporter les étapes de base suivantes, qui sont largement conformes au cadre d'évaluation des aléas présenté par Murphy et coll. (2020) :

- Collecte et examen des données ([chapitre 4](#));
- Recensement et conceptualisation des aléas ([section 5.2](#));
- Définition des mesures et des indicateurs d'aléas ([section 5.3](#));
- Modélisation et analyse des aléas ([sections 5.4 à 5.6](#));
- Cartographie des aléas ([section 6.4.3](#)).

5.2 Recensement et conceptualisation des aléas

La première étape de l'analyse des aléas d'inondation côtière consiste à développer une compréhension conceptuelle des *sources* potentielles des aléas et des *voies* par lesquelles les personnes, les infrastructures ou les biens de valeur peuvent être exposés aux aléas (Murphy et coll., 2020). Cette approche suit le modèle source-voie de propagation-récepteur-conséquence établi pour l'analyse des inondations (Reeve et coll., 2012; Narayan et coll., 2012; Jane et coll., 2018; Piercy et coll. 2021) ([Figure 5.1](#)).

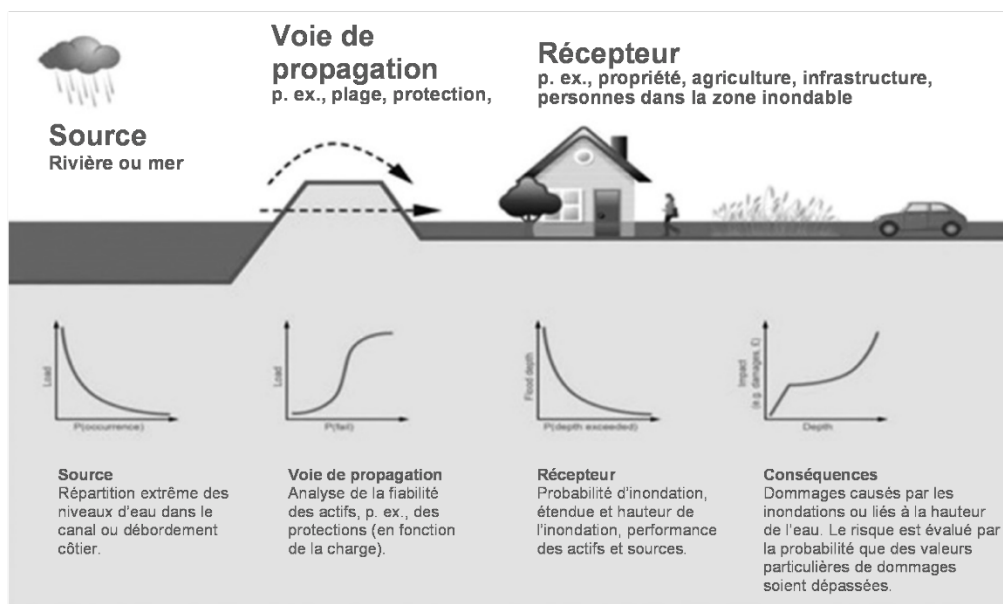


Figure 5.1 : Modèle source-voie de propagation-récepteur-conséquence pour les risques d'inondation (Jane et coll., 2018).

Les analyses régionales se concentrent généralement sur la compréhension et la caractérisation des sources d'inondations, car il est difficile de déterminer les voies de propagation et les interactions entre les aléas et les récepteurs pour de grandes échelles spatiales. Cependant, ces analyses régionales sont généralement une condition préalable à l'étude des voies de propagation et des interactions aléa-récepteur à l'échelle locale (p. ex., communauté ou bâtiments ou infrastructures).

5.2.1. Sources d'aléas

Les sources d'inondations côtières comprennent les niveaux d'eau élevés, les vagues, les tsunamis et les débris en suspension dans l'eau (dont la glace), qui peuvent agir seuls ou en combinaison (c.-à-d. des événements composés) pour générer ou exacerber des inondations. Les débits fluviaux élevés et les précipitations intenses sont également des sources potentielles contribuant aux inondations dans les régions côtières, mais ne sont pas abordés dans les présentes lignes directrices. Chaque source peut compter plusieurs composants; par exemple, les niveaux d'eau côtiers peuvent être élevés en raison des marées, des ondes de tempête (vent et configuration barométrique), de l'élévation du niveau de la mer, de la surélévation et du déferlement d'ondes et d'autres facteurs. Une évaluation préliminaire doit considérer les contributions potentielles ou le rôle de chaque source dans les inondations côtières afin de pouvoir établir les priorités et l'importance d'une analyse plus détaillée. Par exemple, dans les zones côtières situées dans des baies ou des goulées abritées, ou dans des mers aux fetchs relativement courts, les vagues peuvent jouer un rôle moindre dans les inondations et peuvent donc recevoir moins d'attention lors de l'analyse. Dans les régions sujettes à une couverture de glace de mer en hiver, puisque les ondes de tempête (p. ex., Kim et coll., 2021), les marées et les vagues peuvent être atténuées par cette couverture, on peut orienter les analyses vers des sources saisonnières en mer libre. Comme il est expliqué dans Murphy et coll. (2020), la climatologie des tempêtes régionales, telle que fournie par Atkinson et coll. (2016) pour les

eaux côtières marines du Canada, peut offrir un aperçu des facteurs d'inondation côtière liés aux tempêtes et orienter l'analyse.

5.2.2. Voies de propagation des aléas

Les voies de propagation décrivent comment l'eau se déplace vers les récepteurs, tels que les personnes, les infrastructures et les biens de valeur. Comme l'expliquent Piercy et coll. (2021), pour comprendre les voies de propagation des aléas, il faut effectuer l'analyse et la modélisation des mécanismes entraînant l'inondation, comme l'inondation directe, le débordement et la rupture des protections ou des barrières côtières, ou l'érosion. Ces voies de propagation peuvent orienter les exigences en matière de modélisation des aléas. Par exemple, la cartographie statique des valeurs de crête des niveaux d'eau en zone côtière sur les modèles numériques d'élévation (c.-à-d. la modélisation de bassin) peut être adéquate dans les zones où l'inondation directe est le principal mécanisme d'inondation. Cependant, ces approches peuvent surévaluer l'inondation dans des circonstances où la propagation est influencée par les éléments côtiers et les éléments de rugosité; elles peuvent également fournir de fausses données sur l'efficacité de différentes stratégies de gestion des risques d'inondation lorsque les options sont évaluées (Piercy et coll., 2021). Les approches de modélisation dynamique offrent généralement une précision accrue (Didier et coll., 2019) et un meilleur aperçu des voies de propagation des inondations, mais elles nécessitent des niveaux d'efforts, de ressources et d'expertise spécialisée plus élevés. Lorsque les inondations sont liées à la performance des mesures de prévention, la probabilité de défaillance des protections (p. ex., les brèches) doit être caractérisée et combinée à la probabilité des sources d'aléas pour déterminer la probabilité globale d'inondations.

5.2.3. Établir des événements et des scénarios d'aléas pour l'analyse

Une fois que l'on a acquis une compréhension préliminaire des voies de propagation et des sources d'aléas, une série d'événements et de scénarios est généralement élaborée pour une enquête et une analyse plus poussée. Les événements peuvent simplement représenter une seule tempête historique (simulation rétrospective) ou un événement pluvio-hydrologique modélisé, bien que pour les analyses basées sur le risque, on élabore généralement une série d'événements modélisés avec des probabilités définies. Ces événements peuvent être analysés conjointement avec une variété de scénarios de voie de propagation des aléas (avec ou sans probabilités définies), de scénarios multiévénements, de scénarios de planification ou de scénarios d'intervention pour la gestion des inondations afin d'étayer l'évaluation des risques et prendre des décisions. Le choix des événements et des scénarios d'aléas pour la modélisation et l'analyse dépend des buts ou objectifs et des exigences en matière d'évaluation des risques ([section 2.2](#)), des échéances liées à la prise de décision et à l'adaptation, des niveaux d'incertitude, d'une compréhension préliminaire des aléas et des résultats de la définition et de la conceptualisation préliminaires des sources d'aléas et des voies décrites dans les [sections 5.2.1](#) et [5.2.2](#). Par exemple :

- Une évaluation des risques conçue pour évaluer les options de gestion à long terme des risques d'inondation dans une communauté urbaine densément peuplée peut demander l'étude d'un plus grand nombre d'événements et de scénarios qu'une évaluation destinée à guider la planification ou la conception d'une infrastructure non critique ou temporaire.

- Une évaluation des risques pour une communauté côtière de la mer des Salish exige d'étudier attentivement la probabilité conjointe des contributions des marées et des ondes de tempête aux inondations; par contre, la contribution des marées peut ne pas toucher les communautés dans des régions où il n'y a que des micromarées (p. ex., certaines parties de la côte de la mer de Beaufort).
- Les évaluations de risques à l'appui de la planification ou de la conception pour des périodes de 50 ans ou moins peuvent nécessiter moins de scénarios d'aléas que les études portant sur des horizons temporeux plus lointains puisque beaucoup d'incertitude entoure les effets qu'auront les changements climatiques (comme l'élévation du niveau de la mer) sur des périodes plus longues.

Les sections suivantes détaillent des facteurs à considérer pour établir les événements et les scénarios liés à deux sources primaires :

1. Inondations côtières dues aux marées, aux ondes de tempête et aux vagues
2. Tsunami

Bien que ces sources soient souvent interdépendantes (p. ex., le niveau de la marée lors d'un tsunami peut influencer la gravité des aléas entraînés par le tsunami), elles sont généralement analysées séparément en raison de l'expertise différente requise pour analyser les sources d'aléas, des différences dans la probabilité des événements considérés et de la nature plus spécialisée de l'analyse des aléas liés aux tsunamis.

Probabilités d'inondations côtières

Lors de l'élaboration des événements et des scénarios d'aléas liés aux inondations côtières, l'évaluation préliminaire du rôle de chaque variable source (c.-à-d. les marées, les ondes de tempête, les vagues) dans sa contribution à l'inondation côtière permettra d'identifier les priorités et l'importance d'une analyse détaillée. Une partie importante de cette analyse consiste à déterminer ou à attribuer des probabilités d'événements (ou de répercussions).

Plusieurs méthodes et techniques peuvent servir à évaluer la probabilité associée aux événements risquant de générer des inondations côtières. Les méthodes statistiques varient en complexité, allant d'approches simples et unidimensionnelles qui considèrent la probabilité d'un seul phénomène (p. ex., une onde de tempête ou un niveau d'eau) à des approches multidimensionnelles plus complexes qui intègrent la probabilité conjointe de deux phénomènes ou plus (p. ex., des vagues et des niveaux d'eau élevés). Établir des événements et des scénarios d'aléas représentatifs peut s'avérer difficile puisqu'il existe de nombreuses combinaisons de marées, d'ondes de tempête, d'effets de vagues et de facteurs saisonniers, interannuels et intradécadaires qui peuvent se combiner et entraîner de graves ruissellements de surface et des aléas (Murphy et coll., 2020). L'[encadré 5-1](#) ci-dessous, qui paraphrase Murphy et coll. (2020), résume quatre approches fondamentalement différentes utilisées pour évaluer ou attribuer une probabilité aux événements entraînant des aléas d'inondation côtière ou des interventions aux aléas.

Encadré 5-1

Murphy et coll. (2020) résument quatre approches fondamentalement différentes qui sont utilisées pour caractériser les sources de risques (ou les répercussions) et les PDA connexes :

1. Analyse paramétrique unidimensionnelle
2. Probabilité conjointe et méthodes statistiques multidimensionnelles
3. Simulations rétrospectives
4. Méthodes stochastiques-déterministes

L'analyse paramétrique unidimensionnelle utilise des ajustements paramétriques adaptés aux données historiques de niveaux d'eau ou de vagues afin de développer des répartitions de probabilités pour les événements extrêmes (p. ex., Kim et coll., 2021). Cette approche se base généralement sur des ensembles de données mesurées (p. ex., des relevés de marégraphes ou de bouées d'enregistrement des vagues), éventuellement combinés à des simulations numériques forcées par des champs atmosphériques historiques (simulation rétrospective ou réanalyse). Cette approche utilise les valeurs de crête des niveaux d'eau ou d'états de mer provenant de simulations ou de relevés annuels, combinés à des techniques d'ajustement paramétrique pour estimer la probabilité de dépassement annuelle (PDA). Deux approches sont généralement utilisées pour sélectionner les événements extrêmes : l'approche du maximum par bloc (p. ex., le niveau d'eau maximal annuel ou la hauteur de vagues significatives) ou l'approche des valeurs de crête au-dessus du seuil (Bernardara et coll., 2014). Les deux méthodes utilisent les paramètres les mieux adaptés pour interpoler et extrapoler des répartitions de probabilités paramétrées afin d'estimer les valeurs aux PDA souhaitées. Ces méthodes reposent principalement sur l'hypothèse selon laquelle les valeurs de crête des niveaux d'eau ou de mer des ensembles de données d'échantillons comptent des événements indépendants qui sont distribués de manière identique, ce qui permet d'extrapoler les PDA et les valeurs de retour au-delà des plages pour lesquelles des données ont été obtenues. Murphy et Khaliq (2017) font l'examen de différentes méthodes d'analyse unidimensionnelle pour évaluer les niveaux d'eau extrêmes dans les zones côtières et les grands lacs. Les renseignements de sortie d'une analyse paramétrique unidimensionnelle comptent généralement la répartition de probabilité des valeurs extrêmes (PDA) associée à une variable source particulière génératrice d'inondations (p. ex., des niveaux d'eau élevés, des ondes de tempête ou l'état de la mer). En utilisant ces répartitions afin de définir des événements pour l'analyse basée sur les risques, il faut prendre en compte les effets cumulés potentiels de sources génératrices de dangers (p. ex., les marées et les ondes de tempête ou les niveaux d'eau et les vagues élevés) sur les PDA. Dans ce cas, il est possible d'utiliser des approches simplifiées pour combiner la contribution des sources—par exemple, en multipliant les probabilités d'événements sources largement indépendants, comme les marées et les ondes de tempête—ou des approches probabilistes conjointes plus complexes. À titre d'exemple de la première méthode, Daigle (2017) a élaboré des estimations des niveaux d'eau extrêmes pour les communautés côtières du Nouveau-Brunswick en combinant les niveaux de pleine mer supérieure, grande marée (PMSGM) aux statistiques sur les ondes de tempête basées sur une prévision rétrospective

de 40 ans pour le nord-ouest de l'Atlantique (Bernier et Thompson, 2006). En combinant ainsi directement les PDA de niveaux d'eau extrêmes aux PDA d'ondes de tempête, on suppose a priori que les ondes de tempête coïncident avec le niveau de PMSGM (un niveau que la marée n'atteint pas chaque année).

Les lignes directrices Flood Hazard Area Land Use Management Guidelines de la Colombie-Britannique (Ministère des Forêts, des Terres, de l'Exploitation des ressources naturelles et du Développement rural, 2018) autorisent l'utilisation de méthodes probabilistes simplifiées et conjointes pour déterminer les niveaux de construction et les distances de retrait des bâtiments par rapport aux zones côtières pour pallier les inondations, en reconnaissant que la « méthode combinée » plus simpliste (qui implique une analyse unidimensionnelle des ondes de tempête) produit des niveaux d'inondation conservateurs par rapport à l'approche « probabiliste ».

Méthodes de probabilité conjointe et méthodes statistiques multidimensionnelles. Les méthodes de probabilité conjointe combinent les paramètres de deux variables sources ou plus pour créer une répartition multivariée qui représente un ensemble d'événements extrêmes générant des risques d'inondation (p. ex. ondes de tempête et marées) ou des mesures d'intervention en cas d'inondation (p. ex. profondeur de l'inondation et vitesse du courant). Pugh et Vassie (1980) et Pugh (1987) décrivent des méthodes permettant de combiner des répartitions de probabilités unidimensionnelles (marginales) pour la marée et pour l'onde de tempête afin de créer une répartition de probabilité conjointe bidimensionnelle des niveaux d'eau totaux (Pugh et Vassie, 1980). On fait également référence à l'approche JOIN-SEA développée au Royaume-Uni pour évaluer la probabilité conjointe des vagues et des niveaux d'eau (H. R. Wallingford, 1998), puis à un guide des meilleures pratiques pour l'utilisation des méthodes de probabilité conjointe dans la gestion des inondations (Hawkes, 2008). Liu et coll. (2010) ont mené une analyse de probabilité conjointe directe des niveaux d'eau et des vagues dans le cas de débordement de digues à Richmond, en Colombie-Britannique. Pour des problèmes bidimensionnels, on utilise souvent la modélisation copule pour générer des descriptions statistiques bidimensionnelles des conditions d'incident (Masina et coll., 2015; Couasnon et coll., 2018; Mazas et Hamm, 2016, 2017). Le nombre de variables prises en compte dans une analyse de probabilité conjointe doit être conforme aux processus pertinents du système naturel. L'intensité et la trajectoire des tempêtes, la hauteur des marées, le niveau relatif de la mer, la couverture de glace, la hauteur des vagues et le spectre de celles-ci peuvent tous jouer un rôle important pour déterminer l'étendue et l'intensité des inondations côtières. Alors que l'analyse de probabilité conjointe est fréquemment utilisée pour étudier les effets combinés de deux ou trois paramètres (p. ex., une onde de tempête et les marées, ou les vagues et le niveau de l'eau), une évaluation complète de tous les paramètres contribuant aux risques d'inondation côtière est généralement peu pratique ou trop incertaine pour être utile.

Les **méthodes de simulation rétrospective** peuvent servir à générer des enregistrements à long terme (multidécennaux) des conditions menant à une inondation côtière à un moment en particulier. Cette approche peut étayer l'analyse multidimensionnelle—par exemple, les marées, les ondes de tempête et les vagues peuvent être simulées en même temps pour

capter des événements composés générateurs d'inondations. Cette technique peut être utilisée soit dans une approche basée sur un événement (p. ex., en déterminant les PDA des sources de risque dans les zones côtières), soit dans une approche basée sur des répercussions, par lesquelles on détermine les PDA des indicateurs de risques dans les zones inondées. Il est parfois possible d'éviter les dépenses de calcul des simulations à long terme en simulant des combinaisons discrètes de sources de risques, basées sur une matrice d'événements identifiées dans des observations historiques d'endroits proches (p. ex., des bouées d'enregistrement des vagues au large ou des marégraphes proches), dont les résultats peuvent être combinés pour créer une série chronologique continue de sources de risque transformées dans la zone côtière (p. ex., Cornett et Zhang, 2008) ou d'indicateurs (p. ex., la hauteur de l'inondation ou du déferlement d'ondes) pour la zone d'intérêt.

Les **méthodes stochastiques-déterministes** comportent la formulation de champs de vent et de pression de tempête probables modélisés, qui sont ensuite utilisés pour forcer les modèles numériques (déterministes) d'ondes de tempête et de vagues. Généralement, un grand nombre de champs atmosphériques de tempêtes sont modélisés à l'aide de modèles paramétriques ou fondés sur des processus physiques, de manière à constituer des clones statistiquement représentatifs des modèles de tempêtes observés pour une région (Resio et coll., 2009; Bastidas et coll., 2016). Cette approche est axée sur la caractérisation des tempêtes par leur taille, leur intensité, leur vitesse et leur trajectoire, plutôt que sur les réactions d'ondes de tempête ou de vagues qui en résultent dans la zone côtière, qui peuvent être très variables et modulées par diverses conditions locales et propres à l'événement. Les méthodes stochastiques-déterministes sont particulièrement utiles dans les cas où il y a relativement peu de tempêtes dans l'ensemble d'échantillons de données historiques utilisé pour caractériser les probabilités d'événement ou de répercussions (comme c'est souvent le cas avec les ouragans) et où le fait de se fier aux enregistrements historiques peut générer d'importantes erreurs d'estimation des valeurs extrêmes (Irish et coll., 2011). Resio et coll. (2017) décrivent les approches adoptées pour la simulation rétrospective paramétrique, l'analyse de probabilité conjointe et les méthodes de suivi stochastiques-déterministes utilisées pour des études d'inondations côtières aux États-Unis. La simulation de plusieurs événements pluviohydrologiques, comme l'exige cette méthode, demande beaucoup de calculs et n'est pas couramment utilisée pour l'évaluation des risques d'inondation côtière au Canada. Toutefois, cette pratique est bien établie dans les régions tropicales, où les ouragans et les cyclones sont plus fréquents et plus violents, et pourrait s'avérer utile dans le contexte des changements climatiques au Canada.

Le choix de la méthode d'attribution des probabilités d'événement de risque ou de répercussions dépend des exigences à respecter pour l'évaluation des risques; le choix de la méthode se répercute sur les résultats de l'évaluation des dangers et des risques et doit être considéré dans l'optique de la complexité et des exigences en matière de ressources que requièrent les différentes approches. Par exemple, si l'évaluation des risques est axée sur la compréhension des risques associés aux inondations provoquées par des ondes de tempête

sur un site donné, une analyse unidimensionnelle (ondes de tempête) ou bidimensionnelle (ondes de tempête et marées) peut convenir—il est reconnu que cela ne tiendra pas compte des risques associés à d'autres sources de danger potentielles (p. ex., effets des vagues, débris). De même, les approches basées sur les répercussions, par lesquelles on attribue les PDA en fonction d'indicateurs de répercussion des inondations locales (telles que la hauteur de l'inondation), permettent, en théorie, des évaluations plus précises des risques d'inondation que les approches basées sur les événements (où les PDA sont associées aux sources de danger). Cependant, les approches basées sur les répercussions sont très rares en raison de la nature complexe et exigeante en ressources de l'analyse des risques. Pour le soutien à la prise de décisions, qui implique souvent des analyses comparatives de mesures ou de stratégies de gestion des inondations, les approches basées sur les événements sont généralement adéquates.

Scénarios de risques de tsunami

S'il n'existe pas de preuves anecdotiques, historiques ou géologiques de tsunamis antérieurs provoqués par des glissements de terrain dans une zone présentant des pentes généralement faibles et située à moins de 5 km du littoral dans une région antisismique, l'évaluation n'est généralement pas nécessaire. En revanche, les zones présentant des pentes modestes, une sismicité moyenne et des preuves d'un ou plusieurs événements historiques justifieraient une évaluation continue. Il y a beaucoup à apprendre avant que des ruptures se produisent dans les zones sujettes aux glissements de terrain sous-marins, et il est possible d'utiliser efficacement la modélisation hydrodynamique pour évaluer le potentiel tsunamigénique de ces glissements de terrain. Cette recommandation s'applique également aux ruptures subaériennes. L'évaluation des risques de tsunami générés par des glissements de terrain est cruciale pour tout projet d'infrastructure dans un environnement côtier présentant un relief modéré à important. Bien qu'il soit peu probable que l'on puisse prévoir avec certitude la fréquence et l'ampleur de ces événements, les analyses peuvent imposer des contraintes précieuses pour le choix de l'emplacement et la conception des installations côtières.

Pour établir des scénarios de tsunamis, il faut commencer par un examen détaillé des hauteurs historiques des vagues de tsunamis le long de la côte étudiée. Les articles de journaux rédigés par des témoins oculaires et les études sur les paléotsunamis basées sur les dépôts côtiers peuvent fournir des renseignements sur les premiers événements historiques. Les relevés des marégraphes, desquels ont été soustraites les marées astronomiques prévues, constituent la principale source de données sur les vagues de tsunamis lors de la période d'utilisation d'instruments, bien que les relevés à haute résolution de la pression de fond provenant de réseaux câblés d'observation et du DART (Detection and Recording of Tsunamis) s'avèrent de plus en plus utiles pour les événements plus récents. Dans le cas des vagues générées par des séismes sur la côte ouest de l'Amérique du Nord, les scénarios de tsunami sont généralement axés sur les séismes majeurs survenus dans les zones de subduction largement réparties le long de la « ceinture de feu du Pacifique ». Pour les tsunamis générés par des glissements de terrain subaériens et subaquatiques, l'évaluation doit inclure les preuves géologiques des ruptures antérieures et les histoires écrites et orales des événements. La modélisation hydrodynamique, combinée aux données géologiques et géotechniques, peut être utilisée pour évaluer le potentiel tsunamigène des glissements de terrain.

Encadré 5-2

Scénarios de tsunamis pour l'ouest du Canada

Une étude menée dans l'ouest du Canada sur les tsunamis d'origine sismique intègre les hauteurs de vagues des cinq grands séismes et tsunamis du 20^e siècle dans l'océan Pacifique : le tsunami de 1946 aux îles Aléoutiennes (M_w 8,6), le tsunami de 1952 au Kamchatka (M_w 9,0), le tsunami de 1957 aux îles Andreanof (Aléoutiennes) (M_w 8,6), le tsunami de 1960 au Chili (Valdivia) (M_w 9,5) et le tsunami de 1964 en Alaska (Prince William Sound), en plus des hauteurs de vagues estimées du tsunami de janvier 1700 dans la zone de subduction de Cascadia (M_w 9,0) et des récents tsunamis dans l'océan Indien en 2004 (M_w 9,2) et à Tohoku en 2011 (M_w 9,0). En s'appuyant sur ces événements, il a été déterminé qu'un futur tsunami semblable à celui de 1964 en Alaska et de 1700 dans la faille de Cascadia serait le plus dangereux pour la côte de la Colombie-Britannique, tant par rapport à la hauteur qu'à la période des vagues, qui détermine la capacité des vagues à pénétrer dans le sud du détroit de Géorgie en passant par le golfe et les îles San Juan.

En plus des tsunamis générés par des mégaséismes dans les zones de subduction, la rupture des failles crustales sous la mer des Salish peut déclencher des vagues localement dommageables par le biais du déplacement cosismique du plancher océanique. De tels événements ne se sont pas produits dans le court relevé historique de la région, mais des données géophysiques et paléosismiques soutiennent cette probabilité. Les failles crustales connaissent des tremblements de terre de plus faible magnitude que ceux qui se produisent le long des plaques, et l'on peut s'attendre à ce qu'elles génèrent des vagues de tsunami plus petites. Toutefois, pour les régions côtières à proximité, l'atténuation des vagues peut être faible, et le délai d'alerte entre le début des secousses du sol et l'arrivée des vagues dévastatrices peut être court.

Plusieurs failles crustales actives ont été récemment repérées dans le sud du détroit de Géorgie et ont le potentiel de générer des tsunamis touchant la région de Boundary Bay (Caston, 2021). Il s'agit notamment des failles de Birch Bay et de la pointe Sandy d'orientation nord-ouest, cartographiées sur le côté sud de Boundary Bay par Kelsey et coll. (2012), et la zone de faille de Skipjack Island d'orientation ouest, cartographiée par Greene et coll. (2018).

Il faut travailler avec des spécialistes en géophysique et en géotechnique pour déterminer les régions sources des tsunamis d'origine sismique. Pour l'ouest du Canada, Gao et coll. (2018) détaillent des modèles de rupture causée par un mégaséisme pour simuler l'inondation côtière engendrée par un tsunami de magnitude 9,0 émanant de la ZSC au large de la côte ouest de l'Amérique du Nord. Les auteurs ont étudié quinze scénarios de mégaséismes, en mettant l'accent sur deux scénarios principaux : une rupture enterrée (modèle A) et une rupture de divergence de faille (modèle B). Bien que la rupture de divergence de faille représente le mieux un tremblement de terre de la ZSC vu la compréhension actuelle des processus de faille, les deux modèles de séisme ont été utilisés pour simuler des tsunamis dans le sud du détroit de Géorgie et de Boundary Bay. Le National Tsunami Hazard Mapping Program de 2010 (Nicolosky et coll., 2013) recommande que les cartes d'inondation de tels événements soient calculées en utilisant la marée haute comme condition initiale de modélisation. Les cartes d'inondation par

tsunami produites par la University of Alaska définissent la pleine mer supérieure moyenne (PMSM) comme condition initiale (Suleimani et coll., 2013) tandis que celles de l'État de Washington utilisent la pleine mer moyenne (Eungard et coll., 2018). La norme canadienne de la pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) est proche de la norme américaine de la PMSM et a été utilisée dans de nombreux projets de modélisation de tsunamis en Colombie-Britannique (AECOM, 2013; Fine et coll., 2018a, 2018 b; Northwest Hydraulic Consultants Ltd., 2019). Pour présenter les valeurs de risque les plus élevées, les cartes de la hauteur des vagues de tsunami et de la vitesse du courant maximales doivent être citées par rapport à la PMSMM plutôt que par rapport à la marée moyenne ou à une référence géodésique.

La reconstitution des tsunamis antérieurs générés par des glissements de terrain et l'évaluation des risques futurs doivent tenir compte de plusieurs facteurs mal connus, dont la plupart sont géologiques ou géotechniques (Bornhold et Thomson, 2012). En revanche, les facteurs hydrodynamiques des tsunamis générés par des glissements de terrain sont maintenant bien compris grâce aux travaux pionniers de Mader (1988), de Heinrich (1992), de Jiang et LeBlond (1992) et d'autres, bien que les contributions d'autres processus, tels que les ondes de bord, ne soient abordées de manière adéquate que maintenant (Bricker et coll., 2007). Une des principales limites des études sur les glissements de terrain sous-marin ou subaériens antérieurs est l'incertitude concernant le volume et la nature interne de la masse du glissement. Même si on connaît la morphologie des talus avant et après la rupture grâce à des données bathymétriques ou topographiques détaillées, ce qui est rarement le cas, on ne connaît généralement pas le volume de la masse qui a généré le tsunami. En général, il faut envisager le scénario le plus défavorable, dans lequel toute la masse cède en une seule fois. De même, de grandes incertitudes entourent la vitesse de la masse subaérienne qui s'effondre lorsqu'elle entre dans l'eau, ce qui est un facteur essentiel pour déterminer l'ampleur du tsunami qui en résulte. Les caractéristiques physiques de la masse s'étant détachée sont également importantes. Par exemple, s'agissait-il d'un bloc unique, d'une masse rocheuse très fragmentée ou d'un glissement boueux?

5.2.4. Conceptualisation du modèle de risque

Une première étape fondamentale consiste à déterminer les questions auxquelles les techniques d'analyse et les modèles utilisés pour quantifier les risques d'inondation côtière doivent répondre ainsi qu'à anticiper la manière dont les techniques et les modèles seront combinés aux données mesurées afin de développer des renseignements utiles sur les risques pour étayer l'évaluation des risques. Un examen et une évaluation des données disponibles (Chapitre 4) guideront l'élaboration des modèles conceptuels du système (Pye et coll., 2017) et orienteront les besoins de modélisation ou d'acquisition de données supplémentaires.

L'approche de modélisation à privilégier dépend d'un éventail de facteurs, notamment si la communauté ou le site a été exposé antérieurement aux inondations provenant de différentes sources de danger (p. ex., il faut considérer la climatologie des tempêtes, la topographie et les voies de propagation potentielles), les objectifs de l'évaluation des risques et les données, les ressources et l'expertise disponibles. Sur la base de la compréhension du système conceptuel et des objectifs de la modélisation, il est possible de choisir un ou plusieurs modèles appropriés. Lors de la sélection du modèle, il faut considérer :

- Si les processus importants, la physique ou les facteurs touchant les risques sont correctement intégrés dans le modèle.

- La complexité du modèle et l'effort nécessaire pour développer, calibrer et valider le modèle.
- L'efficacité de calcul, le coût et la demande en ressources (en comparaison avec des modèles similaires).
- L'expérience des personnes dans l'application du modèle.
- La dimensionnalité (p. ex., les approches 2-D utilisant des hauteurs d'eau moyennes sont généralement adéquates pour la plupart des applications de modélisation des marées et des ondes de tempête, bien qu'une modélisation 3-D puisse être nécessaire dans certaines circonstances).
- Si le modèle a fait ses preuves, comme en témoigne la vérification des cas d'essai pertinents et des applications pratiques.
- Les mesures et les données de sortie des risques nécessaires ([section 5.3](#)).
- L'intégration à un logiciel de cartographie ou de SIG.

5.3 Mesures et indicateurs de risques

Les exigences pour étayer l'analyse des risques détermineront quels types de mesures et d'indicateurs de risques doivent être produits par l'analyse des risques. Par exemple, la hauteur maximale d'une inondation associée à un événement ou un scénario pluviohydrologique côtier est le plus souvent utilisée dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité et des conséquences. Au fur et à mesure que les techniques et les outils d'analyse des risques évoluent, d'autres indicateurs permettant d'évaluer les dommages et les conséquences peuvent prendre de l'importance ou devenir nécessaires (p. ex., la hauteur des vagues, les vitesses de ruissellement, la durée des inondations et le potentiel d'érosion). L'approche pour la modélisation et l'analyse des risques d'inondation côtière modulent les besoins en matière d'indicateurs de risques; par exemple, la modélisation hydrodynamique des inondations de surface serait nécessaire pour fournir des données sur la vitesse de ruissellement. Les personnes développant les modèles de risques doivent travailler avec les responsables des tâches d'évaluation des risques pour déterminer quelles données de sortie et quels formats de modèle sont nécessaires et doivent consulter les directives relatives à l'évaluation des risques et à l'estimation des dommages dans les Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables (RNCan, 2021).

5.4 Méthodes de modélisation et d'analyse

Les sections suivantes fournissent des directives et des techniques pour la modélisation et l'analyse de différentes sources d'inondations côtières et des répercussions entraînées par les inondations, liées :

- Au niveau d'eau
- Aux vagues
- À la glace et aux débris
- Aux inondations de surface

5.4.1. Niveaux d'eau

Les niveaux d'eau extrêmement élevés sont généralement les principaux facteurs d'inondation sur les côtes ouvertes du Canada. Les niveaux d'eau dans les régions côtières sont constitués de plusieurs composantes distinctes, dont le niveau moyen de la mer, les marées

astronomiques et les variations de l'élévation de la surface de l'eau causées par les événements météorologiques (Figure 5.2). Le niveau moyen de l'eau à un endroit donné est en outre influencé par la variation relative du niveau de la mer, qui varie elle-même selon l'expansion thermique des océans, les eaux de fonte des glaciers et des glaciers continentaux et le mouvement vertical des terres (Greenan et coll., 2018).

La composante marémotrice du niveau de l'eau est régie principalement par les forces gravitationnelles associées à la lune et au soleil (Hicks, 2006). Par conséquent, les fluctuations du niveau de l'eau causées par les marées astronomiques sont généralement cycliques et prévisibles; par exemple, l'amplitude des marées fluctue sur une période de 14,75 jours lorsque les cycles semi-diurnes lunaires et solaires se déroulent (ce qui entraîne les marées de printemps et de mortes-eaux). Le niveau d'eau à un endroit donné, déterminé par les marées astronomiques, dépend d'une combinaison des forces astronomiques et des effets des eaux peu profondes. Les phénomènes météorologiques, tels que le vent et la pression atmosphérique, influencent largement les niveaux d'eau dans les zones côtières et se manifestent par des dénivellations dues au vent, des changements barométriques et des effets des vagues (dont la surélévation de la surface libre). La différence entre le niveau d'eau observé et le niveau d'eau prévu, basé uniquement sur les marées astronomiques et le niveau moyen de la mer, est appelée résidu de niveau d'eau. Les résidus de niveau d'eau reflètent les contributions au niveau d'eau total provenant de toutes les sources autres que les marées astronomiques, qui peuvent inclure les ondes de tempête (dénivellations dues au vent et changements barométriques) et les effets des vagues (p. ex., la surélévation de la surface libre), les seiches ou d'autres phénomènes (tels que les tsunamis).

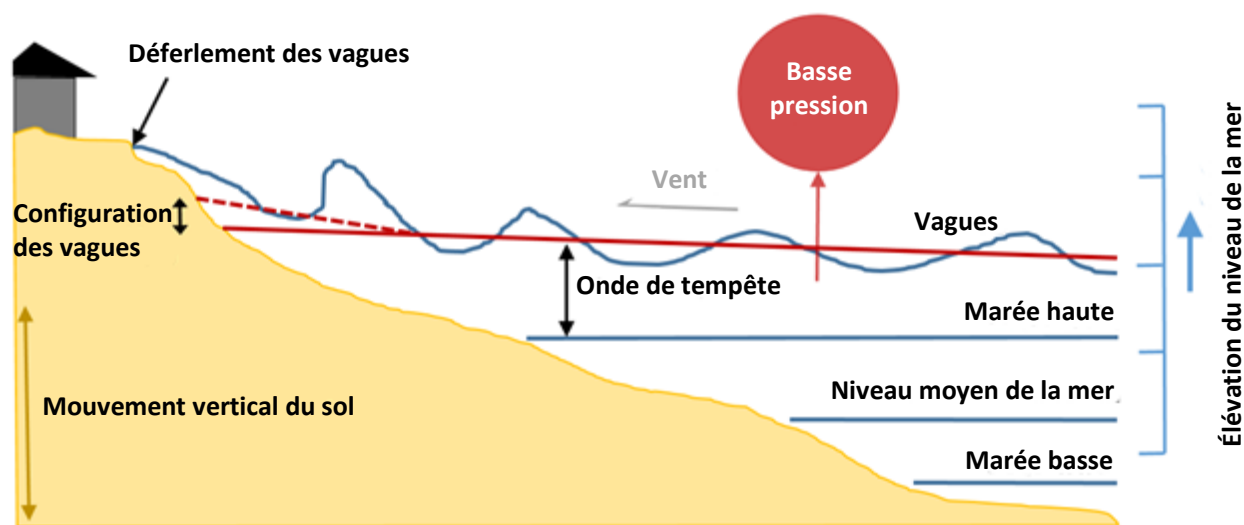


Figure 5.2. Contributions des tempêtes, des marées et de l'élévation du niveau de la mer à l'élévation des niveaux d'eau sur la côte. Adapté de Greenan et coll. (2018).

Analyse des marégraphes

Des mesures de niveau d'eau de haute qualité et à long terme sont disponibles à proximité de la zone d'étude de l'évaluation des risques (c.-à-d. suffisamment proches pour que les niveaux mesurés et/ou la fluctuation des niveaux reflètent les caractéristiques de la zone d'étude) et

peuvent constituer une base directe pour l'analyse des sources de niveau d'eau contribuant aux risques d'inondation côtière.

Selon la longueur des relevés de niveaux d'eau disponibles et l'amplitude de la marée dans une zone côtière, il peut être nécessaire ou souhaitable de soustraire la contribution des marées et d'autres facteurs (p. ex., météorologiques) au niveau d'eau total. Par exemple, cela peut être important pour identifier, dans les archives, les ondes de tempête extrêmes qui ont coïncidé avec des marées basses et qui, si elles coïncident avec des marées plus hautes dans le futur, pourraient entraîner des risques d'inondation côtière plus graves. L'analyse des statistiques d'ondes de tempête à partir de mesures de niveau d'eau (marégraphes) a été traditionnellement effectuée en calculant le « résidu » (la différence d'élévation instantanée entre le niveau d'eau observé et la marée astronomique attendue comme prévu par l'analyse harmonique) (Murphy et coll., 2020). Pour estimer l'eau résiduelle à partir de données de niveau d'eau, il faut d'abord acquérir ou calculer la marée théorique au lieu d'observation (p. ex., un marégraphe) pour la période d'intérêt. Par exemple, si on a une série chronologique de données horaire de niveaux d'eau, il faut calculer la série chronologique horaire de marées prévues, synchronisées avec les données de niveau d'eau. Il faut veiller à ce qu'il n'y ait pas d'erreurs de synchronisation entre les séries chronologiques de données de niveau d'eau et les marées prévues, en tenant également compte de différents fuseaux horaires. Les marées théoriques à un endroit donné peuvent être synthétisées ou prévues selon les principes et les méthodes d'analyse et de prévision des marées décrits par Forrester (1983). Essentiellement, les marées théoriques sont calculées en additionnant les contributions d'importants constituants harmoniques individuels à la zone d'intérêt. Les constituants peuvent être obtenus par l'analyse harmonique des marées à partir de relevés de niveau d'eau d'une durée suffisante. Le progiciel Tidal Package de l'Institut des sciences de la mer, disponible publiquement, offre une suite de programmes, de manuels et de données d'essai pour étayer l'analyse et prévoir les marées (Foreman, 2004).

Il est possible d'analyser le niveau d'eau total ou les résidus des enregistrements des marégraphes à l'aide de différentes méthodes et techniques statistiques ([section 5.2.3](#)) pour déterminer les PDA associées aux niveaux de récurrence extrêmes.

Encadré 5-3

Discussion sur les résidus autres que ceux des marées dans Murphy et coll. (2020) :

Si un résidu autre que celui des marées est principalement constitué de l'onde de tempête, il peut également contenir des erreurs de prévision harmonique, des erreurs de synchronisation, des effets de variabilité saisonnière ou climatique, des interactions non linéaires (Haigh et coll., 2016) ou des contributions d'autres phénomènes autres que les marées. Par exemple, les analyses harmoniques des données de marégraphes en Colombie-Britannique donnent généralement lieu à des séries chronologiques résiduelles présentant une périodicité semi-diurne prononcée (Murphy et coll., 2016; Zhai et coll., 2019), typique des zones qui connaissent de grandes marées avec lesquelles interagissent des effets météorologiques et d'autres processus physiques (p. ex., Horsburgh et Wilson, 2007). Récemment, des équipes de recherche (Williams et coll., 2016; Wahl et Chambers, 2015) ont plaidé pour l'utilisation de la statistique des « ondes asymétriques », qui correspond à la différence entre le niveau maximal observé de la mer et le niveau prévu (astronomique) de la marée, quel que soit leur moment au cours du cycle des marées. Pour les événements importants, les ondes asymétriques sont indépendantes des marées, ce qui permet d'utiliser une approche simplifiée face au problème que posent les probabilités conjointes des marées et des ondes.

Modélisation des marées et des ondes de tempête régionales

Pour les sites où les données de niveau d'eau ne sont pas disponibles ou lorsque les inondations locales sont fortement influencées par les conditions régionales (p. ex. l'état de la glace de mer), la modélisation hydrodynamique (numérique) régionale peut servir à évaluer les contributions des marées et des ondes de tempête aux niveaux d'eau extrêmes, en supposant qu'il soit possible d'ajuster et de valider un modèle à l'aide des données issues d'emplacements à proximité.

L'[encadré 5-4](#) ci-dessous énumère les considérations générales pour l'analyse et la modélisation des risques liés aux ondes de tempête.

Encadré 5-4

Facteurs généraux à considérer pour l'analyse et la modélisation des ondes de tempête basées sur les directives de Murphy et coll. (2020) :

Les méthodes simplifiées d'évaluation des ondes de tempête dans une zone particulière impliquent généralement (1) l'analyse directe des enregistrements des marégraphes (voir l'[analyse des marégraphes](#) à la [section 5.4.1](#)) ou (2) l'application de modèles analytiques ou de formules empiriques pour prévoir la contribution des effets du vent et de la pression atmosphérique aux niveaux d'eau. Cette dernière approche nécessite généralement de formuler des hypothèses en simplifiant la bathymétrie dans la zone côtière, la géométrie de la ligne de rivage (p. ex., des contours de fond droits et parallèles) ou les effets des fluctuations du vent et de la pression atmosphérique sur le niveau d'eau. Par conséquent, ce type de méthodologie ne convient que dans des situations restreintes où les hypothèses simplifiées sont valides ou pour des évaluations préliminaires. Des exemples de ces méthodes sont fournis dans le chapitre 4 de « Rock Manual » (CIRIA et coll., 2007), Pugh (1987) et le volume G — partie 4 des directives du ministère des Ressources naturelles de l'Ontario (2001).

La capacité des modèles numériques fondés sur des processus à prévoir les ondes de tempête a connu des avancées significatives, notamment la conception de modèles couplés de vagues et d'ondes (Bode et Hardy, 1997; Resio et Westerink, 2008) et les réanalyses globales (Muis et coll., 2016). Les systèmes de tempête, les processus atmosphériques et les processus océaniques qui se manifestent par des ondes de tempête dans une zone côtière peuvent couvrir des échelles spatiales de l'ordre de milliers de kilomètres et des échelles de temps typiques de quelques jours à quelques semaines. Cependant, l'ampleur des ondes de tempête peut fluctuer selon la bathymétrie, la topographie et les processus côtiers à des échelles spatio-temporelles caractéristiques beaucoup plus petites. Des approches de modélisation emboîtées ou multiéchelles sont donc souvent nécessaires pour réduire les prévisions d'ondes de tempête de l'échelle océanique à celle de la côte où elles parviendront (Barnard et coll., 2014). En général, cela peut impliquer l'application de modèles distincts pour prévoir le développement et l'évolution des ondes de tempête à l'échelle régionale (synoptique) (p. ex. Ferguson et coll., 2022 et Kim et coll., 2024) et les inondations de surface dues aux ondes de tempête. Des modèles numériques d'ondes de tempête de complexité variable sont largement utilisés. La plupart des modèles d'ondes de tempête sont bidimensionnels, c.-à-d. basés sur des équations en eaux peu profondes, comme décrit dans Ferguson et coll. (2022) et Kim et coll. (2024), ou tridimensionnels, et permettent de définir des champs de vent, des champs de pression et des conditions aux limites de mer libre variant dans le temps et dans l'espace pour générer des prévisions d'ondes de tempête. Barnard et coll. (2014), FEMA (2016), Muis et coll. (2016) et Resio et Westerink (2008) décrivent les considérations générales pour les études de modélisation des ondes de tempête. De Vries et coll. (1995) et Murphy et Khaliq (2017) fournissent un examen des différents modèles numériques et des différentes approches de la modélisation des ondes de tempête.

Indépendamment de l'objectif du modèle (p. ex., caractériser la circulation régionale des marées et les ondes de tempête ou simuler les inondations de surface), on applique des étapes

procédurales similaires, toutes guidées par la définition du système conceptuel : sélection du modèle, définition et discrétisation du domaine, définition des conditions initiales et aux limites, paramétrage de la physique, étalonnage et validation du modèle, calculs numériques et post-traitement et interprétation des résultats. Des orientations générales sur le développement et l'application de modèles numériques pour la simulation de l'hydrodynamique côtière sont fournies dans de nombreux documents (p. ex., USACE, 2002; Pye et coll., 2017; Lawless et coll., 2016; Bode et Hardy, 1997; Van Waveren et coll., 1999; Hearn, 2008). La liste suivante résume certains facteurs importants à considérer pour la modélisation hydrodynamique des côtes régionales :

- **Dimensionnalité** : La circulation des marées et les ondes de tempête sont le plus souvent simulées à l'aide de modèles hydrodynamiques bidimensionnels dans lesquels on résout les équations de hauteur moyenne des eaux peu profondes, sans tenir compte de la variation verticale de ruissellement (Dube et coll., 2010; FEMA, 2016), bien qu'il puisse exister des circonstances où il faut envisager une modélisation tridimensionnelle (p. ex., pour des zones présentant de forts gradients verticaux de bathymétrie ou de stratification de la densité).
- **Domaine et étendue du modèle** : En choisissant le domaine géographique, il faut tenir compte des mécanismes qui entraînent des niveaux d'eau élevés associés aux ondes de tempête. Par exemple, il peut être important de choisir un domaine de modèle suffisamment large pour intégrer les champs de pression atmosphérique et de vent associés aux événements pluviohydrologiques à l'échelle synoptique (Dube et coll., 2010; FEMA, 2016) (Figure 5.3). Les modèles de grilles à maille variable ou les grilles de calcul non structurées (flexibles) peuvent servir à réduire les demandes de calcul nécessaires pour les grandes étendues géographiques et les hautes résolutions spatiales dans les zones côtières (Dube et coll., 2010; KGS, 2022).
- **Représentation de la topographie et de la bathymétrie** : La représentation précise des élévations topographiques et bathymétriques est d'une importance cruciale pour la modélisation fiable de l'hydrodynamique côtière. Il est donc nécessaire d'être consciencieux lors du contrôle de la qualité, de l'agrégation des données (et de la citation de références communes) et de l'intégration des ensembles de données de topographie et de bathymétrie à un modèle numérique.
- **Résolution spatiale et temporelle** : La résolution spatiale doit être suffisamment élevée pour saisir les éléments topographiques ou bathymétriques importants afin de simuler la circulation des marées et des ondes de tempête et les gradients d'élévation de la surface libre, mais elle ne doit pas être si élevée qu'elle entraîne une charge de calcul peu pratique. Les techniques de mailles non structurées et de mailles imbriquées peuvent servir à équilibrer ces exigences contradictoires (Dube et coll., 2010; FEMA, 2016). Le choix du pas de temps du modèle est généralement dicté par des exigences de stabilité numérique, mais il faut sélectionner la résolution temporelle des données de sortie pour capter les niveaux d'eau de pointe et la durée des événements pluviohydrologiques, ce qui nécessite généralement des intervalles de sortie d'au plus une heure. La résolution temporelle des données d'entrée ou des conditions aux limites (p. ex., les champs atmosphériques) peut également restreindre la résolution temporelle des données de sortie du modèle.
- **Forçage du modèle et conditions aux limites** : Le forçage des limites de surface pour les modèles d'ondes de tempête consiste généralement en des champs de vent et de

pression atmosphérique, qui peuvent être dérivés de modèles et d'analyses atmosphériques ou de modèles paramétriques de tempête (ou les deux). La paramétrisation du transfert de quantité de mouvement air-mer (c.-à-d. la sélection des coefficients de traînée aérodynamique et les équations qui décrivent les contraintes sur la surface de l'eau) peut avoir un effet important sur les résultats modélisés (Dube et coll., 2010) et, dans les eaux arctiques et atlantiques au large du Canada, peut nécessiter la prise en compte des effets de la glace (Kim et coll., 2021). Le choix et l'application de conditions aux limites de mer libre pour les modèles d'onde de tempête sont une tâche importante (p. ex., Zhai et coll., 2019) et peut influencer de manière significative la conséquence de l'onde de tempête dans le domaine du modèle (Dube et coll., 2010). Les incertitudes associées aux effets des conditions aux limites ouvertes simulées sont souvent mieux atténuées en choisissant de grands domaines de modèle avec des limites de mer libre profonde afin de minimiser l'influence des conditions aux limites sur les ondes de tempête dans les régions côtières (Blain et coll., 1994). Le forçage de la marée peut être dérivé de modèles de marée mondiaux, tels que TPXO (Egbert et Erofeeva, 2002). Pour les domaines de modèle relativement petits, appliquer un forçage aux limites pour les marées au large (mer libre) peut suffire, mais pour les grands domaines, il faut appliquer un forçage interne (corps) aux limites pour les marées. Dans les modèles imbriqués, les données de sortie des modèles à résolution plus grossière peuvent directement faire office de conditions aux limites pour les mailles à une résolution plus fine.

- **Physique du modèle** : La plupart des modèles hydrodynamiques côtiers (eaux peu profondes) disponibles dans le commerce et à code source ouvert intègrent les processus physiques importants pertinents pour la simulation de la circulation des marées et des ondes de tempête dans les régions côtières, notamment : le forçage du vent et de la pression atmosphérique, le forçage de la marée, la friction du fond, le forçage de Coriolis, le mouillage, le séchage et la turbulence.
- **Étalonnage et validation du modèle** : La capacité de prévision du modèle hydrodynamique numérique doit être étudiée par comparaison avec des données mesurées avant qu'il ne soit adopté comme outil approprié pour l'évaluation des dangers et des risques. L'étalonnage est un processus itératif lors duquel on ajuste les paramètres du modèle jusqu'à ce qu'on atteigne une concordance satisfaisante avec les données mesurées pour une ou plusieurs ondes de tempête données. Une fois que le spécialiste est satisfait de la performance observée lors de l'étalonnage, le modèle optimisé est comparé à un ou plusieurs événements indépendants (exclus du processus d'étalonnage) afin d'en valider la performance. Les processus d'étalonnage et de validation permettent de calculer les mesures de capacité du modèle, telles que l'erreur type des niveaux d'eau, qui peuvent être présentées dans des rapports connexes pour rendre de l'incertitude du modèle. Les indicateurs et les variables de capacité du modèle doivent être évalués dans le contexte de l'objectif de la modélisation des risques et de l'incertitude acceptable. Par exemple, pour les évaluations des conséquences et de la vulnérabilité qui s'appuient sur des courbes de dommages par stade (RNCAN, 2021), il est très important de garantir la capacité élevée du modèle à prévoir les valeurs de crête des niveaux d'eau pendant un événement générateur d'inondation. Cependant, d'autres applications, telles que l'évaluation des dommages causés par les inondations aux biens et aux opérations agricoles, peuvent exiger que l'on priorise la capacité du modèle à prévoir la durée de l'inondation (RNCAN, 2021).

- **Données de sortie du modèle** : Les simulations hydrodynamiques régionales peuvent inclure des prévisions rétrospectives à long terme ou des simulations d'événements historiques extrêmes sélectionnés. Les données de sortie, qui comptent généralement les niveaux d'eau ou les ondes de tempête et la vitesse du courant, peuvent servir à déterminer les événements à simuler à l'aide de modèles d'inondation par ruissellement ([section 5.4.4](#)) ou servir comme forçage direct aux limites de ces modèles.

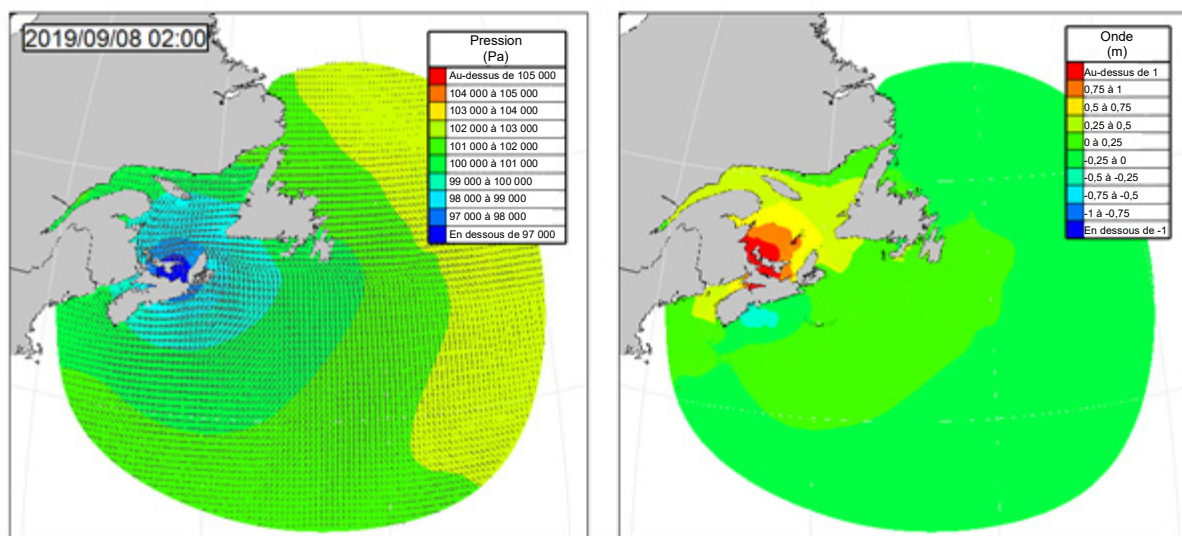


Figure 5.3. Aperçu des champs de vent et de pression atmosphérique d'entrée (à gauche) et de l'onde de tempête prévue (à droite) dans le golfe du Saint-Laurent pendant la tempête post-tropicale Dorian de 2019, à partir d'un modèle hydrodynamique TELEMAC-2D.

5.4.2. Vagues

Les vagues générées par le vent soufflant sur la mer libre contribuent aux risques d'inondation côtière, en particulier aux sites côtiers ouverts les plus exposés. Les vagues peuvent contribuer aux dangers au moyen de :

- **La surélévation de la surface libre** : L'augmentation du niveau d'eau moyen près de la ligne de rivage, qui découle d'une pente dans le niveau d'eau nécessaire pour atteindre un équilibre (stress de rayonnement). La surélévation s'ajoute aux ondes de tempête et à l'élévation des marées, contribuant ainsi potentiellement à l'inondation directe ou au débordement des protections côtières.
- **Le déferlement et le débordement d'ondes** : Les vagues qui frappent les lignes de rivage ou les structures côtières provoquent des déferlements et si la hauteur des déferlements dépasse la crête de la plage, de la dune, de la digue ou d'autres éléments du rivage, elle provoque des rejets de débordement. Selon le rythme ou le volume du débit de débordement et la topographie et le drainage de l'arrière-pays, les débits de débordement des vagues peuvent contribuer aux inondations et à la rupture des mesures de lutte contre les inondations.
- **Le transport de sédiments par les vagues et la morphodynamique** : Les vagues sont un facteur important du transport de sédiments, qui peut entraîner des modifications de la bathymétrie de la zone côtière et de la topographie du rivage sur

différentes échelles temporelles. Par exemple, la rupture des dunes pendant les événements pluviohydrologiques peut entraîner des débits de débordement et l'inondation directe des zones sur terre. L'érosion (affouillement) et le recul de la ligne de rivage à différentes échelles temporelles peuvent affaiblir les défenses côtières ou augmenter l'exposition aux vagues et aux niveaux d'eau extrêmes, augmentant les risques d'inondation.

- **La force et les impacts des vagues** : L'exposition directe à l'action des vagues peut entraîner des charges dynamiques importantes, exacerbant les risques d'inondation.
- **Les courants induits par les vagues** : Les courants littoraux, les contre-courants et les courants d'arrachement générés par les vagues peuvent exacerber les risques d'inondation dans les zones côtières ouvertes exposées.
- **Les débris transportés par les vagues** : Les ondes de tempête peuvent entraîner, dans les zones côtières, des objets tels que de la glace, des arbres et des parties d'arbres, des rondins et des débris d'origine humaine (plastiques, etc.), qui peuvent ensuite frapper directement les bâtiments et d'autres récepteurs ou créer des embâcles ou des accumulations qui entraînent des effets de remous ou le détournement des eaux de crue.

Les réponses aux questions suivantes peuvent guider la définition des scénarios de risques liés aux vagues :

- Potentiellement, dans quelle mesure la communauté ou la zone sont-elles exposées aux vagues provoquées par le vent (en tenant compte de l'orientation de la ligne de rivage par rapport aux vagues du large, du potentiel de génération de vagues sur les fetchs locaux, des voies de propagation source-récepteur potentielles, comme l'érosion ou le débordement, des influences de la topographie et de la bathymétrie de la zone côtière sur les processus de transformation des vagues et de la variabilité du niveau d'eau)?
- Existe-t-il des corrélations ou des dépendances entre les dangers liés aux vagues et d'autres facteurs contribuant aux risques d'inondation côtière (p. ex., les ondes de tempête, les marées) à cet endroit?

Analyse des données de vagues

L'évaluation des contributions des vagues aux risques côtiers nécessite généralement une compréhension des conditions de vagues au large (mer libre), comme les contributions de la houle et des échanges vent-mer, les processus de propagation et de transformation des vagues dans les zones côtières et les interactions des vagues avec les éléments et les structures du littoral (p. ex., FEMA, 2019). Des techniques variant en complexité peuvent servir à caractériser les vagues à un endroit en particulier, selon plusieurs facteurs comme le niveau de risque anticipé, la disponibilité des données de terrain ou modélisées, l'importance de la contribution des vagues au risque d'inondation global et les buts et objectifs de l'évaluation des risques. Des conseils sur le choix des types appropriés d'analyse sont présentés par Murphy et coll. (2020) et sont résumés dans l'[encadré 5-5](#) ci-dessous.

Encadré 5-5

Conseils sur le choix des types appropriés d'analyse des données sur les vagues, basés sur Murphy et coll. (2020)

Des statistiques sommaires sur les vagues au large provenant de prévisions rétrospectives de vagues régionales et de données de bouées d'enregistrement des vagues peuvent permettre d'évaluer les conditions de vagues au large et donner un aperçu des limites supérieures potentielles de l'exposition aux vagues sur un site donné. Les séries chronologiques de vagues au large (spectres ou paramètres), qu'elles proviennent de modèles numériques (p. ex., prévisions rétrospectives), de mesures sur le terrain ou des deux (p. ex., réanalyses), peuvent être analysées pour fournir des statistiques sommaires utiles, notamment :

- Les valeurs de retour de la hauteur de vagues significatives (H_s) et les paramètres d'état de la mer connexes (p. ex., la période du pic des vagues, T_p), départagés par secteur directionnel.
- Les diagrammes de dispersion conjoints H_s - T_p , qui illustrent la plage de périodes de pic des vagues associées à différentes hauteurs significatives des vagues.
- Les tableaux de persistance des vagues (durée des combinaisons hauteur-période des vagues selon la direction).
- La direction des vagues (tracés directionnels de la fréquence d'occurrence des classes de hauteur des vagues).

Lorsqu'elle est disponible, la répartition de l'énergie des vagues par fréquence et par direction doit être prise en considération. La caractérisation adéquate des spectres des vagues au large (y compris l'étalement directionnel, les facteurs d'augmentation de pointe et les contributions relatives de la houle et de la mer du vent générées par les vents soufflant sur les fetchs locaux) est une condition préalable à la modélisation de la transformation des vagues, qui peut permettre d'estimer précisément les risques liés aux vagues dans les zones côtières.

Si ces données ne sont pas disponibles, il est possible d'utiliser des méthodes empiriques pour fournir une estimation approximative des risques liés aux vagues (voir l'Encadré 5-6

La caractérisation des conditions de vagues au large doit inclure une évaluation de la climatologie des tempêtes régionales puisque différents types de tempêtes peuvent donner lieu à des conditions de vagues nettement différentes. Les données relatives aux vagues sont généralement départagées par direction, période ou mécanismes de génération (c.-à-d. le type de tempête) afin de satisfaire aux conditions d'homogénéité des ensembles d'échantillons, condition préalable à l'analyse des valeurs extrêmes.

Les scénarios de risques liés aux vagues et les probabilités connexes doivent être définis en tenant compte des niveaux d'eau parce que les effets des vagues dépendent généralement fortement des profondeurs d'eau locales. Par exemple, en fonction de la bathymétrie et de la topographie de la zone côtière, les vagues peuvent être limitées en profondeur, ce qui limite la hauteur des vagues de la zone côtière pour un niveau d'eau donné et réduit ainsi la page des scénarios de risques liés aux vagues à prendre en compte.

L'analyse de probabilité conjointe peut servir à étudier les effets combinés des vagues et d'autres facteurs contribuant aux risques d'inondation côtière (p. ex., les ondes de tempête, les marées ou les niveaux d'eau totaux) selon des méthodes comme celles décrites par H. R. Wallingford (1998) et Hawkes (2008). Cependant, des analyses multidimensionnelles complètes de tous les paramètres contribuant aux risques d'inondation côtière peuvent générer beaucoup de scénarios à modéliser ou à prendre en compte, ce qui peut être complexe, inutile ou générer des résultats trop incertains pour être valables. La première étape consiste généralement à établir des diagrammes de dispersion des paramètres représentatifs de la hauteur des vagues (p. ex., la hauteur de vagues significatives) en fonction des niveaux d'eau ou des ondes de tempête afin de déterminer dans quelle mesure les vagues et les niveaux d'eau sont corrélés. Selon le degré de corrélation, on peut déduire la probabilité approximative de différentes combinaisons de vagues et de niveaux d'eau selon les probabilités unidimensionnelles. Par exemple, si l'état de la mer est fortement lié au niveau d'eau, l'événement côtier ayant une PDA de 1 % peut être défini comme étant une combinaison du niveau d'eau élevé ayant une PDA de 1 % et de l'état de la mer ayant une PDA de 1 % (définie par des hauteurs et des périodes de vagues représentatives). Lorsque la modélisation de la transformation des vagues est utilisée pour évaluer les conditions des vagues dans la zone côtière, il est possible d'intégrer les effets des niveaux d'eau sur les vagues, ce qui, dans certains cas, simplifie les facteurs de probabilité conjointe à considérer. Les méthodes de probabilité conjointe et de statistiques multivariées sont décrites plus en détail dans l'[encadré 5-1](#).

Lorsque les risques d'inondation côtière sont évalués selon des approches simplifiées et additives (p. ex., en additionnant la contribution des vagues, des ondes de tempête, des marées et d'autres processus, c.-à-d. sans approches probabilistes conjointes rigoureuses), les probabilités combinées qui en résultent doivent toujours être prises en compte dans l'optique de la dépendance (ou l'indépendance) des différents processus.

Modélisation des vagues

Des analyses préliminaires visant à développer une compréhension conceptuelle des processus contribuant aux risques d'inondation côtière dans une zone donnée devraient aider à déterminer la contribution et le rôle potentiels des effets des vagues et, par conséquent, les besoins de modélisation. Ces besoins peuvent aller de l'application de formules empiriques de base pour estimer les états de mer selon la vitesse et la durée du vent ou la longueur du fetch (p. ex., CIRIA et coll., 2007) à une modélisation numérique sophistiquée intégrant la transformation des vagues lorsqu'elles se propagent du large vers la zone côtière ou la terre ferme.

Les conditions des vagues au large (spectres de la houle ou paramètres spectraux) peuvent être dérivées de données météocéaniques (comme des réanalyses) rectangulaires (basées sur des modèles), d'enregistrements des bouées pour l'étude des vagues (voir l'[analyse des données des vagues](#) à la [section 5.4.2](#)) ou calculées selon des formules empiriques utilisant des données sur les vents comme données d'entrée. Cette dernière méthode devrait

typiquement se limiter aux analyses préliminaires ou aux mers limitées par le fetch, où les données maillées sont indisponibles ou peu fiables.

En fonction de la définition des événements extrêmes (comme l'occurrence conjointe des vagues et d'autres processus contribuant aux risques d'inondation côtière) et des scénarios permettant de guider l'évaluation des risques, il est possible d'adopter un éventail d'approches pour transformer les vagues du large en vagues de zone côtière, par exemple (par ordre décroissant de coût de calcul) :

- Transformation dynamique à long terme des vagues du large vers la zone côtière (p. ex., prévisions rétrospectives multidécennales).
- Transformation d'une matrice de conditions sélectionnées de vagues au large à la zone côtière, qui est ensuite utilisée pour recréer un climat de vagues en zone côtière à long terme à l'aide des séries chronologiques au large comme données d'entrée (p. ex., Cornett et Zhang, 2008).
- Transformation de certains événements de vagues au large (p. ex., des conditions de vagues extrêmes avec des probabilités de dépassement annuelles déterminées) vers la zone côtière (p. ex., Murphy et coll., 2019).

Les conditions locales peuvent déterminer les exigences de l'analyse. Par exemple, selon la profondeur de l'eau dans la zone côtière, les vagues peuvent être limitées en profondeur (c.-à-d. la hauteur des vagues dans la zone côtière est limitée par la faible profondeur de l'eau, qui provoque la rupture des vagues). Cela signifie que l'éventail des conditions de vagues dans la zone côtière peut essentiellement être séparé des conditions au large, ce qui peut simplifier les exigences de modélisation de la transformation des vagues de la zone côtière. La surélévation de la surface libre, le rythme de déferlement des vagues et d'autres processus non linéaires peuvent encore nécessiter une analyse détaillée. Comme pour toute modélisation numérique de processus côtiers, on attache une importance capitale à l'étalonnage et la validation du modèle (p. ex., à l'aide de mesures des vagues locales à partir de bouées ou d'autres sources, de levés de surélévation de la surface libre ou de ligne de débris ou d'autres sources), qui, idéalement, capte les conditions de tempête.

Encadré 5-6

Des directives générales sur la modélisation numérique de la transformation des vagues sont fournies dans Murphy et coll. (2020) :

La transformation des vagues est généralement réalisée à l'aide de modèles spectraux d'ondes dits de troisième génération, tels que SWAN (The SWAN Team, 2009), CMS-Wave (Lin et coll., 2008; Sanchez et coll., 2014), MIKE21 SW (DHI, 2017) ou TOMAWAC (Benoit et coll., 1996). Il s'agit de modèles à moyenne de phase qui simulent la croissance, la décroissance et la transformation des échanges vent-mer et de la houle au large et dans les zones côtières par la résolution de l'équation d'équilibre action-vagues. Ces modèles saisissent généralement des processus tels que la génération de vagues par le vent, la réfraction des vagues, l'exhaussement, la formation de moutons, la rupture, les interactions entre vagues, les interactions vagues-courants et la dissipation de l'énergie. En général, ces modèles ne simulent pas explicitement la diffraction des ondes. La plupart des modèles d'ondes spectrales de troisième génération estiment les effets de la diffraction selon une approche à phase découplée de réfraction-diffraction. Tous ces modèles peuvent éventuellement être jumelés à des modèles de circulation de la zone côtière pour inclure les effets des marées et des courants (Manson et coll., 2016b).

L'analyse de la transformation des vagues comporte souvent une procédure imbriquée. Le domaine extérieur peut utiliser un modèle à relativement grande échelle (p. ex., un modèle spectral de vagues de troisième génération tel que SWAN, MIKE21 SW, CMS-Wave ou TOMAWAC) pour transformer les vagues des eaux profondes à une profondeur intermédiaire, en tenant compte de la croissance locale du vent et des vagues, des interactions entre vagues, de l'exhaussement, de la réfraction et de la rupture. Les résultats de cette analyse peuvent ensuite être adaptés à des modèles à plus petite échelle (généralement à résolution de phase) ayant des mailles bathymétriques plus denses, ce qui permet d'inclure des paramètres physiques plus détaillés.

L'agrégation des modèles de vagues et de circulation peut être essentielle pour saisir la croissance locale des vagues de vent en présence de courants et pour saisir les interactions vagues-courants.

Les paramètres de sortie de la modélisation de la transformation des vagues (p. ex., Figure 5.4) peuvent compter les hauteurs, les périodes et les directions des vagues dans la zone côtière, les spectres des vagues et les changements des niveaux d'eau moyens (surélévation et abaissement). En outre, la modélisation des interactions vagues-courants permet de déterminer les effets des courants (de marée, fluviaux ou éoliens) sur les conditions des vagues et les effets des conditions des vagues sur les courants de la zone côtière. La modélisation physique peut également servir à évaluer les transformations des vagues et les interactions vagues-courants, généralement sur de petites échelles (jusqu'à quelques kilomètres), mais à un coût généralement plus élevé que la modélisation numérique.

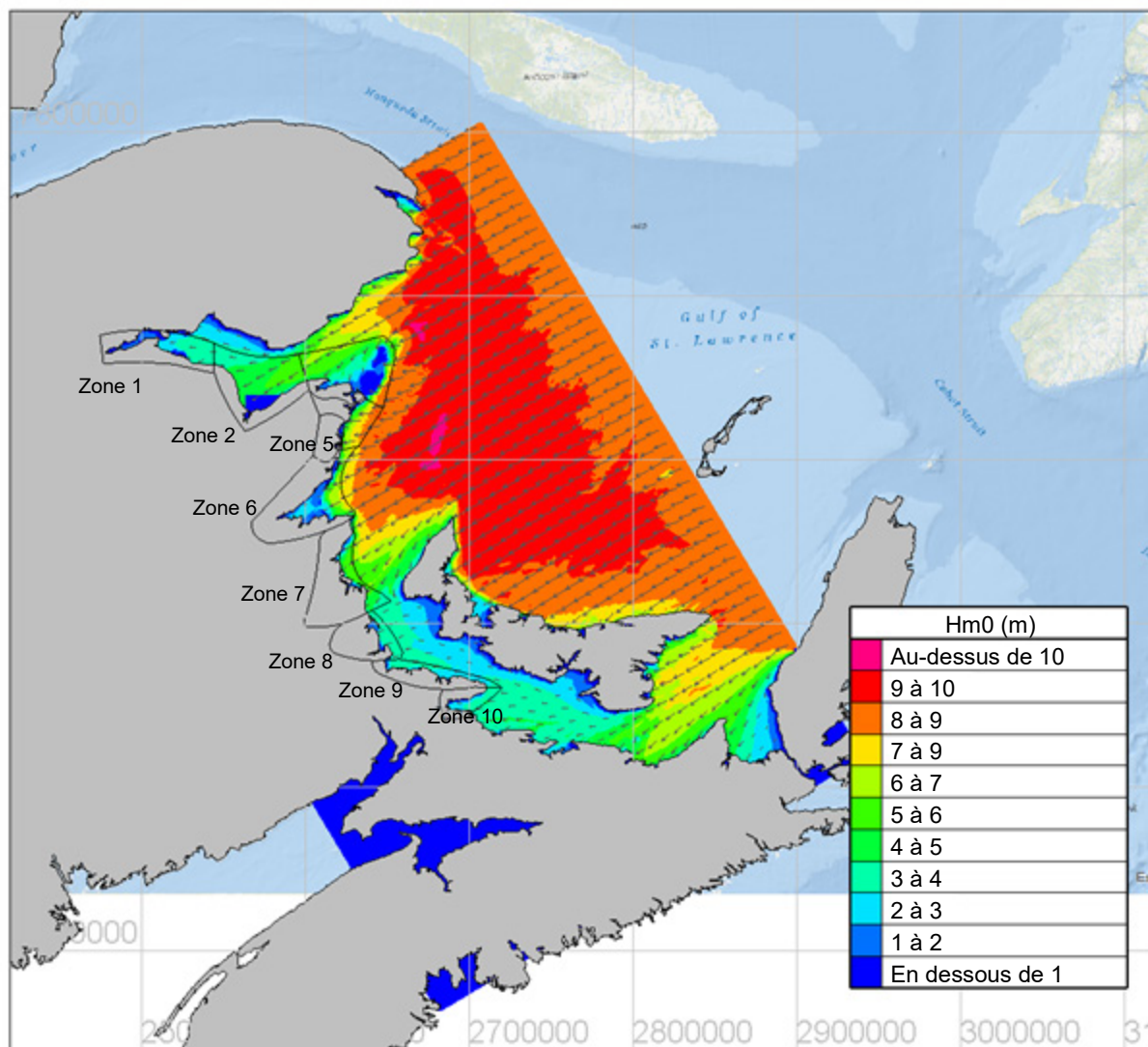


Figure 5.4. Exemple de données de sortie d'un modèle spectral de vagues de troisième génération (SWAN), montrant les hauteurs de vagues et les directions des pics de vagues significatives dans le golfe du Saint-Laurent pour un événement pluviohydrologique modélisé (Murphy et coll., 2018).

Différents types de modèles et d'approches sont nécessaires pour évaluer les processus de la zone de déferlement, la surélévation, le déferlement et le débordement des vagues sur les éléments côtiers et les protections côtières, ou les interactions vagues-structures. En fonction de l'application et des données de sortie exigées pour caractériser les risques d'inondation, les approches peuvent inclure l'utilisation de formules empiriques pour calculer la hauteur de déferlement d'ondes sur les lignes de rivage (p. ex. KGS, 2022) ou les débits moyens de débordement (pour l'intégration aux modèles d'inondation de ruissellement) (EurOtop, 2018), des modèles numériques de vagues sophistiqués à résolution de phase ou des modèles physiques (en laboratoire) (Figure 5.5). Des directives sur ces sujets sont fournies dans Murphy et coll. (2020).



Figure 5.5. Des mesures de débordement des vagues sont effectuées dans des modèles physiques à l'échelle dans les laboratoires de Conseil national de recherches Canada, à Ottawa, afin de participer à la protection du littoral pour les sites côtiers canadiens.

Les données de sortie requises suite à la modélisation des vagues dépendront des besoins d'informations pour guider l'évaluation des risques et du rôle des vagues dans la contribution aux risques d'inondation côtière. Par exemple, une approche simple pour prendre en compte la contribution des vagues peut consister à cartographier les surélévations de surface libre pour évaluer si les bâtiments, les infrastructures ou les biens de valeur seront exposés ou non aux effets des vagues ou si les vagues dépasseront les défenses côtières. Dans les zones où le débit de débordement des vagues contribue aux inondations de surface, mais où les communautés et les biens de valeur ne sont pas directement exposés aux vagues incidentes, la profondeur de l'eau et la vitesse de ruissellement fournies par les modèles d'inondation des terres et les courbes profondeur-dommages peuvent suffire à évaluer le risque. Pour les bâtiments et les infrastructures situés sur des côtes ouvertes exposées où l'action directe des vagues peut contribuer aux dommages, il est possible d'utiliser les hauteurs et les périodes des vagues en combinaison avec des fonctions de fragilité qui utilisent ces données. Dans certaines circonstances, une modélisation plus sophistiquée des interactions vagues-structures peut même être nécessaire pour évaluer les dommages (p. ex., les impacts des vagues sur les types d'infrastructures critiques pour lesquelles il n'existe pas de fonctions de fragilité).

5.4.3. Glace et débris

Les côtes atlantiques et arctiques du Canada sont sujettes à une couverture de glace saisonnière. Selon les conditions, la glace peut réduire ou exacerber les risques d'inondation côtière ou y contribuer. La banquise côtière et les grandes régions couvertes de glace continue (ou quasi continue) agissent comme une barrière à la surface de l'océan, empêchant ou limitant le transport de la quantité de mouvement vent-mer, réduisant ainsi le potentiel de grandes vagues et d'ondes de tempête. La couverture de glace peut effectivement réduire les distances de fetch en mer libre, supprimer la génération de vagues et atténuer les vagues et les ondes de tempête (Shapiro et Simpson, 1953; Squire, 2007; Manson et coll., 2016a; Kim et coll., 2021). Toutefois, les concentrations intermédiaires de glace et les floes mobiles peuvent en fait accroître le transport de la quantité de mouvement air-mer en augmentant la résistance de la rugosité de surface, ce qui peut amplifier les ondes de tempête (Birnbbaum et Lüpkes, 2002). En outre, la glace mobile peut présenter des dangers lorsque les vents du littoral provoquent

l'empilement et le soulèvement de la glace (Barker et Timco, 2017; Kovacs et Sodhi, 1980; Forbes et Taylor, 1994; Forbes et coll., 2004, 2018). Les effets des changements climatiques, comme le recul de la glace de mer, peuvent entraîner une augmentation de la hauteur des vagues dans les mers à fetch limité (Casas-Prat et coll., 2018) et se traduire par des saisons de mer libre plus longues, plus propices aux risques d'inondation côtière. Le potentiel qu'a la glace de moduler ou d'influencer les risques d'inondation côtière doit être considéré en examinant les données historiques disponibles et les changements futurs projetés de l'état des glaces. Le déclin de la couverture de glace de mer et l'allongement des saisons de mer libre observé dans les mers épicontinentales canadiennes de l'Arctique et de l'Atlantique au cours des dernières décennies devraient se poursuivre au XXI^e siècle et entraîneront probablement une exposition accrue aux vagues et aux ondes de tempête dans ces régions (Greenan et coll., 2018). Traditionnellement, les risques d'inondation côtière dans les mers influencées par la glace étaient généralement évalués pour la saison de mer libre uniquement, en supposant que les événements extrêmes coïncident toujours avec une mer libre. Cependant, on sait que des ondes de tempête pouvant générer des inondations se produisent également pendant les périodes de couverture de glace étendue (Ferguson et coll., 2022), et l'on intègre de plus en plus des paramètres de glace relativement simples dans les modèles hydrodynamiques (Joyce et coll., 2019; Kim et coll., 2021) et les modèles spectraux de vagues (Liu et coll., 2020) pour en déterminer les effets sur les ondes de tempête et les vagues. Les progrès et l'application de ces types de modèles seront probablement de plus en plus importants dans le contexte des effets des changements climatiques sur l'état des glaces et la saisonnalité de la couverture de glace.

Tout comme les floes mobiles, de grandes quantités de débris transportés par l'eau, qu'ils soient d'origine naturelle (p. ex. des arbres déracinés ou des zostères marines) ou d'origine humaine (p. ex. du bois manufacturé, des billots provenant d'activités d'exploitation forestière, des conteneurs d'expédition ou des bateaux, des fragments de bâtiments ou d'infrastructures endommagés), peuvent contribuer aux dommages causés lors d'inondations ou de tsunamis (Murphy et coll., 2021). En particulier, les tsunamis peuvent entraîner des débris sur de grandes distances dans l'arrière-pays (Leonard et Bednarski, 2014; Nistor et coll., 2017). FEMA (2011) et ASCE (2016) décrivent les méthodes d'évaluation des charges dynamiques des débris transportés par l'eau sur les structures et des charges résultant de la formation de barrages ou de l'accumulation de débris, qui dépendent de leur taille et leur poids. Cependant, la mesure dans laquelle les risques liés aux débris peuvent actuellement être intégrés aux analyses basées sur le risque est limitée par le manque de fonctions de fragilité dans l'analyse des conséquences, la connaissance limitée des caractéristiques des débris dans différentes régions et le manque de capacité des modèles prédictifs à décrire le transport des débris sur la côte (Murphy et coll., 2021).

5.4.4. Inondation due aux eaux de ruissellement

La modélisation des risques d'inondation par ruissellement implique généralement la combinaison des renseignements sur les sources de risques dans la zone côtière (p. ex. niveaux d'eau et conditions de vagues obtenues par les analyses décrites dans les [sections 5.4.1 à 5.4.3](#)) avec des voies de propagation connues (p. ex. débordement des vagues et inondation directe) afin de déterminer les zones touchées par les inondations (étendues d'inondation) et de générer des mesures des risques d'inondation (p. ex. profondeurs d'eau, vitesse, etc.). Il s'agit normalement d'un exercice de modélisation distinct des analyses régionales décrites dans les [sections 5.4.1 à 5.4.3](#), bien que les techniques de grilles à maille

variable et non structurées permettent d'intégrer des modèles hydrodynamiques numériques régionaux et locaux.

Comparaison des méthodes de modélisation statiques et dynamiques

La modélisation des inondations de surface peut nécessiter 1) des modèles numériques (hydrodynamiques) basés sur des processus ou simplement 2) la cartographie altimétrique représentative des eaux de crue par des modèles numériques d'élévation (MNE), appelée modélisation de « bassin ». Cette dernière approche ne tient pas compte des dynamiques de propagation des eaux de crue ni des voies d'inondation et ne fournit généralement que des renseignements sur les inondations ou la hauteur de l'eau (c.-à-d., pas les vitesses, l'action des vagues, les durées d'inondation ou d'autres indicateurs de risque). Cependant, la complexité moindre et les ressources réduites nécessaires à la mise en œuvre de la modélisation d'un bassin peuvent en faire une approche attrayante, selon la complexité de la topographie des zones inondées et des voies de propagation d'inondation, l'importance des dynamiques locales et les indicateurs de risques requis pour étayer l'évaluation des risques.

Les approches de modélisation de bassin passives peuvent également permettre de cartographier la hauteur des inondations à plus haute résolution que la modélisation hydrodynamique en évitant l'interpolation ou le rééchantillonnage pour des maillages de calcul à plus faible résolution (Didier et coll., 2019).

Certains modèles hydrodynamiques adoptent désormais une approche hybride, dans laquelle les paramètres modélisés (p. ex., la hauteur de l'eau, les vitesses) issus d'un maillage de calcul à résolution plus grossière sont reportés sur des MNE bruts à haute résolution. Une autre combinaison de modèles fondés sur des processus et de la cartographie statique des niveaux d'eau consiste à produire des MNE hydro cohérents (p. ex., en manipulant les élévations pour représenter des voies de ruissellement discrètes telles que des ponceaux, des ouvertures de pont, etc.) avant de propager les niveaux d'eau sur terre (Webster et coll., 2004; Poppenga et coll., 2014). Avant d'adopter de telles approches, il faut tenir compte du fait que les techniques de cartographie statique ou non fondée sur des processus peuvent mal caractériser le risque de danger (p. ex., Barnard et coll., 2019). Une comparaison entre la modélisation d'un bassin et la modélisation hydrodynamique effectuée pour l'étude de cas sur la côte atlantique a montré une concordance raisonnable entre les méthodes de prévision de l'étendue des inondations (Figure 5.6).

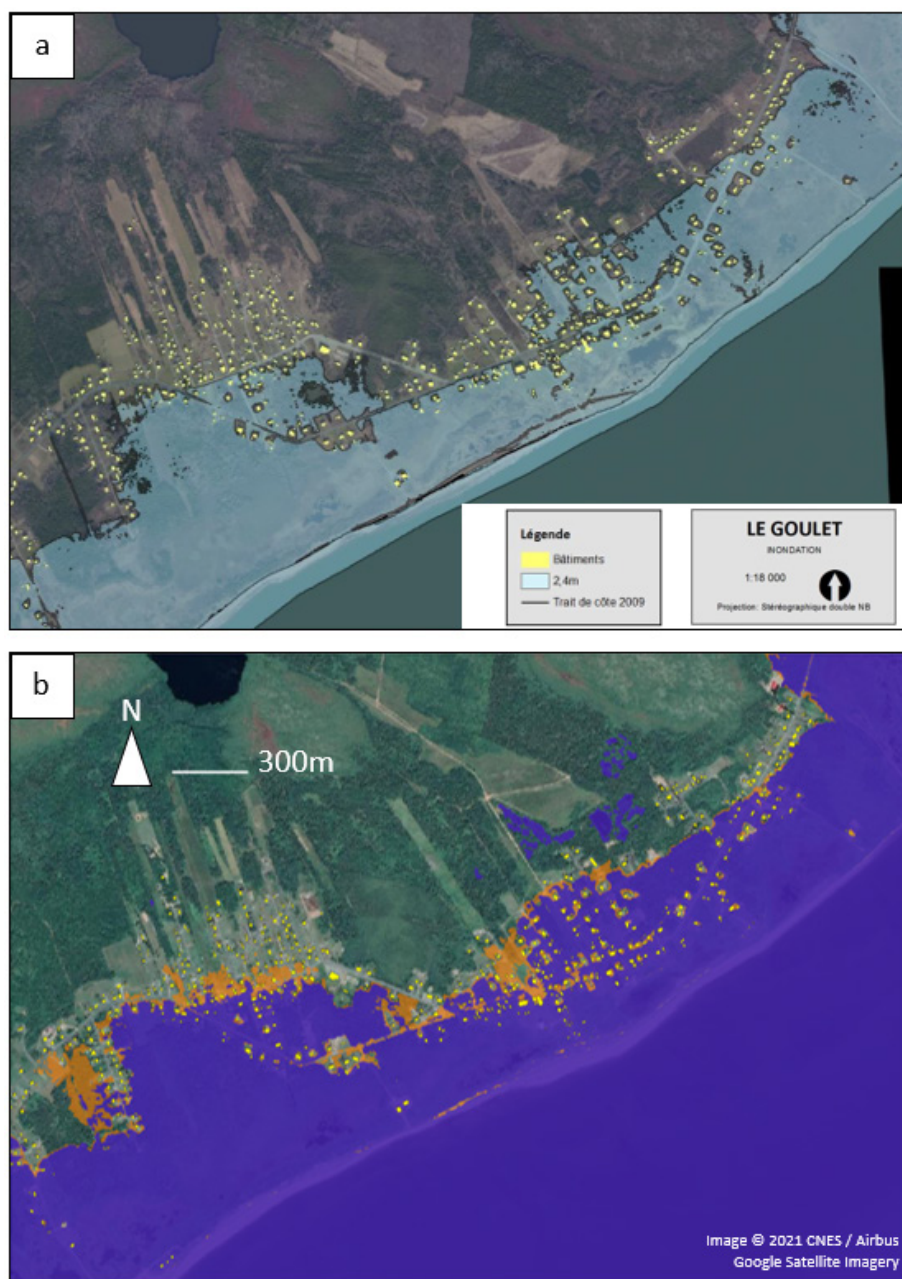


Figure 5.6. Comparaison des prévisions de l'étendue des inondations à partir (a) de la modélisation de bassin effectuée par Robichaud et coll. (2011) et (b) de la modélisation hydrodynamique numérique à Le Goulet, N.-B. La zone teinte en bleu de l'image (a) indique l'étendue de l'inondation estimée pour un événement ayant une PDA de 1 % (100 ans) en l'an 2000 ou un événement ayant une PDA de 2 % (50 ans) en l'an 2025. La zone teinte en violet de l'image (b) indique l'étendue d'une inondation ayant une PDA de 2 % selon les conditions approximatives actuelles, et la zone teinte en orange indique l'étendue d'une inondation ayant une PDA de 1 % selon les conditions approximatives actuelles. Les polygones jaunes en (a) et (b) représentent l'empreinte des bâtiments.

Représentation des infrastructures dans les zones inondables

Dans les zones développées, les infrastructures comme les bâtiments, les murs, les routes et les mesures de lutte contre les inondations peuvent obstruer les eaux de crue en créant des voies d'écoulement préférentielles complexes contribuant à la propagation des inondations et des vagues et modifiant la vitesse d'écoulement (Conseil national de recherches, 2009). De même, les infrastructures de drainage (p. ex., les ponceaux) peuvent relier hydrauliquement des parcelles de terrain qui seraient autrement déconnectées sous certains niveaux d'inondations. En développant des modèles d'inondation de surface, les spécialistes doivent acquérir une certaine connaissance du paysage physique (p. ex., falaises ou plage en pente) et des éléments construits (p. ex., routes, digues, digues de mer, ponceaux, chaussées) qui influencent la propagation des inondations dans la zone d'étude. Par exemple, les éléments linéaires comme les digues, les remblais routiers ou les ponceaux peuvent entraîner des répercussions importantes sur la propagation et la répartition des inondations et peuvent nécessiter une attention particulière pour que les grilles de calcul des modèles représentent bien ces éléments (voir l'[encadré 5-7](#) ci-dessous).

Encadré 5-7

La modélisation à l'échelle de la communauté pour l'étude de cas de l'Atlantique était fondée sur un modèle hydrodynamique (fondé sur des processus) reposant, en partie, sur un MNE à haute résolution et hydro cohérent. Le MNE hydro cohérent présente une modification spéciale des données d'élévation à proximité des ponceaux, permettant un drainage plus réaliste et une connectivité entre les parcelles de terrain. Le maillage de calcul du modèle à l'échelle communautaire a été arrimé aux emplacements des ponceaux pour que la bathymétrie du modèle reflète ces éléments linéaires détaillés ([Figure 5.7](#)).

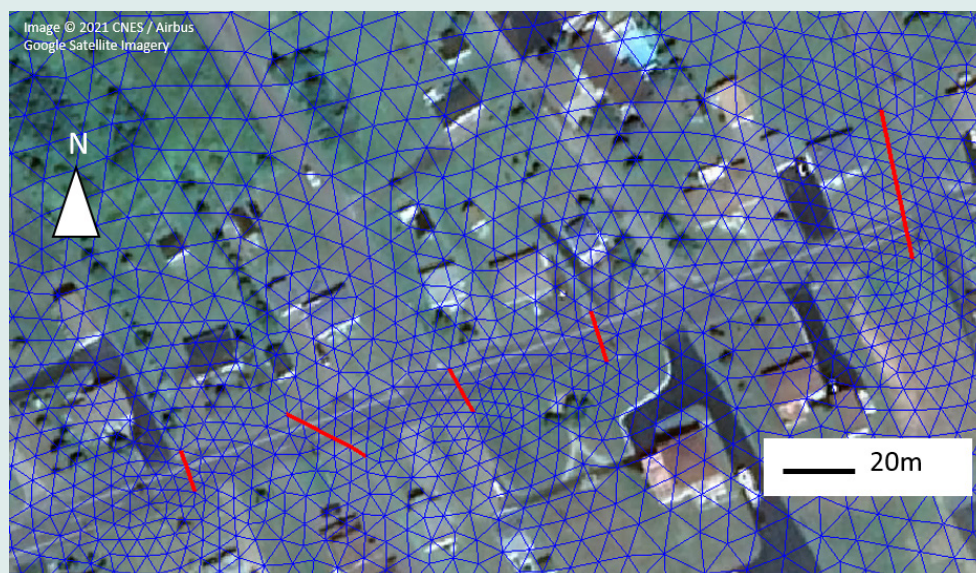


Figure 5.7 : Maillage à l'échelle communautaire pour l'étude de cas de la Péninsule acadienne. Le maillage de calcul (en bleu) a été arrimé aux emplacements des ponceaux (en rouge) pour améliorer la simulation réaliste du drainage et de la connectivité.

Selon l'échelle de l'évaluation des risques et le niveau de détail requis, les spécialistes peuvent avoir besoin d'intégrer les effets des bâtiments, des infrastructures et des protections contre les inondations dans la modélisation et les analyses des inondations. Les infrastructures de drainage, telles que les ponceaux et les fossés, peuvent être intégrées dans des ensembles de données d'élévation (et, par extension, dans la modélisation des inondations) hydro cohérentes ou incorporées dans des modèles hydrodynamiques bidimensionnels en tant qu'éléments ou structures à l'échelle de la sous-maille. Les MNE hydro cohérents comprennent un ajustement spécial des élévations pour refléter la connectivité hydraulique et hydrologique (Poppenga et coll., 2014). Plusieurs méthodes existent pour simuler l'obstruction de l'écoulement causée par les bâtiments et les structures élevées dans les modèles d'inondation. Schubert et Sanders (2012) décrivent quatre méthodes pour intégrer les effets des bâtiments, qui varient en complexité et en efforts requis. Certaines méthodes (comme la méthode de la « résistance des bâtiments ») décrites par Schubert et Sanders (2012) visent à simuler la résistance à l'écoulement ou la traînée qu'exercent les bâtiments sans en résoudre explicitement la géométrie ou l'empreinte exacte. D'autres méthodes (comme la méthode par « omission du

bâtiment ») intègrent les empreintes des bâtiments individuels dans le domaine du modèle et permettent une simulation détaillée des voies d'écoulement préférentielles entre les bâtiments. L'une des principales considérations est que la méthode de résistance des bâtiments permet à l'empreinte des bâtiments de stocker de l'eau, ce qui n'est pas le cas de la méthode par omission du bâtiment. Cette considération est souvent plus pertinente pour les inondations fluviales et de ruisseaux que pour les inondations côtières, mais il faudra possiblement prendre en compte les effets du stockage terrestre dans certains cas pour les inondations côtières. Le niveau de détail auquel les infrastructures (dont les infrastructures de drainage) peuvent être intégrées dans la modélisation des inondations est limité, en partie, par la résolution et la qualité des données d'élévation et d'infrastructure disponibles. Les spécialistes doivent envisager des seuils spatiaux pour l'interaction écoulement-structure. Par exemple, les objectifs de l'analyse justifient-ils la simulation de l'interaction écoulement-structure à l'échelle du bâtiment? Ou peut-être peut-on appliquer des généralisations pour simuler l'interaction écoulement-structure à l'échelle du quartier. Schubert et Sanders (2012) analysent l'influence de diverses approches sur la précision des prédictions et l'effort de calcul requis.

Considérations relatives à la modélisation hydrodynamique des risques d'inondation par ruissellement

Si l'on utilise des modèles hydrodynamiques pour simuler des risques d'inondations par ruissellement, bon nombre des considérations décrites dans la [section Modélisation régionale des marées et des ondes de tempête](#) de la [section 5.4.1](#) s'appliquent également :

- **Dimensionnalité** : Les modèles bidimensionnels (hauteur moyenne de l'eau) sont presque toujours adéquats pour les applications relatives aux inondations de surface.
- **Domaines et étendue du modèle** : Le modèle doit s'étendre suffisamment loin à l'intérieur des terres pour dépasser la portée et l'élévation des inondations simulées les plus graves, ce qui peut nécessiter des essais et erreurs ou des hypothèses conservatrices basées sur des analyses régionales.
- **Représentation de la topographie et de la bathymétrie** : La représentation précise des élévations topographiques et bathymétriques est d'une importance cruciale pour la modélisation fiable des inondations de surface. Il est donc nécessaire d'être consciencieux lors du contrôle de la qualité, de l'agrégation des données (et de la citation de références communes) et de l'intégration des ensembles de données de topographie et de bathymétrie à un modèle numérique. Il faut accorder une attention particulière aux éléments linéaires, comme les ponceaux, les remblais routiers et les digues.
- **Résolution spatiale et temporelle** : La résolution spatiale doit être suffisamment élevée pour représenter les éléments topographiques ou bathymétriques importants à la simulation des inondations de surface et pour montrer les voies d'écoulement, ce qui peut nécessiter des tests de sensibilité pour déterminer quelle est la résolution la plus grossière pouvant être utilisée sans compromettre la précision. Pour ce faire, il faut généralement tenir compte du critère de Courant-Friedrichs-Lewy. Le choix du pas de temps du modèle est généralement dicté par des exigences de stabilité numérique, mais il faut sélectionner la résolution temporelle des données de sortie pour capter les niveaux d'eau de pointe et la durée des événements pluvio-hydrologiques.

- **Forçage du modèle et conditions aux limites** : Les conditions aux limites entre le large et la zone côtière sont généralement dérivées de modèles ou d'analyses régionales. Par exemple, les niveaux d'eau (ou les niveaux d'eau et les vitesses) provenant d'analyses régionales peuvent être appliqués à la limite au large du modèle d'inondation de surface. Dans les cas où il n'y a pas d'inondation directe, les conditions aux limites du modèle d'inondation de surface peuvent consister en des écoulements moyens provenant de la modélisation des vagues ou de calculs empiriques. Le choix des paramètres de friction du fond est généralement un élément clé de l'étalonnage et de la validation des modèles et peut se baser sur la classification des sols dérivée des images satellites, des lidars ou d'autres techniques de télédétection. Si nécessaire, les conditions limites des modèles peuvent inclure les apports d'écoulements fluviaux et du drainage des zones sèches.
- **Physique du modèle** : La plupart des modèles hydrodynamiques bidimensionnels (eaux peu profondes) à code source ouvert disponibles dans le commerce intègrent les processus physiques importants pertinents pour la simulation des inondations de surface.
- **Étalonnage et validation des modèles** : Obtenir les données pour calibrer les modèles d'inondation de surface est souvent un défi important. Idéalement, les données de levés de la ligne des hautes eaux seront disponibles pendant et après l'inondation pour les inondations historiques importantes, mais il en manque souvent. L'imagerie satellitaire à haute résolution pendant les inondations graves peut également être utilisée pour calibrer les modèles d'inondation de surface en permettant l'identification des zones inondées, mais elle rate souvent la valeur de crête d'une inondation courte ou obscurcie par la couverture nuageuse. Il est également possible d'utiliser les levés ou les observations de lignes de varech et de débris, les preuves photographiques ou les récits descriptifs obtenus auprès des personnes présentes lors des inondations pour une évaluation semi-quantitative ou qualitative de l'habileté du modèle (voir l'[encadré 4-3](#) de la [section 4.3](#)). Les individus ou les communautés peuvent également disposer de photographies ou de documents écrits personnels. Tirer parti de cette « science citoyenne » peut constituer une ressource clé. Ces données peuvent être utilisées pour compléter les sources de données quantitatives afin de développer une base plus complète pour l'évaluation de la capacité du modèle.
- **Données de sortie du modèle** : Généralement, elles sont déterminées selon les exigences de l'analyse des risques et peuvent inclure les zones inondées, la hauteur de l'eau et les vitesses de ruissellement. Les conséquences et les dommages sont généralement quantifiés en fonction du nombre et des types de biens exposés aux eaux de crue ainsi que de la hauteur de l'inondation (RNCAN, 2021). Par conséquent, les données de sortie du modèle souhaitées peuvent inclure les étendues et les hauteurs maximales d'inondation produites par l'onde de tempête. Les spécialistes peuvent également avoir besoin de fournir des renseignements sur la variation temporelle des eaux de crue pendant l'onde de tempête afin de guider l'enquête sur la propagation ou la durée de l'inondation. Certaines procédures d'évaluation des risques utilisent des mesures conjointes hauteur-vitesse pour évaluer la sécurité des personnes (Cox et coll., 2010; Jonkman et Penning-Rowsell, 2008) et les dommages aux infrastructures (FEMA, s.d.; RNCAN, 2021). Lors de la préparation des données de sortie du modèle (valeur de crête ou séries chronologiques), il faut écarter les résultats calculés pendant la période d'ajustement du modèle qui précède sa stabilité.

5.5 Modélisation des risques de tsunamis

5.5.1. Conception du modèle

La génération, la propagation et l'inondation des vagues de tsunami sont le plus souvent modélisées à l'aide des équations de Saint-Venant (ESV) à deux dimensions et de modèles non hydrostatiques. Dans les modèles de tsunamis, on néglige l'accélération verticale des particules et les composantes horizontales de la vitesse sont uniformes avec la profondeur. Comme la longueur d'onde horizontale des tsunamis est beaucoup plus grande que la profondeur de l'eau, ces hypothèses sont généralement correctes pour les tsunamis d'origine sismique. Les ESV non linéaires peuvent être dérivées de plusieurs manières différentes, mais toutes découlent fondamentalement d'une intégration des équations d'Euler ou de Navier-Stokes selon l'hypothèse d'une vitesse et d'une pression hydrostatique horizontales verticalement invariables. En raison de leur nature simple et bien étudiée, les équations de Saint-Venant peuvent être résolues par une grande variété de schémas numériques, tels que les approches des différences finies, des volumes finis et des éléments finis.

TUNAMI, COMCOT, MOST et GeoClaw sont des progiciels populaires (basés sur les ESV) dans le domaine de la modélisation des tsunamis qui ont été validés avec succès par des points de référence et des relevés de niveaux d'eau de tsunamis antérieurs. La méthode MOST (Method of Splitting Tsunami) a été développée à l'origine par une équipe de recherche à la University of Southern California (Titov et Synolakis, 1998); le modèle COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model) a été développé à la Cornell University (Liu et coll., 1994); et le modèle TUNAMI (Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation) a été développé au Japon (Imamura et coll., 1988). À l'aide de différents algorithmes à différences finies, les trois modèles résolvent les mêmes équations de Saint-Venant à deux dimensions horizontales (2DH) non linéaires où sont intégrées les profondeurs d'eau. Le logiciel GeoClaw (LeVeque et coll., 2011) est un progiciel de calcul en développement constant qui résout les ESV basés sur des méthodes de capture de chocs de volumes finis à haute résolution, a recours à une technique d'affinement du maillage adaptatif (AMR) pour la modélisation multiéchelle des tsunamis et a été validé par rapport à diverses références de tsunamis (Gonzalez et coll., 2011).

Les modèles d'ESV, par définition, n'ont pas la capacité de simuler des ondes dispersives, qui pourraient être déterminantes dans les tsunamis générés par des glissements de terrain (Lynett et Liu, 2002) et jouer un rôle important pour les tsunamis de champ lointain se déplaçant sur une longue distance. Pour résoudre ce problème, il faut utiliser un ensemble différent d'équations principales. À cet égard, on utilise les modèles de Boussinesq, qui représentent la continuité des ESV, puisqu'ils peuvent mieux décrire la dispersion des ondes. Par exemple, Kirby et coll. (1998) et Wei et coll. (1995) ont élaboré un modèle des ondes de Boussinesq entièrement non linéaire connu sous le nom de FUNWAVE-TVD et COULWAVE (modélisation des ondes longues et intermédiaires de l'Université Cornell, Lynett et coll., 2002). Le modèle FUNWAVE emploie un schéma hybride de volumes finis et de différences finies MUSCL-TVD et est formulé à la fois en coordonnées cartésiennes et sphériques avec des effets de Coriolis pour une application aux problèmes à l'échelle du bassin océanique. Yamazaki et coll. (2010) ont élaboré une autre approche non hydrostatique qui présente le même ordre d'approximation, mais diffère du formalisme du modèle de Boussinesq. Le logiciel, appelé NEOWAVE (Non-hydrostatic Evolution of Ocean WAVes), a été utilisé pour modéliser des tsunamis générés par

des séismes et des glissements de terrain. Un logiciel similaire, nommé NHWAVE (Non-Hydrostatic Wave Model), basé sur une approche numérique différente, a été développé à l'Université du Delaware (Ma et coll., 2012). Bien que les modèles non linéaires non hydrostatiques puissent mieux simuler les phénomènes physiques associés à la dispersion des vagues, ils sont plus exigeants en matière de calcul. Les modèles d'ESV présentent l'avantage de demander moins d'effort de calcul que d'autres modèles et de produire des résultats simulés fiables pour les tsunamis générés par des séismes. En conséquence, les modèles d'ESV sont plus couramment utilisés pour la simulation de la manifestation entière d'un tsunami.

5.5.2. Formulation du maillage imbriqué

La simulation numérique précise des vagues de tsunamis pour les régions côtières qui s'abaissent rapidement dans l'eau exige que le domaine du modèle soit constitué d'une série de maillages dont la résolution spatiale et temporelle est encore plus fine. L'utilisation de grilles imbriquées permet de résoudre les configurations des vagues de tsunamis lorsqu'elles se propagent dans des régions côtières qui émergent rapidement. L'utilisation de maillages imbriqués pour la modélisation numérique entraîne plusieurs contraintes principales :

- (1) La taille des cellules du maillage est obtenue en divisant le maillage numérique initial, à grande échelle et grossier, par un nombre entier, généralement de 3 à 5. Les nombres entiers supérieurs à ces valeurs peuvent mener à des problèmes d'interface avec le maillage.
- (2) Des maillages imbriqués sont nécessaires dans les zones côtières et le maillage « parent » grossier doit être suffisamment étendu pour résoudre les effets de rétroaction que le maillage imbriqué peut avoir sur le maillage parent pendant la simulation.
- (3) Une bonne interface entre les domaines intérieur et extérieur est nécessaire pour éviter les erreurs et l'instabilité du modèle associées à la correspondance des points entre les différentes mailles. Cela devrait permettre des flux bidirectionnels sans piéger les ondes plus courtes aux limites internes du domaine.
- (4) La bathymétrie à haute résolution, le forçage externe et des données d'observation permettent la mise en place, l'initialisation et la validation de chaque niveau de domaine du modèle.

5.5.3. Résolutions du domaine et du maillage

Afin de simuler la propagation des vagues à partir de la source du tsunami dans les grandes profondeurs océaniques et de prévoir les inondations dans les zones côtières d'intérêt, plusieurs maillages doivent être conçus selon l'approche d'imbrication. Le choix du maillage du modèle tient compte de la nécessité de disposer d'une haute résolution spatiale pour résoudre avec précision la réflexion et la transformation des ondes et d'une grande étendue spatiale pour englober la totalité de la zone source.

Pour tenir compte des éléments importants qui influencent l'inondation, la grille de calcul doit être suffisamment fine pour qu'ils couvrent plus de trois cellules. Le domaine du maillage de calcul doit être suffisamment étendu pour rendre compte des processus dynamiques importants des vagues de tsunami. Alors que la résolution du maillage topographique est déterminée par les sources de données disponibles, la résolution du maillage numérique est déterminée par la longueur des ondes qui doit être correctement résolue. En général, pour une représentation numérique raisonnable de la forme des ondes, la longueur d'une seule onde devrait couvrir au

moins 10 points de mailles. En pratique, cela peut s'avérer difficile en raison de la modification de la longueur de la vague par l'exhaussement et la génération non linéaire de vagues plus courtes en eau peu profonde. En pratique, un espacement horizontal de 10 m entre les mailles est suffisant pour résoudre adéquatement l'évolution détaillée d'un tsunami lors de la modélisation d'une inondation côtière de surface propre à un site, tandis qu'une résolution de 40 à 60 m est probablement suffisante pour l'estimation du déferlement et l'évaluation des risques régionaux. Dans les grandes profondeurs océaniques, des longueurs de maillages de quelques kilomètres peuvent fournir une résolution adéquate.

Encadré 5-8

À titre d'exemple de sélection de la résolution du maillage et de la capacité des modèles à prévoir l'inondation par les vagues dans Boundary Bay après un séisme de Cascadia, on a conçu pour l'étude de cas de la côte Pacifique quatre niveaux de mailles imbriquées allant d'une résolution grossière à une résolution fine : 0,5 minute d'arc pour le nord-est de l'océan Pacifique, 120 m pour la côte sud-ouest de la Colombie-Britannique et le nord-ouest de l'État de Washington (échelle régionale), 30 m pour la région de Vancouver et de Boundary Bay (échelle régionale) et 10 m pour l'inondation causée par un tsunami dans la région locale de Boundary Bay et de Semiahmoo. La modélisation à l'échelle de l'océan est simulée selon des coordonnées sphériques, tandis que les échelles régionales et locales utilisent des quadrillages cartésiens. Avec une approche d'imbrication similaire, les équipes de recherche du MPO ont utilisé quatre maillages numériques ayant diverses résolutions allant de grossières pour l'océan au large à fines pour la zone locale de Boundary Bay : 1,8 km, 370 m, 60 m et 10 m, respectivement.

Encadré 5-9

Dans le cas de la modélisation des tsunamis dus à des failles de croûte, où la source de la croûte est proche de la côte, on a besoin de moins de mailles numériques pour prévoir l'inondation. Sur la base de trois scénarios de faille crustale différents pour la mer des Salish, on a constaté qu'utiliser seulement deux maillages numériques ayant une résolution de mailles fines de 30 m et 10 m suffisait pour prévoir l'évolution de la vague de tsunami dans le cadre de l'étude de cas sur la côte Pacifique et l'inondation de Boundary Bay.

5.5.4. Convergence numérique

Il faut effectuer un test de convergence numérique visant à démontrer que les prévisions hydrodynamiques d'intérêt ne dépendent pas de la résolution du maillage. Une approche raisonnable consiste à augmenter et à diminuer la résolution cible de 25 % pour comparer les résultats. Ici, la résolution cible est la résolution de convergence attendue, par exemple 10 m pour une simulation côtière ou sur terre détaillée. Si les données de sortie d'intérêt sont l'élévation maximale de la surface de l'eau près d'un endroit particulier, ces valeurs comme prévues par les simulations avec différentes résolutions devraient être présentées et comparées. Si les résultats se situent dans une tolérance raisonnable, par exemple 5 % du résultat de la résolution cible, on peut affirmer que la résolution cible est convergente. Des travaux antérieurs d'évaluation des risques de tsunami effectués avec FUNWAVE-TVD le long

de la côte est des États-Unis (p. ex., Grilli et coll., 2015; Schambach et coll., 2018) ont indiqué que la convergence nécessitait un maillage côtier d'une résolution d'au moins 30 m. Il vaut mieux utiliser une résolution de 10 m pour faire converger les résultats de l'inondation et du déferlement du tsunami, ce que recommande également le NTHMP des États-Unis. Plus récemment, afin d'évaluer la convergence pour l'évaluation des risques côtiers le long de la Côte d'Azur, Nemat et coll. (2019) ont effectué un ensemble plus récent de simulations et ont conclu que le déferlement du tsunami obtenu à l'aide de maillages à résolution de 40 m et de 10 m semble mutuellement cohérent, ce qui indique que la convergence de ces simulations pourrait avoir été atteinte.

Encadré 5-10

Dans l'étude de cas de la côte Pacifique, pour le scénario de tsunami causé par une faille crustale, on a obtenu des séries chronologiques de hauteur des vagues à différents endroits de Boundary Bay selon trois résolutions de maillage (120 m, 30 m et 10 m). On les a ensuite comparées pour en évaluer la convergence. On a constaté que la hauteur des vagues avec une résolution de maillage de 30 m était très proche de la résolution cible de 10 m, alors que la hauteur des vagues basée sur un maillage de 120 m différait considérablement de la résolution cible.

5.5.5. Intervalles de temps

Le schéma numérique de la plupart des modèles de tsunami est explicite; de plus, l'intervalle de temps maximal admissible pour la stabilité est déterminé par la condition de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) (Courant et coll., 1967) et est donc lié à la taille de la maille utilisée. Selon cette condition, le nombre de Courant, qui décrit le nombre de cellules que traverse une particule d'eau pendant un intervalle de temps (Ata, 2018), doit être une valeur positive et inférieure à un ($0 < C \leq 1$); on recommande généralement une valeur de $C = 0,5$ pour les simulations, ce qui représente un compromis entre la stabilité du modèle, sa précision et la demande de calcul. En général, plus la résolution du maillage est fine, plus les intervalles de temps sont petits afin de maintenir la stabilité du modèle. Des intervalles de temps plus petits rendent le modèle plus coûteux sur le plan des calculs.

5.5.6. Niveau de référence du modèle

Les simulations sont généralement effectuées pour des heures d'arrivée du tsunami qui coïncident avec les heures de pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM) du système de référence altimétrique canadien. Le National Tsunami Hazard Mapping Program de 2010 (Nikolsky et coll., 2013) recommande que les cartes d'inondation soient calculées en utilisant la marée haute comme condition initiale de la modélisation. L'université de l'Alaska définit la pleine mer supérieure moyenne (PMSM) comme condition initiale (Suleimani et coll., 2013) tandis que l'État de Washington utilise la pleine mer moyenne comme condition initiale de ses cartes d'inondation (Eungard et coll., 2018). La norme canadienne de la PMSMM est proche de la norme américaine de la PMSM et a été utilisée dans de nombreux projets de modélisation de tsunamis sur la côte de la Colombie-Britannique pour Victoria (AECOM, 2013), pour Seal Cove et Victoria Cove (Fine et coll., 2018a, 2018 b) et pour Prince Rupert (Northwest Hydraulic Consultants Ltd., 2019). Conséquemment, pour présenter les valeurs de risque les plus élevées, les cartes de la hauteur des vagues de tsunami et de la vitesse du courant maximales

doivent être citées par rapport à la PMSMM plutôt que par rapport à la marée moyenne ou à une référence géodésique.

Encadré 5-11

Pour la région de Boundary Bay, les marégraphes permanents les plus proches se trouvent à Point Atkinson et Vancouver (Service hydrographique du Canada) au nord et à Cherry Point (NOAA) au sud. La PMSMM est à 1,30 m au-dessus du niveau moyen de la mer (NMM) à Point Atkinson et à 1,32 m au-dessus du NMM à Vancouver; en comparaison, la PMSM utilisée aux États-Unis est à 1,18 m au-dessus du NMM à Cherry Point. Le niveau moyen de la mer se situe à 0,18 m à 0,19 m au-dessus du CGVD2013. Il faut vérifier que les maillages bathymétriques américains et canadiens sont basés sur les mêmes niveaux de référence afin qu'il n'y ait pas de discontinuités « artificielles » dans la profondeur. Par commodité, on a ajouté une valeur de référence commune de 1,2 m dans toute la région pour la modélisation des tsunamis dans le cadre de l'étude de cas sur la côte Pacifique.

5.5.7. Validation et vérification du modèle

Comme le recommande le National Tsunami Hazard Mapping Program (NTHMP, 2011), il faut valider et vérifier tous les modèles numériques utilisés pour la cartographie des zones inondables. La « validation » fait référence à la confirmation que les résultats du modèle sont raisonnablement cohérents avec les données disponibles. La vérification, quant à elle, fait référence à la confirmation qu'un modèle est exempt d'erreurs. La meilleure façon de valider les modèles est de soumettre chacun d'entre eux à une série d'essais de référence communément acceptés par la communauté. Les trois catégories habituelles de données de référence utilisées pour définir les essais de référence pour la validation des modèles numériques de tsunamis sont (i) les solutions analytiques, (ii) les expériences en laboratoire et (iii) les mesures sur le terrain. La vérification des modèles numériques est un processus continu. Même les modèles numériques éprouvés doivent être soumis à des tests supplémentaires à mesure qu'on découvre de nouvelles connaissances et méthodes ou de meilleures données. De nouveaux tests de référence doivent également être définis pour tenir compte des nouvelles caractéristiques des sources de tsunamis ou des effets complexes sur les côtes. Par conséquent, tous les modèles numériques existants, en fonction de leurs capacités, doivent être soumis régulièrement à des tests de référence sélectionnés pour validation et vérification. La suite officielle d'essais de référence a été initialement assemblée selon les recommandations de Synolakis et coll. (2007).

Pour les cas réels, dans la mesure du possible, les hauteurs de vagues simulées, les temps d'arrivée des vagues et la tendance générale des vagues doivent correspondre aux séries chronologiques observées aux marégraphes, aux manomètres et aux autres données d'observations disponibles. Ensuite, le déferlement maximal simulé doit être comparé aux données d'observation sur le terrain, le cas échéant. L'évaluation des résultats du modèle par rapport aux données d'observation doit être étayée par des méthodes statistiques, par exemple en calculant les paramètres de moyenne et d'écart-type et de différence de l'écart-type.

5.5.8. Condition initiale

Une simulation réussie de la propagation des tsunamis et une prévision précise de l'heure d'arrivée et de la hauteur des vagues à différents endroits reposent sur une estimation correcte de la géométrie du plan de faille du séisme et du type de faille. Les failles interplaques dans les zones de subduction ont causé la plupart des grands tsunamis historiques. Pour de telles ruptures, le déplacement du plancher océanique qui en résulte peut être estimé en utilisant la théorie élastique linéaire de la rupture (Okada, 1985).

Le déplacement vertical du plancher océanique (soulèvement et affaissement) dû à un séisme est défini comme étant la condition initiale. En partant du principe que la déformation ascendante du plancher océanique est impulsienne et que l'eau de mer est incompressible, le profil initial de la surface libre de l'océan reproduit la déformation. Cette hypothèse est acceptable pour les tsunamis d'origine sismique puisque le temps de rupture est beaucoup plus court que la période de l'onde. Pour une condition donnée de la région source, définie soit par les élévations initiales de la surface libre, soit par l'historique du déplacement du plancher océanique, les modèles hydrodynamiques peuvent simuler avec précision la propagation d'un tsunami sur une longue distance, à condition qu'il existe des données bathymétriques précises du trajet de propagation.

La déformation due à un tremblement de terre doit également être ajoutée au modèle numérique d'élévation (MNE), ce qui est important lorsque ces changements s'étendent vers la terre ferme (topographie). Par exemple, pour un scénario de zone de subduction de Cascadia, certaines parties de la côte ouest de l'île de Vancouver s'enfoncent après le séisme en raison de l'affaissement, ce qui doit être pris en compte pour la modélisation de l'inondation par tsunami.

5.5.9. Conditions aux limites

Il existe trois principaux types de condition aux limites : les limites ouvertes, les limites étanches et les limites perméables. Pour les conditions aux limites ouvertes, les variables de ruissellement de la cellule de frontière intérieure sont copiées dans la cellule fantôme pour permettre des gradients nuls à la frontière; on peut également prescrire des conditions pour imposer le ruissellement d'entrée et de sortie. Pour les conditions aux limites fermées, la vitesse normale et le gradient de la profondeur de l'eau sont fixés à zéro aux limites solides. Par exemple, Giles et coll. (2020) décrivent l'application des cellules fantômes pour prescrire des conditions limites.

Dans FUNWAVE, une condition de paroi aux limites et une condition d'absorption aux limites sont mises en œuvre selon Kirby et coll. (1998). La condition aux limites pour le premier maillage extérieur imbriqué est une limite perméable (« éponge »). La longueur de la couche d'éponge est généralement considérée comme étant égale à une ou deux fois la longueur d'onde d'un tsunami typique.

5.5.10. Durée d'exécution du modèle

La durée d'exécution du modèle doit être suffisante pour capter l'inondation maximale de la simulation de tsunami et pour estimer une période où sont présentes des vagues dangereuses. Le choix de la durée d'exécution dépend principalement de la distance entre la région source du tsunami et la zone d'inondation étudiée. Par exemple, pour une étude sur une inondation de la

région de Boundary Bay en Colombie-Britannique causée par un séisme comme celui de 1964 en Alaska, on a choisi une simulation de 15 heures, alors que pour un séisme de la zone de subduction de Cascadia, on a choisi une simulation de 10 heures. Pour un scénario de faille crustale située à proximité de Boundary Bay, on a constaté qu'une simulation de trois heures suffit pour modéliser les principales caractéristiques des vagues de tsunami, de leur formation à l'inondation de la côte.

5.5.11. Friction

Bien que la friction du fond soit relativement peu importante pour la propagation des tsunamis dans les grandes profondeurs océaniques, la dissipation de l'énergie par le frottement du fond joue un rôle majeur dans la dissipation du déferlement d'ondes maximal sur la côte. Fondamentalement, la dissipation par frottement est causée par l'interaction des mouvements des vagues avec le plancher océanique. Une plage lisse et sablonneuse peut générer une dissipation mineure tandis qu'un récif corallien ou une forêt de mangrove réduiront l'énergie du tsunami de manière plus importante (Fernando et coll., 2005).

Le frottement est modélisé à l'aide de la formule de Manning, qui consiste en une fonction quadratique caractérisée par un coefficient de frottement du fond. Il faut utiliser un coefficient de frottement de fond « Manning n » qui représente le mieux la rugosité globale du terrain. Si aucun coefficient de Manning n'est prescrit, une valeur constante typique de $n = 0,025 \text{ s/m}^{1/3}$, qui représente un fond sablonneux, peut servir dans l'ensemble du domaine de modélisation du tsunami. Cependant, si on connaît la composition du fond, le facteur de friction qui se rapproche le plus du terrain variable du paysage doit alors servir dans la modélisation des inondations.

5.5.12. Stabilité du modèle

Certains ajustements peuvent être nécessaires pour pallier l'instabilité numérique. Une bathymétrie variant rapidement peut provoquer du bruit numérique dû à un gradient important dans le terme source et une pente de fond trop grande peut provoquer de l'instabilité numérique. D'après l'expérience acquise avec FUNWAVE, il faut éviter les gradients de profondeur supérieurs à 1,0 dans le modèle.

Les interfaces de mouillage et de séchage sont une autre source possible d'instabilité numérique. L'utilisation de très faibles valeurs de profondeur minimale peut entraîner une grande vitesse au point de mouillage-séchage, ce qui se traduit par un petit pas de temps. L'ajustement de la profondeur minimale peut permettre d'enrayer de l'instabilité. Une profondeur minimale de 0,1 m est considérée comme étant une valeur par défaut du seuil de mouillage-séchage pour le maillage de plus haute résolution (10 m). Pour les maillages à plus faible résolution, on pourrait choisir une plus grande profondeur minimale. Par exemple, pour le projet Boundary Bay, ONC a utilisé 0,1 m et 0,3 m de profondeur minimale pour les maillages à résolution de 10 m et 30 m, respectivement.

Pour les simulations de tsunamis, la friction du fond peut grandement toucher le ruissellement dans la zone d'inondation et les estimations du déferlement, bien qu'inclure le frottement peut se répercuter sur la stabilité numérique près du point de mouillage-séchage lorsque le facteur de profondeur de l'eau disparaît. À cet égard, on suggère une profondeur d'eau minimale de 0,1 m pour la modélisation à l'échelle du terrain.

Le modèle FUNWAVE utilise un plafond de nombre de Froude pour éviter une vitesse de ruissellement irréaliste dans des eaux très peu profondes. Des vitesses de ruissellement irréalistes se produisent généralement aux interfaces mouillage-séchage. La valeur par défaut du plafond de Froude est de 10,0. L'utilisation d'une valeur plus faible, comme 3,0 ou moins, permet d'éviter le problème et d'améliorer l'efficacité du modèle par rapport à l'algorithme de condition CFL. Cela dit, un plafond du nombre de Froude inférieur à 1,5 n'est pas recommandé puisqu'il pourrait plafonner les vitesses du bord avant d'un courant d'inondation.

5.5.13. Données de sortie

Les simulations numériques fournissent une série de données de sortie qui peuvent être présentées de différentes manières. Ces données de sortie de modèle doivent répondre aux exigences des tâches d'évaluation des risques. Les données de sortie d'un modèle de tsunami doivent inclure l'élévation de la surface de l'eau, les courants provoqués par le tsunami (en tant que composantes est-ouest et nord-sud), l'étendue de l'inondation, la hauteur maximale des vagues du tsunami et les courants maximums provoqués par le tsunami, et peuvent inclure une évaluation des risques (p. ex. profondeur x vitesse). La durée de l'intervalle des données de sortie doit être suffisamment raisonnable pour montrer les changements progressifs de ces paramètres. L'intervalle des données de sortie doit être au moins toutes les cinq minutes, bien que des intervalles plus petits (p. ex., toutes les minutes) soient préférables.

Pour l'analyse des risques liés aux tsunamis, les types de données de sortie typiques doivent être présentés comme suit.

Aperçus de l'élévation de la surface et de la vitesse du courant

Les aperçus de l'élévation ou de la vitesse de la surface de l'eau illustrent le paramètre en deux ou trois dimensions spatiales à un moment précis. Une série d'aperçus allant de la haute mer aux zones côtières est utile pour représenter graphiquement l'évolution spatiale du tsunami dans un rapport technique.

Séries chronologiques de données de sortie du modèle

Les séries chronologiques sont utilisées pour présenter les variations temporelles d'un paramètre simulé à un seul endroit. Ces diagrammes sont utiles pour présenter l'historique de l'élévation de la surface de l'océan à proximité d'un site ou pour un endroit situé au large, tel que l'endroit situé à la limite du large du maillage d'inondation côtière à haute résolution. La résolution temporelle des séries chronologiques doit être suffisante pour délimiter les pics, les creux et la période des vagues.

Cartes des maximums de tsunamis

Les cartes de la hauteur maximale des vagues de tsunami, de l'étendue de l'inondation et des courants produits par le tsunami constituent des représentations graphiques importantes d'une simulation précise. Ces images sont utiles pour illustrer les niveaux maximums atteints à un endroit particulier.

Résultats présentés sous forme de tableau

En plus des images, une analyse des dangers doit également inclure un tableau récapitulatif des résultats propres au site. Ce tableau doit inclure les propriétés du tsunami pour chaque site,

telles que : l'heure d'arrivée initiale du tsunami, l'heure d'arrivée des pics de vagues, les amplitudes maximale et minimale des vagues, les périodes de vagues dominantes et les courants maximaux produits par le tsunami. Ces propriétés doivent être répertoriées pour toutes les sources de tsunamis incluses dans l'analyse propre au site, pour tous les emplacements pertinents du site.

5.6 Effets des changements climatiques

Les changements climatiques influencent de plusieurs manières, et devraient continuer à influencer, les risques d'inondation côtière :

- Le changement du niveau relatif de la mer modifiera la fréquence et la gravité des inondations provoquées par les marées, les ondes de tempête et les effets des vagues.
- Dans les régions côtières sujettes à une couverture de glace saisonnière, le recul de la glace de mer et l'allongement des saisons de mer libre entraîneront probablement une augmentation de la fréquence et de la gravité des inondations côtières.
- La fréquence et l'intensité des tempêtes peuvent changer à l'avenir, entraînant des changements dans la fréquence et la gravité des ondes de tempête et des vagues qui contribuent aux risques d'inondation côtière.

Les sections suivantes donnent des indications pour intégrer certains de ces effets dans la modélisation et l'analyse des dangers.

5.6.1. Changement relatif du niveau de la mer

Les projections du niveau relatif de la mer (James et coll., 2021) sont fournies par le Centre canadien des services climatiques à [Donneesclimatiques.ca](https://donneesclimatiques.ca) (lien direct [<https://donneesclimatiques.ca/variable/>], faites défiler jusqu'à Changement du niveau de la mer]), basées sur le cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Church et coll., 2013) (voir le chapitre 6 pour une description des scénarios climatiques et de la variabilité relative du niveau de la mer au Canada). Les projections du niveau de la mer fournissent les renseignements de base auxquels on peut intégrer d'autres renseignements sur les ondes de tempête, les marées hautes et les vagues afin de déterminer les futurs niveaux d'eau élevés et les risques d'inondation.

Les projections du niveau de la mer sont disponibles sur <https://donneesclimatiques.ca/> pour chaque décennie jusqu'à l'année 2100. En fonction de la portée et de l'échéance du projet, on peut souhaiter envisager des projections du niveau de la mer pour une ou deux décennies futures ou des projections pour la fin du siècle. Pour de nombreux emplacements et applications, l'élévation projetée du niveau de la mer correspondant au 95^e percentile du scénario RCP8.5 à émissions élevées peut présenter le plus grand intérêt puisqu'elle représente la plus haute élévation relative du niveau de la mer projeté. Les spécialistes ayant une faible tolérance aux risques d'élévation du niveau de la mer peuvent également envisager le scénario le plus éloigné de 2100, qui suppose une élévation supplémentaire de 65 cm du niveau de la mer à l'échelle mondiale, sur la base d'une fonte rapide supposée de certaines parties du glacier continental de l'Antarctique, ajoutée à la projection médiane du RCP8.5. Ce scénario indique une élévation du niveau de la mer de 139 cm en 2100. Des scénarios encore plus élevés en 2100 (jusqu'à 2,5 m) sont fournis par la National Oceanic and Atmospheric Administration des États-Unis (Sweet et coll., 2017). Le spécialiste peut souhaiter considérer

ces valeurs plus élevées si la tolérance au risque d'élévation du niveau de la mer est extrêmement faible ou s'il envisage un horizon temporel plus long allant jusqu'à 2200.

Dans les régions où l'on projette une baisse du niveau de la mer, comme la baie d'Hudson et une grande partie de l'archipel arctique canadien (voir le chapitre 4), on peut s'intéresser aux dangers pour la navigation découlant de la réduction de la profondeur de carène. Dans ce cas, le 5^e percentile du RCP2.6 à faibles émissions présente les projections les plus grandes de la baisse relative du niveau de la mer à prendre en considération. Cette projection serait également pertinente pour l'affaissement potentiel d'infrastructures côtières ou d'éléments naturels de valeur, comme les approches et les plages utilisées pour le levage en mer.

Le site <https://donneesclimatiques.ca/> fournit des cartes du changement relatif prévu du niveau de la mer. Des tableaux affichant les prévisions du changement relatif du niveau de la mer peuvent être téléchargés pour des lieux précis. Les spécialistes qui effectuent des enquêtes régionales, dont les échelles couvrent plusieurs kilomètres ou plus, peuvent souhaiter utiliser les fichiers géospatiaux nationaux des changements projetés du niveau de la mer (James et coll., 2021). Ces valeurs prévues peuvent être combinées de plusieurs façons avec les vagues, les ondes de tempête et les variations de la marée pour discerner les risques d'inondation futurs. Au fur et à mesure de l'évolution de la recherche, les modèles doivent prendre en compte les effets du soulèvement ou de l'affaissement terrestres dus aux tremblements de terre sur les projections du niveau de la mer. Toutefois, à l'heure actuelle, il n'est pas possible de fournir une orientation sur la manière d'intégrer ces effets.

Par exemple, l'Outil canadien d'adaptation aux niveaux d'eau extrêmes (OCANEE) est un outil de planification scientifique pour l'adaptation aux changements climatiques des infrastructures côtières liées aux niveaux d'eau extrêmes futurs et aux changements du régime des vagues (<https://www.bio.gc.ca/science/data-donnees/can-ewlat/index-fr.php>). L'outil comprend deux composantes principales : 1) la hauteur d'élévation et 2) le régime des vagues. L'OCANEE a été élaboré principalement pour les emplacements des ports pour petits bateaux (PPB) de Pêches et Océans Canada (MPO), mais il peut également servir pour la planification côtière des infrastructures le long des côtes océaniques du Canada. Les hauteurs d'élévation sont les changements recommandés dans l'élévation des infrastructures côtières nécessaires pour maintenir le niveau actuel de risque d'inondation dans un scénario futur d'élévation du niveau de la mer. Les événements de niveau d'eau extrêmes passés relevés par les marégraphes sont combinés de manière statistique rigoureuse avec les projections de changements relatifs du niveau de la mer pour fournir les hauteurs de niveau de la mer.

D'autres approches sont plus ou moins complexes. La modélisation hydrodynamique des niveaux d'inondation actuels dus aux ondes de tempête, aux variations des marées et aux vagues peut fournir l'étendue et la profondeur des inondations actuelles. Dans le cadre d'un scénario d'élévation du niveau de la mer future, les profondeurs d'inondation peuvent être augmentées en conséquence pour estimer les profondeurs d'inondation futures. Une approche plus réaliste sur le plan physique impliquerait une simulation dynamique des inondations en ajustant la bathymétrie du modèle ou le niveau moyen de l'eau en supposant une quantité définie d'élévation relative du niveau de la mer (voir l'[encadré 5-15](#) ci-dessous), ce qui permettrait de saisir le plan physique du ruissellement de l'eau et de fournir une meilleure estimation des conditions d'inondation futures. L'évolution future des infrastructures, dont celle des protections côtières, comme les digues, devra être explicitement intégrée dans les modèles numériques d'élévation si l'on veut en déterminer avec précision les effets sur les niveaux

d'inondation futurs. La simulation des changements géomorphologiques sur de longues échelles de temps pertinentes pour les effets de l'élévation du niveau de la mer n'est pas pratique, en particulier si l'on considère l'incertitude entourant les forces physiques motrices (p. ex. le régime des vagues), mais dans de nombreuses régions, il s'agit probablement d'un facteur important qui influence la manière dont l'élévation du niveau de la mer influencera les risques d'inondation côtière. Le cas échéant, il faut tenir compte de l'exploration d'autres réactions géomorphologiques ou résultats afin de mieux comprendre les risques associés.

Encadré 5-12

Figure 5.8 ci-dessous montre l'étendue maximale des inondations simulées provoquées par les ondes de tempête de l'étude de cas de l'Atlantique pour le scénario ayant une PDA de 1 % dans la Péninsule acadienne, dans le cadre d'un scénario actuel et de trois scénarios futurs du niveau moyen de la mer représentatifs d'une élévation du niveau mondial de la mer de 0,5 m, 1,0 m et 2,0 m, respectivement. On a ajusté la bathymétrie du modèle à partir des prévisions d'élévation relative du niveau de la mer modélisées par James et coll. (2021) avant de simuler les ondes de tempête.

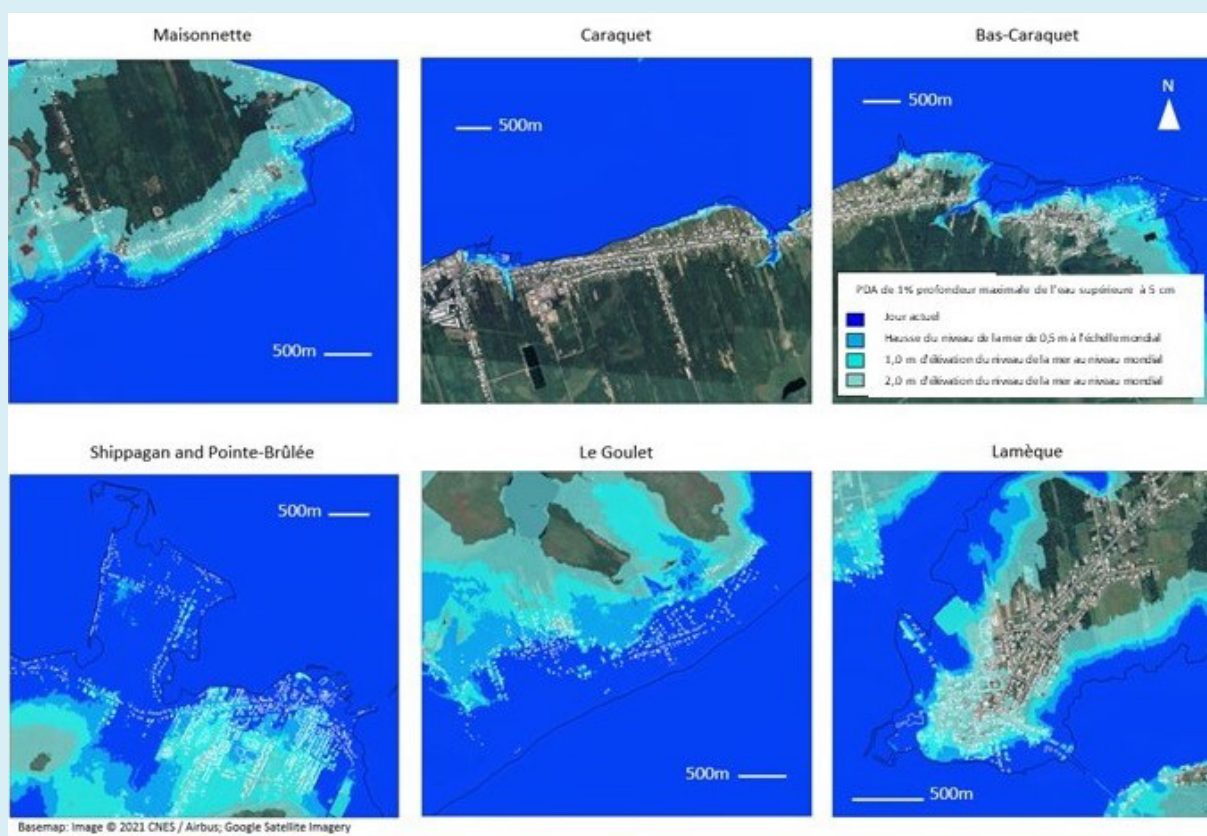


Figure 5.8. Étendue maximale de l'inondation pour un événement ayant une PDA de 1 % pour les niveaux de la mer actuels et les niveaux de la mer futurs tenant compte de l'EMNM.

5.6.2. Changement de l'état des glaces

Le déclin de la couverture de glace de mer et l'allongement des saisons de mer libre observés dans les régions côtières du Canada au cours du dernier demi-siècle devraient se poursuivre au XXI^e siècle et entraîneront probablement une exposition accrue aux vagues et aux ondes de tempête (Greenan et coll., 2018). L'état des connaissances sur les changements prévus de l'état des glaces de mer est résumé par Greenan et coll. (2018). Des modèles hydrodynamiques intégrant la physique des interactions air-glace-eau peuvent servir à explorer les scénarios, les vulnérabilités et les effets potentiels de la modification de la couverture de glace sur les ondes de tempête et les marées (Kim et coll., 2021).

5.6.3. Changements dans les ondes de tempête, les vagues et la variabilité climatique

La fiabilité des changements prévus des vagues et des ondes de tempête dans les régions côtières du Canada est généralement faible, sauf dans les régions où la couverture de glace est saisonnière (Greenan et coll., 2018). Les cycles climatiques, tels que l'oscillation australe El Niño–La Niña (OAEN), peuvent faire fluctuer les niveaux d'eau dans le nord-est du Pacifique de +0,12/-0,04 m en moyenne (Barnard et coll., 2015). Étant donné que les projections concernant la fréquence et l'intensité futures des événements OAEN sont incertaines (Barnard et coll., 2015), il peut être prudent d'envisager les risques d'inondation futurs dans des conditions de valeur de crête d'El Niño. Des projections à résolution réduite des futures ondes de tempête et vagues extrêmes commencent à être élaborées pour certaines côtes canadiennes (Casas-Prat et coll., 2018; Casas-Prat et Wang, 2019). Toutefois, la robustesse des projections, en particulier dans les mers où la glace n'est pas un facteur déterminant, est mise à mal par les incertitudes inhérentes aux projections des paramètres de circulation atmosphérique issues des modèles climatiques (Shepherd, 2014; Casas-Prat et coll., 2018). Si des projections solides des changements dans le caractère des tempêtes (intensité, direction des trajectoires des tempêtes, durée), des ondes de tempête et des vagues extrêmes deviennent disponibles, ces renseignements pourraient être intégrés dans la modélisation et l'analyse des risques d'inondation côtière afin de déterminer les risques futurs. Jusqu'à ce que des projections robustes existent, il faut effectuer des analyses de sensibilité et des tests basés sur des scénarios.

Encadré 5-13

Les changements potentiels dans la fréquence et l'intensité des tempêtes au fil du temps et dans toute autre non-stationnarité doivent être pris en compte lors de l'analyse des risques d'inondation côtière pour les évaluations de risques visant à guider la prise de décisions pour des horizons temporels s'étendant sur plusieurs décennies dans l'avenir. Cependant, l'incertitude et la variabilité entre modèles des projections des vents extrêmes futurs rendent cette tâche difficile en pratique, et la compréhension des répercussions climatiques futures sur les conditions de tempête côtière demeure le sujet de recherches en cours (Casas-Prat et Wang, 2019; Murphy et coll., 2020). Dans de nombreuses régions, les changements du niveau moyen de la mer sont probablement le facteur prédominant qui touche la fréquence accrue des niveaux d'eau extrêmes. Toutefois, une simple analyse de sensibilité effectuée par Bernier et coll. (2007) pour Halifax a démontré « qu'il ne faut pas négliger les changements dans l'activité orageuse » [traduction libre].

5.7 Références

- AECOM. (2013). *Modelling of Potential Tsunami Inundation Limits and Run-Up, Capital Regional District, projet n° 6024 2933*, 36 p.
- American Society of Civil Engineers. (2017). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (7-16)*. American Society of Civil Engineers.
- Ata, R. (2018). *Telemac2d User Manual (Version v8p0)*.
- Atkinson, D. E., Forbes, D. L., & James, T. S. (2016). *Chapter 2: Dynamic coasts in a changing climate*. In Lemmen, D.S., Warren, F.J., James, T.S. & Mercer Clarke, C.S.L. (Eds.). *Canada's Marine Coasts in a Changing Climate (27-68)*. Government of Canada.
- Barker, A. & 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. & 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. & Hansen, J. E. (2015). *Coastal vulnerability across the Pacific dominated by El Niño/Southern Oscillation*. Nature Geoscience, 8(10), 801–807.
- Barnard, P. L., Erikson, L. H., Foxgrover, A. C., Hart, J. A. F., Limber, P., O'Neill, A. C., Van Ormondt, M., Vitousek, S., Wood, N., Hayden, M. K. & Jones, J. M. (2019). *Dynamic flood modeling essential to assess the coastal impacts of climate change*. Scientific Reports, 9(1), 4309. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40742-z>
- Bastidas, L. A., Knighton, J. & Kline, S. W. (2016). *Parameter sensitivity and uncertainty analysis for a storm surge and wave model*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 16(10), 2195–2210.
- Benoit, M., Marcos, F. & Becq, F. (1996). *Development of a third-generation shallow-water wave model with unstructured spatial meshing*. Comptes rendus, International Conference on Coastal Engineering, 465–478.
- Bernardara, P., Mazas, F., Kergadallan, X. & Hamm, L. (2014). *A two-step framework for over-threshold modelling of environmental extremes*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 14, 635–647. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-635-2014>
- Bernier, N. B. & Thompson, K. R. (2006). *Predicting the frequency of storm surges and extreme sea levels in the northwest Atlantic*. Journal of Geophysical Research, 111. <https://doi.org/10.1029/2005JC003168>
- Bernier, N. B., Thompson, K. R., Ou, J. & 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>

Birnbaum, G. & Lüpkes, C. (2002). *A new parameterization of surface drag in the marginal sea ice zone*. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 54(1), 107–123.

<https://doi.org/10.3402/tellusa.v54i1.12121>

Blain, C. A., Westerink, J. J. & Luettich Jr, R. A. (1994). *The influence of domain size on the response characteristics of a hurricane storm surge model*. Journal of Geophysical Research : Oceans, 99(C9), 18467–18479.

Bode, L. & Hardy, T. A. (1997). *Progress and recent developments in storm surge modeling*. Journal of Hydraulic Engineering, 123(4), 315–331.

Bornhold, B. D. & Thomson, R. E. (2012). *Chapter 10: Tsunami hazard assessment related to slope*. Dans Clague, J. J. & Douglas, S. (Eds.), *Landslides: Types, Mechanisms and Modeling*. Cambridge University Press.

Bricker, J. D., Munger, S., Pequignet, C., Wells, J. R., Pawlak, G. & Cheung, K. F. (2007). *ADCP observations of edge waves off Oahu in the wake of the November 2006 Kuril Islands tsunami*. Geophysical Research Letters, 34(23).

Casas-Prat, M., Wang, X. L. & Swart, N. (2018). *CMIP5-based global wave climate projections including the entire Arctic Ocean*. Ocean Modelling, 123, 66–85.

<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.12.003>

Casas-Prat, M., & Wang, X. L. (2020). *Projections of extreme ocean waves in the Arctic and potential implications for coastal inundation and erosion*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 125(8). <https://doi.org/10.1029/2019JC015745>

Caston, M. (2021). *Tsunamigenic Potential of Crustal Faults in the Southern Strait of Georgia and Boundary Bay*. [Master's thesis, University of Victoria]. <http://hdl.handle.net/1828/13351>

Church, J.A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M. A., Milne, G. A., Nerem, R. S., Nunn, P. D., Payne, A. J., Pfeffer, W. T., Stammer, D., & Unnikrishnan, A. S.. (2013). Sea Level Change. In Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

CIRIA, CUR et CETMEF. (2007). *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering* (2^e édition). CIRIA.

Cornett, A. & Zhang, J. (2008). *Nearshore wave energy resources, Western Vancouver Island, BC* (Technical Report CHC-TR-51). Canadian Hydraulics Centre.
<https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/canmetenergy/files/pubs/CHC-TR-051.pdf>

Couasnon, A., Sebastian, A. & 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.

Courant, R., Friedrichs, F. & Lewy, H. (1967). *On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics*. IBM Journal of Research and Development, 11(2), 215–234.

Cox, R. J., Shand, T. D. et Blacka, M. J. (2010). *Australian Rainfall and Runoff Revision Project 10: Appropriate Safety Criteria for People — Rapport de l'étape 1* (P10/S1/006). Engineers Australia.

Daigle, R. (2017). *Mise à jour des estimations de l'élévation du niveau de la mer et des inondations pour les secteurs côtiers du Nouveau-Brunswick, sur la base du cinquième rapport d'évaluation du GIEC*. R.J. Daigle Enviro.

De Vries, H., Breton, M., de Mulder, T., Krestinitis, Y., Ozer, J., Proctor, R., Ruddick, K., Salomon, J. C. & Voorips, A. (1995). *A comparison of 2D storm surge models applied to three shallow European seas*. Environmental Software, 10(1), 23-42. [https://doi.org/10.1016/0266-9838\(95\)00003-4](https://doi.org/10.1016/0266-9838(95)00003-4)

DHI. (2017). *Mike 21 SW Scientific Documentation*.
https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/M21SW_Scientific_Doc.pdf

Didier, D., Baudry, J., Bernatchez, P., Dumont, D., Sadegh, M., Bismuth, E., Bandet, M., Dugas, S. & 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. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12505>

Dube, S. K., Murty, T. S., Feyen, J. C., Cabrera, R., Harper, B. A., Bales, J. D., & Amer, S. (2010). *Storm Surge Modeling and Applications in Coastal Areas*. In Chan, J. C. L. & Kepert, J. D. (Eds.), *Global Perspectives on Tropical Cyclones: From Science to Mitigation*, World Scientific Publishing.

Egbert, G. D. & Erofeeva, S. Y. (2002). *Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides*. Journal of Atmospheric and Ocean Technology, 19, 183–204.

Eungard, D. W., Forson C., Walsh T. J., Gica E & Arcas, D. (2018). *Tsunami Hazard maps of the Anacortes-Bellingham area, Washington – model results from a ~2500-year Cascadia Subduction Zone earthquake scenario*. Washington Geological Survey, série de cartes 2018–2, juin 2018.

Federal Emergency Management Agency. (n.d.). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology: Flood Model—Hazus-MH Technical Manual*. Department of Homeland Security.

Federal Emergency Management Agency. (2011). *Coastal Construction Manual* (FEMA P-55 / Volume II).

Federal Emergency Management Agency. (2016). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping: Coastal Water Levels*.

Federal Emergency Management Agency. (2019). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping: Determination of Wave Characteristics*.

Ferguson, S., Provan, M., Murphy, E. & Kim, J. (2022). *Numerical Simulation of Coastal Flood Hazard in the Acadian Peninsula Region of New Brunswick* (NRC-OCRE-2021-TR-060). Conseil national de recherches Canada.

Fernando, H. J. S., McCulley, J. L., Mendis, S. G., & Perera, K. (2005). *Coral poaching worsens tsunami destruction in Sri Lanka*. Eos Trans. AGU, 86(33) 301-304.

<https://doi.org/10.1029/2005EO330002>

Fine, I. V., Thomson, R. E., Lupton, L. M. & Mundschatz, S. (2018a). *Numerical modelling of an Alaska 1964-type Tsunami at the Canadian Coast Guard Base in Seal Cove, Prince Rupert, British Columbia*. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 321 : v+ 33 p.

Fine, I. V., Thomson, R. E., Lupton, L. M., & Mundschatz, S. (2018b). *Numerical modelling of a Cascadia subduction zone tsunami at the Canadian Coast Guard base in Seal Cove, Prince Rupert, British Columbia* (Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences 321). Pêches et Océans Canada.

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., Bell, T., Manson, G. K., Couture, N. J., Cowan, B., Deering, R. L., Hatcher, S. V., Misiuk, B. & St-Hilaire-Gravel, D. (2018). *Coastal environments and drivers*. Dans Bell, T. et Brown, T.M. (Éds.). *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* (210-249). ArcticNet, Québec, 210–249, https://arcticnet.ulaval.ca/wp-content/uploads/2022/06/IRIS2_synthesis.pdf

Foreman, M. G. G. (2004). *Manual for tidal heights analysis and prediction* (Pacific Marine Science Report 77-10). Institute of Ocean Sciences.

Forrester, W. D. (1983). *Manuel canadien des marées*. Ministère des Pêches et des Océans; Service hydrographique du Canada.

Gao, D., Wang, K., Insua, T. L., Sypus, M., Riedel, M. & Sun, T. (2018). *Defining megathrust tsunami source scenarios for northernmost Cascadia*. Natural Hazards, 94, 445 à 469.

<https://doi.org/10.1007/s11069-018-3397-6>

Giles, D., Kashdan, E., Salmanidou, D. M., Guillas, S. & Dias, F. (2020). *Performance analysis of Volna-OP2—massively parallel code for tsunami modelling*. Computers & Fluids, 209, 104649.

González, F. I., LeVeque, R. J., Chamberlain, P., Hirai, B., Varkovitzky, J. and George, D. L. (2011). *Validation of the GeoClaw Model*. GeoClaw Tsunami Modeling Group, University of Washington.

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., & Perrie, W. (2018). *Chapter 7: Changes in oceans surrounding Canada*. Dans Bush, E. & Lemmen, D.S. (Eds.), *Canada's Changing Climate Report* (pp. 343–423). Government of Canada. <https://changingclimate.ca/CCCR2019/>

Greene, H. G., Barrie, J. V., & Todd, B.J. (2018). *The Skipjack Island fault zone: An active transcurrent structure within the upper plate of the Cascadia subduction complex*. Sedimentary Geology, 378, 61-79.

Grilli, S. T., O'Reilly, C., Harris, J. C., Tajalli-Bakhsh, T., Tehranirad, B., Banihashemi, S., Kirby, J. T., Baxter, C. D. P., Eggeling, T., Ma, G. et Shi, F. (2015). *Modeling of SMF tsunami hazard along the upper U.S. East Coast: detailed impact around Ocean City, MD*. Natural Hazards 76(2), 705–746 <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1522-8>

Haigh, I., Wadey, M., Wahl, T., Ozsoy, O., Nicholls, R., Brown, J., Horsburgh, K. & Bouldby, B. (2016). *Spatial and temporal analysis of extreme sea level and storm surge events around the coastline of the UK*. Scientific Data, 3, 160107, <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.107>

Hawkes, P. J. (2008). *Joint probability analysis for estimation of extremes*. Journal of Hydraulic Research, 46(S2), 246–256.

Hearn, C. J. (2008). *The Dynamics of Coastal Models*. Cambridge University Press.

Heinrich, P. (1992). *Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 118(3), 249–266.

Hicks, S. D. (2006). *Understanding Tides*. National Oceanic and Atmospheric Administration.

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.

H. R. Wallingford. (1998). *The Joint Probability of Waves and Water Levels: JOIN-SEA. A rigorous but practical new approach* (Rapport SR 537). Lancaster University.

Imamura, F., Shuto, N. & Goto, C. (1988). *Numerical simulations of the transoceanic propagation of tsunamis*. [Compte rendu de conférence]. 6th Congress Asian and Pacific Regional Division, IAHR, Japon.

Irish, J.L., Resio, D.T. & Divoky, D. (2011). *Statistical properties of hurricane surge along a coast*. Journal of Geophysical Research : Oceans, 116(C10).

James, T. S., Robin, C., Henton, J. A. & Craymer, M. (2021). Projections relatives du niveau de la mer pour le Canada basées sur le cinquième rapport d'évaluation du GIEC et le modèle national de vitesse de la croûte terrestre NAD83v70VG (Dossier public 8764), Ressources naturelles Canada. <https://doi.org/10.4095/327878>

Jane, R. A., Simmonds, D. J., Gouldby, B. P., Simm, J. D., Dalla Valle, L. & Raby, A. C. (2018). *Exploring the potential for multivariate fragility representations to alter flood risk estimates*. Risk Analysis, 38(9), 1847–1870.

Jiang, L. et LeBlond, P. H. (1992). *The coupling of a submarine slide and the surface waves which it generates*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 97(C8), 12731–12744.

Jonkman, S. N. et Penning-Rowsell, E. (2008). *Human instability in flood flows*. Journal of the American Water Resources Association, 44. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x>

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

- Kelsey, H. M., Sherrod, B. L., Blakely, R. J. & Haugerud, R. A. (2012). *Holocene faulting in the Bellingham forearc basin: Upper-plate deformation at the northern end of the Cascadia subduction zone*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 117(B3).
- KGS. (2022). *Climate Change Flood Risk Mapping Study for Placentia, Carbonear, Victoria and Salmon Cove* (21-3217-002).
- Kim, J., Murphy, E., Nistor, I., Ferguson, S. & Provan, M. (2021). *Numerical Analysis of Storm Surges on Canada's Western Arctic Coastline*. Journal of Marine Science and Engineering, 9(3), 326. <https://doi.org/10.3390/jmse9030326>
- Kim, J., Murphy, E., Ferguson, S., Provan, M. & Nistor, I. (2024). *Numerical simulation of storm surges in the Beaufort Sea and coastal flood hazards in the Hamlet of Tuktoyaktuk, Northwest Territories* (NRC-OCRE-2022-TR-015). Conseil national de recherches Canada.
- Kirby, J., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A. & Dalrymple, R. (1998). *FUNWAVE 1.0, fully nonlinear Boussinesq wave model documentation and users manual* (Rapp. tech. de recherche n° CACR-98-06). Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
- Kovacs, A. & Sodhi, D. S. (1980). *Shore ice pile-up and ride-up: Field observations, models, theoretical analyses*. Cold Regions Science and Technology, 2, 210–288.
- Lawless, M., Hird, M., Rodger, D., Gouldby, B., Tozer, N., Pullen, T., Saulter, A. & Horsburgh, K. (2016). *Investigating coastal flood forecasting — Good practice framework* (Rapport SC140007). Environment Agency (Royaume-Uni). https://assets.publishing.service.gov.uk/media/60362b4a8fa8f5480bbb4545/Coastal_flood_forecasting_a_good_practice_framework_-_report.pdf
- Leonard, L. J. & Bednarski, J. M. (2014). *Field survey following the 28 October 2012 Haida Gwaii tsunami*. Pure and Applied Geophysics, 171(12), 3467–3482.
- LeVeque, R. J., George, D. L., & Berger, M. J. (2011). *Tsunami modeling with adaptively refined finite volume methods*. Acta Numerica, 20, 211-289. <https://doi.org/10.1017/S0962492911000043>
- Lin, L., Demirbilek, Z., Mase, H., Zheng, J., & Yamada, F. (2008). *CMS-Wave: A Nearshore Spectral Wave Processes Model for Coastal Inlets and Navigation Projects* (ERDC/CHL TR-08-13). US Army Corps of Engineers, Coastal and Hydraulics Laboratory.
- Liu, D., Tsarau, A., Guan, C. et Shen, H.H. (2020). *Comparison of ice and wind-wave modules in WAVEWATCH III® in the Barents Sea*. Cold Regions Science and Technology, 172, 103008.
- 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.
- Liu, P. L.-F., Cho, Y.-S., Yoon, S. B., & Seo, S. N. (1995). *Numerical simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii*. In Tsuchiya, Y. & Shuto, N. (Eds.), *Tsunami: Progress in Prediction. Disaster Prevention and Warning* (99-115). Springer Dordrecht.

Lynett, P. & Liu, P. L.-F. (2002). *A numerical study of submarine-landslide-generated waves and run-up*. Proceedings of the Royal Society of London A, 458(2028), 2885–2910.

<https://doi.org/10.1098/rspa.2002.0973>

Lynett P., Wu T. — R. & Liu P. L.-F. (2002). *Modeling wave runup with depth-integrated equations*. Coastal Engineering 46(2), 89–107.

Ma, G., Shi, F. et Kirby, J. T. (2012). *Shock-capturing non-hydrostatic model for fully dispersive surface wave processes*. Ocean Modelling, 43–44, 22–35.

Mader, C. L. (1988). *Numerical Modeling of Water Waves*, University of California Press.

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. & 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. & Archetti, R. (2015). *Coastal flooding: A copula based approach for estimating the joint probability of water levels and waves*. Coastal Engineering, 97, 37–52.

Mazas, F. & Hamm, L. (2016). *An event-based approach for extreme joint probabilities of waves and sea levels*. Coastal Engineering Proceedings, 1(35), 20.

Mazas, F. & Hamm, L. (2017). *An event-based approach for extreme joint probabilities of waves and sea levels*. Coastal Engineering, 122, 44–59.

Ministère des Ressources naturelles de l'Ontario. (2001). *Great Lakes – St. Lawrence River System and Large Inland Lakes Technical Guide for Flooding, Erosion and Dynamic Beaches*. [Fichier informatique]. Watershed Science Centre, ISBN 0-9688196-1-3.

Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development. (2018). *Flood Hazard Area Land Use Management Guidelines*. Ministry of Water, Land and Air Protection, Province of British Columbia. https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/integrated-flood-hazard-mgmt/flood_hazard_area_land_use_guidelines_2017.pdf

Muis, S., Verlaan, M., Winsemius, H. C., Aerts, J. C. & Ward, P. J. (2016). *A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels*. Nature Communications, 7.

Murphy, E. & Khaliq, M. N. (2017). *Input to Canadian national guideline for flood hazard mapping: Coasts & lakes* (OCRE-TR-2017-005). Conseil national de recherches Canada.

Murphy, E., Lyle, T., Wiebe, J., Hund, S. V., Davies, M. & Williamson, D. (2020). *Lignes directrices pour l'évaluation des risques d'inondation côtière pour les applications de conception de bâtiments et d'infrastructures* (CRBCPI-Y5-R2). Conseil national de recherches Canada.

Murphy, E., Osborne, P. & Clohan, D. (2016). *Water level and tsunami design criteria for LNG marine terminals in BC*. [Compte rendu de conférence]. 14^e Triennial International Ports Conference, American Society of Civil Engineers, Nouvelle-Orléans.

Murphy, E., Pilechi, A., & Cousineau, J. (2018). *Regional wave run-up study for the province of New Brunswick. Technical Report* (OCRE-TR-2018-026). National Research Council of Canada. Ocean, Coastal and River Engineering.

Murphy, E., Boisvert, J., McLean, R., Pilechi, V., Cousineau, J., Sushama, L. & Liang, Z. (2019). *Wave run-up contributions to coastal flood hazards in New Brunswick*. [Compte rendu de conférence]. Conférence annuelle : Société canadienne de génie civil 2019, Fredericton.

Murphy, E., Nistor, I., Cornett, A., Wilson, J., & Pilechi, A. (2021). *Fate and transport of coastal driftwood: A critical review*. Marine Pollution Bulletin, 170, 112649.

Narayan, S., Hanson, S., Nicholls, R. J., Clarke, D., Willems, P., Ntegeka, V., & 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), 1431-1439.

National Research Council. (2009). *Mapping the Zone: Improving Flood Map Accuracy*. The National Press.

National Tsunami Hazard Mitigation Program (NTHMP). (2011). *Proceedings and Results of Model Benchmarking Workshop, NOAA Special Report*.

Nemati F., Grilli S. T., Ioualalen M., Boschetti L., Larroque C., & Trevisan J. (2019). *High resolution coastal hazard assessment along the French Riviera from co seismic tsunamis generated in the Ligurian fault system*. Natural Hazards, 96, 553-586.

<https://doi.org/10.1007/s11069-018-3555-x>

Nicolsky, D. J., Suleimani, E. N., Haeussler, P. J., Ryan, H. F., Koehler, R. D., Combellick, R. A., & Hansen, R. A. (2013). *Tsunami inundation maps of Port Valdez, Alaska* (Report of Investigation RI 2013-1). Alaska Division of Geological Geophysical Surveys.

Nistor, I., Goseberg, N. et Stolle, J. (2017). *Tsunami-driven debris motion and loads: A critical review*. Frontiers in Built Environment, 3, 2.

Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (2019). *The City of Prince Rupert Tsunami Flood Risk Assessment* (Final report). City of Prince Rupert. <https://www.princerupert.ca/sites/7/files/2023-06/20190621%203003349%20Prince%20Rupert%20Tsunami%20Report.pdf>

Okada Y. (1985). *Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space*. Bulletin of the Seismological Society of America, 75, 1135–1154.

Piercy, C. D., Simm, J. D., Bridges, T. S., Hettiarachchi, M., & Lodder, Q. (2021). Chapter 5: NNBF Performance. Dans Bridges, T. S., King, J. K., Simm, J.D., Beck, M. W., Collins, G., Lodder, Q. & Mohan R.K. (Eds.), *International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management*. U.S. Army Engineer Research and Development Center.

Poppenga, S. K., Worstell, B. B., Danielson, J. J., Brock, J., Evans, G. A. et Heidemann, H. K. (2014). *Hydrologic enforcement of LiDAR DEMs*. U.S. Geological Survey

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, 959–975.

Pugh, D. T. (1987). *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons Ltd. ISBN 0 471 91 505 X.

Pye, K., Blott, S.J. et Brown, J. (2017). *Advice to Inform Development of Guidance on Marine, Coastal and Estuarine Physical Processes Numerical Modelling Assessments*. Rapport NRW n° : 208, 139 p., Natural Resources Wales, Cardiff.

Reeve, D., Horillo-Caraballo, J., Fox, A., Simmonds, D., Kwan, S., Pan, S. et Greaves, D. (2012). *Coastal defence evaluation: An SPRC approach*. Compte rendu. 33^e conférence internationale de l'ingénierie côtière, Santander.

Resio, D. T., Asher, T. G. et Irish, J. L. (2017). *The effects of natural structure on estimated tropical cyclone surge extremes*. Natural Hazards, 88, 1609–1637.
<https://doi.org/10.1007/s11069-017-2935-y>

Resio, D. T., Irish, J. et Cialone, M. (2009). *A surge response function approach to coastal hazard assessment, part 1: basic concepts*. Natural Hazards, 51(1), p. 163–182.

Resio, D. T. et Westerink, J. J. (2008). *Modeling the physics of storm surges*. Physics Today, 61(9).

RNCan. (2021). *Guide d'orientation fédéral sur l'estimation des dommages causés aux bâtiments et aux infrastructures par les inondations, Version 1.0* (Produit d'information générale 124e).

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.

Schambach L., Grilli S. T., Kirby J. T. et Shi F. (2018). *Landslide tsunami hazard along the upper U.S. East Coast: effects of slide rheology, bottom friction, and frequency dispersion*. Pure and Applied Geophysics <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1978-7>

Schubert, J. E. et Sanders, B. F. (2012). *Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency*. Advances in Water Resources, 41, 49–64. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.02.012>

Shapiro, A. et Simpson, L. (1953). *The effect of a broken ice field on water waves*. Eos Transactions of the American Geophysical Union, 34, 36–42.

Squire, V. A. (2007). *Of ocean waves and sea-ice revisited*. Cold Regions Science and Technology, 49(2), 110–133. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.04.007>

Suleimani, E. N., Nicolsky, D. J. et Koehler, R.D. (2013). *Tsunami Inundation Maps of Sitka, Alaska*. Report of Investigations 2013-3, State of Alaska, Department of Natural Resources, Division of Geological and Geophysical Surveys, Fairbanks, Alaska, 76 p., 1 feuille, échelle 1:250 000. <https://doi.org/10.14509/26671>

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.

Synolakis C. E., Bernard E. N., Titov V. V., Kanoglu, U. et González, F.I. (2007). *OAR PMEL-135 Standards, criteria, and procedures for NOAA evaluation of tsunami numerical models*. Technical report, NOAA Tech. Note. OAR PMEL-135, NOAA/Pacific Marine Environmental Laboratory, Seattle, WA.

The SWAN Team. (2009). *Manuel d'utilisation du SWAN*. Delft University of Technology, Delft.

Titov, V. V. et Synolakis, C. E. (1998). *Numerical modeling of tidal wave runup*, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 124(4), 157–171.

USACE (2002). *Coastal Engineering Manual (CEM), Engineer Manual 1110-2-1100*. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (6 volumes).

van Waveren, R. H., Groot, S., Scholten, H., van Geer, F. C., Wosten, J. H. M., Koeze, R. D. et Noort, J. J. (1999). *Good Modelling Practice Handbook*. Rapport STOWA 99-05, département néerlandais des travaux publics, Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment.

Wahl, T. et Chambers, D. (2015). *Evidence for multidecadal variability in U.S. extreme sea-level records*. J. Geophys. Res. Oceans, 120, 1527–1544, <https://doi.org/10.1002/2014JC010443>

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*. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(1), 64–76, <https://doi.org/10.5589/m03-053>

Wei, G. E., Kirby, J. T., Grilli, S. T. et Subramanya, R. (1995). *A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves*. Partie 1. Highly nonlinear unsteady waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 294, 71–92. <https://doi.org/10.1017/S0022112095002813>

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, <https://doi.org/10.1002/2016GL069522>

Yamazaki Y., Cheung, K. F. et Kowalik, Z. (2010). *Depth- integrated, non-hydrostatic model with grid nesting for tsunami generation, propagation, and runup*. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. <https://doi.org/10.1002/fld.2485>

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), p. 2205–2219.

6.0 Communiquer les résultats de l'évaluation des risques

Auteurs principaux

Julie Van de Valk (Ressources naturelles Canada) et Nicky Hastings (Ressources naturelles Canada)

Citation recommandée

Van de Valk, J. et Hastings, N. L. (2025). Communiquer les résultats de l'évaluation des risques. Dans *Évaluation des aléas d'inondation côtière pour l'analyse fondée sur les risques concernant les côtes marines du Canada*. Éditeurs Ferguson, S., Hastings, N. L., Van de Valk, J., Murphy, E. et Kim, J. Gouvernement du Canada.

6.1 Introduction

Les évaluations des risques d'inondation côtière répondent à la question « quel est le risque d'inondation dans une zone? » pour différentes fins, comme la planification communautaire ou la conception technique. Pour que les renseignements issus d'une évaluation des aléas d'inondation soient compris et utilisés, il faut les transmettre efficacement au public visé. Les modélisateurs des risques doivent veiller à ce que le public visé puisse comprendre leurs résultats grâce à une communication efficace, ce qui permet de garantir que les résultats sont utilisés de manière appropriée et que les connaissances issues de l'évaluation des risques peuvent être mobilisées pour éclairer les décisions et les travaux futurs. L'évaluation des aléas d'inondation utilise une approche basée sur le risque pour s'assurer que plus d'un type d'événement d'inondation est pris en compte. Les aléas d'inondation sont ensuite utilisés pour une évaluation des risques d'inondation afin de déterminer l'impact des inondations sur les récepteurs de risques tels que les bâtiments, les personnes et les infrastructures.

Cette section traite des principes de communication de haut niveau, des directives sur les différents outils de communication et des besoins de communication de publics particuliers.

6.2 Processus de communication

Les stratégies et le style de communication doivent être adaptés aux besoins du public cible (voir la section 6.5). Cependant, des principes directeurs peuvent être appliqués à toute communication. Les principes clés de la communication sont :

- **Respecter les communautés et le savoir autochtones.** Dans le cadre du respect des communautés autochtones, toutes les données et les renseignements sur les communautés autochtones doivent être collectées, protégées, utilisées et partagées selon les [Principes de PCAP des Premières Nations](#)² (Le Centre de gouvernance de l'information des Premières Nations, 2014). Les principes PCAP fournissent des renseignements sur les aspects de propriété, de contrôle, d'accès et de possession des données et des renseignements des Premières Nations. Chaque fois qu'on recherche des connaissances autochtones ou qu'on les intègre dans un projet, il faut suivre le [Cadre stratégique pour le savoir autochtone](#) (Gouvernement du Canada, 2020) tout au long du projet, en partenariat avec les communautés autochtones. Si les connaissances autochtones sont communiquées à un public plus large par le biais du projet, la communication doit être conforme aux souhaits des communautés autochtones et au cadre. Consulter le [chapitre 3](#) pour de plus amples renseignements sur la mobilisation des communautés autochtones. Des informations supplémentaires peuvent être trouvées dans le [Guide d'orientation sur la mobilisation autochtone pour la cartographie des zones inondables](#) (RNCAN, 2024).
- **Identifier les objectifs de la communication.** Des objectifs de communication clairement définis aideront les spécialistes à développer et à affiner les stratégies de communication. Par exemple, l'objectif de la communication peut être de : présenter les méthodes techniques, les résultats et les limites de ceux-ci à un ingénieur; présenter les zones dangereuses à un planificateur communautaire; ou montrer les effets de

² PCAP® est une marque déposée de Le Centre de gouvernance de l'information des Premières Nations (CGIPN).

l'élévation du niveau de la mer au public. Il faut identifier les objectifs de communication au début du processus de rédaction et les énoncer dans le rapport, le cas échéant.

- **Aligner la communication sur le public cible** (voir la [section 6.5](#)).
- **Développer des produits de communication en partenariat avec le public.** Si les auteurs du produit de communication ne sont pas membres du public cible, envisagez de demander à des membres de ce public de développer ou de réviser les outils de communication.
- **Définir clairement la terminologie.** La terminologie doit être clairement définie, axée sur les définitions normalisées, internationales, nationales ou industrielles et en y faisant référence, le cas échéant. Par exemple, il faut utiliser la terminologie trouvée ou mentionnée par renvoi dans les [Profils d'informations sur les dangers : supplément à l'examen de la définition et de la classification des dangers de l'UNDRR-ISC — Rapport technique \(2021\)](#) ou le [Glossaire sur les tsunamis de la Commission océanique intergouvernementale \(2019\)](#) dans la mesure du possible. Même entre pairs techniques, puisqu'il peut y avoir plusieurs interprétations des termes couramment utilisés, on recommande de donner des définitions claires, en utilisant des diagrammes lorsque c'est approprié.
- **Efforcez-vous de permettre à un large public d'accéder aux résultats.** Bien que l'objectif premier d'un produit de communication soit de transmettre des résultats techniques à un public technique, envisagez de résumer l'étude pour le public, ce qui permettra de mobiliser les connaissances techniques en les partageant avec un public élargi, notamment des spécialistes de la planification et de la gestion des urgences, et d'améliorer la compréhension des risques de catastrophe (une des quatre priorités d'action du cadre de Sendai [Nations unies, 2015]).
- **Contextualiser les résultats ayant trait aux risques.** Veillez à ce que les renseignements contextuels soient présentés avec les résultats d'analyse afin de faciliter l'interprétation et la compréhension correctes (et d'éviter les erreurs d'interprétation) des résultats. Par exemple, il peut s'agir de détails concernant le traitement des contributions de la marée ou les structures de protection contre les inondations.
- **Définir l'utilisation appropriée des résultats.** Documentez minutieusement les hypothèses du modèle, expliquez sa précision, soulignez les incertitudes et indiquez explicitement ses limites. Énoncez clairement l'utilisation appropriée des résultats du modèle ainsi que les facteurs pertinents à considérer. Restez attentif à une éventuelle mauvaise interprétation des résultats.

6.3 Interprétation des résultats

Les renseignements contextuels pertinents (p. ex., les détails de l'événement ou du scénario, les hypothèses analytiques et les limites du modèle) doivent accompagner les résultats de l'évaluation des risques pour faciliter l'interprétation (et éviter une mauvaise interprétation ou une mauvaise utilisation) des résultats. Les listes non exhaustives suivantes (dans les sections 6.3.1 et 6.3.2) résument certains éléments qui pourraient devoir être intégrés dans les rapports de projet ou dans d'autres formes de communication (p. ex., des présentations et des cartes) pour étayer l'interprétation des résultats. En outre, les éléments énumérés dans les sections 6.3.1 et 6.3.2 peuvent constituer un matériel de référence précieux pour les utilisateurs des résultats de l'évaluation des risques; il est possible de se référer aux éléments énumérés

pour vérifier qu'on a bien compris le contexte ou pour compiler des questions à l'intention des modélisateurs afin d'obtenir des éclaircissements.

6.3.1. Fournir le contexte des scénarios d'aléas et des événements

Les résultats de l'évaluation des risques doivent être présentés avec des renseignements contextuels relatives aux événements modélisés. Les principales questions directrices sont résumées ci-dessous.

- **Que représentent les événements?** Comprennent-ils les ondes de tempête, les impacts des marées, les impacts des vagues ou l'élévation du niveau de la mer? Comment la probabilité des événements est-elle calculée? La probabilité est-elle corrélée ou indépendante? En quoi cela influence-t-il l'interprétation des résultats? Dans quelle mesure la zone est-elle exposée à la houle ou aux vagues générées par le vent soufflant sur les fetchs locaux?
- **Comment les changements climatiques sont-ils intégrés dans la conception et la modélisation des événements?** L'analyse des changements climatiques tient-elle compte de l'évolution des activités orageuses, de l'élévation du niveau de la mer et d'autres facteurs? Il existe beaucoup d'incertitude quant aux changements de l'intensité des activités orageuses causés par les changements climatiques dans les zones marines du Canada (Greenan et coll., 2018), de sorte que cet aspect n'est pas souvent pris en compte dans la modélisation des risques d'inondation côtière. Les sous-estimations ou surestimations potentielles des risques dues à des facteurs liés aux activités orageuses à considérer doivent être exprimées afin que les personnes concernées puissent interpréter convenablement le contexte et les limites des conditions futures évaluées.
- **Pour quelle période de l'année les événements sont-ils prévus?** Les événements ont-ils un caractère saisonnier et sont-ils plus susceptibles de se produire à un moment en particulier? Cela peut être important pour les plans d'urgence et la potentielle utilisation saisonnière des terres. En outre, les profils de plages peuvent être saisonniers, ceux d'hiver et d'été pouvant changer le risque d'inondation. Le profil de plage doit correspondre à la période de l'année à laquelle les événements sont susceptibles de se produire, ou toute limitation connexe doit être clairement présentée.
- **Les processus géomorphologiques (p. ex., l'érosion côtière et l'évolution des plages) sont-ils pris en compte dans l'évaluation des risques ou considère-t-on seulement les niveaux d'eau d'un littoral immuable?** Le risque d'inondation côtière est influencé par les niveaux d'eau élevés ainsi que par d'autres processus côtiers tels que l'érosion côtière. Les effets des processus géomorphologiques peuvent devoir être pris en compte pour étayer une évaluation précise et holistique des risques d'inondation futurs, en particulier lorsqu'on considère des horizons temporels longs.
- **Les changements d'élévation du sol (c.-à-d. par soulèvement ou affaissement) sont-ils représentés pour l'horizon temporel ou l'événement sismique modélisé?** Il faut en tenir compte dans les analyses qui intègrent les estimations de l'élévation du niveau de la mer ou la déformation de la croûte terrestre issues de modèles de sources de tsunamis.
- **La glace de mer influence-t-elle les risques d'inondation?** Si c'est le cas, est-elle intégrée dans le modèle ou dans la discussion sur le danger? La glace de mer peut avoir un effet sur les vagues (Shapiro et Simpson, 1953) et les ondes de tempête (Kim

et coll., 2021). Les changements futurs de la couverture de glace de mer peuvent moduler la probabilité des hauteurs de vagues ou des ondes de tempête.

- **Quels autres changements sont susceptibles de se produire au cours de la période d'analyse et de moduler le risque d'inondation?** Dans l'horizon temporel de l'élévation attendue du niveau de la mer, quels autres changements sont susceptibles de se produire dans la communauté (p. ex., modification des systèmes d'endiguement, recul de la côte, densification de la communauté)?

6.3.2. Conception et limites du modèle

Les rapports d'évaluation des risques doivent inclure des détails relatifs à la conception du modèle, à la méthodologie, aux hypothèses et aux limites. Les questions et les facteurs principaux à considérer pour comprendre les limites de la modélisation sont décrits ci-dessous.

- **Comment les contributions des vagues sont-elles intégrées dans l'évaluation des aléas d'inondation ?** Les contributions des vagues à l'événement sont-elles basées sur des modèles simplifiés et empiriques ou sur des approches de modélisation sophistiquées (p. ex., numériques)? Quels effets la bathymétrie et la topographie de la zone côtière auront-elles sur les risques liés aux vagues, et les prend-on en compte dans les modèles? Les modèles ont-ils été calibrés localement et validés à l'aide de données d'observation? Quelles hypothèses a-t-on formulées en combinant les vagues avec d'autres contributions aux risques d'inondation côtière (p. ex., concernant la probabilité conjointe)?
- **Comment les digues et autres éléments linéaires sont-ils représentés dans la topographie du modèle?** Les digues sont-elles retirées de la topographie, entraînant ainsi un niveau de crue modélisé relativement plus élevé que celui qui est susceptible de se produire? Les digues sont-elles représentées à des hauteurs plus élevées, entraînant ainsi une protection supérieure à celle qui existe actuellement et une sous-représentation des dangers potentiels? Sont-elles représentées aux hauteurs actuelles et dans un scénario de débordement, influençant l'étendue des inondations en agissant comme une protection partielle? Les digues sont-elles censées se rompre en cas de débordement et, dans l'affirmative, le modèle simule-t-il la profondeur et la vitesse de la rupture? La réaction d'une digue, à savoir si elle est censée se rompre au début du débordement, se rompre de façon dynamique pendant le débordement ou rester intacte pendant toute la durée du débordement, peut avoir une grande influence sur les résultats.
- **Comment représente-t-on les bâtiments et d'autres structures (récepteurs) dans la topographie du modèle?** A-t-on retiré les bâtiments de la topographie pour créer le modèle numérique d'élévation ou demeurent-ils des éléments de surface? L'approche adoptée peut influencer l'inondation modélisée. Par exemple, si des bâtiments individuels sont représentés dans le modèle numérique d'élévation, les eaux de crue modélisées peuvent être canalisées entre les bâtiments. Lorsque les profondeurs des bâtiments sont extraites pour estimer les dommages causés par les inondations, il faut prendre en compte le traitement des bâtiments dans le raster topographique pour assurer une représentation exacte. Par exemple, si des bâtiments et des structures sont représentés dans la topographie du modèle, il est possible qu'on doive ajuster les profondeurs calculées à proximité des bâtiments et des structures pour refléter la profondeur de l'inondation sur le sol nu.

- **Comment les marées sont-elles intégrées dans la modélisation des risques?** La modélisation intègre-t-elle la variation de la marée, ou les simulations sont-elles effectuées à l'aide d'un niveau de marée stationnaire? La différence verticale entre la marée haute et la marée basse peut varier de plusieurs mètres selon l'endroit où l'on se trouve au Canada. Il est important de vérifier que le traitement des marées dans la modélisation est clairement défini (et pris en compte dans la probabilité du scénario, le cas échéant). Par exemple, dans de nombreuses régions du Canada, la différence verticale entre la marée haute et la marée basse peut dépasser les changements futurs projetés du niveau relatif de la mer.
- **A-t-on intégré les débits fluviaux et/ou le drainage des zones sèches dans le modèle?** Les inondations fluviales et le drainage des zones sèches près des côtes peuvent être exacerbés par les niveaux élevés de l'océan et des précipitations pendant une inondation côtière qui crée un effet de remous. En l'absence d'intégration des débits fluviaux, du drainage des zones sèches et de la prise en compte des remous dans le modèle, les résultats de la modélisation risquent de sous-estimer les niveaux d'eau réels à proximité des fleuves et des estuaires.
- **Quelles sont la résolution spatiale et temporelle et la précision du modèle et comment influencent-elles l'utilisation appropriée des résultats?** Les analyses grossières de modélisation des risques conçues pour guider l'évaluation régionale des risques d'inondation peuvent ne pas montrer une résolution spatiale suffisante pour permettre une évaluation technique propre au site.

6.4 Outils de communication

Les résultats de l'évaluation des aléas d'inondation côtière peuvent être communiqués à l'aide d'un éventail d'outils. Il est possible de communiquer les résultats par le biais de rapports techniques et de cartes ou en donnant accès à des ensembles de données (notamment des fichiers de modélisation). Il faut mettre les résultats à la disposition du public, dans la mesure du possible, et les fournir aux promoteurs, aux utilisateurs finaux ou aux décideurs. Les rapports techniques et les produits livrables doivent être suffisamment détaillés pour permettre la reproduction des analyses et des résultats afin que les travaux futurs puissent s'appuyer sur les conclusions du projet.

Bien qu'on puisse hésiter à rapporter des détails adéquats dans l'optique de garder la méthodologie privée ou d'éviter un examen minutieux, il faut fournir des informations et des paramètres détaillés. En outre, bien que les fichiers de modèles contiennent des renseignements délicats et puissent être mal utilisés par des personnes inexpérimentées, il faut les fournir avec les résultats des modèles. Fournir les détails et les fichiers de modélisation permet de montrer que l'argent public est dépensé efficacement et que chaque évaluation des aléas d'inondation côtière permet au public de mieux comprendre la méthodologie et les meilleures pratiques.

6.4.1. Ensembles de données et bases de données

À la fin d'une étude sur les risques d'inondation côtière, les ensembles de données doivent être rendus publics, dans la mesure du possible, ou fournis aux promoteurs, aux utilisateurs finaux ou aux preneurs de décisions. Lorsqu'un autre expert-conseil modifie ultérieurement un modèle existant, il doit toutefois examiner le modèle de manière suffisamment détaillée pour pouvoir

assumer l'entière responsabilité de ses données de sortie, comme s'il l'avait élaboré lui-même. De même, le professionnel qui a créé les cartes devrait-il y ajouter des mesures ou des limites lorsqu'il soumet un travail professionnel dans le cadre de l'entente sur les données ouvertes prévue par les lignes directrices? Rendre les ensembles de données publics permet d'augmenter la probabilité que les travaux futurs s'appuient sur les projets antérieurs et d'éviter les redondances. Cependant, le fait de rendre les ensembles de données et les modèles accessibles au public et réutilisables par d'autres experts-conseils comporte des risques. Une communauté qui prépare des données doit mettre en balance la perte de données non accessibles au public et les risques de mauvaise utilisation, de gestion inadéquate et de faible convivialité en raison d'un manque de documentation appropriée et de validation des ensembles de données.

Lorsque des ensembles de données sont fournis, il faut bien les documenter, y compris les métadonnées qui correspondent aux principes directeurs [FAIR](#) pour la gestion et l'administration des données scientifiques (GoFair, 2016). Grâce aux principes FAIR, on garantit que les ressources numériques sont faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables.

Les métadonnées et la documentation relatives aux ensembles de données d'évaluation des aléas d'inondation côtière doivent au minimum compter les attributs suivants :

- Une référence au(x) document(s) d'appui du rapport
- Description ou résumé des données
- Couverture géographique
- Explication des types d'attributs de données et des codes éventuellement utilisés
- Résolution horizontale et verticale
- Précision horizontale et verticale
- Description complète de la projection et des références altimétriques
- Utilisation appropriée des données et des principales hypothèses du modèle
- Description claire de la probabilité de l'événement
- Revanche ou autres facteurs de sécurité, le cas échéant
- Produits dont on a dérivé l'ensemble de données (p. ex., ensemble de données topographiques sur lequel il a été basé)
- Description du post-traitement pertinent

Les ensembles de données devraient comprendre :

- **Les fichiers topographiques** contenant les modèles numériques d'élévation originaux utilisés pour dériver les mailles du modèle. Il faut fournir les fichiers de topographie utilisés pour la modélisation puisqu'ils contextualisent les résultats du modèle. Par exemple, ils permettent de vérifier la façon dont les éléments linéaires sont représentés et d'étudier comment ils peuvent contribuer aux résultats des risques d'inondation. Ils permettent de vérifier les résultats de la profondeur et de convertir les résultats de la profondeur et de l'élévation de la surface de l'eau.
- **Les fichiers de configuration de la modélisation**, qui comprennent, par exemple, les maillages du modèle et les fichiers de forçage et de conditions aux limites. Lorsque des fichiers de modélisation accompagnent les résultats, des spécialistes peuvent extraire des résultats supplémentaires si nécessaire à l'avenir. En outre, les travaux futurs

peuvent être effectués sur la base des modèles précédents, ce qui renforce la reproductibilité des travaux.

- **Les résultats** comme la profondeur de l'inondation, les vitesses, les courants, la probabilité d'occurrence, la période, la durée et l'étendue de l'inondation. Les résultats du modèle peuvent ainsi être utilisés pour l'évaluation des risques et d'autres analyses.

Lorsque les résultats sont présentés comme des « maximums » (c.-à-d. la profondeur maximale de l'inondation), les séries chronologiques à des endroits clés peuvent fournir des renseignements temporels. Les résultats des modèles post-traités, dérivés des données brutes, peuvent refléter un jugement de spécialiste et des conditions locales, supprimer les zones mouillées qui ne sont pas hydrauliquement connectées aux sources d'inondation, ajouter des revanches ou des éléments de protection, inclure le déferlement d'ondes dans les étendues modélisées ou représenter des données ponctuelles sous forme de surfaces continues. Les résultats bruts et post-traités doivent s'accompagner de descriptions claires des étapes de traitement et de l'utilisation appropriée des résultats. Les étapes du traitement doivent être dictées par le but et les objectifs de l'évaluation des risques.

6.4.2. Rapports

Un rapport technique doit fournir les renseignements nécessaires à des spécialistes techniques pour comprendre et reproduire les résultats du modèle. Bien qu'on puisse hésiter à rapporter des détails adéquats dans l'optique de garder la méthodologie privée ou d'éviter un examen minutieux, il faut décrire les paramètres, les scénarios et la méthodologie de manière approfondie pour une utilisation future. Pour assurer la compréhension et la reproductibilité, il faut inclure les éléments suivants dans le rapport :

- **Élaboration des scénarios** comprenant des hypothèses sur la probabilité combinée, l'élévation du niveau de la mer, les conditions de marée, l'onde de tempête, les effets des vagues et d'autres facteurs.
- **Conception du modèle**, qui comprend, par exemple, les détails relatifs à la discrétisation du domaine, aux conditions aux limites, aux pas de temps et aux hypothèses pertinentes.
- **Résultats d'étalonnage et de validation** avec informations détaillées.
- **Résultats** de la modélisation, éventuellement avec post-traitement.
- **Limites du modèle**, dont les limites inhérentes au logiciel de modélisation.
- **Conclusions et analyse**, dont l'examen des contextes locaux.
- **Recommandations**, le cas échéant.
- **Utilisation appropriée** des résultats du modèle.
- **Annexes** présentant des résultats détaillés, des cartes et des séries chronologiques, le cas échéant.

Outre des rapports techniques, il faut tenir compte des publications universitaires (p. ex. des articles de revues spécialisées ou de conférences) puisqu'elles permettent d'élargir la portée des renseignements techniques. Il est également possible de produire des documents supplémentaires non techniques (p. ex., des rapports non techniques, des résumés non techniques, des introductions ou des brochures) pour mieux communiquer les résultats à un public élargi. Cette documentation est recommandée chaque fois que le projet peut guider la

prise de décision de la communauté, en particulier lorsqu'une consultation publique sur les résultats de risques est prévue.

6.4.3. Cartes

Les cartes sont souvent utilisées pour illustrer et communiquer les risques d'inondation côtière. Une carte bien conçue peut transmettre clairement des renseignements, souvent bien plus efficacement qu'une description écrite. Traditionnellement, et souvent à des fins réglementaires, les cartes sont statiques et les renseignements sont présentés sous forme de fichier PDF non dynamique ou d'impression papier. De plus en plus, les données sont représentées sur des cartes web qui comportent des couches interactives et qui peuvent être téléchargées. Lorsque des cartes web sont utilisées pour communiquer des risques d'inondation, il faut vérifier que les limites de résolution spatiale des données sont clairement indiquées parce que les fonctions interactives peuvent permettre de zoomer, potentiellement à une résolution plus élevée que celle qui est exacte. Lors de l'élaboration d'une carte, il faut déterminer son objectif et son public, ce qui permettra de déterminer quel est le support approprié pour la carte ainsi que les renseignements à inclure. Toutes les couches représentées sur la carte doivent faire l'objet de métadonnées appropriées, comme il est indiqué dans la [section 6.4.1](#). Les exonérations de responsabilités figurant sur les cartes sont très importantes, mais il peut être plus difficile de les conserver pour les produits en ligne. Certaines applications Web exigent que l'utilisateur accepte les exonérations de responsabilités et les limites avant de visualiser les produits de cartographie Web.

La [section 6.1](#) du [Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables](#) (RNCAN, 2019) présente davantage de renseignements sur la cartographie des zones inondables. RNCAN (2019) décrit différents produits cartographiques, comme les cartes d'inondation, les cartes de dangers et de risques d'inondation et les cartes de sensibilisation. Le document décrit l'objectif des différents types de produits cartographiques ainsi que les facteurs à considérer pour la création, le contenu et le format des cartes. Des directives supplémentaires, propres à la cartographie des risques d'inondation côtière, sont présentées dans Murphy et coll. (2021) ainsi que quelques exemples visuels de cartes issues de différentes études au Canada. Dans le contexte des inondations côtières, il faut tenir compte de facteurs supplémentaires pour représenter la vitesse, l'élévation du niveau de la mer, les effets des vagues et les tsunamis.

La vitesse du courant peut être un facteur de risque important pour les infrastructures et les bâtiments côtiers. Les valeurs maximales de la vitesse du courant sont souvent évaluées. Les renseignements concernant les vitesses de courant et les dangers connexes peuvent être représentés sur une carte sous la forme d'une quantité vectorielle (p. ex., l'amplitude avec des flèches à l'échelle indiquant la direction) ou scalaire (l'amplitude uniquement) ou en combinaison avec les dangers liés à la profondeur (p. ex., le produit profondeur-vitesse). Une évaluation des risques (p. ex. profondeur x vitesse) pourrait être utile dans les endroits où la vitesse du courant est importante.

Les hypothèses d'élévation du niveau de la mer doivent être clairement énoncées dans le cadre de la description du scénario. Souvent, un éventail de probabilités d'événements sera analysé selon plusieurs niveaux de la mer. Par exemple, il est possible d'évaluer des ondes de tempête en présumant les conditions actuelles du niveau de la mer, puis des conditions futures selon l'élévation du niveau de la mer, ce qui peut mener à un grand nombre de scénarios de risque. Il

faut veiller à représenter clairement le contexte de chaque scénario de risque sur les produits cartographiques, en s'assurant que les niveaux de la mer sont clairement définis et, si nécessaire, en limitant le nombre d'étendues d'inondation indiquées sur chaque carte.

Il peut être difficile de représenter sur une carte la contribution des vagues aux risques d'inondation. La contribution des vagues peut ne pas être incluse dans toutes les évaluations des risques d'inondation côtière, selon le type de modélisation effectuée (voir le [chapitre 5](#) pour plus de détails). Lorsque la modélisation des vagues est terminée, les résultats présentent généralement une distribution spatiale des états de mer (p. ex., caractérisés par des hauteurs de vagues significatives, des périodes de vagues maximales, la direction des vagues). Les moyens courants de représenter les résultats des vagues sur une carte comprennent :

- La présentation des paramètres de l'état de la mer (p. ex., la hauteur des vagues). Il est possible de les représenter sous forme de maille ou de contour.
- La présentation d'une zone où l'effet des vagues se fait ressentir. Pour ce faire, il faut identifier la région située entre la zone de déferlement des vagues et l'étendue littorale de la zone de déferlement d'ondes.
- L'effet des vagues peut également être délimité selon la hauteur atteinte par des vagues suffisamment hautes pour causer des dommages. Cette approche est utilisée dans l'approche « Limit of Moderate Wave Action » (LiMWA) de FEMA, où on délimite une hauteur de vagues de 0,45 m pour déterminer l'étendue maximale des effets des vagues. Cette approche a été utilisée au Canada avec une plage de valeurs de hauteur de vague.
- Les débits de débordement des vagues peuvent être estimés et utilisés comme condition aux limites d'entrée pour des modèles d'inondations de surface, qui peuvent servir de base pour la cartographie des paramètres de risque (p. ex., l'étendue de l'inondation, les profondeurs, les vitesses).

Lors de la représentation de tsunamis sur une carte, les commentaires ci-dessus concernant la profondeur, la vitesse et les vagues s'appliquent également. En raison de l'incertitude importante associée à la modélisation des tsunamis, un facteur de sécurité est souvent appliqué aux résultats des modèles lorsqu'ils sont cartographiés. Comme le risque de tsunami est principalement lié aux vagues, il est recommandé de décrire clairement ce qui est indiqué sur la carte (c.-à-d. la hauteur des vagues, le déferlement d'ondes, les zones d'inondation). Outre les produits cartographiques illustrant les risques de tsunami et les risques côtiers, les spécialistes peuvent envisager de développer des produits cartographiques pour guider le déroulement des opérations maritimes en cas de tsunami. Par exemple, une carte illustrant les emplacements prévus pour le déferlement des vagues peut aider les marins à déterminer s'il vaut mieux évacuer plus loin dans les terres ou plus au large, au cas où une alerte au tsunami serait diffusée alors qu'ils sont en mer.

Pour toutes les cartes, la symbologie et les autres caractéristiques (p. ex., les teintes de couleurs et les isolignes) doivent être clairement définies à l'aide de légendes ou de documents justificatifs. Les produits cartographiques doivent également indiquer l'échelle et l'orientation géographiques (p. ex. échelles et rose des vents).

6.4.4. Mobilisation du public

La mobilisation du public permet de mobiliser efficacement les ensembles de données, les rapports et les cartes évoqués précédemment. La participation du public peut comprendre des séances d'information, des réunions, des présentations d'affiches, des présentations numériques ou des campagnes médiatiques. Les présentations publiques sont des plateformes efficaces pour partager les informations et permettre une communication bilatérale en temps réel. Il existe parfois d'importants obstacles aux présentations publiques; seules les personnes disposant du temps et d'un moyen de transport nécessaires peuvent être en mesure d'y assister. Il est important de tenir compte du biais de sélection. En général, les parties les plus engagées seront celles dont les intérêts sont les plus directement concernés. Cela peut être un facteur de motivation positif lors de la mobilisation d'une communauté, mais en l'absence de sensibilisation, cela peut également mener à une rétroaction biaisée qui ne représente pas l'ensemble de la communauté. Il est essentiel de classer les contributions de façon adéquate.

Les renseignements partagés dans le cadre d'une présentation publique doivent également être mis à la disposition de quiconque ne pouvant pas assister à la discussion par le biais d'enregistrements numériques ou de sites web. Les sites web et les cartes web peuvent être des outils très efficaces puisqu'ils peuvent faciliter l'interaction et, lorsque l'expérience utilisateur est bien conçue, permettre aux personnes d'atteindre le niveau de détail qui les intéresse sur le contenu qui les concerne le plus. La diffusion numérique du contenu doit être effectuée de manière à favoriser la rétroaction du public, dans la mesure du possible. Il faut également prendre en compte les obstacles à l'accès numérique lors de la mise en œuvre de ces campagnes et des efforts déployés pour rejoindre les gens qui n'ont pas forcément un accès numérique. Les campagnes médiatiques orchestrées par le biais des médias traditionnels (p. ex., les sources de nouvelles) ou des médias sociaux ont le potentiel d'atteindre un large public et de mobiliser efficacement les connaissances. Dans les campagnes médiatiques, ce sont généralement des personnes autres que les membres de l'équipe du projet qui présentent les informations sur les dangers ou les risques, et l'équipe peut ne pas avoir de contrôle sur le message diffusé. À cette fin, il est important de développer un récit clair pour les campagnes médiatiques et de les accompagner de ressources supplémentaires (généralement sur le web ou par le biais d'entretiens de suivi) afin de clarifier les points clés et de partager davantage d'informations. Collaborer avec des partenaires des médias, faire le suivi et répondre aux discussions ou aux commentaires sur les articles peuvent contribuer à une communication efficace.

6.5 Définir le public cible

Différents utilisateurs auront des objectifs différents en matière de connaissance des risques d'inondation côtière et auront besoin de produits différents pour atteindre leurs objectifs. Des publics différents auront également des compétences variables pour interpréter des informations techniques et lire des produits tels que des cartes. Il faut développer des produits et des outils qui informent convenablement les membres d'un large éventail de publics. Les publics communs que visent les renseignements sur les risques d'inondation sont présentés dans les [sections 6.5.1 à 6.5.8](#) ci-dessous ainsi que les principes de communication, les méthodes, les défis et les exemples pertinents pour chaque public.

6.5.1. Ingénieurs et géoscientifiques

Les données sur les risques d'inondation côtière sont souvent partagées avec des ingénieurs et des géoscientifiques qui n'ont pas participé à la rédaction et qui utilisent les renseignements sur les risques pour guider des conceptions ou effectuer une analyse plus approfondie des risques. Ils sont souvent assujettis à des lignes directrices de pratique professionnelle et doivent généralement assumer leur responsabilité dans le cadre de leur travail. Il faut également consulter les lignes directrices de pratique professionnelle locales pour obtenir des suggestions sur la manière de présenter les rapports. Partager les travaux destinés à un public en ingénierie et en géosciences contribue à faire progresser les normes de pratique en partageant la méthodologie. Les principes, les défis, les méthodes et les exemples d'une communication efficace avec un public en ingénierie sont présentés dans la Figure 6.1. Communication efficace avec les ingénieurs et les géoscientifiques : principes, défis, méthodes et exemples. ci-dessous.

Principes	Exiger des informations détaillées, précises et quantitatives Avoir un niveau de compréhension technique élevé Présentation des informations dans un but de reproductibilité
Défis	Définitions différentes des termes courants et des normes de pratique Niveau de détail exigé très élevé, peut être difficile à atteindre ou à formuler
Méthodes	Des rapports et des données sont nécessaires Paramètres et détails techniques clairement énoncés, comme l'indiquent les sections 6.4.1 et 6.4.2 Discussion exhaustive sur les limites et les sources d'erreur
Exemples	Rapports de projets d'études de cas

Figure 6.1. Communication efficace avec les ingénieurs et les géoscientifiques : principes, défis, méthodes et exemples.

6.5.2. Évaluateurs des risques

Les personnes qui évaluent les risques liés aux inondations côtières constituent un public clé pour les renseignements sur les risques d'inondation. Les ingénieurs et les géoscientifiques (6.5.1) peuvent être, et sont souvent, des évaluateurs des risques. Les risques sont évalués à des fins de planification d'infrastructures et de communautés, d'élaboration de seuils de tolérance au risque, d'élaboration d'offres d'assurance et d'établissement de prêts hypothécaires et financiers. Les évaluations des risques sont effectuées par des spécialistes ayant des connaissances variées sur les aspects techniques de la gestion des risques d'inondation côtière. Les informations présentées dans la [Figure 6.2](#) peuvent guider la communication des résultats d'une évaluation des aléas d'inondation côtière aux personnes évaluant les risques.

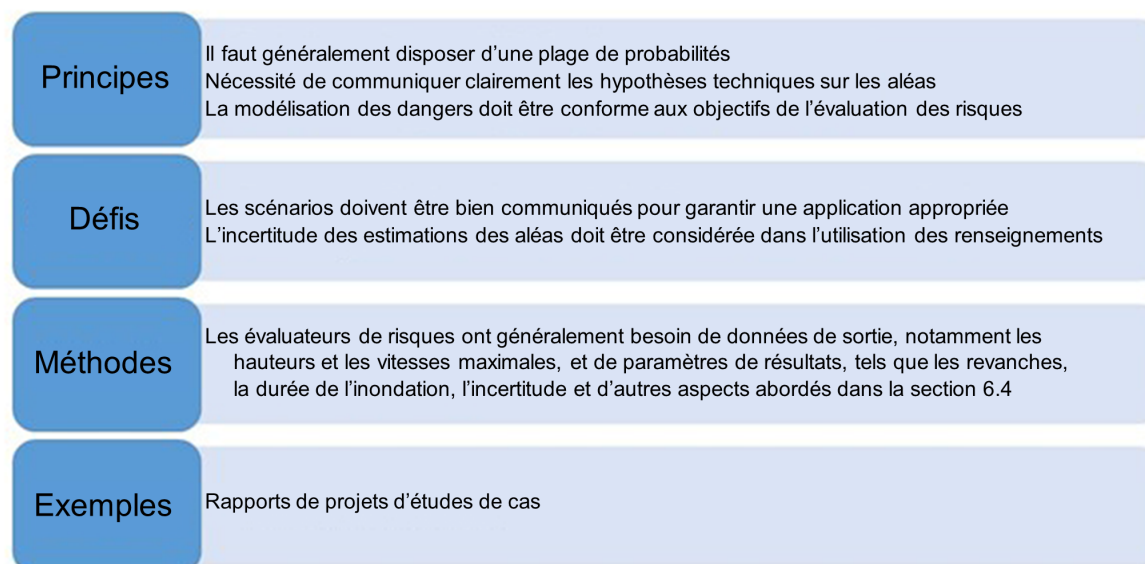


Figure 6.2. Communication efficace aux personnes évaluant les risques : principes, défis, méthodes et exemples.

6.5.3. Gestionnaires de situations d'urgence

Les gestionnaires de situations d'urgence utilisent les renseignements sur les risques d'inondation côtière pour guider les mesures d'atténuation, de préparation, d'intervention et de récupération. Les résultats peuvent servir à soutenir plusieurs initiatives, notamment : les exercices de préplanification, l'emplacement des ressources d'intervention, l'identification des zones potentiellement touchées lors des interventions, la modélisation de l'évacuation et la hiérarchisation des mesures d'atténuation. Les gestionnaires de situations d'urgence utilisent les renseignements sur les risques d'inondation pour élaborer des plans, communiquer avec le public et comprendre les risques. Alors que les personnes évaluant les risques interprètent souvent les informations sur les risques d'inondation côtière par le biais des évaluations de risques, les gestionnaires de situations d'urgence utilisent aussi souvent directement les renseignements sur les risques d'inondation côtière.

Les gestionnaires de situations d'urgence, plus que les autres, s'intéressent souvent aux scénarios les plus pessimistes, même s'ils doivent également comprendre les effets d'un éventail d'événements. Lorsque les scénarios les plus pessimistes sont envisagés, il y a généralement beaucoup d'incertitude associée à la modélisation et aux implications significatives de la sous-estimation des dangers. Par conséquent, les gestionnaires de situations d'urgence peuvent travailler avec des facteurs de sécurité et ont besoin que ces facteurs soient intégrés dans les résultats des dangers. Lorsqu'ils envisagent des voies d'évacuation, les gestionnaires de situations d'urgence peuvent avoir besoin de comprendre les risques d'inondation côtière auxquels font face une zone située en dehors des limites de la communauté ou de l'étude pour déterminer des voies d'évacuation ou des zones refuges claires. Bien que de nombreux gestionnaires de situations d'urgence maîtrisent le langage technique de l'analyse et de la cartographie des risques d'inondation, des définitions claires et un langage non technique sur les cartes sont utiles pour communiquer les résultats le plus largement possible.

6.5.4. Planificateurs de l'utilisation du sol et autorités d'approbation

Les planificateurs jouent un rôle essentiel dans la réduction des risques d'inondation côtière en planifiant l'utilisation des terres, des communautés, des lotissements et des infrastructures. Les autorités d'approbation peuvent être celles qui ont un pouvoir de décision statutaire sur des questions comme les mesures de lutte contre les inondations, les permis d'aménagement des sites, les permis de construire et les règlements régissant l'utilisation des terrains. Les planificateurs travaillent sur des horizons à court, moyen et long terme et doivent comprendre clairement l'évolution du risque dans le temps. Pour utiliser efficacement les informations sur les risques et les dangers d'inondation côtière, les planificateurs doivent avoir une bonne compréhension du risque relatif des événements afin de le relier aux seuils de risque de la communauté et aux plans d'aménagement ou de développement du territoire associés. Communiquer clairement avec eux exige un langage non technique ainsi qu'une explication complète de l'incertitude et des limites du modèle. Le cas échéant, la communication avec les planificateurs doit inclure des renseignements sur le moment et l'étendue des inondations, les effets, l'étendue et la probabilité des inondations dans le temps, les effets de l'élévation du niveau de la mer, les niveaux de construction des inondations, les facteurs de sécurité et les limites des défenses côtières.

6.5.5. Spécialistes en planification financière

Les spécialistes en planification financière peuvent être des banques, des compagnies d'assurance, des économistes et des entreprises (grandes et petites). Ces agences cherchent à mieux comprendre les coûts associés aux catastrophes afin de soutenir le rétablissement et la reconstruction des communautés. À l'instar des gestionnaires de situations d'urgence, les agences financières cherchent à savoir où se trouvent les zones à haut risque pour guider les décisions de planification financière. Le secteur de l'assurance travaille généralement avec des modélisateurs de catastrophes pour développer des modèles à l'échelle régionale afin de comprendre les dangers et les risques côtiers.

6.5.6. Public

Le public utilise les renseignements sur les risques d'inondation côtière pour comprendre le risque qui le touche personnellement ainsi que sa communauté. On peut penser aux décisions immobilières, à la planification de la sécurité personnelle et à la participation citoyenne quant aux risques auxquels s'expose la communauté. Lors de l'élaboration d'informations destinées au public, il est possible de s'assurer que le contenu est revu ou élaboré en partie par le public visé pour y adapter le contenu convenablement.

Pour communiquer avec le grand public, il est recommandé d'utiliser une approche narrative qui résume les informations détaillées et les résultats dans une histoire. Une histoire utilisée pour communiquer des risques d'inondation côtière peut comporter :

- Une amorce dans laquelle les risques d'inondation côtière sont présentés en général.
- Un milieu où sont décrits les résultats de la modélisation appliquée aux risques d'inondation côtière dans la communauté.
- Une fin où est décrite la signification de ces risques d'inondation côtière pour la communauté.

Ce récit doit être très différent de la documentation détaillée d'un rapport technique et se concentrer plutôt sur la description des aspects clés effectuée à l'aide d'un langage adapté au public.

6.5.7. Nations autochtones

De nombreux peuples et nations autochtones sont plus exposés aux risques d'inondation. Lors des échanges avec les communautés autochtones, il est primordial de privilégier des discussions menées par la communauté et des informations reflétant le contexte et les préoccupations de celle-ci. Par exemple :

- Utilisez les noms autochtones des lieux sur les documents.
- Incluez les connaissances traditionnelles autochtones.
- Tenez compte des limites de la réserve, de celles du territoire et des potentielles terres contestées.

6.5.8. Autres publics

Les renseignements sur les risques d'inondation côtière sont également utilisés pour expliquer les risques à d'autres publics variés, dont :

- Les politiciens l'utilisent pour s'informer des questions qui préoccupent leur électorat et pour contribuer à l'élaboration d'orientations politiques et de programmes de financement efficaces.
- Les médias sont un partenaire clé dans le partage d'informations et ont généralement besoin de récits clairs et de ressources visuelles pour communiquer efficacement.
- Les promoteurs peuvent utiliser les informations pour planifier les projets et comprendre en profondeur les risques de haut niveau associés à un projet avant de s'engager dans la planification et la conception.
- Les spécialistes de l'immobilier peuvent citer des informations pour guider leur clientèle dans l'achat de propriétés. De plus en plus de personnes veulent obtenir des informations sur les risques et les dangers d'inondation; il faut améliorer la communication avec ces personnes et envisager les répercussions que provoquent sur l'industrie de nouveaux renseignements sur les risques côtiers.

En présentant des renseignements à un de ces publics ou à d'autres, les membres de ces groupes devraient participer à la préparation ou à la révision des renseignements pour intégrer la perspective de leur discipline et s'assurer que le matériel convient au public visé.

6.6 Autres facteurs de communication à considérer

Il est essentiel de partager largement les renseignements provenant des études sur les risques d'inondation côtière pour sensibiliser et réduire les risques. Bien que le partage d'informations comporte un certain risque d'utilisation abusive, les avantages de la divulgation d'informations et du lancement d'une discussion l'emportent généralement sur les risques. Rendre les informations ouvertement accessibles est une meilleure pratique pour la réduction des risques; le partage efficace des informations nécessite de prendre en compte le public auquel elle est destinée.

Il faut également prendre en considération les difficultés ou les responsabilités potentielles liées à la propriété intellectuelle et à la divulgation de renseignements. Il faut prendre en compte ces éléments dès le début du projet.

6.7 Références

Commission océanographique intergouvernementale. (2019). *Glossaire sur les tsunamis*. Séries techniques de la Commission océanographique intergouvernementale https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000188226_fre

GoFair. (2016). *Les principes FAIR*. <https://www.go-fair.org/fair-principles/>

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 (éd.), *Rapport sur le climat changeant du Canada* (p. 343–423). Gouvernement du Canada.

Kim, J., Murphy, E., Nistor, I., Ferguson, S. et Provan, M. (2021). *Numerical Analysis of Storm Surges on Canada's Western Arctic Coastline*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 326. <https://doi.org/10.3390/jmse9030326>

Le Centre de gouvernance de l'information des Premières Nations. (2014). *Principes PCAP® des Premières Nations* <https://fniqc.ca/fr/les-principes-de-pcap-des-premieres-nations/>

Murray, V., Abrahams, J., Abdallah, C., Ahmed, K., Angeles, L., Benouar, D., Brenes T., Alonso, C., Choe, Cox, S., Douris, J., Fagan, L., Fra Paleo, U., Han, Q., Handmer, J., Hodson, S., Khim, W., Mayner, L., Moody, N., Moraes, L., Osvaldo, Nagy, M., Norris, J., Peduzzi, P., Perwaiz, A., Peters, K., Radisch, J., Reichstein, M., Schneider, J., Smith, A., Souch, C., Stevance A., Triyanti, A., Weir, M. et Wright, N. (2021). *Profils de renseignements sur les risques : supplément à l'examen de la définition et de la classification des dangers de l'UNDRR-ISC : Rapport technique*. Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophes, International Science Council. <https://council.science/fr/publications/hazard-information-profiles/>
DOI : 10.24948/2021.05

RNCan. (2019). *Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables*. Série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables ». https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/rncan-nrcan/m45/M45-114-2019-fra.pdf

RNCan. (2024). *Guide d'orientation sur la mobilisation autochtone pour la cartographie des zones inondables*. Gouvernement du Canada. <https://natural-resources.canada.ca/science-and-data/science-and-research/natural-hazards/flood-mapping/federal-flood-mapping-guidelines-series/indigenous-engagement-guidelines-for-flood-mapping/26460>

Shapiro, A. et Simpson, L. (1953). *The effect of a broken ice field on water waves*. *Eos Transactions of the American Geophysical Union*, 34, 36–42.

Sous-comité consultatif autochtone sur le savoir autochtone. (2020). *Politique-cadre sur le savoir autochtone*. Gouvernement du Canada. <https://www.canada.ca/fr/agence-evaluation->

[impact/consultative/comites-consultatifs/comite-consultatif-autochtone/principes-elaboration-cadre-strategique-savoir-autochtone.html](#)