



Ministère
des Transports

Québec 



IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT MARITIME ET CÔTIER DU NUNAVIK : SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES

Rapport présenté au ministère des Transports du Québec

Rapport final

Juillet 2020



IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT MARITIME ET CÔTIER DU NUNAVIK : SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES.

Rapport final

Mai 2020

COORDINATION DU PROJET

Geneviève Trudel, MTQ
Stéphanie Bleau, Ouranos

RÉALISATION ET CARTOGRAPHIE

Sonia Hachem, Ouranos
Stéphanie Bleau, Ouranos
Raphaël Desjardins, Ouranos

RÉVISION SCIENTIFIQUE

Antoine Boisson, Université Laval
Isabelle Charron, Ouranos
Hélène Côté, Ouranos
Julie Cunningham, Ouranos
Dany Dumont, UQAR
Yves Gauthier, INRS-ÉTÉ

RÉVISION LINGUISTIQUE

Nom de réviseur/use linguistique 1, Affiliation

TRADUCTEUR

Julien Sandiford (synthèse des connaissances et outils de transfert en anglais)

MISE EN PAGE

Prénom Nom, Affiliation

Titre du projet : Impact des changements climatiques sur l'environnement maritime et côtier du Nunavik : synthèse des connaissances

Numéro du projet : T2.1 (Action 28.2 PACC 2013-2020)

Citation suggérée : Hachem S. et Bleau S., (2020). *Impact des changements climatiques sur l'environnement maritime et côtier du Nunavik : synthèse des connaissances*. Rapport présenté au Ministère des transports du Québec. Ouranos. Montréal. 70 p. + annexes.

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres. Toute utilisation ultérieure du document sera au seul risque de l'utilisateur sans la responsabilité ou la poursuite juridique des auteurs.

REMERCIEMENTS

La présente synthèse des connaissances est une initiative du ministère des Transports du Québec (MTQ), réalisée dans le cadre de l'action 28.2 de la priorité 28 du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC). Ce document vulgarisé a été financé par le Fonds vert 2020 et coordonné par Ouranos.

Les résultats des études présentées dans cet outil d'aide à la décision et de transfert des connaissances proviennent principalement de différents projets de recherche réalisés dans le cadre d'une initiative de recherche, menée par le MTQ, intitulée « Évaluation de l'impact des changements climatiques sur les infrastructures maritimes du Nunavik et solutions d'adaptation » démarrée en 2009 dans le cadre du PACC 2006-2012 et se poursuivant dans le cadre du PACC 2013-2020.

Les auteurs reconnaissent la grande contribution des membres du comité de suivi ayant participé au bon déroulement du projet et aux différentes phases de révision servant à bonifier l'outil ; Anick Guimond (MTQ), Geneviève Trudel (MTQ), Laurie Beaupré (Makivik), Véronique Gilbert (ARK), Jean-Denis Bouchard (MSP), Julie Veillette (MELCC) et Frédérique Gosselin-Lessard (MTQ).

Les auteurs remercient également Isabelle Charron et Julie Cunningham de l'équipe mobilisation de connaissances et Hélène Côté de l'équipe science du climat et services climatiques en tant que réviseurs à l'interne d'Ouranos ainsi que les réviseurs scientifiques externes Antoine Boisson du CEN -Université Laval, Dany Dumont de l'UQAR-ISMER et Yves Gauthier de l'INRS-ÉTÉ dont les commentaires et corrections ont permis de clarifier, de simplifier, d'alléger et de bonifier ce texte.

Cette initiative a mobilisé beaucoup d'acteurs de différentes organisations publiques gouvernementales régionale et locale ainsi qu'académiques et privés. Le MTQ et Ouranos souhaitent remercier les collaborateurs et mandataires suivants pour leur participation à cette initiative de recherche et développement en cours depuis 2009 :

- Administration régionale Kativik (ARK)
- Société Makivik
- Ministère de la Sécurité publique (MSP)
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)
- INRS-ETE
- UQAR-ISMER
- CEN, Université Laval
- CIMA+
- Environnement Illimité Inc.
- LaSalle NHC



Ministère
des Transports

Québec



RÉSUMÉ

Le ministère des Transports du Québec (MTQ) a coordonné et/ou financé plusieurs études portant sur les impacts des changements climatiques (CC) sur l'environnement côtier et maritime du Nunavik entre 2009 et 2020 dans le cadre des Plan d'action sur les changements climatiques (PACC). Afin d'assurer l'accès et le transfert efficace des connaissances développées dans le cadre de ces projets de recherche et favoriser leur utilisation comme soutien à la mise en œuvre et au suivi de l'adaptation par différents intervenants gouvernementaux régionaux et locaux, et privés, les résultats ont été regroupés dans un outil d'aide à la décision qui présente les principaux faits saillants des connaissances.

Contexte du projet

Les impacts des CC sont déjà et seront de plus en plus importants au Nunavik. Les augmentations des températures de l'air (4 à 7,5°C) et des précipitations (20 à 35%), y seront plus élevées que dans le reste du Québec d'ici à la fin du XXI^e siècle, principalement en automne et en hiver. Conscients que les infrastructures côtières seront soumises à ces changements, le MTQ, en collaboration avec l'administration régionale Kativik (ARK), a voulu documenter et améliorer leurs connaissances sur plusieurs aléas hydrologiques et climatiques pouvant avoir une incidence sur l'intégrité et la pérennité des ouvrages côtiers du Nunavik, à moyen et à long terme. L'objectif de cette démarche est d'optimiser la planification, la maintenance et la réhabilitation de ces infrastructures et d'établir les actions à mettre en œuvre pour renforcer leur résilience face aux CC. La synthèse des connaissances, spécifique au Nunavik, présente un portrait des aléas à l'échelle du territoire et de ses 14 communautés. Il offre un éclairage intégré des vulnérabilités pour juger des risques et guider l'adaptation durable des infrastructures maritimes. Il s'accompagne d'un rapport technique dans lequel les concepts scientifiques et techniques qui ont permis de mener les recherches et d'obtenir les résultats sont expliqués, d'une présentation en format Powerpoint et d'une affiche imagées et vulgarisées.

Principaux résultats tirés des études

La période sans glace pourrait être plus longue de six semaines à deux mois par le retard de la formation des glaces en automne et devancée de plusieurs semaines par leur disparition au printemps. La période pendant laquelle les glaces de rive et de mer sont instables pourrait être allongée. Les concentrations de glace au mois de décembre pourraient être réduites à 40 et 60% sur les littoraux d'Ivujivik à Kangiqsualujuaq et pourraient être quasiment absentes entre Ivujivik et Inukjuak à l'horizon 2040-2070. Les niveaux d'eau extrêmes hauts et bas qui avaient une période de retour de 100 ans pourraient être atteints plus fréquemment avec une période de retour de 50 ans, vers la moitié du XXI^e siècle. Sur la plupart des sites des côtes du Nunavik, il pourrait y avoir des surcotes de maximum 1 m et des décotes du même ordre de grandeur que dans le passé récent. Cependant, le relèvement des terres (isostasie) au Nunavik pourrait compenser le rehaussement du niveau marin global au point tel que plusieurs sites (surtout dans la baie d'Hudson) connaîtraient une baisse ou une stagnation du niveau marin moyen relatif d'ici à la fin du XXI^e siècle, diminuant par le fait même l'effet des surcotes. Par contre, la baisse des niveaux extrêmes bas qui accentuerait les impacts des niveaux d'eau extrêmes bas sur les côtes, serait due à l'addition des décotes extrêmes basses et de la baisse du rehaussement du niveau marin global.

Intégrer les connaissances vers la mise en œuvre de l'adaptation

Les risques côtiers sont localisés là où la possibilité d'occurrence d'un aléa se combine avec la présence de populations et d'infrastructures. Au Nunavik, les quatorze communautés inuites et la baie Déception sont toutes localisées sur le littoral. Elles sont donc, *a priori*, potentiellement à risque. Les connaissances, sur les

aléas climatiques et les facteurs qui influencent la vulnérabilité et les dommages que pourraient subir les milieux maritimes et côtiers du Nunavik, sont grandissantes et forment déjà une base solide sur laquelle la mise en œuvre de solutions peut s'appuyer. Le monde décisionnel et la population sont aussi, plus que jamais, sensibilisés aux enjeux climatiques. Les conditions pour la mise en place de l'adaptation sont donc réunies. Déjà des exemples d'action pour réussir l'adaptation en milieu nordique se multiplient. En effet, des normes de construction spécifiques au Nord sont déjà en places et des programmes d'action et de sensibilisation pour faciliter la compréhension des CC et des mesures pour réduire les risques sont aussi en œuvre. Certes, certains défis de connaissances demeurent, mais ceux-ci ne devraient pas être un frein à la mise en œuvre et au suivi de l'adaptation. Celle-ci ne pourra qu'être bonifiée avec une plus grande acceptabilité sociale au fur et à mesure que les connaissances se préciseront.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	i
Résumé	ii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux.....	viii
Liste des abréviations, sigles et acronymes	x
Introduction générale	1
1. Contexte de la synthèse des connaissances	2
1.1 Portrait de la population et des infrastructures	2
1.2 Portrait climatique du Nunavik	4
1.3 Évaluer des changements sur les aléas climatiques et hydrologiques et leurs caractéristiques	6
1.4 Évaluation de La vulnérabilité du milieu côtier et des communautés.....	8
1.5 La synthèse des connaissances comme amorce au processus d’adaptation	9
1.6 Mise en garde sur les incertitudes des résultats obtenus dans les différents rapports du MTQ et ses Partenaires.....	9
2. Les faits saillants	11
2.1 Le Nunavik.....	12
2.1.1 Portrait général	12
2.1.2 Niveau marin relatif	14
2.1.3 Niveaux d’eau extrêmes, fréquence et saisonnalité.....	15
2.1.4 Récurrence des tempêtes	20
2.1.5 Conditions de glace	20
2.1.6 Vagues.....	22
2.2 La baie d’Hudson.....	23
2.2.1 Portrait général	23
2.2.2 Les communautés de la baie d’Hudson	27
2.3 Le détroit d’Hudson	37
2.3.1 Portrait général	37
2.3.2 Les communautés du détroit d’Hudson.....	39
2.4 La baie d’Ungava	44
2.4.1 Portrait général	44
2.4.2 Les communautés de la baie d’Ungava.....	45
3. Intégrer les connaissances vers la mise en œuvre de l’adaptation	48

3.1	Les aléas, les vulnérabilités et les risques dans le nord du québec	48
3.2	Données et connaissances en soutien à l'adaptation.....	50
3.2.1	Analyser les vulnérabilités	50
3.2.2	Analyse spatiale des zones à risques	52
3.3	Aller plus loin : Des outils pour la prise de décision	53
3.3.1	Conception et adaptation en contexte d'incertitude : quelques repères	53
3.3.2	Informations utiles pour les professionnels et gestionnaires municipaux, en aménagement du territoire, en changements climatiques.....	54
3.4	Des pistes prometteuses en recherche appliquées aux milieux côtiers et maritimes du Nunavik	55
3.4.1	Améliorer les connaissances scientifiques du milieu.....	55
	Conclusion générale.....	59
	Glossaire.....	61
	Références	64
	Annexe – Cartes de sensibilité des côtes et des niveaux d'eau par site d'étude	70

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des données acquises pour les aléas étudiés avec période d'acquisition et nom du réseau de maintenance. Les données proviennent des stations météorologiques (températures, vent, humidité), des marégraphes (niveau d'eau sur la côte), des houlographes (niveau d'eau au large), caméras (photographie de la mer près de la côte), images Landsat et MODIS (images satellites) au Nunavik, avec période d'acquisition et nom du réseau de maintenance.	4
Figure 2. Le processus d'adaptation d'après Ouranos, 2020.....	9
Figure 3. Marnage au Nunavik (CanCoast data product, source data from Canadian Hydrographic Service). (Boisson, 2019).....	12
Figure 4. Niveaux extrêmes des ondes de tempête, de période de retour 100 ans, pour le passé récent 1980-2009 et variations des décotes (a) et des surcotes (b) pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099.	16
Figure 5. Concentration moyenne de la glace de mer au Nunavik en décembre de 1980-2010 (a) et 2040-2070 (b) (Senneville, 2018a).....	22
Figure 6. Sensibilité côtière de la communauté de Kuujjuarapik aux CC, niveaux des surcotes pour le passé-récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099	28
Figure 7. Indice de sensibilité côtière, niveaux des surcotes pour la période 1989-2009 et variations des surcotes pour les horizons futurs (2040-2069 et 2070-2099).....	52
Figure 8. Sensibilité côtière de la communauté de Umiujaq aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099)	70
Figure 9. Sensibilité côtière de la communauté de Inukjuak aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099	71
Figure 10. Sensibilité côtière de la communauté de Puvirnituk aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099.....	72
Figure 11. Sensibilité côtière de la communauté de Akulivik aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099	73
Figure 12. Sensibilité côtière de la communauté de Ivujivik aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099	74
Figure 13. Sensibilité côtière de la communauté de Baie Déception aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099.....	75

Figure 14. Sensibilité côtière de la communauté de Kangiqsujuaq aux CC niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099 76

Figure 15. Sensibilité côtière de la communauté de Quaqaq aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099 77

Figure 16. Sensibilité côtière de la communauté de Kuujjuaq aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099 78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Résumé des données climatiques du Nunavik (IRIS 4, 2 ^e édition - communication personnelle)	5
Tableau 2.	Liste des données simulées pour les différents sites étudiés au Nunavik.....	7
Tableau 3.	Niveau marin relatif (cm ± intervalle de confiance 95 %) selon les scénarios climatiques RCP4.5, RCP8.5 et RCP8.5 avec l'effondrement de la calotte glaciaire de l'Antarctique Ouest (Oan), à certains sites du Nunavik pour la période 2081-2100 par rapport à 1986-2005. Ces scénarios tiennent compte du relèvement isostatique, d'après James et al. (2014).	14
Tableau 4.	Niveaux des décotes et des surcotes extrêmes, de période de retour 100 ans simulés pour le passé récent et pour les futurs proches et lointain, (Massé et Gallant, 2016)	17
Tableau 5.	Moyenne sur le Nunavik, période de retour et saisonnalité des niveaux extrêmes des ondes de tempêtes (décote et surcote).	18
Tableau 6.	Période de retour des niveaux d'eau totaux extrêmes bas en climats actuel et futurs à Umiujaq, Ivujivik et Quaqtq (d'après les Figures 5.15, 5.14 et 5.13 de Massé et Gallant, 2016).....	19
Tableau 7.	Périodes de retour des niveaux d'eau totaux extrêmes hauts en climats actuel et futurs à Umiujaq, Ivujivik et Quaqtq (d'après les Figures 5.9, 5.8 et 5.7 de Massé et Gallant, 2016)	19
Tableau 8.	Risques liés à la couverture et à la durée de la présence des glaces aux horizons futurs selon l'hiver, le printemps et l'automne au Nunavik.....	21
Tableau 9.	Les taux de relèvement isostatique de la modélisation NRCan pour les communautés de la Baie d'Hudson	26
Tableau 10.	Résumé des observations de glace obtenues par les caméras pour Kuujjuarapik de 2015 à 2018 (Bernier et al., 2017; 2019; Poulin et al., 2018).	29
Tableau 11.	Durée des différents stades du couvert de glace obtenue par les caméras pour Kuujjuarapik de 2015 à 2018 (Bernier et al., 2017; 2019; Poulin et al., 2018).	29
Tableau 12.	Niveau des décotes et niveau total minimum, en climat futur, à Umiujaq (d'après la Figure 5.15 de Massé et Galland, 2016)	30
Tableau 13.	Périodes de retour de certains niveaux d'eau totaux extrême minimum en climats actuel et futur à Umiujaq (d'après la Figure 5.15 de Massé et Gallant, 2016).....	31
Tableau 14.	Niveau des surcotes et niveau total maximum, en climat futur, à Umiujaq (d'après la Figure 5.9 de Massé et Galland, 2016).....	31
Tableau 15.	Périodes de retour de certains niveaux d'eau totaux extrême maximum en climats actuel et futur à Umiujaq (d'après la Figure 5.9 de Massé et Gallant, 2016).....	32
Tableau 16.	Durée des différents stades du couvert de glace obtenue par les caméras pour Umiujaq de 2016 à 2018 (Bernier et al., 2017; 2019; Poulin et al., 2018).	32

Tableau 17. Niveau des décotes et niveau total minimum, en climat futur à Ivujivik (d’après la Figure 5.14 de Massé et Galland, 2016)	35
Tableau 18. Périodes de retour de certains niveaux d’eau totaux extrême minimum en climats actuel et futur à Ivujivik (d’après la Figure 5.14 de Massé et Galland, 2016)	36
Tableau 19. Niveau des surcotes et niveau total maximum, en climat futur, à Ivujivik (d’après la Figure 5.8 de Massé et Galland, 2016)	36
Tableau 20. Périodes de retour de certains niveaux d’eau totaux extrême maximum en climats actuel et futur à Ivujivik (d’après la Figure 5.8 de Massé et Galland, 2016)	37
Tableau 21. Processus de glace à Ivujivik (Bernier et al., 2017 ; 2019; Poulin et al, 2018).	37
Tableau 22. Les taux de relèvement isostatique de la modélisation NRCan pour les communautés du détroit d’Hudson (James et al., 2014).....	38
Tableau 23. Processus de glace à la Baie Déception (Bernier et al., 2017 ; 2019; Poulin et al, 2018). 40	
Tableau 24. Niveau des décotes et niveau total minimum, en climat futur, à Quaqtq (d’après la Figure 5.13 de Massé et Galland, 2016)	42
Tableau 25. Périodes de retour de certains niveaux d’eau totaux extrême minimum en climats actuel et futur à Quaqtq (d’après la Figure 5.13 de Massé et Galland, 2016)	42
Tableau 26. Niveau des surcotes et niveau total maximum, en climat futur, à Quaqtq (d’après la Figure 5.7 de Massé et Galland, 2016).....	42
Tableau 27. Périodes de retour de certains niveaux d’eau totaux extrême maximum en climats actuel et futur à Quaqtq (d’après la Figure 5.7 de Massé et Galland, 2016)	43
Tableau 28. Processus de glace à Quaqtq (Bernier et al., 2017 ; 2019; Poulin et al, 2018).	44
Tableau 29. Processus de glace à Aupaluk (Bernier et al., 2017 ; 2019; Poulin et al, 2018)	46
Tableau 30. Les indices de sensibilité utilisés pour construire l’indice de sensibilité côtière (ISC) (traduit de l’anglais, d’après Manson et la., 2019)	50

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACA	Analyse coûts - avantages
ARK:	Administration régionale Kativik
CC	Changements climatiques
CEN	Centre d'études nordiques
CICE	Modèle de glace de mer (CICE5 : version 5 du CICE)
DJF	Mois de décembre, janvier et février qui représentent l'hiver
GES	Gaz à effet de serre
GIEC / IPCC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat / <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
INRS-ÉTÉ	Institut national de la recherche scientifique - Eau, terre et environnement
IRIS	<i>Integrated Regional Impact Studies</i>
ISC / CSI	Indice de sensibilité côtière (<i>Coastal Sensivity Index (CSI)</i>)
ISMER	Institut des sciences de la mer de Rimouski
JJA	Mois de juin, juillet et août qui représentent l'été
MAMH	Ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques
MOR	Modèle océanique régional
MRC	Modèle régional du climat
MSP	Ministère de la Sécurité publique
MTQ	Ministère des Transports du Québec
PACC	Plan d'action sur les changements climatiques
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i> (Trajectoire de concentration représentative)
RNCan	Ressources naturelles Canada
UQAR	Université du Québec à Rimouski

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le réchauffement climatique mondial a été évalué par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) à 1°C de plus depuis les niveaux préindustriels (GIEC, 2014) et pourrait atteindre 2°C à l'horizon 2031-2050 et 4,3°C à l'horizon 2081-2100 (IPCC, 2019) selon le scénario de fortes émissions de gaz à effet de serre (GES) RCP8.5 (voir encadré). C'est en Arctique que le réchauffement est le plus marqué. Les températures ont augmenté de plus du double de la moyenne mondiale lors des deux dernières décennies (IPCC, 2019). Dans l'Arctique canadien, il l'est encore davantage puisque les températures moyennes annuelles de l'air ont augmenté trois fois plus vite que la moyenne mondiale (Bush et al., 2019). Les projections indiquent que le réchauffement s'amplifiera pour toutes les saisons quel que soit le scénario d'émissions de gaz à effet de serre (GES) considéré (voir encadré). Cependant, les températures extrêmes d'été (les plus chaudes) et celles d'hiver (les plus froides) pourraient se réchauffer davantage (Bush et al., 2019). Le réchauffement climatique est aussi fortement ressenti dans les régions subarctiques telles que le Québec septentrional.

Dans ce contexte de réchauffement accentué dans les régions nordiques, le gouvernement du Québec, en collaboration avec l'administration régionale Kativik (ARK), souhaitait mesurer l'ampleur des changements susceptibles d'affecter son l'environnement maritime dans le futur.

Cette synthèse des connaissances regroupe les résultats obtenus des études coordonnées par le ministère des Transports du Québec (MTQ) sous le nom « Évaluation de l'impact des changements climatiques sur les infrastructures maritimes du Nunavik et solutions d'*adaptation* » et financées par le Fonds vert dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques (PACC) 2006-2012 et se poursuivant dans le cadre du PACC 2013-2020.

Ce document cible différents usagers œuvrant en territoire nordique, dont les professionnels en CC et aménagement du territoire (ex. MAMH, MSP, MELCC, ARK) et les gestionnaires municipaux. Par le biais de document, ces usagers ont à leur disposition, un outil d'aide à la décision et les parties prenantes un outil de référence. Il leur fournira de l'information sur les connaissances récentes spécifiques au Nunavik, des côtes de la baie d'Hudson, du détroit d'Hudson et de la baie d'Ungava, si nécessaire, lorsqu'ils devront concevoir, mettre en œuvre et faire le suivi de l'adaptation au cours des années à venir comme par exemples pour les schémas d'aménagement et d'occupation du territoire ou pour l'entretien d'infrastructures et leur installation sur le littoral. En somme, ce document peut servir à appuyer la mise en œuvre de solutions d'adaptation aux CC et vient en soutien aux processus décisionnels et de planification.

Le présent document inclut un glossaire des termes scientifiques. Ils sont écrits en italique la première fois qu'ils apparaissent dans le texte. Il inclut aussi un encadré qui explique les notions scientifiques complexes ; une bibliographie qui regroupe les références utilisées dans le corps de la synthèse et une annexe qui contient des cartes synthèse par communauté. De plus, différents outils complémentaires et vulgarisés accompagnent la synthèse des connaissances. Une synthèse technique (uniquement en français) qui consigne les appareils de mesure et les méthodes d'observation du passé récent (la calibration et la paramétrisation des modèles utilisés dans les travaux), et spécifie les modèles et les scénarios d'émission de GES et les modèles de glace utilisés dans les études pour évaluer les changements futurs. Un sommaire exécutif (en français, en anglais et en inuktitut) et une présentation disponible en format pdf (en français et en anglais) qui résumant les principaux résultats de la synthèse des connaissances. Une affiche (en français, en anglais et en inuktitut) qui vulgarise encore davantage les résultats de la synthèse en utilisant des symboles pour chaque aléa et impact majeur étudié et imprimable en format lettre ou affiche. Tous ces outils peuvent être téléchargés sur le site Internet d'Ouranos : www.ouranos.ca.

La présente synthèse des connaissances est divisé en trois chapitres. Une contextualisation des projets qui ont été menés depuis 2009 par le MTQ au Nunavik (**chapitre 1**). Les résultats des études menées pour le MTQ, pour le Nunavik puis par région côtière et enfin par communauté (**chapitre 2**). Une démonstration de l'utilité des connaissances présentées dans les chapitres précédents quand elles sont intégrées à certaines étapes clés du processus d'adaptation et des exemples d'outils d'aide à la décision existants ou qui pourraient être appliqués au Nunavik (**chapitre 3**).

1. CONTEXTE DE LA SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES

Ce premier chapitre contextualise les projets qui ont été menés depuis 2009 par le MTQ au Nunavik. Il présente un portrait de la population et de ses infrastructures (**section 1.1**) et un portrait climatique (**section 1.2**) du Nunavik. Les *aléas* qui perturbent la stabilité du littoral et les caractéristiques à considérer pour comprendre les *impacts* des CC au Nunavik sont listés (**section 1.3**). Chacune de ces caractéristiques a pu être étudiée grâce à l'installation d'appareils de mesure sur plusieurs communautés. Une carte synthèse régionale recense les types d'observations, leurs localisations, leurs périodes d'acquisition et le nom du réseau qui permet la collecte et la maintenance des appareils. L'importance d'analyser à la fois les aléas et la *vulnérabilité* d'un milieu pour comprendre comment les *risques* liés aux impacts climatiques sont appelés à changer dans le futur, est évoquée (**section 1.4**). La synthèse des connaissances peut être utilisée comme une amorce à l'*adaptation* (**section 1.5**). Des nombreuses incertitudes existent encore, à différents niveaux des différents projets, qui seront levées au fur et à mesure de l'amélioration des connaissances (**section 1.6**).

1.1 PORTRAIT DE LA POPULATION ET DES INFRASTRUCTURES

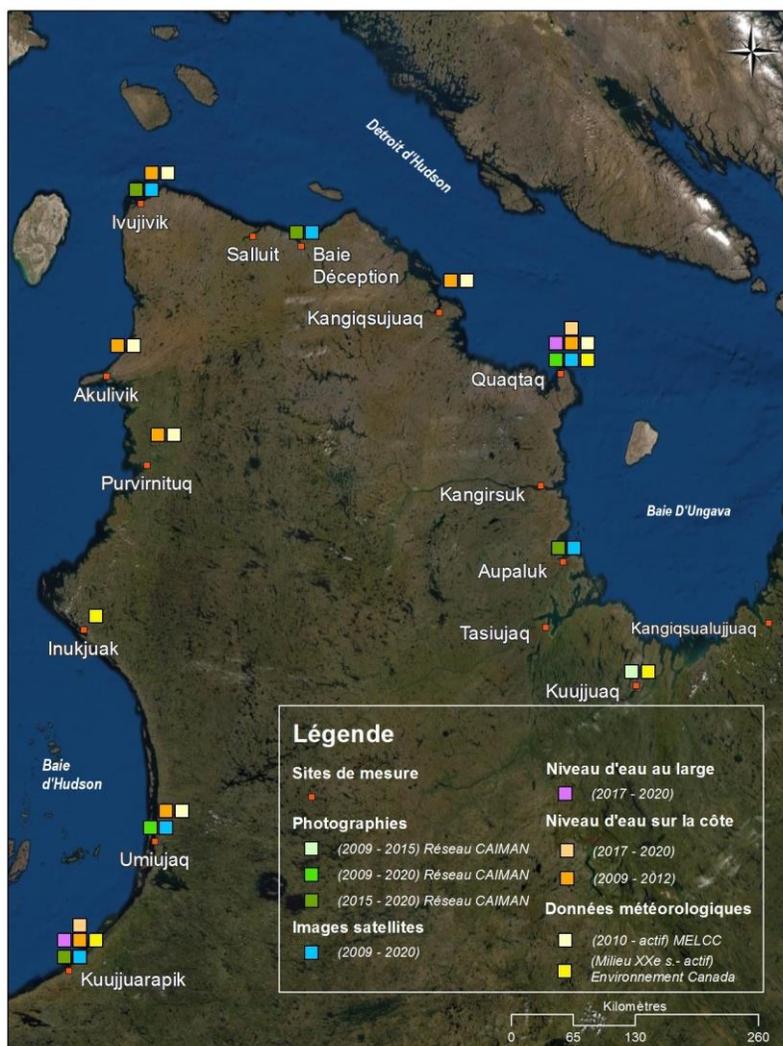
Situé au nord du 55^e parallèle, le Nunavik est la région la plus septentrionale du Québec¹. Son littoral s'étend sur environ 8 000 km (Ouranos, 2015b), le long de la baie d'Hudson, du détroit d'Hudson et de la baie d'Ungava. Lors du dernier recensement du Canada de 2016², le Nunavik comptait plus de 12 000 résidents Inuits et un peu plus d'un millier non Inuit. Sa population connaît une importante hausse démographique, (quatre fois plus rapide que la population québécoise entre 2011 et 2016³) et les différentes ententes de développement socio-économiques du Nunavik entre les communautés inuites, la société Makivik, l'Administration Régionale Kativik (ARK) et le gouvernement du Québec s'accompagneront d'une augmentation de l'occupation du sol et du transport maritime (Comtois, 2020), se traduisant potentiellement par la nécessité d'augmenter la taille des infrastructures marines et côtières ou d'en construire de nouvelles

¹ Le Nunavik, se situant entre 55°N et 62°N (Ivujivik est la communauté québécoise la plus nordique), n'est pas considéré comme faisant partie de la région Nord du Canada dans le rapport d'Environnement et Changement Climatique Canada (Bush et al., 2019).

² Recensement Canada, 2016. Données récupérées le 27 février 2020 à <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F>.

³ Entre 2006 et 2011 la population des 14 communautés du Nunavik a cru de 11.7% et entre 2011 et 2016, elle a cru de 12.7% (Recensement 2016 de Statistique Canada) alors que la population du Québec a cru de 4.9% et 2.8% respectivement (Institut de la statistique du Québec, 2019).

plus adaptées aux changements démographiques. La population est répartie dans 14 communautés côtières (Figure 1) de la baie d’Hudson, du détroit d’Hudson et de la baie d’Ungava. Ces communautés éloignées sont reliées entre elles par les voies aériennes et maritimes ; aucune route ne les relie entre elles ou au reste de la province. Air Inuit et First Air assurent le transport aérien de personnes et de marchandises légères en desservant les 14 communautés nordiques et en les reliant à Montréal et à Québec. Les déplacements par avion entre les communautés se font deux fois par jour, en s’arrêtant à chaque communauté depuis Salluit vers Kuujjuarapik ou vers Kujjuaq pour finir à Montréal ou Québec. L’accès à la mer est essentiel à la fois pour permettre aux Inuits de pratiquer leurs activités traditionnelles de chasse, de pêche et de cueillette de subsistance, et leurs activités de loisirs, mais également pour assurer leur développement économique⁴. En effet, durant la période estivale et automnale, c’est par la desserte maritime que l’acheminement des marchandises pondéreuses et non-périssables (ex. matériaux de construction, véhicules, biens de consommation courante, carburants, etc.) est privilégiée par les communautés et par l’industrie minière pour l’approvisionnement des sites d’exploitation et l’exportation du minerai (Comtois et al., 2020).



⁴ Société Makivik, 2019. Programme d’infrastructures maritimes, aperçu dans <http://www.makivik.org/fr/marine-infrastructure/>

Figure 1. **Localisation des données acquises pour les aléas étudiés.** Les données proviennent des stations météorologiques (températures, vent, humidité), des marégraphes (niveau d'eau sur la côte), des houlographes (niveau d'eau au large), des caméras (photographie de la mer près de la côte), des images Landsat et MODIS (images satellites), avec période d'acquisition et nom du réseau de maintenance.

Entre 1999 et 2011, des infrastructures maritimes (brise-lames, rampes d'accès, quais en eau profonde) ont été construites dans l'ensemble des communautés nordiques du Nunavik. Elles offrent un accès sécuritaire et fiable, à la mer, aux utilisateurs des petites embarcations, une optimisation des opérations liées à la desserte maritime, une contribution au développement socioéconomique des communautés et favorisent la poursuite des activités traditionnelles des Inuits (Ministère du Transport du Québec, 2011). Entre 2009 et 2020, afin de fournir des *séries temporelles* de données aux différents modèles, des appareils de mesures ont été installés aux abords des côtes de différentes communautés. La carte synthèse régionale des instruments de mesure (Figure 1) localise les communautés du Nunavik, les sites d'acquisition de données, les types de données acquises, le nom du réseau qui permet la maintenance des stations, qui collige et rend disponible les données, et la période d'acquisition de ces données. Cette carte révèle les efforts déployés, dans la dernière décennie, afin d'améliorer les connaissances sur la dynamique hydroclimatique de la région. Elle montre aussi que certaines communautés ont été pourvues de plusieurs types d'appareils de mesures et d'un plus grand nombre de jeux de données sur une plus longue période de temps (Kuujuarapik et Quaqtqa) et que d'autres communautés n'ont pas d'installations de mesure sur la côte (Inukjuak, Salluit, Kangirsuk, Tasiujaq et Kangiqsualujuaq et la région maritime de la baie d'Ungava).

L'intégrité des infrastructures maritimes et côtières peut être affectée par des événements climatiques extrêmes. La force et la *réurrence* des aléas climatiques, s'ils s'amplifiaient dans le futur, pourraient occasionner des dommages à ces infrastructures, car bien qu'elles soient conçues pour résister aux intempéries « normales », elles n'ont pas été conçues pour résister aux conditions climatiques futures (Comtois, 2020). En effet, jusqu'ici les risques naturels étaient calculés selon l'hypothèse que les mêmes contraintes apparues sous les conditions climatiques passées se reproduiraient. Or, en contexte de CC, il est impossible de s'appuyer uniquement sur des événements passés pour décider des actions à mener aujourd'hui, pour anticiper l'avenir (Ouranos, 2015). Le réchauffement climatique se faisant déjà sentir au Nunavik, le gouvernement du Québec souhaitait évaluer les changements futurs sur le littoral du Nunavik à partir des projections climatiques. De ces changements futurs, découleront des variations relatives aux coûts d'entretien, de remise en état ou de relocalisation des infrastructures côtières, qu'il importe de mesurer. De la même façon, les CC auront des répercussions sur le coût d'investissements et l'organisation socioculturelle des Inuits qu'il est opportun d'anticiper.

1.2 PORTRAIT CLIMATIQUE DU NUNAVIK

La région composée de la Baie d'Hudson, du détroit d'Hudson, de la baie d'Ungava et du territoire du Nunavik a connu une augmentation hivernale de 1,5°C par décennie, pendant la période 1987-2016. Pendant cette période, l'augmentation estivale était de 0,5°C par décennie. Les projections indiquent que ce réchauffement se poursuivra. La région pourrait connaître des augmentations de températures de l'air annuelles de 4 à 5,1°C sur la période de 2046 à 2064, et de 4,1 à 7,5°C sur la période 2076 à 2100. Un réchauffement plus marqué pourrait être atteint pour les températures de l'air hivernales avec des augmentations de 5,5 à 5,8°C, sur la période de 2046 à 2064, selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (voir encadré). Selon les mêmes scénarios et les mêmes périodes futures, les augmentations des températures de l'air pourraient atteindre de 2,0 à 2,5°C en été (Integrated Regional Impact Studies (IRIS) 4, 2^e^{ème} édition – communication personnelle).

La hausse des températures aurait pour effet d'augmenter les précipitations totales (quantité totale de pluie et de neige) annuelles (Ouranos, 2015a). Il y a une plus grande incertitude dans les moyennes annuelles des

précipitations mais il y a un consensus sur le fait que les précipitations aient cru de 3% par décennie depuis les années 50 sur toute la région (IRIS 4, 2^e édition – communication personnelle).

Selon les mêmes scénarios, RCP4.5 et RCP8.5, dans la région du Nunavik, les précipitations moyennes annuelles pourraient augmenter de 20 à 35 % sur la période de 2046 à 2064. Il est anticipé sur toute l'année, une augmentation des précipitations quotidiennes, se situant entre 0 et 0,5 mm / jour. Les précipitations extrêmes pourraient augmenter sur toute la région de 5 à 10 mm / jour respectivement pour les horizons 2046-2064 et 2076-2100, sous le RCP8.5. Les changements dans les précipitations extrêmes seraient systématiquement plus importants que les changements dans les précipitations annuelles. Alors que les précipitations totales ont augmenté, le réchauffement semble avoir contribué à un déclin de 13 % des précipitations solides (neige, grêle, plus verglaçante) totales, entre 1980-2014. Ce déclin des précipitations solides est plus élevé en octobre et novembre (IRIS 4, 2^e édition – communication personnelle).

Tableau 1. **Résumé des données climatiques du Nunavik (IRIS 4, 2^e édition - communication personnelle)**

Horizons Saison	Passé récent	RCP4.5		RCP8.5	
	1987-2016	2046-2064	2076-2100	2046-2064	2076-2100
Tmoy air été (JJA)	↗ 0,5°C par décennie	↗ 2,0°C		↗ 2,5°C	
Tmoy air hiver (DJFM)	↗ 1.5°C par décennie	↗ 5,5°C		↗ 5,8°C	
Tmoy air année	↗ 0.5 à 0.9°C par décennie	↗ 4,0°C	↗ 5,1°C	↗ 4,1°C	↗ 7,5°C
Précip. max (mm/jour)				↗ 5	↗ 10
Moy annuelle des précip. quotidiennes (mm/jour)	Entre 1 et 1,6	↗ 0,33	↗ 0,37	↗ 0,39	↗ 0,69
Précip moy annuelles (%)				↗ 20 à 35	
Durée de l'enneigement (jours)		↘ 23	↘ 31	↘ 31	↘ 63

Ainsi, les changements concernant les températures et les précipitations se font déjà sentir dans la région du Nunavik et s'amplifieront surtout en automne et hiver et surtout dans la partie nordique du Nunavik (IRIS 4, 2^e édition communication personnelle) d'ici la fin du XXI^e siècle.

Encadré. Les scénarios climatiques du GIEC

En 2013, dans son 5^e rapport, le GIEC confirme qu'il est extrêmement probable que le réchauffement climatique soit lié aux émissions de GES libéré par les activités anthropiques (combustion des carburants fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel), les pratiques forestières et agricoles ainsi que par l'urbanisation). Aussi, le GIEC met en place, en 2014, quatre *trajectoires de concentration représentative* (Representative Concentration Pathways - RCP) ou scénarios climatiques soit les RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5, basés sur des projections de croissances économique et démographique planétaires, qui décrivent les émissions de GES futures plausibles.

Scénario RCP8.5 – Le scénario le plus pessimiste où les émissions de GES sont très élevées car il assume qu'aucune action significative ne sera prise par les gouvernements pour les réduire (IPCC, 2019).

Scénarios RCP4.5 et RCP6.0 – Les scénarios d'émissions de GES modérées. Ils supposent une action vigoureuse de l'ensemble des gouvernements pour réduire les émissions de GES.

Scénario RCP2.6 – Le seul scénario qui conduit à une augmentation des températures sous 2°C en 2100 (IPCC, 2019). Il prévoit une réduction très importante de l'utilisation des carburants fossiles et de nombreuses

mesures d'atténuation visant à réduire à zéro les émissions nettes de GES vers le milieu du XXI^e siècle. Ce scénario est considéré comme peu réaliste actuellement.

En 2007, dans son quatrième rapport, le GIEC utilisait d'autres scénarios appelés **SRES** (Special Report on Emissions Scenarios). Ils étaient fondés sur le même canevas pour ce qui est de l'évolution démographique, sociétale, économique et technologique. L'ensemble des scénarios SRES comprenait quatre familles de scénarios : **A1, A2, B1 et B2**. Les émissions du scénario SRES A2 sont comparables au forçage radiatif du RCP8.5 (voir synthèse technique).

Ces différents scénarios d'émissions de GES sont fournis aux modèles climatiques qui calculent des projections climatiques. Celles-ci permettent d'estimer comment les scénarios d'émission pourraient affecter les normales climatiques, la variabilité et les tendances des variables climatiques pour une région et un horizon donnés. (Charron, 2016).

1.3 ÉVALUER DES CHANGEMENTS SUR LES ALÉAS CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES ET LEURS CARACTÉRISTIQUES

Le gouvernement du Québec a coordonné plusieurs études⁵ portant sur les impacts des CC sur l'environnement côtier et maritime du Nunavik entre 2009 et 2020 dans le cadre du PACC 2006-2012 et du PACC 2013-2020. Ces études, synthétisées ici, ont été menées ou se poursuivent encore aux centres de recherche de l'INRS-ÉTÉ, de l'ISMER, à Ouranos et aux firmes de consultants Environnement Illimité Inc., CIMA+ et Lasalle NHC.

Quelles que soient la latitude et les caractéristiques géophysiques d'une côte, les deux principaux impacts physiques qu'une côte peut subir sont la *submersion* et l'érosion (Boyer-Villemaire, 2016). Des dommages causés au milieu naturel (ie : disparition de la plage par submersion, érosion des falaises côtières) aux infrastructures et aux installations côtières (ie : submersion des bâtiments, affouillements des pieds des structures de protection) pourraient rendre difficile l'accès au territoire. Pour évaluer les changements qui concernent le littoral du Nunavik, les études mentionnées précédemment et sur lesquelles la synthèse des connaissances repose, ont chacune évalué les changements sur les caractéristiques d'*aléas* hydroclimatiques⁶ naturels particuliers (niveau d'eau, vagues, vents et glaces extrêmes) qui pourraient s'amplifier dans le futur et provoquer une augmentation de la perturbation de la côte.

Les principaux aléas perturbateurs des côtes, étudiées sont :

- Le régime des tempêtes, même si les intensités sont moindres ;
- Les *niveaux d'eau extrêmes* ;
- la fréquence de fortes vagues ;
- Les dates de formation/disparition de la *glace de mer* et l'épaisseur atteinte.

⁵ Ces études sont utilisées dans la synthèse des connaissances et dans la synthèse technique, les références se trouvent en bibliographie (Clerc et al., 2012 ; Massée et Villeneuve, 2013 ; Massé et Gallant, 2016; Savard et al. 2014 et 2016; Bernier et al. 2016, 2017, 2018, 2019 ; Ropars, 2014 ; Senneville et St-Onge, 2013 ; Senneville, 2018 et Neumeir et al. 2019).

⁶ Les interactions entre les *aléas* climatiques et hydrologiques (géophysiques) étudiés sont expliquées dans la synthèse technique

Les caractéristiques des aléas (moyenne, intensité, probabilité d’occurrence (ou récurrence), la localisation spatiale (ou étendue) et la durée possible de leurs effets sont nécessaires pour mieux comprendre leur nature et ainsi accroître la connaissance de leurs impacts sur le milieu exposé (Morin, 2008b).

Il s’agit ensuite de recueillir des séries d’observations sur ces perturbateurs. Ces observations permettent d’évaluer la mesure des changements qui ont déjà eu lieu. Au Nunavik, il n’existe pas ou peu de longues séries d’observations sur les niveaux d’eau, la glace de rive et de mer et les vagues et il en existe peu sur les conditions climatiques qui les influencent. Aussi, dès 2009, pour chacune des études, des équipements de mesures sur différents sites du Nunavik ont été installés afin de recueillir les conditions météorologiques sur la côte, les niveaux d’eau au large et sur la côte, la présence de la glace de rive et de mer, les hauteurs des vagues et les conditions météorologiques qui influencent ces aléas (Figure 1).

Ces observations ont ensuite été traitées et utilisées pour valider (ou calibrer) les modèles hydrodynamiques (de glaces de mer, de vagues et de niveaux d’eau) (synthèse technique) qui ont effectué des simulations pour les périodes du passé récent (1989-2009), du futur proche (horizon 2040-2069) et du futur lointain (horizon 2070-2099), (synthèse technique). Le Tableau 2⁷ compile les types de données et les séries temporelles hydroclimatiques simulées à partir des différentes séries d’observations pour les 14 communautés du Nunavik et baie Déception. Le Tableau 2 indique aussi les *réanalyses* (longues séries de données spatio-temporelles, continues et uniformes, cohérentes entre diverses variables, utilisées comme données du passé récent dans les modèles lorsque les données observées sont trop discontinues) et les simulations climatiques utilisées comme intrants dans les modèles hydroclimatiques.

Tableau 2. Liste des données simulées pour les différents sites étudiés au Nunavik

Nom de la station de mesure	Réanalyses 1979-2012 Simulations climatiques 2011-2040 2041-2070 2071-2100	Niveaux d’eau moyens atteints en 2100 Avec Relèvement isostatique	Niveaux d’eau maximum et minimum, période de retour 100 ans 1980-2009 2040-2069 2070-2099	Niveaux d’eau maximum, période de retour 2 ans et 75 ans 1980-2009 2040-2069 2070-2099	Concentration Épaisseur Volume de glace de mer 2041-2070	Vagues 1980-2010 2071-2100
Baie d’Hudson						
Kuujuarapik	X	X	X	X	X	X
Umiujaq	X		X		X	
Inukjuak	X	X	X		X	
Puvirnituq	X		X	X		
Akulivik	X		X	X		
Ivujivik	X		X	X	X	
Détroit d’Hudson						
Salluit	X	X				
Baie Déception	X		X		X	
Kangiqsujuaq	X		X	X		
Quaqtaq	X		X	X	X	X

⁷ Pour plus d’information sur les différentes données acquises, les équipements utilisés, les différents appareils de mesure, leurs contraintes, la discontinuité des données et les traitements nécessaires et enfin les modélisations réalisées le lecteur peut consulter la synthèse technique. (Synthèse technique).

Baie d'Ungava						
Kangirsuq	X					
Aupaluk	X				X	
Tasiujaq	X					
Kuuujuaq	X	X	X		X	
Kangiqualujuaq	X					

Des cartes synthèses reprenant les résultats des simulations pour chacun des aléas étudiés devaient être produites. Cependant, certains résultats, tels que les conditions de glace ou les échelles spatiales et/ou temporelles, pour des raisons techniques de visibilité, ne peuvent pas être représentés sur une carte régionale. Les résultats des simulations de concentration de glace sont disponibles dans l'atlas des conditions de glace de Senneville, produit en 2018. Les conditions de glace y sont répertoriées mensuellement pour des horizons futurs. Les simulations sur les vagues et sur les tempêtes toujours à l'étude ne peuvent pas non plus figurer sur une carte. Une partie des résultats, obtenus pour les *ondes de tempête*, a été représentée à la Figure 4 (section 2.1.3).

1.4 ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DU MILIEU CÔTIER ET DES COMMUNAUTÉS

Une évaluation de la vulnérabilité complète doit ajouter aux caractéristiques étudiées des aléas, les caractéristiques des infrastructures et les caractéristiques des populations. En effet, les aléas hydroclimatiques ne correspondent qu'en partie au risque (ou probabilité) pour le milieu de subir des modifications importantes. Ce risque dépend aussi des facteurs de vulnérabilités intrinsèques du milieu. La vulnérabilité intrinsèque, résulte de facteurs physiques et environnementaux mais aussi sociaux, ou économiques. Elle prédispose les éléments exposés à la manifestation d'un aléa à subir des dommages (Morin, 2008b). Dans les régions nordiques, le potentiel de développement économique et la croissance démographique combinés aux impacts des CC complexifient les enjeux associés à la vulnérabilité des côtes (Ouranos, 2015b).

Pour le milieu côtier des villages au Nunavik, les éléments de vulnérabilités à évaluer sont :

- Environnemental : la géomorphologie de la côte c'est-à-dire sa forme (en baie, fjord ou embouchure) et la présence d'îles au large ; le type de sol c'est-à-dire un sol sédimentaire (sableux ou argileux) ou une côte rocheuse ; et la dégradation du pergélisol (Allard et al., 2010; Allard et Lemay, 2013; L'Hérault et al., 2013)
- Physique et économique : le nombre, l'âge de la construction, les matériaux et leur résistance aux phénomènes naturels, la distance à la rive, le coût pour des réparations ou des déplacements, des infrastructures sont à considérer au regard de l'intensité et de la récurrence des aléas.
- Social : l'attachement historique au milieu, l'organisation sociale et la démographie, le niveau de sensibilité aux impacts et aux solutions envisageables renseignent sur la *capacité d'adaptation* des populations.

Afin de comprendre comment les risques liés aux impacts climatiques sont appelés à changer dans le futur, il importe donc d'analyser les aléas et la vulnérabilité des côtes mais les caractéristiques des infrastructures et les caractéristiques des populations pourraient être ajoutées.

1.5 LA SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES COMME AMORCE AU PROCESSUS D'ADAPTATION

L'adaptation est un processus par lequel les communautés et les écosystèmes s'ajustent aux effets des CC pour limiter les conséquences négatives et tirer profit des bénéfiques potentiels (Larrivée, 2010). Tel que présenté à la figure 2, la mise en place de mesure d'adaptation (étape 4-figure 2) doit s'appuyer sur des connaissances robustes quant aux changements climatiques attendus et des risques (conséquences) que ceux-ci peuvent avoir sur le système (naturel et humain) (étape 1-figure 2). Cette synthèse pourra servir de point de départ au processus d'adaptation de l'environnement maritime et côtier puisqu'elle correspond à l'étape 1 du processus d'adaptation. En effet, elle résume les travaux scientifiques qui évaluent les changements probables des aléas hydroclimatiques affectant les milieux côtiers et maritimes du Nunavik dans un contexte de CC, en les mettant en relation avec les impacts anticipés sur la côte à différentes échelles d'analyse, soit de l'échelle régionale (le Nunavik) vers l'échelle locale (communautés) (**chapitre 2**). Puis, elle offre une démonstration de l'utilité des connaissances présentées dans le chapitre précédent quand elles sont intégrées à certaines étapes clés du processus d'adaptation et des exemples d'outils d'aide à la décision existants ou qui pourraient être appliqués au Nunavik (**chapitre 3**).



Figure 2. Le processus d'adaptation d'après Ouranos, 2020

1.6 MISE EN GARDE SUR LES INCERTITUDES DES RÉSULTATS OBTENUS DANS LES DIFFÉRENTS RAPPORTS DU MTQ ET SES PARTENAIRES

Cette synthèse des connaissances s'appuie sur des rapports de recherches scientifiques dont les méthodologies et les incertitudes détaillées pour chacun d'eux, sont résumées dans la synthèse technique. Pour des informations plus complètes, le lecteur est invité à consulter les rapports de recherche en se référant à la bibliographie. Les données de la synthèse devraient être vérifiées par l'utilisateur avant la conception d'ouvrage, la navigation ou d'autres activités sensibles à l'exactitude des données. De même, les statistiques de niveaux extrêmes sont limitées à des fins de recherche et de planification côtière et leur

utilisation pour de la conception d'ouvrages est la responsabilité des utilisateurs. Les principales incertitudes inhérentes à toute étude prospective du climat sont indiquées ci-dessous.

1. Les données d'observation de courtes durées ou intermittentes. Elles sont utilisées pour calibrer des modèles. Elles peuvent aussi servir à développer des paramétrages qui aident les modèles climatiques à représenter certains phénomènes qui ne peuvent être correctement pris en charge par leurs équations fondamentales (Charron, 2016). Si ces données sont peu nombreuses (comme pour le régime des vagues) ou s'étendent sur une période trop courte (comme pour le niveau d'eau extrême), elles sous-estiment la diversité des conditions possibles. De plus, les données climatiques de courtes durées ou intermittentes ne peuvent pas fournir un portrait fiable du climat observé (normales, variabilité interannuelle et décennale, extrêmes) qui nécessite plusieurs décennies de données. Par conséquent, les résultats des modèles hydrodynamiques et des modèles climatiques ne peuvent pas être correctement validés. Pour pallier à la discontinuité des données observées les *réanalyses* sont développées par les centres de recherche en météorologie à partir de leurs bases de données observées (synthèse technique).

2. Les limites de temps et de budget. Elles ne permettent pas de réaliser une quantité de calculs très élevé. Cependant, des calculs supplémentaires pourraient être faits ultérieurement, pour obtenir de nouvelles projections des extrêmes de niveaux totaux, des hauteurs de vagues ou des conditions de glace dans un climat futur (Massé et Gallant, 2016 ; Senneville, 2018 ; Neumeier, 2019).

3. Les modèles simplifications de la réalité. Le système climatique étant très complexe et non-linéaire (chaotique), il s'avère que les interrelations entre les différents sous-systèmes ne sont pas toutes bien connues et représentées dans les modèles. Chaque modèle simplifie une partie de la réalité. Les modèles diffèrent notamment par leur degré de simplification et la manière de représenter les phénomènes physiques qui se produisent à des échelles plus fines (Charron, 2016). Toutefois, leur réalisme s'améliore constamment grâce à l'inclusion de nouveaux processus et au perfectionnement de ceux qui s'y trouvent déjà (synthèse technique).

4. L'amplitude des CC futurs dépendante des scénarios d'émission des GES (GIEC, 2014). Ces scénarios, tous considérés comme plausibles (Charron, 2016 ; IPCC, 2019), dépendent de changements dans les procédures économiques et l'implication des politiques pour mettre en place des leviers visant à diminuer l'émission des GES (encadré 1). Ils sont mis à jour avec chaque nouveau rapport du GIEC en fonction des changements politiques et économiques mis en place, aussi les résultats utilisant ces scénarios sont valides pour ces scénarios disponibles au moment des simulations. L'amplitude des CC s'inscrit donc dans l'intervalle de résultats des projections climatiques issues des deux scénarios les plus extrêmes (RCP2.6 et RCP8.5 voir encadré) pour les différents horizons choisis.

5. Les résultats projetés sur des périodes de 30 ans (horizons). Ils ne peuvent pas être considérés comme des prévisions pouvant se produire pour ces périodes précises mais plutôt comme des conditions typiques susceptibles de se produire approximativement à l'intérieur de ces périodes. Les périodes futures (appelées horizons) projetées les plus lointaines (pour la fin du XXI^e siècle) sont associées aux plus fortes incertitudes.

6. La comparaison sur des projections faites à partir de différents scénarios de GES et pour des horizons différents. Il est important, lorsque l'on veut comparer des ensembles de résultats issus de modèles différents, de vérifier que les projections ont été fondées sur les mêmes scénarios (RCP ou SRES), pour la même période de référence et pour des horizons couvrant la même période de temps (30 ans). Certaines équipes de recherche dans les rapports étudiés utilisent des horizons sur 20 ans.

7. L'incertitude spatiale. Les modèles régionaux du climat (MRC) du groupe UQAM-Ouranos qui fournissent les données climatiques pour la région du Nunavik sont à une résolution de 45 km et de 25 km. Les mailles du modèle de glace sont de 10 km et devraient être raffinées à 2 km près des côtes. Ces résolutions spatiales sont trop grossières pour représenter certains effets qui se produisent à l'échelle de la communauté. Bien que les images satellites étudiées pour les conditions de glace aient une résolution de 30 m, elles doivent être agrégées sur les mailles du modèle de glace à 10 km afin de le valider.

2. LES FAITS SAILLANTS

Les études sur les *aléas* hydroclimatiques qui nous intéressent ici sont beaucoup plus nombreuses à avoir été menées en Arctique que sur la baie d'Hudson et le Nunavik. Bien qu'il ne soit pas possible d'y transférer tous les résultats obtenus sur l'Arctique, quelques-unes de ces études offrent des pistes intéressantes pour comprendre l'évolution de certains aléas au Nunavik car les deux environnements présentent quelques similitudes, notamment la présence de glace marine. Il a ainsi été montré qu'en Arctique, la perte de *glace de mer* sera continue pour la moitié du siècle (IPCC, 2019). La probabilité annuelle que l'océan Arctique soit libre de glace en septembre autour de 2050 est de 1% si l'augmentation des températures globales de l'air est limitée à 1,5°C. Or, cette probabilité augmente entre 10 et 35% pour un réchauffement global atteignant 2°C (IPCC, 2019). De plus, les événements de *niveau d'eau extrême* qui avaient lieu une fois par siècle dans le passé récent devraient arriver au moins une fois par année vers le milieu du XXI^e siècle selon tous les RCP (IPCC, 2019). En ce qui concerne les tempêtes, les analyses les plus récentes ont été centrées sur l'océan arctique et excluent la baie d'Hudson (voir synthèse technique). Sur l'archipel arctique canadien et la baie de Baffin, les tempêtes hivernales (DJF) pourraient être plus fréquentes mais les conclusions sont très mitigées quant à leur taille et leur intensité. Le secteur du bassin de Foxe pourrait aussi connaître une hausse des tempêtes estivales (JJA) contrairement à d'autres régions de l'Arctique d'ici à la fin du XXI^e siècle (Akperov et al. 2019). Ces résultats sont basés sur des analyses regroupant des modèles plus récents, plus nombreux et à plus fine résolution que ceux des travaux antérieurs sur l'Arctique rapportés dans Ford et al., (2016).

Tant que les données sont inexistantes ou peu nombreuses au Nunavik, il est possible, avec prudence, de s'inspirer de celles de l'Arctique. Ainsi ces deux environnements, qui subiront un réchauffement beaucoup plus marqué que la moyenne mondiale, ont en commun la présence de glace marine et de pergélisol mais diffèrent considérablement quant à la circulation atmosphérique régissant la formation des tempêtes. Ainsi, les résultats obtenus sur l'Arctique ne sont pas suffisants pour comprendre et connaître ce qui se passe plus spécifiquement au Nunavik. Les études coordonnées par le MTQ apportent donc des connaissances nouvelles et distinctives sur les caractéristiques des aléas potentiels, climatiques et hydrologiques, au Nunavik.

Ce deuxième chapitre a pour objectif de faire état des connaissances issues des recherches menées ces dernières années sur les *impacts* des CC sur les aléas sur le littoral du Nunavik. Les caractéristiques des aléas sont indiquées sous forme d'un message clé par aléa sous lequel une explication est détaillée.

Les résultats sont présentés à l'échelle du Nunavik (**section 2.1**), afin d'établir un portrait général des résultats principaux, communs à la région entière. Puis, ils sont présentés par région océanique (baie d'Hudson, détroit d'Hudson et baie d'Ungava) (**sections 2.2, 2.3, 2.4**) afin de souligner les grandes particularités pour chacun d'eux. Les messages clés sont ensuite présentés de façon détaillée pour chacune des communautés pour permettre aux lecteurs de se diriger directement sur leur communauté d'intérêt (**sous sections 2.2.2, 2.3.2 et 2.4.2**).

Une carte synthèse locale a été créée pour les neuf communautés pour lesquelles des simulations ont été produites et pour Baie Déception. Un exemple de ce type de cartographie ainsi qu'une brève explication sur sa lecture sont fournis dans la section de la communauté de Kuujjuarapik. Les neuf autres cartes synthèses locales sont placées en annexe de ce document. La présentation des communautés suit la côte en commençant par la communauté la plus au sud, sur la côte sud-ouest de la baie d'Hudson, Kuujjuarapik. Elle se dirige vers le nord et l'est pour terminer avec la communauté la plus au nord et à l'est de la baie d'Ungava, Kangiqsualujjuaq. Il faut mentionner que la documentation des aléas n'est pas la même pour toutes les communautés. (Figure 1) et que d'autres études complémentaires menées à l'échelle locales sont mentionnées au chapitre 3 (Allard et al., 2020a, b et c).

2.1 LE NUNAVIK

2.1.1 PORTRAIT GÉNÉRAL

L'environnement côtier (milieux naturels et infrastructures) peut être endommagé en subissant une *submersion* et/ou une érosion provoquée par les aléas hydroclimatiques (niveau d'eau, vagues, vents et glaces), selon leur *vulnérabilité* (qui dépend de la physiographie du littoral et de la présence de protections naturelles) et selon le degré d'exposition (intensité et durée). Les différents impacts qui pourraient affecter les différentes côtes du Nunavik sont succinctement décrits dans les paragraphes suivant selon qu'ils surviennent à cause du *marnage* (ou amplitude des *marées*) et selon les aléas hydroclimatiques. Les relations entre les différents aléas étudiés sont expliquées dans la synthèse technique.

- Le **marnage** est faible sur la côte de la Baie d'Hudson, modérée sur le détroit d'Hudson et forte dans la baie d'Ungava (Figure 3). Or, un site avec une faible amplitude de marée signifie qu'il est sensible aux inondations par submersion à marée basse lorsqu'une *surcote* se manifeste. À l'opposé, un site avec une forte amplitude de marée signifie qu'il ne serait sensible à la submersion que pour des surcotes élevées concordant avec des marées hautes.

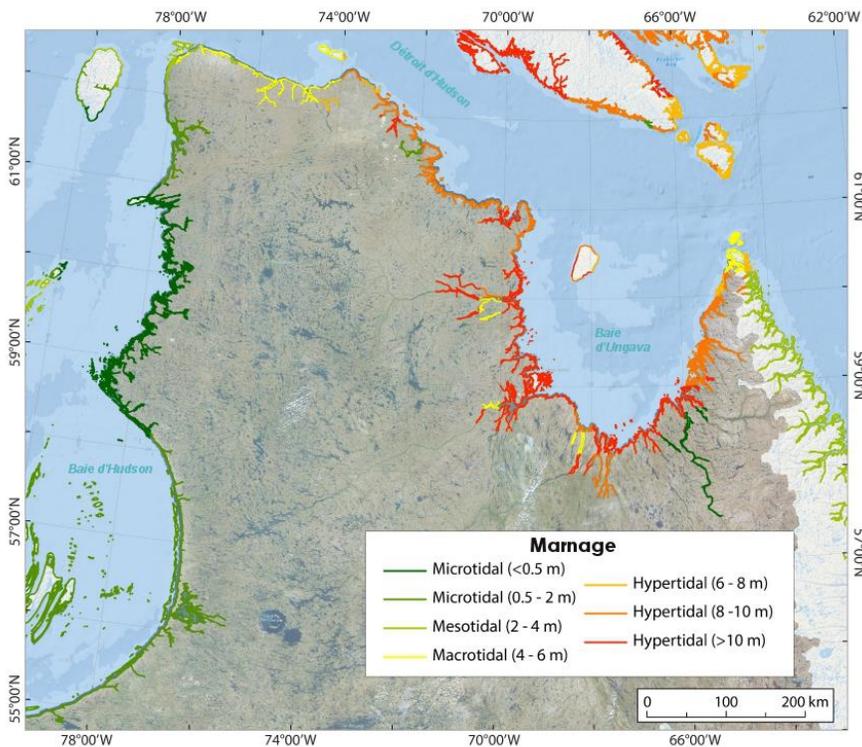


Figure 3. Marnage au Nunavik (CanCoast data product, source data from Canadian Hydrographic Service). (Boisson, 2019).

- Lors d'une **tempête**, le niveau d'eau est accru et les vagues sont plus vigoureuses augmentant les risques de submersion et d'érosion. La puissance (vitesse du vent d'une tempête dépasse 90 km/h) et la vitesse de déplacement des tempêtes peuvent être accrues par le fetch (l'espace disponible qui permet au vent d'accélérer) et l'absence de glace de mer. Les tempêtes nordiques se déplacent plus lentement que celles du sud du Canada prolongeant davantage la durée d'exposition aux vagues et

aux ondes destructrices des côtes nordiques (Ford et al., 2016). De plus, les tempêtes même d'intensité faible, peuvent entraîner, par des contraintes répétitives, des dommages cumulatifs si elles apparaissent de façon plus rapprochée (Ropars, 2014). Au regard de nouvelles études sur les tempêtes et de connaissances plus à jour, les résultats produits sur la présence des tempêtes dans la Baie d'Hudson de Savard et al. (2014) sont considérés comme trop fragmentaires et doivent être mis à jour en se basant sur des modèles plus récents et plus nombreux ayant démontré sur l'Arctique une meilleure habilité à simuler des processus importants pour la baie d'Hudson. Voir la synthèse technique pour plus de détails.

- Les **vagues** (ou déferlantes) plus fréquentes et plus fortes et leur angle d'approche (la direction du vent et l'orientation à la côte) déterminent l'exposition de la côte. La modélisation des vagues au Nunavik est toujours en cours, plusieurs nouveaux résultats sont attendus pour 2021 et 2022.
- Les **niveaux d'eau totaux** très élevés peuvent entraîner des submersions des littoraux plus fréquentes. En contrepartie, des niveaux d'eau totaux très bas peuvent entraîner le retrait des eaux, plus fréquents sur de plus grandes distances.
- La couverture complète de **glaces de rive (ou glace de mer stables)**, en hiver, diminue le fetch et protège la côte contre l'érosion. Par contre, la surface de la plage et de l'arrière-plage, y compris les dunes, subissent l'érosion, et les infrastructures maritimes peuvent être endommagées lorsque les **glaces de mer instables**, liées à une couverture partielle au printemps et en automne, sont poussées sur la grève (poussées glacielles) par les vagues et les vents de tempête importants (Atkinson et al., 2016; Boisson, 2019; Bush et al., 2019). Les glaces s'empilent sur les barres sublittorales formant des bourrelets en dessous et au-dessus de la zone de marée haute et creusent ou déplacent les sédiments sublittoraux vers la terre érodant la côte (les baies et les détroits). Avec le réchauffement des températures, la période de couverture de glaces partielles et instables est plus longue.

L'inondation par submersion concerne surtout les terres et les infrastructures situées dans les zones basses. Les vagues ou les glaces peuvent percuter le sommet des infrastructures et les endommager, si elles ne sont pas suffisamment robustes pour résister à la pression hydraulique. Les vagues peuvent submerger les côtes en franchissant l'infrastructure et peuvent aussi endommager les aménagements côtiers qui ne sont plus protégés (Boisson, 2019). Dans le cas le plus extrême, la submersion peut pénétrer plus loin sur le littoral. Avec le retrait de l'eau, l'érosion de la côte, des sapements et des affouillements au pied des infrastructures et le descellement des pierres ou d'autres éléments, peuvent se produire. L'ensablement à l'embouchure des rivières nécessitant du dragage peut compromettre l'accès aux infrastructures et l'entrée et la sortie des bateaux aux ports (Boisson, 2019). Les activités de navigation deviennent périlleuses et puisque le *niveau marin relatif* est beaucoup plus bas que la normale le *risque d'échouage* est accru. De façon général, l'accès au territoire, tant pour les activités traditionnelles et de récolte que pour les activités industrielles peut être compromis (Ouranos, 2015b).

Les impacts énoncés ci-dessus peuvent être plus ou moins importants selon l'intensité, la fréquence et la répétition des aléas qui les provoquent. Il est donc important de considérer les aléas et leurs caractéristiques dans un horizon futur, un futur proche (2040-2070), ou un futur lointain (2070-2100), afin de pouvoir ajuster l'*adaptation* aux impacts probables. Dans un futur proche (2040-2070), les niveaux d'eau moyens et extrêmes, les vents et la présence de glace, pourraient augmenter la probabilité d'occurrence des vagues hautes (Ford et al., 2016). Dans un futur lointain (2070-2100), les projections montrent que dans une grande partie du Nunavik, le niveau relatif de la mer sera bas car l'effet du *rehaussement isostatique* (élévation des terres) sera plus important que la hausse du niveau des mers ainsi, les *niveaux d'eau extrêmes* hauts pourraient être réduits (Ford et al., 2016). **De ce fait**, les impacts liés à la baisse du niveau d'eau relatif seront graduellement plus importants à la fin du siècle (Boisson, 2019).

2.1.2 NIVEAU MARIN RELATIF

L'augmentation du niveau marin relatif affecte l'ensemble de l'Atlantique Nord. Cependant, il affectera faiblement les côtes du Nunavik d'ici à la moitié du XXI^e siècle puis plus du tout à la fin du XXI^e siècle. En effet, grâce à la compensation du *relèvement isostatique* (élévation des terres) qui y est très rapide (0,6 à 1,4 cm / an), le Nunavik pourrait connaître une baisse du niveau marin relatif de 40 à 90 cm selon la communauté et le scénario d'émission considéré.

L'élévation du niveau de la mer conduit à une augmentation de submersions et d'érosions côtières, selon la nature physique du littoral. Par exemple, des communautés, comme celles d'Aupaluk et d'Inukjuak, où la tolérance à ce type de risque est très faible (faible altitude, type de sol de surface argilo-silteux, *fetch* important) une hausse du niveau de la mer pourrait s'avérer très dommageable. Par conséquent, les projections de changement du niveau de la mer sont importantes pour la prévision de risque pour les populations, la planification et l'entretien des infrastructures et la gestion de l'environnement naturel (Bush et al., 2019).

Selon le scénario RCP8.5, le GIEC (IPCC, 2019) prévoit une hausse du niveau moyen global des océans (ou niveau marin absolu moyenné sur l'ensemble du globe) de 71 cm entre 2081-2100 et de plus de 84 cm à la fin du XXI^e siècle. Or, en Arctique, les ajustements isostatiques postglaciaires vont réduire le taux de changement prévu du niveau de la mer (Ford et al., 2016). Sur les côtes du Nunavik, l'élévation des terres, est, de nos jours, de l'ordre de 0,6 à 1,4 cm par année selon la côte considérée. La combinaison de l'élévation des terres et des niveaux marins globaux pourrait résulter en une baisse du niveau d'eau relatif de 40 à 90 cm sur les côtes du Nunavik, selon la communauté et le scénario considéré, à la fin du XXI^e siècle (Tableau 3). Ainsi, pour une grande partie du Nunavik :

- La hauteur maximale et la *réurrence* des phénomènes de niveaux d'eau extrêmes hauts (*surcotes*) seraient réduites.
- Les dommages à anticiper devraient être principalement attribuables aux niveaux d'eau extrêmes bas (*décotes*) qui pourraient être encore plus bas et plus fréquents que dans le passé récent.

De plus, si à la fin du XXI^e siècle, une portion de la calotte glaciaire de l'ouest de l'Antarctique fondait, 65 cm pourrait être ajouté au niveau moyen global des mers (James et al., 2014). Or, même avec cet important apport d'eau venu de la fonte de l'ouest de l'Antarctique, l'élévation des terres resterait élevée à Kuujjuarapik et Inukjuak où les niveaux d'eau seraient inchangés alors qu'à Kuujjuak et Salluit, les niveaux d'eau subirait une augmentation de 40 cm (Tableau 3).

Par contre, à la moitié du XXI^e siècle, l'élévation des terres pourrait ne pas être assez fort pour compenser les effets des *ondes de tempêtes*, notamment les effets des *surcotes* comme la submersion côtière.

Tableau 3. Niveau marin relatif (cm ± intervalle de confiance 95 %) selon les scénarios climatiques RCP4.5, RCP8.5 et RCP8.5 avec l'effondrement de la calotte glaciaire de l'Antarctique Ouest (OAnt), à certains sites du Nunavik pour la période 2081-2100 par rapport à 1986-2005. Ces scénarios tiennent compte du relèvement isostatique, d'après James et al. (2014).

Site	Niveau d'eau atteint en 2100 selon le Scénario RCP4.5	Niveau d'eau atteint en 2100 selon le Scénario RCP8.5	Niveau d'eau atteint en 2100 selon le Scénario RCP8.5 + OAnt
Kuujjuak	-45.9 ± 27.1 cm	-36.2 ± 33.2 cm	40 cm
Salluit	-42.0 ± 23.7 cm	-32.5 ± 29.5 cm	40 cm
Inukjuak	-71.2 ± 21.7 cm	-58.8 ± 25.4 cm	0 cm
Kuujjuarapik	-87.1 ± 23.4 cm	-72.6 ± 23.4 cm	0 cm

2.1.3 NIVEAUX D'EAU EXTRÊMES, FRÉQUENCE ET SAISONNALITÉ

Le Nunavik pourrait être touché par l'augmentation de la fréquence des niveaux d'eau extrêmes à l'horizon 2040-2069. Si les niveaux d'eau extrêmes hauts (**surcotes**) peuvent atteindre progressivement des niveaux moins élevés d'ici la fin du XXI^e siècle, les niveaux d'eau extrêmes bas (**décotes**) pourraient être plus bas en s'additionnant à la baisse du niveau marin relatif.

Tous les niveaux d'eau indiqués ci-dessous ne tiennent pas compte du relèvement isostatique.

Les niveaux d'eau extrêmes pourraient s'élever ou diminuer jusqu'à ± 1 m.

Entre 1980 et 2010, les niveaux d'eau des décotes ont diminué (de 54 cm à 1 m). Par rapport à cette période de référence, les décotes pourraient être encore plus basses dans le futur et abaisser encore le niveau d'eau de 1,5 cm à l'horizon 2040-2069 et de 6 cm à l'horizon 2070-2099.

Entre 1980 et 2010, les niveaux d'eau des surcotes ont augmenté (de 68 cm à 1,5 m). Par rapport à cette période de référence, les surcotes pourraient être encore plus hautes et augmenter le niveau d'eau de 10 cm, dans le futur.

Leur **fréquence** pourrait augmenter à l'horizon 2040-2069. Les niveaux d'eau extrêmes qui ont lieu actuellement une fois par 100 ans, pourraient subvenir une fois par 35 ou 50 ans.

La **saison** des ondes de tempêtes pourrait s'allonger dans un futur proche et être encore plus étendue dans un futur lointain.

Au Nunavik, d'ici la fin du XXI^e siècle, la baisse du niveau marin relatif aura pour conséquence de réduire les *niveaux d'eau totaux* extrêmes hauts (Savard, 2016). Le mot « total » indique que ce niveau d'eau est la somme du niveau marin relatif, de la marée, de l'onde de tempête et des processus côtiers comme le *jet de rive*. Les études synthétisées ici n'ont pas considéré les processus côtiers, il serait donc pertinent de les considérer dans des études ultérieures (Chapitre 3). L'adjectif « extrême » est utilisé pour les niveaux d'eau qui atteignent des maximums et des minimums rares, c'est-à-dire pour *une période de retour* de 100 ans. Les niveaux d'eau très élevés plus fréquents pourraient entraîner de l'érosion et des submersions plus fréquentes. En contrepartie, le retrait des eaux et des niveaux d'eau très bas pourraient provoquer la formation de plages. De manière générale, dans les systèmes côtiers, les niveaux d'eau totaux extrêmes qui pourraient se produire pendant tout le XXI^e siècle, doivent être considérés pour adapter les infrastructures car ils surviennent lorsqu'une onde de tempête forte est synchrone avec la *marée de vive-eau* ou de *morte-eau*, et que les vents sont dirigés vers la côte (Boyer-Villemare et al., 2016).

L'étude sur les ondes de tempêtes (Massé et Gallant, 2016) s'est concentrée sur trois de leurs caractéristiques : les niveaux des décotes et des surcotes probablement atteints, leur probabilité d'occurrence (ou fréquence) et leur saisonnalité (la saison avec la plus forte probabilité d'apparition).

1- Niveaux d'eau extrêmes des ondes de tempêtes.

Les niveaux d'eau provoqués par la marée sont connus et constants et donc prévisibles. Par contre, les niveaux d'eau des ondes de tempêtes qui s'y ajoutent sont inconnus et pourraient provoquer des conséquences graves. C'est pourquoi Massé et Gallant (2016) soustraient le signal de marée aux niveaux d'eau totaux simulés pour obtenir les niveaux d'eau des ondes de tempêtes (surcotes et décotes). Seuls les niveaux d'eau extrêmes, de période de retour 100 ans, en 1980-2009, ont été considérés dans ce chapitre⁸.

⁸ Des périodes de retour plus petites (75 ans, 50 ans et 30 ans) ont été calculées et peuvent être retrouvées dans le rapport de Massé et Gallant (2016).

Tous les résultats sur les niveaux d'eau extrêmes présentés dans le Figure 4 et les Tableau 4 et 5 proviennent de simulations qui n'avaient pas intégrées le rehaussement isostatique.

La Figure 4 présente, deux cartes de synthèse régionale qui illustrent les résultats des simulations des niveaux d'eau extrêmes des ondes de tempête : (a) les décotes et (b) les surcotes. Les niveaux d'eau sont dits extrêmes lorsqu'ils atteignent des hauteurs maximales très rares, une fois tous les 100 ans. Sur ces cartes, les niveaux d'eau sont exprimés, en centimètres (cm). Les niveaux de décotes et de surcotes, atteints pour la période de 1980 à 2009, sont figurés par le symbole rond qui varie du niveau le plus proche du niveau zéro cm (en **bleu**) vers le niveau le plus éloigné (en **rouge**). Pour les horizons futurs, la variation des niveaux extrêmes c'est le niveau extrême de l'horizon futur moins le niveau extrême du passé récent. La variation peut être positive, ce qui indique une augmentation. Elle est alors représentée par une flèche montante. La variation peut être négative, ce qui indique une diminution. Elle est alors représentée par une flèche descendante. Si la variation est faible de l'ordre de 0 à 5 cm, la flèche est bleue. Si la variation est modérée entre 5 et 10 cm, la flèche est verte ; si la variation est forte entre 10 et 15 cm, la flèche est orange et enfin, si la variation est très forte de l'ordre de 15 à 20 cm la flèche est rouge.

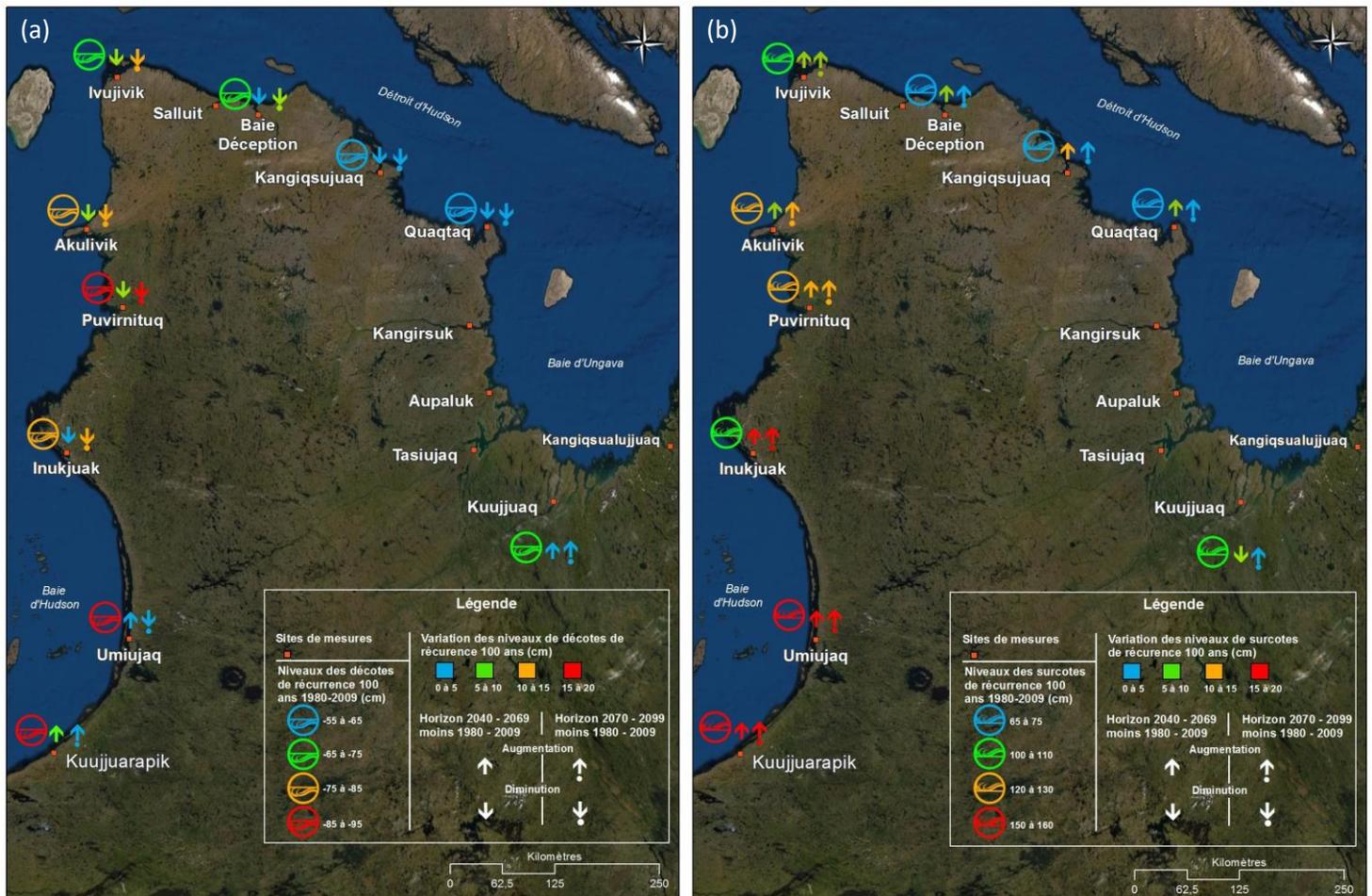


Figure 4. Niveaux extrêmes des ondes de tempête, de période de retour 100 ans, pour le passé récent 1980-2009 et variations des décotes (a) et des surcotes (b) pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099.

Le Tableau 4 montre les valeurs des niveaux des décotes et des surcotes extrêmes (de période de retour 100 ans) qui ont été simulées pour le passé récent, et les deux horizons futurs sur six communautés de la Baie d’Hudson, trois communautés du détroit d’Hudson et à Kujjuaq pour la baie d’Ungava.

Tableau 4. **Niveaux des décotes et des surcotes extrêmes, de période de retour 100 ans simulés pour le passé récent et pour les futurs proches et lointain, (Massé et Gallant, 2016)**

Site étudié		Niveaux des décotes (en cm), de période de retour 100 ans					Niveaux des surcotes (en cm), de période de retour 100 ans				
		1980-2009	2040-2069	(2040-2069) – (1980-2009)	2070-2099	(2070-2099) – (1980-2009)	1980-2009	2040-2069	(2040-2069) – (1980-2009)	2070-2099	(2070-2099) – (1980-2009)
Baie d’Hudson	Kuujuarapik	-87,3	-80,3	7	-83,8	3,5	147	166	19	162,7	15,7
	Umiujaq	-94,2	-90	4,6	-95	-0,9	156	172	15,6	173	15,6
	Inukjuak	-78,7	-81,4	-2,7	-90,5	-11,8	112	129,6	17,6	132,9	20,9
	Puvirnituq	-91,7	-96,9	-5,2	-108,4	-16,7	129	139,8	10,8	143,2	14,2
	Akulivik	-79,6	-85,9	-6,3	-93,5	-13,9	118	127,2	9,2	130,4	12,4
	Ivujivik	-66,5	-74	-7,1	-80	-13,3	101	111	8,1	107	6,1
Détroit d’Hudson	Baie Déception	-65,1	-68	-2,9	-71,5	-6,4	75,1	81,7	6,6	78,5	3,4
	Kangiqsujuaq	-57,8	-58,6	-0,8	-59,9	-2,1	68,3	78,4	10,1	71,7	3,4
	Quaqtaq	-54,3	-55	-0,4	-55	-0,4	69,7	81	9,9	73	4,1
Baie d’Ungava	Kuujuuaq	-71,8	-70,6	1,2	-69,4	2,4	101	91,9	-9,1	103,4	2,4
Moyenne Nunavik		-77,0	-76,1	-1,3	-80,7	-6,0	107,7	117,9	9,8	117,6	9,8

*D’après les figures 5.18a et 5.18b du rapport de Massé et Gallant, 2016.

Pour tout le Nunavik, dans les deux horizons futurs, les niveaux d’eau des décotes pourraient diminuer (Figure 4a et Tableau 4) et les niveaux d’eau des surcotes pourraient s’élever (Figure 4b et Tableau 4). Sur la Baie d’Hudson et dans la baie d’Ungava, les niveaux d’eau des décotes ont été plus bas que dans le détroit d’Hudson pendant que les niveaux d’eau des surcotes ont été plus élevés que dans le détroit d’Hudson (Figures 4a et 4b et Tableau 4).

Le long de la Baie d’Hudson, les décotes, de période de retour 100 ans, pourraient baisser le niveau d’eau minimum de 0,7 m à 1 m à l’horizon 2040-2069 et de 0,8 m à 1,1 m à l’horizon 2070-2099 (Tableau 4). Les surcotes extrêmes seraient partout supérieures à 1 m (entre 1,1 m et 1,7 m) avec un maximum de 1,7 m à Umiujaq (Tableau 4). Or, sur les côtes de la baie d’Hudson où l’amplitude des marées est faible (de 4 m à 50 cm et moins) (Figure 3), les niveaux d’eau extrêmes des ondes de tempêtes ont un impact significatif sur les niveaux d’eau totaux. Les surcotes extrêmes provoqueront toujours une inondation le long des côtes de l’ensemble de la baie d’Hudson (Savard et al. 2016) qu’elles soient en phase ou non, avec les marées de vive-eau.

Par contre, sur les côtes de la Baie d’Ungava et du détroit d’Hudson où l’amplitude des marées est forte (de 4 à 10 m et plus) (Figure 3) les niveaux d’eau totaux sont principalement dus à la marée et très peu dus aux ondes de tempêtes. Actuellement, dans ces régions, les infrastructures sont adaptées pour subir sans dommage les pleines mers supérieures de marées exceptionnelles de vives eaux (plus de 10 m). Comme sur

ces côtes, les surcotes de période de retour 100 ans (les plus hautes) pourraient ne pas dépasser 1 m dans les deux horizons futurs et que seul Kuujuaq pourrait connaître des surcotes de 1 m en 2070-2099 (Tableau 4), les surcotes de 1 m auront des impacts sur le milieu côtier et les infrastructures maritimes seulement si une surcote extrême (de 1 m) s’ajoute à la marée de vive eau (10 m). Les décotes, de période de retour 100 ans, pourraient baisser le niveau d’eau de 72 cm maximum dans les deux horizons futurs, ce qui correspond aux niveaux des décotes actuelles (Tableau 4).

Le Tableau 5 résume les principaux résultats simulés pour les ondes de tempêtes (décotes et surcotes) sur l’ensemble du Nunavik.

Tableau 5. **Moyenne sur le Nunavik, période de retour et saisonnalité des niveaux extrêmes des ondes de tempêtes (décote et surcote).**

	Horizons	Ondes de tempêtes	
		 décote	 surcote
Moyenne des niveaux extrêmes de période de retour 100 ans sur tout le Nunavik	1980-2010	entre – 1 m et - 50 cm	entre + 68 cm et + 1,5 m
	2040-2069	↘ de 1,5 cm	↗ de 10 cm
	2070-2099	↘ de 6 cm	↗ de 10 cm
Période de retour des niveaux extrêmes qui ont actuellement une période de retour de 100 ans	2040-2069	50 ans	50 ans
	2070-2099	100 ans	100 ans
Saisonnalité (fréquence saisonnière)	2040-2069	↗ de juillet à août ↗ de décembre à janvier ↘ de février à mars	↗ d’août à février
	2070-2099	↗↗ de juillet à août ↘↘ de décembre à janvier	↗ d’octobre à février apparition en mars et en été

2- Période de retour des niveaux d’eau extrêmes.

Pour connaître la probabilité d’occurrence des niveaux d’eau extrêmes, il faut considérer le moment où l’amplitude de la marée est à son extrême (marée haute de vive-eau ou basse de morte-eau) et qu’elle est synchrone à la présence des surcotes et décotes extrêmes, soit celles qui se produisent une fois par 100 ans (Savard, 2016). Ainsi, il est possible de classer les niveaux d’eau extrêmes les plus hauts et les plus bas en fonction de leur probabilité d’occurrence. Les plus rares sont celles qui atteignent les niveaux d’eau les plus extrêmes, les plus hauts ou les plus bas.

Lorsqu’une décote a lieu à marée basse, les niveaux d’eau sont très bas, et plus rarement, lorsqu’une décote extrême coïncide avec une marée basse de morte-eau, le niveau d’eau total atteint est extrêmement bas (Tableau 6). Les simulations extrêmes montrent que la probabilité d’occurrence de niveaux très bas sera plus élevée à l’horizon 2040-2069, pour les trois communautés étudiées, passant de 1 fois par 100 ans à 1 fois par 50 ans à Umiujaq, à 1 fois par 30 ans à Ivujivik et à 1 fois par 45 ans à Quaqtac (Tableau 6).

Tableau 6. Période de retour des niveaux d'eau totaux extrêmes bas en climats actuel et futurs à Umiujaq, Ivujivik et Quaqtac (d'après les Figures 5.15, 5.14 et 5.13 de Massé et Gallant, 2016)

Communauté	Niveau total extrême bas (cm)	Période de retour en climat actuel (années)	Période de retour entre 2040-2069 (années)	Période de retour entre 2070-2099 (années)
Umiujaq	-152	100	50	100
Ivujivik	-214	100	30	55
Quaqtac	-552	100	45	100

Le niveau d'eau très haut, quand une surcote de tempête se produit à marée haute, a une probabilité d'occurrence plus élevée que le niveau d'eau extrême haut qui survient quand une surcote de tempête extrême (une fois par siècle) coïncide avec une marée haute de vive-eau. Enfin, quand une surcote de tempête extrême (une fois par siècle) coïncide avec la marée haute la plus élevée du siècle (une fois par siècle), l'occurrence est presque improbable.

La probabilité d'occurrence des niveaux d'eau de surcotes extrêmes montrent que leur probabilité d'occurrence sera plus élevée d'ici à l'horizon 2040-2069 pour les trois communautés étudiées, passant de 1 fois par 100 ans à 1 fois par 40 ans à Umiujaq, à 1 fois par 35 ans à Ivujivik et 1 fois par 50 ans à Quaqtac (Tableau 7). Ces mêmes niveaux d'eau extrêmes seront moins fréquents à l'horizon 2070-2099 pour Ivujivik et Quaqtac mais pas pour Umiujaq où la probabilité d'occurrence augmente à 1 fois par 35 ans (Tableau 7).

Tableau 7. Périodes de retour des niveaux d'eau totaux extrêmes hauts en climats actuel et futurs à Umiujaq, Ivujivik et Quaqtac (d'après les Figures 5.9, 5.8 et 5.7 de Massé et Gallant, 2016)

Communauté	Niveau total extrême haut (cm)	Période de retour en climat actuel (années)	Période de retour entre 2040-2069 (années)	Période de retour entre 2070-2099 (années)
Umiujaq	209	100	40	35
Ivujivik	235	100	35	Plus que 100
Quaqtac	530	100	50	100

Cependant, les études menées par Savard, 2016 ; Massé et Villeneuve, 2013 et Massé et Gallant, 2016 concernant les niveaux d'eau n'ont pas tenu compte de la baisse de niveau d'eau relatif due au relèvement isostatique pour aucune des simulations climatiques. Or, Umiujaq a un taux de relèvement isostatique très rapide (1,15 cm/an) qui en compensant la hausse du niveau marin global, pourrait réduire les niveaux d'eau extrêmes ainsi que les probabilités d'occurrence présentées précédemment.

3- Étendue temporelle.

En ce qui concerne la saisonnalité des ondes de tempêtes, les simulations de Massé et Gallant (2016) montrent qu'elle varie sur les 3 régions maritimes. La saison des surcotes extrêmes se produisait, pendant la période 1980-2009, durant les mois de septembre, octobre et novembre sur l'ensemble du domaine d'étude. Cette saison pourrait subir davantage de surcotes extrêmes à l'horizon 2070-2099, dans le centre de la baie d'Hudson. Les décotes extrêmes se produisaient pendant la même saison dans la partie centrale de la baie d'Hudson. Par contre elles avaient tendance à être plus présentes en hiver dans le Nord de la baie d'Hudson et dans le détroit d'Hudson, avec un mois central, le mois de mars (Massé et Gallant, 2016).

À l'horizon 2040-2069, les décotes de niveaux les plus faibles (inférieures à - 0,60 m) pourraient être plus fréquentes de juillet à août et de décembre à janvier alors qu'elles pourraient être moins fréquentes de

février à mars. À l'horizon 2070-2099, les décotés les plus basses pourraient être plus fréquentes au printemps et être beaucoup moins fréquentes en hiver (comme c'est le cas actuellement) (Tableau 5).

À l'horizon 2040-2069, les surcotes de niveaux les plus élevés (de 0,75 m à 0,95 m), pourraient être plus fréquentes d'août à février, sur toute la région. À l'horizon 2070-2099, elles pourraient atteindre de 0,85 m à 0,95 m, et être plus fréquentes d'octobre à février, sur toute la région (Tableau 5). Dans un horizon lointain (2070-2099), des surcotes pourraient apparaître aussi en mars, au printemps et en été alors qu'elles étaient pratiquement totalement absentes en climat actuel (Tableau 5).

2.1.4 RÉGIME DES TEMPÊTES

L'état actuel des connaissances ne permet pas d'affirmer quelle tendance les tempêtes pourraient suivre dans la baie d'Hudson.

Les changements dans le régime des tempêtes dans la baie d'Hudson sont encore méconnus, il est recommandé de les étudier avec les nouveaux modèles climatiques plus performants pour cette région (synthèse technique). Les connaissances sur les tempêtes des milieux marins nordiques se concentrent principalement sur l'océan Arctique et sont développées grâce aux simulations de l'ensemble CORDEX ARCTIC. Bien que la circulation atmosphérique dans la baie d'Hudson et l'océan Arctique diffèrent, la présence de tempêtes, pendant la période de formation des *glaces de rive*, lorsqu'elles sont instables et mobiles, a des conséquences décisives sur les environnements côtiers de ces deux cas. Par exemple,

- le déplacement des glaces poussées par les vents forts orientés vers la côte pourraient réduire davantage leur stabilité sur la rive.
- les tempêtes pourraient accroître les niveaux d'eau et la hauteur et la vigueur des vagues augmentant les risques de submersion et d'érosion.
- qu'il y ait ou non des changements dans l'intensité ou la récurrence des tempêtes, les changements appréhendés de la glace marine pourrait favoriser les dommages cumulatifs par des contraintes répétitives rapprochées.

Dans un climat futur plus chaud, la fonte plus hâtive des glaces et la température estivale plus élevée permettra à la réserve de chaleur qui s'accumule en été dans l'eau de la baie d'Hudson de s'accroître. De juin à août, l'atmosphère est très stable, parce que l'eau de surface très froide, refroidit l'air de la basse atmosphère, et donc la formation de tempêtes est faible (Savard et al., 2016). Cette chaleur dans l'eau qui pourrait perdurer en automne, d'une part, pourrait augmenter l'instabilité atmosphérique et d'autre part, retarder la prise des glaces. Ces deux facteurs pourraient favoriser l'augmentation de l'intensité et/ou le nombre de tempêtes (Savard et al., 2016) mais d'autres mécanismes interviennent fort probablement. Cette hypothèse devra donc être validée avec de nouvelles simulations ainsi que les autres mécanismes en jeu. Des recommandations sont détaillées dans la synthèse technique.

2.1.5 CONDITIONS DE GLACE

L'augmentation rapide des températures hivernales au-dessus de la baie d'Hudson et du Nunavik retardera et avancera davantage les processus d'englacement et de déglacement.

- La durée de la saison des glaces, pourrait être réduite de plus de six semaines d'ici 2041-2070 et de plus de deux mois d'ici 2100.

- L'augmentation de la mobilité des glaces pourrait conduire à une probabilité d'érosion par les glaces plus élevée.
- Sur les côtes du Nunavik, une diminution de la concentration de glace moyenne de l'ordre de 30% pour le mois de mai à l'horizon 2040-2070 pourrait être observée. Cette concentration pourrait être plus faible de 10% à 40% pour le climat de 2040-2070 qu'elle ne l'était pour 1980-2010.

L'amincissement de l'épaisseur moyenne de glace, d'après les simulations régionales faites par Senneville (2018), à l'horizon 2040-2070, serait de l'ordre de 15 cm en novembre et de 80 cm en juin. Le couvert de glace aminci pourrait se briser si des vents forts et des niveaux d'eau élevés se produisaient en même temps. Au printemps et en automne, les côtes pourraient donc être plus à risque d'érosion par des poussées glacielles.

En hiver, la stabilité de glace de mer diminue le fetch et protège la côte contre l'érosion (Tableau 8).

Le printemps et l'automne sont des périodes problématiques en raison de la présence de glace mobile. La couverture de glace de mer partielle, mobile (ou instable) augmente le risque d'érosion et peut provoquer des dommages lorsque le vent fort pousse cette glace mobile vers le littoral (Tableau 8). Au printemps, les températures douces activent la dégradation thermique et mécanique du couvert de glace. En accélérant le processus de maturation, elles entraînent une plus grande mobilité spatiale des radeaux de glace. La température atmosphérique peut aussi retarder le processus de formation du couvert de glace fixe, à l'automne, (Clerc et al., 2012) – (voir section Quaqtq 2.3.2.4.).

Cependant, durant l'englacement à l'automne, les périodes de glaces mobiles pour les secteurs étudiés sont beaucoup moins longues et l'épaisseur des glaces en mouvement est beaucoup plus faible que pendant la fonte au printemps (Clerc et al., 2012). L'automne est donc une saison où les probabilités de dommages causées par les glaces sont moins élevées qu'au printemps en général. Mais selon les paramètres hydroclimatiques en interaction et en cas de facteurs cumulés (vagues, forts vents et direction des vents, marées, etc...) qui permettent le détachement de la banquise et son retour l'automne pourrait être une saison avec des probabilités de dommages élevés comme sur les côtes du détroit d'Hudson par exemple.

Les côtes du Nunavik pourraient subir une diminution de la concentration de glace moyenne de l'ordre de 30% pour le mois de mai à l'horizon 2040-2070. Cette concentration pourrait être plus faible de 10% à 40% pour le climat de 2040-2070 qu'elle ne l'était pour 1980-2010 et que la diminution de l'épaisseur moyenne de glace entre le passé récent et le scénario futur 2040-2070 serait de l'ordre de 15 cm en novembre et de 80 cm en juin.

Tableau 8. **Risques liés à la couverture et à la durée de la présence des glaces aux horizons futurs selon l'hiver, le printemps et l'automne au Nunavik**

	Stabilité de la glace :
Hiver	Glacé stable : Couverture complète plus courte, Protection des côtes contre l'érosion
Printemps Automne	Glacé mobile : Couverture partielle plus longue, Augmente le risque d'érosion

Dans le Nord du Québec et dans l'Arctique canadien, si la diminution de l'étendue du couvert de glace et la durée de la saison des glaces pourront permettre une saison de navigation plus longue, les déplacements sur la banquise, pour la pratique d'activités traditionnelles par les populations locales, seront plus risqués (Lemmen et al., 2016).

La durée de la saison des glaces, dans les plans d'eau ceinturant le Nunavik, pourrait être réduite de plus de six semaines d'ici 2041-2070 selon le scénario SRES-A2 (Senneville et St-Onge Drouin, 2013) et de plus de deux mois d'ici 2100 selon le même scénario (Joly et al. 2011). Les simulations climatiques à 10 km de résolution horizontale représentent pour l'instant la meilleure source d'information pour projeter la concentration et l'épaisseur des glaces sur l'horizon 2040-2070 (Senneville, 2018b). L'amélioration du modèle de glace pour obtenir des simulations des conditions de glace à une échelle plus locale est à l'étude (Synthèse technique). Les résultats des simulations ont été compilés dans l'atlas mensuel climatique de la concentration et de l'épaisseur de glaces au Nunavik (Senneville, 2018a). Ils indiquent que la **concentration et l'épaisseur des glaces de mer et de rive** pourraient aussi être réduites (Senneville, 2018a). À titre d'exemple, la Figure 5 montre qu'au mois de décembre, les littoraux allant d'Ivujivik à Kangiqsualujuaq avaient, dans le passé récent, des concentrations moyennes de glaces entre 90 et 100%, alors qu'à l'horizon 2040-2070 la concentration pourrait être, en moyenne, réduite à 40 et 60%. Entre Ivujivik et Inukjuak, de 1980 à 2010 les concentrations moyennes de glaces étaient de 60 à 80%, elles pourraient être quasiment absentes (autour de 10%) à l'horizon 2040-2070, en décembre.

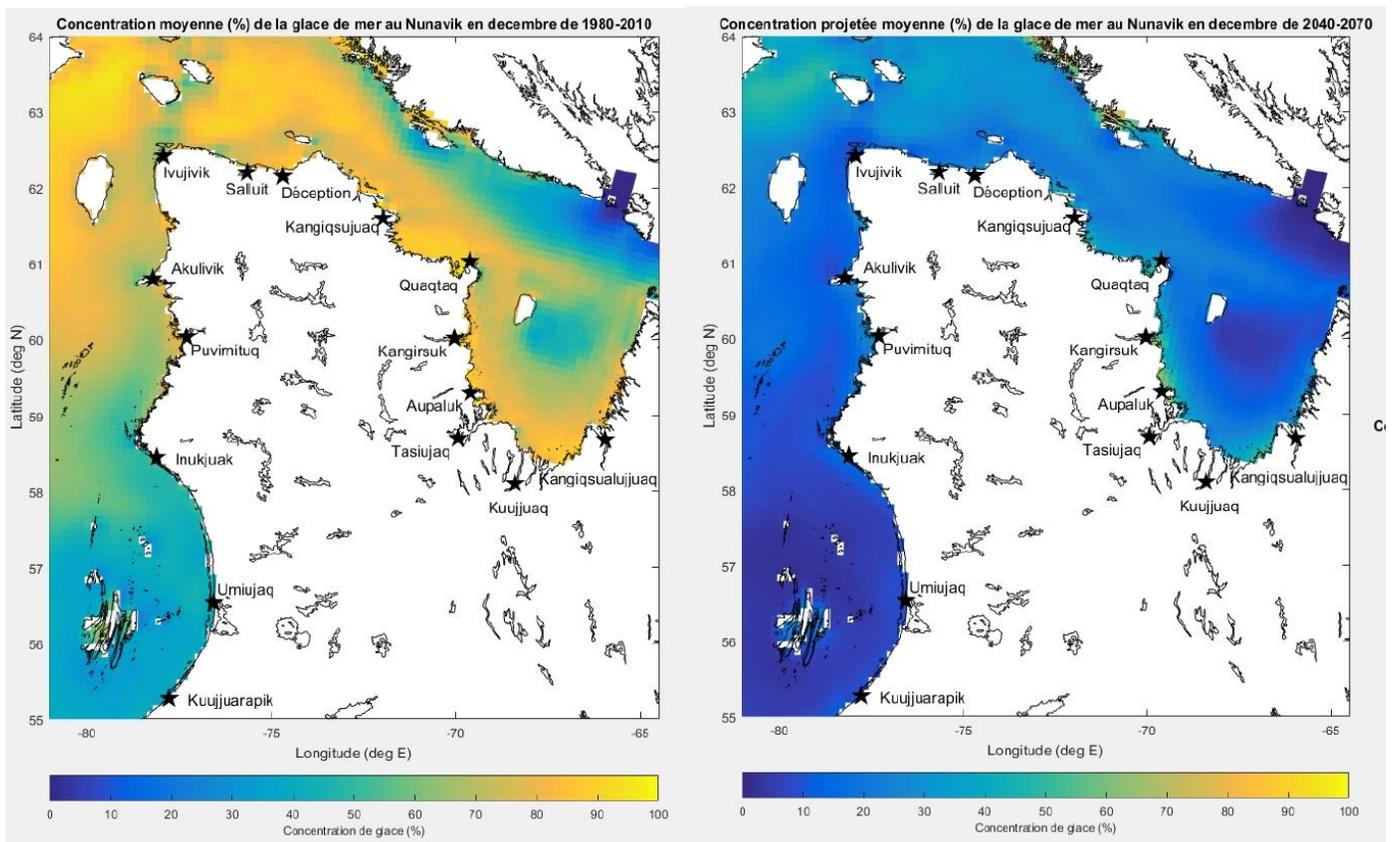


Figure 5. Concentration moyenne de la glace de mer au Nunavik en décembre de 1980-2010 (a) et 2040-2070 (b) (Senneville, 2018a).

2.1.6 VAGUES

Aucune donnée de vagues n'existait pour le Nunavik avant que le projet CAIMAN n'installe des stations de mesures de hauteur de vagues, en 2017, à Kuujuarapik et à Quaqtaq pour l'équipe de

Neumeier (UQAR-ISMER) dont les résultats sont attendus en 2021 et 2022. Par contre, les processus qui régissent les vagues sont connus et des hypothèses peuvent être émises.

Lors des épisodes de vents plus forts causés par des tempêtes puissantes, le nombre de surcotes, la quantité et l'énergie des vagues atteignant les côtes peuvent être accrues. Ainsi, au Nunavik, le raccourcissement de la saison de glaces de mer, d'environ 40 jours, aurait pour effet d'augmenter l'énergie totale de vagues produites par les tempêtes atteignant la côte. Aussi, à l'horizon 2040-2070, les niveaux d'eau moyens et extrêmes, les vents et la présence de glace, pourraient augmenter la probabilité d'occurrence des vagues hautes.

Cependant, parallèlement à cela, le soulèvement isostatique fait baisser graduellement le niveau relatif de la mer, la vulnérabilité de la côte à ces vagues pourrait être réduite à la fin du XXI^e siècle.

Dans les systèmes des milieux côtiers, le régime des vagues est influencé par l'orientation et la force du vent, en particulier lors de tempêtes. Il est aussi influencé par la persistance du vent (la durée pendant laquelle il souffle), le fetch, la présence d'un couvert de glace et des obstacles physiques (des îles) dans certaines orientations (Boyer-Villemare et al., 2016). Lorsque la houle s'approche de la côte, la profondeur de l'eau diminue et la vague déferle. La forme des vagues est influencée par la typologie des fonds marins, la bathymétrie, la profondeur de l'eau et les courants. Si le fond est plat et en pente douce, les vagues sont plates et douces, par contre, si le fond a une pente abrupte les vagues sont creuses et puissantes. La modélisation physique des vagues permet de décrire leur forme en fonction du vent et de la typologie des fonds marins.

Au Nunavik, en hiver, la formation des vagues est inhibée par la présence d'un couvert de glaces de mer et de glaces fixées à la rive. Par conséquent, le raccourcissement de la saison de glaces de mer d'environ 40 jours aura pour effet d'augmenter l'énergie totale de vagues produites par les tempêtes, atteignant la côte. Si les tempêtes devenaient plus fréquentes, les vents violents et donc la hauteur des vagues sur la côte seraient accrues. L'état actuel des connaissances ne permet pas de dégager de tendance fiable quant à l'intensité et la fréquence des tempêtes. Cependant, le soulèvement isostatique faisant baisser graduellement le niveau relatif de la mer, à la fin du XXI^e siècle, la vulnérabilité de la côte aux fortes vagues pourrait être réduite.

Deux projets de recherches sont en cours afin de connaître le régime des vagues. Le premier projet de recherche, projet CC09.2 « Suivi des conditions des glaces de rive et de vagues à l'aide de caméras et d'imagerie satellitaire à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques: Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtac et Aupaluk (2017-2020) » (Bernier et al., 2019), va notamment fournir des observations pour alimenter un modèle numérique de vague développé à l'ISMER dans le cadre du second projet. Le second projet de recherche, projet CC16.1, « Suivi, analyse et modélisation des conditions de vagues en milieu côtier au Nunavik en fonction des conditions de glace dans un contexte de changements climatiques » (Neumeier, 2019) va permettre d'acquérir des données sur les vagues mais aussi sur les courants de glace et des données bathymétriques près des infrastructures maritimes à Quaqtac et Kuujjuarapik. Les ensembles de données recueillies par ces deux projets, entre 2017 et 2020, permettront de tester le modèle numérique de vagues de l'ISMER selon différents scénarios climatiques pour évaluer l'impact des CC sur le régime des vagues. Des précisions sur ces deux projets sont fournis dans la synthèse technique.

2.2 LA BAIE D'HUDSON

2.2.1 PORTRAIT GÉNÉRAL

GÉOMORPHOLOGIE DE LA CÔTE

La côte de la baie d’Hudson est principalement composée de sols sédimentaires. Actuellement, elle avance sur la mer.

La côte de la baie d’Hudson est composée, entre Kuujjuarapik et Inukjuak, de *cuestas* entrecoupées par de riches environnements sédimentaires ; entre Inukjuak et Ivujivik d’affleurements peu élevés, de petites îles, de plages de poche et de baies (ex. Kovik) (Boisson, 2019). Boisson (2019) a identifié, au sud-est de la baie d’Hudson, de nombreuses flèches sableuses en formation qui vont éventuellement se raccrocher à des petites îles rocheuses qui appartiennent au Nunavut.

ALÉAS EN CLIMAT ACTUEL

La côte de la baie d’Hudson est un environnement très sensible aux risques d’inondations mais elle n’est pas sensible à l’érosion.

Les tempêtes, les niveaux d’eau, les vagues hautes et l’augmentation de la période sans glaces amplifient ces risques. La présence de glace a diminué de 10,5% entre 1968 et 2010.

La côte de la baie d’Hudson, de par l’amplitude des marées, faible à modérée (de moins de 0,5 m à 4 m) (Figure 3), et son exposition aux variations des niveaux d’eau extrêmes et aux vagues, est un milieu sensible aux inondations par submersion (L’Hérault, 2017a et 2017b), par contre, malgré sa composition de dépôts sédimentaires, la côte n’est pas sensible à l’érosion (Boisson, 2019).

La côte de la baie d’Hudson se caractérise par la présence de vagues déferlantes (Ford et al. 2016). Le risque de vagues déferlantes plus haute pourrait être amplifié si la « saison des tempêtes » était simultanée avec la saison pendant laquelle la baie est libre de glaces (Savard et al., 2014) car ni les vents ni les vagues hautes ne seraient atténuées par la contrainte des glaces.

Le développement des ondes de tempêtes sur la baie d’Hudson est causé par les chutes de la pression atmosphérique induites lorsqu’un système dépressionnaire intense y transite (*baromètre inverse*) et par les ondes de tempêtes venues de la mer du Labrador. La baie d’Hudson n’a pas été bien représentée dans les différents modèles climatiques globaux passés et la connaissance, sur le développement et le déplacement des tempêtes sur ce plan d’eau, doit encore être réalisée. En ce qui concerne les vagues, les modèles sont actuellement en traitement (Synthèse technique).

L’étendue des glaces d’été dans la baie d’Hudson a diminué de 10,5 % par décennie entre 1968 et 2010, (Derksen et al., 2012).

ALÉAS EN CLIMAT FUTUR

La baie d’Hudson est la côte qui pourrait connaître une augmentation des précipitations totales hivernales la plus marquée du Nunavik.

La hausse des températures hivernales pourrait réduire la durée de la saison des glaces de près de deux mois ainsi que leur concentration et leur épaisseur. Les vagues pourraient être plus hautes à l’automne à cause de l’absence des glaces qui allonge le fetch et diminue la protection du littoral.

En incluant les changements du niveau relatif de la mer, les surcotes pourraient être plus nombreuses et moins hautes, mais les décotes pourraient être plus nombreuses et/ou plus basses vers 2100. Ainsi, les risques liés aux surcotes devraient diminuer à long terme, car la baisse du niveau marin relatif va réduire graduellement le potentiel de dommages de la hausse des niveaux d’eau extrêmes liés aux surcotes.

Sur la baie d’Hudson, les décotes hivernales pourraient avoir lieu plus souvent en début d’hiver et au mois de mars.

La côte est de la Baie d’Hudson est la côte qui pourrait connaître une augmentation des précipitations totales hivernales la plus marquée du Nunavik avec 25 à 45% de précipitations de plus pour le milieu du XXI^e siècle (Logan et al., 2011).

L’est de la baie d’Hudson, ainsi que la baie d’Ungava sont parmi les régions où l’on projette que l’épaisseur de la glace pourrait subir de plus grandes diminutions dans le futur (Ouranos, 2015a). L’englacement devrait être plus tardif, de l’ordre de 25 à 30 jours, le déglacement plus hâtif, de 22 à 24 jours et l’épaisseur de la glace hivernale réduite de 30 à 50 % pour la période 2041-2070 comparativement à la période 1961-1990 (Joly et al. 2011; Senneville et St-Onge Drouin 2013). Ceci correspondrait à un allongement de la période d’eau libre, sans glace, de deux mois. Si le développement des glaces de rive coïncidait avec la période de fortes tempêtes, la formation et la stabilité des glaces de rive seraient encore réduites par le déplacement des glaces poussées par les vents forts.

Comme les températures plus chaudes pourraient s’étendre jusqu’en hiver, les conditions d’instabilité atmosphérique particulières à l’automne pourraient aussi s’étendre en janvier, février et même en mars vers la fin du XXI^e siècle (2041 à 2099). En effet, dans un climat futur plus chaud, la saison d’eau libre de glace serait plus longue et sa fin plus tardive. L’accumulation de chaleur durant l’été dans l’eau de la baie d’Hudson va s’accroître et se prolonger en début d’hiver, ce qui va retarder la prise des glaces et pourrait augmenter l’instabilité atmosphérique, prolonger la saison des surcotes et des décotes et augmenter leur fréquence et leur taille de 0,5 à 1m. De plus, la saison, pendant laquelle des niveaux extrêmes accompagnés de fortes vagues peuvent se produire, qui était autrefois limitée à l’automne, pourrait s’étendre de plus en plus aux premiers mois de l’hiver. Les conditions atmosphériques automnales sont réputées difficiles (fréquence élevée de brouillard, pluie verglaçante, vents violents etc.), elles pourraient empirer et se prolonger de plusieurs semaines dans quelques décennies mais cette hypothèse reste à vérifier (Savard, 2016).

Le fort ajustement isostatique dans ce secteur, qui atténue la hausse du niveau marin relatif due aux autres contributions, ne doit pas être négligé. En effet, la côte se sera soulevée d’environ 1,4 m de Kuujuarapik jusqu’aux environs de Puvirnituk d’ici 2100 (Ouranos 2015a). En tenant compte de ce relèvement, les projections montrent que la fréquence des niveaux d’eau très élevés pourrait diminuer, alors que celle des niveaux très bas devrait augmenter plus rapidement que par le passé (James et al., 2014). Les décotes de période de retour 100 ans pourraient baisser le niveau d’eau minimum de 70 cm à 1 m à l’horizon 2040-2069 et de 80 cm à 1,1 m à l’horizon 2070-2099. Une diminution des niveaux d’eau totaux pourrait être d’autant plus forte en direction du sud, d’Akulivik vers Umiujaq, à cause d’une baisse conjuguée du niveau moyen relatif de la mer et d’une augmentation de l’intensité des décotes (Ropars, 2014). Dans le centre et le nord de la baie d’Hudson, il pourrait y avoir une baisse de la hauteur des décotes en début d’hiver, et une augmentation entre février et mars. En futur lointain, ces décotes hivernales pourraient être décalées au printemps (Savard, 2016).

Sur les côtes de la baie d’Hudson, les surcotes extrêmes provoqueront toujours une inondation qu’elles soient en phase ou non avec les marées de vive-eau. Or, les niveaux d’eau des surcotes prévues seront proches de 1 m donc très proches de l’amplitude des marées pour plusieurs communautés. La combinaison vague-niveau d’eau et l’énergie des vagues atteignant les côtes pourraient augmenter. Les cartes des aléas naturels produites par le CEN- équipe de Michel Allard à la demande du MSP (Carbonneau et al., 2015, Allard et al., 2020) pour les communautés de la baie d’Hudson, utilisent un niveau de 2,5 m au-dessus du niveau de la haute mer. Le niveau plus élevé est choisi pour augmenter la sécurité compte tenu des incertitudes sur les valeurs de surcote. En baie d’Hudson, une surcote de tempête accompagnée d’un jet de rive atteignant de 3 à 4 mètres de hauteur est un problème majeur, d’autant que la vitesse du relèvement isostatique autour de 1 cm par an (Tableau 9) ne permet pas de réduire ce risque avant encore longtemps (plus de 50 ans) (Michel Allard, communication personnelle).

Tableau 9. Les taux de relèvement isostatique de la modélisation NRCan pour les communautés de la Baie d’Hudson

Station	Taux de Relèvement isostatique	Station	Taux de Relèvement isostatique
Ivujivik	0.79 cm/an	Inukjuak	1.18 cm/an
Akulivik	0.86 cm/an	Umiujaq	1.15 cm/an
Puvirnitug	0.89 cm/an	Kuujuarapik	1.38 cm/an

Comme il a été indiqué au chapitre 1, les aléas hydroclimatiques ne correspondent qu’en partie au risque pour le milieu de subir des modifications importantes. En effet, il dépend aussi des facteurs de vulnérabilités intrinsèques du milieu qui se déclinent en quatre grandes catégories, soit ceux associés au milieu naturel (environnemental et physique) et ceux associés au milieu humain (économique et social).

Des recherches récentes effectuées par les équipes du CEN et de NRCan (Allard et al., 2020a, b et c et Manson et al., 2019) ont permis d’aboutir à la cartographie des aléas hydroclimatiques et des facteurs de vulnérabilités environnemental et physique du milieu côtier.

Les cartes produites par le CEN localisent, à l’échelle de la communauté, l’étendue spatiale des aléas naturels recensés au Nunavik pour chacune des communautés (Allard et al., (2020a, b et c). Elles complètent les résultats présentés ici.

NRCan a mis au point un indice de sensibilité côtière (ISC) aux CC (discuté en détail au chapitre 3) qui intègre des aléas externes (le changement du niveau de la mer, les changements dans la hauteur des vagues incluant les effets des changements dans la glace de mer) et des caractéristiques physiques (ie : les matériaux de la côte, la pente, la présence de glace dans le sol) du milieu côtier qui peuvent changer au cours du temps (Manson et al., 2019). NRCan propose une carte à l’échelle canadienne, cependant, il est possible de zoomer à l’intérieure de celle-ci et d’obtenir l’ISC à l’échelle du Nunavik (voir Figure 7-Chapitre 3-section 3.2.1). Comme la carte reprend les mêmes aléas externes et y ajoute des caractéristiques physiques, elle complète relativement bien les résultats obtenus pour le MTQ.

Une carte synthèse des différentes caractéristiques citées plus haut a été créée pour chacune des communautés dont les niveaux d’eau ont été simulés, c’est-à-dire pour neuf communautés et Baie Déception. La première carte est insérée pour la première communauté de la première région côtière (Section 2.2.2) qui apparaît ci-après, soit pour Kuujuarapik (sous-section 2.2.2.1). Il s’agit de la Figure 6 « Kuujuarapik et les changements climatiques ». Les cartes des autres communautés sont placées en annexe de ce document. La lecture de ces cartes est expliquée dans le paragraphe suivant.

Sur chacune des cartes synthèses présentées dans le texte (Figure 6) et en annexe (Figures 9 à 17), l’ISC a été superposé aux niveaux d’eau extrême de surcotes et de décotes simulées pour le passé-récent et aux variations des niveaux d’eau extrême sur les horizons futurs. Cependant, l’ISC utilisé ici ne doit pas être considéré pour prendre des décisions d’aménagement puisque les données sous-jacentes sont issues d’une base de données à échelle canadienne qui est trop grossière et donc imprécise pour l’échelle de la communauté) telle que préciser dans section 3.2.1. Ces cartes sont fournies à titre indicatif pour montrer un des axes de recherche possible permettant d’avancer la connaissance des environnements côtiers.

Sur ces cartes, les niveaux d’eau sont exprimés en centimètres (cm). Les niveaux de décotes et de surcotes atteints pour la période de 1980 à 2009, sont identifiés par un symbole rond dans lequel est représenté une vague et un niveau d’eau. Pour le symbole de la décote, la vague se situe en dessous du niveau d’eau 0, alors que dans le symbole de la surcote, elle est au-dessus du niveau 0. Ces ronds changent de couleur selon l’éloignement du niveau d’eau zéro cm ; le niveau d’eau le plus proche du niveau zéro cm est **bleu** et le niveau le plus éloigné est **rouge**. Pour les horizons futurs, la variation des niveaux extrêmes par rapport à la période de référence (1980-2009) est représentée, c’est la différence entre le niveau extrême de l’horizon futur et le niveau extrême du passé-récent. La variation peut être positive, ce qui indique une augmentation. Elle est

alors représentée par une flèche montante. La variation peut être aussi négative, ce qui indique une diminution. Elle est alors représentée par une flèche descendante. Si la variation est faible, de l'ordre de 0 à 5 cm, la flèche est bleue ; si la variation est moyenne, entre 5 et 10 cm, la flèche est verte ; si la variation est forte, entre 10 et 15 cm, la flèche est orange et enfin, si la variation est très forte, de l'ordre de 15 à 20 cm, la flèche est rouge.

2.2.2 LES COMMUNAUTÉS DE LA BAIE D'HUDSON

2.2.2.1 Kuujjuarapik

Le niveau marin relatif aux environs de Kuujjuarapik pourrait s'abaisser de 87,1 cm pour le RCP4.5 et de 72,6 cm avec le RCP8.5 à la fin du XXI^e siècle, à cause du relèvement isostatique.

Il est probable que Kuujjuarapik ne connaisse pas de variation de niveaux des décotes extrêmes vers la fin du XXI^e siècle par rapport au passé récent.

Les surcotes extrêmes, qui ont été calculées sans tenir compte du relèvement isostatique, pourraient être plus hautes de 19 cm en 2040-2069 et de 15,7 cm en 2070-2099.

Actuellement, les tempêtes sont très présentes et régulières durant toute la période libre de glace, les moments de mer calme sont quasi-inexistants au large de Kuujjuarapik.

L'observation des glaces à Kuujjuarapik pour les trois années de 2015-2016, 2016-2017 et 2017-2018 n'est pas assez longue pour établir une tendance sur la longueur de la saison et l'épaisseur des glaces, leur englacement et leur fonte.

Kuujjuarapik et les changements climatiques



Figure 6. Sensibilité côtière de la communauté de Kuujjuarapik aux CC, niveaux des surcotes pour le passé-récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099

Dans la région de Kuujjuarapik, le taux de relèvement isostatique est le plus élevé du Nunavik, atteignant 1,4 cm/an (Tableau 9). Ceci est si élevé que « la collectivité ne devrait pas connaître d'élévation du niveau de la mer, même en considérant une contribution supplémentaire à l'élévation du niveau de la mer provenant de la fonte du glacier de l'Antarctique occidental » (Ford et al., 2016). La baisse du **niveau marin relatif** aux environs de Kuujjuarapik serait de 87,1 cm pour le RCP4.5 et 72,6 cm avec le RCP8.5 (Tableau 3) d'ici la fin du XXI^e siècle, ce qui conduirait nécessairement à la baisse du même niveau d'une surcote de période de retour 100 ans par rapport à la période 1980-2009. Le Tableau 4 et la Figure 6 sont basés sur les calculs de Massé et Galland (2016), ils ne tiennent pas compte du relèvement isostatique. Selon Massé et Galland (2016), ce niveau de surcote atteindrait 1,63 m vers la fin du XXI^e siècle (Tableau 4). Si on tenait compte du relèvement isostatique le niveau de surcote pourrait être diminué à une hauteur de 0,29 m (1,63 – 1,34). Par ailleurs, pour que la piste d'atterrissage soit submergée, il faudrait une surcote de 4 m (Boisson, 2019).

Les décotes et surcotes atteignant près de 1 m influençant fortement le niveau d'eau à cause du faible marnage (Figure 3) doivent être considérées. Comme le marnage moyen est de 1,43 m et le marnage maximal est de 2 m (Pêches et Océans Canada, 2016), il est du même ordre de grandeur que les niveaux des ondes de tempêtes moyens.

Le niveau des **décotes extrêmes** pourrait augmenter les niveaux d'eau pour les deux horizons futurs. Les projections suggèrent que la différence entre les décotes futures et celles du passé-récent est positive, ce qui indique que les décotes futures seraient moins basses que celles mesurées dans le passé récent, de 7 cm en 2040-2069 et de 3,5 cm en 2070-2099 (Tableau 4 et Figure 6).

Les surcotes régulières (non extrêmes) peuvent facilement atteindre 1 m (Hill et al, 2003 et Neumeier et al., 2017). Les **surcotes extrêmes** de période de retour 100 ans, pourraient être plus hautes de 19 cm en 2040-2069 et de 15,7 cm en 2070-2099 (Tableau 4 et Figure 6). Ces dépassements ne causeront pas de dommages sur la voirie (routes et piste d'atterrissage) et les habitations actuelles (Boisson, 2019).

Au cours de l'année d'observation (2017-2018), Neumeier et al. (2019) ont constaté qu'il y a eu 12 événements de **tempêtes** où les vagues ont dépassé trois mètres. La présence de tempêtes était importante durant le mois d'août et le début de septembre. Cependant, ces données ne permettent pas encore de préciser comment la variabilité interannuelle des événements de tempêtes se répartit, ni de confirmer ou d'infirmer des patrons saisonniers.

Les îles Manitounuk offrent une protection à la côte en atténuant l'énergie des **vagues** venant du large, mais semblent moins efficaces face aux forts vents d'ouest qui génèrent des vagues pouvant pénétrer par le détroit de Manitounuk (Neumeier et al., 2019). Le vent du nord génère des vagues plus importantes au Sud et au large de l'embouchure de la Grande-rivière-de-la-Baleine. Des vagues mesurant entre 1,5 m et 2 m atteignent les îles Manitounuk et pénètrent à travers les îles, mais sont fortement atténuées. Dans le détroit de Manitounuk, les vagues n'excèdent pas 1,5 m de hauteur. Les passes entre les îles Neilsen et Merry, face à l'infrastructure maritime de Kuujjuarapik, semblent être les passages les plus importants pour les vagues du large dans le détroit de Manitounuk pour ce type de tempête. Le vent d'ouest génère des vagues plus importantes au large des îles Manitounuk, ainsi qu'au nord de la communauté, à l'embouchure du détroit de Manitounuk. Les vagues qui pénètrent dans le détroit de Manitounuk sont plus hautes (> 1,5 m) et se propagent plus loin.

Les résultats des deux simulations précédentes montrent que les vagues semblent être rapidement atténuées à l'embouchure de la Grande-rivière-de-la-Baleine et n'excèdent pas 1 m de hauteur à l'intérieur

de la rivière. Au large de Kuujjuarapik, les tendances à l'augmentation de la vitesse du vent en hiver sont faibles (Ouranos, 2015a).

L'observation des **glaces** à Kuujjuarapik pour les trois années de 2015-2016, 2016-2017 et 2017-2018 (Tableaux 10 et 11) n'est pas assez longue pour établir une tendance. En effet, l'hiver le plus récent semble avoir eu les premières glaces plus tardives mais l'englacement complet a été plus rapide, en seulement deux jours, que les deux hivers précédents. Au printemps, il semble que les glaces ont commencé à fondre plus tardivement mais les dernières glaces observées aussi ont été plus tardives que l'année 2015-2016.

Tableau 10. **Résumé des observations de glace obtenues par les caméras pour Kuujjuarapik de 2015 à 2018 (Bernier et al., 2017; 2019; Poulin et al., 2018).**

Caméra Nord (Infrastructure Maritime)	Premières observations de glace	Englacement complet	Premiers signes d'eau	Première libération complète	Dernières observations de glace
2015-2016	27 novembre 2015	23 décembre 2015	29 mai 2016	06 juin 2016	16 juillet 2016
2016-2017	23 novembre 2016	14 décembre 2016	26 mai 2017	07 juin 2017	9 juin 2017
2017-2018	10 décembre 2017	12 décembre 2017	13 juin 2018	26 juin 2018	15 juillet 2018

Tableau 11. **Durée des différents stades du couvert de glace obtenue par les caméras pour Kuujjuarapik de 2015 à 2018 (Bernier et al., 2017; 2019; Poulin et al., 2018).**

Observations	2015-2016	2016-2017	2017-2018
Durée de l'englacement (jours)	26	22	2
Nombre de jours du couvert complet	158	162	182
Nombre de jours entre la première apparition d'eau et l'évacuation	8	13	14
Nombre de jour entre l'évacuation et la dernière apparition de glace	40	2	19
Nombre d'épisodes de glace mobile	2	1	1
Durée moyenne des épisodes de glace mobile (jours)	15 (5 et 25)	1	1

Selon la classification côtière réalisée par l'Hérault et al., (2017), Kuujjuarapik est faite de bancs ou de plages de sables et la flèche sableuse de cette communauté est en progradation. Certains secteurs du détroit de Manitounuk pourraient être à risque de glissement de terrain. En effet, un évènement significatif survenu dans ce détroit en 2005 a provoqué la formation d'une nouvelle baie. Ce type d'évènement, dont le déclenchement ne dépend pas du climat, mais plutôt des conditions géologiques locales, pourraient survenir encore (Boisson, 2019). Il semble aussi que l'érosion et les inondations ne représentent pas un risque en ce moment.

Ainsi les infrastructures de Kuujjuarapik ne devraient pas être vulnérables aux surcotes extrêmes. La récente infrastructure maritime, située dans le détroit de Manitounuk, est protégée des vagues du large et des conséquences d'une potentielle surcote extrême (Boisson, 2019). Par contre, le quai situé dans la Grande

Rivière de la Baleine est davantage exposé aux risques liés à l’augmentation de l’intensité et de la fréquence des décotes extrêmes. En effet, l’accès pourrait être plus difficile, une conséquence dû à l’ensablement continu du delta de la Grande Rivière de la Baleine (Boisson, 2019).

2.2.2.2 Umiujaq

Le niveau d’eau relatif pourrait être 92 cm plus bas qu’aujourd’hui à la fin du XXI^e siècle.

Les niveaux de décotes extrêmes pourraient être moins bas que par le passé à l’horizon 2040-2069 et être inchangés à l’horizon 2070-2099. Ceux des surcotes pourraient s’élever de près de 16 cm aux horizons 2040-2069 et 2070-2099. À cause du faible marnage, les niveaux des surcotes et des décotes influencent fortement le niveau d’eau total.

La période de retour des ondes de tempêtes extrêmes pourrait diminuer. Le niveau d’eau total extrême qui atteignait 2,09 m une fois par 100 ans, serait atteint 1 fois par 40 ans entre 2040-2069 et 1 fois par 35 ans entre 2070-2099.

Dans le futur, la durée du couvert de glace pourrait diminuer de 29 jours : la formation des glaces de rive pourrait être retardée de 20 jours et leur fonte sera devancée de 9 jours. De plus, la période de glaces mobiles pourrait durer plusieurs semaines.

Le relèvement isostatique étant de 1,15 cm/an (Tableau 9), le **niveau d’eau relatif** pourrait être 92 cm plus bas qu’aujourd’hui, à la fin du XXI^e siècle, si on ne tient pas compte de la hausse globale du niveau de la mer.

Vers la fin du XXI^e siècle, à Umiujaq, le niveau d’eau d’une **décote extrême**, de période de retour 100 ans, pourrait être moins bas que par le passé à l’horizon 2040-2069 et être sensiblement le même soit - 0,95 m à l’horizon 2070-2099 (Tableau 4 et Figure 9). Le niveau d’eau total le plus bas pourrait être de - 1,54 m en 2040-2069 et -1,51 m en 2070-2099 (Tableau 12). Ce niveau, le plus bas, pourrait être atteint avec une période de retour diminuée de moitié, soit 1 fois pour 50 ans en 2040-2069 (Tableau 13). Par contre, en 2070-2099, les niveaux de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pourraient avoir les mêmes périodes de retour qu’actuellement. Actuellement, les décotes extrêmes ont lieu en septembre, octobre et novembre et les décotes de taille moyenne ont lieu en hiver (Massé et Gallant, 2016).

Tableau 12. Niveau des décotes et niveau total minimum, en climat futur, à Umiujaq (d’après la Figure 5.15 de Massé et Gallant, 2016)

Période de retour	Niveau des décotes (niveau résiduel) en cm		Niveau total (marée + niveau résiduel)	
	2040-2069	2070-2099	2040-2069	2070-2099
2 ans	-65	-66	-121	-120
5 ans	-73	-76	-131	-127
10 ans	-76	-80	-136	-134
20 ans	-80	-85	-142	-140
25 ans	-82	-85	-144	-140
50 ans	-86	-91	-149	-146
100 ans	-90	-95	-154	-151

Tableau 13. Périodes de retour de certains niveaux d'eau totaux extrême minimum en climats actuel et futur à Umiujaq (d'après la Figure 5.15 de Massé et Gallant, 2016)

Niveau total extrême bas (cm)	Période de retour en climat actuel (années)	Période de retour entre 2040-2069 (années)	Période de retour entre 2070-2099 (années)
-152	100	50	100
-149	75	45	75
-146	50	35	50
-143	30	25	30

À Umiujaq, ce sont les vents d'ouest, forts et persistants, qui causent la plupart des **surcotes** majeures. Le marnage moyen est de 1,5 m (faible) à l'île Gillies (proche d'Umiujaq) (Figure 3). Les surcotes extrêmes aux horizons 2040-2069 et 2070-2099 pourraient être plus élevées que celles du passé-récent de 15,6 cm (Tableau 4). Les surcotes avec une période de retour de 2 ans pourraient atteindre 1 m, et les surcotes les plus extrêmes jusqu'à 1,7 m pour les deux horizons futurs (Tableau 14). Le niveau d'eau total le plus haut, de période de retour 100 ans, pourrait être de 226 cm à l'horizon 2070-2099 (Tableau 14). En considérant l'abaissement de 92 cm vers la fin du XXI^e siècle, ce niveau total extrême de période de retour de 100 ans serait donc de 134 cm (226 - 92). Il pourrait donc être inférieur au niveau d'eau total extrême actuel qui est de 209 cm (Tableau 15). Ces niveaux de surcotes extrêmes doubleraient presque la hauteur du marnage moyen.

Tableau 14. Niveau des surcotes et niveau total maximum, en climat futur, à Umiujaq (d'après la Figure 5.9 de Massé et Gallant, 2016)

Période de retour	Niveau des surcotes (en cm)		Niveau total (marée + surcote)	
	2040-2069	2070-2099	2040-2069	2070-2099
2 ans	110	110	160	160
5 ans	125	130	175	175
10 ans	140	140	190	190
20 ans	150	150	200	200
25 ans	150	155	205	205
50 ans	162	163	213	215
100 ans	172	173	224	226

S'il est possible que les niveaux d'eau puissent diminuer, il est important de considérer que la période de retour pourrait, elle aussi, diminuer. Par exemple, le niveau d'eau total de 2,09 m, a, actuellement, une période de retour de 100 ans, le même niveau aurait une période de retour de 40 ans entre 2040-2069 et 35 ans entre 2070-2099 (Tableau 15). Même si les niveaux d'eau extrêmes étaient inférieurs à ce qui se produit aujourd'hui, leur probabilité d'occurrence pourrait aussi causer des dommages importants par la répétition des contraintes (Boisson, 2019).

Tableau 15. Périodes de retour de certains niveaux d'eau totaux extrême maximum en climats actuel et futur à Umiujaq (d'après la Figure 5.9 de Massé et Gallant, 2016).

Niveau total extrême haut (cm)	Période de retour en climat actuel (années)	Période de retour entre 2040-2069 (années)	Période de retour entre 2070-2099 (années)
209	100	40	35
205	75	30	25
200	50	20	20
190	30	10	10

Les surcotes extrêmes pourraient avoir lieu en septembre, octobre et novembre (Massé et Gallant, 2016). Des ondes de tempête de plus faibles amplitudes pourraient apparaître autour des mois de juin et de février. Aussi, les ondes de tempête pourraient augmenter de manière généralisée entre les mois d'août et décembre, avec une augmentation marquée en septembre (Massé et Villeneuve, 2013).

La **période de glace mobile** peut s'échelonner sur plusieurs semaines à Umiujaq au printemps (Clerc et al., 2012 et Bernier et al., 2017; 2018; 2019) par l'effet des courants forts qui sont en mouvement tout au long de l'hiver (Clerc et al., 2012). Les îles Nastapoka (Gillies, Curran) protègent le littoral d'Umiujaq des intempéries provenant du large. Elles permettent aussi la formation d'une *glace de rive* côtière stable en hiver et limitent l'apport de glaces exogènes en provenance de la baie d'Hudson pendant la fonte printanière, moment où le littoral est le plus vulnérable aux glaces en dérive (Clerc et al., 2012). Cependant, au même moment, les glaces sont évacuées du lac Tasiujaq (ou Guillaume Delisle) pendant plusieurs semaines dans le détroit Nastapoka et dérivent du sud au nord en passant devant Umiujaq. Ces radeaux de glace constituent un risque non négligeable pour les infrastructures et la navigation (Clerc et al., 2012).

Sur la période 2009-2017, l'englacement a été fait rapidement (de 1 à 3 semaines) à Umiujaq (Clerc et al., 2012, Bernier et al., 2017; 2018; 2019) (Tableau 16). Dans le futur, la durée du couvert de glace pourrait diminuer de 29 jours : la formation des glaces de rive pourrait être retardée de 20 jours et leur fonte pourrait être devancée de 9 jours (Senneville et St-Onge Drouin, 2013).

À Umiujaq, les conditions de glaces, que ce soit lors de la fonte printanière ou de l'englacement, ne posent pas de problème à l'infrastructure maritime (Clerc et al., 2012). Les deux raisons principales sont probablement la faible amplitude des marées et la protection apportée par les îles Nastapoka face à la communauté. Les seuls risques associés à l'englacement sont un décrochement de la banquise avec des niveaux d'eau élevés ou des vents forts (Clerc et al., 2012).

L'observation des glaces à Umiujaq pour les trois années de 2015-2016, 2016-2017 et 2017-2018 (Tableau 16) n'est pas assez longue pour établir une tendance. En effet, la durée de l'englacement est la plus courte (8 jours) la première année d'observations et la plus longue (19 jours) la deuxième année d'observations.

Tableau 16. Durée des différents stades du couvert de glace obtenue par les caméras pour Umiujaq de 2016 à 2018 (Bernier et al., 2017; 2019; Poulin et al., 2018).

Observations	2015-2016	2016-2017	2017-2018
Durée de l'englacement (jours)	8	19	12
Nombre de jours du couvert complet	154	159	170
Nombre de jours entre la première apparition d'eau et l'évacuation	4	5	19

Le littoral d'Umiujaq est formé d'une plage de sable bordée par une microfalaise de 2 m de hauteur. L'intensité et la fréquence des vagues de tempête érodent la microfalaise et la font reculer. Même en cas d'une surcote extrême de 1,7 m (Tableau 4), ni la voirie, ni les habitations ne seraient affectées, sauf pour quelques cabanons en bois (certaines ont déjà été retirées). Par contre, les lieux de stockage à proximité de l'infrastructure maritime sont à risque d'inondation (Boisson, 2019). Ainsi, les infrastructures maritimes d'Umiujaq pourraient être de moins en moins vulnérables aux niveaux d'eau élevés grâce à l'effet du relèvement isostatique, bien que l'accessibilité aux bassins pourrait devenir un problème (Ropars, 2014). Cependant, à court terme, il est très important de tenir compte de la fréquence plus rapprochée des niveaux d'eau extrême malgré la baisse des niveaux d'eau totaux et extrêmes prévue pour la fin du XXI^e siècle. Les cartes des aléas établies par Carbonneau et al., (2015), indiquent qu'Umiujaq est aussi sensible au dégel du pergélisol et aux mouvements de masse qui provoquent des glissements de terrain.

2.2.2.3 Inukjuak

La baisse du niveau de la mer d'ici la fin du XXI^e siècle pourrait être de 71,2 cm avec le RCP4.5 et 58,8 cm avec le RCP8.5 à cause du relèvement isostatique.

Le niveau d'eau des décotes extrêmes pourrait atteindre -0,81 m à l'horizon 2040-2069, et - 0,91 m à l'horizon 2070-2099.

Le niveau d'eau des surcotes extrêmes pourrait atteindre près de 1,3 m aux horizons 2040-2069 et 2070-2099 soit des augmentations de niveaux de surcote de plus de 20 cm par rapport à 1989-2009.

Les ondes de tempêtes ont un effet très important sur le **niveau d'eau total** car la marée a une amplitude minimale (~ 22 cm) (Figure 3). Dans la région d'Inukjuak, le taux de relèvement isostatique atteignant 1,2 cm/an (Tableau 9), la baisse du niveau d'eau relatif d'ici la fin du XXI^e siècle pourrait être de 71,2 cm avec le RCP4.5 et 58,8 cm avec le RCP8.5.

Les **décotes extrêmes** de période de retour 100 ans pourraient diminuer de 2,7 cm pour atteindre -0,81 m à l'horizon 2040-2069, et diminuer de 11,8 cm à l'horizon 2070-2099 pour atteindre - 0,91 m à l'horizon 2070-2099 (Tableau 4 et Figure 10). Ce qui pourrait conduire, en tenant compte de l'effet du relèvement isostatique, à des niveaux de décote extrême de -1,62 m (0,91 + 0,71) pour le RCP4.5 et de -1,50 m (0,91 + 0,59) pour le RCP 8.5 d'ici la fin du XXI^e siècle.

Le niveau des **surcotes extrêmes** pourrait atteindre 1,30 m à l'horizon 2040-2069 et 1,33 m à l'horizon 2070-2099 (Tableau 4), soit des augmentations de plus de 20 cm par rapport à 1989-2009 (Tableau 4). Ce qui pourrait conduire, en tenant compte de l'effet du relèvement isostatique, à des niveaux de surcotes de 0,59 m (1,30 – 0,71) pour le RCP4.5 et de 0,74 m (1,33 – 0,59) pour le RCP 8.5.

Associés à une augmentation de leur fréquence, ces niveaux d'eau pourraient poser un risque d'inondations sur quelques maisons situées proche du littoral, les abords de l'infrastructure maritime et quelques sections de routes où l'altitude du milieu bâti n'excède pas 30 m et où le relief est plat avec quelques collines rocheuses et des vallées (Boisson, 2019)

Cette communauté est établie sur des terrasses sableuses le long de la rive est de la rivière Innuksuak (L'Hérault et al., 2017).

2.2.2.4 Puvirnituk

La baisse du niveau de la mer d'ici la fin du XXI^e siècle pourrait être de 71,2 cm avec le RCP4.5 et 58,8 cm avec le RCP8.5 à cause du relèvement isostatique.

Le niveau d'eau des décotes extrêmes pourrait atteindre -0,97 m à l'horizon 2040-2069, et - 1,08 m à l'horizon 2070-2099.

Le niveau d'eau des surcotes extrêmes pourrait atteindre près de 1,40 m aux horizons 2040-2069 et 2070-2099 soit des augmentations de niveaux de surcote de plus de 13 cm par rapport à 1989-2009.

Les ondes de tempêtes ont un effet très important sur le **niveau d'eau total** car le marnage est microtidal (Figure 3). Le taux de relèvement isostatique, actuellement de 0,89 cm/an (Tableau 9), pourrait amener à une baisse du niveau d'eau relatif de 71,2 cm à la fin du XXI^e siècle sans tenir compte de la hausse du niveau global des mers. Les influences cumulées de la hausse du niveau moyen des océans et du relèvement isostatique devraient provoquer une faible baisse (moins de 10 cm pour une période de retour de 30 ans ou de 50 ans) des niveaux d'eau totaux relatifs à Puvirnituaq (Ropars, 2014).

Les niveaux d'eau des **décotes extrêmes**, qui atteignaient -0,92 m dans le passé-récent, et qui pourraient atteindre -0,97 m à l'horizon 2040-2069 et -1,08 m à l'horizon 2070-2099 (Tableau 4 et Figure 11) seraient amplifiés par la baisse du niveau marin relatif lié au relèvement isostatique. À la fin du XXI^e siècle, les niveaux d'eau extrêmes des décotes pourraient alors atteindre - 1,79 m (1,08 + 0,71).

Les niveaux d'eau des **surcotes extrêmes**, qui atteignaient 1,30 m dans le passé-récent, pourraient atteindre 1,40 m entre 2040-2069 et 1,43 m entre 2070-2099 (Tableau 4), soit des augmentations respectivement de près de 11 cm et de 14 cm par rapport à 1989-2009 (Tableau 4).

Située sur la rive nord de la rivière Puvirnituaq, à moins de 10 km de la baie d'Hudson, la communauté de Puvirnituaq a un littoral caractérisé par de petites anses, des plages et des îlots rocheux. La majorité du bâti se trouve à une altitude inférieure à 10 m (Boisson, 2019). Les mouvements de masse, l'érosion et le dégel du pergélisol sont les aléas les plus importants pour cette communauté (Carbonneau et al., 2015). Les surcotes extrêmes prévues ne poseraient généralement pas de risque pour les habitations actuelles (Boisson, 2019). Par contre, certaines habitations, des portions de routes ainsi que les abords de l'infrastructure maritime situés à environ 10 m de la zone balayée par une surcote, seraient inondés (Boisson, 2019).

2.2.2.5 Akulivik

La baisse du niveau de la mer d'ici la fin du XXI^e siècle pourrait être de 68,8 cm à cause du relèvement isostatique.

Le niveau d'eau des décotes extrêmes pourrait atteindre -0,90 m aux horizons 2040-2069, et 2070-2099.

Le niveau d'eau des surcotes extrêmes pourrait atteindre près de 1,30 m aux horizons 2040-2069 et 2070-2099 soit des augmentations de niveaux de surcote de plus de 9 cm par rapport à 1989-2009.

Les ondes de tempêtes ont un effet très important sur le **niveau d'eau total** car le marnage est microtidal, inférieur à 2 m (Figure 3). Le taux de relèvement isostatique, actuellement de 0,86 cm/an (Tableau 9) pourrait amener à une baisse du niveau d'eau relatif de 68,8 cm à la fin du XXI^e siècle sans tenir compte de la hausse du niveau global des mers. Les influences cumulées de la hausse du niveau moyen des océans et du relèvement isostatique devraient faire en sorte que les niveaux d'eau totaux relatifs resteraient relativement stables avec des variations prédites inférieures à 10 cm à Akulivik (Ropars, 2014).

Les niveaux d'eau des **décotes extrêmes**, qui atteignaient -0,80 m dans le passé-récent, et qui pourraient atteindre -0,86 m à l'horizon 2040-2069 et -0,94 m à l'horizon 2070-2099 (Tableau 4 et Figure 12) seraient amplifiés par la baisse du niveau marin relatif lié au relèvement isostatique. À la fin du XXI^e siècle, les niveaux d'eau extrêmes des décotes pourraient alors atteindre - 1,63 m (0,94 + 0,69).

Les niveaux d'eau des **surcotes extrêmes**, qui atteignaient 1,18 m dans le passé récent, pourraient atteindre 1,27 m entre 2040-2069 et 1,30 m entre 2070-2099 (Tableau 4), soit des augmentations respectivement de près de 9 cm et de 14 cm par rapport à 1989-2009 (Tableau 4).

Akulivik est la communauté la plus vulnérable face à l'aléa de submersion côtière puisqu'elle est très peu élevée en altitude et l'amplitude des marées est microtidal (Figure 3), (Boisson, 2019). Les événements hydrologiques extrêmes y sont l'aléa le plus important (Carbonneau et al., 2015).

Un niveau de surcote d'une hauteur de 1,18 m (Tableau 4) qui pourrait survenir plus fréquemment que par le passé causerait de nombreux dégâts sur les infrastructures (Boisson, 2019). Une dizaine d'habitations ainsi que les routes menant au port et à l'aéroport seraient inondées (Boisson, 2019).

2.2.2.6 Ivujivik

D'ici la fin du XXI^e siècle, le niveau de la mer pourrait être quasiment le même que dans le passé-récent.

Le niveau d'eau des **décotes extrêmes** pourrait atteindre près -0,75 m aux horizons 2040-2069, et 2070-2099. Le niveau d'eau total extrême le plus bas (- 2,14 m) qui avait une période de retour 100 ans dans le passé-récent aurait une période de retour de 30 ans à l'horizon 2040-2069 et de 55 ans à l'horizon 2070-2099.

Le niveau d'eau des **surcotes extrêmes** pourrait atteindre près de 1,30 m aux horizons 2040-2069 et 2070-2099 soit des augmentations de niveaux de surcote de plus de 9 cm par rapport à 1989-2009. Le niveau d'eau total extrême le plus haut (2,35 m) qui avait une période de retour 100 ans dans le passé-récent, aurait une période de retour de 35 ans à l'horizon 2040-2069.

L'observation des glaces à Ivujivik pour les trois années de 2015-2016, 2016-2017 et 2017-2018 n'est pas assez longue pour établir une tendance.

Le taux de relèvement isostatique, actuellement de 0,79 cm/an (Tableau 9) pourrait amener à une baisse du niveau d'eau relatif de 63,2 cm à la fin du XXI^e siècle sans tenir compte de la hausse du niveau global des mers. L'amplitude des marées est moyenne (entre 2 et 4 m) (Figure 3), il y a donc un effet peu marqué des ondes de tempêtes sur le **niveau marin total**. Les influences cumulées de la hausse du niveau moyen des océans et du relèvement isostatique devraient provoquer une quasi-stabilité des niveaux totaux relatifs avec une baisse prédite de quelques centimètres (Ropars, 2014).

Les niveaux des **décotes extrêmes** qui atteignaient - 66,5 cm dans le passé-récent pourraient être encore plus bas, à -74 cm à l'horizon 2040-2069 et - 80 cm à l'horizon 2070-2099 (Tableau 4 et Figure 13) soit s'abaissant respectivement de 7 cm et 13 cm (Tableau 4). Les niveaux totaux extrêmes les plus bas, avec une période de retour de 100 ans, sans tenir compte du relèvement isostatique, pourraient diminuer jusqu'à - 2,28 m à l'horizon 2040-2069 et -2,18 m à l'horizon 2070-2099 (Tableau 17). Le niveau d'eau total extrême le plus bas atteint dans le passé-récent était de -2,14 m (Tableau 18). Ce même niveau d'eau aurait une période de retour de 30 ans à l'horizon 2040-2069 et de 55 ans à la fin du XXI^e siècle (Tableau 18).

Tableau 17. **Niveau des décotes et niveau total minimum, en climat futur à Ivujivik (d'après la Figure 5.14 de Massé et Galland, 2016)**

Période de retour	Niveau des décotes (niveau résiduel) en cm		Niveau total (marée + niveau résiduel) en cm	
	2040-2069	2070-2099	2040-2069	2070-2099
2 ans	-44	-46	-180	-177

5 ans	-52	-56	-194	-189
10 ans	-57	-62	-202	-195
20 ans	-63	-66	-210	-202
25 ans	-64	-69	-213	-204
50 ans	-69	-74	-220	-211
100 ans	-74	-80	-228	-218

Tableau 18. **Périodes de retour de certains niveaux d'eau totaux extrême minimum en climats actuel et futur à Ivujivik (d'après la Figure 5.14 de Massé et Gallant, 2016)**

Niveau total extrême bas (cm)	Période de retour en climat actuel (années)	Période de retour entre 2040-2069	Période de retour entre 2070-2099
-214	100	30	55
-212	75	25	50
-209	50	17	35
-203	30	12	25

Les **décotes** de taille moyenne (- 0,5 m) se produisaient majoritairement en hiver dans le passé-récent. Par contre, en climat futur, les décotes de grosse taille et extrêmes (- 0,6 à - 1 m) pourraient être de plus en plus nombreuses en automne en octobre, novembre, mars et avril (Massé et Gallant, 2016). En revanche, les décotes de niveaux encore plus importants seraient moins fréquentes à la fin de l'automne et en hiver (Savard, 2016).

Les niveaux des **surcotes extrêmes** qui atteignaient 1,01 m dans le passé-récent pourraient atteindre des niveaux plus hauts à 1,11 m, à l'horizon 2040-2069 et 1,07 m à l'horizon 2070-2099 (Tableau 4) soit une augmentation respectivement de 10 cm et de 6 cm. Le niveau d'eau total extrême le plus haut, avec une période de retour de 100 ans, sans tenir compte du relèvement isostatique, pourrait atteindre 2,48 m à l'horizon 2040-2069 et 2,31 m à l'horizon 2070-2099 (Tableau 19). Le niveau d'eau total extrême le plus haut atteignait 2,35 m dans le passé-récent. Ce même niveau d'eau aurait une période de retour de 35 ans à l'horizon 2040-2069 (Tableau 19).

Les **surcotes** extrêmes pourraient avoir lieu en septembre, octobre et novembre (Massé et Gallant, 2016).

Tableau 19. **Niveau des surcotes et niveau total maximum, en climat futur, à Ivujivik (d'après la Figure 5.8 de Massé et Gallant, 2016)**

Période de retour	Niveau des surcotes (niveau résiduel) en cm		Niveau total (marée + niveau résiduel) en cm	
	2040-2069	2070-2099	2040-2069	2070-2099
2 ans	64	65	195	191
5 ans	76	76	210	202
10 ans	85	85	220	209
20 ans	93	92	230	215
25 ans	95	94	231	216
50 ans	103	100	239	224

100 ans	111	107	248	231
---------	-----	-----	-----	-----

Tableau 20. Périodes de retour de certains niveaux d'eau totaux extrême maximum en climats actuel et futur à Ivujivik (d'après la Figure 5.8 de Massé et Gallant, 2016)

Niveau total extrême haut (cm)	Période de retour en climat actuel (années)	Période de retour entre 2040-2069	Période de retour entre 2070-2099
235	100	35	Plus que 100
233	75	30	Plus que 100
230	50	25	80
224	30	15	45

L'englacement de la baie et du détroit d'Hudson peut se produire en quelques jours, dépendamment des températures, des vents et des marées qui poussent les glaces dans la baie (Bernier et al 2017; 2018; 2019). Le tableau 21 présente les observations tirées de Bernier et al (2017-2019) et de Poulin et al (2018). L'observation des glaces à Ivujivik pour les trois années de 2015-2016, 2016-2017 et 2017-2018 n'est pas assez longue pour établir une tendance.

Tableau 21. Processus de glace à Ivujivik (Bernier et al., 2017 ; 2019; Poulin et al, 2018).

Observations	2015-2016	2016-2017	2017-2018
Durée de l'englacement (jours)	18	6	9
Nombre de jours du couvert complet	196	162	181
Nombre de jours entre la première apparition d'eau et l'évacuation	6	14	28

Situé dans le fond d'une petite vallée, la communauté d'Ivujivik est presque entièrement installée sur un terrain rocheux et légèrement ondulé (L'Hérault et al., 2017). Une surcote extrême de 1 m (Tableau 4) pourrait causer quelques dégâts mineurs à l'environnement bâti. Les abords de l'infrastructure maritime et deux cabanes inhabitées seraient inondés (Boisson, 2019). Les mouvements de masse, l'érosion et le dégel du pergélisol y sont aussi des aléas très importants (Carbonneau et al., 2015).

2.3 LE DÉTROIT D'HUDSON

2.3.1 PORTRAIT GÉNÉRAL

GÉOMORPHOLOGIE DE LA CÔTE

La côte est rocheuse. L'érosion se fait plus lentement que sur la baie d'Hudson.

La côte sud du détroit d'Hudson est située entre le Cap Wolstenholme et le Cape Hopes Advance. Les relevés photographiques pris par Boisson (2019) ont montré que cette côte rocheuse (Ford et al., 2016) consiste principalement en des promontoires élevés et des fjords (vallées glaciaires submergées) encaissés ayant des talus d'éboulis.

ALÉAS EN CLIMAT ACTUEL

Les marées ont une amplitude élevée donc les ondes de tempête ont très peu d'effet sur les variations extrêmes du niveau d'eau total.

L'étendue des glaces a diminué dans le passé. Les glaces mobiles sont présentes plus longtemps. Elles pourraient provoquer des dommages aux infrastructures si leur présence s'accompagne de vents violents dirigés vers la côte.

Dans le détroit d'Hudson, les vents dominants sont d'Ouest, les courants de marée sont importants et les marées ont une amplitude élevée de Salluit (3,3 m) vers Quaqtq (8,1 m) (Figure 5). Les vents sont souvent causés par des dépressions situées dans la mer du Labrador, de sorte que la probabilité conjointe de fortes vagues et de niveaux d'eau très élevés est vraisemblablement plus faible que dans la baie d'Hudson (Savard, 2016). Les ondes de tempête n'ont que très peu d'effet sur les variations extrêmes du niveau d'eau total, car l'amplitude des marées est plus élevée que la hauteur des surcotes et décotes et le niveau d'eau total se rapproche de celui de la marée (Massé et Villeneuve, 2013).

L'étendue des glaces dans le détroit d'Hudson a diminué de 16 % au cours de la période 1968-2010 (Derksen et al., 2012). En hiver, le couvert de glace n'est pas continu dans le détroit d'Hudson. Par exemple, au large de Quaqtq, des icebergs et des floes (plaques de glace résultant de la dislocation de la banquise) sont observés tout au long de l'année en raison de forts vents qui soufflent dans l'axe du détroit, d'ouest en est (Clerc et al., 2012), le délestage des glaces de l'Arctique suit cette direction, ce qui peut poser un risque pour la navigation et pour d'éventuelles infrastructures situées dans des zones peu protégées (Boisson, 2019).

ALÉAS EN CLIMAT FUTUR

Beaucoup reste à faire pour comprendre les impacts des CC sur le détroit d'Hudson. Les oscillations et systèmes dépressionnaires qui frappent la région sont très peu connus.

Les CC auront une importance relativement faible par rapport à l'amplitude de la marée et n'affecteront probablement pas de manière significative les niveaux d'eau totaux.

Sur les rives du détroit d'Hudson, les risques associés aux surcotes seront faibles et ceux reliés aux décotes seront très faibles d'autant plus que le taux de relèvement isostatique est peu élevé. En effet, la côte se sera soulevée de 60 à 80 cm, d'ici 2100.

Tous les sites sur le détroit d'Hudson pourraient connaître une augmentation moyenne des surcotes de période de retour 100 ans de l'ordre de 10 cm à l'horizon 2040-2069, et seulement de 4 cm à l'horizon 2070-2099 par rapport à 1980-2009 (Tableau 3). Elles pourraient atteindre près de 80 cm à l'horizon 2040-2069 et près de 75 cm à l'horizon 2070-2099, alors qu'elles atteignaient près de 70 cm dans le passé-récent. Compte tenu de la très grande amplitude des marées, ces extrêmes de hauteurs d'eau pourraient être dommageables que si elles surviennent en même temps que la marée de vive ou de morte-eau.

Les niveaux extrêmes bas pourraient demeurer inchangés dans le détroit d'Hudson (Tableau 3). Les risques associés aux décotes sont donc très faibles dans le détroit d'Hudson d'autant plus que le taux de relèvement isostatique est moins élevé que dans la baie d'Hudson (Boisson, 2019). En effet, la côte se sera soulevée de 60 cm à 80 cm sur les rives du détroit d'Hudson, d'ici 2100 (Tableau 22).

Tableau 22. Les taux de relèvement isostatique de la modélisation NRCan pour les communautés du détroit d'Hudson (James et al., 2014)

Station	Taux de Relèvement isostatique
Salluit	0.75 cm/an

Kangiġsujuaq	0.67 cm/an
Quaqtaq	0.63 cm/an

2.3.2 LES COMMUNAUTÉS DU DÉTROIT D’HUDSON

2.3.2.1 Salluit

La baisse du niveau de la mer d’ici la fin du XXI^e siècle pourrait être de 60 cm à cause du relèvement isostatique.

Les risques côtiers, érosion et submersion, liés aux surcotes sont et pourraient rester modérés à élevés.

Le taux de relèvement isostatique, actuellement de 0,75 cm/an (Tableau 22) pourrait amener à une baisse du niveau d’eau relatif de 60 cm à la fin du XXI^e siècle sans tenir compte de la hausse du niveau global des mers. L’amplitude des marées est macrotidal (entre 4 et 6 m) (Figure 3), il y a donc un effet peu marqué des ondes de tempêtes sur le **niveau d’eau total** (Massé et Villeneuve, 2013).

Les instruments de mesure de niveaux d’eau et de conditions de glace n’ont pas été installés dans la communauté de Salluit (Figure 1). Cependant, compte tenu de sa configuration géomorphologique, les augmentations de l’intensité et de la fréquence des surcotes extrêmes, dans un futur proche, pourraient causer des dommages sur les infrastructures à Salluit (Boisson, 2019). Situé entre Ivujivik et Baie Déception, Salluit pourrait connaître une surcote extrême de près de 1 m (Tableau 4) qui entraînerait l’inondation de la première rangée de maisons le long de la côte et de la route menant à l’infrastructure maritime (Boisson, 2019). Les abords de l’embouchure du ruisseau Kuuguluk seraient également impactés. Les enrochements mis en place pour protéger les maisons les plus proches du littoral témoignent de la tentative de se protéger de cet aléa côtier (Boisson, 2019) et de la vulnérabilité de la communauté à son égard.

Ainsi grâce à sa position dans le fjord, Salluit est protégée de l’érosion automnale liée aux poussées glacielles venant du large (Boisson, 2019), cependant, le sol sableux et de faible altitude est sensible à l’érosion (Carbonneau et al., 2015). L’augmentation de la fréquence des hauts niveaux d’eau pourrait augmenter les risques d’érosion estivale. Cette sensibilité importante aujourd’hui pourrait néanmoins avoir tendance à rester identique ou diminuer dans un futur lointain, horizon 2070-2099, à cause des effets cumulés du relèvement isostatique et de l’élévation global des océans.

2.3.2.2 Baie Déception

Les niveaux d’eau des décotes extrêmes pourraient être faiblement plus bas (-3 cm) à l’horizon 2040-2069 et modérément plus bas (- 6 cm) à l’horizon 2070-2099 que dans le passé-récent.

Les niveaux d’eau des surcotes extrêmes pourraient être modérément plus hauts (7 cm) à l’horizon 2040-2069 et faiblement plus haut (3 cm) à l’horizon 2070-2099 que dans le passé-récent.

La *série temporelle* des conditions de glace est encore trop courte pour laisser apparaître une tendance.

L’amplitude des marées est macrotidal (entre 4 et 6 m) (Figure 3), il y a donc un effet peu marqué des ondes de tempêtes sur le niveau d’eau total (Massé et Villeneuve, 2013).

Les niveaux des **décotes extrêmes** atteignaient -0,65 m dans le passé-récent et pourraient atteindre -0,68 m à l’horizon 2040-2069 et -0,72 m à l’horizon 2070-2099 (Tableau 4 et Figure 14), soit des baisses respectivement de 3 et 6 cm par rapport à 1989-2009 (Tableau 4).

Les niveaux des **surcotes extrêmes** atteignaient 0,75 m dans le passé-récent et pourraient atteindre 0,82 m à l’horizon 2040-2069 et 0,79 m à l’horizon 2070-2099 (Tableau 4), soit des augmentations respectivement de près de 7 cm et de 3 cm par rapport à 1989-2009 (Tableau 4).

Baie Déception est établie sur des argiles marines fragiles. Les aléas les plus susceptibles d’y causer des dommages sont les mouvements de masse et l’érosion (Carbonneau et al., 2015). En effet, Baie Déception a déjà connu un glissement de terrain et les risques liés à cet aléa pourraient être plus élevés pour les infrastructures maritimes (Boisson, 2019).

Un système d’observation des glaces de rives par caméras a été installé en 2015. Les données récupérées ont été étudiées pour les années 2015 à 2018 (Tableau 23). La série temporelle est encore trop courte pour voir apparaître une tendance.

Tableau 23. **Processus de glace à la Baie Déception (Bernier et al., 2017 ; 2019; Poulin et al, 2018).**

Stade d’évolution du couvert de glace à la Baie Déception	Nombre de jour 2015-2016	Nombre de jour 2016-2017	Nombre de jour 2017-2018
Durée de l’englacement	39	16	35
Durée du couvert de glace permanent	208	185	197
Durée entre la première apparition d’eau et l’évacuation des glaces lors de la fonte printanière	2	5	13

2.3.2.3 Kangiqsujuaq

La baisse du niveau de la mer d’ici la fin du XXI^e siècle pourrait être de 53,6 cm à cause du relèvement isostatique. La hausse du niveau moyen des océans serait donc peu compensée par le relèvement isostatique et une augmentation des niveaux d’eau totaux (environ 30 cm pour des périodes de retour de 30 ans ou 50 ans), à l’horizon 2040-2074, pourrait avoir lieu.

Le taux de relèvement isostatique, actuellement de 0,67 cm/an (Tableau 22) pourrait amener à une baisse du niveau d’eau relatif de 53,6 cm à la fin du XXI^e siècle sans tenir compte de la hausse du niveau global des mers. L’amplitude des marées est hypertidal (entre 8 et 10 m) (Figure 3), il y a donc un effet très faible des ondes de tempêtes sur **le niveau d’eau total** (Massé et Villeneuve, 2013). Les CC affectant les surcotes auraient une importance relativement faible par rapport à l’amplitude de la marée et n’affecteraient probablement pas de manière significative les niveaux totaux qui ne devraient pas vraiment varier (Massé et Villeneuve, 2013 ; et Ropars, 2014). Par contre, comme la hausse du niveau moyen des océans est peu compensée par le relèvement isostatique à Kangiqsujuaq, une augmentation des niveaux d’eau totaux (environ 30 cm pour des périodes de retour de 30 ans ou 50 ans) en climat futur (2040-2074) pourrait vraisemblablement avoir lieu (Ropars, 2014).

Les niveaux des **décotes extrêmes** atteignaient -0,58 m dans le passé-récent et pourraient atteindre -0,59 m à l’horizon 2040-2069 et -0,60 m à l’horizon 2070-2099 (Tableau 4 et Figure 15), soit des baisses négligeables respectives de 1 et 2 cm par rapport à 1989-2009 (Tableau 4).

Les niveaux des **surcotes extrêmes** atteignaient 0,68 m dans le passé-récent et pourraient atteindre 0,78 m à l'horizon 2040-2069 et 0,72 m à l'horizon 2070-2099 (Tableau 4), soit des augmentations respectives de près de 10 cm et de 3 cm par rapport à 1989-2009 (Tableau 4).

Localisée dans la baie de Wakeham et située dans un fjord à environ 10 km du détroit d'Hudson, la communauté de Kangiqsujuaq est logée dans une vallée entourée de hautes parois rocheuses recouvertes de dépôts meubles (Boisson, 2019). Cette situation, dans une baie relativement protégée, devrait limiter l'exposition aux risques liés aux glaces venant du large, bien que quelques maisons situées entre les deux petites rivières qui s'écoulent dans la communauté pourraient être atteintes par une surcote extrême de 1 m (Boisson, 2019). La route menant à l'infrastructure maritime ne serait pas inondée (Carbonneau et al., 2015).

Les aléas les plus susceptibles de causer des dommages à Kangiqsujuaq sont donc les mouvements de masse et le dégel du pergélisol (Carbonneau et al., 2015).

2.3.2.4 *Quaqtaq*

L'élévation du niveau moyen des océans provoquera l'augmentation du niveau d'eau total à Quaqtaq de l'ordre de 30 à 40 cm.

Les ondes de tempêtes ont, et pourraient continuer dans le futur, à avoir peu d'effet sur le niveau d'eau total même si elles sont extrêmes (période de retour 100 ans) à cause de la très grande amplitude des marées et le fait qu'elles sont prévues pour être de faible niveau (10 cm pour les surcotes et - 4 mm pour les décotes) par rapport à 1980-2009. Leur contribution au niveau d'eau total serait équivalente à ce qu'elle est actuellement.

Les niveaux d'eau extrêmes totaux qui ont une période de retour de 100 ans actuellement seraient plus fréquents, avec une période de retour de 50 ans, à l'horizon 2040-2069.

Les surcotes extrêmes pourraient avoir lieu en septembre, octobre et novembre et se prolonger en décembre et janvier et les décotes extrêmes avoir lieu surtout en mars et avril.

La saison la plus à risque à cause de la présence de glaces mobiles est actuellement le printemps. Mais la probabilité d'augmentation de fréquences des surcotes extrêmes en automne pourrait accroître les risques liés aux glaces mobiles en automne.

Le relèvement isostatique est très faible, environ 0,63 cm/an, à Quaqtaq (Tableau 22). Il pourrait amener une élévation des terres de près de 50 cm d'ici à la fin du XXI^e siècle. Aussi, il ne compensera que faiblement l'augmentation prévisible du niveau moyen des océans. **Le niveau d'eau relatif** devrait augmenter dans le futur, de l'ordre de 30 à 40 cm pour la période de retour des événements de 30 à 50 ans (Ropars, 2014).

La marée à Quaqtaq est hypertidale (entre 8 et 10 m) (Figure 3), donc les niveaux d'eau totaux sont principalement dus à la marée et très peu aux ondes de tempêtes, même extrêmes (période de retour 100 ans). Le marnage a atteint plus de 9 m en vive-eau et moins de 4 m en morte-eau entre 2015 et 2017 (Neumeier et al., 2019).

Le niveau des **décotes** a été de -54,3 cm entre 1980-2009. Il pourrait atteindre -55 cm aux horizons 2040-2069 et 2070-2099 (soit 4 mm de moins que le niveau du passé récent) (Tableau 4 et Figure 16). Les niveaux totaux extrêmes bas pourraient atteindre -5,6 m à l'horizon 2040-2069 et -5,5 m à l'horizon 2070-2099 (Tableau 24) alors qu'il atteignait, dans le passé récent, -5,5 m (Tableau 25). Le niveau d'eau total extrême bas de -5,5 m de période de retour 100 ans, actuellement, serait attendu 1 fois par 45 ans à court terme (Tableau 25). À Quaqtaq, au cours de la période de 1980-2009, il n'y avait pas de saison des décotes en automne mais plutôt en hiver (Massé et Gallant, 2016)

Tableau 24. Niveau des décotes et niveau total minimum, en climat futur, à Quaqtq (d'après la Figure 5.13 de Massé et Galland, 2016)

Période de retour	Niveau des décotes (niveau résiduel) en cm		Niveau total (marée + niveau résiduel) en cm	
	2040-2069	2070-2099	2040-2069	2070-2099
2 ans	-36	-36	-515	-520
5 ans	-41	-41	-526	-515
10 ans	-45	-45	-535	-525
20 ans	-47	-47	-542	-535
25 ans	-48	-48	-545	-535
50 ans	-52	-52	-552	-544
100 ans	-55	-55	-559	-553

Tableau 25. Périodes de retour de certains niveaux d'eau totaux extrême minimum en climats actuel et futur à Quaqtq (d'après la Figure 5.13 de Massé et Galland, 2016)

Niveau total extrême bas (cm)	Période de retour en climat actuel (années)	Période de retour entre 2040-2069 (années)	Période de retour entre 2070-2099 (années)
-552	100	45	100
-549	75	40	75
-545	50	25	50
-540	30	17	30

Le niveau des **surcotes** a atteint près de 70 cm entre 1980-2009. Il pourrait atteindre 81 cm à l'horizon 2040-2069 (soit 10 cm de plus que le niveau du passé-récent) et 73 cm à l'horizon 2070-2099 (soit 4 cm de plus que le niveau du passé-récent) (Tableau 4). Les niveaux totaux extrêmes hauts pourraient atteindre 5,4 m à l'horizon 2040-2069 et 5,3 m à l'horizon 2070-2099 (Tableau 26) alors qu'il est présentement de 5,3 m (Tableau 27). Le niveau d'eau total extrême haut de 5,3 m de période de retour 100 ans, actuellement, aurait lieu, une fois par 50 ans en 2040-2069 puis une fois par 100 ans en 2070-2099 (Tableau 27).

L'élévation des niveaux totaux à cause des ondes de tempêtes resterait dans les intervalles du marnage et des niveaux de surcotes et de décotes qui ont été atteints dans le passé-récent, et ce, sans tenir compte du relèvement isostatique. Pour que les surcotes causent des dommages sur la côte ou aient un effet supérieur à celui de la marée, elles devraient dépasser 4 m en période de morte eau. Ce qui est peu probable d'après les simulations obtenues et les observations de Neumeier et al., 2019. Les surcotes n'ont pas dépassé 0,45 m entre 2015 et 2017. Les surcotes extrêmes se produisent principalement durant les mois de décembre et janvier.

Tableau 26. Niveau des surcotes et niveau total maximum, en climat futur, à Quaqtq (d'après la Figure 5.7 de Massé et Galland, 2016)

Période de retour	Niveau des surcotes (niveau résiduel) en cm		Niveau total (marée + niveau résiduel) en cm	
	2040-2069	2070-2099	2040-2069	2070-2099
2 ans	46	47	492	480

5 ans	56	55	505	494
10 ans	64	60	512	505
20 ans	67	64	520	512
25 ans	70	65	522	515
50 ans	75	69	530	523
100 ans	81	73	537	531

Tableau 27. **Périodes de retour de certains niveaux d'eau totaux extrême maximum en climats actuel et futur à Quaqtq (d'après la Figure 5.7 de Massé et Gallant, 2016)**

Niveau total extrême haut (cm)	Période de retour en climat actuel (années)	Période de retour entre 2040-2069 (années)	Période de retour entre 2070-2099 (années)
530	100	50	100
529	75	45	75
524	50	25	50
519	30	17	30

Les **tempêtes** propices à la formation de vagues élevées arrivent principalement en automne, d'août à novembre, et de façon très régulière (Neumeier et al., 2019). Cependant certaines tempêtes sont encore présentes à la mi-décembre lorsque la glace se forme. Ces observations corroborent les simulations en climat récent (1980-2009) de Massé et Gallant (2016), qui montrent que la saisonnalité des surcotes s'étend de l'automne à la majeure partie de l'hiver et que les décotes se produisent davantage en hiver qu'en automne. En climat futur, la saison des surcotes et des décotes pourrait être plus longue du mois d'août au mois de janvier. La saison des surcotes pourrait parfois s'étendre jusqu'en février (Massé et Gallant, 2016). Les surcotes extrêmes pourraient avoir lieu en septembre, octobre et novembre et se prolonger en décembre et janvier et les décotes extrêmes surtout en mars et avril (Massé et Gallant, 2016)

Majoritairement, les 10 tempêtes les plus fortes (sur 11 durant la période d'enregistrement entre août 2017 et août 2018) provenaient du secteur nord-ouest. Elles sont passées entre l'île Hearn et le continent et avaient des vagues de tempêtes supérieures à 4,5 m de hauteur significative. Une seule tempête provenait du nord-est (Neumeier et al., 2019).

En hiver, l'environnement côtier du secteur de Quaqtq est protégé par la présence de **glaces** fixes. Par exemple, un pied de glace s'accumule sur le brise-lames et assure une certaine protection même lorsque la banquise côtière disparaît graduellement durant le processus de démantèlement printanier. C'est vers la fin de la période de fonte, lorsque le cordon n'est plus présent, que les glaces peuvent se rapprocher des bâtiments et infrastructures (Clerc et al., 2012). Elles deviennent alors un risque aux installations sur le littoral pouvant ainsi les percutées et les endommager.

Sur la période 2009-2017, l'englacement prenait généralement de 1 à 5 semaines tandis que, la fonte s'échelonnait sur 3 à 6 semaines (Clerc et al., 2012 ; Bernier et al, 2017; 2018; 2019) (Tableau 28). Toutefois, l'observation des **glaces** à Quaqtq pour les trois années de 2015-2016, 2016-2017 et 2017-2018 (Tableaux 28) n'est pas assez longue pour établir une tendance. Par contre, les simulations de (Senneville et St-Onge Drouin, 2013) montrent qu'en effet, la fonte pourrait être devancée de 17 jours et l'englacement pourrait être retardé de 22 jours.

Tableau 28. Processus de glace à Quaqtq (Bernier et al., 2017 ; 2019; Poulin et al, 2018).

Observations (jours)	2015-2016	2016-2017	2017-2018
Durée de l'englacement (jours)	17	11	21
Nombre de jours du couvert complet	196	166	181
Nombre de jours entre la première apparition d'eau et l'évacuation	22	35	38

De manière générale, dans la région de Quaqtq, la côte pourrait être exposé beaucoup plus longtemps aux glaces mobiles et aux hauts niveaux d'eau caractéristiques du printemps et de l'automne (Senneville et St-Onge Drouin, 2013). Les risques liés aux glaces mobiles sont potentiellement plus élevés au printemps mais les surcotes extrêmes pourraient être plus fréquentes en automne.

L'installation des infrastructures en hauteur et en dehors de la zone balayée (Boisson, 2019) par une surcote extrême possible de 1 m (supérieure aux prévisions Tableau 4), permettrait de réduire le risque associé à une surcote.

En été, les côtes sont plus sensibles aux mouvements de masse et à l'érosion (Carbonneau et al., 2015), d'autant plus que les moments de calme (sans vents forts) sont inexistantes durant la période libre de glace (Neumeier et al., 2019).

2.4 LA BAIE D'UNGAVA

2.4.1 PORTRAIT GÉNÉRAL

Des trois régions maritimes du Nunavik, la baie d'Ungava est la région qui a reçu le moins d'attention jusqu'à présent (Figure 1- Chapitre 1). Des efforts importants sont à prévoir dans plusieurs domaines de recherche pour comprendre les aléas et la dynamique océanique de l'Est du Nunavik (section 3.4.1.).

GÉOMORPHOLOGIE DE LA CÔTE

Le littoral de la baie d'Ungava est relativement protégé de l'érosion grâce aux nombreuses îles qui sillonnent les larges estuaires et diminuent le fetch. À certains endroits, la terre avance sur la mer.

Le littoral de la baie d'Ungava est caractérisé par des fjards (grand espace d'eau ouvert entre des groupes d'îles), des côtes basses rocheuses, des baies et de larges estuaires (i.e. Arnaud, aux Feuilles, False, À-la-Baleine, George) avec de vastes vasières et marais maritimes remplis de blocs rocheux apparents à marée basse (Boisson, 2019). Seul Kuujjuaq est située à l'intérieur des terres. Tasiujaq et Aupaluk sont les communautés les moins élevées en altitude.

Malgré un *fetch* relativement plus important en baie d'Ungava que sur la façade orientale de la baie d'Hudson, les nombreuses îles et de larges estrans constituent des barrières naturelles qui atténuent l'énergie des vagues et limitent l'érosion sur la côte (Boisson, 2019). Boisson (2019) a même observé la progradation des plages et l'avancement des marais sur la mer. Seules certaines zones rocheuses subissent de l'érosion sous l'effet de la *gélifraction* et des vagues de tempêtes (Fournier et Allard, 1992) comme dans l'estuaire de la rivière George. Ce phénomène agit depuis le retrait des glaciers et va se poursuivre dans le futur. Les relevés montrent également que les plages actuelles ne sont pas érodées.

ALÉAS EN CLIMAT ACTUEL

Des appareils de mesure dans la baie d'Ungava à Aupaluk et Kuujuaq ont été installés. Cependant, l'absence d'appareil de mesure dans les autres communautés de cette région limite la compréhension des impacts des CC dans cette région maritime.

L'étendue des glaces a diminué dans le passé et les glaces mobiles sont présentes plus longtemps. Elles peuvent provoquer des dommages aux infrastructures si leur présence s'accompagne de vents violents dirigés vers la côte.

L'amplitude des marées dans la baie d'Ungava est très grande, de 4 m à plus de 6 m (Figure 3) avec un maximum de 16,7 m atteint dans l'estuaire de la rivière aux Feuilles (Pêches et Océans Canada, 2019). Aussi, les ondes de tempêtes n'ont que très peu d'effet sur les variations extrêmes du niveau d'eau total. Les littoraux de communautés isolées de Tasiujaq et d'Aupaluk possèdent les marnages les plus importants connus au Québec. La marée engendre des *courants de flot* et de *jusant* particulièrement forts qui augmentent grandement les risques pour la navigation et qui brisent continuellement le couvert de glace qui se forme dès la fin du mois d'octobre (Boisson, 2019). Par contre, à certains endroits où se trouvent des plages soulevées et des plages de barricades de blocs glaciels soulevées (*raised boulder barricades*) en arrière-plage, Boisson (2019) constate la régression du trait de côte. Ces barricades ont également un rôle protecteur, en diminuant l'intensité des vagues qui atteignent la côte (Boisson, 2019).

Aupaluk a été dotée de caméras pour observer les conditions de glace à partir de 2015. L'étendue temporelle des données d'observations est trop courte pour établir une tendance claire.

ALÉAS EN CLIMAT FUTUR

Les communautés de la Baie d'Ungava n'ont peu ou pas d'appareil de mesure pour permettre des observations à long terme (Figure 1 Chapitre 1) il est difficile de tirer des tendances passées et encore moins d'extrapoler dans le futur, pour les différents aléas identifiés par le MTQ.

La baie d'Ungava était incluse dans l'étendue spatiale ou domaine de calcul du modèle hydrodynamique utilisé dans les travaux de Massé et Villeneuve, 2013 ; Savard et al. 2014 et Massé et Gallant, 2016, bien que cette région soit déficiente sur le plan des données en général. Les simulations ont été calculées seulement pour Kuujuaq. Parmi les cinq communautés au pourtour de la baie d'Ungava et en amont de la rivière Koksoak, seule Kuujuaq a été munie d'un marégraphe à l'embouchure de l'estuaire qui n'a malheureusement pas pu recueillir de séries de données en raison du bris de l'appareil (voir synthèse technique).

Afin d'obtenir un portrait plus exhaustif des conditions au Nunavik, il serait intéressant d'améliorer les connaissances hydrologique et climatique sur la baie d'Ungava, qui est, de ce fait, un terrain prometteur pour la recherche et le développement (section 3.4.1.).

2.4.2 LES COMMUNAUTÉS DE LA BAIE D'UNGAVA

2.4.2.1 Kangirsuk

La communauté de Kangirsuk est séparée en deux quartiers localisés de part et d'autre d'une baie sur la rive nord de la rivière Arnaud. Construite sur des dépôts grossiers, elle repose sur une base solide en roc. La situation géographique de cette communauté — sur une colline rocheuse aux versants abrupts — lui confère une certaine sécurité face à un risque de submersion. Ainsi, en cas d'une surcote extrême de 1 m, ni la voirie, ni les habitations et les autres infrastructures ne seraient exposées. À Kangirsuk, le risque associé à une surcote est donc nul et le restera dans un contexte de CC. Les forts courants de flot et de jusant rencontrés dans l'estuaire de la rivière Arnaud peuvent rendre, actuellement, la navigation plus hasardeuse (Boisson,

2019). Les aléas cartographiés à Kangirsuk sont d'ordre climatiques et hydrologiques (Carbonneau et al., 2015).

2.4.2.2 Aupaluk

Située au sud de la Baie Hopes Advance, Aupaluk est construite sur des dépôts sableux de plages soulevées ne dépassant pas 40 m d'altitude. Elle est, avec Inukjuak, une des communautés la moins élevée en altitude (Boisson, 2019). Aussi, les aléas de type hydrologique sont ceux qui pourraient provoquer le plus de dégâts en plus des mouvements de masse et le dégel du pergélisol (Carbonneau et al., 2015). Une hauteur de surcote extrême de 1 m pourrait submerger plusieurs infrastructures construites à la base de la terrasse marine (Carbonneau et al., 2015).

Selon les données recueillies (Tableau 29) entre les années 2015 et 2017, le processus d'englacement est d'environ quatre semaines. En revanche, celui de la fonte du couvert de glace s'échelonne sur trois à quatre semaines. Durant la fonte, les blocs de glace peuvent se déposer dans la baie ou être transportés au gré des marées. Toutefois, l'observation des glaces à Aupaluk pour les deux années de 2015-2016 et 2016-2017 (Tableau 29) n'est pas assez longue pour établir une tendance.

Tableau 29. Processus de glace à Aupaluk (Bernier et al., 2017 ; 2019; Poulin et al, 2018)

State d'évolution du couvert de glace à Aupaluk	2015-2016	2016-2017
	Nombre de jours	Nombre de jours
Durée de l'englacement	27	32
Durée du couvert de glace permanent	196	177
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	21	30

2.4.2.3 Tasiujaq

Localisée dans une baie de la rive sud du bassin de la rivière aux Feuilles et à l'embouchure de la rivière Bérard, la communauté de Tasiujaq est installée à environ 3 m d'altitude sur une ancienne terrasse marine. En raison de la forte amplitude des marées dans cette région, l'estran fait plusieurs kilomètres de largeur et est composé d'un champ de blocs glaciels (Boisson, 2019). Les aléas possibles à Tasiujaq sont les aléas hydrologiques comme l'érosion, ainsi que le dégel du pergélisol (Carbonneau et al., 2015). Selon Boisson (2019), une surcote extrême de 1 m ne causerait pas de dégâts. Par contre, une surcote de 2,5 m entraînerait les premiers dégâts observés sur la route menant à l'infrastructure maritime (Boisson, 2019). Toujours selon cet auteur, les CC ne généreront pas nécessairement une augmentation des aléas côtier. Cependant, la navigation dans le secteur de la rivière aux Feuilles demeurera très périlleuse (Boisson, 2019).

2.4.2.4 Kuujuaq

Kuujuaq est située sur la rive ouest de la rivière Koksoak, à 53 km de son embouchure, en zone de transition estuarienne (Boisson, 2019; Bleau, 2012), où le marnage y est de 4,6 m (Figure3). Sur le tronçon de la rivière où la communauté et les infrastructures sont localisées, les marées sont importantes. Le **niveau marin relatif** pourrait diminuer de 45.9 ± 27.1 cm selon le RCP4.5 et de 36.2 ± 33.2 cm selon le RCP8.5 d'ici à 2100 (Tableau 3). C'est lorsque la fonte du glacier de l'Inlandsis ouest de l'Antarctique est considérée que le niveau marin relatif pourrait augmenter de 40 cm à la fin du XXI^e siècle.

Les niveaux des **décotes extrêmes** atteignaient -0,72 m dans le passé-récent, et pourraient atteindre -0,71 m à l'horizon 2040-2069 et -0,69 m à l'horizon 2070-2099 (Tableau 4 et Figure 17) soit des baisses négligeables respectivement de 1 et 2 cm par rapport à 1989-2009 (Tableau 4).

Les niveaux des **surcotes extrêmes** atteignaient 1,01 m dans le passé-récent, pourraient atteindre 0,92 m à l'horizon 2040-2069 et 1,03 m à l'horizon 2070-2099 (Tableau 4), soit une baisse de 9 cm à l'horizon 2040-2069 et une augmentation négligeable de près de 2 cm à l'horizon 2070-2099, par rapport à 1989-2009 (Tableau 4).

Les processus de déglacement et la présence de glaces mobiles durent plusieurs semaines au printemps. Le savoir local (Bleau, 2012) et les observations par caméras montrent qu'entre 2009 et 2012, il a fallu de 5 à 25 jours de temps doux pour que les signes de détérioration du couvert glaciaire se manifeste près de l'infrastructure maritime. De plus, des morceaux de glace fixes ou en dérive sont restés présents pendant 25 à 55 jours (Clerc et al., 2012). Les courants de marée jouent un rôle déterminant non seulement dans la prise du couvert glaciaire mais aussi sur le va et vient des radeaux de glaces, qui dure près de trois mois (75 à 90 jours) et de 25 à 55 jours lors de la période de fonte (Clerc et al., 2012; Bleau, 2012). Plus les glaces sont épaisses et denses dans l'estuaire, plus les risques sont élevés. Les photographies du réseau CAIMAN n'ont pas été analysées pour Kuujuaq après 2015 (Figure 1) (Bernier et al., 2017 et 2019). À la moitié du XXI^e siècle, la fonte des glaces printanière pourrait être devancée de quatre jours et à l'automne, l'apparition des glaces de rive pourrait être retardée de 12 jours (Senneville et St-Onge Drouin, 2013).

Actuellement, en cas d'une surcote extrême, ni la voirie, ni les habitations et les autres infrastructures ne seraient affectées (Boisson, 2019). Les aléas naturels les plus importants sont liés au dégel progressif du pergélisol et à des aléas de types hydrologiques (Carbonneau et al., 2015) tels que les embâcles sur la Koksoak selon les connaissances locales (Bleau, 2012).

2.4.2.5 Kangiqsualujuaq

Kangiqsualujuaq est installé sur les bords de la baie Akilasakallak sur la rive est de l'estuaire de la rivière George. Cette baie se caractérise par un marais intertidal et une vaste vasière à blocs rocheux. Le risque associé à une surcote est faible. Seule une partie de la route menant au port serait inondée par une surcote de 1 m. Enfin, dans un contexte de CC, cette communauté ne sera que très peu concernée par des aléas côtiers majeurs (Boisson, 2019).

3. INTÉGRER LES CONNAISSANCES VERS LA MISE EN ŒUVRE DE L'ADAPTATION

La synthèse des connaissances sur l'*impact* des changements climatiques sur l'environnement maritime et côtier au Nunavik est un outil destiné aux professionnels en environnement et CC, en aménagement du territoire et aux gestionnaires municipaux. Elle a pour but de rendre accessible les résultats de recherches scientifiques récents leur permettant de comprendre les impacts des CC et de faciliter leur intégration dans les différents outils d'aménagement du territoire et lors de la planification de l'entretien des infrastructures maritimes. L'*adaptation* passe d'abord et avant tout par une meilleure conscientisation et une sensibilisation de toutes les parties prenantes pouvant être impactées par les CC. Pour être efficaces et robustes, les mesures d'adaptation doivent, en règle générale, s'ancrer dans les différents types de savoir et les acquis de plusieurs professionnels et décideurs. Informer la population des impacts et solutions potentielles peut aussi faciliter leur acceptabilité (Morin, 2008a).

L'objectif de ce troisième chapitre est de proposer des moyens d'intégrer les connaissances présentées dans les chapitres précédents à certaines étapes clés du processus d'adaptation (figure 2, chapitre 1). Ce chapitre se divise en quatre sections. Les concepts d'*aléas*, de *vulnérabilité* et de *risque* sont brièvement présentés (**section 3.1**). Des pistes pour l'utilisation des connaissances compilées dans les chapitres précédents sont suggérées pour mieux protéger et aménager le territoire (**section 3.2**). Différents outils utiles à l'adaptation au Nunavik sont présentés (**section 3.3**). La dernière section se penche sur les avenues de recherches futures concernant les particularités des environnements nordiques et les enjeux de l'adaptation dans ces régions (**section 3.4**).

3.1 LES ALÉAS, LES VULNÉRABILITÉS ET LES RISQUES DANS LE NORD DU QUÉBEC

Le risque est la rencontre entre un aléa et une vulnérabilité. Autrement dit, il y a un risque de conséquences dommageables quand un aléa se produit dans un lieu où les éléments exposés ont une certaine vulnérabilité. (Morin, 2008b). Le terme aléa s'applique à tout phénomène naturel (inondation, crue de tempête, avalanche, éboulement, séisme, etc.) ou anthropique (déraillement de train, défaillance d'une centrale nucléaire, bombardements, etc.) ayant une certaine probabilité de se produire en un endroit précis. Tel que décrit au chapitre 1, les caractéristiques permettant d'établir l'ampleur des aléas pour une situation et un milieu donnés sont l'intensité, la probabilité d'occurrence (ou la *réurrence*) et la localisation spatiale (l'étendue) possible de ses effets (Morin, 2008b). Dans ce contexte, l'identification des aléas permet de mieux comprendre la nature du phénomène en cause, d'accroître la connaissance de leurs impacts sur le milieu exposé et d'anticiper les besoins éventuellement générés après la manifestation de l'aléa. La vulnérabilité est « une condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux qui prédispose les éléments exposés à la manifestation d'un aléa à subir des préjudices ou des dommages » (Morin, 2008b).

Le chapitre 2 a exposé les caractéristiques des aléas climatiques et hydrologiques qui pourraient avoir lieu sur le littoral du Nunavik et les facteurs physiques naturels, essentiellement géomorphologiques, qui influencent la vulnérabilité et les impacts des aléas. Les risques côtiers sont localisés là où sont réunis la probabilité d'occurrence d'un aléa et la présence de populations et d'infrastructures. Au Nunavik, toutes les populations et les infrastructures sont situées sur le littoral, à l'embouchure de rivières ou d'estuaires, dans

des baies ou des fjords. En conséquence, on peut déduire que les quatorze villages inuits et la baie Déception sont potentiellement à risque (Boisson, 2019 et L'Hérault et al., 2017a).

Les Nunavimmiut ont d'ores et déjà modifié certaines de leurs habitudes de vie suites aux changements qu'ils ont perçus dans leur environnement. Par exemple, ils ont déjà modifié les routes et leurs habitudes de chasse et de pêche saisonnières pour s'adapter au fait que le couvert de glace se forme aujourd'hui plus tard dans la saison et se désagrège plus rapidement qu'au cours des dernières décennies (Clerc et al., 2011). Les changements sont devenus tellement variables d'une année à l'autre que dans certains secteurs, il est de plus en plus difficile de prévoir si les conditions de glace sont sécuritaires, ce qui augmente les risques d'accident (Clerc et al., 2011) et pourrait restreindre l'utilisation des motoneiges ou les autres moyens de se déplacer sur la glace.

Tel que décrit au chapitre 2, les changements dans les conditions de glace peuvent amoindrir la protection de la côte. En hiver, au Nunavik et, en particulier dans la baie d'Hudson, la présence des glaces de mer immobiles et stables (glace ancrée au fond ou banquise côtière), de janvier à juin, limite les actions des vagues et du vent sur les berges (Savard et al. 2016). Si les vents sont très violents, la glace pourrait être incapable de résister aux contraintes qu'ils imposent et devenir mobile (Atkinson et al., 2016). En hiver, les principaux dangers associés aux déplacements pour les Inuits, sont les fissures et les empilements de glace qui peuvent apparaître dans certains secteurs sensibles au battement des *marées* et aux courants marins (Clerc et al., 2011). Cependant, c'est au printemps et en automne que les côtes sont plus à risque puisqu'une combinaison de vents forts et de niveaux d'eau élevés (liés aux fortes marées) peut entraîner le bris du couvert de glace aminci par des températures plus douces. Les conditions de glace étaient bien connues des populations en condition climatique passée. Les changements qu'ils constatent ne leur permettent plus de se fier à leurs connaissances acquises.

Ainsi la présence d'un couvert de glace peut protéger la côte ou non selon la température de l'air mais aussi selon la forme et la force des vagues de tempêtes qui s'abattent en direction des côtes. Connaître le comportement de la glace et l'évolution des conditions de glace permettra d'identifier le moment et la durée des périodes où la glace est fragile et mobile et que la côte n'est pas protégée par la glace de rive⁹ et le moment où elle est solide et fixe (Bernier et al., 2017). Considérer la récurrence accrue des *surcotes* même si elles devenaient moins intenses, permettra d'identifier de nouvelles vulnérabilités dans les zones inondables. Considérer la baisse du *niveau marin relatif* et la baisse accrue des *décotes* qui seraient maximales à la fin de XXI^e siècle sur la côte la baie d'Hudson permettra de mieux analyser la localisation de futurs ports en eau profonde (L'Hérault et al., 2017a).

Les aléas étudiés pour le littoral du Nunavik ayant une origine naturelle, leurs caractéristiques ne peuvent pas être modifiées volontairement par les humains. Comme l'indique Morin (2008a), lorsque nous avons peu d'emprise sur l'aléa, il faut agir sur la vulnérabilité des infrastructures exposées pour réduire les risques. Par conséquent, **la seule façon de diminuer les risques au Nunavik est de diminuer la vulnérabilité des facteurs physiques de l'environnement naturel, des infrastructures et des communautés. Ceci implique qu'il faut améliorer les compétences des parties prenantes et accroître le pouvoir d'agir des intervenants à poser des actions concrètes pour réduire les vulnérabilités.**

⁹ La durée de la saison de glace de rive a été définie comme le nombre de jours où la concentration de glace de rive, est supérieure à 30 %.

3.2 DONNÉES ET CONNAISSANCES EN SOUTIEN À L'ADAPTATION

La compréhension des aléas, des vulnérabilités et des risques peut informer les décisions en lien avec l'occupation et l'aménagement du territoire. En effet, ces informations peuvent servir à analyser les impacts potentiels des CC de manière régionalisée, ce qui permet de cibler les mesures d'adaptation à prioriser sur le territoire. Afin de montrer comment cela pourrait être fait au Nunavik, cette section présente deux exemples d'analyses qui pourraient être utilisées en intégrant les nouvelles informations, pour mieux protéger et aménager ce territoire. La première est une analyse de sensibilité, qui combine des informations en lien avec les aléas et les vulnérabilités, et la seconde est une analyse spatiale des risques liés à différents aléas climatiques.

3.2.1 ANALYSER LES VULNÉRABILITÉS

La connaissance des aléas et des facteurs de vulnérabilité naturelle permet d'évaluer où les impacts seront les plus élevés. Sur les environnements côtiers, les impacts susceptibles de causer le plus de dommages sont la *submersion* et l'érosion.

Une des méthodes les plus fréquemment utilisées pour évaluer les vulnérabilités est la grille d'analyse, où des pointages d'importance sont attribués aux différents aléas pertinents pour la région d'intérêt. L'objectif de cette méthode est d'analyser les sensibilités en climat actuel et de les comparer à ce qui est attendu en climat futur afin de classer les vulnérabilités en ordre d'importance pour prioriser les mesures d'adaptation ou d'aménagement.

Une étude de RNCAN utilise ce type de grille pour analyser la sensibilité de l'ensemble des côtes canadiennes à différents aléas (Manson et al. 2019). Cette étude utilise un indice de sensibilité côtière (ISC), qui est une mesure relative de la réponse de la géomorphologie spécifique de la zone côtière (ie : les matériaux de la côte, la pente, la présence de glace dans le sol) à deux aléas, soit le changement du niveau de la mer et les changements dans la hauteur des vagues, incluant les effets des changements de la glace de mer (Manson et al., 2019). L'étude compare la période 2006-2020 à la fin du siècle. Six variables sont catégorisées selon une échelle de sensibilité dont le pointage s'échelonne de 1 pour le moins sensible à 5 pour le plus sensible (Tableau 30).

Tableau 30. Les indices de sensibilité utilisés pour construire l'indice de sensibilité côtière (ISC) (traduit de l'anglais, d'après Manson et la., 2019)

Pointage Variables	1	2	3	4	5
Variation du niveau de la mer, 2006 à 2020 et 2006 à 2100 (en m)	≤ -0,33	- 0,32 à - 0,20	- 0,19 à 0,20	0,21 à 0,70	> 0,70
Hauteur moyenne des vagues décennales (2000 et 2090) en m	≤ 0,25	0,26 à 0,75	0,76 à 1,50	1,51 à 2,25	> 2,25
Glace dans le sol	Pergélisol n'existe pas ou glace dans le sol nulle	Nulle à faible et faible	Faible à modérée et modérée	Modérée à élevée	Élevée
Matériaux du sol	- roches intrusives - roches métamorphiques - roches volcaniques	- roches sédimentaires et volcaniques - roches sédimentaires	- Blocs et gravats avec sable et limons - Gravats et limons Sable, graviers et diamicton	- Limon épais et continu - Sableux et graviers locaux - Sable et limon mineur	- Limon et argile avec des pierres - Limon, argile et sable fin - Tourbe, boue et sédiments inorganiques mineurs

		- roche mère inconnue	- Sable, graviers et poches de sédiments plus fins - Sables, graviers et limons	- Limon stratifié, sable, argile et graviers	- Argile limoneuse fluide et limon argileux - Glace et débris morainiques mineurs
Inclinaison de la pente (en °)	> 24	12,1 à 24	5,1 à 12,0	1,1 à 5,0	≤ 1,0
Marnage (en m)	2,1 à 4,0	4,1 à 6,0	1,1 à 2,0	> 6,0	≤ 1,0

L'indice a été calculé en superposant dans un système d'information géographique, nommé CanCoast 2.0, les spécificités géophysiques et hydrodynamiques du terrain (les six variables du Tableau 30 spatialisées à différentes échelles. Différentes cartes ont été utilisées pour évaluer différentes caractéristiques de la côte par exemple, un modèle d'élévation du terrain pour connaître la topographie et la pente à l'échelle 1/50 000, une carte des surfaces géologiques à l'échelle 1/5 000 000 et la carte du pergélisol à l'échelle 1/7 500 000. Ces deux dernières sont actuellement trop anciennes et devraient être mises à jour. Les projections pour la hauteur des vagues, les glaces de mer et le *relèvement isostatique* ont été faites avec des modèles utilisant le RCP8.5 dont les sorties ont été rééchantillonnées à une échelle côtière de 50 km.

L'indice de sensibilité a ensuite été traduit en une échelle qualitative de la sensibilité de la côte (ie, sensibilité faible, modéré ou forte aux changements climatiques) plus simple à analyser.

L'avantage de CanCoast est qu'il est offert en « open source » ce qui signifie que les données du Nunavik plus à jour pourraient être ajoutées et permettre d'obtenir un ISC personnalisé pour chaque région côtière et à des échelles relativement précises de 50 km. Ainsi, pour offrir un exemple visuel de ce qui pourrait être obtenu avec des données récentes au Nunavik, nous avons cartographié la région côtière du Nunavik (Figure 7) et différentes communautés et baie Déception (Figures 6 et 8 à 17 en annexe) à partir de l'actuel CanCoast 2.0. à ces différentes échelles, nous avons superposé l'ISC aux niveaux d'eau des surcotes, sur la Figure 7 et aux niveaux d'eau des surcotes et des décotes, sur les Figures 6, et 8 à 17, pour la période 1980-2009 et pour les variations pour les deux horizons futurs.

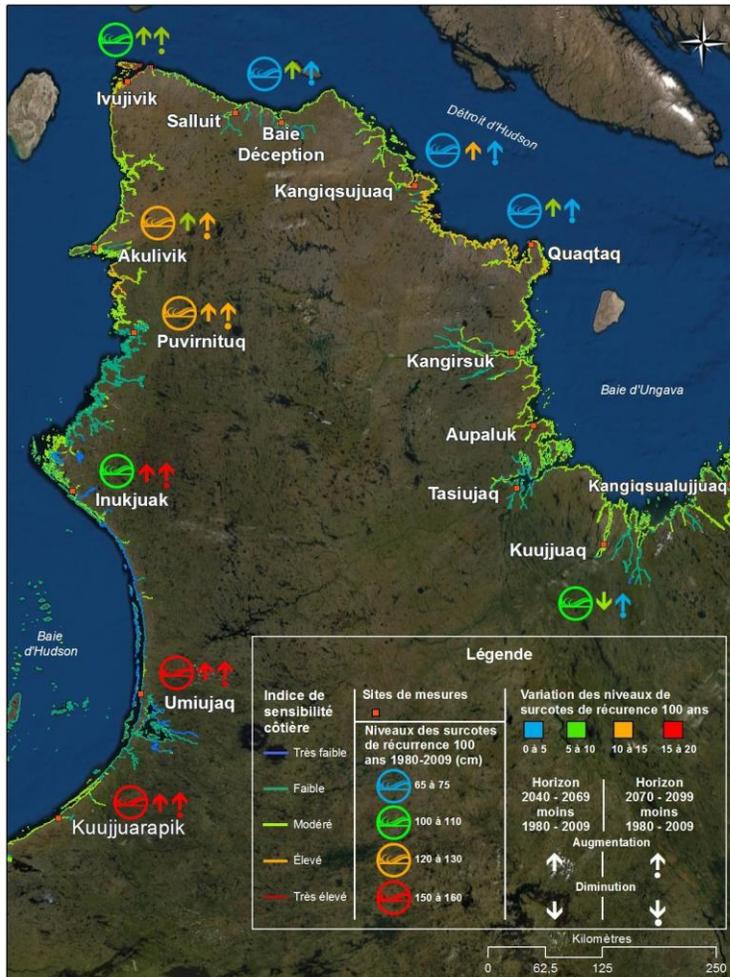


Figure 7. Indice de sensibilité côtière, niveaux des surcotes pour la période 1989-2009 et variations des surcotes pour les horizons futurs (2040-2069 et 2070-2099).

La Figure 7 pourrait être complétée en prenant soin d’y inclure les aléas hydro-climatiques (en remplacement ou en complément des variables du Tableau 30) qui sont pertinents et au fur et à mesure de l’amélioration des connaissances. Les Figures 6 et 8 à 17 pourraient aussi être complétées en introduisant des aléas plus spécifiques à chaque communauté et à leur milieu. Par exemple, dans la Baie et le détroit d’Hudson, il serait pertinent d’évaluer les fortes surcotes combinées à de fortes vagues et le *jet de rive*, tandis qu’à Quaqaq, il serait plus pertinent d’analyser des éléments reliés au couvert de glace mobile, aux vents dirigés vers la côte et aux hauts niveaux d’eau. À Aupaluk, dans la baie d’Ungava, les aléas de type hydrologique devraient être évalués avec attention car cette communauté est construite sur des dépôts sableux de plages soulevées ne dépassant pas 40 m. Par conséquent, une hauteur de surcote extrême de 1 m pourrait submerger plusieurs infrastructures construites à la base de la terrasse marine (Carbonneau et al., 2015).

3.2.2 ANALYSE SPATIALE DES ZONES À RISQUES

En procédant à l’analyse sur différentes régions ou communautés sur l’ensemble du territoire, il devient possible de cibler l’urgence d’agir sur l’occupation du territoire afin de réduire les vulnérabilités et les risques. L’utilisation des outils cartographiques peut, sans contredit, grandement faciliter un aménagement du territoire qui prend compte des risques climatiques. La superposition de plusieurs éléments d’information

spatialisés sur une carte offre un aperçu visuel pertinent de l'ensemble des connaissances hydroclimatiques des chapitres précédents.

Le chapitre 2 présente, en plus des résultats des études coordonnées par le MTQ, des éléments qu'il serait intéressant de cartographier pour toutes les communautés afin d'avoir une analyse de risques plus complète sur l'ensemble du Nunavik. Entre autres, il pourrait être pertinent de cartographier les zones à risques d'érosion en faisant un suivi de la dynamique du trait de côte (Corriveau et al., 2016). Au Nunavik, il semble que l'érosion (le recul de la ligne de côte) ait lieu sur certains rivages comme à Umiujaq, tandis que la progradation (l'avancée de la terre sur la mer) soit aussi courante pour d'autres, comme à Kuujjuarapik (Boisson, 2019). Ces phénomènes n'ont pas fait l'objet d'études approfondies pour toutes les communautés. Les zones d'inondations par submersion ont été cartographiées par L'Hérault et al. (2013) et Carboneau et al. (2015) par une ligne correspondant à l'altitude maximale du niveau de la marée projetée par les modélisations de Massée et Villeneuve (2013). C'est-à-dire que la limite inférieure de la zone littorale inondable correspond à l'altitude maximale atteinte actuellement pas les surcotes et la limite supérieure correspond à l'altitude qui risque d'être atteinte d'ici la fin du siècle (Boisson, 2019). Ces zones d'inondations ont été utilisées pour établir des cartes des aléas côtiers. Elles ont été, mises à jour par le CEN pour le MSP, par communauté et pour l'ensemble des 14 communautés du Nunavik, en présentant les zones de submersions d'après les modélisations de Massée et Gallant (2016), par exemple celles d'Akulivik, Kuujjuaq et Salluit (Allard et al., 2020a, 2020b, 2020c).

3.3 ALLER PLUS LOIN : DES OUTILS POUR LA PRISE DE DÉCISION

Cette section présente des outils, programmes et stratégies pouvant informer et inspirer les professionnels du Nunavik dans leur recherche de solutions face aux enjeux côtiers. Bien qu'elles ne soient souvent pas identifiées comme des mesures d'adaptation, plusieurs communautés arctiques posent déjà des actions concrètes pour réduire les risques que posent les aléas climatiques et leurs impacts sur les infrastructures et les environnements maritimes et côtiers. En outre, des outils déployés hors Nunavik peuvent alimenter les travaux au Québec et accroître la *résilience* de son littoral.

3.3.1 CONCEPTION ET ADAPTATION EN CONTEXTE D'INCERTITUDE : QUELQUES REPÈRES

Il a été mentionné précédemment qu'il est inadéquat de s'appuyer sur les moyennes climatiques historiques pour prendre des décisions dont la portée est locale ou régionale. Par exemple, la fréquence et l'intensité accrues des intempéries attendues dans la foulée des CC au Nunavik font en sorte que les normes de sécurité en matière de bâtiment devront être revues. Les acteurs nordiques devront forcément s'appuyer sur les projections climatiques (Ropars, 2014).

Les professionnels œuvrant au Nunavik peuvent se référer aux travaux réalisés dans le cadre de l'Initiative de normalisation des infrastructures nordiques (ININ)¹⁰ du Conseil canadien des normes (CCN). L'action de l'ININ encadre la conception, la planification et la gestion des infrastructures nordiques. Des normes spécifiques pour les environnements nordiques ont été mises au point et des vidéos de formation sont

¹⁰ <https://www.scc.ca/fr/inin>

accessibles sur leur portail d'information. Par exemple, on y trouve quatre normes pour les constructions dans les régions pergélisolées¹¹ et pour les adaptations aux conditions météorologiques extrêmes¹².

En outre, on y présente deux normes conçues par le Bureau de normalisation du Québec¹³, lesquelles ont été approuvées pour l'adaptation aux CC dans le Nord canadien. La norme *BNQ 2501-500*¹⁴ : *Études géotechniques pour les fondations de bâtiments construites dans les zones de pergélisol* et la norme *BNQ 9701-500* : *Approche basée sur le risque relativement à l'urbanisme dans les régions nordiques*, dont la publication est prévue pour 2021¹⁵. Ces documents sont des sources d'information importantes à considérer.

Le protocole sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (Comité sur la Vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP)¹⁶) est un autre outil utile dont l'application peut satisfaire les besoins nordiques. Il permet de réaliser un examen systématique des données climatiques historiques et de projeter la nature, la gravité et la probabilité d'événements climatiques futurs, de même que la *capacité d'adaptation* d'éléments d'infrastructure individuels en fonction de leur conception, de leur exploitation et de leur entretien. Il comprend une estimation de la gravité des impacts climatiques sur les composantes de l'infrastructure (c.-à-d. leur détérioration, leur endommagement ou leur destruction) afin de permettre de déterminer les composantes présentant le plus de risques. Cette information peut servir à poser des jugements techniques éclairés sur différentes composantes nécessitant une adaptation ainsi que la façon de le faire. Le protocole est disponible gratuitement en vertu d'un contrat de licence avec Ingénieurs Canada (s/d).

3.3.2 INFORMATIONS UTILES POUR LES PROFESSIONNELS ET GESTIONNAIRES MUNICIPAUX, EN AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, EN CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les acteurs nordiques en collaboration avec les autorités et le milieu académique développent déjà des outils d'aide à la décision en réponse aux défis que posent les changements climatiques pour maintenir les activités courantes et améliorer leurs capacités d'action.

En voici quelques exemples :

Le programme de recherche en ingénierie nordique, Arkuluk, offre dorénavant des solutions techniques aux problèmes de comportement des infrastructures de transport sur pergélisol instable¹⁷. De plus, un cadre d'analyse quantitative des risques des infrastructures linéaires sur pergélisol allant de propriétés géotechniques aux impacts sociaux a été développé et testé (Brooks, 2019). L'outil qui doit être perfectionné a servi à déterminer les dangers pour la route d'accès à l'aéroport de Salluit, et l'évaluation des dangers, des risques et de la rentabilité a été effectuée pour l'aéroport international d'Iqaluit.

¹¹ <https://www.scc.ca/fr/inin/les-constructions-dans-les-regions-pergelisolees>

¹² <https://www.scc.ca/fr/nisi/meteorologiques-extremes>

¹³ <https://www.bnq.qc.ca/fr/>

¹⁴ <https://www.bnq.qc.ca/fr/normalisation/genie-civil-et-infrastructures-urbaines/etudes-geotechniques-pour-les-fondations-de-batiments-construites-dans-les-zones-de-pergelisol.html>

¹⁵ <http://www.scc.ca/fr/inin/la-prise-en-compte-des-risques-changements-climatiques>

¹⁶ <https://pievc.ca/fr>

¹⁷ https://arquluk.gci.ulaval.ca/mission_et_objectifs/

PermaSim est une application pour ordinateur qui simule la profondeur et l'intensité du gel du sol et du pergélisol au Nunavik à partir de données climatiques réelles et spécifiques pour chaque communauté, pour différents types de sol et de couvert végétal. Cet outil est actuellement utilisé lors de formations préparées par l'Université Laval (professeur Michel Allard) auprès des municipalités et organismes du Nunavik et du Nunavut qui désirent améliorer leur compréhension du phénomène et leurs compétences générales.

Dernièrement, le MSP et le CEN ont déployé des efforts pour identifier les risques actuels et appréhendés sur le territoire des 14 communautés du Nunavik en fonction des changements climatiques (Allard et al, 2020 a, b, c) (voir section 3.2.2).

Smart Ice (<https://smartice.org/>) est un outil technologique développé à Terre Neuve qui a gagné plusieurs prix d'innovation, qui fournit des données sur les conditions de glace en temps réel in situ. Il permet l'implication active des communautés dans toutes les opérations du projet dans la recherche et les prises de décisions.

Par ailleurs, certains ouvrages synthèses sur l'arctique et l'environnement nordique contribuent également à nourrir les processus de planification et de décision. À cet effet, RNCAN prépare des portraits régionaux des impacts des CC et de l'adaptation à ces changements au Canada. Une des six régions portera sur le Québec¹⁸. Le réseau d'excellence ArcticNet réalise une 2^e itération de l'étude intégrée d'impact régional sur les CC pour la région du Nunavik (IRIS 4) publié par Allard et al (2012). La dernière synthèse des connaissances sur les CC d'Ouranos (2015a) offre aussi des informations pertinentes pour la région, et ce consortium, en collaboration avec ses partenaires, a aussi produit un portrait climatique régional pour la région du Nunavik afin de mieux soutenir les études de vulnérabilité et d'impacts de même que les études économiques et la recherche de solutions durables (Charron et al, 2015).

3.4 DES PISTES PROMETTEUSES EN RECHERCHE APPLIQUÉES AUX MILIEUX CÔTIERS ET MARITIMES DU NUNAVIK

Dans un processus d'adaptation, il est important d'avoir des connaissances sur les probabilités d'occurrence et d'intensité des aléas pour pouvoir faire une analyse des vulnérabilités et proposer des actions afin de diminuer les impacts. Le Chapitre 1 illustre que la recherche est confrontée aux incertitudes liées aux imprécisions des modèles qui seront certainement améliorés dans les années à venir, mais aussi d'incertitudes liées au manque de données d'observations et à la nécessité de pérenniser et d'étendre les observations sur plus de sites à caractéristiques particulières. Ainsi malgré les progrès énormes réalisés jusqu'à présent, il subsiste des lacunes qui doivent être comblées et dont les pistes en recherche sont prometteuses.

3.4.1 AMÉLIORER LES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES DU MILIEU

Cette section permet de souligner les éléments prospectifs soulevés dans les différentes études pilotées par le MTQ et ses partenaires et de proposer l'appropriation d'un système mis en place par RNCAN qui permettrait de faire progresser la recherche et le développement en milieux côtier et maritime au Nunavik.

Renforcer le réseau de stations de mesures encore embryonnaire

¹⁸ <https://www.rncan.gc.ca/le-canada-dans-un-climat-en-changement-perspectives-regionales/21093>

Le peu de données obtenues sur quelques stations ne permet pas de bien évaluer les modèles climatiques couvrant le territoire du Nunavik (Ouranos, 2015b) ni de bien calibrer le modèle de vagues qui permettrait de produire des probabilités conjointes de *niveaux d'eau extrêmes* et de fortes vagues (Savard, 2016). Il serait donc judicieux d'équiper toutes les communautés d'appareils de mesures météorologiques, marégraphiques et houlographiques, et de pérenniser ces installations sur le long terme. Voir Figure 1.

Implémenter des prévisions météorologiques au modèle de niveau d'eau

Un modèle semblable au modèle hydrodynamique 2D utilisé par Massé et Villeneuve (2013) et Massé et Gallant (2016) pour reproduire les variations des niveaux d'eau pourrait être *piloter* par des prévisions météorologiques plutôt que par des ré-analyses pour fournir aux communautés côtières et aux gestionnaires d'infrastructures des prévisions opérationnelles de niveau d'eau en temps réel.

Simuler les déplacements des tempêtes dans la Baie d'Hudson

La modélisation des tempêtes est encore balbutiante puisque de nombreux paramètres sont encore inconnus. Les études sur les tempêtes réalisées en Arctique (au-delà du 60°N) et dans les latitudes moyennes (sur l'Atlantique et le Pacifique dans les latitudes du Canada) nous renseignent sur l'amélioration des habilités des modèles climatiques et sur les façons optimales de prendre en compte les incertitudes. Cela offre des pistes intéressantes quant à certains processus qui sont aussi importants pour la baie d'Hudson mais les différences notables quant à la circulation atmosphérique, la présence ou non de glace marine ou la saisonnalité de l'activité cyclonique font en sorte que les résultats de ces études sur l'Arctique, le Pacifique et l'Atlantique sont difficilement transférables à la baie d'Hudson. Il serait essentiel de poursuivre les études dans cette région du Canada qui affecte le climat du Nunavik avec les nouveaux groupes de modèles CORDEX-NA et CMIP6 bientôt disponibles (plus de modèles y sont inclus avec des résolutions plus fines qui « voient » la baie d'Hudson) – Voir synthèse technique.

Raffiner la résolution spatiale des simulations de glaces de 10 km à 2 km, voire à plus fine échelle

Le raffinement de la résolution spatiale des simulations des variables relatives à l'océan avec le modèle océanique régional (MOR) et des simulations de glace (CICE) n'a pas été performant : la simulation reproduit une proportion trop importante de glace dans la période d'englacement et de fonte (Senneville, 2018b).

- Simuler l'ensemble du domaine de la baie d'Hudson, incluant toutes les côtes du Nunavik, à une résolution assez fine pour que les glaces de rive soient présentes, au moins 2 km de résolution.
- Développer des simulateurs de glace à haute résolution, nécessitant l'observation des glaces avec des images satellites à fines résolutions (RADARSAT, MODIS et LANDSAT) pour la validation des résultats et l'amélioration des modèles de glace utilisés à de fines échelles. Une résolution de 1 à 10 m a pu être atteinte dans l'estuaire du Saint-Laurent sur une zone de quelques km².
- Maximiser l'utilisation d'un réseau de caméras pour valider les modèles de glace. Il serait d'intérêt pour la recherche et les communautés d'ajouter de nouvelles caméras et de maintenir active celles déjà installées dans le réseau CAIMAN afin d'assurer un suivi local à l'échelle régionale.

Considérer les processus côtiers dans les études des niveaux d'eau extrêmes

De récentes études ont démontré que l'évaluation de la submersion par addition des niveaux d'eau extrêmes et de la variation anticipée du niveau marin global fournie par le GIEC, croisé avec des données topographiques ou un modèle numérique d'élévation, est insuffisante pour estimer les dommages causés par la submersion. Les niveaux réellement atteints, responsables des plus importants dommages, sont supérieurs à l'évaluation traditionnelle. Celle-ci tient compte de la récurrence de niveau d'eau et du rehaussement du niveau marin mondial mais ignore l'effet du jet de rive (Didier et al., 2019). Comme le jet de rive atteint une limite supérieure à celle d'une surcote, il serait intéressant d'évaluer aussi le jet de rive liés aux vagues dans l'estimation du *niveau d'eau total* (Dumont, communication personnelle) dans des études ultérieures.

Approfondir l'étude de certains aléas et conditions géomorphologiques

L'Hérault et al., (2017b) suggèrent d'approfondir les études sur les poussées glacielles, dont les conséquences sur la morphologie et sur les infrastructures maritimes sont encore méconnues. Ils suggèrent aussi de procéder à des levés de cartographie sous-marine dans les estuaires, les baies et les fjords qui sont des lieux importants de collecte de ressources alimentaires pour les autochtones et des sites potentiels de création ou d'expansion d'installations portuaires. Boisson (2019) propose d'approfondir l'étude des glissements subaquatiques affectant la zone littorale car ils pourraient impacter les infrastructures maritimes établies sur des argiles marines.

Améliorer la précision de la bathymétrie du domaine de la baie d'Hudson, du détroit d'Hudson et de la baie d'Ungava

La bathymétrie est mal connue dans la région d'étude et pourtant cette donnée est essentielle pour la simulation des vagues et des niveaux d'eau. Par exemple, les données bathymétriques GEBCO, SHC et DTU10 utilisées par Massé et Villeneuve (2013) contiennent chacune des approximations qui contribuent à des erreurs sur les ondes de marée (propagation des ondes de marée trop rapide dans la baie d'Hudson ou trop lente dans le détroit et la baie d'Hudson).

Améliorer la portion des côtes du Nunavik dans la base de données de CanCoast 2.0

CanCoast 2.0 est basé sur des données dites « open source », c'est-à-dire libre d'accès et gratuites. Elles peuvent être mises à jour lorsque que de nouvelles sources de données sont disponibles. Les modifications à apporter peuvent l'être sur les différentes couches d'information comme la vitesse du relèvement isostatique, les types de sols sur la côte, les conditions de glace ou de pergélisol. Toutefois, il faut noter que CanCoast étant un programme d'envergure nationale la qualité et la précision des données pour des études locales dans les communautés inuites restent très grossière.

Vers une meilleure compréhension de la dynamique côtière au Nunavik

Actuellement, l'université Laval et l'équipe de Didier (UQAR-ISMER) étudient des photographies aériennes anciennes et récentes prises entre 1960 et 2020 (Boisson et al. 2020). Ces études plus locales et précises pourraient servir à l'améliorer la compréhension de la dynamique côtière de plusieurs communautés du Nunavik.

3.4.2 Améliorer les connaissances pour une adaptation plus efficace et robuste

Améliorer la cartographie des zones à risque côtières.

Carbonneau et al. (2015) ont cartographié les zones à risque de crues de tempêtes, d'inondations, d'éboulements et d'avalanches pour huit communautés du Nunavik (Umiujaq, Inukjuak, Ivujivik, Kangiqsujuaq, Quaqtuaq, Aupaluk, Kuujuaq et Kangiqsualujuaq). Leur analyse est basée sur des observations de terrain et par un travail de photo-interprétation (photographies de 2015 et relevés LiDAR de 2010). Une mise à jour du rapport de Carbonneau et al. (2015) a été effectuée par Boisson (2019) en utilisant les niveaux maximums de *période de retour* 100 ans modélisés par Massé et Gallant (2016). Plusieurs cartes des aléas des communautés ont été conçues en 2020 pour le MSP et par le CEN (Allard et al., 2020a, 2020b et 2020c).

Améliorer la cartographie des infrastructures

Au-delà d'une analyse des zones à risques, il est aussi important de localiser les infrastructures névralgiques à l'intérieur de ces zones. Ces différentes infrastructures devraient être classées selon leur âge, leur état actuel, l'historique de l'entretien et des réparations effectuées, le type de fondations, l'intérêt stratégique privé ou public, considérer que la valeur stratégique puisse être plus importante que la valeur foncière (Larrivée, 2010).

Il est aussi important de localiser les réseaux de transports et les catégoriser selon leur longueur, leur nombre et leur type (routier, ferroviaire, portuaire, électrique, aqueduc, drainage pluvial...). Et de localiser les infrastructures d'intérêts sociaux (esthétique, récréotouristique, utilité pour la santé, pour la biodiversité...) pour éviter la perte d'accès à ces liens importants pour les populations.

Évaluer la pertinence des mesures d'adaptation

Toutes les mesures d'adaptation ne sont pas applicables à tous les endroits puisque le choix des mesures les plus appropriées dépendent de plusieurs facteurs.

Les mesures peuvent être plus ou moins contraignantes et plus ou moins coûteuses. Mais il est important de vérifier qu'elles soient les plus pertinentes selon les particularités de chaque côte. Certaines solutions d'adaptation peuvent engendrer des impacts supplémentaires ou différents des impacts que l'on cherche à éviter. Par exemple, des empierrements linéaires contribuent à la réflexion des vagues qui vont être responsables d'affouillements et de la disparition des plages (Savard et al., 2008)

Utiliser des outils d'aide à la décision

Les analyses économiques financières ou coûts-avantages (ACA) par exemple, sont utilisées pour mieux faire les liens entre les impacts physiques et les coûts socio-économiques envisagées pour contrer ces impacts. Ce type d'analyse a été abondamment utilisé dans d'autres milieux côtiers au Québec comme l'ACA des options d'adaptation réalisée en zone côtière aux îles de la Madeleine (Circé et al., 2016). Il pourrait servir d'inspiration pour le Nord.

À Salluit, une analyse financière pour l'aménagement en contexte de CC, pour le compte du ministère des Affaires municipales, de l'occupation du territoire et de l'habitation (MAMH), a été réalisée. Cette analyse financière visait à étudier le terrain et le bâti existant et les options d'aménagement du territoire pour isoler les zones d'expansion en tenant compte des CC et de leur influence notamment sur les pentes du village (Journeaux, 2011).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les connaissances intégrées dans ce document informent des résultats les plus à jour sur les observations et les tendances futures afin de mieux guider la planification des environnements nordiques et la prise de décisions.

Grâce aux efforts soutenus en recherche et développement par le MTQ et ses partenaires sur l'impact des CC sur l'environnement maritime et côtier durant la dernière décennie, des avancées significatives en matière de recherche nordique ont pu être réalisées dans plusieurs domaines d'expertises.

Des outils visuels cartographiques ont été créés pour aider le lecteur à localiser les instruments de mesure implantés au Nunavik et aussi pour voir où ont été recueillies les informations régionales sur les différents aléas hydro-climatiques (Chapitre 1). Ces contributions visuelles montrent une certaine disparité entre les communautés dans la couverture du réseau d'équipements d'acquisition de données.

Les résultats des simulations des niveaux d'eau extrêmes des ondes de tempêtes (les décotes et les surcotes) lorsqu'ils atteignent des hauteurs maximales très rares (une fois tous les 100 ans) et leurs variations pour les horizons 2040-2069 et 2070-2099 sont présentés au chapitre 2. Les cartes mensuelles de conditions de glace projetées sur les plans d'eau ceinturant le Nunavik sont compilées dans un atlas des conditions de glace (Senneville, 2018a) disponible auprès du MTQ (Chapitre 2). Les résultats sur les changements dans les processus des tempêtes à ce stade sont préliminaires et nécessiteront une attention particulière pour en dégager des tendances claires. De nouveaux résultats en lien avec les travaux de l'ISMER sur les vagues seront accessibles courant 2021.

À terme, l'acquisition de données soutenue sur les aléas hydroclimatiques permettrait de doter la région d'un portrait plus exhaustif des impacts et des risques qui s'en dégagent aujourd'hui et dans l'avenir. De plus, poursuivre les efforts déployés par les autorités jusqu'à présent vient en appui au besoin de la région de mieux coordonner l'acquisition et l'intégration de données, facilitant la gestion des risques en milieu isolé et contribuant à la mise en œuvre de solutions d'adaptation contextualisées et plus adéquates.

Ailleurs dans le monde, les littoraux doivent composer avec les impacts causés par la hausse du niveau marin relatif. Au Nunavik, à l'inverse, le relèvement isostatique compense ces effets sur l'environnement maritime où une baisse du niveau marin relatif de 40 à 90 cm pourrait être atteinte selon les communautés et le scénario considéré. Toutefois, les effets bénéfiques de cette compensation ne se feront réellement sentir qu'à la fin du XXI^e siècle. Au tournant du siècle, le milieu côtier devrait tout de même composer avec des impacts liés à la submersion et l'érosion. De plus, le territoire sera aussi affecté par le dégel du pergélisol et l'augmentation des débits des rivières.

Voici quelques faits saillants à retenir pour améliorer la protection de l'environnement et le développement côtier du territoire du Nunavik.

Le Nunavik

Les niveaux d'eau extrêmes des ondes de tempêtes pourraient s'élever ou diminuer jusqu'à ± 1 m pour les horizons 2040-2069 et 2070-2099, ce qui est très proche de l'amplitude des marées pour plusieurs communautés.

D'ici la fin du XXI^e siècle, la fréquence de ces niveaux d'eau extrêmes pourrait s'accroître si le réchauffement climatique continue de s'emballer.

La période pendant laquelle ces niveaux d'eau extrêmes pourraient être plus fréquents, pourrait s'étendre dans l'année.

Les glaces pourraient se former de plus en plus tard en automne et fondre de plus en plus tôt au printemps, conduisant à une période de couverture partielle de glace plus longue de plus de six semaines d'ici 2040-2070 et de plus de deux mois d'ici 2070-2100. La probabilité d'érosion par les glaces serait alors plus élevée.

La baie d'Hudson

Les augmentations des températures et l'accroissement des précipitations totales hivernales pourraient y être plus marquées.

Les décotes extrêmes pourraient abaisser le niveau d'eau minimum de 70 cm à 1 m à l'horizon 2040-2069 et de 80 cm à 1,1 m à l'horizon 2070-2099. Les décotes hivernales pourraient avoir lieu plus souvent en début d'hiver et au mois de mars. Les surcotes extrêmes de période de retour 100 ans pourraient atteindre de 10 à 20 cm de plus qu'entre 1989 et 2009. Elles pourraient avoir lieu encore plus souvent en automne.

La présence de glace a déjà diminué de plus de 10 % entre 1968 et 2010. De plus, le couvert de glace est appelé à quasi disparaître (10%) entre Ivujivik et Inukjuaq à l'horizon 2040-2070.

Le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava

Il est anticipé que les ondes de tempêtes (surcotes comme décotes) pourraient être strictement inférieures à 1 m. Ainsi, les risques associés aux surcotes sont faibles et ceux reliés aux décotes sont très faibles.

Les concentrations de glace, au mois de décembre pourraient diminuer de 40% à 60% sur les littoraux d'Ivujivik à Kangiqsualujjuaq à l'horizon 2040-2070.

Comme l'Arctique se réchauffe deux fois plus vite que le reste de la planète, il faut s'attendre à ce que les impacts prévus y surviennent plus rapidement. Une des façons de diminuer les conséquences graves de ces impacts au Nunavik est de réduire la vulnérabilité de l'environnement naturel, des infrastructures et des communautés. Plusieurs moyens existent déjà pour améliorer les compétences des parties prenantes, accroître leur pouvoir d'agir ou la capacité des intervenants à poser des actions concrètes pour les réduire. Par exemple, en appliquant les normes de construction spécifiques aux réalités du Nunavik (norme BNQ 2501-500 pour la fondation de bâtiments construits sur pergélisol) ou le protocole sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (<https://pievc.ca/fr>) qui permet notamment d'estimer la capacité d'adaptation des composantes d'une infrastructure aux CC. Des programmes d'ingénierie nordique (<https://arquluk.gci.ulaval.ca/>) et des ouvrages synthèses sur les environnements nordiques publiés par Arctinet, le CEN, RNCAN et Ouranos contribuent également à nourrir les processus de planification et de décision.

S'il est conseillé aux décideurs de prendre des décisions éclairées en se basant sur des connaissances scientifiques à jour, il reste que celles-ci demeurent incomplètes au Nunavik et que des décisions doivent être prises pour protéger les côtes et les habitants sans toutefois posséder toutes les réponses.

Il existe plusieurs pistes de recherche prometteuses pour améliorer les connaissances scientifiques des aléas et pour rendre le processus d'adaptation plus efficace et robuste. Cet outil synthèse peut être complété en consultant la synthèse technique qui fournit des informations sur les processus et méthodes de collectes de données et de modélisation. Les connaissances présentées dans les chapitres précédents sont aussi disponibles en format plus vulgarisé de style affiche ou conférences ciblées.

GLOSSAIRE

Adaptation : L'adaptation est un changement dans les comportements et les caractéristiques d'un système de manière à pouvoir composer avec une nouvelle situation spécifique. L'adaptation aux changements climatiques fait référence aux ajustements qui sont mis en place spécialement pour composer avec un climat en évolution rapide.

Aléa : Éventualité d'un phénomène naturel ou anthropique susceptible d'entraîner des pertes en vies humaines, des blessures ou autres effets sur la santé, ainsi que des dégâts et des pertes touchant les biens, les infrastructures, les moyens de subsistance, la fourniture des services, les écosystèmes et les ressources environnementales.

Baromètre inverse : Réponse de l'océan à la pression atmosphérique qui résulte soit d'une élévation du niveau de la mer au centre d'une basse pression (tempête) soit d'une baisse du niveau de la mer au centre d'une haute pression (anticyclone).

Capacité d'adaptation : Capacité de systèmes (toutes les possibilités, les ressources et les institutions d'un pays, d'une région, d'une collectivité ou d'un groupe d'humains) à mettre en œuvre des mesures d'adaptation aux changements climatiques y compris la variabilité et les extrêmes du climat, à ajuster les dommages potentiels et tirer avantage des opportunités ou de répondre aux conséquences.

Courants de flot : Mouvement horizontal de l'eau correspondant à la marée montante. Les courants de flot portent généralement, selon le cas, vers la côte ou dans la direction de propagation de l'onde marée. On dit aussi flot.

Courants de jusant : Mouvement horizontal de l'eau correspondant à la marée descendante. Les courants de jusant portent généralement, selon le cas, vers le large ou dans la direction opposée à celle de la propagation de l'onde de marée. On dit aussi jusant, ou courant de reflux.

Décote : Hauteur d'eau mesurée ou observée localement, inférieure au niveau de la mer moyen quotidien (ou niveau 0 m) au même instant due à la présence d'une tempête

Fetch : La distance horizontale d'eau libre parcourue par le vent dans une direction principale et de façon constante sans rencontrer d'obstacles, générant des vagues. Son intensité, varie avec la direction du vent. Plus le fetch est long, plus le transfert d'énergie aux vagues est important. On utilise aussi longueur de fetch.

Gélifraction : Processus d'érosion qui se produit dans les régions froides sujettes à l'englacement. De l'eau liquide s'infiltré dans la craque d'une roche et gèle lorsque la température chute. La glace prenant plus de volume, elle finit par élargir la craque. Le processus se poursuit, suivant les cycles de gel/ dégel jusqu'à ce que, à long terme, la roche éclate et soit transportée ailleurs par le vent et l'eau.

Glace de mer : Toute forme de glace trouvée en mer qui résulte du gel de l'eau de mer

Glace de rive : Glace de mer ancrée sur la rive ou au fond de l'océan et qui ne se déplace ni par le vent ni par les courants marins.

Impact : Effets sur les écosystèmes naturels (impacts physiques : inondations, sécheresse, élévation du niveau de la mer) et les systèmes humains (impacts humains : effets sur la vie des personnes, les modes de subsistance, la santé, le patrimoine économique, social et culturel, les services et les infrastructures) des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes et des changements climatiques, au cours d'une période donnée. Le terme impact peut aussi être utilisé comme conséquence et incidence.

Jet de rive : La masse d'eau projetée sur un rivage vers le haut d'un estran par le déferlement des vagues. Sa hauteur maximale dépend de la période et de la hauteur significative des vagues et l'inclinaison de la plage sur laquelle celles-ci déferlent. L'altitude maximale atteinte par le jet de rive est le run-up.

Marée : Mouvement périodique de montée (marée haute) et descente (marée basse) de la surface des océans, des baies etc., du principalement par les interactions entre la Lune, le Soleil et la Terre.

Marée morte-eau : Marée de faible marnage se produisant lorsque la Lune est proche du premier et du dernier quartier. On dit aussi morte-eau.

Marée de vive-eau : Marée de fort marnage se produisant aux époques de pleine lune et de nouvelle lune. On dit aussi vive-eau.

Marnage : Le marnage est, pour un jour donné, la différence entre la distance verticale entre les limites consécutives des hauts et bas niveaux d'eau. Il est inclus entre les périodes de vive-eau (marnage maximal) et de morte- eau (marnage minimal). On parle aussi d'amplitude des marées.

Niveaux d'eau extrêmes : Niveaux d'eau qui n'ont qu'une très faible récurrence. Ces niveaux correspondent souvent à l'occurrence simultanée à un endroit donné d'une marée de vive-eau et d'une surcote de tempête (lié à une onde de tempête) avec des vents dirigés vers la côte. Ils sont beaucoup plus hauts que la moyenne annuelle du niveau marin relatif.

Niveau d'eau total : Total du niveau d'eau observé qui est la somme de la marée, de la surcote de tempête, de la surcote liée aux vagues et du jet de rive.

Niveaux marin relatif et absolu : Sur la côte, le niveau marin relatif est mesuré par rapport à un point fixe sur la rive. Au Canada et au Nunavik en particulier le relèvement isostatique joue un rôle essentiel dans le changement du niveau relatif de la mer car il compense la hausse du niveau moyen des océans.

Onde de tempêtes : Élévation locale et anormale du niveau de la mer, d'une durée de quelques heures à quelques jours, provoquée par une action violente du vent sur la surface de la mer et/ou par la baisse de la pression atmosphérique (lors de la présence d'une tempête). L'onde de tempête peut être plus sévère si elle a lieu en même temps qu'une marée haute. On dit aussi marée de tempête. Une onde de tempête se décompose en surcote et décote.

Période de retour : Période de temps entre deux occurrences d'un phénomène. C'est l'inverse de la récurrence. Une période de retour de 100 ans (ou centennale) indique que le phénomène considéré a 1 chance sur 100, chaque année de se produire. Si la période de retour diminue (50 ans, ou 30 ans) c'est que le phénomène revient ou se répète plus souvent.

Piloter un modèle régional climatique (MRC) : Fournir à un modèle régional de climat (MRC) dont les grilles de calcul sont spatialement limitées (45 km ou moins), des valeurs de variables issues d'un modèle climatique global (MCG) ou de réanalyses, à ses frontières ainsi qu'à la surface des océans. Les valeurs aux frontières se combinent graduellement d'une large échelle à une plus fine à chacun de ses pas de temps. Ainsi, la simulation produite régionalement par un MRC reste cohérente avec le climat planétaire.

Projection climatique : Réponse simulée du système climatique à un scénario futur d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols, obtenue à l'aide de modèles climatiques. Les projections climatiques sont fonction des scénarios d'émissions, de concentration ou de forçage radiatif utilisés, qui reposent sur des hypothèses concernant, par exemple, l'évolution socio-économique et technologique à venir, ces hypothèses pouvant se réaliser ou non. Une projection climatique n'est pas une prévision climatique.

Réanalyse : Méthode d'analyse, pour l'atmosphère et l'océan, de la température, du vent, des courants et d'autres grandeurs météorologiques et océanographiques, fondée sur le traitement de données météorologiques et océanographiques passées des modèles de prévision du temps et des dernières

techniques d'assimilation des données. La continuité temporelle des réanalyses s'est améliorée, mais des incertitudes spatiales à l'échelle du globe persistent à cause des irrégularités d'implantation et des imperfections des systèmes d'observation.

Récurrence : C'est la probabilité (la fréquence ou le nombre de répétitions) qu'un phénomène se produise ou soit dépassé au cours d'une année donnée. Une récurrence de 0,01 indique que le phénomène considéré a 0,01 chance de se produire chaque année.

Relèvement isostatique : Dans la majeure partie du Canada, il est la principale source de déplacement vertical des terres. La fonte, pendant et après la déglaciation, des gros inlandsis dont le poids tenait enfoncé presque toutes les terres du Canada où ils se trouvaient, a retiré la pression qu'ils exerçaient et les terres ont commencé à se relever. L'échelle temporelle de réaction de la Terre étant de milliers d'années, il se poursuit aujourd'hui, des milliers d'années après la déglaciation. On dit aussi ajustement isostatique glaciaire (AIG) ou relèvement postglaciaire.

Résilience : C'est la capacité des systèmes sociaux, économiques ou environnementaux de se réorganiser, de s'adapter face à une perturbation ou un événement dangereux, facteurs de stress ou de choc, en se rétablissant des dommages par un retour à leur état d'équilibre d'avant la perturbation, en conservant leur fonction essentielle, leur identité et leur structure.

Risque : C'est la probabilité qu'un événement dangereux (aléas) aient des conséquences (impacts) sur quelque chose ayant une valeur. Il est plus ou moins important selon la récurrence d'aléas et la vulnérabilité des éléments exposés que viennent amplifier les impacts des aléas.

Série temporelle : Une série temporelle de données d'observations ou simulées est une suite de données régulières qui permettent d'établir une tendance dans le temps.

Submersion : C'est une inondation par la mer, d'une région côtière, au-delà du niveau prévu de la marée haute en milieu naturel ou, en milieu artificialisé, au-delà de la hauteur de la première ligne de structures de protection côtière.

Surcote de tempête : Hauteur d'eau mesurée ou observée localement, supérieure au niveau de la mer moyen quotidien (ou niveau 0 m) au même instant due à la présence d'une tempête.

Trajectoires de concentration représentative (Profils représentatifs d'évolution de concentration) : Scénarios climatiques comprenant les séries chronologiques des émissions et des concentrations de l'ensemble des gaz à effet de serre (GES) et aérosols, et des gaz chimiquement actifs, ainsi que de données d'utilisation des terres et des types de couverture terrestre. Ils sont dits représentatifs dans la mesure où ils font partie d'un ensemble de scénarios distincts possibles conduisant à un forçage radiatif aux caractéristiques similaires. Le terme profil d'évolution souligne les niveaux de concentration atteints à long terme, mais aussi la trajectoire suivie pour parvenir à ce résultat.

Vulnérabilité : Désigne à quel point un système est sensible aux effets nuisibles du changement climatique et est incapable de les absorber. La vulnérabilité est une fonction de la localisation du système, de la nature, de la magnitude et du taux de changement auquel le système est soumis, ainsi que de sa sensibilité et sa capacité d'adaptation.

RÉFÉRENCES

- Akperov M., Rinke A., Mokhov I. I., Semenov V. A., Parfenova M. R., Matthes H., Adakudlu M., Boberg F., Christensen J. H. Demitskaya M. A. Dethloff K., Fettweis X., Gutjahr O., Heinemann G., Koenig T., Koldunov N. V. Laprise R., Mottram R., Nikiéma O., Sein D., Sobolowski S., Winger K, Zhang W. (2019). « Future projections of cyclone activity in the Arctic for the 21s century from regional climate models (Arctic-CORDEX) ». *Global and Planetary Change*. 182. 103005.
- Allard M., Aubé-Michaud, S., L'Hérault, E., Mathon-Dufour, V., Deslauriers, C. et Chiasson, A., (2020a). « Identification des risques actuels et appréhendés sur le territoire des communautés du Nunavik en fonction des changements climatiques – phase 2 : Document synthèse, communauté d'Akulivik ». Rapport final réalisé pour le compte du ministère de la Sécurité publique (gouvernement du Québec), Centre d'études nordiques, Université Laval, 63 p.
- Allard M., Aubé-Michaud, S., L'Hérault, E., Mathon-Dufour, V., Deslauriers, C. et Chiasson, A., (2020b). « Identification des risques actuels et appréhendés sur le territoire des communautés du Nunavik en fonction des changements climatiques – phase 2: Document synthèse, communauté de Kuujuaq ». Rapport final réalisé pour le compte du ministère de la Sécurité publique (gouvernement du Québec), Centre d'études nordiques, Université Laval, 67 p.
- Allard M., Aubé-Michaud, S., L'Hérault, E., Mathon-Dufour, V., Deslauriers, C. et Chiasson, A., (2020c). « Identification des risques actuels et appréhendés sur le territoire des communautés du Nunavik en fonction des changements climatiques – phase 2 : Document synthèse, communauté de Salluit ». Rapport final réalisé pour le compte du Ministère de la Sécurité publique (gouvernement du Québec), Centre d'études nordiques, Université Laval, 74 p.
- Allard M., Lemay M., Barrett M., Sheldon T. et Brown R. (2012). « De la science aux politiques publiques au Nunavik et au Nunatsiavut : synthèse et recommandations – une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation ». Dans Allard M. et M. Lemay (Éd), *Nunavik and Nunatsiavut : From science to policy. An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of climate change and modernization*. ArcticNet Inc., Québec, Cana, 72 pages.
- Allard M., L'Hérault E., Gibéryen T. et Barrette C. (2010). « L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte de pergélisol au communauté de Salluit, Nunavik ». Rapport final : S'adapter et croître.
- Allard, M. et Lemay, M. (2013). « Le Nunavik et le Nunatsiavut : de la science aux politiques publiques ».
- Atkinson, D.E., D.L. Forbes et T.S. James. (2016). « Un littoral dynamique dans un contexte de climat en mutation », Chapitre 2 dans *Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, T.S. James et C. Mercer Clarke (éd.); Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), p. 27–68.
- Bernier, M., Gignac, C., Chokmani, K., Poulin, J. et Y. Gauthier (2016). « Un atlas interactif sur la probabilité de l'aléa glace à l'échelle des infrastructures maritimes et côtières dans un contexte de changements climatiques ». Rapport final. Québec, INRS, 62 pages.
- Bernier M., Poulin J., Ratsimbazafy T, Gauthier Y. et D. Éthier. (2019). « Suivi des conditions de glaces de rive et de vagues à l'aide de caméras et d'imagerie satellitaire à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtqaq et Aupaluk (2017-2020) ». Rapport d'étape 2 remis au Bureau de la coordination du Nord-du-Québec, Ministère des Transports du Québec, INRS R1852, 28 février 2019, 72 pages.
- Bernier, M., Poulin, J., Gauthier, Y., Gignac, C. (2017). « Suivi des conditions de glaces de rives à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Kuujuarapik, Umiujaq,

- Ivujivik, Baie Déception, Quaqtq et Aupaluk ». Rapport final réalisé pour le compte du Ministère des Transports du Québec. Institut national de la recherche scientifique, Québec, 155 pages.
- Bleau, S. (2012). « Étude du comportement des glaces dans un environnement subarctique en régime macrotidal, estuaire de la rivière Koksoak, Nunavik ». Mémoire pour l'obtention du grade M. Sc. Sciences de l'eau. INRS, centre Eau, Terre, Environnement (M-1341). 235 pages. Directrice : M. Bernier, Codirecteur : M. Allard.
- Boisson A., Didier D., Allard M., Bélanger A., Bernatchez P., 2020. Towards a better understanding of Nunavik's coastal dynamics. Arctic Change 2020, Comes to you!, December 7-10, 2020
- Boisson A. (2019). « Caractérisation et modèles d'évolution des environnements côtiers du Nunavik », Thèse de doctorat en sciences géographiques, Université Laval, Québec, Canada, 267 pages.
- Boyer-Villemare U. (2016). « Évaluation intégrée de la vulnérabilité des communautés côtières faisant face aux aléas naturels dans un contexte de changements climatiques : les cas d'Avignon (Canada), Kilkeel (Royaume-Uni) et Chipiona (Espagne) ». Thèse de doctorat en sciences de l'environnement, UQAR.
- Boyer-Villemare U., Savard J.-P. et Roy P. (2016) « Évaluation des niveaux d'eau extrêmes causant des dommages de submersion en zone côtière au Québec ». Ouranos, Montréal. 30 pages.
- Brooks, H. (2019). « Quantitative Risk Analysis for Linear Infrastructure Supported by Permafrost: Methodology and Computer Program ». Thèse de doctorat génie civil, Université Laval, 434 pages. Consulté sur https://arquluk.gci.ulaval.ca/publications_et_documents/theses_et_memoires/.
- Bush, E. et Lemmen, D.S., éditeurs : « Rapport sur le climat changeant du Canada », gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 2019, 446 pages.
- Carbonneau, A.-S., L'Hérault, E., Aubé-Michaud, S., Taillefer, M., Ducharme, M.-A., Pelletier, M., & Allard, M. (2015). « Production de cartes des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour huit communautés du Nunavik ». Rapport final. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 127 pages.
- Charron, I. (2015). « Élaboration du portrait climatique régional du Nunavik », Ouranos, Montréal, 86 pages.
- Charron, I. (2016). « Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation », Édition 2016. Ouranos, 94 pages.
- Circé, M., Da Silva, L., Duff, G., Boyer-Villemare, U., Corbeil, S., Desjarlais, C., Morneau F. (2016) « Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la Madeleine ». Ouranos, Montréal. 174 pages et annexes
- Clerc, C., Poulin, J., Gauthier, Y., Bernier, M., Bleau, S., Gignac, C., Bédard, J.S., & Duhamel-Beaudry, E. (2012). « Descripteurs et indicateurs de la couverture glacielle au Nunavik: Quaqtq, Umiujaq et Kuujjuaq ». Rapport de recherche n° R1389 remis au ministère des Transports du Québec, au Consortium Ouranos et au ministère des Affaires autochtones et Développement du Nord Canada. Institut national de la recherche scientifique, 186 pages.
- Clerc, C., M. Gagnon, K. Breton-Honeyman, M. Tremblay, S. Bleau, Y. Gauthier, S. Aloupa, A. Kasudluak, C. Furgal, M. Bernier et M. Barrett (2011). « Changements climatiques et infrastructures marines au Nunavik - Connaissances locales et point de vue des communautés de Quaqtq, Umiujaq et Kuujjuaq ». Québec, INRS - Centre Eau Terre Environnement, ix, 144 pages. (Rapport de recherche; 1273f).
- Comtois, C., Slack, B., Champagne-Gélinas, A., Savard, S. et Lagacé, M. (2020) « Transport maritime au Nunavik: Vulnérabilité, opportunités et défis d'adaptation », Rapport interne au Bureau de la coordination du Nord-du-

- Québec, Ministère des Transports du Québec, Rouyn-Noranda: Ministère des Transports du Québec, - non public, 332 p.
- Corriveau, M., Fraser, C., Caron, T., Bernatchez, P., Buffin-Bélanger, T. Van-Wiersts, S., (2016). « Étude de la dynamique morphosédimentaire des côtes basses sablonneuses en bordure de la route 138 sur la Côte-Nord du Saint-Laurent en contexte de changements climatiques » : Rapport final. Projet X016.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère des Transports du Québec, Mars 2016, 421 p. + annexes.
- Derksen, C., Smith, S.L., Sharp, M., Brown, L., Howell, S., Copland, L., Mueller, D.R., Gauthier, Y., Fletcher, C.G., Tivy, A., Bernier, M., Bourgeois, J., Brown, R., Burn, C.R., Duguay, C., Kushner, P., Langlois, A., Lewkowicz, A.G., Royer, A. et Walker, A. (2012). « Variability and change in the Canadian cryosphere ». *Climatic Change*, 115(1), 59-88. doi:10.1007/s10584-012-0470-0.
- Didier D., Bandet M., Bernatchez P., Dumont D. (2019). « Modelling Coastal flood propagation under sea level rise: a case study in Maria, Eastern Canada ». *Geosciences*, 9, 76, doi:10.3390/geosciences9020076.
- Ford, J.D., T. Bell et N.J. Couture. (2016) « Perspectives relatives à la région de la côte Nord du Canada », Chapitre 5 dans *Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, T.S. James et C.S.L. Mercer Clarke (éd.); Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), p. 153–208.
- GIEC, (2013), « Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat » [sous la direction de Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique.
- GIEC, (2014) « Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat » [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 pages.
- Hill P.R., Meulé S. et Longuépée H. (2003). « Combined-flow processes and sedimentary structures on the shoreface of the wave-dominated Grande-rivière-de-la-Baleine delta. » *Journal of Sedimentary Research*, 73(2) : 217-226.
- Ingénieurs Canada, Bureau canadien des conditions d'admission en génie, (s/d). « Principes d'adaptation aux changements climatiques à l'intention des ingénieurs », 40 pages. <https://engineerscanada.ca/sites/default/files/Principes-adaptation-changement-climatique.pdf>
- Institut de la statistique du Québec (ISQ). (2019). « Le bilan démographique du Québec, Édition 2019 », [En ligne], Québec, L'Institut, 180 pages. <https://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/bilan2019.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2019). « Summary for policymakers ». Dans : *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. [H. O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, M. Weyer (eds.)]. In Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). « Annex II: Glossary [Mach, K.J., S. Planton and C. von Stechow (eds.)]. In: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* » [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 117-130.
- James T. S., Henton J. A., Leonard L. J., Darlington A., Forbes D. L., et Craymer, M. (2014) « Relative Sea-level Projections in Canada and the Adjacent Mainland United States », *GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA - OPEN FILE 7737*-. doi: 10.4095/295574.

- Joly, S., S. Senneville, D. Caya et F. Saucier (2011). « Sensitivity of Hudson Bay Sea ice and ocean climate to atmospheric temperature forcing ». *Climate Dynamics*, 36(9) :1835-1849. DOI: 10.1007/s00382-009-0731-4
- Journeaux N. (2011). « Analyse technique et financière du plan d'aménagement du village de Salluit et recommandations sur la réalisation d'études géotechniques au Nunavik ». Rapport noL-10-1398-Rév.4. Affaires municipales, Régions et Occupation du territoire. Québec. 56 pages.
- Larrivée C., (2010). « Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. Guide destiné au milieu municipal québécois », Ouranos, Montréal (Québec), 48 pages.
- Lemmen, D.S., F.J. Warren et C.S.L. Mercer Clarke. (2016) « Introduction », dans *Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat*, (éd.), D.S. Lemmen, F.J. Warren, T.S. James et C.S.L. Mercer Clarke, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), p.17–26.
- L'Hérault E., Allard M., Fortier D., Carbonneau A-S., Doyon-Robitaille J., Lachance M-P., Ducharme M-A., Larrivée K., Grandmont K., Lemieux C. (2013). « Production de cartes prédictives des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik ». Rapport final. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 90 pages.
- L'Hérault, E., Boisson, A., Allard, M., Aubé-Michaud, S, Sarrazin, D., Roger, J. et C. Barrette (2017a). « Détermination et analyse des vulnérabilités du Nunavik en fonction des composantes environnementales et des processus physiques naturels liés au climat ». Rapport final. Réalisé pour le compte du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Gouvernement du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval, 160 pages.
- L'Hérault E., Boisson A., Allard M., Aubé-Michaud S., Sarrazin D., Roger J. et Barette C. (2017b). « Répartition spatiale des aléas naturels recensés au Nunavik ». Centre d'études nordiques, échelle 1 : 3 350 000.
- Logan, T., I. Charron, D. Chaumont et D. Houle. (2011). « Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise ». Ouranos et MRNF. 55 pages +annexes.
- Manson, G. K., Couture N. J. et T. S. James, (2019). « CanCoast 2.0 : data and indices to describe the sensitivity of Canada's marine coasts to changing climate ». Geological Survey of Canada, Open File 8551, 18 + ii p. <https://doi.org/10.4095/314669>
- Massé, A. et M. Villeneuve (2013). « Infrastructures maritimes du Nunavik – Modélisation numérique des marées et des ondes de tempête dans la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava ». Rapport présenté à Ouranos, Le Groupe-Conseil LaSalle Inc., 45 pages. + annexes.
- Massé, A. et N. Gallant (2016). « Marée et ondes de tempêtes dans la baie d'Hudson, la baie James, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava – Modélisation numérique des niveaux d'eau actuels et futurs dus aux changements climatiques ». Rapport présenté à Ouranos, LaSalle NHC, Montréal, 31 pages. + annexes.
- Ministère des Transports du Québec (MTQ) (2011). « Projet de recherche visant à évaluer l'impact des changements climatiques sur les infrastructures maritimes du Nunavik et à déterminer les solutions d'adaptation ». Programme de travail – Transports Québec. 24 pages.
- Morin, M., (2008a). « Approches et principes en sécurité civile. Ministère de la Sécurité publique ». ISBN 978-2-550-54256-8. 70 pages
- Morin, M., (2008b). « Concepts de base en sécurité civile. Ministère de la Sécurité publique ». ISBN 978-2-550-54254-4. 60 pages.
- Neumeier U., Joly S., Collin S., (2019), « Suivi, analyse et modélisation des conditions de vagues en milieu côtier au Nunavik en fonction des conditions de glace dans un contexte de changements climatiques ». Projet de

- recherche CC16.1. Rapport d'étape 1 : Rapport produit pour le compte du Bureau de la coordination du Nord-du-Québec, Ministère des Transports du Québec. Février 2019. Uqar- ISMER. 45 pages.
- Ouranos (2015a). « Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec ». Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos, 114 pages.
- Ouranos (2015b). « Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 2 : Vulnérabilités, impacts et adaptation aux changements climatiques ». Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos, 234 pages.
- Ouranos (2015c). « Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 3 : Vers la mise en œuvre de l'adaptation ». Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos. 49 pages.
- Pêches et océans (2019) Tables de marées et courants du Canada. Service hydrographique du Canada, Ottawa.
- Poulin, J., Bernier, M., Ratsimbazafy, T. (2018). « Suivi des conditions des glaces de rive et de vagues à l'aide de caméras et d'imagerie satellitaire à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques: Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtq et Aupaluk (2017-2020) ». Rapport d'étape no. 1 réalisé pour le compte du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec. Institut national de la recherche scientifique, Québec, 59 pages.
- Ropars, Y. (2014). « Étude sur la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik aux niveaux d'eau extrêmes en conditions de changement climatique ». Rapport remis au Ministère des Transports du Québec, CIMA +, 45 pages. + annexes.
- Savard, J.-P. (2016). « Impacts des changements climatiques sur le régime des tempêtes et les niveaux d'eau dans la baie d'Hudson, la baie James et le détroit d'Hudson ». Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, Montréal, Ouranos.
- Savard, J.-P., van Proosdij, D. et O'Carroll, S. (2016). « Perspectives relatives à la région de la côte Est du Canada », dans Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat, D.S. Lemmen, F.J. Warren, T.S. James et C.S.L. Mercer Clarke (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) p. 99–152.
- Savard, J.-P., Gachon P., Rosu C., Aider R., Martin P., et C. Saad. (2014) « Impact des changements climatiques sur le régime des tempêtes, les niveaux d'eau et les vagues dans le Nunavik », Consortium Ouranos. Rapport d'étude pour le MTQ. Octobre 2014, 109 pages.
- Savard J-P, Bernatchez P., Morneau F., Saucier F., Gachon P., Senneville S., Fraser C., Jolivet Y. (2008). « Étude de la sensibilité des côtes et de la vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques ». Rapport synthèse. Éd : Ouranos. 58 pages. ISBN : 978-2-923292-02-1.
- Senneville, S. (2018a). « Atlas mensuel climatique de la concentration et épaisseur de glace au Nunavik ». (Annexe rapport finale MTQ, projet CC05.1) 74 pages.
- Senneville, S. (2018b). « Modélisation des glaces de rive à fine échelle à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik en contexte de changements climatiques : Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception Quaqtq et Aupaluk ». Rapport final remis au Bureau de la coordination du Nord du Québec, Ministère des Transports du Québec. Projet CC05.1. 15 octobre 2018. 67 pages.
- Senneville, S. et S. St-Onge Drouin (2013), Étude de la variation des glaces dans le système couplé océan-glace de mer de la baie d'Hudson, Rapport final remis au Ministère des Transports du Québec et au Consortium Ouranos, 109 pages.

Shah, C., Ford J., Labbé J., Flynn M. (2018) Rapport final : Adaptation policy and practice in Nunavik, Rapport final remis au Consortium Ouranos, Université McGill, 80 pages.

ANNEXE – CARTES DE SENSIBILITÉ DES CÔTES ET DES NIVEAUX D’EAU PAR SITE D’ÉTUDE

MISE EN GARDE SUR LES CARTES SUIVANTES :

l’Indice de sensibilité côtière utilisé ici ne doit pas être considéré pour prendre des décisions d’aménagement puisque les données sous-jacentes sont issues d’une base de données à échelle très petite (donc imprécise pour l’échelle de la communauté) telle que préciser dans le chapitre 3. Ces cartes sont fournies à titre indicatif pour montrer un des axes de recherche possible permettant d’avancer la connaissance des environnements côtiers.

Umiujaq et les changements climatiques

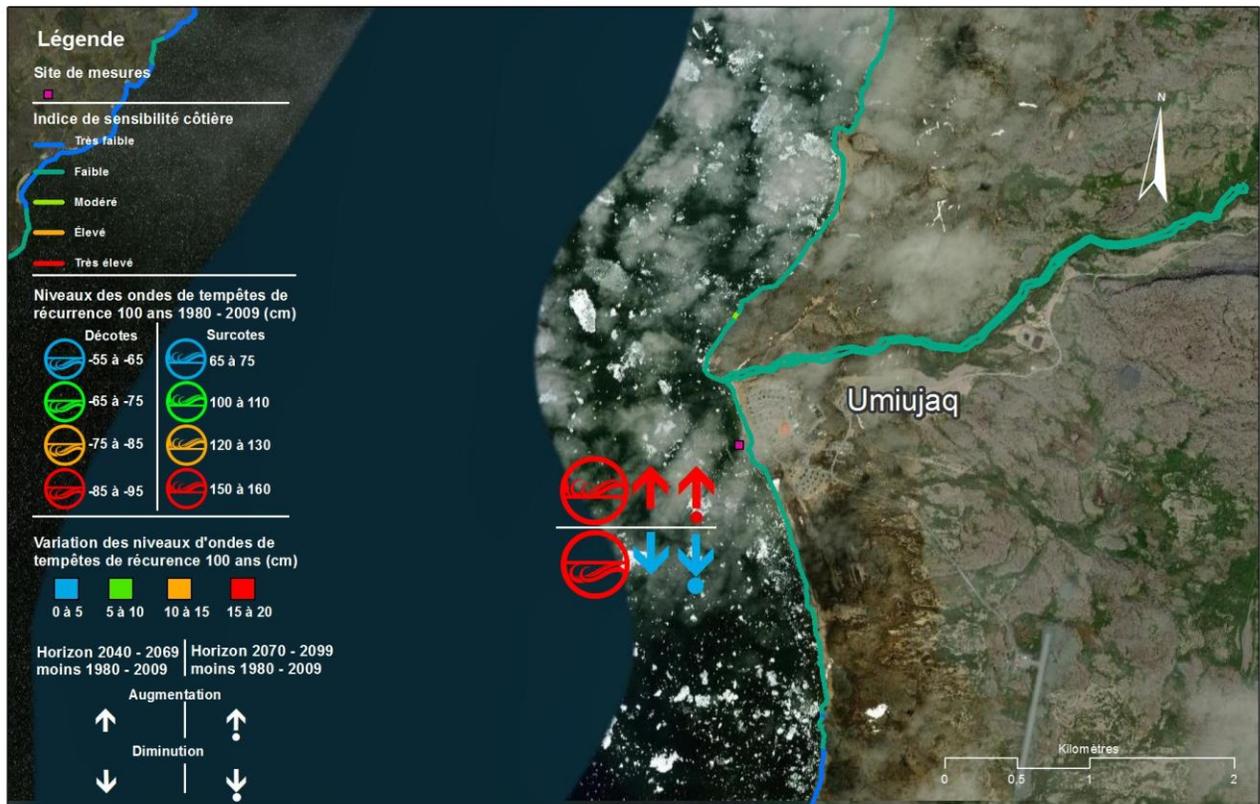


Figure 8. Sensibilité côtière de la communauté de Umiujaq aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099)

Inukjuak et les changements climatiques



Figure 9. Sensibilité côtière de la communauté de Inukjuak aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099

Puvirnituk et les changements climatiques

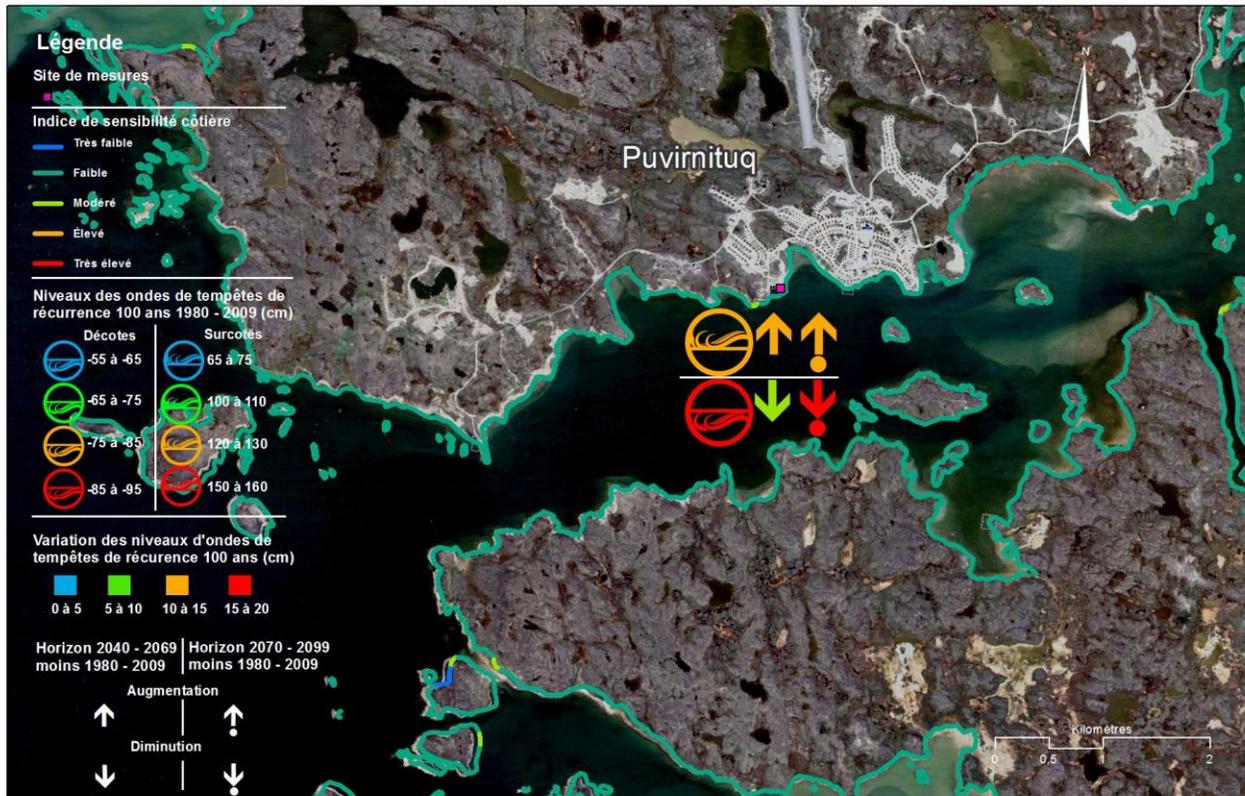


Figure 10. Sensibilité côtière de la communauté de Puvirnituk aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099

Akulivik et les changements climatiques

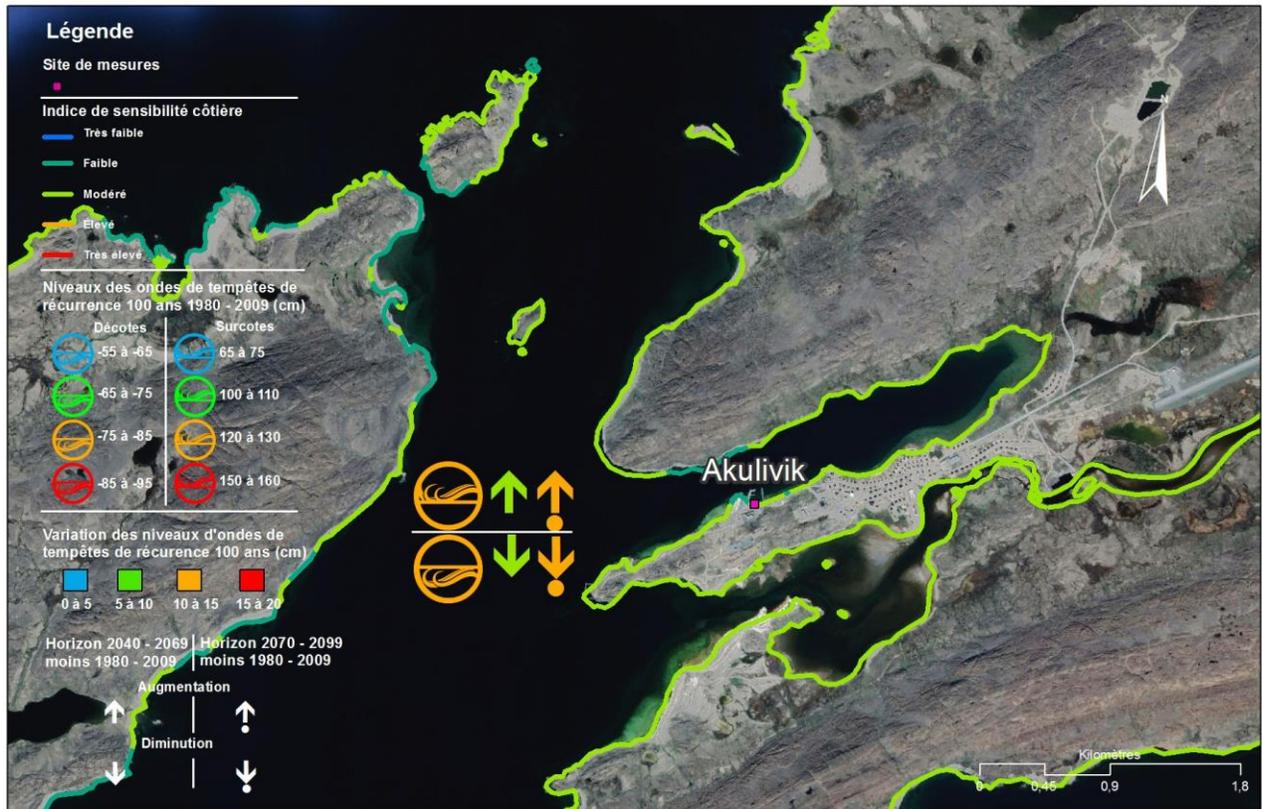


Figure 11. Sensibilité côtière de la communauté de Akulivik aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099

Ivujivik et les changements climatiques

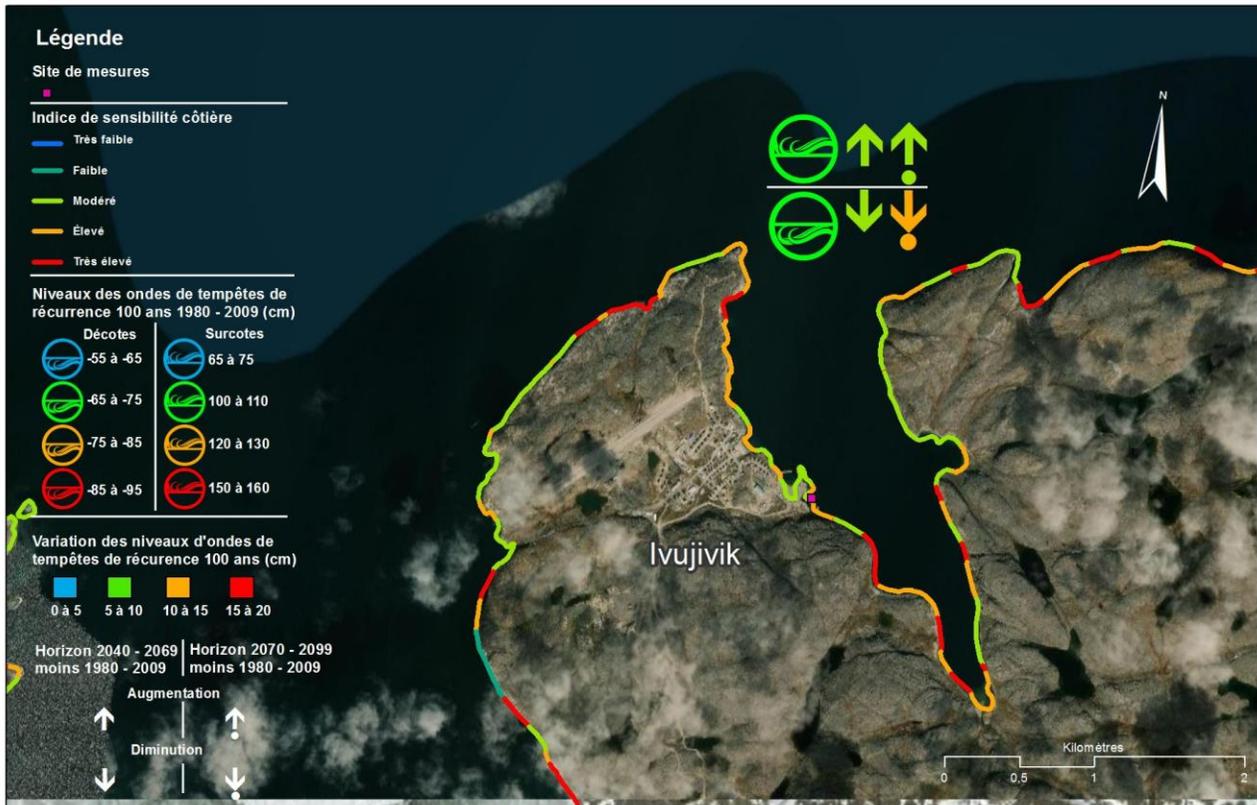


Figure 12. Sensibilité côtière de la communauté de Ivujivik aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099

Baie Déception et les changements climatiques



Figure 13. Sensibilité côtière de la communauté de Baie Déception aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099

Kangiqsujuaq et les changements climatiques

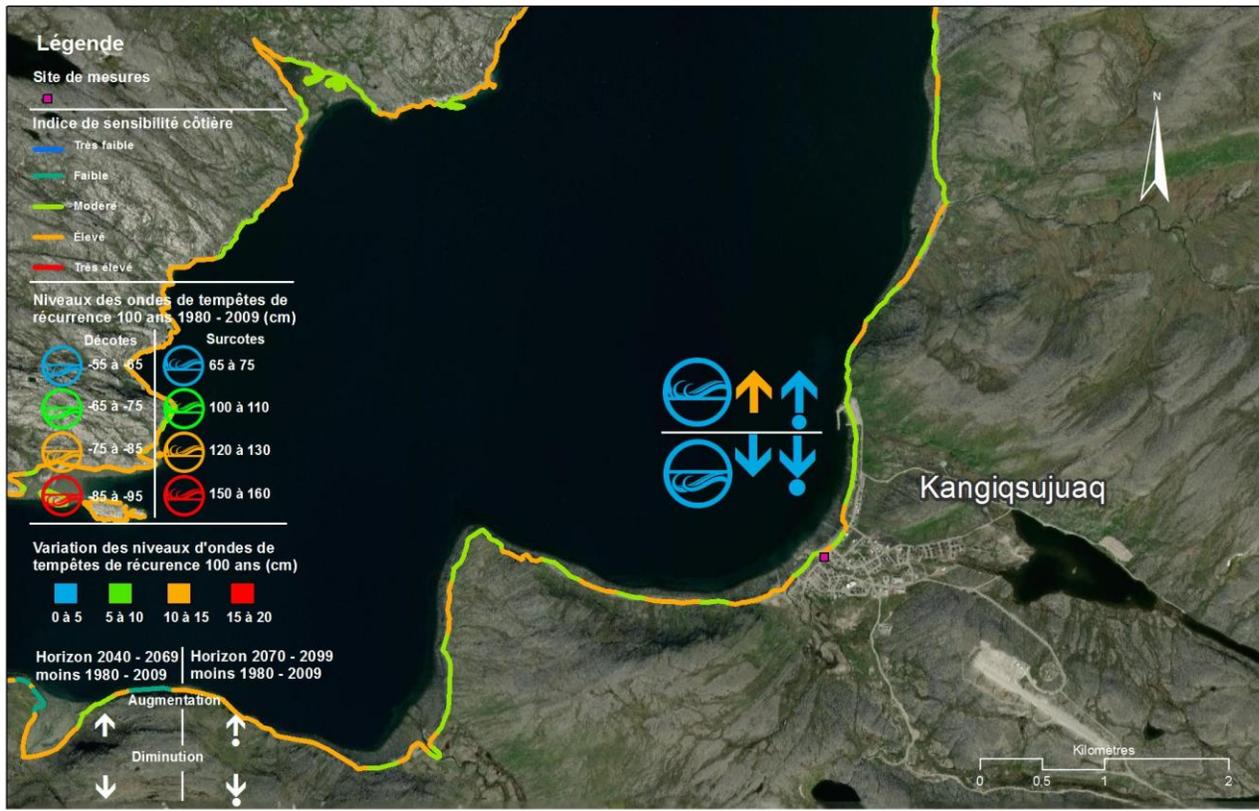


Figure 14. Sensibilité côtière de la communauté de Kangiqsujuaq aux CC niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099

Quaqtaq et les changements climatiques

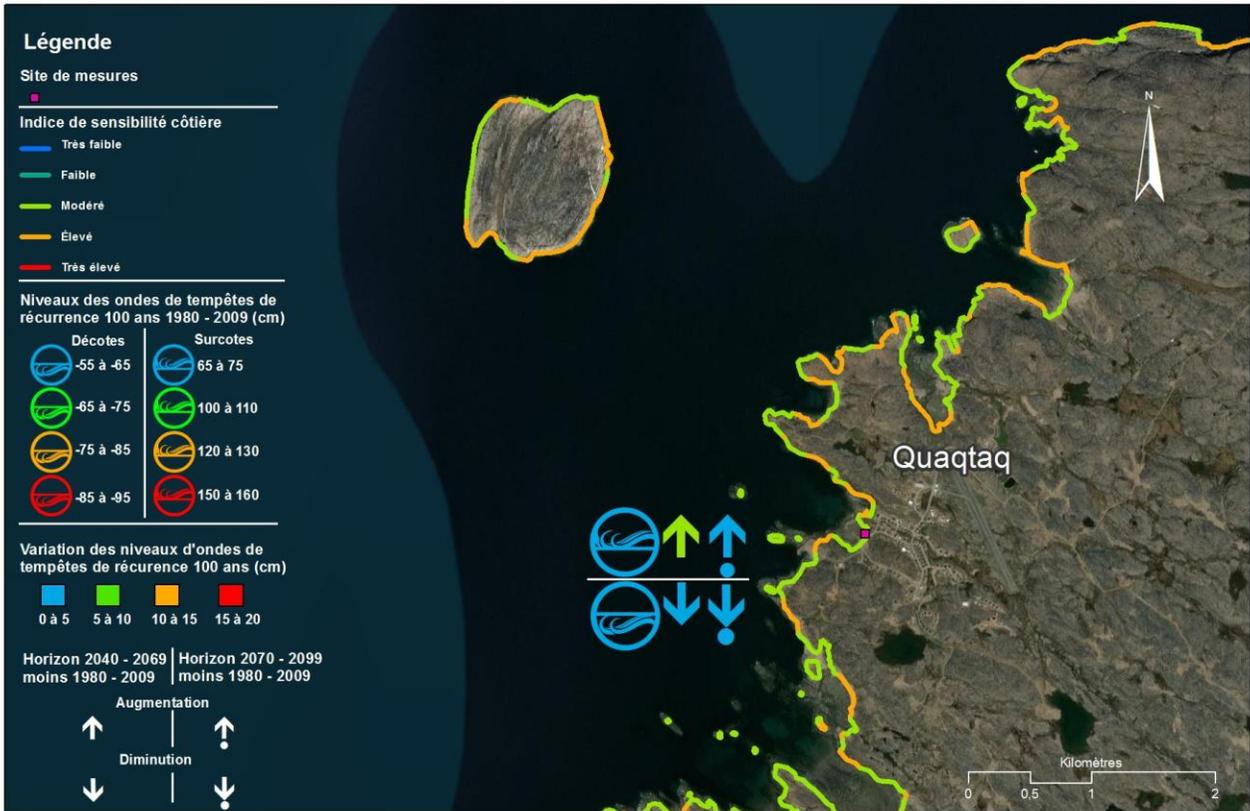


Figure 15. Sensibilité côtière de la communauté de Quaqtaq aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099

Kuujjuaq et les changements climatiques

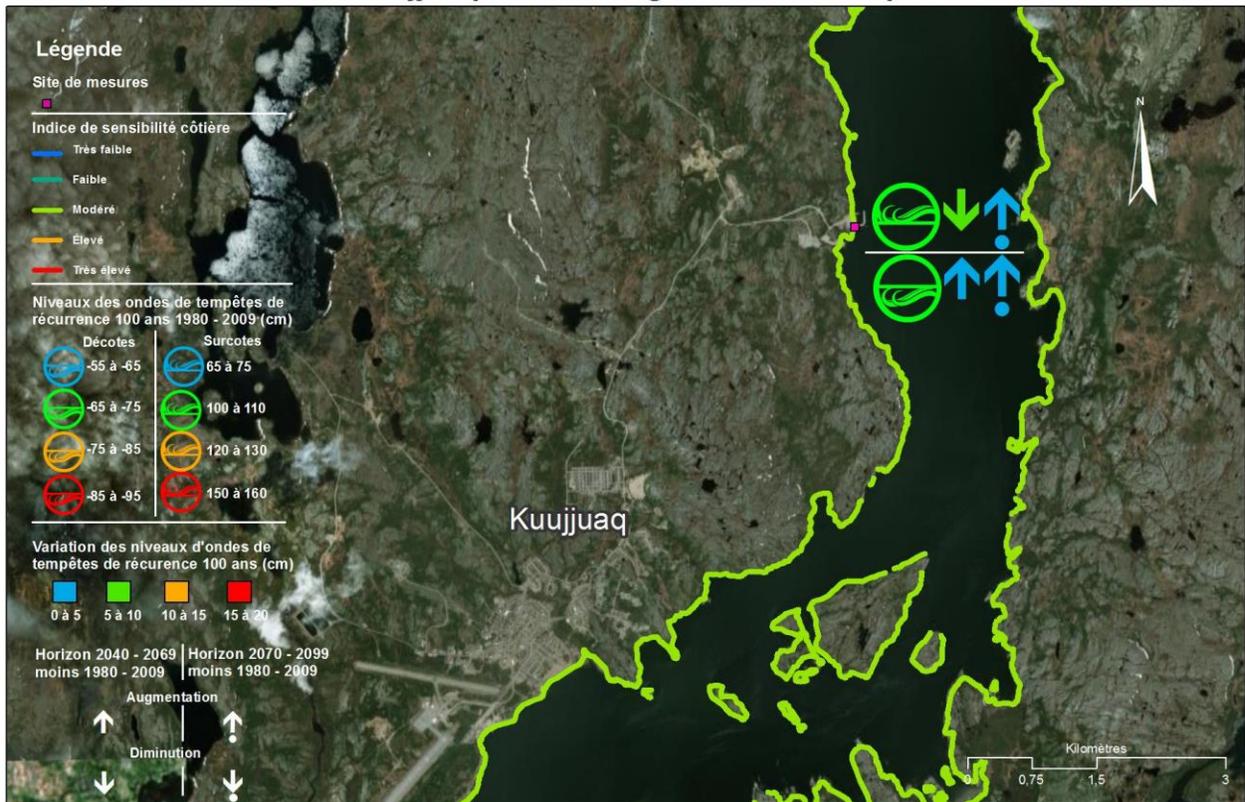


Figure 16. Sensibilité côtière de la communauté de Kuujjuaq aux CC, niveaux des ondes de tempêtes pour le passé récent et variations des niveaux de surcotes et de décotes extrêmes, de période de retour 100 ans, pour les horizons 2049-2069 et 2070-2099



550 SHERBROOKE OUEST, TOUR OUEST, 19^e ÉTAGE, MONTRÉAL, QC, CANADA, H3A 1B9 | TÉLÉPHONE 514 282.6464 | TÉLÉCOPIEUR 514 282.7131 WWW.OURANOS.CA