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

Rapport technique en soutien au document synthèse présenté au ministère des Transports du Québec

Rapport final

juin 2020

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

Rapport final

Juin 2020

COORDINATION DU PROJET

Geneviève Trudel, MTQ
Stéphanie Bleau, Ouranos

ÉQUIPE DE RÉALISATION :

Sonia Hachem, Ouranos

RÉVISION SCIENTIFIQUE

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

RÉVISION LINGUISTIQUE :

Nom de réviseur/use linguistique 1, Affiliation

MISE EN PAGE :

Prénom Nom, Affiliation

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

Numéro du projet Ouranos: 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 MTQ. Montréal. Ouranos. 60 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 technique 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). La réalisation de ce document vulgarisé a été financée par le Fonds vert 2020 et coordonnée 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 ministère des Transports du Québec, 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 Plan d'action sur les changements climatiques (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), Frédérique Gosselin-Lessard (MTQ), Julie Veillette (MELCC), Laurie Beaupré (Makivik), Véronique Gilbert (ARK) et Jean-Denis Bouchard (MSP).

Les auteurs remercient également l'équipe de mobilisation de connaissances et Hélène Côté de l'équipe science du climat en tant que réviseurs à l'interne d'Ouranos ainsi que les réviseurs scientifiques externes Antoine Boisson du CEN, Dany Dumont de l'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 gouvernementale régionale et locale ainsi qu'académiques. 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 (MTQ)
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)
- INRS-ETE
- UQAR-ISMER
- CEN, Ulaval
- CIMA+
- Environnement Illimité Inc.
- LaSalle NHC

PRÉAMBULE

La synthèse technique est complémentaire aux informations contenues dans l'outil d'aide à la décision produit par Ouranos intitulé « Synthèse des connaissances sur l'impact des changements climatiques (CC) sur l'environnement maritime et côtier au Nunavik. Ce document technique est destiné à toutes personnes qui souhaitent comprendre les technicités contenues dans les études menées par le ministère des Transports du Québec sous le nom « Évaluation de l'impact des changements climatiques sur les infrastructures maritimes du Nunavik et solutions d'adaptation » démarrée en 2009 dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques (PACC) 2006-2012 et se poursuivant dans le cadre du PACC 2013-2020. De ce fait, la synthèse technique précise les éléments méthodologiques derrière les connaissances produites dans la dernière décennie par le ministère des Transports. Elle résume et vulgarise les relations entre les différents aléas hydrologiques et climatiques et les facteurs de vulnérabilité, les méthodes d'observation, les modélisations climatiques et hydrodynamiques, l'indice de sensibilité côtière et les incertitudes liées à toutes les étapes des études. Plusieurs tableaux et figures offrent aux lecteurs des informations combinées sur les données observées et simulées. Une liste des acronymes et un glossaire des termes scientifiques sont fournis pour faciliter la compréhension du texte.

Les données observées par les caméras aux infrastructures du Nunavik peuvent être récupérées à l'adresse suivante : http://caiman.ete.inrs.ca/.

Les données de météorologiques sur la côte peuvent être récupérées à l'adresse suivante : http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/donnees/OQcarte.asp, celles aux aéroports des 14 communautés inuites peuvent être récupérées sur le site d'environnement Canada à l'adresse suivante : https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html.

Les données d'observations des niveaux d'eau mesurés par des marégraphes ainsi que toutes les données simulées seront accessibles via le MTQ quand toutes les études seront terminées.

Synthèse des connaissances : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportHachem2020_FR.pdf

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements i
Préambule ii
Liste des figures iv
Liste des tableaux v
Liste des abréviations, sigles et acronymes vi
1. Interactions entre les aléas géophysiques étudiés 1
2. Méthodes d'observations du passé récent 3
2.1 Données climatiques 3
2.1.1 Mesurer les variables climatiques 3
2.1.2 Analyse des données climatiques du passé récent 4
2.1.3 Données de réanalyses climatiques 5
2.2 Données hydrologiques 6
2.2.1 Mesurer et décomposer les niveaux d'eau 6
2.2.2 Mesurer les tempêtes 11
2.2.3 Mesurer les vagues 12
2.2.4 Mesurer les fonds marins : les données bathymétriques 14
2.2.5 Mesurer les conditions de glace 15
3. Incertitudes, reconstitution du passé récent et Modélisations des changements futurs 17
3.1 Les incertitudes liées à la modélisation 17
3.1.1 Incertitude liée aux conditions initiales 17
3.1.2 Incertitude liée aux différents modèles 17
3.1.3 Incertitude liée aux scénarios climatiques d'émission de gaz à effet de serre 18
3.2 Les modèles climatiques 18
3.3 Les modèles hydrodynamiques 20
3.3.1 La Calibration 20
3.3.2 Modélisation des niveaux d'eau 20
3.3.3 Analyse des tempêtes 24
3.3.4 Modélisation des vagues 25
3.3.5 Modélisation des conditions de glace 26
Glossaire 29
Références 31

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma conceptuel des aléas géophysiques qui impactent les infrastructures maritimes et côtières sous conditions climatiques normales 2

Figure 2. Schéma conceptuel des aléas géophysiques qui impactent les infrastructures maritimes et côtières selon les scénarios de réchauffement climatique 2

Figure 3. Anomalie de température moyenne annuelle (ou écart entre la température moyenne annuelle et la moyenne des températures sur la période 1950-2015) de surface à 2 m au-dessus du sol aux quatre stations météorologiques longue durée au Nunavik (Kuujjuarapik, Inukjuak, Kuujjuaq et Schefferville). 5

Figure 4. : Localisation des stations marégraphiques dans le domaine d'étude de la modélisation des niveaux d'eau 9

Figure 5. Position des 23 sites où des séries chronologiques de niveau d'eau ont été modélisées par LaSalle-NHC (Massé et Gallant, 2016). En jaune, les 5 sites qui ont servi à calibrer le modèle. 10

Figure 6. Composantes des niveaux d'eau extrême (Didier et al. 2014) – BMIGM = un niveau géodésique de référecne qui constitue les basses mers maximales, Nprédit = un miveau de marée prédit, Nobservé = un niveau d'eau observé, Nextrême = Un niveau extrême qui survient à la limite supérieure du jet de rive 11

Figure 7. Distribution de la pression atmosphérique (en géopotentiel à 1000 hPa [GZ]), le 31/10/2009 en Amérique du Nord. Les flèches indiquent la direction des vents. Une tempête est centrée au sud-ouest du Nunavik. 12

Figure 8. Positions des mouillages installés à Kuujjuarapik (a) et à Quaqtaq (b). (Neumeier et al., 2019) 14

Figure 9. Emplacement des six sites à l'étude Les rectangles rouges et noirs correspondent aux sous-domaines à 2 km et 400 m de résolution, respectivement. (Senneville, 2018) 15

Figure 10. Saisons de glace déterminées par les caméras (2013-2016) et observations faites sur les images Landsat-8 (2013-2017) pour Umiujaq (Bernier et al, 2017). 16

Figure 11. Domaine du modèle hydrodynamique Mike21-2D et bathymétrie utilisée. La limite extérieure du modèle est située entre les deux points bleus (Nain, au Labrador et Qaqortoq, au Groenland). Les autres limites marines sont fermées. Les points jaunes indiquent les stations qui ont été utilisées pour calibrer le modèle. D'après Massé et Gallant (2016). 21

Figure 12. Comparaison du niveau non-tidal mesuré et modélisé à Umiujaq du 1er août au 31 décembre 2010. les niveaux non-tidaux observés (en rouge) et modélisés (en bleu) D'après Savard et al. (2014). 22

Figure 13. Localisation des mailles utilisées pour extraire les concentrations de glace représentatives du régime des glaces à Quaqtaq (baie Diana et détroit d'Hudson) et Umiujaq (à l'ouest des îles Nastapoka dans la baie d'Hudson). 28

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Principales stations météorologiques au Nunavik 4

Tableau 2. Réanalyses utilisées dans les simulations des études sur les tempêtes, les glaces, les niveaux d'eau et les vagues au Nunavik pour la période 1979-2013 6

Tableau 3. Les facteurs qui font varier le niveau d'eau, leur échelle de variation et la fiabilité de leur prédiction 7

Tableau 4. Position et période d'enregistrement des stations marégraphiques installées au Nunavik (d'après Massé et Villeneuve, 2013) 8

Tableau 5. Localisation géographique et périodes des fonctionnements des mouillages. Les heures sont en UTC. (Neumeier et al., 2019) 13

Tableau 6. Modèles climatiques utilisés pour simuler les impacts des changements climatiques sur les tempêtes, les niveaux d'eau et les conditions de glace au Nunavik 19

Tableau 7. Principaux impacts des changements climatiques sur l'englacement et la concentration de glace de mer ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 8. Taux de diminution de la durée de la saison de glace de rive sur la période 1981-2070 **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 9. Variation dans la durée moyenne de la saison de glace de rive (nombre de jours et %) entre 1981-2010 et 2041-2070 pour les deux simulations climatiques . **Erreur ! Signet non défini.**

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ARK :	Administration régionale Kativik
AWAC	Profileur de courant avec options vagues et glaces, modèle AWAC-AST 600 kHz de la firme Nortek (Neumeier, U et al., 2019)
CC	Changements climatiques
CEN	Centre d'Études nordiques
CICE	Modèle de glace de mer (CICE5 : version 5 du CICE)
GES	Gaz à effets de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat
MELCC	Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques
MOR	Modèle Océanique Régional
MOR-HB	Modèle Océanique Régional – Baie d'Hudson
MPO	Ministère des Pêches et Océans
MGC	Modèle global du climat
MRC	Modèle régional du climat
MRCC	Modèle régional canadien du climat
MSP	Ministère de la sécurité publique
MTQ	Ministère des Transports du Québec
PACC	Plan d'action sur les changements climatiques
RCP	Representative Concentration Pathways (trajectoire de concentration représentative)

1. INTERACTIONS ENTRE LES ALÉAS GÉOPHYSIQUES ÉTUDIÉS

Les relations existantes entre les différents évènements géophysiques qui ont été étudiés à la demande du MTQ sont présentées dans la Figure 1. Les niveaux d'eau dépendent de la *marée* qui est constante, locale et connue, et des *ondes de tempêtes* (*surcotes* et *décotes*). Les niveaux d'eau au Nunavik varient aussi sous l'effet du *relèvement isostatique*. Celui-ci est lent, continu et régional, il augmente de quelques centimètres par an. Compte tenu de sa vitesse, son effet ne se fera sentir qu'à un horizon lointain, vers 2100. Les marées, les ondes de tempêtes, les hauteurs des vagues sur la rive et *le jet de rive* sont les principaux forçages hydrodynamiques qui commandent l'évolution des littoraux. Toutefois, pour les régions arctiques et subarctiques, le rôle de la glace de mer est majeur, ses effets aussi bien positifs que négatifs sur la stabilité de la côte sont considérables. La présence de glace de mer (sous forme de banquise) en automne et en hiver (pendant 7 à 8 mois) protège les côtes des tempêtes en ralentissant la vitesse du vent et en empêchant la formation d'une houle puis d'une haute vague déferlante et du même coup en empêchant l'érosion. La fonte et le démantèlement de la banquise au printemps et la formation des glaces à l'automne produisent la glace mobile. Les vents poussent la glace sur la côte (poussées glacielles) ce qui érode la surface de la plage et de l'arrière-plage, y compris les dunes. Ces poussées ont une force suffisante pour endommager les infrastructures portuaires.

Ces éléments, sous conditions climatiques normales, ont des impacts bien connus sur les environnements et les infrastructures côtières. Celles-ci sont conçues selon les normes de construction.

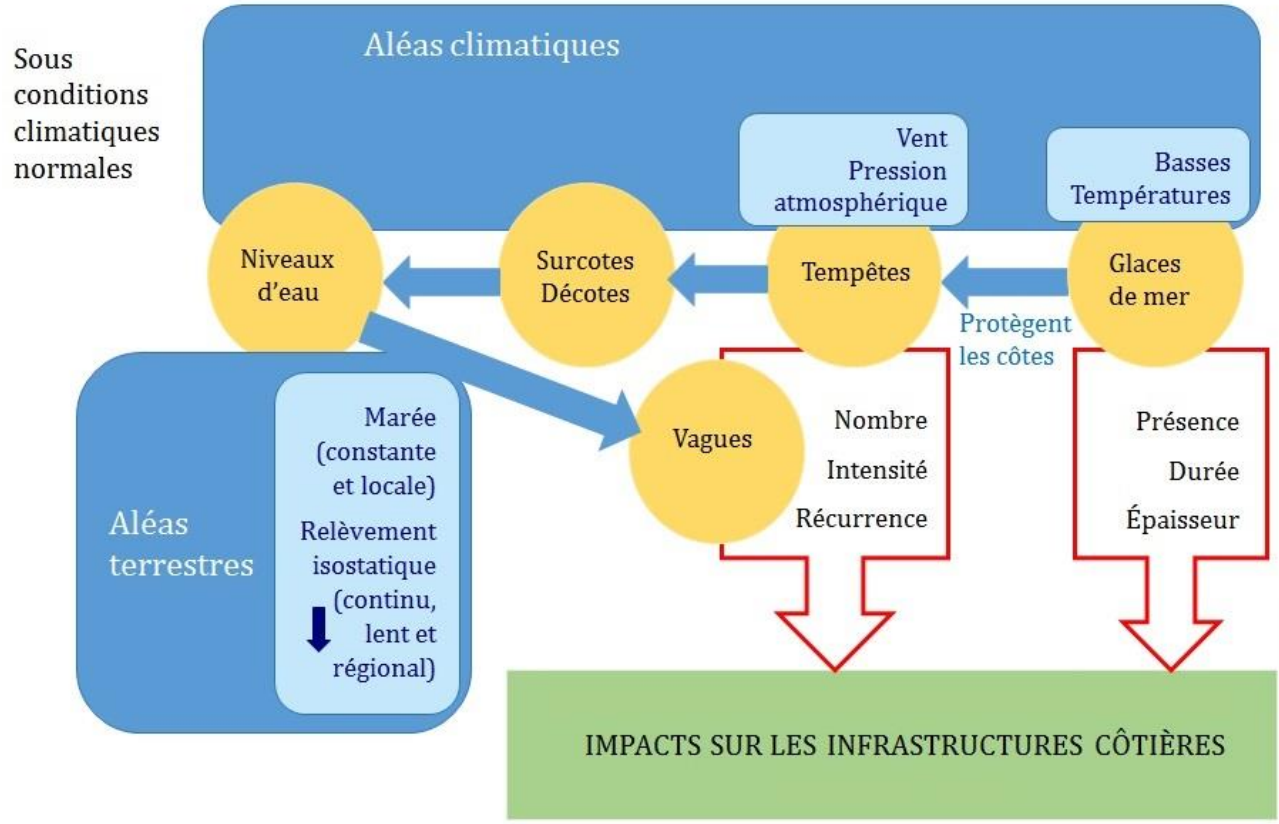


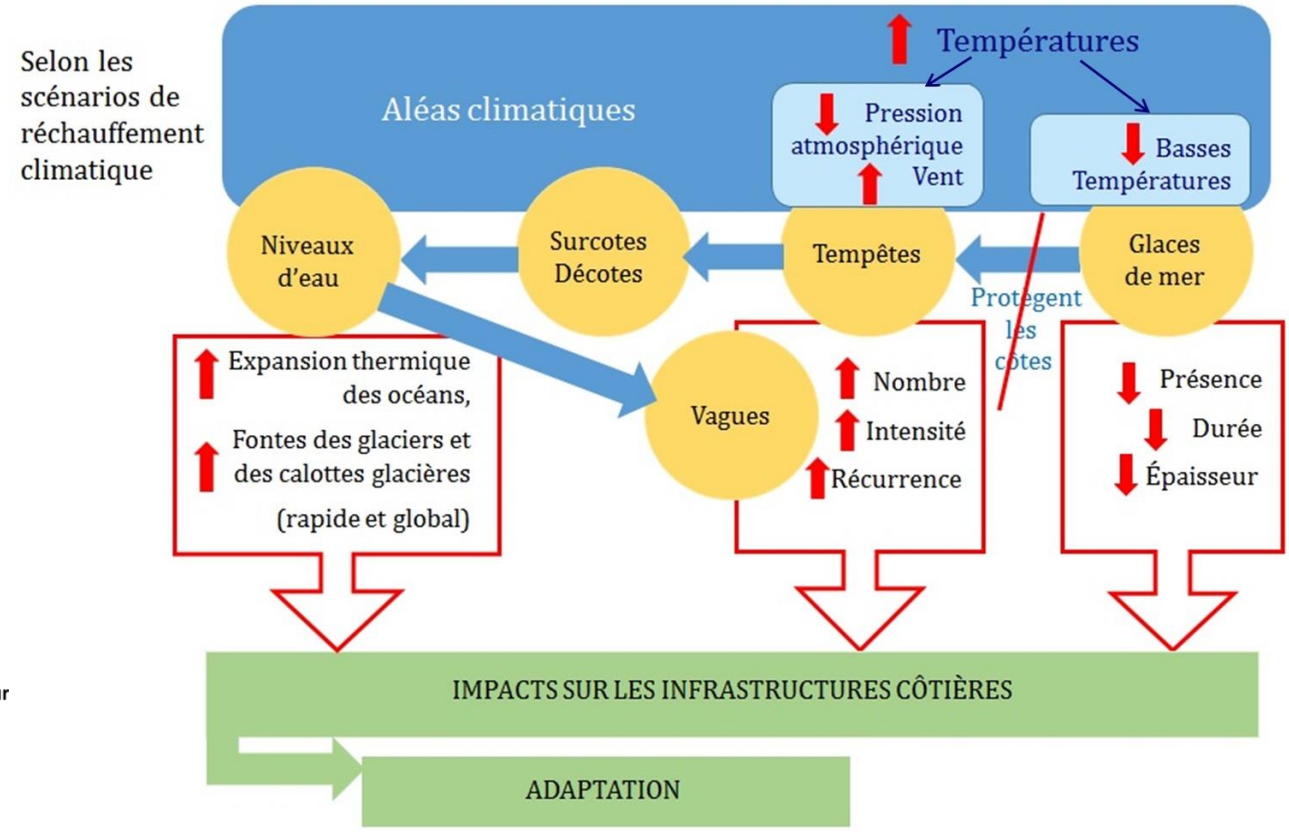
Schéma conceptuel des aléas géophysiques qui impactent les infrastructures maritimes et côtières sous conditions climatiques normales

La Figure 2 montre les mêmes aléas géophysiques selon les scénarios de réchauffement climatique. Lorsque la température augmente, elle entraine une baisse de la pression atmosphérique et une augmentation des vents qui sont responsables de la formation des tempêtes. Celles-ci pourraient s'accompagner d'ondes de tempêtes plus importantes, avec des surcotes plus hautes et des décotes plus basses. L'expansion thermique des océans, et les fontes des glaciers et des calottes glacières vont provoquer une augmentation du niveau marin global.

Figure 1.

D'ici la fin du XXIe siècle, au Nunavik, les effets des ondes de tempêtes et la hausse du niveau global de l'eau seront compensés par le relèvement isostatique. Celui-ci pourrait faire diminuer le niveau d'eau de près d'un mètre dans certains villages amoindrissant l'effet des tempêtes.

Par contre, dans un horizon proche, de 2040 à 2069, le relèvement isostatique n'aura pas encore un effet prédominant sur la baisse du niveau marin relatif alors que les ondes de tempêtes pourraient provoquer des surcotes et des décotes extrêmes qui pourraient s'accompagner d'une élévation ou d'un abaissement du niveau de l'eau jusqu'à un mètre. D'autre part, l'augmentation des températures a pour conséquences de retarder la formation des glaces de mer en automne et d'accélérer leur fonte au printemps. La présence de ces glaces est alors moins longue et leur épaisseur est plus mince. Ainsi, comme la période sans glaces fixes est plus longue, leur effet protecteur contre les vagues déferlantes et le jet de rive, pourrait être, lui aussi, diminué.



Figur

Schéma conceptuel des aléas géophysiques qui impactent les infrastructures maritimes et côtières selon les scénarios de réchauffement climatique

2. MÉTHODES D'OBSERVATIONS DU PASSÉ RÉCENT

2.1 DONNÉES CLIMATIQUES

2.1.1 MESURER LES VARIABLES CLIMATIQUES

Les données météorologiques de longue durée sont rares au Nunavik.

Environnement Canada opère **quatre stations météorologiques aux aéroports** de Kuujjuarapik, Inukjuak, Kuujjuaq et Schefferville[1], qui ne sont pas toujours représentatives des conditions météorologiques marines et côtières. Toutes les autres stations météorologiques sont soit intermittentes, donc peu utilisables pour produire des statistiques climatiques, soit de courte durée ou non standardisées (ex : anémomètre à moins de 10 m de hauteur), ce qui rend très difficile la comparaison avec les autres stations et la détermination de tendances à long terme.

Entre 2009 et 2012, le MTQ, en collaboration avec Environnement Canada, a installé **six stations météorologiques, près des côtes, dans les villages** de Quaqtaq, Kangiqsujuaq, Ivujivik, Puvirnituq, Akulivik et Umiujaq afin de constituer des séries de données plus complètes et mieux distribuées spatialement le long des côtes du Nunavik (voir Figure 1 de la synthèse des connaissances et le tableau 1 qui présente les principales stations météorologiques du Nunavik). Leurs emplacements ont été choisis de façon à être représentatifs des conditions météorologiques côtières. Par exemple, les données de vent provenant du large sont peu affectées par le relief à proximité des stations côtières contrairement aux stations aux aéroports. Toutes ces stations rencontrent les standards des stations météorologiques d'Environnement Canada. Les paramètres mesurés sont la température de l'air à 2 m du sol, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, la pression barométrique et la température à 10 cm du sol. Ces stations sont aujourd'hui la propriété du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte aux changements climatiques (MELCC) qui a la responsabilité d'en diffuser les données par l'entremise du Service Info-Climat[2]. Les données sur le site du MELCC sont disponibles à partir de 2010[3] et sont actives encore aujourd'hui.

Le fait que ces stations météorologiques produisent des données continues et normalisées pour une période assez longue a permis de caractériser de manière beaucoup plus fine les conditions climatiques

[1] À noter que Schefferville est situé dans la région administrative de la Côte-Nord, mais à la limite sud-est du Nunavik et, par conséquent, cette station est représentative du climat du Nunavik.

[2] Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte aux Changements climatiques, *Surveillance du climat.* [en ligne, consulté le 26 février 2020] http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/surveillance/reseau-parametres.asp

[3] Le site du MELCC indique que les stations météorologiques de de Kangiqsujjuaq et Puvirnituq ont été ouvertes en 2005. Il s'agit d'une erreur de conception du site Internet qui n'est pas modifiable. Leur service confirme par communication personnelle la date de début des mesures disponible le 13 aout 2010.

prévalant dans les villages sélectionnés. La pérennité des stations météo permettra à l'avenir d'obtenir des simulations climatiques sur une plus longue période de temps.

Tableau 1. **Principales stations météorologiques utilisées dans les projets au Nunavik**

Village	Emplacement	Début de la période de mesure	Propriété
Kuujjuarapik	aéroport	1957	Environnement Canada
Inukjuak	aéroport	1953	Environnement Canada
Kuujjuaq	aéroport	1953	Environnement Canada
Akulivik	Côte	2010	MELCC
Ivujivik	Côte	2010	MELCC
Kangiqsujuaq	Côte	2010	MELCC
Umiujaq	Côte	2010	MELCC
Puvirnituq	Côte	2010	MELCC
Quaqtaq	Côte	2010	MELCC

Sources : Environnement Canada et MELCC

2.1.2 ANALYSE DES DONNÉES CLIMATIQUES DU PASSÉ RÉCENT

La figure 3 présente l'anomalie de température de l'air moyenne annuelle (Ama), soit l'écart entre la température moyenne annuelle (Tma) et la moyenne des températures de la période 1950-2015 (Tmp), pour les trois stations météorologiques d'Environnement Canada au Nunavik et Shefferville. Si l'anomalie de température (Ama) est positive, alors l'année représentée (Tma) a été plus chaude que la moyenne (Tmp). À l'inverse si Ama est négative alors Tma a été plus froide que Tmp. Ainsi, la figure 3 montre que **Tma a augmenté de 2,1 °C pour la période 1920 à 2015**. La hausse de température est particulièrement marquée pour les deux dernières décennies (1995 à 2015), où Ama est presque toujours au-dessus de 0.

La figure 3 montre aussi que les Tma sont très cohérentes entre les stations. Autrement dit, les variations de Tma se produisent dans tout le Nunavik et sont du même ordre de grandeur.

La figure 3 permet de visualiser la variabilité interannuelle, c'est-à-dire les variations d'Ama d'une année à l'autre. Ces variations peuvent atteindre jusqu'à ± 4 °C d'une année à l'autre. Par exemple, l'année 2002 a été presqu'aussi froide que la moyenne de la décennie 1930. Cependant, cette année froide est une exception au début du XXI^{e} siècle alors qu'elle était très courante dans les années 1930. De même, la tendance des températures pendant la période 1950-1990 était à la baisse alors que la tendance sur un siècle est à la hausse. Il faut donc distinguer les tendances établies sur une période de quelques années ou de quelques décennies, des tendances à beaucoup plus long terme**.** Pour l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) une tendance établie sur une période de temps de trois décennies, peut être attribuée aux CC, alors que les tendances établies sur une courte période, de trois décennies et moins, sont souvent causées par la variabilité naturelle des conditions climatiques.

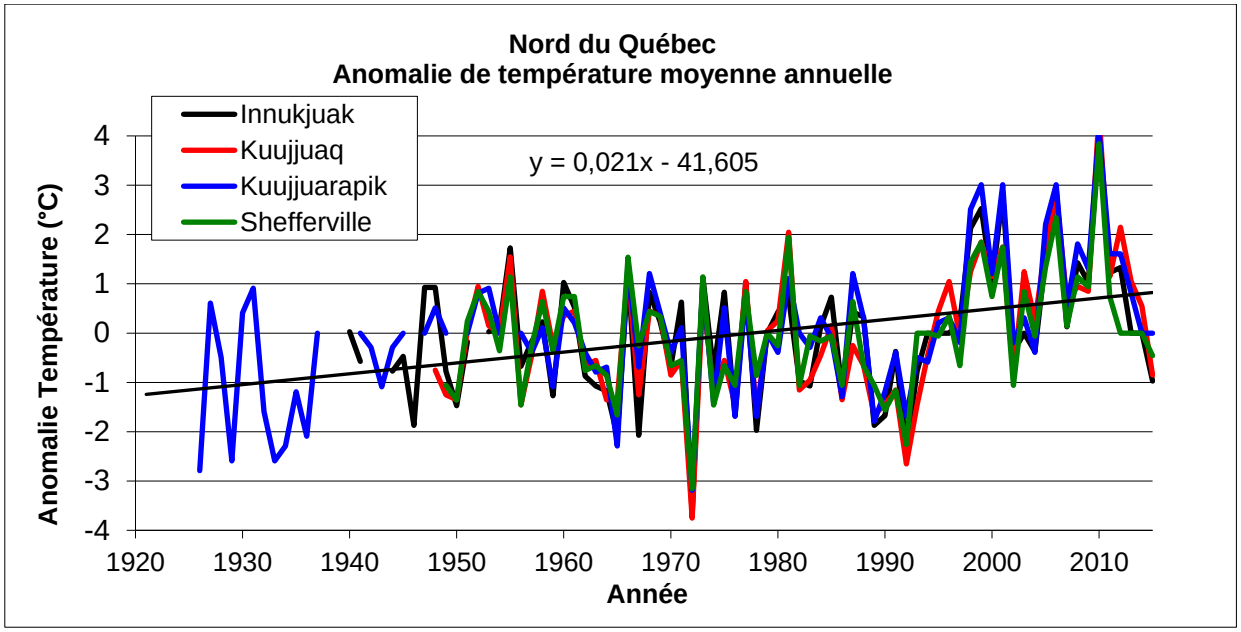


Figure 3. Anomalie de température moyenne annuelle (ou écart entre la température moyenne annuelle et la moyenne des températures sur la période 1950-2015) de surface à 2 m au-dessus du sol aux quatre stations météorologiques longue durée au Nunavik (Kuujjuarapik, Inukjuak, Kuujjuaq et Schefferville).

Si l'Ama est plutôt uniforme spatialement, ce n'est pas le cas de plusieurs autres variables climatiques dont notamment les précipitations totales, le vent et la quantité de neige au sol. Par exemple, le vent est sensible à la topographie locale ainsi qu'à la température et l'humidité au-dessus du sol ou d'un plan d'eau. Il n'est donc pas possible d'interpoler ou d'étendre les caractéristiques du vent obtenues à un site de mesure à un autre site très éloigné. Pour obtenir la distribution spatiale de ces variables, il est nécessaire d'utiliser des modèles atmosphériques.

2.1.3 DONNÉES DE RÉANALYSES CLIMATIQUES

Les *réanalyses* climatiques sont des bases de données sur grille qui fournissent des séries chronologiques à intervalle régulier pour de nombreuses variables atmosphériques et de surface qui sont cohérentes entre elles. Les réanalyses sont produites à l'aide de modèles de prévisions météorologiques ayant assimilé de nombreuses séries d'observations provenant notamment de satellites, de radiosondes et de stations météo. Les réanalyses sont très fiables pour les variables observées. Toutefois, la contribution du modèle météorologique permet aux réanalyses de fournir de précieuses données pour les variables qui ne sont pas mesurées par les divers réseaux d'observations**. Autrement dit, les réanalyses permettent de combler le manque de données temporellement et spatialement pour le passé-récent (les dernières décennies).**

Les réanalyses sont produites à différentes échelles spatiales et fréquences temporelles. La plupart des réanalyses, à l'échelle régionale de l'Amérique du Nord, couvre la période de 1979 à nos jours, alors que les réanalyses globales, à l'échelle planétaire, débutent en 1961. Les données météorologiques provenant des six stations du MELCC ont été utilisées pour valider les données de réanalyses à proximité de la côte.

Le tableau 2 présente les cinq réanalyses utilisées dans les études sur les tempêtes (Savard et al., 2014 et Savard, 2016), les conditions de glace (Joly et al., 2011; Senneville et St-Onge-Drouin, 2013), les niveaux d'eau (Massé et Villeneuve, 2013; Massé et Gallant, 2016) et les vagues (Ropars, 2014) discutées dans les faits saillants de la synthèse des connaissances.

Réanalyses climatiques utilisées dans les simulations des études sur les tempêtes, les glaces, les niveaux d'eau et les vagues au Nunavik pour la période 1979-2013

Tableau 2.

Réanalyses	Domaine	Taille de grille	Intervalle des données
NARR[1]	Amérique du Nord	32 km	3 h
Merra[2]	Global	55 km	1 h
NCEP[3]	Global	277 km	6 h
ERA-Interim[4]	Global	75 km	6 h
ERA-40[5]	Global	277 km	3 h

[1] NARR : North American Regional Reanalysis (Mesinger et al., 2006).
[2] MERRA: Modern Era-Retrospective Analysis for Research and Applications (Rienecker et al., 2011).
[3] NCEP : National Centers for Environmental Prediction (Kalnay et al., 1996).
[4] ERA-Interim : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Interim Reanalysis (Deep et al., 2011).
[5] ERA40 : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - 40 (Uppala et al., 2005).

2.2 DONNÉES HYDROLOGIQUES

2.2.1 MESURER ET DÉCOMPOSER LES NIVEAUX D'EAU

2.2.1.1 Les facteurs qui font varier le niveau d'eau

Les facteurs qui font varier le niveau d'eau sont nombreux et s'exercent à différentes échelles. Le Tableau 3 résume les variations de ces facteurs ainsi que la fiabilité de leur prédiction.

La *marée* est le facteur prépondérant car elle est cyclique sur une base quotidienne et est stable dans le temps. Elle peut être décrite de façon très fiable sur une échelle de temps quotidienne et une échelle spatiale régionale.

Le second facteur inclut les processus atmosphériques, en particulier le vent et la pression atmosphérique qui sont à l'origine des tempêtes. Lors des tempêtes, les *ondes de tempêtes* se forment et provoquent des *surcotes* et des *décotes***.** L'échelle temporelle de variation de ces processus est courte. Ils ont lieu sur quelques jours et leur récurrence n'est pas régulière, en particulier pour les tempêtes les plus intenses dont les périodes de récurrence sont plus courtes qu'auparavant (Collins et al., 2013) (moins de 50 ans). Le vent transmet son énergie à un plan d'eau sous l'action de forces de cisaillement qui empilent l'eau sur les côtes. Les variations de pression atmosphérique provoquent des effets de succion (ou de repoussement de la surface de l'eau) appelé aussi l'effet de *baromètre inversé*. Si ces deux évènements s'ajoutent à une onde de marée, le niveau d'eau peut atteindre une valeur extrême inhabituelle.

Le troisième facteur provient des changements climatiques, l'élévation des températures attendue avec dans les prochaines décennies causeront l'élévation globale du niveau des mers, (IPCC, 2019).

Le dernier facteur concerne des forces qui ne sont pas climatiques mais géologiques. Les mouvements tectoniques, bien que très étudiés et bien que les régions de forte probabilité de mouvements soient très bien surveillées, ne sont pas prévisibles sur une échelle de temps d'une vie humaine (100 ans). Ils ne sont donc pas considérés dans les études menées par le MTQ. Le *relèvement isostatique* est, quant à lui, bien connu et très important dans la région du Nord est canadien et du Nunavik plus particulièrement. Il doit donc être pris en compte dans l'évolution des variations de niveaux d'eau.

Les facteurs qui font varier le niveau d'eau, leur échelle de variation et la fiabilité de leur prédiction

Tableau 3

Forces et processus qui engendrent les facteurs	Facteurs qui font varier le niveau d'eau	Échelle de variation			Prédiction
		Temporelle	Spatiale	Récurrence	
Forces gravitationnelles (Soleil –Lune- Terre)	Marée	Quotidienne	Régionale	Quotidienne	Très fiable
Processus atmosphériques (vent, pression atmosphérique températures de l'air et précipitations combinés)	Vents, pression atmosphérique	De quelques heures à quelques jours	Régionale	Quelques jours	Fiable sur une courte période de temps
	Vents puissants (>90 km/h), pression atmosphérique très basse (onde de tempêtes : surcote et décote)			10 à 100 ans (plus fréquents)	Fiable sur une longue période de temps
Réchauffement climatique (élévation globale des températures)	Élévation globale des océans (expansion thermique des océans fonte des glaciers de montagnes calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique.	Moyen et long terme (50 ans et plus)	Élévation globale	Continue	Fiable sur une longue période de temps, plus de 25 ans
Forces géologiques (internes à la Terre)	Mouvements tectoniques	Très long terme (sur plusieurs millénaires)	Variation globale	Inconnue	Impossible
	Relèvement isostatique postglaciaire		Abaissement régional	Continue	Très fiable

2.2.1.2 Les données de stations marégraphiques

La mesure du niveau d'eau total à un site particulier se fait à l'aide de marégraphes qui fournissent des données en continu, à intervalle régulier, sur une longue période et qui permettent de produire des séries temporelles de niveau d'eau total.

La marée est variable au Nunavik. Elle est de forte amplitude – hypertidale dans la baie d'Ungava, de forte à moyenne amplitude – macrotidale - de Quaqtaq à Ivujivik soit dans le détroit d'Hudson et de faible amplitude – microtidale - dans la baie d'Hudson (Ropars, 2014). (Voir Figure 3 dans la synthèse des connaissances).

Dans le but de recueillir des données pour reconstruire précisément la hauteur de l'eau à n'importe quel instant (Benyahya, 2012), pour calibrer le modèle hydrodynamique choisi (Massée et Villeneuve, 2013) et pour servir d'intrants dans ce même modèle (Massé et Galland, 2016), le MTQ a fait installer des stations marégraphiques à proximité des infrastructures de 7 villages du Nunavik : Umiujaq, Puvirnituq, Akulivik, Ivujivik, Kangiqsujuaq, Quaqtaq et Kuujjuaq entre 2009 et 2012. Le choix des sites est représentatif de la variabilité spatiale des niveaux d'eau dans l'ensemble du Nunavik et tient compte de l'amplitude de la marée. Les marégraphes installés à l'embouchure de la rivière Koksoak près de Kuujjuaq n'ont pas fonctionné correctement à cause de l'accumulation d'algues laminaires et des forts courants. Aucune

donnée n'a pu y être récoltée. Aux autres stations, les données ont été prélevées en continu pour des périodes de 2 et 3 ans (Tableau 4).

Tableau 4. **Position et période d'enregistrement des stations marégraphiques installées au Nunavik (d'après Massé et Villeneuve, 2013).**

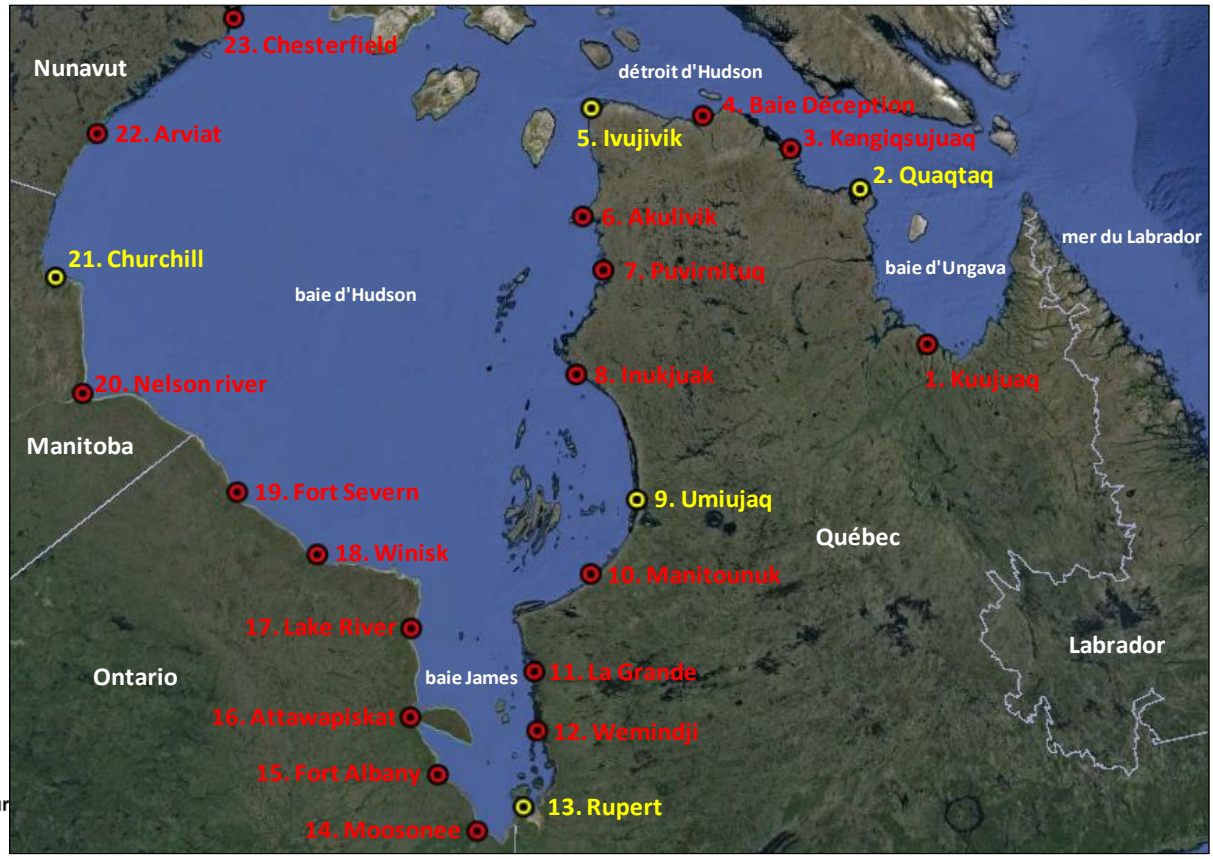
Stations marégraphiques	Position		Période d'enregistrement		
	Longitude (º)	Latitude (º)	Début	Fin	Durée
Quaqtaq	-69.649 E	61.050 N	4 oct. 2009	8 sept. 2012	3 ans
Kangiqsujuaq	-72.062 E	61.602 N	1 oct. 2009	5 sept. 2012	3 ans
Ivujivik	-77.890 E	62.411 N	28 sept. 2009	2 sept. 2012	3 ans
Akulivik	-78.221 E	60.800 N	15 sept. 2010	27 août 2012	2 ans
Puvirnituq	-77.341 E	59.982 N	18 sept. 2010	24 août 2012	2 ans
Umiujaq	-76.550 E	56.533 N	28 sept. 2009	22 août 2012	3 ans

La Figure 4 montre l'étendue spatiale du domaine du modèle hydrodynamique Mike 21-2D utilisé pour la modélisation des niveaux d'eau. Il est beaucoup plus vaste que les plans d'eau ceinturant les côtes du Nunavik. L'étendue du domaine d'étude couvre la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava mais aussi, le bassin de Foxe au Nord du détroit d'Hudson, le golfe de Boothia au Nord du bassin de Foxe, la baie de Baffin, le détroit de Davis et la mer du Labrador. Sur l'ensemble de ce domaine d'étude, il n'existe que 7 stations marégraphiques permanentes actives sur de longues séries temporelles. Quatre stations appartiennent au ministère Pêches et Océans (MPO), Qaqortoq et Thule, sur la côte ouest du Groenland ; Churchill à l'est de la baie d'Hudson, et Nain au Labrador. Trois stations appartiennent à Hydro Québec soit Rupert dans le Sud de la baie James, Kuujjuarapik et La Grande sur la côte est de la baie d'Hudson.

Figur : Localisation des stations marégraphiques dans le domaine d'étude de la modélisation des niveaux d'eau

La méthodologie employée pour acquérir et traiter les données installées au Nunavik (instruments de mesure utilisés, acquisition et traitement des données, rattachement au sol, etc.) est présentée en détail dans le rapport de Tremblay et Lorrain (2013). Les données sont fiables avec une marge d'erreur de l'ordre de ± 1 cm.

Benyahya (2012) a utilisé les six sites actifs du MTQ au Nunavik (Tableau 4) pour la campagne d'observation ; Massé et Villeneuve (2013) ont inclus ces mêmes six sites et les 4 stations du gouvernement canadien ; Ropars (2014) a utilisé les six sites actifs du MTQ ; enfin Massé et Gallant (2016) ont utilisé 3 stations du MTQ (Quaqtaq, Ivujivik, Umiujaq) ainsi que le stations de Rupert et de Churchill comme sites de références pour calibrer le modèle hydroclimatique (Figure 5).



Figur

Position des 23 sites où des séries chronologiques de niveau d'eau ont été modélisées par LaSalle-NHC (Massé et Gallant, 2016). En jaune, les 5 sites qui ont servi à calibrer le modèle.

2.2.1.3 Analyse des données marégraphiques, utilisation pour la cartographie de submersion

Les données mesurées forment une série temporelle du niveau d'eau total observé qui, grâce à la méthode de l'analyse harmonique peut être décomposée (Benyahya, 2012). Le niveau tidal correspond à la variation du niveau d'eau due à la marée et le niveau non-tidal (appelé aussi résidu non-tidal ou signal résiduel) correspond aux variations dues aux effets de vent et de pression atmosphérique appelés ondes de tempêtes qui peuvent être des niveaux observés plus élevés (*surcotes*) ou plus faibles (*décotes*).

Les variations dues uniquement à la marée peuvent être quantifiées et extraites d'une série temporelle de quelques mois, avec une grande fiabilité. Ces caractéristiques (sa fréquence, son amplitude et sa phase)

peuvent ensuite être reconstruites sur n'importe quelle période. Les variations de niveau d'eau des ondes de tempêtes sont beaucoup plus difficiles à décrire et à prédire car ils se produisent de manière aléatoire.

Aux fins de prévisions de CC, les séries temporelles ou signal des marées, connues, sont soustraites de la série temporelle totale. Il reste le signal d'ondes de tempête dont les statistiques de la période de retour peuvent être établies grâce à des données mesurées sur de longues périodes de temps. Les résultats des modélisations de Massé et Villeneuve (2013) et Massé et Gallant (2016) projettent que les ondes de tempêtes pourraient atteindre ± 1 m à l'horizon 2040-2069.

Ce 1 m a été utilisé comme la limite supérieure de l'altitude maximale que pourrait atteindre les zones de submersion d'ici la fin du siècle (Carbonneau et al., 2015). La limite inférieure de la zone littorale inondable correspond à l'altitude maximale atteinte actuellement par les surcotes (Boisson, 2019).

Cependant, plusieurs études récentes (Didier et al., 2014 et 2015) ont démontré que les niveaux d'eau extrêmes sont dans les faits plus élevés que les niveaux atteints par les surcotes. En outre, il faudrait ajouter l'effet du jet de rive (Figure 5) sans quoi la superficie réellement inondée est sous-estimée.

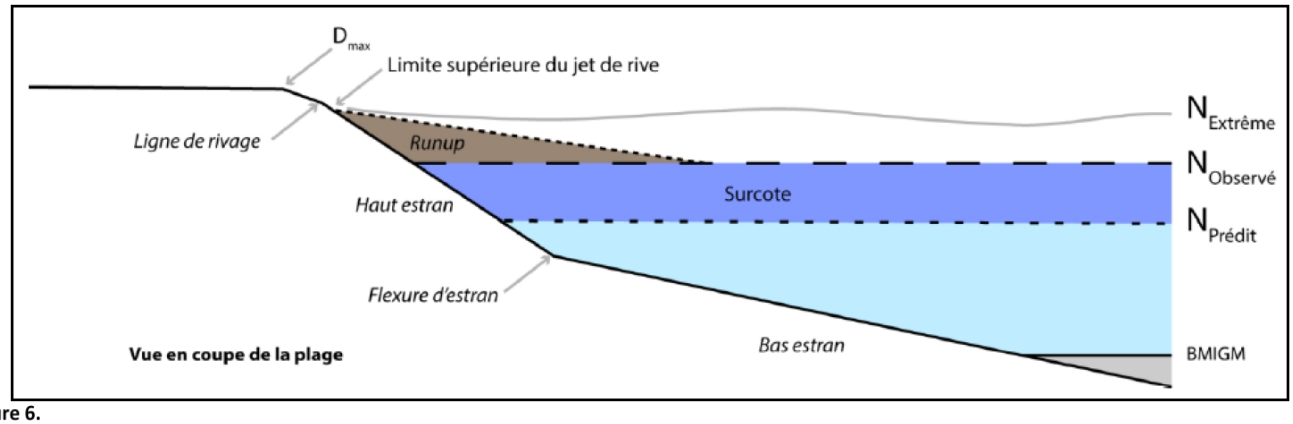


Figure 6. Composantes des niveaux d'eau extrême (Didier et al. 2014) – BMIGM = un niveau géodésique de référecne qui constitue les basses mers maximales, Nprédit = un miveau de marée prédit, Nobservé = un niveau d'eau observé, Nextrême = Un niveau extrême qui survient à la limite supérieure du jet de rive

2.2.2 MESURER LES TEMPÊTES

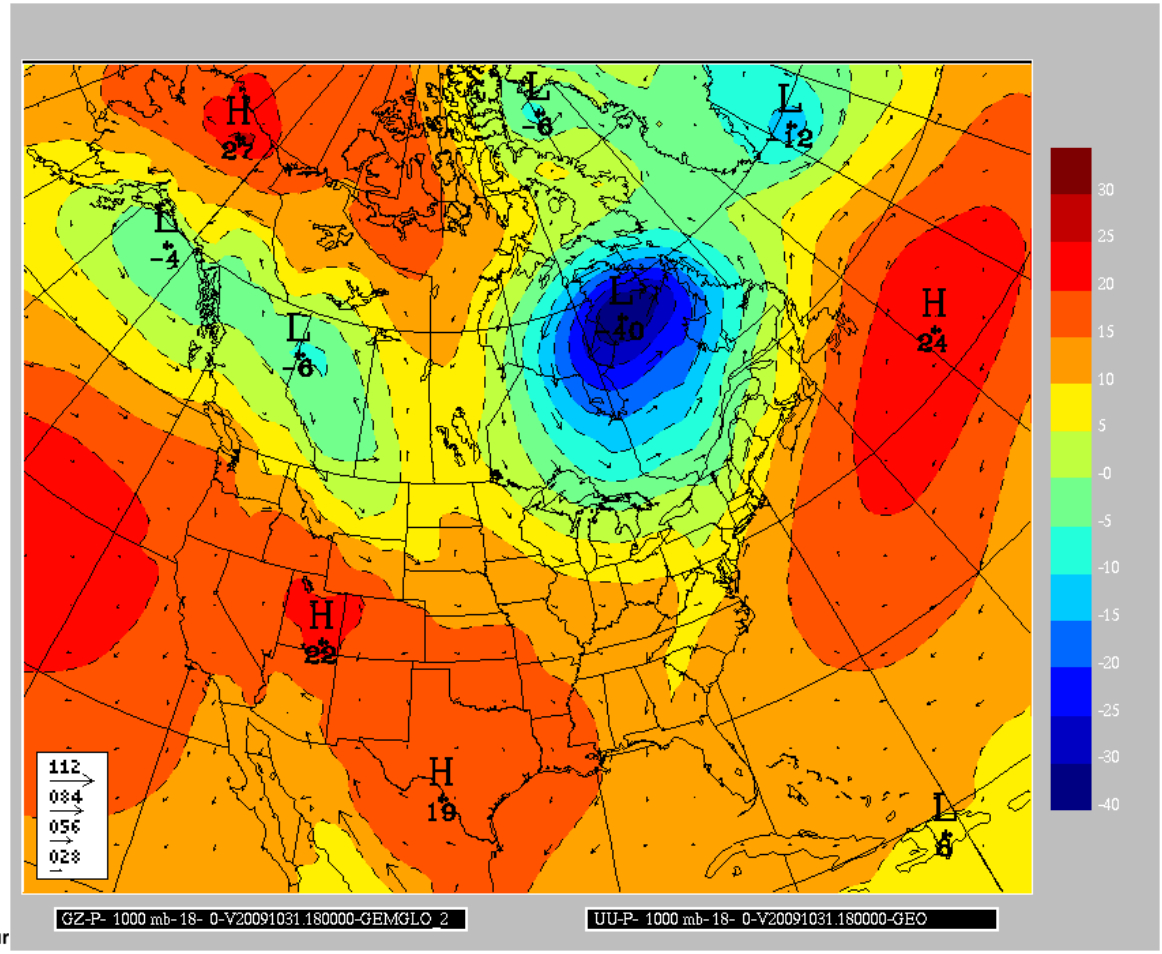
2.2.2.1 L'algorithme de Sinclair

Un algorithme de suivi des trajectoires de tempête appelé « algorithme de Sinclair » (Sinclair 1997) et amélioré par Rosu (2005) a été utilisé par Savard et al. (2014) et Savard (2016) afin de détecter les dépressions atmosphériques qui se forment au-dessus de l'Amérique du Nord et des océans Atlantique, Pacifique et Arctique. L'algorithme permet de calculer les positions successives du centre d'une dépression atmosphérique en utilisant les données provenant de modèles atmosphériques. Les propriétés des tempêtes (intensité, trajectoire, vent, pression atmosphérique, tourbillon, etc) ont été identifiées par Savard et al. (2014) à partir des systèmes dépressionnaires majeurs ayant circulé entre 1961 et 2011.

2.2.2.2 Observations des tempêtes

La figure 6 schématise l'organisation de la pression atmosphérique. La zone en bleu (indiqué par un L) correspond à l'endroit où la pression atmosphérique est la plus basse, ce qui correspond au centre cyclonique. En général, plus la pression atmosphérique est basse, plus les vents sont forts. Les zones en

rouge sont des anticyclones ou zones de haute pression atmosphérique dont le centre (indiqué par un H) correspond à l'endroit où la pression atmosphérique est la plus élevée.



Figur

Distribution de la pression atmosphérique (en géopotentiel à 1000 hPa [GZ]), le 31/10/2009 en Amérique du Nord. Les flèches indiquent la direction des vents. Une tempête est centrée au sud-ouest du Nunavik.

2.2.3 MESURER LES VAGUES

2.2.3.1 Les appareils de mesures

Aucune observation directe des conditions de vague n'existait pour le Nunavik avant le démarrage du projet CC16.1 mené par l'équipe de Neumeier (ISMER) pour la période de 2017 à 2021. Ce projet de recherche a pour objectifs de mesurer les vagues, les courants et les glaces au large de Kuujjuarapik et de Quaqtaq, d'acquérir des données bathymétriques près des infrastructures maritimes de ces deux villages et dans les secteurs environnants où les vagues interagissent avec le fond marin et d'y évaluer par modélisation l'impact des CC sur le climat de vagues jusqu'à la période 2071-2100.

Le Tableau 5 et la Figure 7 indiquent les positions des différents mouillages. Ils se composent d'un profileur de courant de type *AWAC*, d'un marégraphe et d'un houlographe qui mesurent le profil du courant, les vagues, les glaces, les périodes de la marée, la pression totale, les périodes et les hauteurs des vagues ayant une période > 2 s ainsi que la direction des vagues ayant une période ≥ 3,5 m.

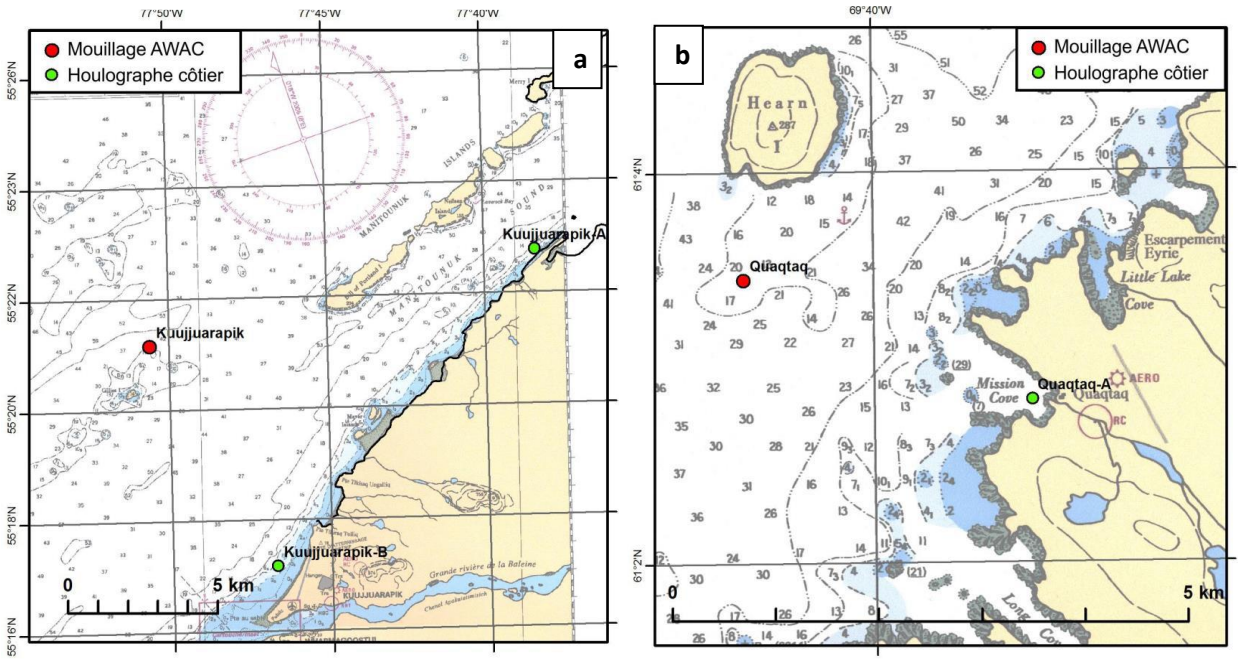
Les données de pression atmosphériques des stations météorologiques des aéroports de Kuujjuarapik et de Quaqtaq ont été récupérées et ajoutées, car la pression atmosphérique doit être soustraite de la pression totale pour obtenir seulement la pression de la colonne d'eau.

Tableau 1 : Localisation géographique et périodes des fonctionnements des mouillages. Les heures sont en UTC. (Neumeier et al., 2019)

Mouillage	Kuujjuarapik 2017	Kuujjuarapik A 2018	Kuujjuarapik B 2018	Quaqtaq 2017	Quaqtaq A 2018
Latitude / Longitude	55° 21.157' N 77° 50.616' W	55° 22.771' N 77° 38.382' W	55° 17.179' N 77° 46.717' W	61° 03.449' N 69° 41.405' W	61° 02.833' N 69° 38.304' W
Profondeur sous zéro marin	30 m	5 m	5 m	35 m	–2 m
Mise à l'eau	2017-08-10 16:58	2018-08-12 22:25	2018-08-12 21:52	2017-08-13 16:12	2018-08-15 21:40
Première donnée valide	2017-08-10 17:09	2018-08-13 23:00	2018-08-13 22:00	2017-08-13 17:09	2018-08-16 00:00
Dernière donnée valide	2018-09-09 16:09	2018-08-19 22:00	2018-08-19 23:00	2018-08-15 17:09	2018-11-06 16:00
Récupération	2018-09-09 16:45	2018-09-19 23:05	2018-09-19 23:45	2018-08-15 17:52	2018-11-06 18:00

2.2.3.2 Analyse des données de vagues

Les données des vagues ont été compilées et représentées sous forme de probabilité de dépassement des hauteurs de vagues, spécifique au lieu où elles sont mesurées. Les données des houlographes fournissent les moments de présence de tempêtes importantes durant le mois d'août et le début de septembre. Les informations des prochaines années d'échantillonnage renseigneront sur la variabilité interannuelle des évènements de tempêtes et viendront confirmer (ou non) des patrons saisonniers (Neumeir et al., 2019).



Positions des mouillages installés à Kuujjuarapik (a) et à Quaqtaq (b). (Neumeier et al., 2019)

Figure 8.

2.2.4 MESURER LES FONDS MARINS : LES DONNÉES BATHYMÉTRIQUES

Massé et Villeneuve (2013) ont utilisé les données bathymétriques GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans), celles fournies par le SHC (Service Hydrographique du Canada) et celles de SRTM30_PLUS (Shuttle Radar Topography Mission) afin de valider des simulations de marées et d'ondes de tempêtes. Ils remarquent que la bathymétrie du SHC est plus profonde que celle de GEBCO dans le détroit d'Hudson, les différences surpassant 10% de la profondeur, ce qui a pour effet de propager les ondes de marée trop rapidement. De son côté, la bathymétrie de SRTM30_PLUS est généralement moins profonde dans le détroit d'Hudson que celle de GEBCO, ce qui résulte en une propagation trop lente des ondes de marée dans l'ensemble du détroit et de la baie d'Hudson. Comme la précision des simulations de marée est intimement liée à celle des données bathymétriques, la grande incertitude de ces dernières, principalement au niveau du détroit d'Hudson, qui agit comme régulateur des échanges de masse entre la baie d'Hudson et la mer du Labrador, vient limiter l'utilisation des simulations de marées dans les prédictions à long terme des niveaux d'eau (Massé et Villeneuve, 2013).

De son côté, Senneville (2018a) a utilisé les données bathymétriques du service hydrographique canadien (SHC) ; les données d'échosondeur liées aux missions scientifiques d'ArcticNet obtenues du Ocean mapping group (OMG) ; les relevés bathymétriques et topographiques sous format Autocad des infrastructures et de leur environ obtenues du MTQ; les relevés bathymétriques et topographiques de certaines rivières obtenus d'Hydro-Québec (HQ). Ces données doivent avoir des grilles de 2 km et 400 m de résolution horizontale à proximité des six sites (Kuujjuarapik, Ivujivik, Umiujaq, Baie Déception, Quaqtaq et Aupaluk) afin de concevoir des modèles numériques. Sur les six sites la carte bathymétrique a été numérisée et les points de sondage et les isolignes de profondeur ont été récupérés. La limite de 16 points de sondage par cellule, près des infrastructures maritimes est suffisante pour cette étude.

2.2.5 MESURER LES CONDITIONS DE GLACE

2.2.5.1 Sites d'études

Six sites ont été identifiés pour l'étude des conditions de glace au Nunavik. Il s'agit, en partant du sud ouest et en progressant en sens horaire le long de la côte de Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq et Aupaluk (Figure 8).

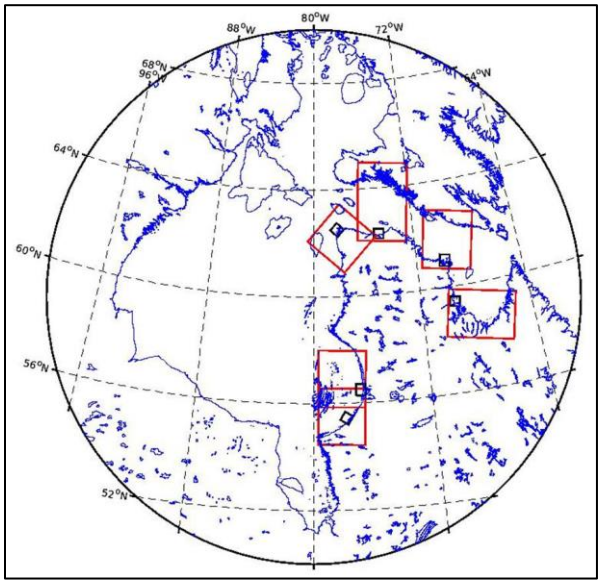


Figure 9. Emplacement des six sites à l'étude Les rectangles rouges et noirs correspondent aux sous-domaines à 2 km et 400 m de résolution, respectivement. (Senneville, 2018)

2.2.5.2 Photographies in situ

Depuis 2009, plus de 400 000 photos[4] des conditions locales de glace ont été acquises à partir de 30 caméras au sol sur 7 sites. Ces photos horaires ont permis d'établir les dates de la période d'englacement et de la période de fonte, et la durée de la saison de glace (Gauthier, 2019), et de confirmer la variabilité temporelle et spatiale du phénomène (Clerc et al., 2012) depuis 2009 ou depuis 2015 (Figure 9).

En 2015, une nouvelle phase d'acquisition d'observations sur les glaces a été initiée au voisinage de six infrastructures maritimes (Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie-Déception, Quaqtaq et Aupaluk). L'objectif est de documenter les concentrations de glace à l'échelle des infrastructures sur une longue séquence temporelle (Bernier et al. 2017, 2019 et Poulin et al., 2018). Ces photographies serviront à raffiner l'échelle (passer de 10 km à 2 km puis à 400 m) du modèle de simulation des conditions d'englacement près des infrastructures.

[4] Toutes les photos, dont certaines en temps réel, sont accessibles sur le portail CAIMAN (Caméras aux Infrastructures Maritimes du Nunavik) au www.caiman.ete.inrs.ca .

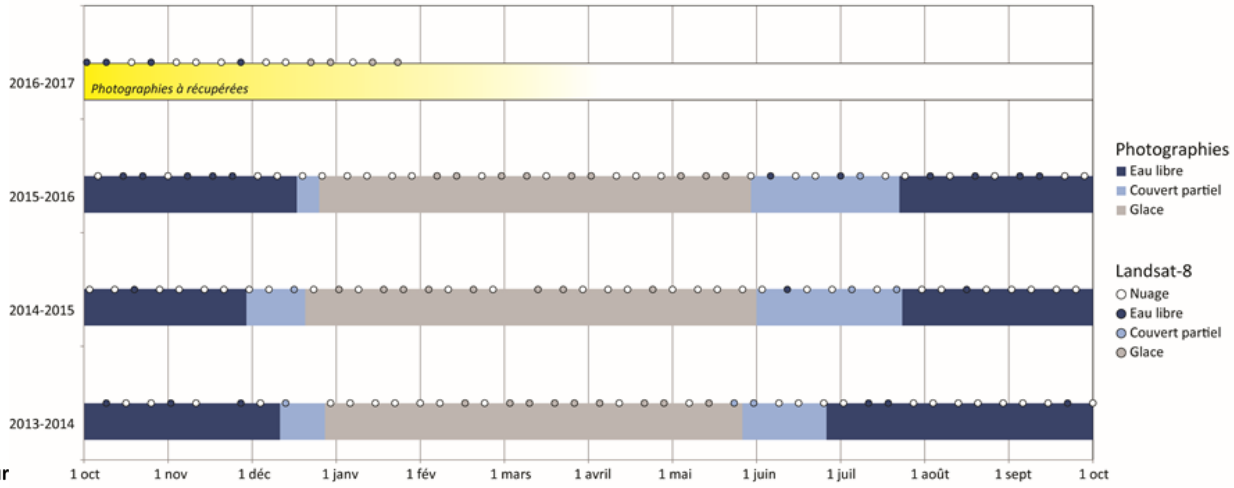
2.2.5.3 *Images satellites*

En parallèle, des centaines d'images satellites ont été utilisées pour caractériser les glaces au niveau régional. La figure 8 montre les zones couvertes par les images satellites de 2 km et 400 m de résolution. De 2009 à 2019, les images radar du satellite RADARSAT-2 ont été utilisées, puis de 2015 à 2019, les images optiques du satellite Landsat-8 ont été ajoutées.

Les images satellites sont acquises ponctuellement au moment où le satellite survole la zone étudiée. Le mode optique ne permet pas de voir au travers des nuages dont la présence masque les glaces. Ainsi, les images satellites fournissent la répartition spatiale du couvert de glace seulement pour certains jours.

L'utilisation d'images de RADARSAT-2 a permis d'étudier la dynamique d'englacement et de fonte sur une zone de 20 km autour des infrastructures des villages d'Umiujaq, Quaqtaq et Kuujjuaq et depuis 2015 au voisinage de Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie-Déception, Quaqtaq et Aupaluk (Clerc et al, 2012).

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre un exemple de la complémentarité entre les photos et les images pour déterminer la chronologie de la saison de glace.



Figur

Saisons de glace déterminées par les caméras (2013-2016) et observations faites sur les images Landsat-8 (2013-2017) pour Umiujaq (Bernier et al, 2017).

2.2.5.4 *Analyse des données*

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, Quaqtaq et Aupaluk (2017-2020) » (Bernier et al., 2019), a pour premier objectif, de poursuivre la documentation historique des conditions de glace de rive à proximité des communautés à l'étude. Une partie de ces observations servira, pour un deuxième objectif, à alimenter un modèle numérique de vague développé à l'ISMER dans le cadre du projet CC16.1. Le troisième objectif de ce projet est de valider le potentiel de l'imagerie satellitaire radar pour déterminer les caractéristiques des vagues. Les premiers résultats contenus dans le rapport d'étape 2 (Bernier et al., 2019) sont prometteurs mais demeurent en attente de validation par des données *in situ* acquises dans le cadre du projet CC16.1.

3. INCERTITUDES, RECONSTITUTION DU PASSÉ RÉCENT ET MODÉLISATIONS DES CHANGEMENTS FUTURS

3.1 LES INCERTITUDES LIÉES À LA MODÉLISATION

Les modèles tentent d'estimer le mieux possible les données observées, mais il existe toujours des incertitudes, entre les données observées et modélisées. Un modèle cherche à représenter les statistiques à long terme de l'état du système, le comportement général du système et son évolution.

Dans le cas des modèles climatiques, ils ne peuvent par fournir une simulation parfaite de la réalité parce que d'une part, les plus importantes composantes du système climatique, à toutes les échelles de temps ou d'espace ne peuvent être résolues avec les capacités informatiques actuelles et d'autre part comme le système climatique est non linéaire, son comportement peut être *chaotique* (IPCC, 2007). La nature chaotique ajoute une incertitude et limite la capacité de projeter tous les aspects des CC (IPCC, 2007).

Les données observées ont également une erreur inhérente (qui vient des erreurs des appareils de mesure, de leur localisation, des bris qui peuvent survenir et une représentativité non homogène). Aussi les séries de données observées ne pourraient pas être identiques à celles d'un modèle même parfait.

Comme les connaissances de la situation climatique passée et actuelle sont généralement imparfaites, les modèles qui utilisent ces informations pour produire une projection climatique le sont aussi.

3.1.1 INCERTITUDE LIÉE AUX CONDITIONS INITIALES

De façons générales, un modèle numérique nécessite une condition initiale et des conditions aux frontières. La théorie stipule que ces conditions, initiale et aux frontières, sont nécessaires afin d'avoir une solution unique. En effet, si ces conditions restent les mêmes d'une simulation à l'autre, la solution sera elle aussi la même. Par exemple, si une simulation est démarrée le 1 janvier 1980 et utilise les mêmes conditions initiales et conditions aux frontières, les résultats de la simulation seront les mêmes à chaque fois que cette simulation sera reprise. Par contre, si les conditions initiales et aux frontières changent, la solution sera différente. Ce qui doit être retenu, c'est que les conditions aux frontières sont essentielles pour bien reproduire la réalité et les simulations climatiques. (Senneville, 2018a).

Dans le cas des modèles climatiques par exemple, la température moyenne sur 30 ans peut varier de ± 2 ou 3 °C entre deux simulations provenant du même modèle dont les conditions initiales varient. Les conditions initiales sont les données atmosphériques fournies au modèle à la date de mise en route d'une simulation. Si une simulation de 30 ans est reprise en modifiant légèrement les conditions initiales, alors une nouvelle climatologie différente de la précédente est obtenue. En répétant l'exercice plusieurs fois avec un même modèle, il est possible d'évaluer l'incertitude découlant de perturbations des conditions initiales à partir d'un même modèle. Ces simulations tirées d'un même modèle pour une même période sont appelées des membres d'un ensemble d'un modèle.

3.1.2 INCERTITUDE LIÉE AUX DIFFÉRENTS MODÈLES

Chaque modèle a ses particularités. Si les conditions initiales d'une simulation sont identiques pour deux modèles différents (par exemple, un modèle canadien et un modèle allemand), les simulations obtenues

seront un peu différentes. Cette différence n'est pas due aux conditions initiales, mais aux particularités des modèles. En répétant les simulations avec plusieurs modèles différents, l'incertitude découlant des modèles eux-mêmes peut être évaluée. Ces simulations tirées de modèles différents pour une même période sont appelées des membres d'un ensemble multi-modèles (multi-model ensemble)

3.1.3 INCERTITUDE LIÉE AUX SCÉNARIOS CLIMATIQUES D'ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE

La nature non linéaire et chaotique du système climatique impose des limites naturelles à l'extension des capacités prédictives des modèles (IPCC, 2013). C'est pourquoi le GIEC a plutôt privilégié la prédiction d'une distribution probable de situations climatiques possibles d'un système futur (IPCC, 2007). Pour ce faire, le GIEC génère des *scénarios d'émission* de *gaz à effet de serre* (ex : RCP4.5 et RCP8.5). Or, l'incertitude vient aussi de ces scénarios.

Des simulations exécutées avec les mêmes conditions initiales et les mêmes modèles, mais en utilisant des scénarios climatiques d'émission de GES différents (voir l'encadré 1 de la synthèse des connaissances), fournissent des résultats différents puisque le climat futur dépend de la quantité de GES émis par l'activité humaine. Sur un horizon lointain, de 50 – 100 ans, les scénarios d'émission de GES sont le principal facteur d'incertitude en ce qui concerne les projections climatiques futures.

3.2 LES MODÈLES CLIMATIQUES

Les modèles climatiques doivent résoudre les équations fondamentales de la mécanique des fluides transposées dans un code informatique qui opère sur une grille de calcul en trois dimensions (2 dimensions horizontales et 1 verticale) (Charron, 2016). Les modèles climatiques doivent simuler le climat de la Terre, il faut donc leur donner un portrait détaillé des données, sous forme d'équation fondamentales (*paramétrage)*, géophysiques de la Terre tels que les limites des continents avec profondeur et altitude ou des caractéristiques physiques tels que l'angle zénithal du solaire ou encore la composition chimique de l'atmosphère.

Il existe de nombreux modèles climatiques développés par autant de centres climatologiques dans le monde tous différents par leur résolution (la taille des cellules de la grille) ou encore par les choix de représentations des phénomènes physiques (Charron, 2016).

En fonction de la résolution des modèles, deux ensembles principaux de modèles climatiques sont distingués, des modèles climatiques globaux (MCG) et des modèles climatiques régionaux (MRC). Les MCG couvrent l'ensemble de la Terre ayant entre environ 400 à 200 km de résolution selon le MCG considéré. Les MRC couvrent une sous-région de la Terre. Ils ont alors un domaine spatial limité (ex : Amérique du Nord), qui leur permet de représenter les processus régionaux à une résolution spatiale plus fine (généralement de moins de 45 km).

Les modèles exécutent les différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre pendant une certaine période de temps pour produire des simulations du climat futur (Charron, 2016).

Pour rester en lien avec le climat global, un MRC doit être alimenté, sur ses frontières avec certaines variables climatiques provenant d'un MCG ou de *réanalyses*. Cette procédure s'appelle le *pilotage* du modèle régional de climat. Les données de réanalyses et les résultats des simulations climatiques servent à alimenter les modèles hydrodynamiques pour évaluer les comportements des éléments géophysiques dans le futur en contexte de CC.

Deux MCG et le Modèle régional climatique canadien (MRCC) ont été utilisés pour calculer les simulations dans les rapports de Savard et al, 2016, Massé et Gallant, 2026 et Senneville et St-Onge-Drouin (2013). Le

tableau 6 présente une liste et un descriptif sommaire des modèles climatiques utilisés dans les études de Savard et al., 2014; Savard, 2016; Massé et Villeneuve, 2013 et Massé et Gallant, 2016.

En bref, le tableau inclut le nom des modèles (première colonne), le nom usuel (ex : ECHAM5) suivi du numéro de membre de la simulation. Les modèles régionaux doivent être alimentés en données à leur frontière par les modèles globaux appelés pilotes. Pour le modèle régional canadien du climat (MRCC), le nom du modèle global utilisé comme pilote est fourni entre parenthèses, par exemple MRCC (CGCM3/#5). Les périodes couvertes par les diverses simulations sont aussi indiquées. La deuxième colonne fournit les abréviations des modèles et des pilotes utilisés dans le texte. La troisième colonne fournit la taille de grille de ces modèles.

Modèles climatiques et pilotes utilisés pour simuler les impacts des changements climatiques sur les tempêtes, les niveaux d'eau et les conditions de glace au Nunavik

Modèle (Pilote)	Abréviation	Résolution	Période							Type de modèle
			1950-2005	1980-2010	1961-2000	2007-2009	2040-2069	2070-2099	2005-2100	
ERA40		277 km			Θ					Réanalyse ou modèle de prévision
NCEP (NCAR)		277 km		X	Θ					
NARR		32 km		ϖ Θ X						
GEM		15 km / 100 km				Θ			Δ	
ECHAM5/#1 SRES-A2	eh51	210 km			X		X	X		Modèles globaux
ECHAM5/#2 SRES-A2	eh52	210 km			Θ X		Θ X	Θ X		
ECHAM5/#3 SRES-A2	eh53	210 km			Θ X		Θ X	Θ X		
CGCM3/#4 SRES-A2	g3#4 / abu /abv	416 km			Θ X		Θ X	Θ X		
CGCM3/#5 SRES-A2	g3#5 /abx / abw	416 km			Θ X		Θ X	Θ X		
MRCC (NCEP) SRES-A2	ade	45 km		X	Θ					Modèles régionaux
MRCC (ERA40) SRES-A2	aex	45 km		X	Θ					
MRCC (CGCM3/#4) SRES-A2	adj	45 km		Ψ	Θ X		X Ψ	Θ X Ψ		
MRCC (CGCM3/#4) SRES-A2	aet	45 km		Ψ	Θ X		X Ψ	Θ X		
MRCC (CGCM3/#5) SRES-A2	aev	45 km		ϖ Ψ #	X Δ		X ϖ Ψ # Δ	X Ψ Δ		
MRCC (ECHAM5/#1) SRES-A2	agx	45 km		Ψ	X		X Ψ	X Ψ		
MRCC (ECHAM5/#3) SRES-A2	ahj	45 km		ϖ Ψ #	X Δ		Θ X ϖ Ψ # Δ	X ϖ Ψ Δ		
MRCC5 (CanESM2/#1; #2;	Bbfg; bbhi; bbjk; bblm;	10 km, 2km et 400 m	Δ						Δ	

#3; #4 et #5) RCP8.5	bbno									

Θ Modélisation du régime des tempêtes (Savard et al., 2014)
X Modélisation du régime des tempêtes (Savard, 2016)
ϖ Modélisation des niveaux d'eau (Massé et Villeneuve, 2013)
Ψ Modélisation des niveaux d'eau (Massé et Gallant, 2016)
Modélisation des conditions de glace (Senneville et St-Onge-Drouin, 2013)
Δ Modélisation des conditions de glace (Senneville, 2018)

3.3 LES MODÈLES HYDRODYNAMIQUES

3.3.1 LA CALIBRATION

Les modèles numériques hydrodynamiques nécessitent une étape de calibration ou d'ajustement avant leur utilisation. La calibration consiste à ce que le modèle recherche les valeurs optimales des paramètres et des coefficients modifiables des relations empiriques, en les comparant avec les données mesurées. Ainsi, lorsque le modèle reconstitue ou reproduit avec un bon niveau de confiance les variations de la variable qu'il doit reproduire selon les séries temporelles des données enregistrées aux stations, le modèle est dit calibré ou validé.

Une fois le modèle calibré, les variations que le modèle va reconstituer pour le passé-récent sont valides et peuvent être utilisées comme intrants dans le modèle aux fins de prédictions futures.

3.3.2 MODÉLISATION DES NIVEAUX D'EAU

3.3.2.1 Reconstitution des niveaux d'eau du passé-récent

Massé et Villeneuve (2013) ont utilisé les niveaux d'eau tirés des analyses harmoniques aux abords de six villages du Nunavik par Benyahya (2012). Massé et Gallant (2016) ont utilisé les données enregistrées par les dix marégraphes disponibles (les 5 sites références précités (sous-section 2.2.1.2.) les 3 autres sites du MTQ, Manitounuk et La Grande) ainsi que les données de vent et de pression atmosphérique fournies par le modèle de réanalyse NARR[5] de 1979 à 2012, pour calibrer le modèle numérique de niveau d'eau Mike 21 (encadré 1).

Le domaine du modèle comprend la baie d'Hudson, la baie James, le détroit d'Hudson, le bassin de Foxe, la baie d'Ungava, la baie de Baffin et une partie de la mer du Labrador (Figure 10).

Encadré 1 : Modèle hydrodynamique Mike21-2D

[5] Modèle régional de Réanalyse de l'Amérique du Nord du Centre national de Prédictions Environnementales (NCEP) de L'Administration Nationale Océanique et Atmosphérique des États-Unis (NOAA). Le modèle de réanalyse NARR fournit des données de vent et de pression atmosphérique de 1979 à 2013 avec une résolution spatiale de 32 km et une résolution temporelle de 3 h.

Le modèle Mike21-2D a été développé par le Danish Hydraulic Institute Water & Environment. Il est conçu pour simuler les écoulements en milieu marin et côtier à partir d'une formulation bi-dimensionnelle des équations de la masse et de la quantité de mouvement. Un forçage externe des niveaux d'eau est imposé à la seule frontière ouverte du modèle située le long d'une ligne reliant Nain (Labrador) et Qaqortoq (Groënland) (Figure 10). Le modèle prédit à chaque point de grille, ou maille, du domaine le niveau d'eau et la vitesse du courant sur la verticale (Massé et Villeneuve, 2013).

La validation du modèle Mike 21 s'est faite en deux étapes. D'abord en imposant seulement les ondes de marée aux frontières ouvertes du modèle, la validation des simulations de marée a été faite en comparant les amplitudes de marée lunaire de Mike21 avec celles du modèle de marées océaniques global DTU10[6]. Puis, après que les ondes de tempêtes ont été incluses, les tests de validation ont comparé les ondes de tempête simulées à celles extraites par analyse harmonique aux stations marégraphiques.

Puisque les objectifs de l'étude sont orientés sur les niveaux d'eau extrêmes, la comparaison a été effectuée durant la période des tempêtes automnales (septembre, octobre et novembre) qui présente la majorité des plus grosses surcotes et décotes (Villeneuve et Gallant, 2016).

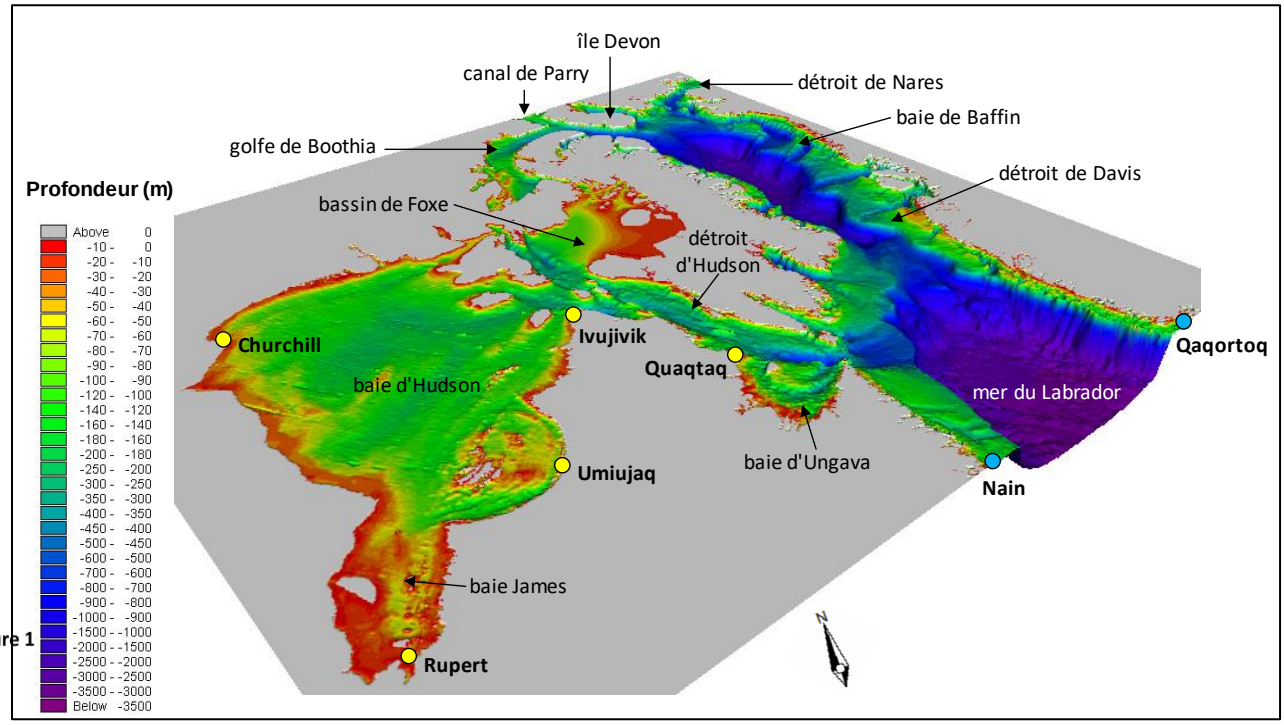


Figure 1 Domaine du modèle hydrodynamique Mike21-2D et bathymétrie utilisée. La limite extérieure du modèle est située entre les deux points bleus (Nain, au Labrador et Qaqortoq, au Groenland). Les autres limites marines sont fermées. Les points jaunes indiquent les stations qui ont été utilisées pour calibrer le modèle. D'après Massé et Gallant (2016).

[6] Le DTU est le Modèle de marée océanique global de l'Université Technique du Danemark

Les régressions linéaires servent à comparer les niveaux d'eau observés et modélisés pour les 5 sites choisis comme référence (Quaqtaq, Ivujivik, Umiujaq, Rupert et Churchill). Massé et Gallant (2016) ont calculé les coefficients de détermination et la pente des distributions de Gumble[7] pour la période 1980-2009 pour valider les niveaux d'eau extrêmes hauts et bas obtenus par modélisation hydrodynamique. Autant pour le niveau total que le niveau non-tidal, le modèle reproduit de manière satisfaisante les niveaux observés quoique les écarts entre les observations et le modèle soient plus élevés pour les extrêmes bas que les extrêmes hauts (figure 11).

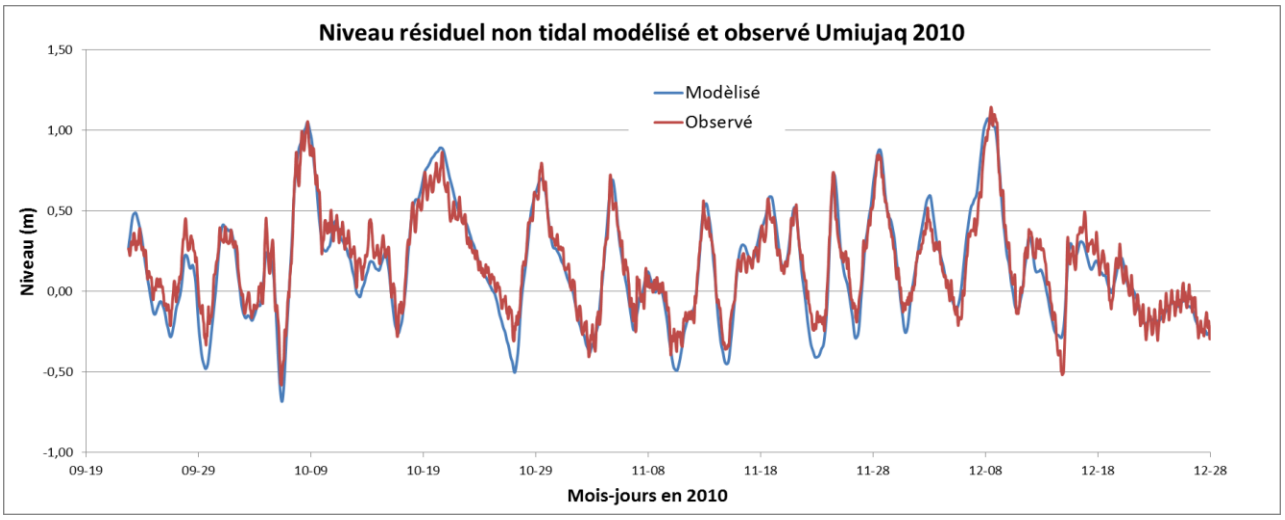


Figure 12. Comparaison du niveau non-tidal mesuré et modélisé à Umiujaq du 1er août au 31 décembre 2010. les niveaux non-tidaux observés (en rouge) et modélisés (en bleu) D'après Savard et al. (2014).

3.3.2.2 Modélisation des niveaux d'eau futurs

Dans la région de la baie d'Hudson, de la baie James, du détroit d'Hudson et de la baie d'Ungava, à cause de l'absence de longues séries chronologiques de mesures de niveaux d'eau, il est nécessaire d'utiliser des simulations pour établir des niveaux d'eau actuels aux sites qui n'ont pas de stations de mesures.

Cependant, lorsque des données marégraphiques ont été enregistrées, la reconstruction directe des signaux de marée du passé-récent à partir des composantes extraites par analyse harmonique des niveaux d'eau a été privilégiée (Massé et Villeneuve, 2013).

Massé et Villeneuve (2013) et Massé et Gallant (2016) ont alimenté le modèle hydrodynamique avec des simulations climatiques pour les stations marégraphiques. Les données atmosphériques des réanalyses NARR ont permis de reconstituer les séries temporelles de niveaux d'eau, de la période de 1980 à 2009 et de 1979 à 2013. Puis les données météorologiques du MRCC ont permis de produire deux simulations

[7] La méthodologie est décrite en détail dans Massé et Gallant (2016); la projection de Gumbel est la distribution statistique qui représente le mieux les extrêmes de niveaux d'eau observés. Loi de Gumble est une loi d'extremum généralisée qui sert à représenter des phénomènes de valeurs extrêmes (minimum ou maximum). La pente et le coefficient de détermination idéals possèdent une valeur égale à 1.

climatiques aet et ahj pour les périodes 1980-2009, 2040-2069 et 2070-2099 et cinq simulations de climatiques adj, aet, aev, agx et ahj, pour les périodes 1980 – 2012; 2040 - 2069 et 2070-2099 (sauf aet par manque de données). Ainsi des séries temporelles horaires des hauteurs d'eau non tidal (signal d'ondes de tempête), tidal (signal de marée) et total (tidal plus non tidal) ont pu être reconstituées pour les 6 sites du MTQ (Massé et Villeneuve, 2013 et pour les 23 sites longeant les côtes de la baie d'Ungava, du détroit d'Hudson, de la baie d'Hudson et de la baie James (Massé et Gallant, 2016). La figure 4 indique la position de ces 23 sites.

3.3.2.3 Incertitudes spécifiques à l'étude sur les niveaux d'eau

Le modèle utilisé par Massé et Villeneuve (2013) et Massé et Gallant (2016) reproduit relativement bien les facteurs les plus importants qui font varier les niveaux d'eau (la pression atmosphérique, la marée et le vent). Néanmoins quatre incertitudes connues doivent être considérées.

1- Autres facteurs physiques non examinés responsables du niveau d'eau.

Comme Massé et Gallant (2016) le signalent, leurs travaux se limitent aux variations du niveau d'eau causées par la marée et les ondes de tempêtes sur une courte période de temps. Ceci sous-entend qu'ils ne tiennent compte ni de l'élévation du niveau de la mer du aux changements climatiques ni des facteurs locaux tels que la fonte des glaciers, le débit des rivières et les vents locaux qui pourtant pourraient contribuer de façon non négligeable à la hausse des niveaux d'eau.

Ils ont aussi négligé le relèvement isostatique en utilisant des données bathymétriques fixes. Massé et Gallant (2016) ont contourné cette source d'erreur en extrayant la marée à chacun des sites après le calcul du modèle et en y substituant la marée reconstituée par les données marégraphiques lorsqu'elles étaient disponibles, par les données de DTU10 ou celles du MPO[8]. Cependant, pour des études sur un grand nombre de sites et pour les modélisations futures de périodes lointaines, négliger le relèvement isostatique peut être une source d'erreur notamment sur la côte de la baie d'Hudson (James et al., 2014).

2- Séries temporelles des données mesurées trop courtes (2 ou 3 ans)

Pour estimer la période de retour des événements extrêmes (tempêtes décennales et centennales) avec un fort niveau de confiance, il faut disposer de séries temporelles d'observation de plus de 30 ans.

3- Sous estimation de l'amplitude des ondes de tempête dans le détroit d'Hudson

À la frontière ouverte du modèle, des erreurs ont été introduites par l'utilisation de l'effet de *baromètre inverse* qui simplifie la condition de niveau d'eau résiduel (Massé et Villeneuve, 2013). Cette simplification à la frontière pourrait avoir contribué en partie aux erreurs sur la modélisation des ondes de tempête le long du détroit d'Hudson. Mais cette source d'erreur a un effet restreint à l'intérieur de la Baie d'Hudson qui est surtout affectée par les processus atmosphériques locaux, car cette région est partiellement isolée de la mer du Labrador par le détroit d'Hudson (Massé et Gallant, 2016). Selon Massé et Villeneuve (2013), ces erreurs pourraient être diminuées en utilisant les résultats d'un modèle d'ondes de tempête global à la frontière de la mer du Labrador.

4- Imprécisions des données bathymétriques

[8] Le MPO fournit des prédictions de marée basées sur des observations sur son site Internet.

Les trois sources de données bathymétriques cumulent entre elles une différence supérieure de 10% de la profondeur dans le détroit d'Hudson. Ce manque de précision des sources de données bathymétriques, avec lesquelles le modèle a été testé, limite l'utilisation des simulations de marées dans les prédictions à long terme des niveaux d'eau (Massé et Villeneuve, 2013).

5- Sous évaluations des réanalyses NARR des niveaux d'eau par rapport aux simulations du MRCC sauf pour les simulations aev et ahj

Les processus climatiques (données de vent et de pression atmosphérique) provenant du modèle NARR sont imposés sur l'ensemble de la surface libre du domaine de calcul (Figure 10) à titre de conditions climatiques réelles du passé. Ropars (2014) met en garde quant à l'utilisation des réanalyses NARR. Il a comparé les résultats de calcul de niveaux d'eau totaux, des niveaux de surcotes et des niveaux de décotes avec les simulations climatiques MRCC et avec les réanalyses NARR et a montré que de façon systématique l'utilisation des réanalyses NARR sous-évaluaient aussi bien des niveaux d'eau que des niveaux de surcote et de décote par rapport à l'utilisation des simulations MRCC. Il remarque que cet effet est particulièrement sensible dans les zones à faible marnage. Par contre, il constate que la sous-estimation observée des résultats de calcul avec les réanalyses NARR n'est pas observée lorsqu'il utilise les simulations aev et ahj du MRCC (voir tableau 6).

3.3.3 ANALYSE DES TEMPÊTES

Les tempêtes qui transitent ou se forment dans la baie d'Hudson atteignent les côtes du Nunavik. Il est donc essentiel pour les communautés du Nunavik de connaitre les impacts des CC sur la formation et l'intensité des tempêtes dans la baie d'Hudson. Malheureusement, la situation géographique de la baie d'Hudson fait en sorte qu'elle a été plutôt mal servie par les grandes études sur l'évolution des tempêtes. En effet, afin de bénéficier des données provenant des modèles climatiques régionaux centrés sur l'Arctique, les analyses de tempêtes réalisées dans cette région se limitent au nord du 65 °N. La baie d'Hudson ne figure pas dans ces études car son secteur septentrional se situe au sud du 65 °N dans la zone dite subarctique. Les études sur l'Arctique ne sont donc pas transposables dans la baie d'Hudson. Néanmoins, les études sur l'Arctique offrent des pistes d'analyses et d'interprétation scientifiquement intéressantes car la saisonnalité de l'activité cyclonique de la baie d'Hudson ressemble à celle de l'Arctique en raison de la présence de glace marine. La question de la disparition graduelle des glaces y est primordiale et se produit en été, de juin à août (JJA).

En fait, la baie d'Hudson se situant dans les latitudes moyennes, elle devrait, en théorie connaitre des similitudes avec la circulation de l'océan Atlantique. Or, les études sur la circulation de l'océan Atlantique ont surtout été menées sur la période de novembre à mars quand l'activité cyclonique est maximale dans l'océan Atlantique. La saison de ces études se situe en dehors de la saison la plus importante pour la baie d'Hudson. Il n'est donc pas possible de transposer les résultats de la circulation de l'océan Atlantique à la circulation de la baie d'Hudson.

L'étude de Savard, et al. (2014) a testé la possibilité d'analyser l'évolution des tempêtes dans la baie d'Hudson. C'est la première et la seule étude sur les tempêtes qui a été effectuée sur la baie d'Hudson. L'étude de Savard et al. (2014) étant un premier test elle doit être complétée. La méthodologie d'une nouvelle analyse devrait s'inspirer des meilleures études réalisées tant en Arctique qu'aux latitudes moyennes tout en prenant compte des particularités de la baie d'Hudson. Par exemple, dans la baie d'Hudson il faut tenir compte des processus d'échanges de chaleur qui dominent lors de la phase d'intensification des tempêtes (Seiler, 2019) et du fait que ces processus qui opèrent à des échelles assez fines sont sensibles aux paramétrages physiques des modèles régionaux de climat (Akperov et al. 2019). De plus, plusieurs tempêtes qui transitent par la baie d'Hudson sont dominées par des processus d'une échelle

supérieure et sont donc sensibles au choix du modèle climatique global (Akperov et al. 2019; Chang 2018; Seiler 2019). L'étude de Savard, et al. (2014) *doit donc être complétée avec des ensembles de simulations issues d'un plus grand nombre de MGC et/ou par le plus grand nombre possible de MRC pilotées par la plus grande variété possible de MGC* (Akperov et al. 2019).

Actuellement de plus en plus de recherches utilisant les modèles récents améliorés laissent à penser que la connaissance et la modélisation des tempêtes dans la baie d'Hudson permettront bientôt de mieux y comprendre les interactions. Une des difficultés rencontrées est de comprendre les interactions et les rétroactions entre les variations de la glace et les variations des tempêtes. Plusieurs travaux tentent d'élucider cette complexité et plusieurs hypothèses prometteuses sont à l'étude sans avoir encore donnés d'explications complètes (Crawford et Serreze, 2016; Koyama et al., 2017). Les modèles climatiques – globaux et régionaux – plus récents (CMIP5, CORDEX, et bientôt CMIP6) se sont améliorés sur les processus reliés aux tempêtes et ont des résolutions spatiales et verticales affinées (Colle et al., 2013; Zappa et al. 2013).

3.3.4 MODÉLISATION DES VAGUES

En l'absence d'observations directes, les seules données disponibles sur les vagues proviennent de simulations numériques. Par exemple, Savard et al. (2014) ont utilisé le modèle de vagues d'Environnement Canada (Jacob et al., 2004) pour identifier les dates où de fortes vagues de plus de trois mètres pouvaient approcher les côtes du Nunavik dans la baie et le détroit d'Hudson au large de Quaqtaq et d'Inukjuak pour la période 2007-2009.

De son côté, Ropars (2014) a utilisé le modèle de génération de vagues GENER v.1.32 pour reconstituer des séries temporelles de direction des vagues, de hauteur significative (Hs) et de période de pointe (Tp) en un point précis au large des infrastructures maritimes de Quaqtaq et d'Umiujaq pour la période 1980-2010 et 2040-2070 à l'aide des simulations climatiques MRCC-ahj et MRCC-aev (Tableau 6).

Le projet de recherche mené par l'ISMER de 2017 à 2021 vise, en premier lieu, à acquérir des données sur les vagues et les courants de glace et des données bathymétriques près des infrastructures maritimes à Quaqtaq et Kuujjuarapik. Ce projet vise également à implanter un modèle numérique de vagues pour évaluer l'impact des CC sur le régime des vagues selon différents scénarios climatiques pour la période 2017-2020 à Quaqtaq et Kuujjuarapik. Ce modèle générera des séries temporelles de vagues pour la période 1981-2100. Il permettra également d'évaluer l'impact des CC sur la dynamique des vagues dans le futur (2040-20270 et 2070-2090). Les premiers tests de modélisation ont été réalisés pour le secteur de Kuujjuarapik. Deux cas simples, avec des vents de tempêtes, mais sans vagues venant du large, sont présentés dans le rapport d'étape 1 de ce projet (Neumeier et al., 2019). Dans la première simulation de vagues (A), le vent vient du nord à une vitesse de 20 m/s. Dans la deuxième simulation de vagues (B), le vent vient de l'ouest à la même vitesse de 20 m/s. Pour les deux simulations, le modèle représente bien la propagation de l'énergie des vagues à travers le domaine et génère des vagues atteignant plus de 2 m (hauteur significative).

Lors de la modélisation des impacts des vagues sur le littoral, il faut considérer le niveau d'eau s'il est accentué par une surcote de tempête, ainsi que les dynamiques près de la rive telle que la hauteur du jet de rive et l'écoulement de l'eau. Ces paramètres sont importants pour comprendre le phénomène de submersion et complexifie la modélisation. Il existe déjà des modèles empiriques qui évaluent le jet de rive. Didier et al. (2019) ont utilisé le modèle XBeach sur une échelle locale, à Maria, dans le golfe du Saint Laurent, en considérant un large éventail de paramètres environnementaux (les vagues, les pentes des plages, l'amplitude de la marée, les types de plages (forme et composition sable/graviers). Le modèle XBeach est reconnu pour sa capacité à simuler la propagation de la vague et la submersion des

environnements proches de la rive dans le contexte de l'élévation du niveau de la mer. L'étude de Didier et al. (2020) montre que jet de rive a un effet dominant sur les autres forces hydrodynamiques mais qu'en incluant la pente de la plage, la compréhension des composants du jet de rive peut être améliorée. Leur étude offre un fort potentiel pour évaluer des morphologies d'environnements côtiers différentes ayant des fetchs courts.

3.3.5 MODÉLISATION DES CONDITIONS DE GLACE

3.3.5.1 Reconstitution des conditions de glaces passées

Le Modèle Océanique Régional – Baie d'Hudson (MOR-HB) a été utilisé dans le projet de recherche n°CC05.1 mené par Senneville (2018a) et Senneville et St-Onge Drouin (2013) (encadré 2). Le domaine du modèle couvre le système de la baie d'Hudson, incluant la baie James, le bassin de Foxe, la baie d'Ungava et la baie et le détroit d'Hudson. MOR-HB a permis de reconstituer des séries temporelles de concentration et d'épaisseur des glaces de mer à une résolution spatiale de 10 km pour les deux périodes futures dont les résultats ont été compilés dans l'atlas des conditions de glace (Senneville, 2018b). Les conditions aux frontières océaniques ouvertes sont essentielles pour bien reproduire la réalité et les simulations climatiques. Pour MOR-HB, les conditions initiales comprennent la salinité, des niveaux d'eau et de la température, au départ de la simulation, sur l'ensemble du système de la baie d'Hudson, incluant toutes les côtes du Nunavik.

Encadré 2. MOR-HB : Modèle Océanique Régional – Baie d'Hudson

Le modèle MOR-HB a été développé, en partie, par l'ISMER (Saucier et al., 2004). Il est constitué de deux composantes couplées : un simulateur océanique, nommé MOR, et un simulateur de glace de mer, nommé CICE. Le couplage implique que les résultats de chacun des simulateurs sont échangés dynamiquement et s'influencent mutuellement. Le simulateur océanique est basé sur les équations du mouvement ainsi que la conservation de la masse. De plus, une équation d'état fait le lien entre la densité du fluide et certaines variables comme sa température et sa salinité. D'autres équations sont nécessaires pour déterminer les processus qui ne peuvent être résolus, comme la turbulence. Le simulateur de glace de mer (CICE) traite deux aspects : la thermodynamique et la dynamique des glaces de mer. La partie thermodynamique détermine la production ou la fonte des glaces de mer en fonction des échanges de chaleur entre l'eau, la glace et l'atmosphère. La dynamique des glaces détermine la façon dont réagissent les glaces en fonction des stress appliqués par l'eau et l'atmosphère (la rhéologie) et la façon dont s'empilent les glaces une fois que les pressions internes dépassent un seuil de rupture (empilement).

Pour valider le modèle, Senneville et St-Onge Drouin (2013) ont comparé les résultats de la première version du modèle CICE avec les observations de thermographes, de niveaux d'eau, de profils CTD (conductivité, température, profondeur) et de concentration et d'épaisseur de glaces. Ils ont établi des relations empiriques entre les concentrations de *glace de mer* et de *glace de rive* (l'absence, couverture partielle ou couverture totale) générées par MOR-HB et observées sur les photographies horaires à Umiujaq, Quaqtaq et Kuujjuaq par l'INRS, pour la période de prise de données de 2009 à 2012. De façon générale, le modèle reproduit bien la concentration moyenne et le volume de glace total ainsi que les variations interannuelles de ces paramètres, mais il sous-estime légèrement la concentration de glace.

Senneville (2018a) a utilisé la cinquième version améliorée du modèle de simulation de glaces CICE (CICE5) qui tient compte des processus physiques permettant de prendre en compte l'effet d'attachement et de formation de la glace de rive et la possibilité aux glaces de mer de s'ancrer sur le fond marin. Selon la

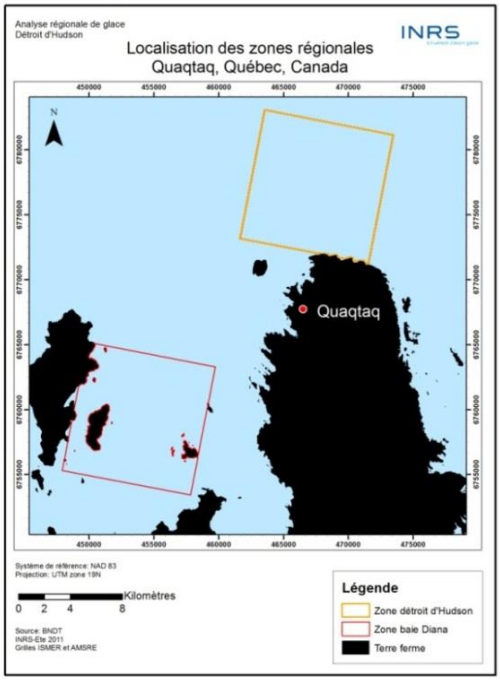
distribution statistique de la bathymétrie et celle de la glace, il est possible qu'il y ait un contact entre le fond marin et la glace. Plusieurs mécanismes permettent de remettre des glaces en mouvement. Elle peut se libérer quand ces stress seront supérieurs à celui entre la glace et le fond marin ou quand le niveau d'eau augmente, par les marées par exemple. Une augmentation du niveau de la mer diminue la possibilité de contact entre la glace et le fond marin.

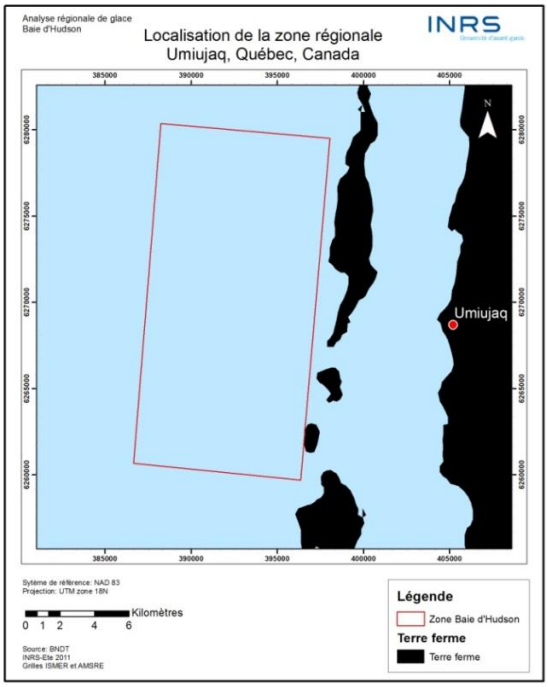
La stabilité de CICE5 a été validé par les photographies des glaces de rives et des données issues des travaux d'interprétation d'images satellitaires fournies par l'équipe de Monique Bernier (INRS-ÉTÉ; projet CC09.2) et est maintenant jugée satisfaisante à haute résolution (400m).

3.3.5.2 Modélisation des conditions de glace futures

Comme les séries temporelles produites à l'aide des relations empiriques sont à l'échelle des observations utilisées pour les produire, la trop faible résolution spatiale du modèle (10 km) n'a pas permis d'effectuer des prévisions de conditions de glace à l'échelle des infrastructures maritimes. Les relations empiriques ont été utilisées avec les simulations climatiques ahj et aev du MRCC permettant d'obtenir, pour chaque village, des séries temporelles de conditions de glace de rive pour 1981 à 2010 et pour 2040-2070.

Afin d'être en mesure de comparer des données de sources différentes dans des secteurs pertinents, les données ont été générées pour les mailles du domaine du modèle MOR-HB développé par l'ISMER (Figure 12). Chaque maille est un carré de 10 x 10 km. Pour Quaqtaq, deux mailles indépendantes et pour Umiujaq, deux mailles contiguës ont été utilisées afin d'extraire les statistiques à partir des cartes du Service canadien des glaces et celles du National Snow and Ice Data Center. Pour chaque maille, les concentrations des glaces à différentes échelles (régionales et locales) ainsi que les dates d'englacement et de fonte ont été extraites et compilées dans une base de données transférée à l'ISMER afin de servir à valider la modélisation des conditions de glace.





Localisation des mailles utilisées pour extraire les concentrations de glace représentatives du régime des glaces à Quaqtaq (baie Diana et détroit d'Hudson) et Umiujaq (à l'ouest des îles Nastapoka dans la baie d'Hudson).

Figure 13

Pour compléter la base de données, chaque processus d'englacement ou de fonte a été décrit dans l'espace et dans le temps et selon chaque type de support (images satellitaires, photos). Ceci a permis d'établir le régime des glaces autour des infrastructures de Quaqtaq, Umiujaq et Kuujjuaq. L'emphase a été mise sur les événements et les paramètres climatiques significatifs et susceptibles d'engendrer des conditions posant des risques potentiels pour les infrastructures maritimes. Aussi, pour chaque image RADARSAT-2 acquise, l'état de vulnérabilité des infrastructures a été noté : protégée par la glace, vulnérable (*i.e.* comporte un risque associé aux glaces) ou exposée (*i.e.* sans risque associé aux glaces, mais exposée aux intempéries).

Le passage d'une résolution de 10 km à 2 km a immédiatement changé le comportement des glaces près des côtes dans le modèle. L'augmentation de la finesse de la résolution a fait apparaitre des baies et des bras de mer qui créent des points d'ancrage facilitant l'établissement de la glace de rive. Ceci s'est fait sans même avoir ajouté de nouveaux processus au modèle de glace de rive. Elles ont été validées à l'aide d'observations (Senneville, 2018a).

Les auteurs invitent le lecteur intéressé à consulter ces rapports pour plus d'information.

GLOSSAIRE

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).

Chaos : un système dynamique, tel que le système climatique, gouverné par des équations déterministes non linéaires, peut produire un comportement erratique ou chaotique lorsque de très petits changements dans les conditions initiales du système conduisent à travers le temps, à des changements importants et apparemment imprévisibles. Un tel comportement chaotique peut limiter la prédictibilité des systèmes dynamiques non linéaires pour des périodes de temps futures spécifiques, cependant, des changements dans ses statistiques peuvent être prédictibles si les changements de paramètres du système ou des conditions aux limites extérieures sont données (IPCC, 2013).

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.

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.

Hauteur significative des vagues : La moyenne du tiers supérieur de l'ensemble des vagues qui est généralement considérée, par les océanographes, comme 4 fois l'écart-type du signal. (Ifremer.fr)

Jet de rive (run-up) : 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.

Niveaux d'eau extrême : 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.

Niveaux de la mer absolu et relatif : Lorsque les scientifiques parlent d'élévation du niveau de la mer, ils parlent en réalité du niveau absolu de la mer qui est mesuré par rapport au centre de la Terre. 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.

Paramétrage: Dans les modèles climatiques, ce terme réfère à la technique utilisée pour représenter les processus qui ne peuvent pas être explicitement résolus à l'échelle spatiale ou temporelle du modèle par des relations entre l'échelle du modèle (résolution plus large). Ce sont des processus qui sont à une échelle plus fine. (IPCC, 2007)

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.

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.

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.

Surcote : 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.

.

RÉFÉRENCES

Akperov M., Rinke A., Mokhov I. I., Semenov V. A., Parfenova M. R., Matthes H., Adakudlu M., Boberg F., Christensen J. H., Dembitskaya M. A., Dethloff K., Fettweis X., Gutjahr O., Heinemann G., Koenigk T., Koldunov N. V., Laprise R., Mottram R., Nikiéma O., Sein D, Sobolowski S., Winger K., and Zhang W., (2019). « Future Projections of Cyclone Activity in the Arctic for the 21st Century from Regional Climate Models (Arctic-CORDEX) ». Global and Planetary Change, 182(April).

Benyahya, L. (2012). « Analyse harmonique de données de niveaux d'eau dans le Nord du Québec ». Rapport soumis à Ouranos, 12 février 2012, 46 p. + annexes.

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 : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq 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 pp.

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 : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq et Aupaluk ». Rapport final réalisé pour le compte du Ministère des Transports du Québec. Institut national de la recherche scientifique, Québec, 155 pp.

Boisson A. (2019). « Caractérisation et modèles d'évolution des environnements côtiers du Nunavik », Thèse de doctorat en sciences géographiques, Université Laval, Québec, Canada, 267 pp.

Carbonneau A.-S., L'Hérault E., Aubé-Michaud S., Taillefer M., Ducharm, M.-A., Pelletier M., et Allard M. (2015). « Production de cartes des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour 8 communautés du Nunavik ». Rapport final. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 127pp.

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 pp.

Chang E. K. M., (2018). « CMIP5 Projected Change in Northern Hemisphere Winter Cyclones with Associated Extreme Winds ». Journal of Climate 31(16):6527–42.

Clerc C., Poulin J., Gauthier Y., Bernier M., Bleau S., Gignac C., Bédard J.S., et Duhamel-Beaudry E. (2012). « Descripteurs et indicateurs de la couverture glacielle au Nunavik: Quaqtaq, 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 pp.

Colle B., Zhang Z., Lombardo K., Chang E., Liu P., et Zhang M. (2013). « Historical Evaluation and Future Prediction of Eastern North American and Western Atlantic Extratropical Cyclones in the CMIP5 Models during the Cool Season ». Journal of Climate 26(18):6882–6903.

Collins M., Knutti R., Arblaster J., Dufresne J.-L., Fichefet T., Friedlingstein P., Gao X., Gutowski W.J., Johns T., Krinner G., Shongwe M., Tebaldi C., Weaver A.J. et Wehner M. (2013). « Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility ». Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P. M. Midgley (dir.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution

of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 1029–1136). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Crawford A. D. et Serreze M. C. (2016). « Does the Summer Arctic Frontal Zone Influence Arctic Ocean Cyclone Activity? ». Journal of Climate 29(13):4977–93.

Didier D., Caulet C., Bandet M., Bernatchez P., Dumont D., Augereau E., Floc'h F., Delacourt C., (2020) « Wave runup parameterization for sandy, gravel and platform beaches in a fetch-limited, large estuarine system ». Continental Shelf Research 192(2020) 104024.

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 2019, 9, 76. Doi: 10.3390/geosciences9020076.

Didier D., Bernatchez P., Boucher-Brossard G., Lambert A., Fraser C., Barnett R.L. et Wiertz S. (2015) « Coastal Flood Assessment Based on Field Debris Measurements and Wave Runup Empirical Model. » Journal of Marine Science Engineering (3) : 560-590. Doi :10.3390/jmse3030560.

Didier D., Bernatchez P. et Lambert A. (2014). « Scénarios de submersion côtière pour la municipalité de Maria dans le cadre d'une analyse économique ». Rimouski, Chaire de recherche en géoscience côtière –LDGIZC-UQAR for/pour Ouranos, 33 p + annexes.

Gauthier Y., (2019). « Calendrier 2019-2020: La météo au Nunavik, Les observations environnementales du réseau CAIMAN » http://www.caiman.ete.inrs.ca/img/CAIMAN_2019_2020.pdf

IPCC (2007) « Climate Change 2007 : The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ». [Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M. and Miller H. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

IPCC (2013). « Climate Change 2013 : The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ». [Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K. Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and MidgleyP. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

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.

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.

Jacob D., Perrie W., Toulany B., Saucier F., Denis Lefaivre D. et Turcotte V., (2004). « Wave Model Validation in the St Lawrence River Estuary ». &th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. Octobre 21-25, Banff, Alberta, Canada. 14 pp.

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., Senneville S., Caya D. et Saucier F. (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

Koyama T., Stroeve J., Cassano J., et Crawford A. (2017). « Sea Ice Loss and Arctic Cyclone Activity from 1979 to 2014 ». Journal of Climate 30(12):4735–54

Massé A. et Villeneuve M. (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 p. + annexes.

Massé A. et Gallant N. (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 p. + annexes.

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 pp.

Poulin J., Bernier M. et 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: Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq 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 pp.

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 p. + annexes.

Rosu C. (2005). « Les caractéristiques des cyclones et l'apport d'eau dans les bassins versants du Québec ». Mémoire de maîtrise en Sciences de l'atmosphère, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada, 118 pp.

Saucier F., Senneville S., Prinsenberg S., Roy F., Smith G., Gachon P., Caya D. et Laprise R. (2004). « Modelling the sea ice-ocean seasonal cycle in Hudson Bay, Foxe Basin and Hudson Strait, Canada ». Climate Dynamics, 23(3): 303-326.

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 pp.

Seiler, Christian. 2019. "A Climatological Assessment of Intense Extratropical Cyclones from the Potential Vorticity Perspective." *Journal of Climate* 32(8):2369–80.

Senneville S. (2018a). « Modélisaton des glaces de rive à fine échelle à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik en contexte de changements climatiques : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception Quaqtaq 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 pp.

Senneville S. (2018b). Atlas mensuel climatique de la concentration et épaisseur de glace au Nunavik. (Annexe rapport finale MTQ, projet CC05.1) 74 p.

Senneville S. et St-Onge Drouin S. (2013) Rapport final : 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 pp.

Sinclair M.R. (1997) « Objective Identification of Cyclones and their Circulation Intensity, and Climatology ». *Weather and Forecasting,* 12(3): 595-612.

Tremblay G. et Lorrain S. (2013) Achat de marégraphes, installation et collecte de données – Infrastructures maritimes au Nunavik (Kuujjuaq, Quaqtaq, Kangiqsujuaq, Ivujivik, Akulivik, Puvirnituq et Umiujaq) Rapport d'intégration 2012, Environnement Illimité Inc., 144 p. + annexes.

Zappa G., Shaffrey L. C., et Hodges K. I. (2013). « The Ability of CMIP5 Models to Simulate North Atlantic Extratropical Cyclones ». Journal of Climate 26(15):5379–96.

OURANOS

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