



SOCIÉTÉ DE
DÉVELOPPEMENT
CRIE



LA GRANDE ALLIANCE

ÉTUDE DE PRÉFAISABILITÉ - PHASES II & III – INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT

NOTE TECHNIQUE 13A

PORT EN EAU PROFONDE

CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES PHYSIQUES

VERSION FINALE

DATE : LE 25 MARS 2024

PRÉPARÉ PAR :

Jan Matthé, P. Eng., M.Sc., ir. (C.-B.)
Ingénieur portuaire senior
Ports, Genie Côtier et Maritime
Numéro de licence : 30989

Keyvan Mahluji, M.Sc., P. Eng. (C.-B.)
Ingénieur côtier principal sr.
Numéro de licence : 32428



SOMMAIRE EXÉCUTIF

La présente note technique 13 a été divisée en deux parties :

- 13A : Conditions environnementales physiques;
- 13B : Conception du port.

La présente note technique 13A relative à l'étude sur un port en eau profonde porte sur la description et l'évaluation des conditions environnementales physiques le long du littoral de Whapmagoostui/Kuujuarapik, afin d'identifier la zone la plus appropriée pour la construction d'un port.

Au moment de la rédaction de ce document, la taille du port et son objectif n'étaient pas encore connus (sous réserve de l'achèvement de l'étude de marché), et toutes les options portuaires sont envisagées, allant d'un port pour petits bateaux saisonniers pour les navires nécessitant uniquement une profondeur d'eau de 6,0 m maximum à une exploitation à l'année pour un port en eau profonde nécessitant des navires d'une profondeur d'eau de 18,0 m maximum.

Les conditions environnementales physiques qui sont favorables à un port pour petits bateaux ne le sont pas nécessairement pour un port en eau profonde et vice versa.

Les conditions physiques principales étudiées sont :

- la dynamique des glaces;
- l'océanographie (bathymétrie, vent, vagues, courants et niveaux d'eau, tant au niveau opérationnel que les extrêmes);
- la géomorphologie côtière et fluviale.

Après avoir étudié les données obtenues pour définir les conditions environnementales physiques, nous avons sélectionné les zones qui présentent le moindre risque de phénomène environnemental physique (susceptible d'endommager les structures, d'entraîner un besoin d'entretien important ou d'entraver les opérations pour les deux types de ports), qui sont susceptibles d'offrir une meilleure opérabilité ou dont les coûts d'investissement sont moindres.

Bien que régis par des phénomènes physiques différents, il appert que l'emplacement choisi pour l'option du port pour petits bateaux soit le même que celui choisi pour le port en eau profonde. Ceci permet donc d'envisager l'expansion du port pour petits bateaux en un port en eau profonde si nécessaire, en minimisant les dépenses d'investissement, et permettrait même de conjuguer un potentiel port pour petits bateaux à un potentiel port en eau profonde. L'emplacement choisi ne semble pas poser de problèmes particuliers en ce qui concerne l'accès routier à Whapmagoostui/Kuujuarapik, l'accès ferroviaire ou la gare de triage de la future ligne de chemin de fer, l'accès au terrain (différences d'altitude), les conditions géotechniques et de pergélisol, la superficie disponible pour construire le(s) terminal(aux) et les zones potentiellement importantes sur le plan culturel. Tous ces paramètres sont étudiés dans le cadre des autres zones de travaux de l'étude de La Grande Alliance et devront faire l'objet d'une attention particulière dans les phases ultérieures.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Objet et portée	1
1.2	Emplacement.....	2
2	CONDITION DES GLACES PRÈS DE WHAPMAGOOSTUI/KUJJUARAPIK	3
2.1	Régime de la glace dans la baie et le détroit d'Hudson ..	3
2.2	Régime des glaces le long de la côte près de whapmagoostui/Kuujjuarapik	5
2.3	Épaisseur de la glace	19
2.4	Scénarios de charge et d'interaction glaciaire	22
2.5	Changements climatiques	24
2.6	Sommaire	26
3	CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET OCÉANOGRAPHIQUES	27
3.1	Vent	27
3.2	Niveaux d'eau	30
3.3	Climat des vagues	32
3.4	Courants	33
3.5	Résumé	33
4	GÉOMORPHOLOGIE	34
4.1	Bathymétrie	34
4.2	Topographie	35
4.3	Déglaciation	36
4.4	Géologie de surface	37
4.5	Pergélisol	40
4.6	Géomorphologie côtière et fluviale.....	41
4.7	Bilan sédimentaire	47
4.8	Changement environnemental	49

TABLE DES MATIÈRES

4.9	Archéologie.....	50
4.10	Résumé	50
5	ZONE PRIVILÉGIÉE POUR LE PORT.....	52
5.1	Objectifs.....	52
5.2	Port pour petits bateaux	52
5.3	Port en eau profonde.....	59
5.4	Emplacement privilégié pour un port pour petits bateaux.....	65
5.5	Emplacement privilégié pour un port en eau profonde .	67
6	CONCLUSIONS ET CONSIDÉRATIONS SUPPLÉMENTAIRES.....	70
7	RÉFÉRENCES.....	71

TABLE DES MATIÈRES

TABLEAU

Tableau 2-1	Résumé des sources d'information sur le régime des glaces près de Whapmagoostui/Kuujjuarapik	6
Tableau 3-1	Marées de Whapmagoostui/Kuujjuarapik (Tables des marées et courants du Canada 2021, volume 4, Arctique et baie d'Hudson)	30
Tableau 3-2	Changement projeté du niveau de la mer (Pointe Tikiraq Ungalliq, Whapmagoostui/Kuujjuarapik, QC) (donneesclimatiques.ca, 2022)	31
Tableau 4-1	Légende de l'unité morphologique côtière	39
Tableau 5-1	Considérations clés pour un PPB	53
Tableau 5-2	Considérations clés pour un port en eau profonde	59
Tableau 5-3	Classement de chaque zone pour un PPB	66
Tableau 5-4	Classement de chaque zone pour un port en eau profonde	67

FIGURES

Figure 1-1	Zones d'étude A, B, C et D près de Whapmagoostui/Kuujjuarapik	2
Figure 2-1	Médiane de la concentration des glaces dans la baie d'Hudson et le détroit d'Hudson, pour la période 1981-2010 (EC, 2021)	4
Figure 2-2	Images satellites Sentinel 2, en couleurs naturelles, pour la saison des glaces 2020-2021 (novembre-décembre)	8
Figure 2-3	Images satellites Sentinel 2, en couleurs naturelles, pour la saison des glaces 2020-2021 (décembre-janvier)	9
Figure 2-4	Images satellites Sentinel 2, en couleurs naturelles, pour la saison des glaces 2020-2021 (février-mars)	10

TABLE DES MATIÈRES

Figure 2-5	Images satellites Sentinel 2, en couleurs naturelles, pour la saison des glaces 2020-2021 (mars-avril).....	11
Figure 2-6	Images satellites Sentinel 2, en couleurs naturelles, pour la saison des glaces 2020-2021 (avril-mai)	12
Figure 2-7	Images satellites Sentinel 2, en couleurs naturelles, pour la saison des glaces 2020-2021 (mai-juin)	13
Figure 2-8	Exemples de débâcle précoce - Images Landsat	15
Figure 2-9	Exemples de débâcles tardives - Images Sentinel 2	16
Figure 2-10	Conditions de glace à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine le 27 mai 2016 (a), le 21 mai 2017 (b), le 22 avril 2021 (c) et le 29 mai 2021 (d).....	18
Figure 2-11	Mesure de l'épaisseur maximale annuelle de la glace sur la période 1973-1991. Selon les mesures effectuées par le GC (2022)	20
Figure 2-12	Courbes d'épaisseur de la glace : Épaisseur de glace mesurée entre décembre 1972 (GC, cercles bleus) et 1982-1983 (cercles bleus avec croix noires), courbes estimées basées sur l'équation de Stefan avec les valeurs 0,019, 0,027 et 0,034 m °C-½ d-½ (lignes pointillées noires).....	21
Figure 2-13	Courbe d'épaisseur de la glace pour l'hiver 1984-1985	21
Figure 2-14	Concentration moyenne de la glace de mer au Nunavik en décembre 1980-2010 (a) et 2040-2070 (b) (Senneville, 2018b) - extrait de Ouranos (2020)	25
Figure 3-1	Rose des vents de l'aéroport de Whapmagoostui/Kuujjuarapik 1957-2022	28
Figure 3-2	Rose des vents de la saison libre de glaces à Whapmagoostui/Kuujjuarapik	29
Figure 3-3	Rose des vents de la saison des glaces à Whapmagoostui/Kuujjuarapik.....	29

TABLE DES MATIÈRES

Figure 3-4	Changement prévu du niveau de la mer pour Whapmagoostui/Kuujjuarapik selon les scénarios d'émissions RCP 2.6, RCP 4.5, et RCP 8.5 (donneesclimatiques.ca, 2022).....	32
Figure 4-1	Bathymétrie de la zone d'étude (Navionics ChartViewer)	35
Figure 4-2	Vues schématiques en plan de la baie d'Hudson entre -8 700 et -8 400 ans, montrant les premiers stades de la déglaciation.....	36
Figure 4-3	Élévation inférée du NMR postglaciaire pour la côte est de la baie d'Hudson en années civiles avant le temps présent (cal BP). La section en pointillés de la courbe indique l'incertitude due au manque de données de référence utilisées pour déterminer le NMR (modifié de Lavoie et al., 2012).	37
Figure 4-4	Distribution de la morphologie autour des zones étudiées (Brouard et al., 2020).....	38
Figure 4-5	a) Conditions de pergélisol sur la côte dans le contexte de b) la géologie du substrat rocheux (Bhiry et al. 2011).....	40
Figure 4-6	Carte de classification côtière pour le littoral de la zone d'étude, y compris les caractéristiques géomorphologiques et les directions du transport des sédiments basées sur les directions des vents dominants pendant les conditions libres de glaces (Boisson et Allard, 2015 ; Hill et al., 2003 ; Owczarek et al., 2020).....	42
Figure 4-7	Delta subaérien situé à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine. L'image en haut à droite est une photographie aérienne de 1954 (de Ruz et Allard, 1994), celle en bas à droite est une image satellite de 2021.....	43
Figure 4-8	Exemples de plages de poche dans la zone d'étude (images de Boisson et al. 2015).....	44

TABLE DES MATIÈRES

Figure 4-9	Image satellite illustrant l'avant et l'après du glissement de terrain d'avril 2021, situé à 8 km en amont de l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine (image en médaillon de la Première nation de Whapmagoostui, via Nunatsiaq News).....	46
Figure 4-10	Taux d'accumulation des sédiments du fond marin et bilan sédimentaire pour la zone d'étude	48
Figure 5-1	Emplacement des îles Maver sur la carte bathymétrique et l'imagerie satellite.....	67
Figure 5-2	Carte de navigation près de Carte de navigation près de Whapmagoostui/KuujjuarapikKuujjuarapik	68

1 INTRODUCTION

L'objet de la présente note technique 13, partie A, est de décrire l'environnement physique, y compris les processus côtiers (vent, vagues, niveaux d'eau, courants), la morphologie côtière et marine et la dynamique des glaces dans une zone côtière plus large qui pourrait convenir à une infrastructure portuaire proposée, prévue dans la phase III de l'étude de La Grande Alliance, à savoir un port à Whapmagoostui/Kuujuarapik.

1.1 OBJET ET PORTÉE

L'objet de ce rapport est d'évaluer les conditions environnementales physiques locales de la côte adjacente à Whapmagoostui/Kuujuarapik et d'établir l'emplacement le plus favorable pour un port. Les systèmes côtiers sont évalués dans le contexte de trois paramètres principaux :

- La dynamique des glaces;
- L'océanographie;
- La géomorphologie côtière et fluviale.

La dynamique des glaces est décrite dans la section 2. Les conditions tout au long du cycle annuel de la glace ont été examinées pour la côte près de Whapmagoostui/Kuujuarapik à partir d'images satellites et de caméras d'observation. Ces données ont été compilées afin de produire une image spatio-temporelle des conditions de la glace de mer pour déterminer les périodes de prise et de relâchement de la glace.

La description de l'océanographie physique comprend l'est de la baie d'Hudson et l'estuaire de la Grande rivière de la Baleine et fait l'objet de la section 3. Les données océanographiques requises pour développer l'infrastructure maritime, évaluer les impacts et définir les mesures d'atténuation sont les suivantes :

- Bathymétrie et nature des fonds marins et des rivières;
- Marées, niveau de l'eau et courants;
- Vent, vagues et ondes de tempête.

Une caractérisation géomorphologique fluviale et côtière décrivant l'état des rives et les risques d'érosion et de submersion marine est fournie à la section 4. L'étude décrit les principales sources de sédiments (Grande rivière de la Baleine, érosion côtière) et les processus sédimentaires fluvio-marins afin d'évaluer les zones à risque de sédimentation significative pouvant nécessiter un dragage d'entretien important.

Chacun des principaux paramètres de l'environnement physique a également été analysé dans le cadre des systèmes côtiers dans un contexte de changements climatiques. La compréhension de la façon dont les changements climatiques affectent la stabilité côtière et la nature de la réponse côtière constitue une base pour l'évaluation de ce que cela implique pour les infrastructures portuaires.

Des sources d'information de base, dont les suivantes, ont été consultées afin de dresser un tableau complet de la situation :

- Cartes marines de la région;
- Imageries satellite;
- Cartes provinciales de géologie des formations en surface;
- Données d'Environnement Canada :
 - Météorologie : Aéroport de Whapmagoostui/Kuujuarapik;
 - Données sur les marées et les niveaux d'eau.
- Données provenant d'études sur le développement du projet hydroélectrique de la Grande rivière de la Baleine (Hydro-Québec);
- Études de recherche antérieures couvrant la zone d'étude.

1.2 EMBLACEMENT

Le site d'étude est situé dans la baie d'Hudson, le long du littoral, près de Whapmagoostui/Kuujuuarapik, au Québec, à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine. Ce rapport évalue la pertinence de quatre zones d'étude pour l'implantation d'un port en eau profonde (18,0 m de profondeur) ou d'un port pour petits bateaux (PPB) (6 m de profondeur). Les quatre zones d'étude (A, B, C, et D) sont représentées sur la figure 1-1.



Figure 1-1 Zones d'étude A, B, C et D près de Whapmagoostui/Kuujuuarapik

2 CONDITION DES GLACES PRÈS DE WHAPMAGOOSTUI/KUUJJUARAPIK

2.1 RÉGIME DE LA GLACE DANS LA BAIE ET LE DÉTROIT D'HUDSON

Cette section présente la condition générale des glaces dans la baie et le détroit d'Hudson. Le régime spécifique des glaces le long de la côte est près de Whapmagoostui/Kuujuarapik est décrit dans la section 2.2 suivante.

La figure 2-1 illustre la concentration médiane des glaces dans la baie et le détroit d'Hudson, pour la période 1981-2010, compilée par Environnement Canada (EC).

La formation de la couverture de glace débute généralement à la fin octobre dans les zones côtières du nord-ouest de la baie d'Hudson et dans le détroit d'Hudson (figure 2-1 a). La couverture progresse vers le sud-est dans la baie et ensuite dans la baie James (figure 2-1 b-c). La baie et le détroit sont complètement recouverts de glace (couverture de 100 %) au début de janvier (figure 2-1 d). La glace dans la baie est non consolidée, à l'exception des côtes où elle forme généralement une couverture de glace solide (MPO, 1996). Le dégel et la débâcle dans la baie débutent habituellement en mai. En juin (figure 2-1 e), la couverture de glace le long de la côte est de la baie se situe généralement entre 0 et 30 %. Au même moment en juin, le détroit est encore couvert de glace avec une couverture qui varie entre 30 et 100 %. À la mi-juillet (figure 2-1 f), un corridor libre de glace est généralement praticable dans le détroit. Il n'y a généralement plus de glace dans la baie et le détroit en août, à l'exception de rares icebergs provenant du bassin de Foxe qui dérivent dans le détroit (Percy, 1990).

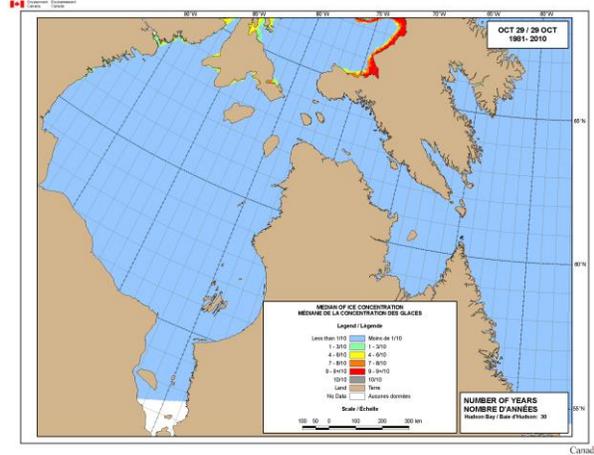
Selon les observations des glaces d'EC sur la période 1981-2010, la saison typique sans glace est :

- Détroit d'Hudson : De la mi-juillet à la mi-novembre (~4 mois);
- Baie d'Hudson (côte est) : Début juillet à fin novembre (~5 mois).

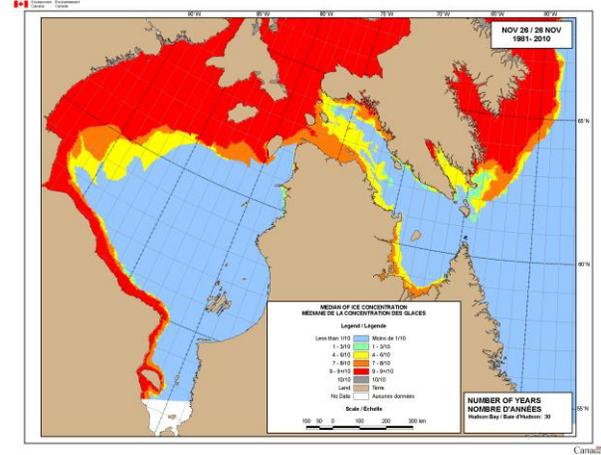
Les cartes montrent que la couverture de glace sur la côte est se forme plus tard et se brise plus tôt que sur la côte ouest. Ainsi, une infrastructure maritime à Whapmagoostui/Kuujuarapik (côte est) connaîtrait une saison libre de glace plus longue qu'une infrastructure située le long de la côte ouest, par exemple le port actuel de Churchill (Manitoba).

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

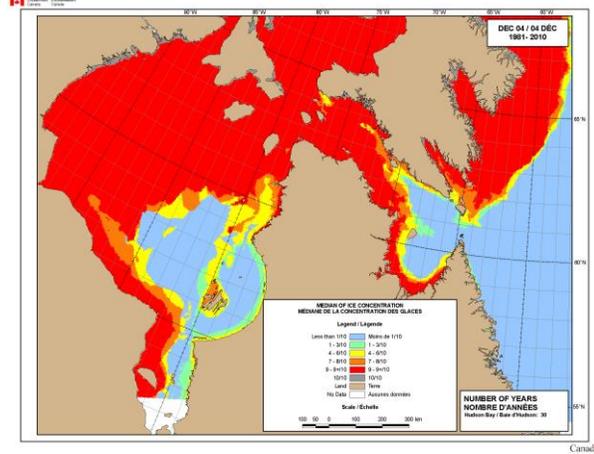
(a) 29 octobre



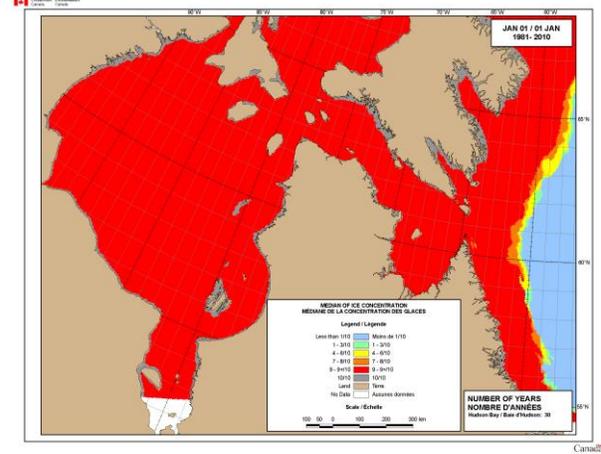
(b) 26 novembre



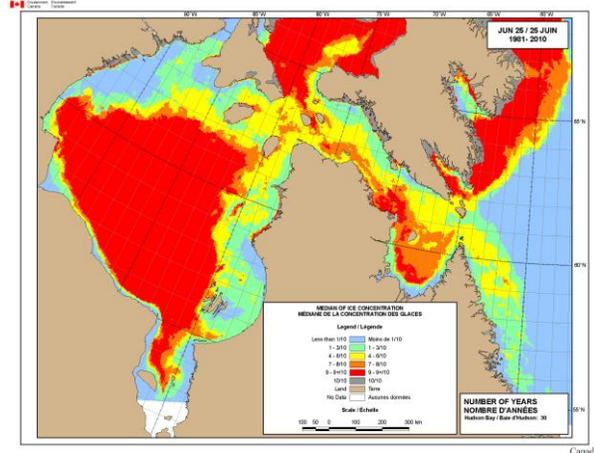
(c) 4 décembre



(d) 1er janvier



(e) 25 juin



(f) 16 juillet

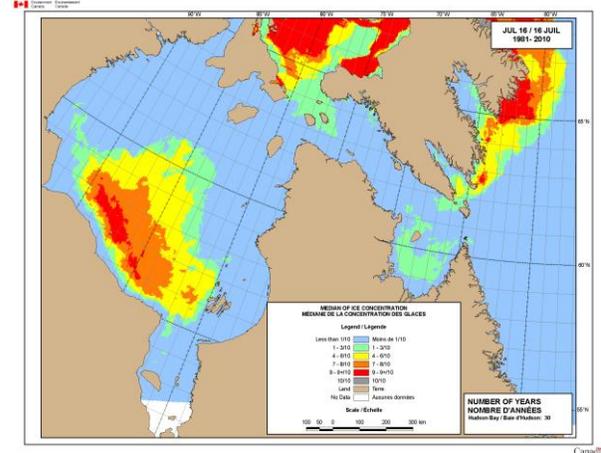


Figure 2-1 Médiane de la concentration des glaces dans la baie d'Hudson et le détroit d'Hudson, pour la période 1981-2010 (EC, 2021)

2.2 RÉGIME DES GLACES LE LONG DE LA CÔTE PRÈS DE WHAPMAGOOSTUI/KUJJUARAPIK

Cette section décrit le régime des glaces le long de la côte près de Whapmagoostui/Kuujjuarapik. Les conditions de glace dans les zones A, B, C et D (figure 1-1) sont décrites dans le but d'identifier l'emplacement privilégié pour la mise en place de l'infrastructure portuaire.

2.2.1 APPROCHE

La comparaison entre les zones A, B, C et D est subdivisée en quatre saisons glaciaires correspondant au cycle annuel complet, comme indiqué ci-dessous. Cette répartition est généralement aussi valable pour le cycle glaciaire, bien qu'il y ait quelques différences et incohérences.

- Gel;
- Milieu de l'hiver;
- Débâcle;
- Été.

La comparaison portait sur les cinq derniers hivers, car cette période est considérée comme la plus pertinente pour l'étude. De plus, les informations les plus complètes et détaillées disponibles sur les glaces portaient sur cette période (décrite plus loin). Toutefois, par souci d'exhaustivité, l'imagerie satellitaire remontant à l'hiver 2004-2005 a également été examinée.

2.2.2 SOURCES D'INFORMATIONS

Nous nous sommes limités aux sources d'information pouvant montrer des conditions de glace détaillées, nécessaires pour rencontrer les objectifs de l'étude. Elles comprennent les éléments suivants, résumés dans le tableau 2-1.

Images satellites Sentinel 2 - cette source fournissant les informations les plus détaillées, elle a été la principale source d'information pour 2017-2018 et les années suivantes :

- Images satellites Landsat - elles ont été utilisées pour compléter le bagage d'information et pour avoir des données plus anciennes. Les images Landsat ont été examinées jusqu'à l'hiver 2004-2005;
- Caméras d'observation installées sur la terre ferme face au chenal et aux îles Manitounuk et sur l'île Gillis. Les images sont disponibles sur <http://www.caiman.ete.inrs.ca/>. Ces caméras ont fourni des informations locales sur les glaces, mais elles n'ont pas été en mesure de fournir un portrait d'ensemble à l'échelle régionale.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

Tableau 2-1 Résumé des sources d'information sur le régime des glaces près de Whapmagoostui/Kuujjuarapik

Hiver	Images satellites		Photos en continu (chaque heure)	
	Images Sentinel 2 ¹	Images Landsat ¹	Face au chenal Manitounuk	Sur l'île de Gillis
2020-21	89 images	-	n/a	√
2019-20	67 images	-	√	√
2018-19	96 images	-	√	√
2017-18	108 images	-	√	√
2016-17	28 images	77 images	√	√
2015-16	11 images	74 images	√	√
2014-15	n/d avant 2015	32 images	n/d avant 2015	n/d avant 2015
2013-14		59 images		
2012-13		14 images		
2011-12		19 images		
2010-11		27 images		
2009-10		16 images		
2008-09		9 images		
2007-08		23 images		
2006-07		39 images		
2005-06		40 images		
2004-05	54 images			

Note : Seules les images contenant des informations utiles sur les glaces sont incluses dans les totaux ci-dessus. Veuillez noter que toutes les images satellites disponibles n'ont pas fourni d'informations utiles sur les glaces en raison de la couverture nuageuse.

2.2.3 CYCLE GLACIAIRE 2020-2021

Pour illustrer les tendances, le cycle des glaces pour l'hiver 2020-2021 est décrit en détail. Il convient de noter que ces mêmes tendances générales ont aussi été observées pour les autres hivers. Des images satellites clés pour 2020-2021 sont mentionnées dans le texte.

Le gel a commencé vers mi-novembre avec une croissance de nouvelle glace le long de la côte (figure 2-2 a). Ce phénomène a progressé au cours des deux semaines suivantes et de la nouvelle glace a été observée pour la première fois à l'extrémité nord du chenal Manitounuk le 30 novembre (figure 2-2 c). Il est à noter que toutes les zones étaient essentiellement libres de glace durant cette période.

Le 3 décembre, de la nouvelle glace (comme en témoigne sa coloration) était présente sur toute la zone D et le chenal Manitounuk (figure 2-2 c), bien que les zones A, B et C étaient libres de glace, ainsi que les zones au large de celles-ci. Le 13 décembre, la nouvelle glace était évidente au large, mais les zones A, B et C étaient toujours libres de glace (figure 2-3 a).

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

Le 25 décembre, les zones A et B étaient encore libres de glace, mais la zone C était partiellement couverte de glace, avec une lisière de glace qui la traversait à un angle d'environ 45° (figure 2-3 b). Le 28 décembre, toutes les zones étaient couvertes de glace. La couverture de glace des zones A et B était constituée de nouvelle glace (d'après la coloration) avec des radeaux glaciels (provenant probablement du large) gelés dans la matrice (figure 2-3 c).

Le 17 janvier, on pouvait observer un chenal côtier, ce qui fait que la zone A était pratiquement libre de glace. Les autres zones (c.-à-d. B, C et D) étaient couvertes de glace, car la lisière des glaces traversait la zone B (figure 2-3 d). La glace au large du chenal côtier était clairement dynamique puisque des chenaux et des zones d'eau libre étaient présents.

Le 1er février, la couverture de glace était essentiellement solidifiée sur toute la région (y compris les zones A, B, C et D), et un chenal côtier avait été établi au sud des îles Manitounuk (figure 2-4 a).

La couverture de glace a été partiellement brisée le 21 février, car on peut voir des zones nouvellement gelées (selon la coloration) dans le pack glacial (figure 2-4 b). La couverture de glace de la zone A était principalement constituée de nouvelle glace, tandis que la couverture de glace des autres zones était encore intacte.

Ce scénario s'est répété peu après :

- La couverture de glace s'est solidifiée, et un chenal côtier allant du sud des îles Manitounuk s'est établi le long de tout le littoral le 28 février (figure 2-4 c);
- La couverture de glace s'est fragmentée de telle sorte que la zone A a été recouverte de nouvelle glace le 3 mars, tandis que la couverture de glace des autres zones était encore intacte et formait une couche de glace solide (figure 2-4 d).

Après le 3 mars, le chenal côtier est progressivement devenu plus grand comme le montrent les images du 25 mars, du 4 avril, du 9 avril et du 12 avril (figure 2-5 a, b, c et d, respectivement). Au cours de cette période, la zone A était essentiellement libre de glace tandis que la couverture de glace des autres zones était encore intacte et formait une couche de glace solide.

Le 17 avril, la zone au large était libre de glace (figure 2-6 a). La zone A était essentiellement libre de glace tandis que la couverture de glace des autres zones était encore intacte. Le 22 avril, des radeaux glaciels (provenant de plus loin au large) avaient dérivé dans la zone A (figure 2-6 b), tandis que la couverture de glace des autres zones était encore intacte et formait une couche de glace solide.

Ce scénario général a persisté pendant environ six semaines, comme le montrent les images du 29 avril, du 19 mai, du 22 mai et du 24 mai (figure 2-6 c, d et figure 2-7 a, b, respectivement). La zone A était exposée à des radeaux glaciels dérivant du large, tandis que la couverture de glace des autres zones était encore intacte et formait une couche de glace solide. La couverture de glace se détériorait clairement (d'après la coloration), surtout dans la zone D, comme on l'a vu le 19 mai.

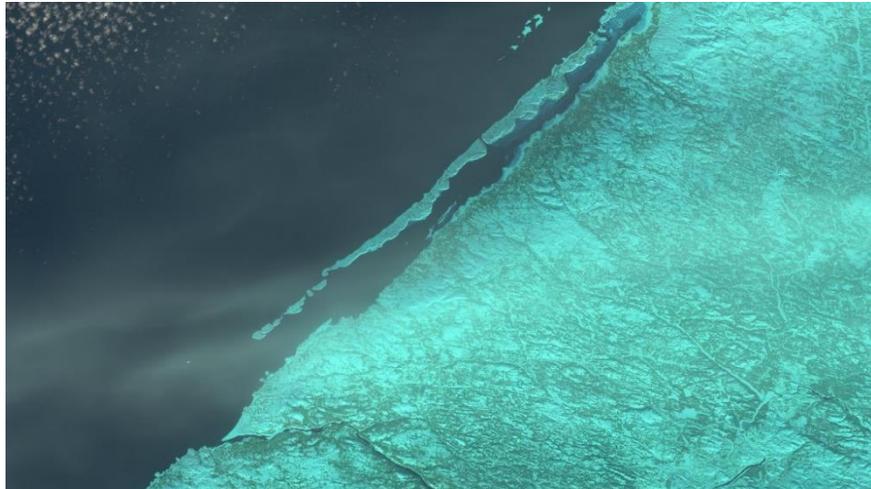
Toutes les zones étaient libres de glace le 13 juin et le 18 juin (figure 2-7 c et d, respectivement).

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

a) 13 novembre 2020



b) 25 novembre 2020



c) 30 novembre 2020



d) 3 décembre 2020

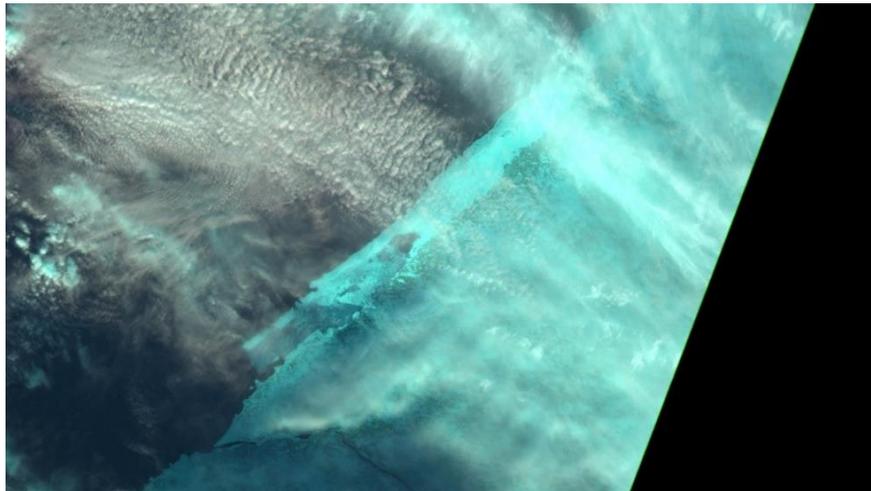
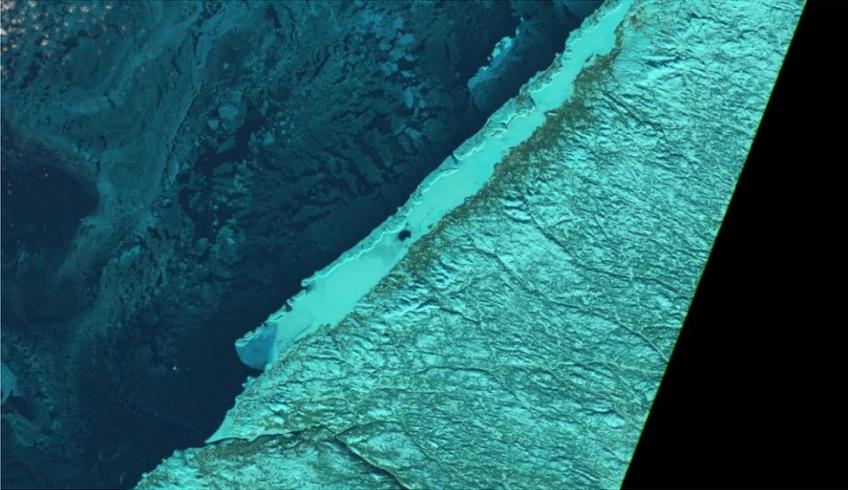


Figure 2-2 Images satellites Sentinel 2, en couleurs naturelles, pour la saison des glaces 2020-2021 (novembre-décembre)

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

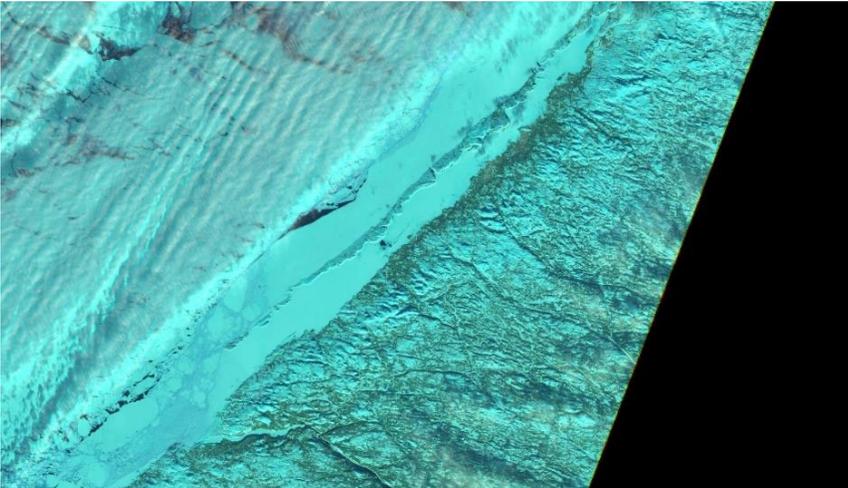
a) 13 décembre 2020



b) 25 décembre 2020



c) 28 décembre 2020



d) 17 janvier 2021

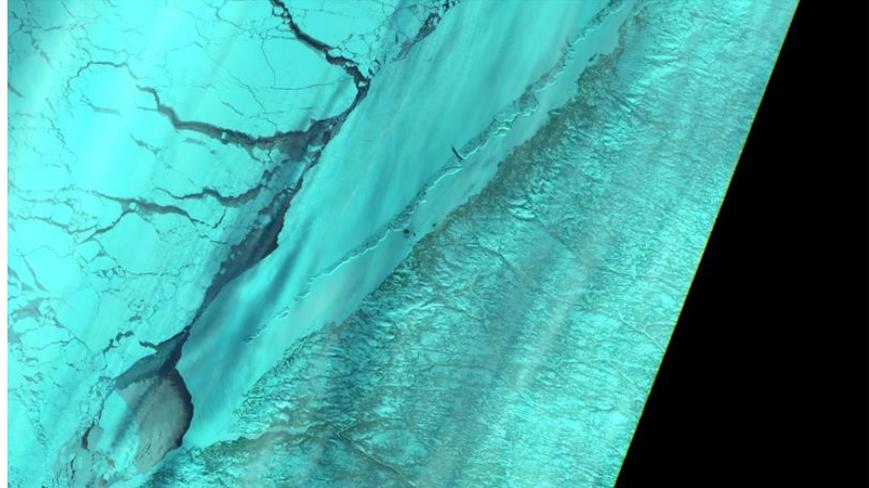
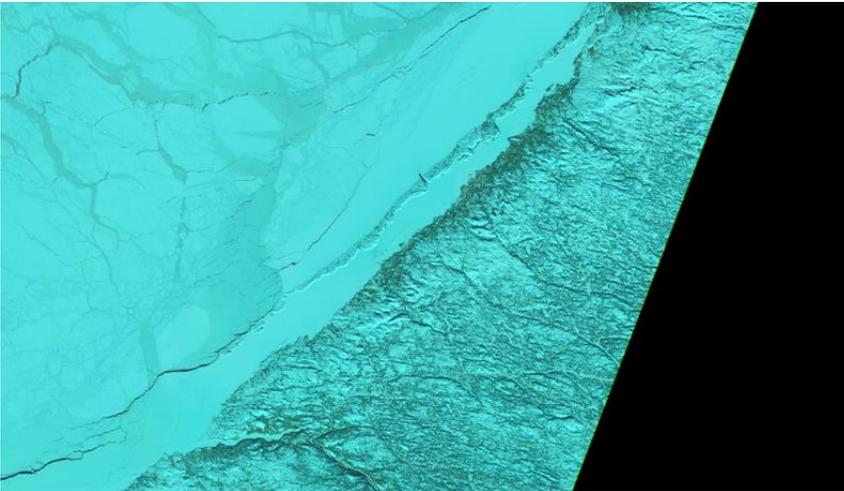


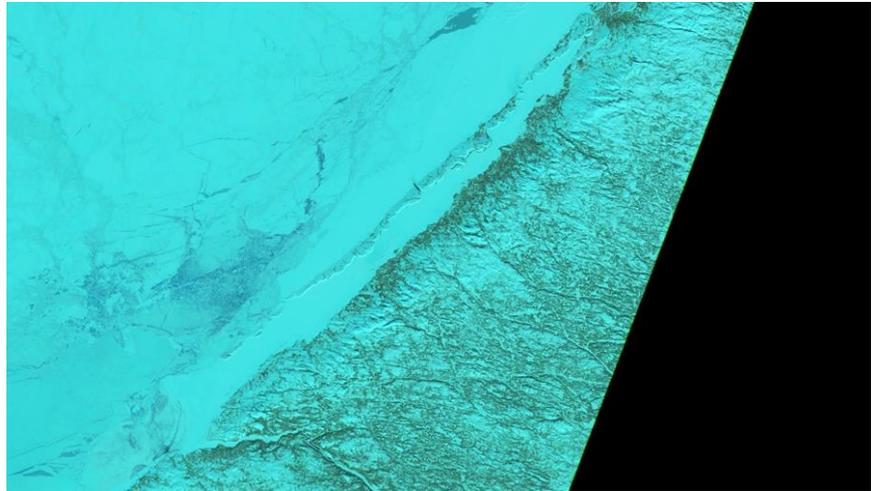
Figure 2-3 Images satellites Sentinel 2, en couleurs naturelles, pour la saison des glaces 2020-2021 (décembre-janvier)

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

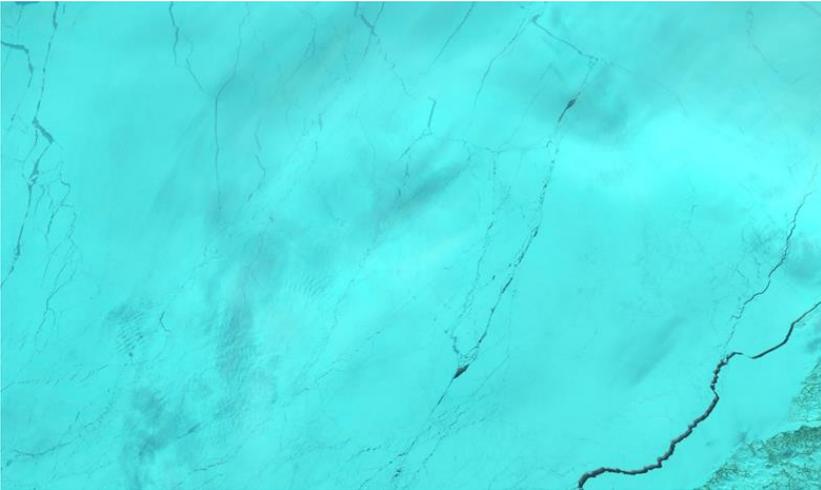
a) 1^{er} février 2021



b) 21 février 2021



c) 28 février 2021



d) 3 mars 2021

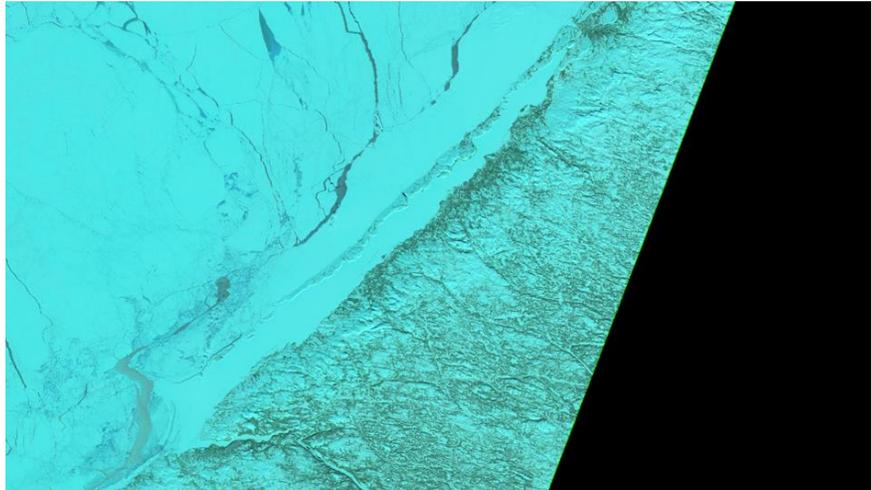


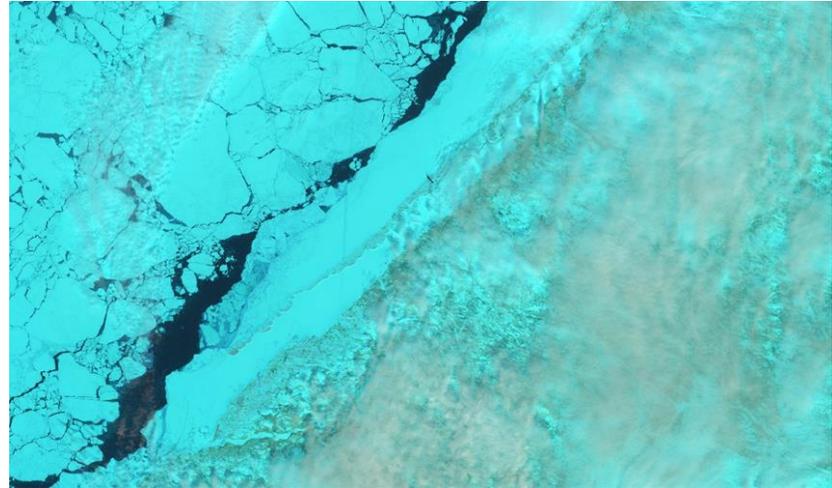
Figure 2-4 Images satellites Sentinel 2, en couleurs naturelles, pour la saison des glaces 2020-2021 (février-mars)

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

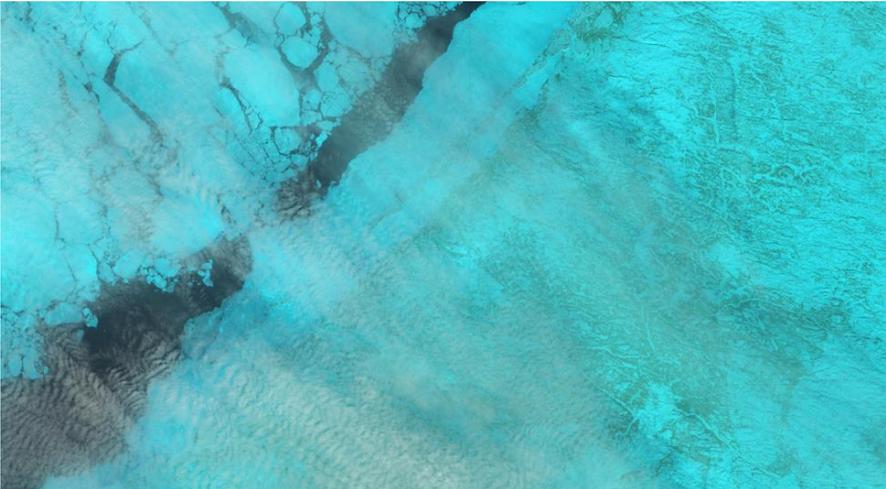
a) 25 mars 2021



b) 4 avril 2021



c) 9 avril 2021



d) 12 avril 2021

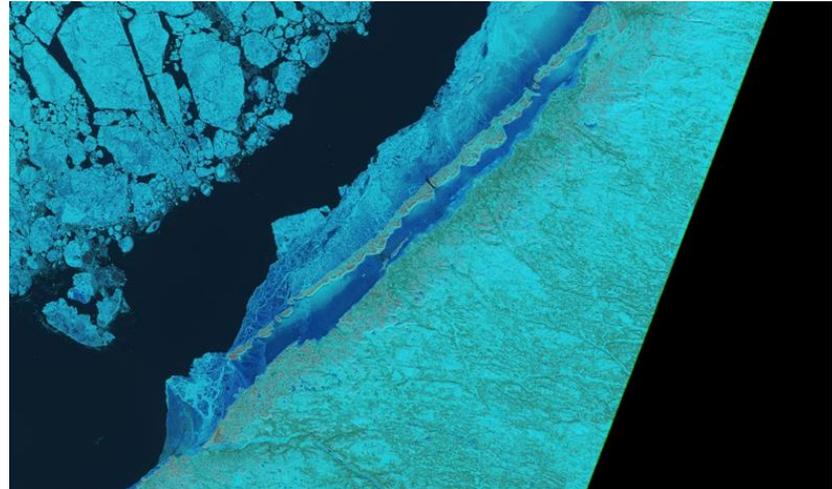
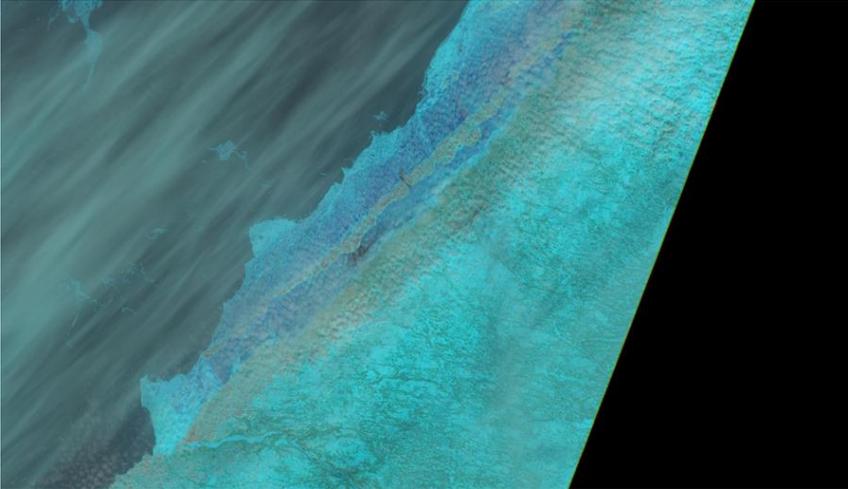


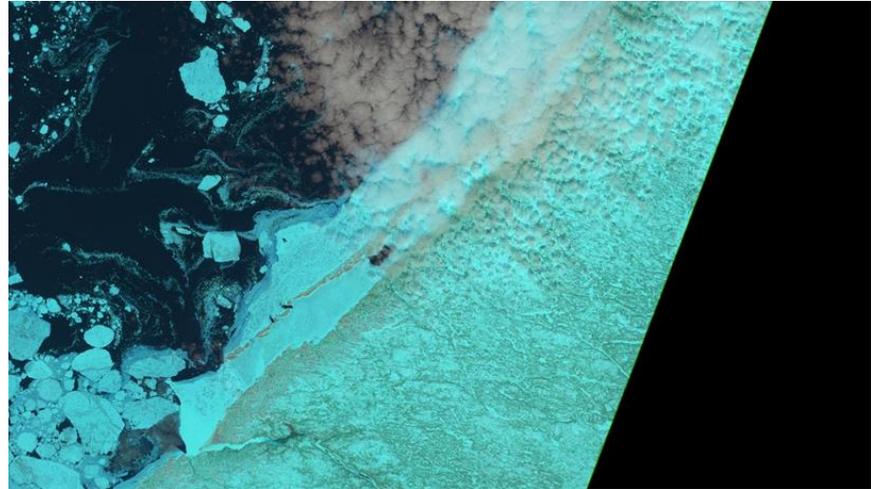
Figure 2-5 Images satellites Sentinel 2, en couleurs naturelles, pour la saison des glaces 2020-2021 (mars-avril)

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

a) 17 avril 2021



b) 22 avril 2021



c) 29 avril 2021



d) 19 mai 2021

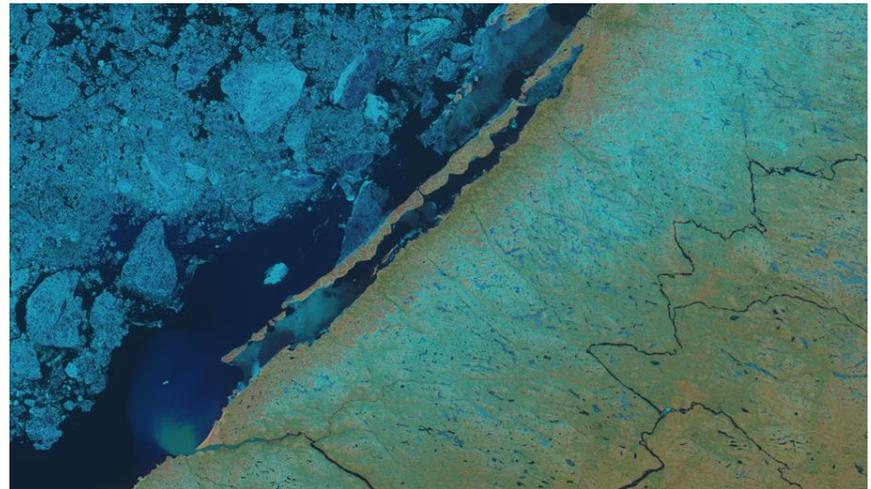
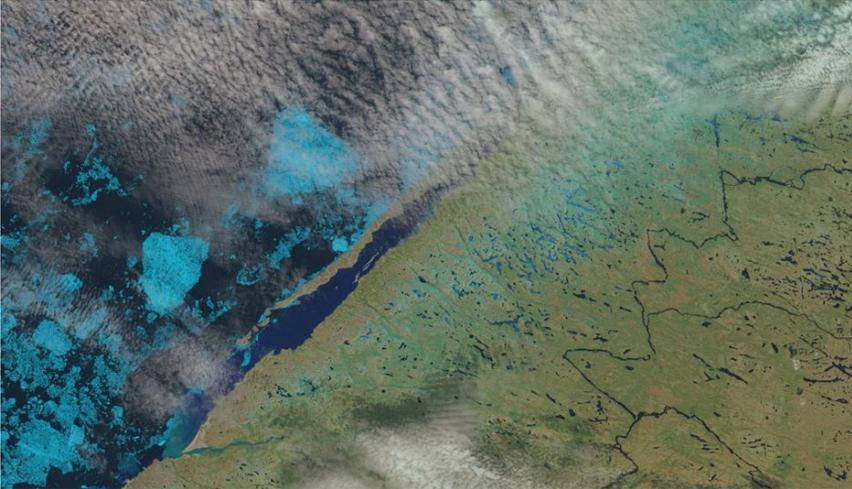


Figure 2-6 Images satellites Sentinel 2, en couleurs naturelles, pour la saison des glaces 2020-2021 (avril-mai)

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

a) 24 mai 2021



b) 29 mai 2021



c) 13 juin 2021



d) 18 juin 2021



Figure 2-7 Images satellites Sentinel 2, en couleurs naturelles, pour la saison des glaces 2020-2021 (mai-juin)

2.2.4 VARIATION DE LA PERIODICITE DE LA DÉBÂCLE

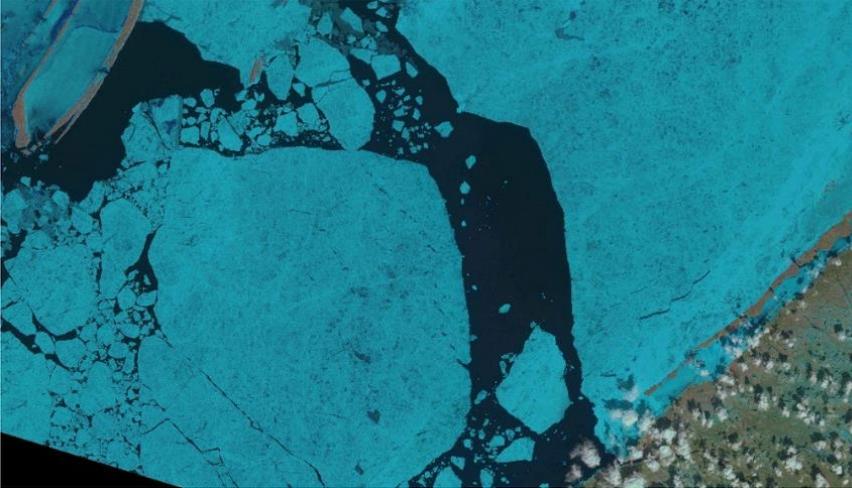
Comme prévu, des variations ont pu être observées entre les hivers étudiés (2004-2021). En général, l'amplitude de la variation des dates de débâcle était d'environ 1 mois.

Les débâcles précoces en 2004-2005 et 2016-2017 sont illustrées à la figure 2-8 a-b, et c-d respectivement. Ces images montrent un cas où toutes les zones étaient libres de glace avant le 1er juin. Cependant, les zones A, B et C auraient été potentiellement exposées à des incursions de glace impliquant de très gros radeaux glaciels. La zone D était protégée des incursions de glace, étant située dans le chenal Manitounuk.

Une débâcle tardive s'est produite en 2017-2018, comme le montre la séquence du 2 au 12 juin (figure 2-9 a-d). Dans ce cas, seule la zone A était libre de glace au 12 juin, tandis que les zones B, C et D étaient encore recouvertes de glace.

**NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde –
Conditions environnementales physiques**

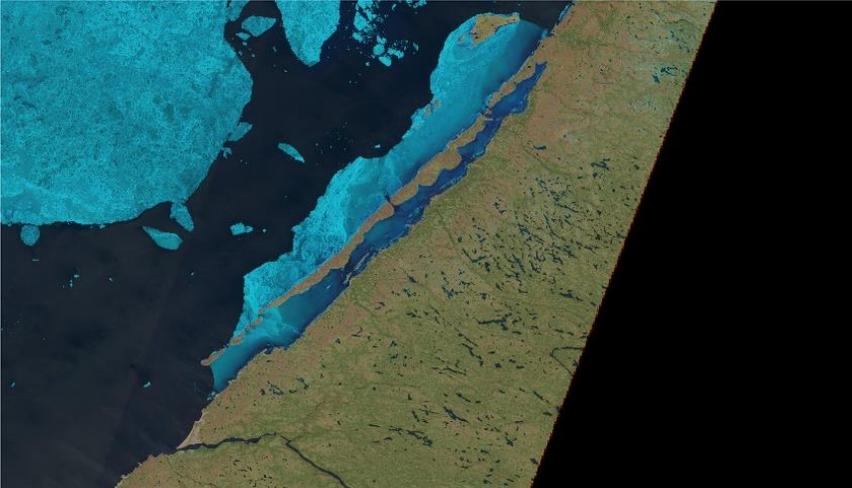
a) 20 mai 2005



b) 28 mai 2005



c) 28 mai 2017



d) 4 juin 2017

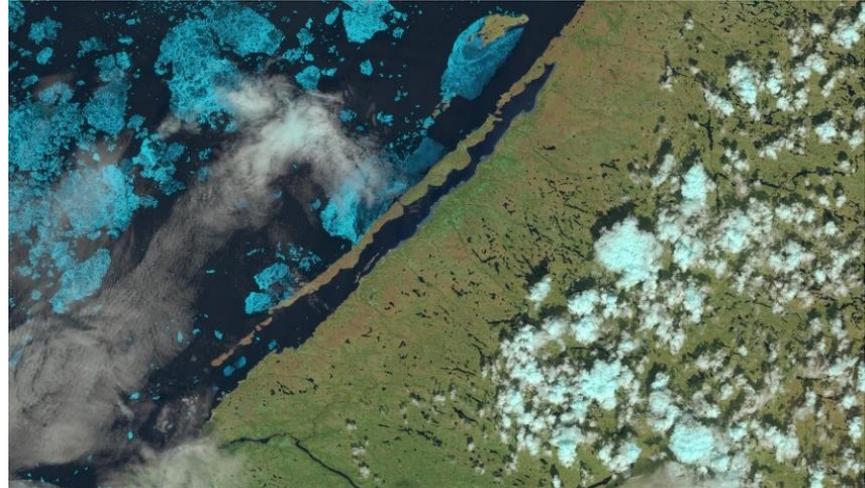


Figure 2-8 Exemples de débâcle précoce - Images Landsat

**NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde –
Conditions environnementales physiques**

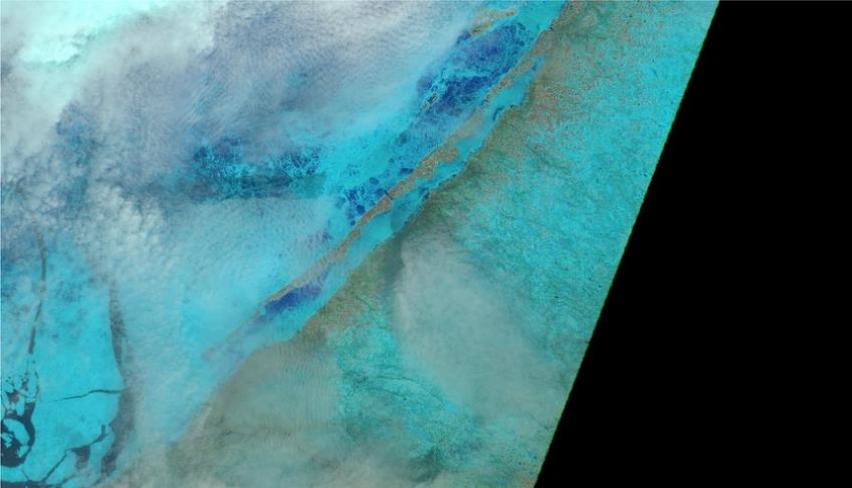
a) 2 juin 2018



b) 4 juin 2018



c) 7 juin 2018



d) 12 juin 2018

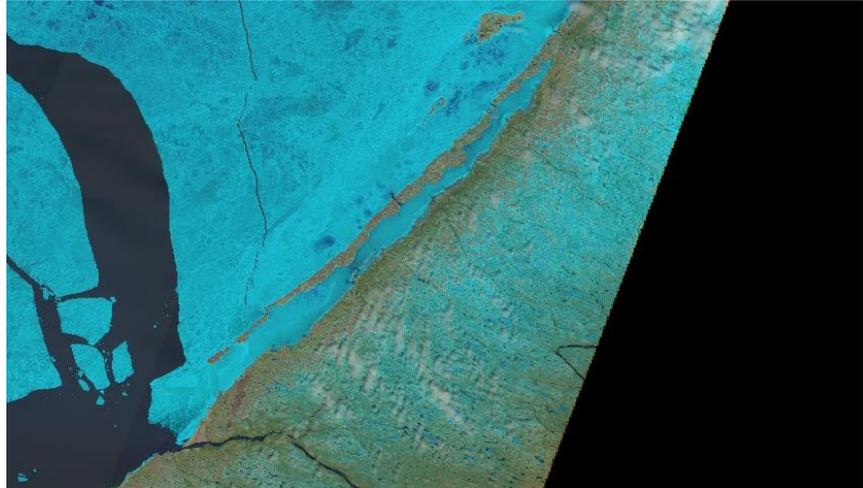


Figure 2-9 Exemples de débâcles tardives - Images Sentinel 2

2.2.5 EMBÂCLES ET PROCESSUS GLACIAIRES À L'EMBOUCHURE DE LA GRANDE RIVIÈRE DE LA BALEINE

La débâcle sur la Grande rivière de la Baleine et l'embâcle potentiel à son embouchure pourraient avoir un impact sur une infrastructure située dans la zone A (figure 1-1). Par exemple, les installations pourraient être prises dans un embâcle ou être touchées par les floes fluviaux flottant sur la rivière.

Un embâcle aurait des répercussions différentes sur les deux options générales de port (c.-à-d. PPB ou port en eau profonde). Un PPB serait situé dans des eaux relativement peu profondes (probablement environ 6 m), il serait donc plus proche de la côte et de l'embâcle également. Cependant, tous les bateaux et les jetées flottantes d'un PPB seraient probablement retirés pour l'hiver. Par conséquent, les seules structures susceptibles d'être exposées à un embâcle seraient les brise-lames rocheux qui devraient former les côtés extérieurs du PPB. Ceux-ci seraient probablement capables de résister aux forces d'un embâcle, mais ils pourraient être touchés par l'affouillement hydraulique causé par l'embâcle.

Un port en eau profonde serait situé dans des eaux plus profondes (probablement 18 m ou plus) et serait donc plus à l'abri des effets immédiats d'un embâcle. Néanmoins, un embâcle pourrait potentiellement être préoccupant pour les structures portuaires. De plus, un embâcle affecterait vraisemblablement l'accès des navires au port, s'il s'agissait d'un port ouvert toute l'année.

Dans l'ensemble, il est souhaitable d'éviter que le port ou le PPB soit situé à un endroit où il serait exposé aux embâcles.

La figure 2-10 montre des images satellites des conditions de la glace à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine. Les images montrent que la couverture de glace sur la rivière peut se briser avant la glace de rive le long de la côte (figure 2-10 a) ou après (figure 2-10 b).

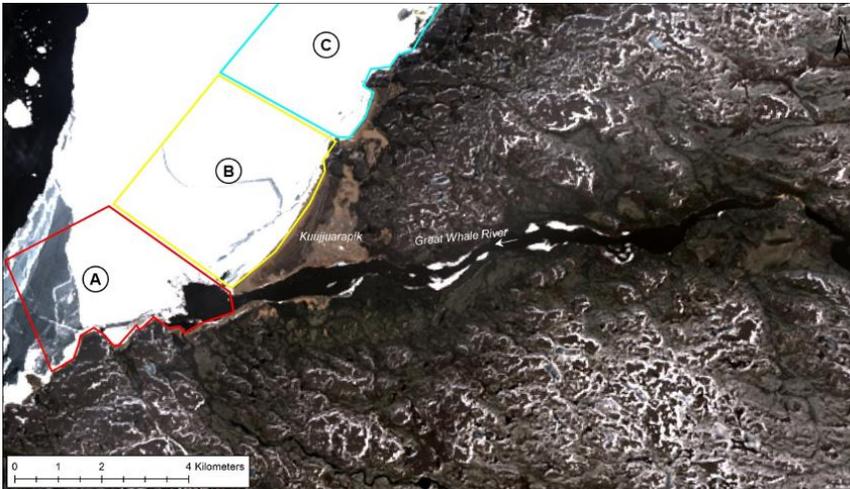
Aucune indication d'embâcle à l'embouchure de la rivière ni d'inondation par embâcle à Whapmagoostui/Kuujjuarapik n'a été recensée dans la littérature. Malgré le moment possible de la débâcle (c.-à-d. débâcle dans la rivière avant l'embouchure), il semble que la rivière n'ait pas tendance à former un gros embâcle à Whapmagoostui/Kuujjuarapik.

Des accumulations de glace peuvent se former en amont de Whapmagoostui/Kuujjuarapik, comme ce fut le cas en avril 2021 (figure 2-10 d). Les autorités enquêtent actuellement sur cet événement. Il n'est pas clair à ce stade si l'accumulation de glace s'est produite avant le glissement de terrain ou a été déclenchée par celui-ci.

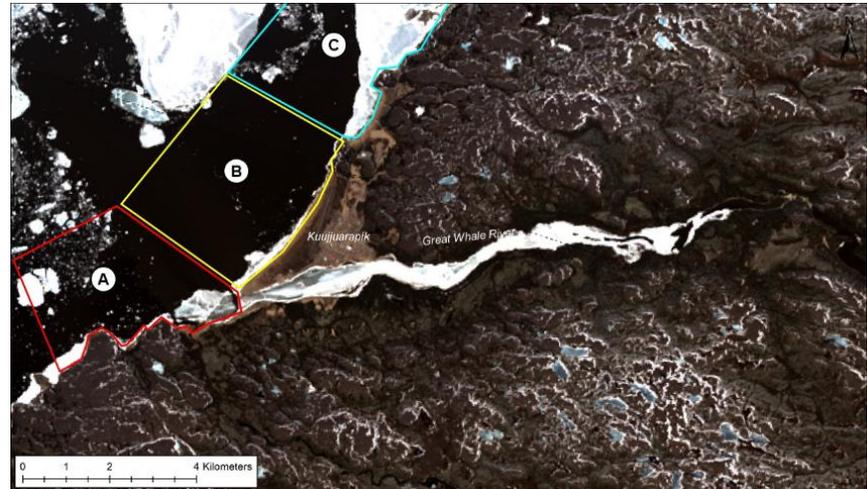
Les infrastructures de la zone A pourraient modifier la dynamique de la glace de rivière pendant la débâcle, par exemple en bloquant partiellement le déplacement de la glace. Une analyse supplémentaire de la glace de rivière serait nécessaire si la zone A est sélectionnée.

NOTE TECHNIQUE 13A – PORT EN EAU PROFONDE – CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES PHYSIQUES

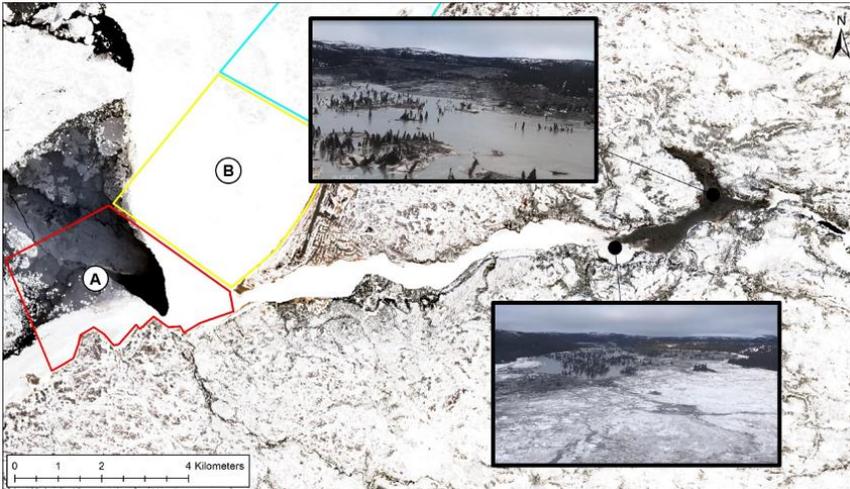
a) 27 mai 2016 – la rivière se dégage avant la baie



b) 21 mai 2017 – la rivière se dégage après la baie



c) 22 avril 2021 – accumulation de glace en amont



d) 29 mai 2021 – débris de glissement de terrain

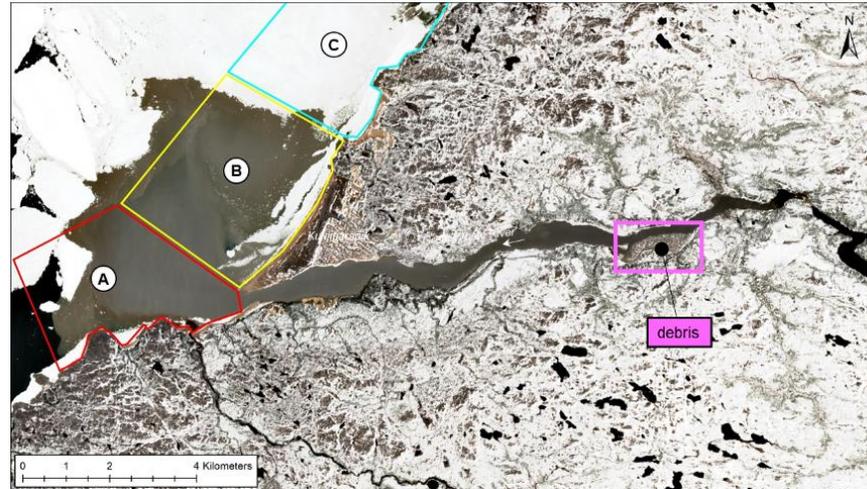


Figure 2-10 Conditions de glace à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine le 27 mai 2016 (a), le 21 mai 2017 (b), le 22 avril 2021 (c) et le 29 mai 2021 (d).

2.2.6 RÉSUMÉ ET COMPARAISONS DU RÉGIME DE LA GLACE

Les éléments suivants sont évidents en ce qui concerne les régimes de glace pour les quatre zones :

Zone A - Il s'agit du site le plus exposé. La couverture de glace se forme le plus tard dans la zone A et est souvent retirée par l'action du pack glaciaire, suivie d'une nouvelle croissance de la glace. Elle est la plus tardive à geler et la plus précoce à se briser. Un port situé dans la zone A serait exposé à des incursions de glace impliquant de gros radeaux glaciaires pendant une grande partie de l'hiver. La zone A est également exposée à la débâcle et à un embâcle potentiel à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine. La zone A est libre de glace en moyenne 7 à 8 mois par an, avec de fréquents épisodes de débâcle et d'incursions de glace.

Zone B - L'exposition à la glace pour la zone B est intermédiaire, entre la zone A (qui est la plus exposée) et la zone D (qui est la plus protégée). La zone B gèle plus tard que la zone D, mais plus tôt que la zone A. La glace a tendance à se briser plus tard dans la zone B que dans la zone A. Contrairement à la zone D, la débâcle se produit lorsque la glace est transportée hors de la zone (probablement par les vents et les courants) plutôt que par la désintégration thermique et la fonte thermique, comme c'est le cas dans la zone D. Un quai dans la zone B serait exposé à des incursions de glace impliquant de gros radeaux glaciaires pendant la partie du cycle de la glace où se produit la débâcle. La zone B est libre de glace en moyenne 7 à 8 mois par an.

Zone C - La zone C est un peu moins exposée à l'action des glaces que la zone B, car elle gèle avant la zone B et se brise plus tard. La zone C est libre de glace en moyenne 7 à 8 mois par an.

Zone D - Il s'agit du site le plus protégé. La glace se forme le plus tôt dans la zone D et persiste le plus tard. L'épaisseur de la glace est contrôlée par la croissance thermique pendant tout l'hiver. La débâcle se produit par voie thermique, la glace fondant principalement sur place. La zone D n'est pas exposée aux incursions de radeaux glaciaires provenant du large. La zone D est libre de glace en moyenne 6 à 7 mois par an.

2.3 ÉPAISSEUR DE LA GLACE

L'épaisseur de la glace est un paramètre primordial lorsqu'on évalue la charge de la glace et son interaction avec les infrastructures maritimes. Cette section donne un aperçu de l'épaisseur de la glace dans la zone d'étude.

Le gouvernement du Canada (GC, 2022) a mesuré l'épaisseur de la glace près de Whapmagoostui/Kuujuuarapik, à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine, pendant 19 saisons hivernales entre décembre 1972 et avril 1991. La base de données sur l'épaisseur de la glace comprend 329 mesures. Les mesures sont considérées comme représentatives des conditions dans les quatre zones d'étude : A, B, C et D.

La figure 2-11 illustre la mesure annuelle maximale de l'épaisseur de la glace sur la période 1973-1991. La mesure maximale de l'épaisseur de la glace a été de 2,2 m, le 4 avril 1983. L'épaisseur maximale annuelle moyenne de la glace est de 1,4 m. La figure montre la variabilité naturelle de l'épaisseur de la glace. La glace évolue et s'épaissit différemment d'une année à l'autre sous l'influence des conditions climatiques et hydrauliques.

L'épaisseur de la glace peut être estimée à l'aide de l'équation de Stefan :

$$h = \alpha \sqrt{AFDD}$$

où h est l'épaisseur de la glace (m), α est le coefficient de croissance de la glace ($m^{\circ}C^{-1/2} d^{-1/2}$) et AFDD est le degré-jour de gel accumulé ($^{\circ}C-d$). L'AFDD a été calculé à partir de la température quotidienne de l'air enregistrée à l'aéroport de Whapmagoostui/Kuujuuarapik par Environnement Canada (station ID n° 6083).

L'AFDD est calculé en additionnant les températures de l'air quotidiennes inférieures à zéro degré Celsius ($<0^{\circ}C$). Les jours au-dessus de $0^{\circ}C$ ne sont pas pris en compte dans le calcul. Conformément à l'approche utilisée par le Service canadien des glaces, le comptage commence le jour où la température moyenne de l'air sur 30 jours est négative.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

Le coefficient de croissance de la glace (α) varie en fonction des conditions d'exposition et de l'isolation de la surface. Le maximum théorique de α est de $0,034 \text{ m } ^\circ\text{C}^{-1/2} \text{ d}^{-1/2}$. La valeur typique pour un lac venteux et sans neige est de $0,027 \text{ m } ^\circ\text{C}^{-1/2} \text{ d}^{-1/2}$ (CRIPE, 1996).

La figure 2-12 montre les courbes d'épaisseur de la glace à partir des mesures de GC. Les cercles bleus montrent les mesures réelles (329 points de données) et les lignes pointillées noires montrent les courbes estimées (minimum, moyenne et maximum) selon l'équation de Stefan avec des coefficients de croissance α de 0,019, 0,027 et 0,034 $\text{ m } ^\circ\text{C}^{-1/2} \text{ d}^{-1/2}$, respectivement.

La courbe maximale ($\alpha = 0,034$) englobe toutes les données, à l'exception de l'hiver 1982-1983. Pour cet hiver (croix noires sur la figure 2-12), un épaissement rapide de +0,6 m s'est produit entre le 24 décembre (0,6 m) et le 14 janvier (1,2 m).

La figure 2-13 montre la courbe d'épaisseur de la glace pour l'hiver 1984-1985. La courbe montre la croissance progressive de la couverture tout au long de l'hiver et le début de la décroissance à la fin avril et en mai. La courbe d'épaisseur de la glace pour l'hiver 1984-1985 suit à peu près la courbe moyenne ($\alpha = 0,027$).

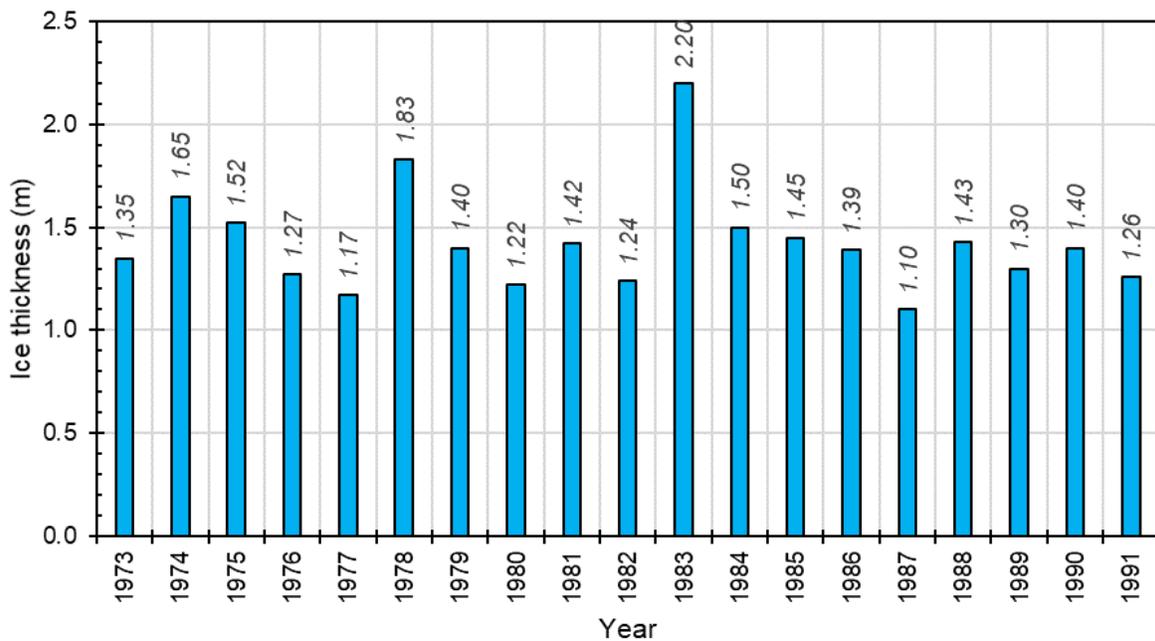


Figure 2-11 Mesure de l'épaisseur maximale annuelle de la glace sur la période 1973-1991. Selon les mesures effectuées par le GC (2022)

**NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde –
Conditions environnementales physiques**

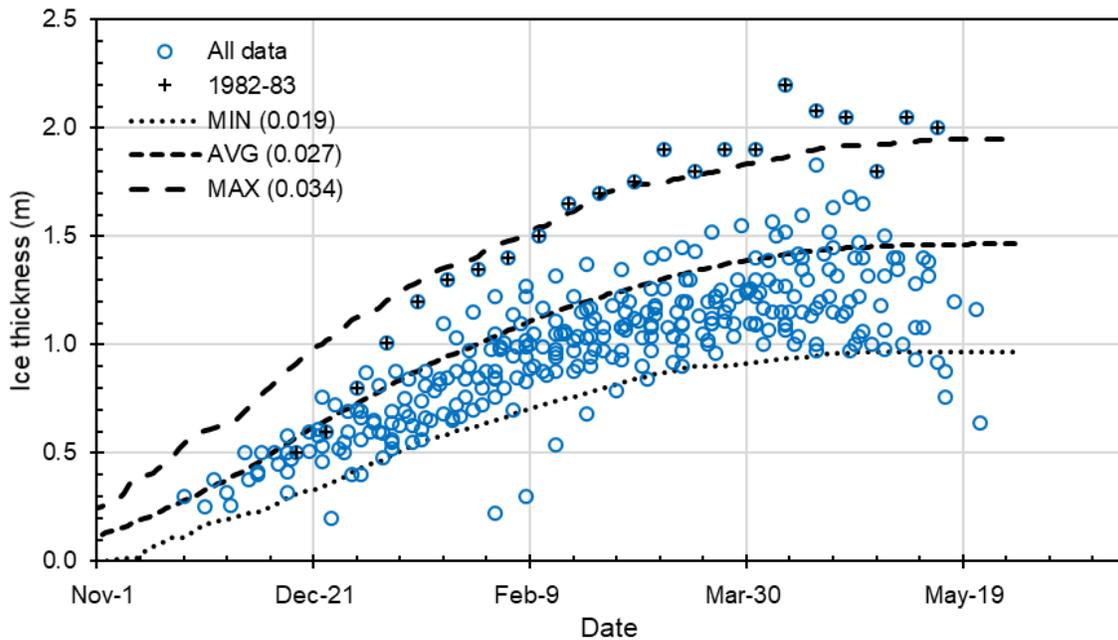


Figure 2-12 Courbes d'épaisseur de la glace : Épaisseur de glace mesurée entre décembre 1972 (GC, cercles bleus) et 1982-1983 (cercles bleus avec croix noires), courbes estimées basées sur l'équation de Stefan avec les valeurs 0,019, 0,027 et 0,034 m °C^{-1/2} d^{-1/2} (lignes pointillées noires).

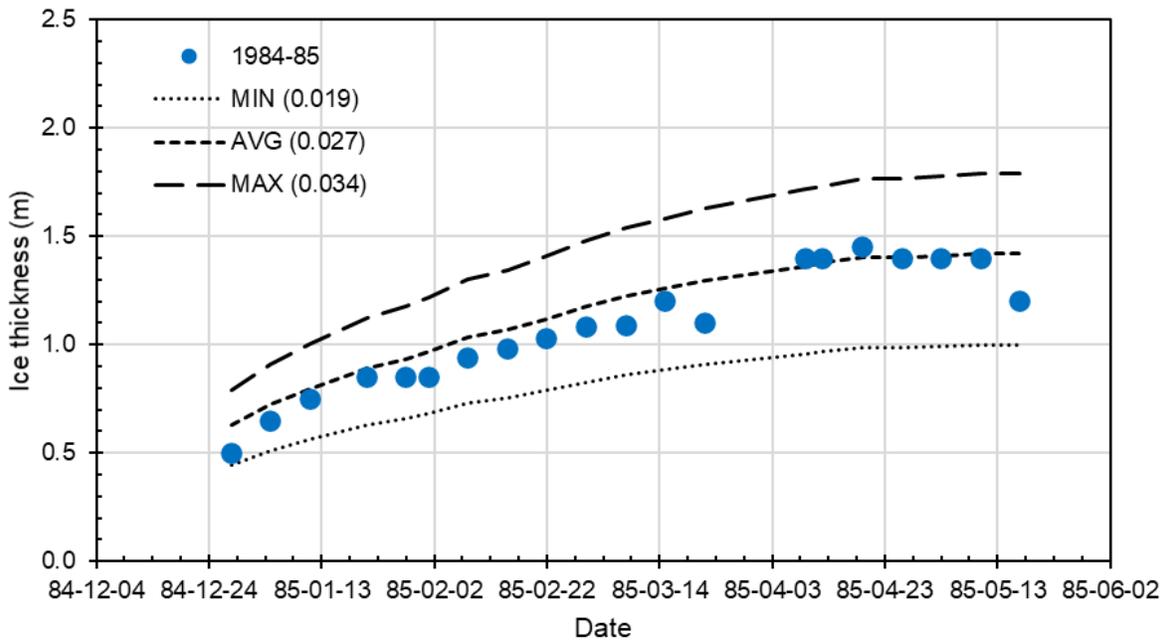


Figure 2-13 Courbe d'épaisseur de la glace pour l'hiver 1984-1985

2.4 SCÉNARIOS DE CHARGE ET D'INTERACTION GLACIAIRE

2.4.1 GÉNÉRAL

Les scénarios de charge et d'interaction glaciaire sont des considérations importantes pour le port. L'étude étant au stade de la préfaisabilité, seuls des commentaires généraux sont possibles. Les scénarios d'action des glaces susceptibles d'être importants varient grandement entre les deux options générales de port (c.-à-d. un port de PPB par rapport à un port en eau profonde).

2.4.2 PORT POUR PETITS BATEAUX

Les actions relatives à la glace pour un PPB sont affectées par de nombreux facteurs :

- Profondeur de l'eau - la profondeur de l'eau pour un PPB ne dépasserait probablement pas environ 6 m, ce qui situerait généralement le PPB dans la zone de la banquise côtière. Cela le protégerait contre les incursions de glace provenant du large. De plus, la faible profondeur d'eau empêcherait les caractéristiques des bummocks à fort tirant d'eau (p. ex., les quilles de crête) d'atteindre le PPB.
- Le type de structures composant le PPB - très probablement, l'extérieur du PPB (qui sera exposé à la glace) serait constitué de brise-lames en carapace :
 - Charges de glace - Les brise-lames en carapace ont généralement une résistance latérale élevée qui leur confère une bonne capacité à résister aux forces de la glace, de sorte que les charges de glace ne devraient pas constituer un problème majeur pour eux. Pour cette raison, les scénarios de charge glaciaire pour les brise-lames en pierre ne sont pas abordés ici;
 - Actions de la glace sur les pierres de carapace - les pierres de carapace doivent être dimensionnées pour éviter les dommages causés par la glace. Les scénarios d'action de la glace sur les pierres de carapace des brise-lames en pierre sont abordés plus loin;
 - Chevauchement et empiètement de la glace - l'importance de cette action de la glace dépend de la possibilité que des installations soient endommagées par un empiètement de la glace. Dans le cas d'un brise-lames en carapace isolé, il est peu probable que des installations soient présentes sur le brise-lames. Par conséquent, il serait peu vulnérable aux dommages causés par l'empiètement des glaces. Pour cette raison, les scénarios d'empiètement des glaces sur les brise-lames en pierre ne sont pas abordés ici;
 - Déglacement - la disposition des brise-lames du PPB peut retarder le dégagement de la glace au printemps, empêchant ainsi les petites embarcations de sortir du PPB et raccourcissant la saison d'exploitation du PPB.
- Les navires faisant escale au PPB et la base d'exploitation du PPB - Par définition, le PPB serait limité aux petites embarcations qui n'auraient pas la capacité de naviguer dans la glace. Ainsi, la saison d'exploitation d'un PPB serait limitée à la période d'eau libre.

Les actions de la glace sur les pierres de carapace peuvent généralement être divisées selon les processus suivants :

- Bulldozage - Dans ce cas, l'action horizontale de la glace « buldoze » les pierres de carapace. Comme l'interface est en pente, la glace a tendance à pousser les pierres de carapace vers le haut de la pente. La face inclinée entraîne également une rupture en flexion de la glace, un chevauchement et la formation de gravats sur ou au sommet de la pente;
- Plumage - il s'agit du cas où des pierres de carapace individuelles sont déplacées ou emportées par la glace. Ce type d'action de la glace est le plus préoccupant dans les cas où les mouvements verticaux de la glace sont prédominants, ce qui pourrait se produire en raison des marées ou des changements de niveau d'eau. Le « plumage » est peu probable à moins que des changements importants, constants et cycliques du niveau de l'eau ne se produisent. Ce type de fluctuation du niveau de l'eau se produit régulièrement dans les barrages

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

hydroélectriques, et il n'est pas surprenant que ce soient les sites où le « plumage » a été principalement observé. Avec l'action régulière des marées, un « pied de glace » stationnaire est généralement généré sur l'interface talus/glace. Le mouvement vertical de la glace se produit alors à l'extérieur du pied de glace, au niveau d'une fissure de marée. On s'attend à ce que cela se produise dans un PPB à Whapmagoostui/Kuujuarapik;

- Glissement - il s'agit de plans de rupture à grande échelle se développant dans une berme rocheuse sous l'effet des forces de la glace, qui pourraient inclure la « décapitation » de la berme. Les défaillances par glissement sont peu probables à notre avis, car les bermes de gravats ont généralement une résistance élevée au glissement. Les pierres de carapace peuvent être conçues pour résister aux trois processus susmentionnés.

2.4.3 PORT EN EAU PROFONDE

Les actions relatives à la glace pour un port en eau profonde sont influencées par de nombreux facteurs :

- Profondeur d'eau - la profondeur d'eau d'un port en eau profonde serait probablement d'environ 18,0 m, ce qui l'exposerait davantage aux conditions dynamiques de la glace, comme les incursions de la glace du large qui pourraient amener des bummocks et des éléments de glace à fort tirant d'eau (p. ex., quilles de crête) en contact avec le port.
- Le type de structures composant le port - un port en eau profonde serait plus grand qu'un PPB et il serait composé de structures permanentes plus complexes, nécessitant une évaluation détaillée des actions de la glace. Cela comprendrait les éléments suivants :
 - Charges glaciaires - la conception doit garantir que les structures présentent une intégrité structurelle adéquate contre les charges glaciaires pendant une période de retour prescrite. Les scénarios de charge de glace sont abordés plus loin;
 - Chevauchement et empiètement de la glace - la conception doit garantir que toutes les structures (par exemple, les chargeurs de navires) ne seront pas affectées par un éventuel chevauchement et empiètement de la glace sur le pont. Les scénarios d'empiètement de la glace sont abordés plus loin.
- Les navires faisant escale dans le port et la base d'exploitation du port - la saison d'exploitation d'un port en eau profonde peut varier selon la plage suivante :
 - a. Port ouvert uniquement en eau libre - bien entendu, cette option offrirait la saison d'exploitation la plus courte, mais les navires faisant escale dans le port n'auraient besoin que d'une classe glace minimale. Dans ce cas, la couverture de glace se développerait naturellement sans être affectée par les transits de navires, et les navires de gestion tactique des glaces ne seraient probablement pas nécessaires puisque le port ne fonctionnerait qu'en eau libre. On s'attend à ce que, de temps à autre, le port doive faire appel à la Garde Côtière Canadienne (GCC) pour obtenir l'aide d'un brise-glace, par exemple pour dégager la glace résultant d'une incursion dans la glace. Toutefois, on ne s'attend pas à ce que les demandes du port soient plus excessives que celles des autres ports en eau libre de l'Arctique que la GCC soutient dans ses opérations estivales.
 - b. Port ouvert en eau libre et saison d'englacement « intermédiaire » - il s'agit d'une approche couramment utilisée pour prolonger la saison d'exploitation des ports arctiques. Dans ce cas, les navires faisant escale au port devraient avoir une classe glace appropriée pour une exploitation dans la glace au début de l'hiver. Dans ce scénario, le régime des glaces peut être affecté par les transits de navires en début de saison, mais il se développerait naturellement après la fin des transits de navires. Bien entendu, les navires faisant escale dans un port exploité en eau libre et pendant la saison d'englacement « intermédiaire » devraient avoir une capacité de glace suffisante pour transiter dans les conditions de glace le long des trajets vers et depuis le port, par exemple dans la baie d'Hudson et le détroit d'Hudson. Toutefois, comme ces navires ne seraient probablement pas équipés pour la gestion tactique des glaces au port, on s'attend à ce qu'un certain soutien de brise-glace soit nécessaire au port pendant la saison intermédiaire, par exemple pour garder le port ouvert et dégager les voies d'accès au terminal. Étant donné que le port ne fonctionnerait que pendant la saison intermédiaire, le ou les navires de soutien tactique des glaces n'auraient besoin que d'être capables de

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

fonctionner dans une glace relativement mince, jusqu'à une épaisseur d'environ 0,3 à 0,5 m, selon le calendrier d'exploitation du port.

- c. Port ouvert toute l'année - Bien entendu, il s'agirait de la plus longue saison d'exploitation, mais les navires faisant escale au port devraient être classés pour pouvoir transiter dans les glaces toute l'année. Les transits réguliers de navires affecteraient le régime des glaces, retardant ou empêchant probablement l'établissement de la glace de rive. Les transits réguliers de navires entraîneraient également la formation des sarrasins agglomérés près du port et dans les couloirs de navigation. Les commentaires formulés en b. ci-dessus s'appliquent également à un port ouvert toute l'année. Toutefois, dans le cas d'un port ouvert toute l'année, le ou les navires de soutien tactique de la glace requis devraient être plus aptes à fonctionner dans la glace, car ils devraient fonctionner dans la glace jusqu'à l'épaisseur maximale de la glace pour l'hiver.

Les charges glaciaires peuvent être exercées par différents mécanismes :

- Impacts des radeaux glaciels provenant du large qui sont poussées vers le quai, par exemple par les vents - ce scénario peut se produire pendant deux périodes générales décrites ci-dessous. Les charges glaciaires dominantes peuvent être produites par l'un ou l'autre cas, selon les paramètres de l'interaction (par exemple, l'épaisseur de la glace, sa résistance).
 - Gel : les mouvements de la glace sont possibles jusqu'à la fin du gel, qui stabilise la glace et empêche tout nouveau mouvement;
 - Débâcle : des incursions de glace peuvent se produire, amenant de gros radeaux glaciels et peut-être aussi des crêtes de glace, à entrer en contact avec le quai.
- Charges thermiques de la glace - ces charges seront les plus importantes au milieu de l'hiver, lorsque la glace est essentiellement stable.
- Charges de glace verticales - les charges verticales seront exercées en raison de l'action des marées. L'action de la marée aura également un effet sur les charges de glace horizontales par la formation d'une accumulation de glace sur les structures.

L'empiètement de la glace peut se produire pendant le gel ou la débâcle. Fondamentalement, des mouvements de glace sont nécessaires pour produire des empiètements de glace (apport de glace sur le dessus des structures), selon les paramètres de l'interaction (profondeur de l'eau, pente de la structure, quantité de mouvement, épaisseur de la glace, etc.)

2.5 CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les changements climatiques modifieront les caractéristiques futures de la glace de mer (p. ex., présence, durée, épaisseur) au Nunavik, y compris le long de la côte de la baie d'Hudson, près de Whapmagoostui/Kuujuarapik. Ces changements pourraient, à leur tour, avoir un impact sur les infrastructures côtières.

Le littoral du Nunavik a été exposé à un réchauffement important, surtout pendant la période de 1987 à 2016, qui montre une augmentation des températures hivernales de +1,5 °C par décennie (Ouranos, 2020). L'augmentation de la température ambiante hivernale sera un facteur important des changements prévus dans les conditions de glace. Au Nunavik, pour l'horizon 2046-2064, la température moyenne de l'air en hiver (DJFM) devrait augmenter de +5,5 °C selon le scénario RCP4.5 et de +5,8 °C pour le scénario RCP8.5 (Ouranos, 2020).

Les changements futurs prévus dans les conditions de glace sont décrits par Ouranos (2020) à partir des ouvrages d'autres scientifiques. Les principales conclusions sont les suivantes :

- L'augmentation rapide des températures hivernales au-dessus de la baie d'Hudson et du Nunavik entraînera une prise de la glace plus tardive et une débâcle plus précoce;
- Au printemps, les températures plus chaudes accéléreront les processus de dégradation de la glace, ce qui entraînera le déplacement des radeaux glaciels;

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

- La mobilité accrue de la glace pourrait entraîner une probabilité plus élevée d'érosion liée à la glace et d'impact de la glace sur les infrastructures maritimes;
- Selon les simulations originales réalisées par Senneville (2018a), d'ici 2040-2070, la glace devrait être plus mince de 15 cm en novembre et de 80 cm en juin. La couche de glace plus mince pourrait se briser si des vents forts et des niveaux d'eau plus élevés se produisent simultanément. Au printemps et en automne, les côtes pourraient donc être plus exposées à l'érosion par les poussées de glace;
- La durée de la saison des glaces dans les plans d'eau entourant le Nunavik pourrait être réduite de plus de six semaines d'ici 2041-2070, selon le scénario SRES-A2 (Senneville et St-Onge Drouin, 2013), et de plus de deux mois d'ici 2100, selon le même scénario (Joly et al. 2011).

La figure 2-14 montre la concentration moyenne de glace de mer au Nunavik en décembre 1980-2010 (a) et 2040-2070 (b). D'après cette figure, il semblerait que la couverture de glace près de Whaphmagoostui/Kuujuuarapik pourrait être réduite approximativement de 40-50 % (1980-2019) à 10-20 % (2040-2070). La couverture de glace dans le détroit d'Hudson est également réduite de manière significative : approximativement de 80-90 % à 30-40 %. Les modèles de glace de mer sont actuellement améliorés pour affiner leur résolution horizontale (actuellement 10 km).

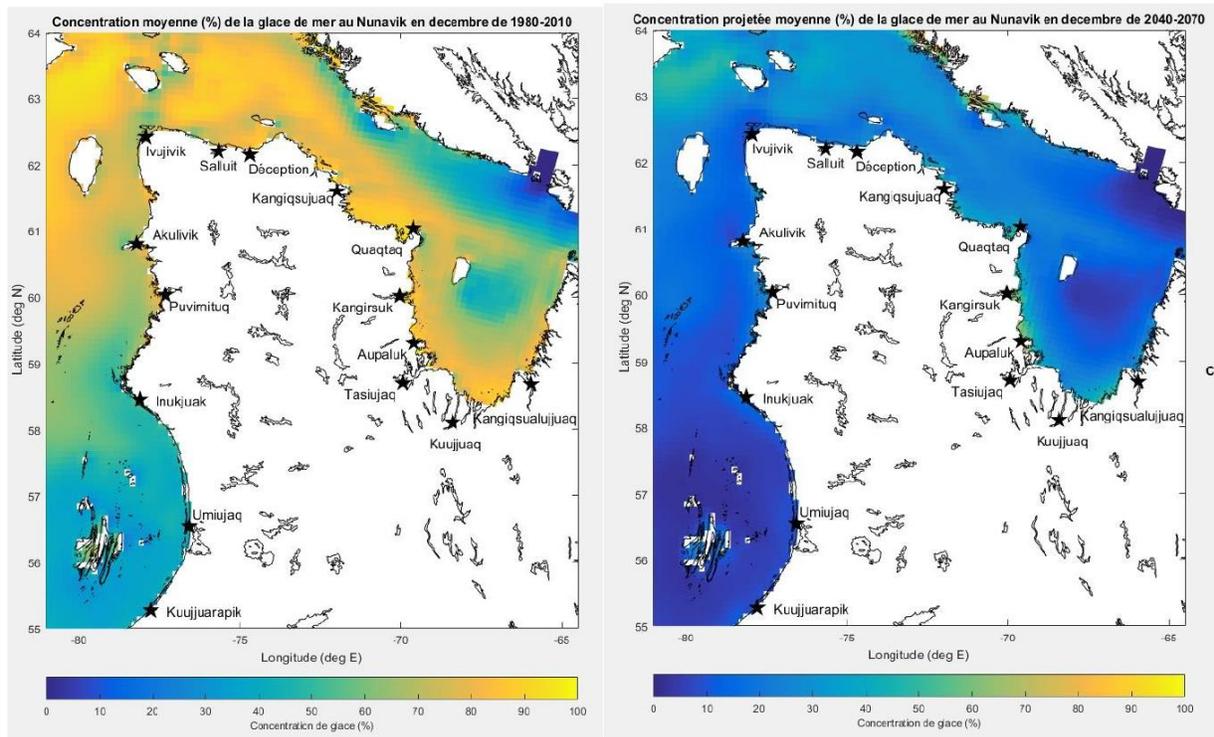


Figure 2-14 Concentration moyenne de la glace de mer au Nunavik en décembre 1980-2010 (a) et 2040-2070 (b) (Senneville, 2018b) - extrait de Ouranos (2020)

Avec le changement climatique, toutes les zones (A, B, C et D) connaîtront une prise des glaces plus tardive, une débâcle plus précoce et une couverture de glace plus mince. La fréquence des incursions de glace augmentera dans les zones A, B et C, mais pas dans la zone D, qui est protégée par le chenal Manitounuk.

La Grande rivière de la Baleine sera également touchée par les changements climatiques, qui pourraient entraîner des débâcles plus fréquentes et un mouvement accru des radeaux glaciels à l'embouchure de la rivière. La zone A sera influencée par ces changements du régime des glaces de la rivière.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

Le changement climatique prolongera la durée de la période sans glace. La route de navigation entre Whapmagoostui/Kuujuarapik et le détroit d'Hudson restera ouverte plus longtemps, ce qui sera favorable à la navigation.

Les impacts anticipés des changements climatiques n'affectent pas la zone privilégiée pour un port.

2.6 SOMMAIRE

Le régime des glaces dans la baie d'Hudson (de façon globale) et le long de la côte est près de Whapmagoostui/Kuujuarapik a été analysé à l'aide des informations disponibles, notamment les cartes des glaces, les images satellites, les mesures de l'épaisseur des glaces et les données climatiques.

Les résultats montrent que la saison typique sans glace le long de la côte est de la baie d'Hudson dure environ 5 mois, de juillet à novembre. Selon les projections des changements climatiques, la durée de la saison sans glace pourrait augmenter de plus de six semaines d'ici 2041-2070 (Ouranos, 2020). La couverture de glace sur la côte est se forme plus tard et se brise plus tôt par rapport à la côte ouest, ce qui pourrait être un avantage pour une infrastructure maritime au Québec (Est) par rapport à une infrastructure au Nunavut, au Manitoba ou en Ontario (Ouest).

Le régime des glaces dans quatre (4) zones d'étude (A, B, C et D) près de Whapmagoostui/Kuujuarapik a été analysé à partir d'observations par satellite. Les principales conclusions sont les suivantes :

- La zone A est le site le plus exposé. La couverture de glace se forme le plus tard dans la zone A, et est souvent détachée par l'action du pack glaciaire, suivie d'une nouvelle croissance de la glace. Elle est la plus tardive à geler et la plus précoce à se briser. Un quai situé dans la zone A serait exposé à des incursions de glace impliquant de gros radeaux glaciaires pendant une grande partie de l'hiver. La zone A est également exposée à la débâcle et à un embâcle potentiel à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine.
- La zone B présente une exposition intermédiaire à la glace, entre la zone A (qui est la plus exposée) et la zone D (qui est la plus protégée). La zone B gèle plus tard que la zone D, mais plus tôt que la zone A. La glace a tendance à se briser plus tard dans la zone B que dans la zone A. Contrairement à la zone D, la débâcle se produit par le transport de la glace hors de la zone plutôt que par la désintégration thermique et la fonte. Un quai situé dans la zone B serait exposé à des incursions de glace impliquant de gros radeaux glaciaires pendant la débâcle.
- La zone C est un peu moins exposée à l'action de la glace que la zone B, car elle gèle avant la zone B et se brise plus tard.
- La zone D est le site le plus protégé. La glace se forme le plus tôt dans la zone D et persiste le plus tard. L'épaisseur de la glace serait contrôlée par la croissance thermique durant tout l'hiver. La débâcle se produit par voie thermique, la glace fondant principalement sur place. La zone D n'est pas exposée aux incursions de radeaux glaciaires provenant du large.

Selon notre évaluation générale des glaces, la zone privilégiée pour un port PPB et un port en eau profonde est la zone B et la partie ouest de la zone C. Des analyses plus détaillées, le cas échéant, devraient suivre pour identifier l'emplacement optimal de l'infrastructure. Cette option est abordée plus en détail à la section 5.

3 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET OCÉANOGRAPHIQUES

3.1 VENT

Les vitesses du vent dans la zone d'intérêt sont enregistrées à l'aéroport de Whapmagoostui/Kuujjuarapik, situé à 55°17'00" N, 77°45'00" O, à environ 1,2 km à l'est de la côte de la baie d'Hudson dans le village de Whapmagoostui/Kuujjuarapik. L'aéroport de Whapmagoostui/Kuujjuarapik se trouve plus près de la zone B, mais en raison du manque de données disponibles aux autres emplacements (A, C et D), on peut supposer que les conditions de vent à tous les sites sont similaires en raison de leur proximité relative et de la similitude topographique entre les sites. Les enregistrements de vent à la station de l'aéroport sont disponibles entre 1957 et aujourd'hui. La rose des vents ci-dessous montre l'environnement éolien global de 1957 à 2022 enregistré à l'aéroport de Whapmagoostui/Kuujjuarapik, figure 3-1. Sur toute la durée de la période d'enregistrement, la majorité des vents soufflent du sud-est au nord-est. La direction prédominante dans la rose des vents est le sud-est, mais des vents plus forts se produisent dans les secteurs ouest et nord-ouest. La vitesse moyenne du vent sur l'ensemble des enregistrements est d'environ 5,1 m/s.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

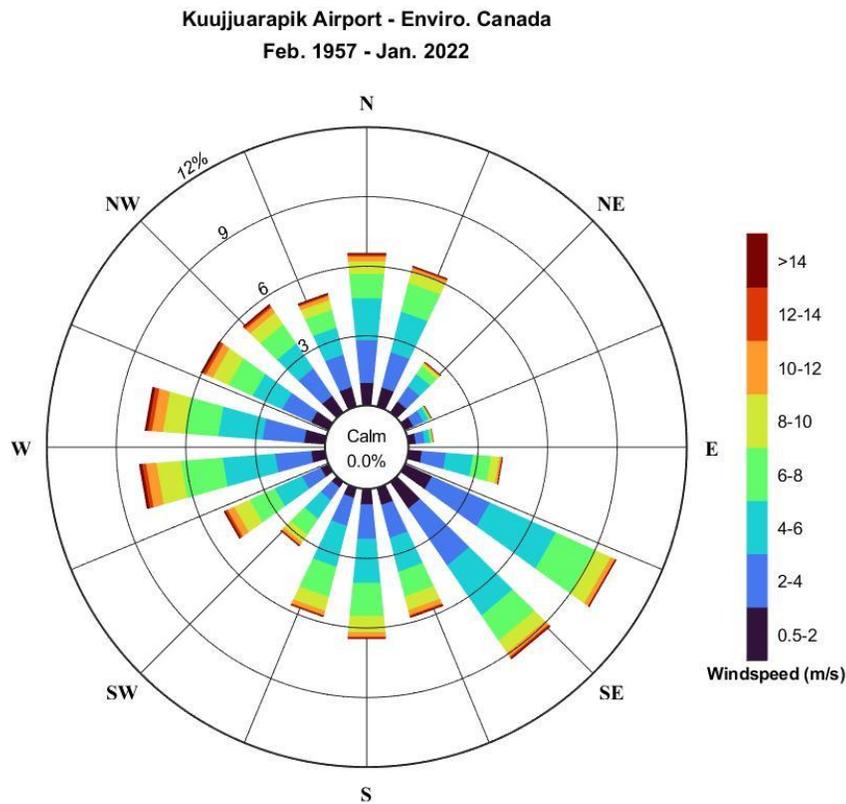


Figure 3-1 Rose des vents de l'aéroport de Whapmagoostui/Kuujjuarapik 1957-2022

Les données de vent de la saison des glaces et des saisons libres de glaces ont été comparées sur toute la période de données disponibles (1957-2022). En comparant les deux roses des vents, figure 3-2 et figure 3-3, on constate que pendant la saison des glaces en hiver, il y a une augmentation des vents dominants du sud-est et de l'est-sud-est, alors que pendant les mois d'été en eau libre, les vents les plus fréquents proviennent de l'ouest. Les vents du sud-est proviennent de la terre ferme et n'influencent pas le régime des vagues sur le site.

**NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde –
Conditions environnementales physiques**

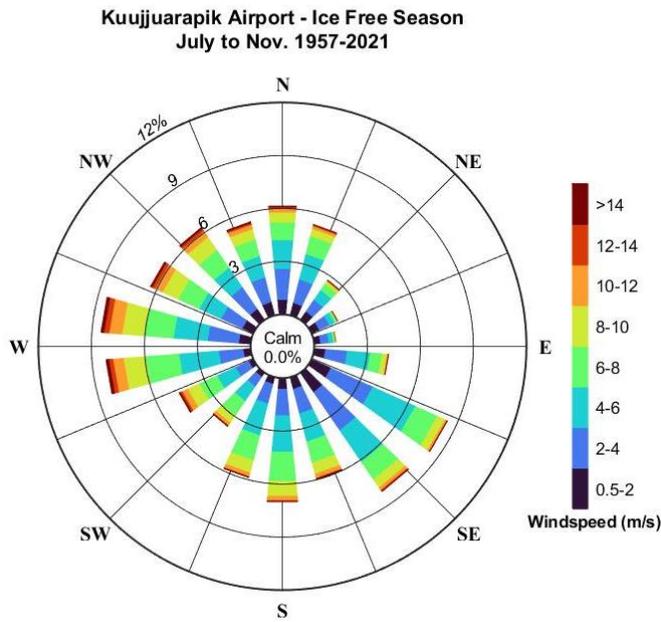


Figure 3-2 Rose des vents de la saison libre de glaces à Whapmagoostui/Kuujjuarapik

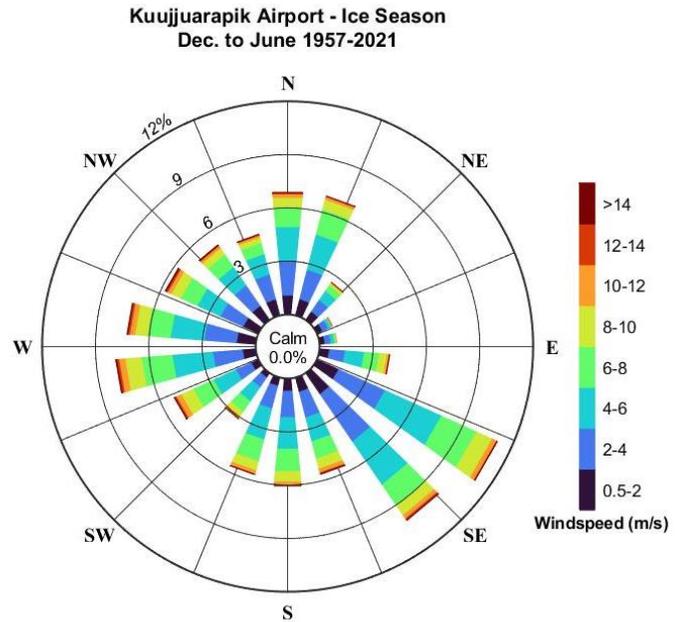


Figure 3-3 Rose des vents de la saison des glaces à Whapmagoostui/Kuujjuarapik

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

3.2 NIVEAUX D'EAU

Les niveaux d'eau près de Whapmagoostui/Kuujuarapik sont sujets à des fluctuations en raison des marées et pendant les ondes de tempête. Les niveaux d'eau changent également sur des échelles de temps plus longues en raison de la variation du niveau marin relatif (NMR).

3.2.1 MARÉES

Dans cette région de la baie d'Hudson, la marée domine les fluctuations des niveaux d'eau à court terme, bien que les conditions météorologiques et les ondes de tempête puissent également influencer les niveaux d'eau. Les données générales sur les niveaux d'eau pour l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine, fournies par le Service hydrographique du Canada (SHC), sont présentées dans le tableau 3-1.

Les marées près de Whapmagoostui/Kuujuarapik sont semi-diurnes et l'amplitude des marées varie d'une moyenne de 1,5 m à une amplitude maximale de 2,0 m. Les marées provenant des tables des marées et courants du Canada 2021, volume 4, pour l'Arctique et la baie d'Hudson, tableau 3-1. Notez que les marées pour Whapmagoostui/Kuujuarapik utilisent Churchill comme port de référence qui se trouve à environ 1000 km au nord-ouest.

Tableau 3-1 Marées de Whapmagoostui/Kuujuarapik (Tables des marées et courants du Canada 2021, volume 4, Arctique et baie d'Hudson)

Région	Whapmagoostui/Kuujuarapik		
Port de référence	Churchill		
Numéro d'index	4645		
Type de marée	Semi-diurne		
Marnage	Marée moyenne		1,5 m
	Marée haute		2,0 m
Hauteur de marée	Pleine mer supérieure	Marée moyenne	1,7 m
		Grande marée	2,0 m
	Basse mer inférieure	Marée moyenne	0,2 m
		Grande marée	0,0 m (zéro des cartes)
Niveau moyen de l'eau			1,0 m

* Note : Les hauteurs sont comparées au zéro des cartes
Fs73-4-2021.pdf (publications.gc.ca)

Il est à noter qu'il existe des variations saisonnières des marées en raison de la couverture annuelle de glace. Pendant la saison des glaces, la baie d'Hudson connaît des variations de marée plus faibles en plus d'un avancement de la marée (Freeman, 1986).

3.2.2 ONDES DE TEMPÊTE

Les ondes de tempête résultant d'une faible pression atmosphérique et de vents d'ouest peuvent induire une augmentation accrue du niveau de la mer au-dessus du niveau moyen de la mer et des fluctuations de marée. À l'automne 1999, une étude à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine a été réalisée par l'Institut des sciences de la mer de l'Université du Québec. Cette étude comprenait la mesure des vagues, des courants et des sédiments en suspension dans une profondeur d'eau de 10,0 m pendant 15 jours, au cours desquels a eu lieu une tempête de quatre jours. Au cours de cette tempête, des vagues de plus de 3,0 m de hauteur pendant 15 heures et une onde de tempête de plus de 1,0 m de hauteur ont été enregistrées. Pendant les jours de beau temps du recueil de données, seules des vagues locales avec des hauteurs significatives de moins de 1,0 m ont été enregistrées (Hill et al., 2003). Ce dernier résultat est cohérent avec les ondes de tempête de plus de 1,0 m rapportées par Hydro-Québec (Hydro-Québec, 1980).

3.2.3 NIVEAU DE LA MER

Les projections en matière de changement climatique dans le milieu marin indiquent que l'élévation du niveau de la mer et le déclin de la glace de mer entraîneront des changements dans les niveaux d'eau extrêmes, ce qui aura des répercussions sur les côtes canadiennes et les infrastructures. Il est essentiel de comprendre ces changements pour élaborer des stratégies d'adaptation susceptibles de minimiser les effets néfastes qui pourraient en résulter.

Le niveau de la mer relatif (NMR) est défini comme le niveau de la mer observé par rapport à un cadre de référence terrestre. Le NMR change en raison de l'élévation du niveau de la mer et du mouvement vertical de la terre. Ce point est abordé plus en détail dans la section 4.3.

Les valeurs des changements projetés du NMR de 2006 à 2020, 2050 et 2100 sont présentées dans le tableau 3-2 à partir de trois scénarios de gaz à effet de serre : RCP 2.6 pour un scénario à faibles émissions, RCP 4.5 pour un scénario à émissions intermédiaires, et RCP 8.5 pour un scénario à fortes émissions, qui comprend également un scénario amélioré pour RCP 8.5. Une représentation graphique du scénario de changement du niveau de la mer est également présentée à la figure 3-4.

On prévoit que le NMR sera plus bas qu'actuellement selon les scénarios présentés en raison du soulèvement isostatique. Les projections de changement du NMR vont de 109 cm d'ici 2100 pour le scénario médian RCP 2.6 à -6 cm d'ici 2100 pour le scénario renforcé RCP 8.5 (donneesclimatiques.ca, 2022).

Tableau 3-2 Changement projeté du niveau de la mer (Pointe Tikiraq Ungalliq, Whapmagoostui/Kuujuarapik, QC)
(donneesclimatiques.ca, 2022)

	2020	2050	2100
RCP 2.6 médian (50 %) (cm)	-23	-52	-109
RCP 2.6 supérieur (95 %) (cm)	-21	-50	-103
RCP 4.5 médian (50 %) (cm)	-23	-50	-98
RCP 4.5 supérieur (95 %) (cm)	-21	-48	-84
RCP 8.5 médian (50 %) (cm)	-22	-47	-80
RCP 8.5 supérieur (95 %) (cm)	-21	-36	-48
RCP 8.5 renforcé (cm)	N/A	N/A	-6

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

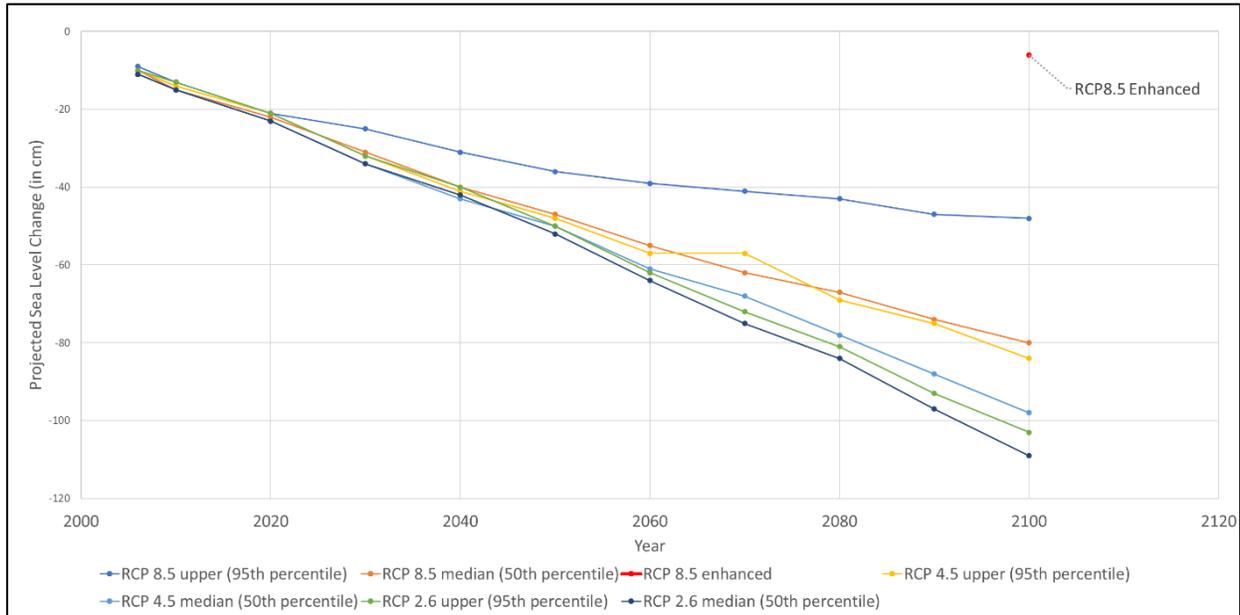


Figure 3-4 Changement prévu du niveau de la mer pour Whapmagoostui/Kuujuarapik selon les scénarios d'émissions RCP 2.6, RCP 4.5, et RCP 8.5 (donneesclimatiques.ca, 2022)

3.3 CLIMAT DES VAGUES

Les données publiées sur les vagues dans la zone sud-est de la baie d'Hudson sont rares. Des observations limitées effectuées au cours des étés 1991 et 1992 sur la plage de Whapmagoostui/Kuujuarapik permettent d'estimer la hauteur des vagues de 0,2 à 1,2 m sur des périodes de 2 à 5 secondes et une hauteur médiane de 50 cm (Ruz, 1994a).

Des fetchs importants d'environ 1000 km combinés à de forts vents de l'ouest et du nord-ouest lors de tempêtes entraînent le développement de grandes vagues générées par le vent. Le climat des vagues, précédemment référencé dans le rapport Ropars 2011, a été généré à l'aide des données sur les vents recueillis à l'aéroport de Whapmagoostui/Kuujuarapik. L'analyse a généré des hauteurs de vagues significatives dépassant 4,8 m en moyenne pendant une heure par saison de navigation et 6,0 m pour une période de retour de 25 ans à l'entrée du détroit de Manitounuk, qui est à proximité de la zone D. Plus près du littoral, la hauteur significative des vagues était de 1,7 m et de 2,2 m pour une période de retour de 25 ans.

Pendant les mois d'été, la région de Whapmagoostui/Kuujuarapik est dominée par des vagues de l'ouest (Ruz, 1994a), ce qui est prévisible en raison de l'augmentation des vents de l'ouest pendant la saison libre de glaces.

L'embouchure de la Grande rivière de la Baleine, adjacente aux zones A et B, est un environnement dominé par les vagues avec une faible influence des marées (Hill et al. 2003). Ces vagues sont le plus souvent générées par le vent.

Les vagues observées dans les zones A, B et C seront sensiblement les mêmes en raison de l'absence d'abris. La zone D est assez bien abritée des fortes vagues de l'ouest et du nord-ouest et constituerait un emplacement favorable pour un terminal en eau profonde. Les zones A, B et C peuvent être protégées des vagues du nord à divers degrés en raison de la présence des îles Manitounuk.

3.4 COURANTS

Les courants peuvent être alimentés par une combinaison de vents, de vagues et de marées. Une grande partie de l'énergie des courants est associée aux marées et aux vents dans la région. Les courants littoraux dans la zone de déferlement sont également alimentés par les vagues.

Ropars (2011) résume les courants pour les zones étudiées près de Whapmagoostui/Kuujjuarapik (A, B et C) comme étant de peu d'importance et selon le CSSA 1992, ils sont d'environ 30 cm/s. Cependant, la zone D peut être impactée par des courants plus forts induits par les marées et parfois par le vent en raison de son emplacement dans le détroit de Manitousuk (Ropars, 2011).

3.5 RÉSUMÉ

- Les données sur les vents de la saison des glaces et de la saison libre de glaces ont été comparées sur toute la période de données disponibles (1957-2022). Pendant la saison hivernale des glaces, on observe une augmentation des vents dominants du sud-est et de l'est-sud-est, alors que pendant les mois d'été en eau libre, les vents les plus fréquents proviennent de l'ouest.
- Les niveaux d'eau près de Whapmagoostui/Kuujjuarapik ont une marée moyenne de 1,5 m, et une grande marée moyenne de 2,0 m au-dessus du zéro des cartes.
- Le NMR de Whapmagoostui/Kuujjuarapik devrait baisser selon les études sur les trois voies critiques des gaz à effet de serre, qui indiquent une plage de changement potentiel de -109 cm d'ici 2100 pour le scénario médian RCP 2.6 à -6 cm d'ici 2100 pour le scénario renforcé RCP 8.5.
- Des fetchs importants d'environ 1000 km combinés à des vents forts de l'ouest et du nord-ouest lors de tempêtes entraînent le développement de grandes vagues générées par le vent. Une analyse a généré des hauteurs de vagues significatives dépassant 4,8 m en moyenne pendant une heure par saison de navigation et 6,0 m pour une période de retour de 25 ans. Plus près du littoral, la hauteur significative des vagues est de 1,7 m et de 2,2 m pour une période de retour de 25 ans.

4 GÉOMORPHOLOGIE

La zone d'étude est caractérisée par des formes de relief façonnées par des vestiges de processus glaciaires, le littoral ayant été remanié alors que la terre émergeait lentement de la mer. La Grande rivière de la Baleine est la principale source de sédiments de la côte dans la zone d'étude. Au nord-est de la zone d'étude, l'érosion côtière est une source importante de sédiments dans le passage de Manitounuk. Le littoral moderne est constitué de dépôts de roche-mère et de sédiments sur lesquels agissent des processus hydrodynamiques, comme les marées, les courants de marée et la glace de mer, dans un contexte de baisse relative du niveau de la mer. On prévoit que le changement climatique aura de multiples répercussions sur les processus géomorphologiques dans la zone d'étude sous l'effet de la dynamique de la glace de mer, des variations du niveau de l'eau, des précipitations et des changements de température.

Cette section présente les éléments de la géomorphologie du littoral de l'est de la baie d'Hudson dans les environs de Whapmagoostui/Kuujuarapik, du passage de Manitounuk, incluant l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine. La bathymétrie, la topographie et le processus de déglaciation sont pris en considération pour fournir le cadre du développement de la morphologie actuelle.

4.1 BATHYMÉTRIE

La bathymétrie, illustrée à la figure 4-1, est caractérisée par des tendances générales qui reflètent la morphologie du substrat rocheux sous-jacent, notamment des crêtes et des creux discontinus orientés nord-est-sud-ouest. Les crêtes forment des cuestas, à forte pente à l'est, et à faible pente à l'ouest. Les cuestas s'étendent au large sur 40 km à l'ouest de la Grande rivière de la Baleine.

À l'ouest de la Grande rivière de la Baleine, la profondeur augmente jusqu'à 60 m à moins de 3 km du rivage, mais elle dépasse rarement 100 m par rapport au zéro des cartes. À environ 8 km à l'ouest de l'embouchure de la rivière, le fond marin s'élève jusqu'à des profondeurs de moins de 20 m. Les crêtes discontinues sont orientées vers le nord-est et sont des prolongements contigus des îles Manitounuk. Au sud-ouest de la Grande rivière de la Baleine, la tendance des crêtes est coupée par un creux orienté ouest-sud-ouest, généralement aligné avec le chenal de la Grande rivière de la Baleine.

Le passage de Manitounuk est situé à environ 10 km au nord-est de la Grande rivière de la Baleine et est délimité par la côte continentale orientée vers le nord-est et les îles Manitounuk. Le détroit a une longueur de 58 km, une largeur minimale de 1 km et une largeur maximale de 5,7 km. L'embouchure du passage de Manitounuk, d'une largeur de 3,5 km, s'ouvre vers le sud-ouest. Les eaux s'approfondissent progressivement vers l'ouest à partir du continent. La profondeur maximale de l'eau est de >100 m près de l'embouchure du détroit, et elle est moins profonde vers le nord-est. Près de la tête du passage de Manitounuk, la profondeur maximale de l'eau est de >30 m. Des estrans intertidaux sont présents à l'abri de promontoires ou de caps, et ont généralement une largeur de <100 m dans le sud-est du détroit, et s'élargissent jusqu'à 1 km près de la tête du passage de Manitounuk.

La bathymétrie du delta de la Grande rivière de la Baleine présente une marge de haut-fond (<5 m) avec des bancs de sable peu profonds (<2 m). Le delta s'étend sur 2 km à partir du rivage près de l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine avec une rupture de pente entre 5 et 10 m de profondeur d'eau. La marge du haut-fond se rétrécit vers le nord-est. En général, la marge côtière présente une rupture de pente à une profondeur de 5 à 10 m à moins de 150 m du rivage. Par endroits, la pente de la marge côtière est plus prononcée, comme au sud-ouest de l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine et au nord-est de la zone d'étude, en face de l'île Manitounuk, avec des profondeurs de l'ordre de 10 à 20 m à moins de 50 m du rivage.

La bathymétrie est un élément important à considérer pour un port en eau profonde ou un port de type PPB dans la zone d'étude. Les eaux littorales sont peu profondes, avec une marge relativement large dans les zones B et C, qui comprennent l'estuaire de la Grande rivière de la Baleine et le nord-est du delta de la rivière. Les profondeurs d'eau sont plus importantes dans la zone littorale au sud-ouest de la zone A et au nord-est de la zone D.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

La topographie de la zone côtière littorale de la zone d'étude n'est généralement pas abrupte dans les zones B et C, avec des pentes douces près du littoral ($< 5^\circ$). Toutefois, au sud de la Grande rivière de la Baleine, dans la zone A, la topographie de la zone côtière littorale a une pente plus prononcée ($< 15^\circ$), ce qui constitue un terrain plus difficile pour la construction d'infrastructures et peut nécessiter le dynamitage de roches pour niveler le site potentiel.

4.3 DÉGLACIATION

La plupart des sédiments de la côte constituent un héritage de dépôt depuis le dernier cycle glaciaire, lorsque l'inlandsis Laurentien était présent dans la région de la baie d'Hudson. Comme décrit par Lochte et al. (2019) et illustré à la figure 4-2, la déglaciation s'est déroulée selon les étapes suivantes :

- Développement du lac Agassiz/Ojibway, un lac proglaciaire massif situé au sud de l'inlandsis, dans le sud de la baie d'Hudson, entre 13 000 et 8 700 ans.
- La déglaciation de la baie d'Hudson a commencé il y a environ 8 700 à 8 400 ans (Lochte et al. 2019), et celle de la Grande rivière de la Baleine il y a environ 8 100 ans (Hillaire-Marcel, 1976).
- Écoulement du lac Agassiz/Ojibway à partir du sud de la baie d'Hudson.
- Incursion de la mer de Tyrrell dans les zones isostatiquement déprimées nouvellement déglacées. La mer de Tyrrell est définie comme la mer de la fin de la période glaciaire et de la période postglaciaire dans la région de la baie d'Hudson (Lee, 1960).

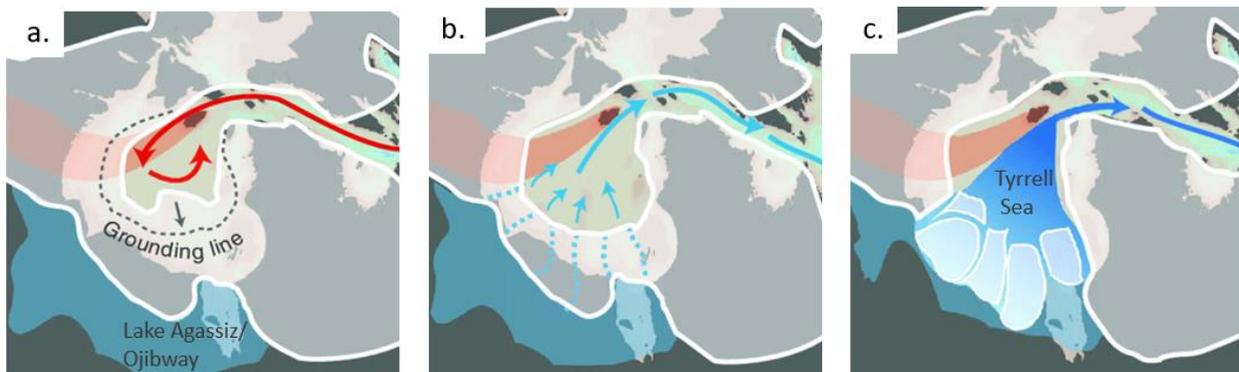


Figure 4-2 Vues schématiques en plan de la baie d'Hudson entre -8 700 et -8 400 ans, montrant les premiers stades de la déglaciation.

- Étendue de l'inlandsis Laurentien et du lac Agassiz/Ojibway
- Écoulement du lac Agassiz
- Inondation de la mer de Tyrrell (modifié de Lochte et al, 2019)

Le poids de la glace a entraîné une dépression isostatique de la masse terrestre, de sorte que la mer de Tyrrell était beaucoup plus grande que la baie d'Hudson actuelle. Cependant, la taille de la nouvelle mer était régie par deux processus opposés : l'élévation eustatique du niveau de la mer et la baisse isostatique de la mer causée par le relèvement du sol. L'élévation eustatique du niveau de la mer, causée par la fonte continue de la glace et l'expansion thermique de l'océan, a été dominante jusqu'à la déglaciation, il y a environ 8 500 ans. Par la suite, le relèvement isostatique est devenu très rapide. La combinaison des composantes eustatiques et isostatiques est définie comme le NMR (niveau de la mer relatif).

L'émergence du littoral de l'est de la baie d'Hudson a entraîné de multiples formes d'érosion et d'accumulations littorales soulevées qui ont été utilisées pour mesurer les taux de changement du NMR. Comme illustré sur la figure 4-3, le taux d'émergence du littoral de l'est de la baie d'Hudson était initialement très rapide, de l'ordre de 9 à 10 m/siècle, et a diminué à un taux d'environ 1 m/siècle à partir de -2 800 ans (Lavoie et al., 2012).

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

L'ajustement isostatique continue de provoquer le soulèvement du littoral de la baie d'Hudson, ce qui entraîne l'émergence des terres (NMR négatif). Les projections récentes du niveau de la mer pour Whapmagoostui/Kuujuarapik sont présentées à la section 3.2.3. Les projections indiquent que le taux d'émergence de la côte pourrait être égal ou inférieur à l'élévation à long terme du NMR au cours des 2 800 dernières années.

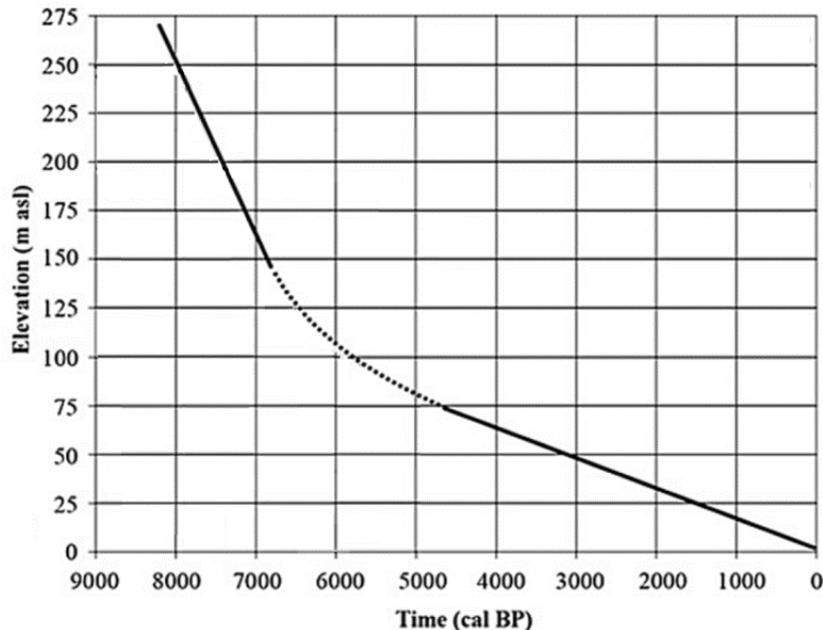


Figure 4-3 Élévation inférée du NMR postglaciaire pour la côte est de la baie d'Hudson en années civiles avant le temps présent (cal BP). La section en pointillés de la courbe indique l'incertitude due au manque de données de référence utilisées pour déterminer le NMR (modifié de Lavoie et al., 2012).

4.4 GÉOLOGIE DE SURFACE

Une carte de la morphologie du secteur d'étude présentée à la figure 4-4 a été produite par Le Bureau de la Connaissance géoscientifique du Québec (BCGQ) (Brouard et al., 2020). Selon cette carte, le littoral de la zone d'étude est principalement composé de dépôts prodeltaïques et de sédiments déposés dans le littoral de l'ancienne mer de Tyrell (Unité Mb) et du substrat rocheux (R et Rp) (voir les descriptions des morphologies dans le tableau 4-1.

Dans la section estuarienne de la Grande rivière de la Baleine, les dépôts de sol sont principalement composés de sédiments fins glaciomarins deltaïques, prodeltaïques et d'eau profonde (Md et Ma), constitués d'argile, de limon et de gravier. Les glissements de terrain sont récurrents dans ces sols, souvent initiés par les processus fluviaux et contribuent à l'apport de sédiments dans la zone d'étude (Owczarek et al. 2020).

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

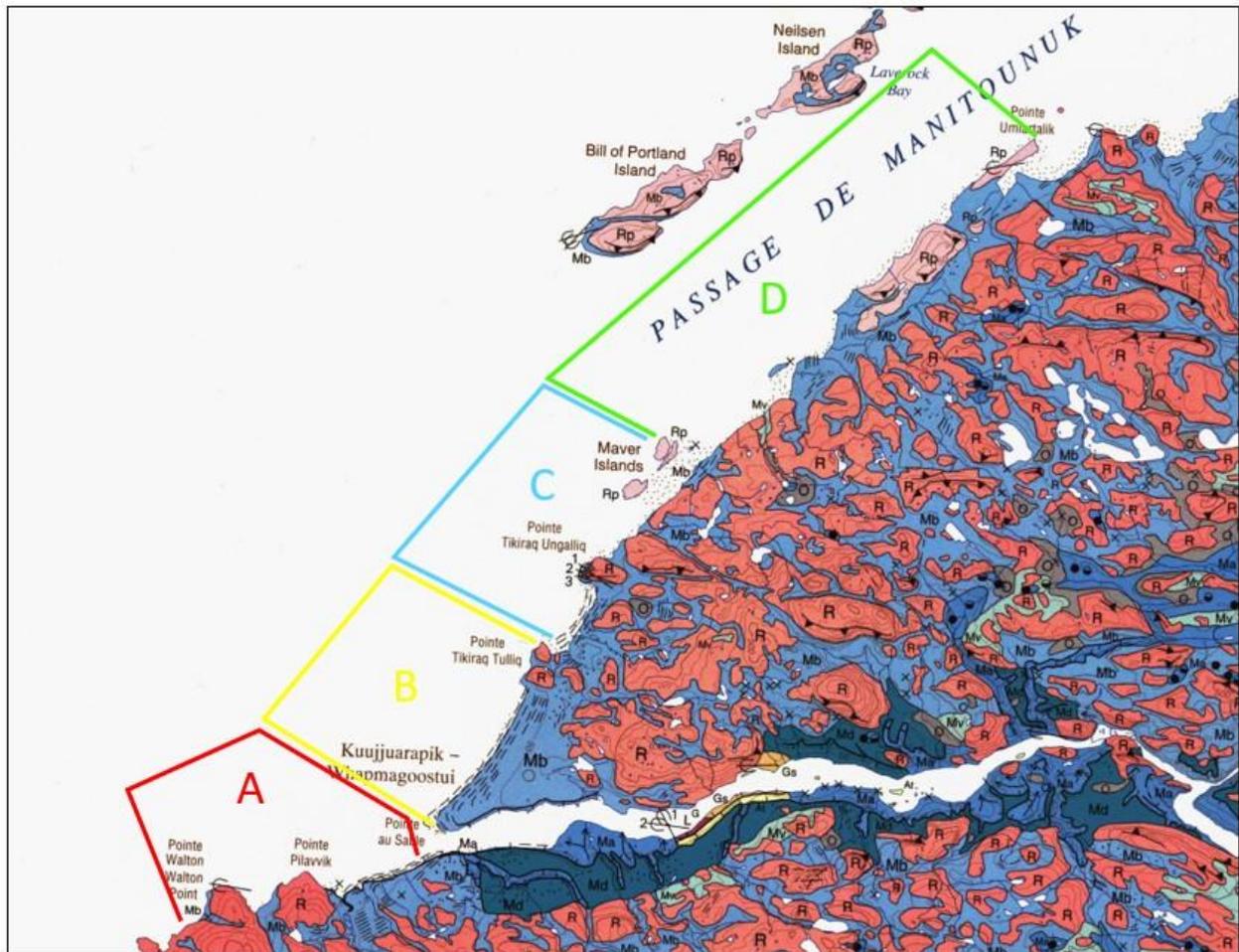


Figure 4-4 Distribution de la morphologie autour des zones étudiées (Brouard et al., 2020).

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

Tableau 4-1 Légende de l'unité morphologique côtière

CLASSIFICATION	CODE	GROUPE	DESCRIPTION
Roche	Rp	Socle rocheux protérozoïque	Roches volcaniques et sédimentaires du Protérozoïque
	R	Socle rocheux archéen	Roches métasédimentaires, métavolcaniques et intrusives de l'Archéen.
Sable, gravier, cailloux, blocs	Mb	Sédiments côtiers et précôtiers	0,5 à 5 m d'épaisseur; déposés le long des anciens rivages de la mer de Tyrrell; comprenant également des sédiments prodeltaïques à proximité de grands complexes deltaïques; surface généralement marquée par des crêtes de plage et parfois modifiée par l'action du vent.
	Mv	Till pré littoral mince et remanié	<0,5 m ou till remanié sur une épaisseur de <0,5 m déposé en eau peu profonde dans la mer de Tyrrell; surface contrôlée par la topographie du substrat rocheux du till sous-jacent.
Sable, gravier	Md	Dépôts marins et glaciomarins	1 à 40 m d'épaisseur; déposé à l'embouchure des rivières qui se jettent dans la mer de Tyrrell; surface généralement marquée par des chenaux abandonnés et parfois modifiée par l'action du vent.
Argile, silt	Ma	Sédiments marins d'eau profonde	0,5 à 20 m d'épaisseur; déposé par des cours d'eau, des ravinements et des mouvements de masse; surface généralement recouverte d'une fine couche de tourbe et modifiée par la présence de paises.

4.5 PERGÉLISOL

Les quatre sites portuaires potentiels (A, B, C, D) de Whapmagoostui/KuujuarapiK sont situés le long du littoral de la baie d'Hudson. Adjacentes aux sites potentiels, les terres émergées sont généralement classées comme pergélisol discontinu et dispersé, où moins de 50 % de la surface terrestre est pergélisolée, la température du pergélisol pour les sols argileux riches en glace et la tourbe est estimée au point de fusion, et la température du pergélisol est estimée entre 0 °C et -1 °C (Allard et al. 2012). Plus précisément, les zones de hautes terres adjacentes aux sites portuaires sont « caractérisées par des palses recouvrant des sédiments fins de la mer de Tyrrell et par un pergélisol dispersé sous des collines rocheuses exposées au vent le long de la côte. » (Bhiry et al. 2011), comme illustré à la figure 4-5. Localement, le pergélisol peut varier sur de courtes distances en fonction de la topographie, de la végétation et de la couverture neigeuse. Cependant, Bhiry et al. (2011) notent l'absence de pergélisol à des altitudes inférieures à 20 m le long de la côte qui est attribuée aux effets modérateurs de la baie d'Hudson.

Selon GRID-Arendal (2020), le pergélisol ne devrait pas s'étendre au large. Les dépôts littoraux comprennent des plages rocheuses sablonneuses, ainsi que des dunes et autres caractéristiques éoliennes affectées par les processus de gel et la dynamique côtière.

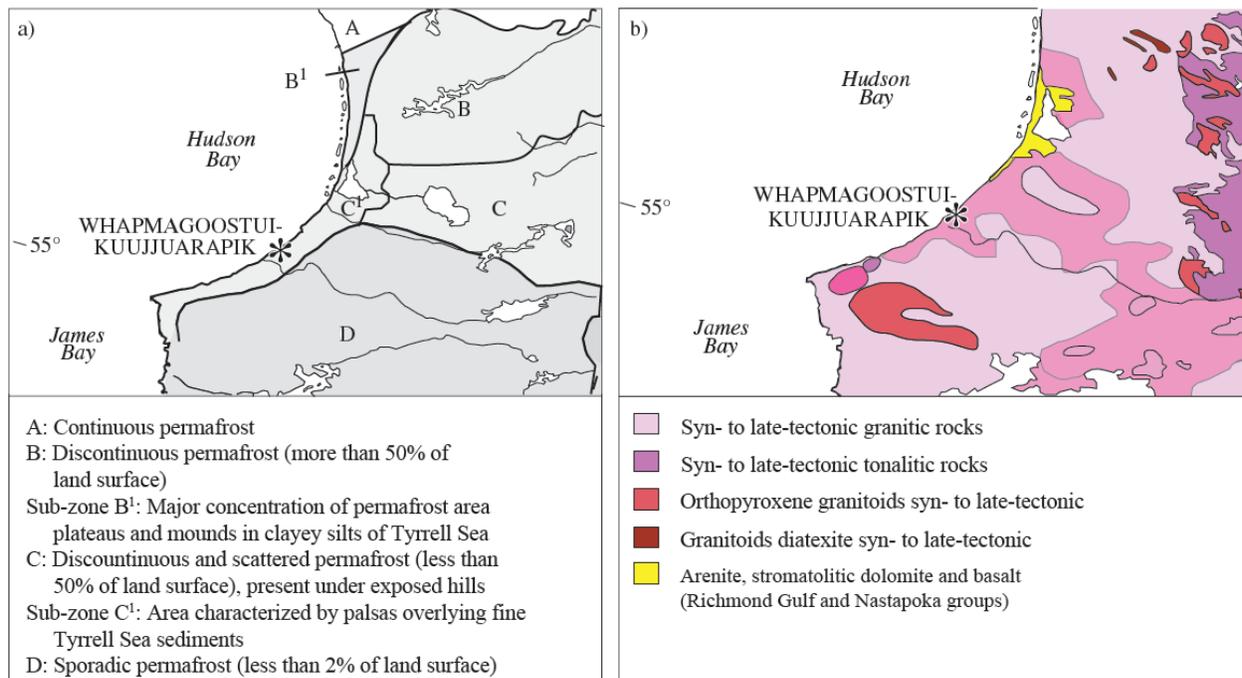


Figure 4-5 a) Conditions de pergélisol sur la côte dans le contexte de b) la géologie du substrat rocheux (Bhiry et al. 2011).

La géomorphologie et la géologie de surface de la zone terrestre comprennent un substrat rocheux affouilli par les glaciers, exposé à la surface ou recouvert de sédiments le long de la côte de la baie d'Hudson (RNCAN 2020). À l'intérieur des sites portuaires potentiels C et D, le substrat rocheux est recouvert de sédiments extracôtiers contenant du limon et de l'argile, ainsi que de gros clastes. À l'intérieur des terres des sites portuaires potentiels A et B, le substrat rocheux est recouvert de sédiments littoraux et proches du rivage, y compris des dépôts de sable et de gravier. La Grande rivière de la Baleine se jette dans la baie d'Hudson approximativement à la frontière entre les sites portuaires potentiels A et B.

ONeil et al. (2019) fournissent des estimations de l'excès de glace terrestre (pourcentage de glace par volume) dans les cinq premiers mètres du pergélisol. Pour la zone située à l'intérieur des sites portuaires potentiels C et D, la teneur totale estimée en glace excédentaire dans le pergélisol est supérieure à 10-20 %. Pour la zone située à l'intérieur des sites potentiels A et B, la teneur totale estimée en glace excédentaire dans le pergélisol est supérieure à 0-5 %. Ces estimations de l'excès de glace dans le sol correspondent en général aux désignations des unités géologiques superficielles; les dépôts de silt et d'argile ont un plus grand potentiel d'excès de glace dans le sol que les dépôts de sable et de gravier.

4.6 GÉOMORPHOLOGIE CÔTIÈRE ET FLUVIAIRE

La dynamique d'érosion et de dépôt sur le littoral de la zone d'étude est conditionnée par le contexte hydrodynamique, la physiographie et l'émergence côtière due au soulèvement. L'émergence côtière a préservé des formes de relief et des caractéristiques géomorphologiques spécifiques, et il reste un héritage de paléorivages, consistant en des rivages parsemés de blocs, des terrasses marines soulevées, des paléodeltas, et des volées de plages et de dunes surélevées. Une classification générale du littoral pour la zone d'étude est présentée à la figure 4-6 en utilisant une classification cartographique développée par Wynja et al. 2015.

La plupart des caractéristiques du littoral non lithifié de la zone d'étude sont progradantes, comme les flèches de sable, les plages, les tombolos et les deltas. Cependant, de courtes sections de la côte au nord de la zone d'étude reculent. Une partie de la zone d'étude se trouve au passage de Manitounuk, une côte abritée par un chapelet d'îles cuesta (c'est-à-dire les îles Manitounuk) - dans ces zones, il y a des estrans qui reculent en raison de la fonte du pergélisol côtier et de l'érosion. De plus, des sections de la vallée de la Grande rivière de la Baleine présentent une zone de glissement de terrain qui s'érode par le biais de mouvements de masse.

La Grande rivière de la Baleine se déverse dans la zone d'étude à partir d'un bassin versant d'environ 42 735 km² (Hülse et Bentley, 2012). Les courants de surface sont orientés vers le nord-est à des vitesses moyennes de 0,6 à 0,7 m/s (Hydro-Québec, 1993), et dépendent fortement du débit d'eau douce, qui est en moyenne de 700 m³s⁻¹, allant de <200 m³s⁻¹ en mars à >1300 m³s⁻¹ en juin (Ingram, 1981). Les vents contribuent à la circulation vers le nord-est, la direction la plus fréquente étant celle de l'ouest entre juillet et novembre, pendant les conditions libres de glaces. La figure 4-6 montre la direction dominante du transport littoral pendant les conditions libres de glaces.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

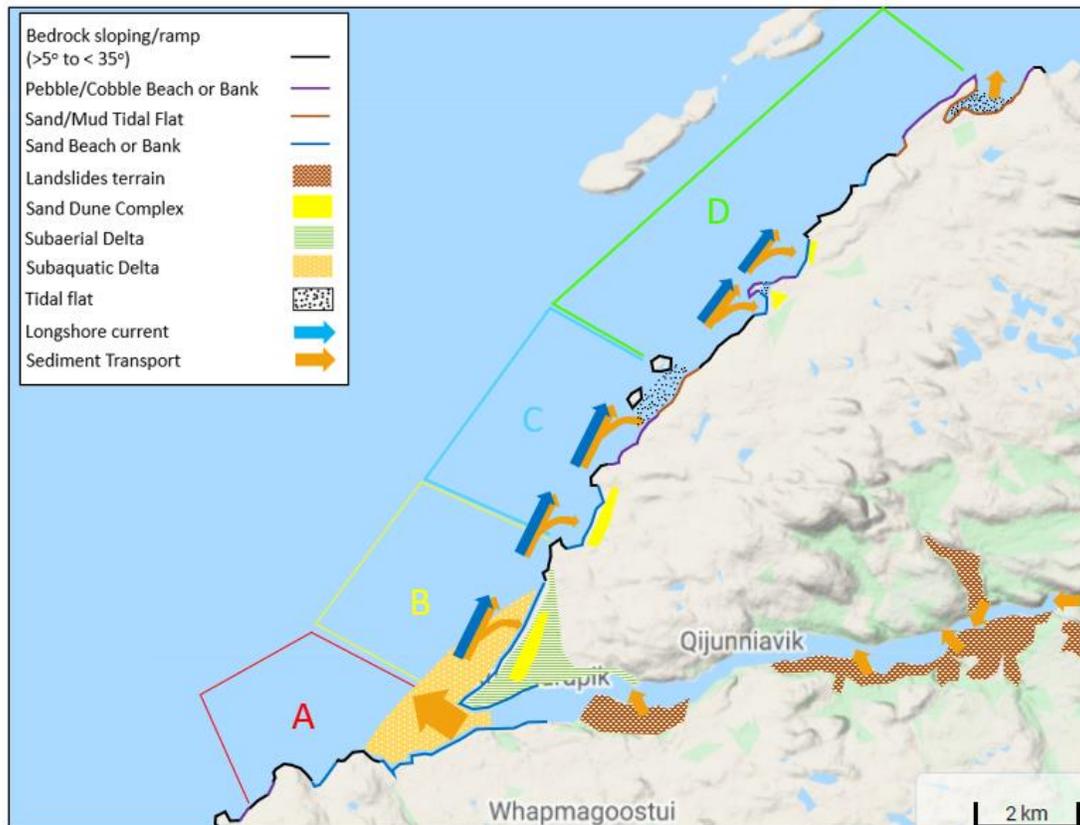


Figure 4-6 Carte de classification côtière pour le littoral de la zone d'étude, y compris les caractéristiques géomorphologiques et les directions du transport des sédiments basées sur les directions des vents dominants pendant les conditions libres de glaces (Boisson et Allard, 2015 ; Hill et al., 2003 ; Owczarek et al., 2020).

4.6.1 ROC

Le littoral rocheux est généralement constitué d'affleurements rocheux peu élevés ayant de faibles pentes ($< 5^\circ$), sauf au sud-ouest de l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine, où les pentes sont plus abruptes ($< 15^\circ$). Les côtes rocheuses sont intensément balayées par les vagues, affouillées par la glace flottante et ont été affectées par l'altération par le gel depuis le retrait de l'inlandsis Laurentidien et la régression subséquente de la mer de Tyrrell (Boisson et Allard, 2018, Fournier et Allard, 1992). Les côtes lithifiées sont stables avec peu ou pas de retrait.

4.6.2 DELTA SUBAQUATIQUE

L'embouchure de la Grande rivière de la Baleine se jette dans la mer sur le côté sud-ouest d'une terrasse (delta subaérien) et sur une plateforme littorale d'environ 1 km de large. Le chenal de la rivière s'enfonce dans une barre d'embouchure peu profonde (< 2 m) (Hill et al. 2003, Longuepee 2000). Au large de la barre d'embouchure, une barre unique de 2,5 m de haut, dont la crête a une profondeur d'eau minimale de 3,5 m, s'étend le long du bord extérieur de la plateforme subaquatique du delta, parallèlement à la plage, et converge avec le littoral près de l'extrémité distale (nord-est) de la plage. La rupture de pente se produit entre 5 et 10 m de profondeur d'eau, et la pente du prodelta s'étend jusqu'à environ 40 m de profondeur d'eau, où elle se confond avec le fond du bassin.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

La progression de la Grande rivière de la Baleine est visible dans les sédiments littoraux de la vallée fluviale, car les vestiges d'une série d'incisions descendantes dans des dépôts deltaïques plus anciens, causées par le relèvement isostatique, ont laissé des expositions de deltas plus anciens dans les parois de la vallée (Hill et al. 2003).

4.6.3 DELTA SUBAÉRIEN

La terrasse sableuse de forme triangulaire, dont le rivage est limité au sud par l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine, est un delta subaquatique, déposé lorsque le niveau de la mer était plus élevé, et qui est devenu subaérien en raison du relèvement isostatique. Ruz et Allard (1994) décrivent la terrasse, caractérisée par une surface plongeant vers la mer, inclinée à 1° de l'altitude de 25 m au niveau de la mer. Cette caractéristique s'étend sur 3,6 km de l'embouchure de la rivière à un affleurement rocheux au nord-est. Les crêtes sableuses à la surface du delta subaérien sont parallèles à la ligne de rivage actuelle et s'incurvent près de l'embouchure de l'estuaire, marquant l'ancienne position de l'embouchure du fleuve. Il y a environ 20 crêtes, progressant à une altitude de 20-25 m, développées entre -2000 ans et aujourd'hui. L'analyse des photos aériennes par Ruz et Allard (1994) indique une progradation de 100 à 150 m entre 1972 et 1990 à l'extrémité sud de la plage. La comparaison avec l'imagerie satellite de 2021 montre une progradation continue vers le sud (figure 4-7).

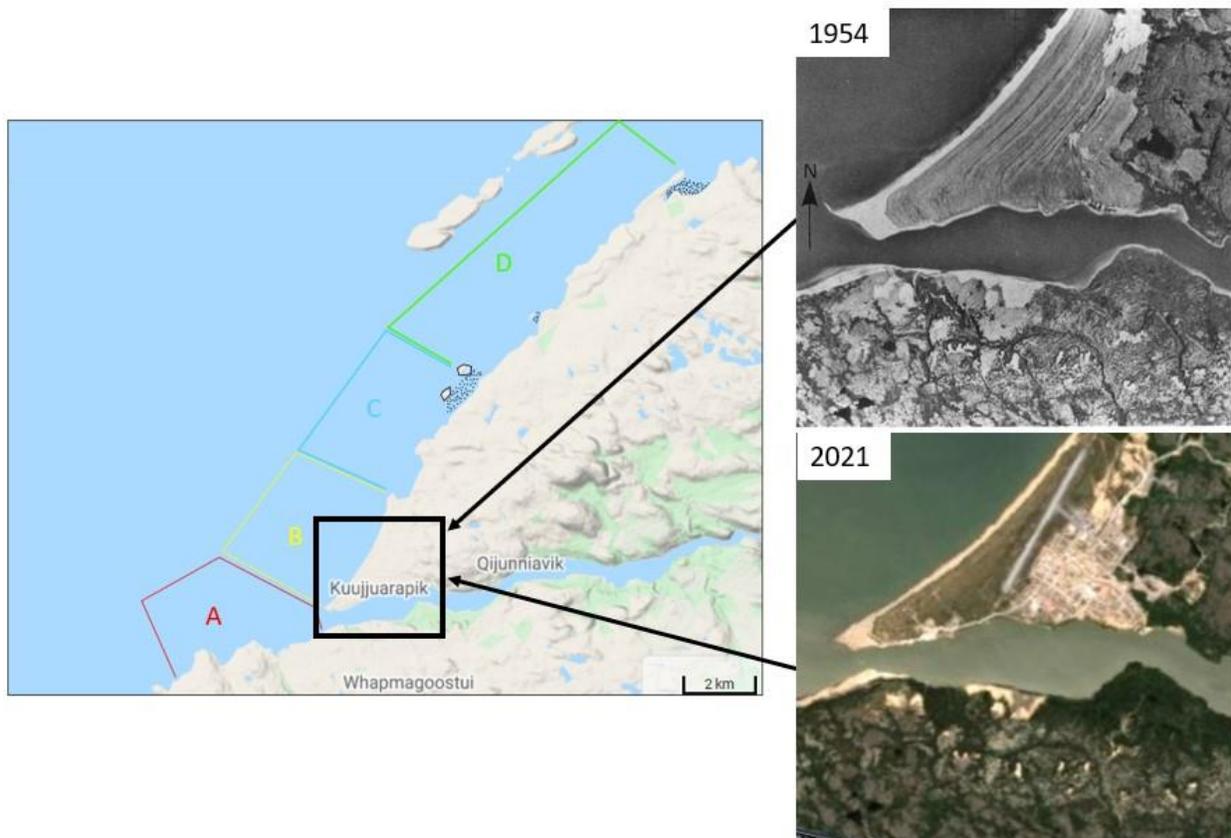


Figure 4-7 Delta subaérien situé à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine. L'image en haut à droite est une photographie aérienne de 1954 (de Ruz et Allard, 1994), celle en bas à droite est une image satellite de 2021.

4.6.4 PLAGES ET DUNES

Des plages de poche sablonneuses sont présentes entre les promontoires rocheux et les bancs de galets et de cailloux dans les sites B et C. Des exemples de plages dans la zone d'étude sont présentés à la figure 4-8. En raison de la circulation locale de l'eau, le panache d'eau douce de la Grande rivière de la Baleine a tendance à s'étendre vers le nord-est, agissant comme une source de sédiments pour le dépôt des plages dans la zone d'étude (Hequette et Tremblay, 2009). Une plage de 1,6 km située à 4 km à l'est de l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine a été caractérisée par Hequette et Tremblay (2009). La zone intertidale a une largeur d'environ 100 m, avec une pente moyenne de l'estran de 5 %, diminuant à environ 2 % sur le bas de plage. La zone littorale est caractérisée par des barres littorales parallèles et des creux qui dissipent l'énergie des vagues entrantes. Les principaux paramètres responsables du mouvement des sédiments le long des plages sont l'énergie des vagues et la vitesse des courants littoraux induits par les vagues incidentes obliques (Hequette et Tremblay, 2009).

Des dunes basses (<5 m de haut) se sont formées à l'intérieur des plages de sable. Des crêtes de dunes s'élevant progressivement sont également présentes, interprétées comme des dunes reliques ayant gagné en hauteur sous l'effet du soulèvement isostatique (Ruz et Allard, 1994b). Les dunes de la côte est de la baie d'Hudson ont tendance à se former sur les côtes océaniques exposées à des fetchs importants (centaines de kilomètres) (Boisson et Allard, 2018). Au nord-est, en raison de conditions plus abritées au passage de Manitounuk, il n'y a aucune dune sur le littoral.



Figure 4-8 Exemples de plages de poche dans la zone d'étude (images de Boisson et al. 2015)

4.6.5 ZONES DE GLISSEMENT DE TERRAIN

Des glissements de terrain ont été signalés sur une distance de 12 km en amont de l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine (Bélanger et Filion, 1991). Le terrain des glissements de terrain est limité à des argiles marines silteuses à grain fin provenant de la mer de Tyrrell, principalement situé sur la rive sud de la rivière. Les glissements de terrain entraînent des épisodes de forte charge sédimentaire et provoquent des rétrécissements de la rivière. Une préoccupation potentielle est l'impact des taux de sédimentation élevés, qui peuvent entraîner l'obstruction d'une voie navigable ou présenter un obstacle pour la navigation pour un PPB installé dans l'estuaire de Whapmagoostui/Kuujuarapik ou près de l'embouchure de la rivière.

Il existe des exemples de mouvements de masse à la fois graduels et rapides de zones de glissement de terrain actives. Owczarek et al. (2020) ont utilisé des photos aériennes pour analyser les formes de terrain à l'intérieur du glissement de terrain et de la vallée fluviale afin d'évaluer les ruptures de pente graduelles et la constriction de la rivière entre 1969 et 2020. L'analyse indique que les mécanismes de déclenchement sont des processus en interaction, les plus importants étant l'intensité des précipitations estivales et les débits élevés de la rivière. Les argiles marines soulevées sont exposées et instables, ce qui entraîne un seuil relativement bas de précipitations et de débits fluviaux menant au déclenchement ou à l'activation du glissement de terrain, comparativement à d'autres zones de glissement de terrain du Canada subarctique.

Un exemple de glissement de terrain à transport de masse rapide s'est produit à 8 km en amont de l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine en avril 2021 (figure 4-9). Le glissement de terrain couvre une section de 1,8 km d'un affluent de la Grande rivière de la Baleine et a une largeur approximative de 500 mètres. La cicatrice d'arrachement et la zone perturbée en dessous sont identifiables sur l'image de la figure 4-9. Les sédiments transportés depuis l'affluent sont visibles sur les rives de la Grande rivière de la Baleine à partir d'images satellites.

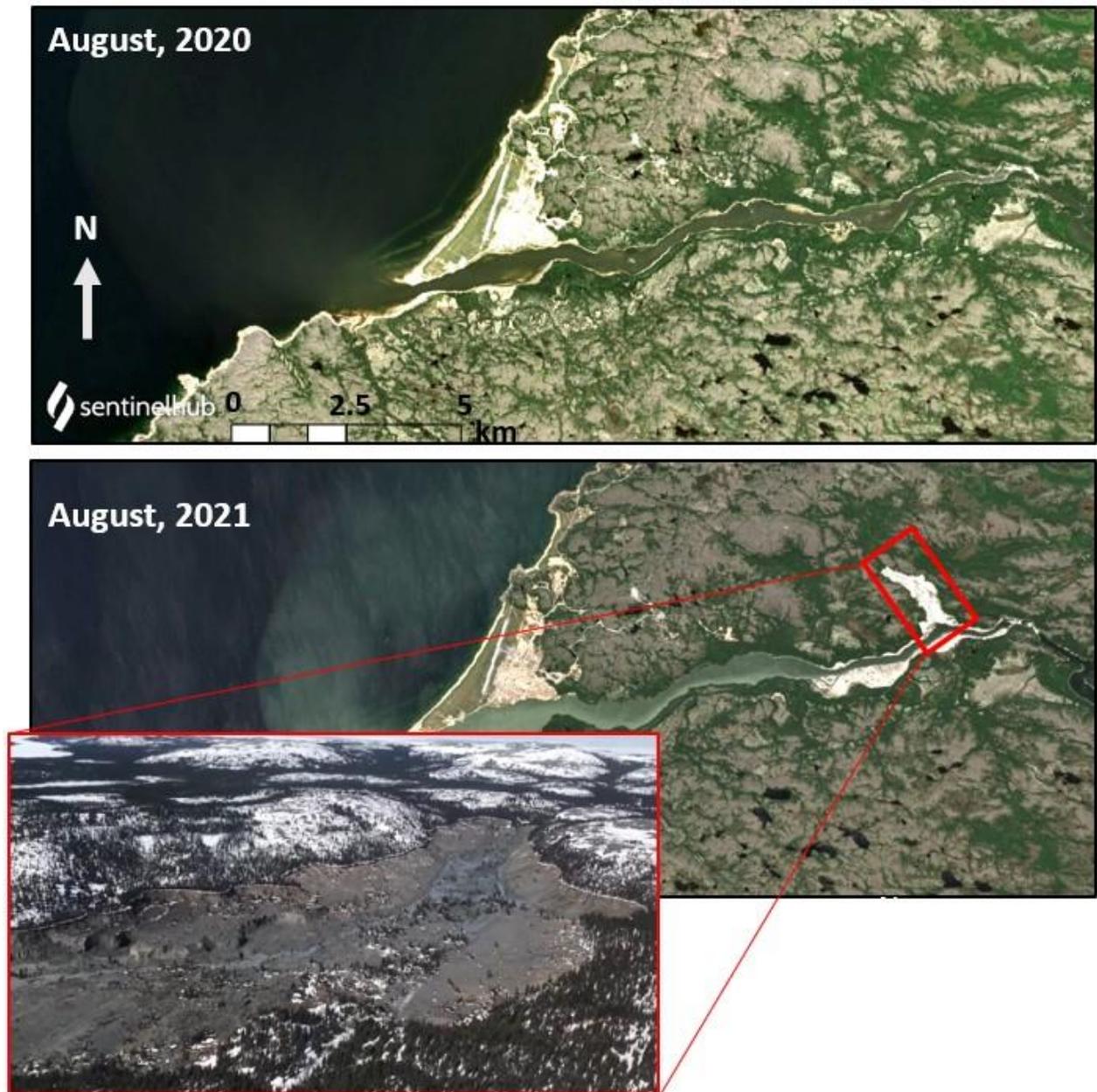


Figure 4-9 Image satellite illustrant l'avant et l'après du glissement de terrain d'avril 2021, situé à 8 km en amont de l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine (image en médaillon de la Première nation de Whapmagoostui, via Nunatsiq News).

4.6.6 ESTRANS – PASSAGE DE MANITOUNUK

Les estrans du passage de Manitounuk reculent en raison du dégel du pergélisol côtier et de l'érosion. Les estrans du passage de Manitounuk sont constitués d'argiles marines dérivées de la mer de Tyrrel postglaciaire et déposées lorsque le niveau de la mer était beaucoup plus élevé qu'aujourd'hui, et ont émergé en raison du soulèvement isostatique. Il s'agit d'une plateforme d'érosion qui est maintenant adaptée au régime local des marées (Allard et al., 1998). D'après l'inspection des images satellites et les observations de la vidéo côtière (Michaud et Frobel, 1994), des estrans étroits sont présents juste au nord de la zone d'étude, situés dans des échancrures entre des promontoires bas et étroits, et devenant progressivement plus larges (jusqu'à 1 km de large) vers la tête du détroit.

La glace de rive se forme au-dessus des estrans, gèle jusqu'au fond de la mer et absorbe jusqu'à 3 m de sédiments (Allard et al., 1998). Les volumes mesurés le long des vasières en avril 1993 indiquent une composition moyenne de 28 % de sédiments dans la glace par unité de volume à la base de la glace (Zevenhuizen, 1994). Les effets combinés de l'incorporation des sédiments dans la glace de mer et de la fonte subséquente modifient les propriétés géotechniques en réduisant la cohésion des sédiments, ce qui les rend plus sensibles à l'érosion (Zevenhuizen, 1994, Allard et al., 1998).

4.7 BILAN SÉDIMENTAIRE

4.7.1 GRANDE RIVIÈRE DE LA BALEINE

Dans le cadre d'une étude, Hulse et Bentley (2012) ont évalué la charge sédimentaire dans la Grande rivière de la Baleine et ont utilisé des carottes de sédiments marins pour estimer les taux d'accumulation des sédiments. Les taux moyens d'accumulation de sédiments mesurés à partir de 8 carottes marines ont été utilisés pour estimer l'accumulation totale dans un bassin littoral, une zone de 25 km² délimitée par une crête du fond marin orientée nord-est, qui est alignée avec les îles Manitounuk. Les accumulations totales ont ensuite été comparées à une estimation de l'apport sédimentaire de la Grande rivière de la Baleine. Les résultats décrivent la charge sédimentaire de la Grande rivière de la Baleine, les taux d'accumulation marine et la distribution :

- Une étude de la charge sédimentaire réalisée par Hydro-Québec (1993) a mesuré une charge sédimentaire fluviale de 176 000 t/an provenant de la Grande rivière de la Baleine.
- Les taux d'accumulation de sédiments des échantillons de carottes mesurent entre 0,09 et 0,26 cm/an (figure 4-10). En se basant sur la moyenne de ces taux d'accumulation et en les évaluant sur le bassin proximal de 25 km², un calcul de 40 000 t/an de charge sédimentaire est déposé dans le bassin proximal de 25 km². Cela représente 23 % du dépôt de l'apport de sédiments de la Grande rivière de la Baleine. Le reste de la sédimentation contourne le bassin proximal.
- La dynamique du panache d'eau douce est abordée pour expliquer le dépôt des autres 77 % de l'apport sédimentaire de la Grande rivière de la Baleine. Ingram (1981) décrit le panache d'eau douce couvrant une zone de ~100 km² et s'étendant sur ~8 km au large. Sous le panache d'eau douce, les courants sont parallèles au rivage vers le nord-est. Par conséquent, il est probable que la majeure partie du panache de sédiments se dépose dans la zone du panache de 100 km², une partie se déposant également le long de la côte.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

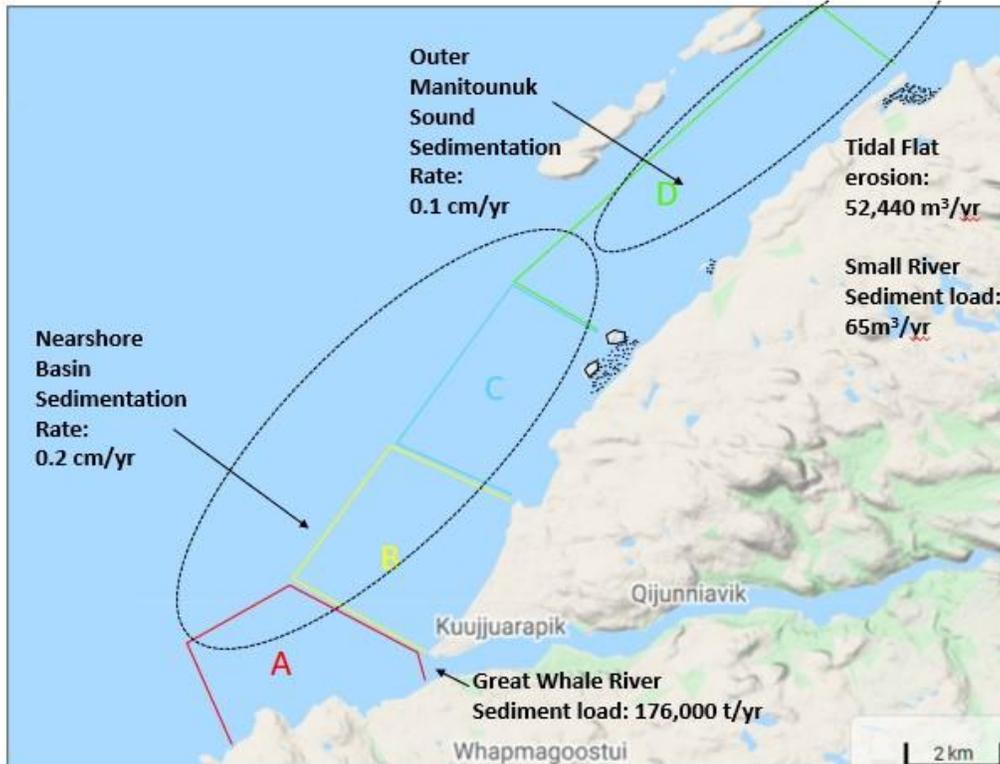


Figure 4-10 Taux d'accumulation des sédiments du fond marin et bilan sédimentaire pour la zone d'étude

4.7.2 PASSAGE DE MANITOUNUK

La plupart des informations sur le bilan sédimentaire du passage de Manitounuk proviennent de Zevenhuizen (1994) et sont résumées ci-après :

- Les estrans s'érodent en raison du soulèvement isostatique et de l'exposition subséquente aux courants de marée, de l'action des vagues et des ondes de tempête épisodiques, ainsi que de la cohésion réduite causée par la glace de rive. Les relevés des élévations des estrans indiquent une érosion annuelle de l'ordre de 1 à 2 cm/an (Zevenhuizen, 1994 ; Allard et al., 1998). Ces données sont approximatives et bénéficieraient d'études à long terme (Allard et al., 1998).
- La plupart des apports sédimentaires dans le passage de Manitounuk proviennent de l'érosion côtière situés sur la côte est du passage de Manitounuk. D'après les fiches de terrain du SHC (Service hydrographique du Canada), la superficie totale des zones subtidales peu profondes et des estrans du passage de Manitounuk est de $14,164 \times 10^6 \text{ m}^2$, et le volume retiré est de $141\,640 \text{ m}^3/\text{an}$. Le volume total de sédiments rejetés dans le détroit par l'érosion des falaises causée par la fonte de la glace de sol est de $2880 \text{ m}^3/\text{an}$. Seuls $370 \text{ m}^3/\text{an}$ de sédiments proviennent de l'apport fluvial.
- Dans la section extérieure du passage de Manitounuk, la superficie totale de la zone de marée peu profonde est de $5,244 \times 10^6 \text{ m}^2$, et le volume retiré est de $52\,440 \text{ m}^3/\text{an}$. $65 \text{ m}^3/\text{an}$ de sédiments proviennent de l'apport fluvial.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

- La glace de rive disparaît principalement par fonte in situ. Après la débâcle, les radeaux glaciels en mouvement sont poussés par les vents et transportés par les courants de marée, mais comme l'amplitude de la marée est à peu près égale à l'épaisseur des radeaux glaciels, ceux-ci sont trop gros pour flotter au-dessus du plat de marée (Allard et al., 1998). Ainsi, l'affouillement par la glace est très faible et ne contribue donc pas au bilan sédimentaire global (Zevenhuizen, 1994 ; Allard et al., 1998).
- Le taux de dépôt moyen pour les parties intérieure, centrale et extérieure du détroit est de 0,3, 0,2 et 0,1 cm/an, selon le bilan sédimentaire et la superficie du passage de Manitounuk. La tendance montre une diminution constante du taux de dépôt de la tête à l'embouchure du détroit.

Ce bilan sédimentaire établi par Zevenhuizen (1994) suggère que peu de sédiments parviennent au passage de Manitounuk en provenance de sources extérieures, y compris de la Grande rivière de la Baleine. Cette hypothèse est fondée sur le parcours du panache qui, selon Ingram (1981), dévie vers le large au sud du passage de Manitounuk. Par conséquent, il est probable que très peu de sédiments provenant de la Grande rivière de la Baleine parviennent au passage de Manitounuk.

4.8 CHANGEMENT ENVIRONNEMENTAL

Les impacts des changements climatiques affectent la nature des changements le long de la côte dans la zone d'étude. Les changements climatiques entraîneront vraisemblablement une augmentation des niveaux d'eau, des vagues et des vents extrêmes, ce qui entraînera une augmentation des taux de submersion et potentiellement d'érosion du littoral de Whapmagoostui/Kuujuarapik.

Les principaux impacts prévus des changements climatiques sur la côte sont les suivants :

- Niveaux d'eau et niveaux élevés/bas des ondes de tempête

Les ondes de tempête positives extrêmes pourraient augmenter jusqu'à 29 cm vers la fin du 21^e siècle, d'après les calculs de Masse et Gallant (2016). Les ondes de tempête négatives ne devraient pas changer par rapport au passé récent.

Inversement, d'après les projections du NMR (voir la section 4.2), il est probable que les taux de changement du NMR soient plus lents, ce qui entraînera certainement un degré plus élevé de remaniement du littoral non lithifié. L'exposition prolongée aux conditions hydrodynamiques influencera probablement le développement des caractéristiques de progradation et d'érosion sur la côte. Cependant, cette hypothèse n'a pas encore été validée par la cartographie géomorphologique.

- Dates de formation et de disparition de la glace de mer

Avec le réchauffement climatique, la débâcle se produit plus tôt et le gel plus tard (Joly et al., 2010; Tivy et al., 2011). Les concentrations de glace de mer en été diminuent également (Tivy et al., 2011). La saison des glaces de mer dans la baie d'Hudson pourrait être réduite de plus de 6 semaines d'ici 2041-2070 (Senneville et St-onge Drouin, 2013).

La côte est protégée par la glace de mer contre l'action des vagues en hiver. Cependant, à mesure que l'étendue et la durée de la glace de mer diminuent, le fetch augmente, ce qui fait que les vagues sont plus grandes et que leur énergie atteint la côte, ce qui entraîne une érosion accrue. L'impact de la glace de mer comprend l'érosion par la glace et l'introduction des radeaux glaciels dans les estrans. La glace peut se déplacer contre la côte sous l'effet de la pression du vent ou de la pression transmise par les packs glaciels, affouillant le fond marin et entraînant les sédiments vers la côte.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

– Poussée de glace

Une poussée de glace se produit lorsque des nappes de glace sont poussées et empilées sur le littoral en raison de courants océaniques, de vents forts ou de changements de température. Une fois sur le rivage, la glace pousse et affouille les sédiments pour former des monticules ou des crêtes. Ainsi, un événement de poussée glacielle peut éroder les environnements sédimentaires (c'est-à-dire les plages, les estrans). Dans le contexte des changements climatiques, la poussée des glaces pourrait être plus intense et plus fréquente en raison d'une plus longue période de glace de mer mobile.

– Glissements de terrain

Les modèles climatiques indiquent que les événements de précipitations extrêmes vont augmenter dans le futur pour cette région, coïncidant avec des augmentations rapides de la température de l'air (Atlas climatique du Canada, 2019). Selon les recherches d'Owczarek (2020), l'augmentation des événements de précipitations entraînera un risque accru de glissements de terrain. L'augmentation du rendement sédimentaire entraînera probablement des changements dans l'architecture des chenaux fluviaux et une augmentation des taux de sédimentation dans la baie d'Hudson et sur le littoral en raison de l'apport fluvial.

4.9 ARCHÉOLOGIE

Depuis des millénaires, les peuples autochtones voyagent, vivent et s'installent le long des rives de la baie d'Hudson. Au Nunavik, les établissements côtiers se trouvent souvent dans des endroits tels que des affleurements rocheux, des plages émergées, des blocs de terrain et sur une flèche de sable en progradation à Whapmagoostui/Kuujuarapik. De nombreux sites archéologiques autochtones ont été identifiés le long de la côte de la baie d'Hudson, notamment des cercles de tente, des caches, des caches de chasse, des supports à kayak, des abris semi-souterrains, des zones de déchets et des sites de sépulture. Les sites non autochtones sont plus récents et comprennent notamment des postes de traite des fourrures et des épaves de navires (Boisson et Allard, 2018). Les sites archéologiques les plus anciens peuvent se trouver à plusieurs mètres au-dessus du niveau actuel de la mer et à l'écart des rivages actuels en raison de la régression marine et du relèvement isostatique qui se sont produits au cours des millénaires. Certains sites peuvent ne pas avoir survécu aux conditions du littoral, où les vagues et la glace auraient perturbé le matériel archéologique. D'autres sites peuvent se trouver à la surface du sol, exposés aux intempéries, ou être enfouis par les processus d'accrétion impliqués dans la formation des dunes. Des mesures d'atténuation archéologiques supplémentaires seraient nécessaires pour toute zone sélectionnée. Voir la note technique 4 pour plus de détails sur l'aspect archéologique de la côte.

4.10 RÉSUMÉ

- Le littoral de la zone d'étude est composé principalement de substrat rocheux exposé, de dépôts deltaïques et de dépôts de sédiments postglaciaires. La plupart des caractéristiques du littoral non lithifié sont progradantes, comme les flèches de sable, les plages, les tombolos et les deltas. Les estrans sont présents dans de courtes sections de la côte au nord de la zone d'étude et reculent en raison du dégel du pergélisol côtier et de l'érosion. Des sections de berges de la Grande rivière de la Baleine subissent de l'érosion et des glissements de terrain engendrés par des mouvements de masse souvent initiés par des processus fluviaux, ce qui contribue à l'apport de sédiments dans la zone d'étude. Le principal apport de sédiments à la côte provient de la Grande rivière de la Baleine. Cependant, au passage de Manitousuk, l'apport dominant de sédiments provient de l'érosion des estrans.
- À proximité des sites potentiels, la zone terrestre est généralement classée dans la catégorie du pergélisol discontinu et dispersé, où moins de 50 % de la surface terrestre est constituée de pergélisol. Pour la zone intérieure des sites portuaires potentiels C et D, la teneur totale estimée en glace excédentaire dans le pergélisol est supérieure à 10-20 %. Pour la zone intérieure des sites potentiels A et B, la teneur totale estimée en glace excédentaire dans le pergélisol est supérieure à 0-5 %.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

- La principale source de sédiments pour les plages des zones B, C et D provient de la Grande rivière de la Baleine, et est transportée par les courants littoraux. Un concept important à considérer est l'accrétion des sédiments sous le vent des brise-lames en mer et l'érosion en aval de la côte. Un brise-lames a le potentiel de créer un nouvel équilibre statique, avec une accrétion sous le vent au détriment de l'érosion de la plage en aval. Étant donné que les courants littoraux transportent principalement des sédiments vers le nord-est depuis la Grande rivière de la Baleine, les plages des zones B et C sont les plus susceptibles de subir des changements d'équilibre. Les plages de poche de la zone A sont petites et probablement alimentées par de petits cours d'eau et ne seraient probablement pas aussi vulnérables aux changements dans le transport sédimentaire à grande distance. La zone D présente l'avantage de compter moins de plages sablonneuses que la zone B ou la zone C.

5 ZONE PRIVILÉGIÉE POUR LE PORT

5.1 OBJECTIFS

Le but de ce travail était d'identifier les avantages et les inconvénients d'un port situé dans les zones A, B, C ou D. Comme les considérations importantes varient considérablement entre les deux options générales de port (c'est-à-dire un PPB saisonnier versus un port en eau profonde), des évaluations sont fournies pour chaque option de port.

Il convient également de noter que, l'étude étant au stade de la préfaisabilité, seules des évaluations générales sont possibles pour le moment. Des analyses plus détaillées devraient être effectuées à la suite de celles-ci, le cas échéant.

5.2 PORT POUR PETITS BATEAUX

Les principales considérations relatives à un PPB sont résumées dans le tableau 5-1.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

Tableau 5-1 Considérations clés pour un PPB

FACTEURS GÉNÉRAUX		IMPORTANCE
Conditions de la glace	Profondeur de l'eau	La profondeur d'eau pour le PPB serait de 6,0 m ou moins; ainsi, le PPB se trouverait très probablement dans la glace de rive, ce qui le protégerait généralement des actions de la glace provenant du large.
	Épaisseur de la glace	On ne s'attend pas à ce qu'il s'agisse d'un facteur déterminant pour les quatre zones, car l'épaisseur nominale de la glace ne sera probablement pas très différente pour les quatre zones.
	Embâcle et rupture de la glace	La zone A est située à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine où la débâcle et l'embâcle potentielle peuvent se produire. Une analyse supplémentaire de la glace de rivière serait nécessaire si la zone A est sélectionnée.
	Structures PPB et actions préoccupantes relatives à la glace	Très probablement, le PPB aura des brise-lames en pierre le long de son extérieur, ce qui aura une incidence sur les actions de la glace, qu'elles soient importantes ou non. Les actions de la glace les plus importantes devraient être : (a) l'effet du PPB sur l'évacuation de la glace; et (b) les actions de la glace sur les pierres de carapace.
Géomorphologie côtière	Topographie	La pente de la topographie du littoral est un facteur à prendre en considération pour le développement, car les endroits plus abrupts peuvent nécessiter un nivellement et un dynamitage du substrat rocheux, ce qui rend la topographie à faible pente plus favorable.
	Bathymétrie	Une profondeur d'eau inférieure à 6 m est requise pour un PPB. La profondeur de la bathymétrie du littoral est inférieure à 6 m dans tout le littoral des deux zones. Toutefois, la profondeur d'eau doit être maximisée pour éviter les risques de hauts-fonds et pour maximiser l'accès des navires. Ainsi, le gradient et la profondeur d'eau du littoral sont des facteurs à prendre en considération dans la conception des structures portuaires d'un PPB.
	Pergélisol	On ne s'attend pas à ce que cela soit un facteur déterminant pour le littoral parmi les quatre zones, car il n'y a pas de pergélisol à moins de 20 m du niveau de la mer. Au-dessus de 20 m d'altitude, le pergélisol est un facteur à prendre en considération, mais il ne s'agit pas d'un facteur déterminant, car les pourcentages de pergélisol à l'intérieur des terres sont similaires dans toute la zone. Une analyse supplémentaire du pergélisol serait nécessaire pour toute zone sélectionnée.
	Composition du littoral	Le lieu doit prendre en compte la stabilité du littoral par rapport aux effets de l'érosion et de la progradation du littoral.
	Processus de transport des sédiments	La conception des PPB doit prendre en compte le potentiel de transport de sédiments par la dérive littorale.
	Archéologie	L'emplacement du port doit prendre en considération le potentiel des sites archéologiques sur la côte. Une analyse archéologique supplémentaire serait nécessaire pour toute zone sélectionnée.
Vents/Vagues/Courants		L'impact des conditions météorologiques et hydrodynamiques est minimisé dans les emplacements favorables à des PPB.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

FACTEURS GÉNÉRAUX	IMPORTANCE
Accessibilité	La distance entre la communauté locale et le site portuaire est essentielle pour l'accessibilité. De même, la distance entre le site portuaire et les infrastructures de transport est un facteur à considérer pour réduire les coûts d'infrastructure liés à la construction de nouvelles routes.

Les avantages et les inconvénients d'un PPB et d'un port en eau profonde dans les zones A, B, C ou D sont résumés ci-dessous :

5.2.1 ZONE A

Les éléments clés de la zone A sont résumés ci-dessous :

CONDITIONS DE LA GLACE

- a. Régime des glaces - Il s'agit du site le plus exposé parmi les quatre zones. La couverture de glace se forme le plus tard dans la zone A et est souvent retirée pendant l'hiver par l'action de packs glaciels, suivie d'une nouvelle croissance de la glace. Elle est la plus tardive à geler et la plus précoce à se briser. Un port situé dans la zone A serait exposé aux incursions de glace provenant du large et impliquant de gros radeaux glaciels pendant une grande partie de l'hiver.
- b. Régime des glaces - La zone A est située à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine, où une débâcle et un embâcle potentiel peuvent se produire. Une analyse supplémentaire de la glace de rivière serait nécessaire si la zone A est sélectionnée.
- c. Épaisseur de la glace - L'épaisseur nominale de la glace (pour les structures comprenant les PPB) sera contrôlée par l'épaisseur des radeaux glaciels amenés sur le site depuis le large par des incursions de glace. Par mesure de prudence, l'épaisseur nominale de glace en mer sera la même pour toutes les zones.
- d. Saison d'exploitation - Un PPB dans la zone A aurait probablement la plus longue saison d'exploitation parmi les quatre zones. Toutefois, une évaluation plus approfondie est nécessaire pour pouvoir en juger de façon définitive, car les bateaux qui utiliseraient le PPB n'auraient aucune capacité de transit dans la glace. Si des incursions de glace amenaient de la glace du large jusqu'au PPB, les bateaux ne pourraient pas entrer ou sortir du PPB avant que la glace ne se dissipe.
- e. Charges de glace et actions de la glace sur les structures PPB - Étant donné que la zone A est exposée et que, souvent, la glace de rive se dégage, un PPB situé à cet endroit connaîtrait les charges de glace et les actions de la glace les plus sévères.

GÉOMORPHOLOGIE CÔTIÈRE

- a. Stabilité du littoral - La majeure partie du littoral au sud de l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine est composée de roche-mère, qui est stable dans le contexte des processus d'érosion.
- b. Processus d'accrétion - L'embouchure de la Grande rivière de la Baleine dans la zone A est susceptible de subir des processus d'accrétion. Cependant, il est probable qu'il y ait moins de sédiments provenant de la Grande rivière de la Baleine poussés vers le sud par les courants littoraux que vers le nord-est, ce qui réduit le potentiel de processus d'accrétion autour d'une structure de PPB dans la zone A au sud du delta de la rivière.
- c. Topographie - Le long de la côte, la zone A présente une topographie plus abrupte que toutes les autres zones, ce qui peut nécessiter un nivellement du substrat rocheux pour les infrastructures.
- d. Bathymétrie - Au sud de la Grande rivière de la Baleine dans la zone A, la bathymétrie du littoral est plus abrupte que dans les zones situées au nord-est, ce qui permet une profondeur d'eau de <6 m pour les PPB.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

- e. Pergélisol - Pour les terres situées au-dessus de 20 m d'altitude du côté terre de la zone côtière A, la teneur totale estimée en pergélisol est supérieure à 0-5 %, ce qui est similaire à la zone B et inférieur aux zones C et D.
- f. Archéologie - Il y a un potentiel faible à modéré d'artefacts archéologiques près du rivage compte tenu de l'exposition prédominante du substrat rocheux sur le rivage, mais une enquête plus approfondie est nécessaire.

VENT/VAGUES/COURANT

- a. Exposition - L'absence d'abri contre le vent dominant saisonnier de l'ouest, présent pendant les périodes libres de glaces, indique une plus grande exposition au vent et aux vagues dans les zones A, B et C que dans la zone D.

ACCESSIBILITÉ

- a. L'accessibilité est actuellement faible, car il n'existe aucune route près du rivage au sud de la Grande rivière de la Baleine.

5.2.2 ZONE B

Les éléments clés de la zone B sont résumés ci-dessous :

CONDITIONS DE LA GLACE

- a. Régime des glaces - L'exposition aux glaces de la zone B est intermédiaire, entre la zone A (qui est la plus exposée) et la zone D (qui est la plus protégée). La zone B gèle plus tard que la zone D, mais plus tôt que la zone A. La glace a tendance à se briser plus tard dans la zone B que dans la zone A. Contrairement à la zone D, la débâcle se produit lorsque la glace est transportée hors de la zone (probablement par les vents et les courants) plutôt que par la désintégration thermique et la fonte, comme c'est le cas dans la zone D. Un port dans la zone B serait exposé à des incursions de glace impliquant de gros radeaux glaciels pendant la débâcle.
- b. Régime des glaces - Aucun embâcle n'est prévu dans la zone B.
- c. Épaisseur de la glace - L'épaisseur nominale de la glace au large (pour les structures comprenant les PPB) sera contrôlée par l'épaisseur des radeaux glaciels amenés sur le site depuis le large par des incursions de glace. Par mesure de prudence, l'épaisseur nominale de glace en mer sera la même pour toutes les zones.
- d. Saison d'exploitation - Un PPB situé dans la zone B aurait probablement une saison d'exploitation semblable à celle de la zone A. Toutefois, une évaluation plus poussée est nécessaire pour en juger de façon définitive, car les bateaux qui utilisent le PPB n'auraient pas la capacité de transiter dans la glace. Si des incursions de glace amènent de la glace du large vers le PPB, les bateaux ne pourraient ni entrer ni sortir du PPB.
- e. Charges de glace et actions de la glace sur les structures PPB - Étant donné que la zone B est exposée, un PPB situé à cet endroit connaîtrait de fortes charges de glace et des actions de la glace.

GÉOMORPHOLOGIE CÔTIÈRE

- a. Stabilité du rivage - Le rivage est composé principalement de sédiments deltaïques et est potentiellement sensible aux processus d'érosion.
- b. Processus d'accrétion - L'embouchure de la Grande rivière de la Baleine, dans la zone B, est susceptible de subir des processus d'accrétion, et il est probable que la plupart des sédiments de la Grande rivière de la Baleine soient poussés vers le nord-est par les courants littoraux; il existe donc un potentiel important de processus d'accrétion autour d'une structure de PPB, n'importe où dans la zone B.
- c. Topographie - Il y a une topographie à faible gradient le long de la côte dans la zone B, similaire à celle des zones C et D.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

- d. Bathymétrie - La bathymétrie du littoral est moins profonde dans la zone B que dans les autres zones étudiées, avec des bancs d'embouchure de rivière de moins de 2,0 m de profondeur, ce qui peut constituer un obstacle pour la navigation des petits bateaux.
- e. Pergélisol – Pour les zones de terrain situées au-dessus de 20 m d'altitude du côté terre de la zone côtière B, la teneur totale estimée en pergélisol est supérieure à 0-5 %, ce qui est similaire à la zone A et inférieur aux zones C et D.
- f. Archéologie – Dans le contexte des considérations géomorphologiques, des sites archéologiques pourraient exister, mais une enquête plus approfondie est nécessaire. Des artefacts archéologiques potentiels peuvent être enfouis près du littoral, compte tenu des processus d'accrétion impliqués dans la formation des dunes de sable dans la région.

VENT/VAGUES/COURANT

- a. Exposition – L'absence de protection contre le vent dominant saisonnier de l'ouest présent pendant les périodes libres de glaces, indique une plus grande exposition au vent et aux vagues dans les zones A, B et C que dans la zone D.

ACCESSIBILITÉ

- a. Une infrastructure de transport existe dans les communautés adjacentes de Whapmagoostui/Kuujuuarapik; les communautés de Whapmagoostui/Kuujuuarapik sont facilement accessibles.

5.2.3 ZONE C

Les éléments clés de la zone C sont résumés ci-dessous :

CONDITIONS DE LA GLACE

Un point essentiel est que le régime des glaces dépend de l'emplacement exact du PPB dans la zone C. Pendant l'englacement, une lisière de glace a tendance à se former, suivant une diagonale approximative N-S à travers la zone C. De la glace feuilletée avait tendance à se former à l'est de la lisière de glace, tandis que les conditions de glace à l'ouest de celle-ci étaient plus dynamiques. Des comparaisons sont présentées ci-dessous :

- a. Régime des glaces – Un PPB situé à l'est de la lisière des glaces connaîtrait un régime des glaces similaire à celui de la zone D. Inversement, un PPB situé à l'ouest de la lisière des glaces connaîtrait un régime des glaces similaire à celui de la zone B.
- b. Régime des glaces – Aucun embâcle n'est prévu dans la zone C.
- c. Épaisseur de la glace – Un PPB situé à l'est de la lisière des glaces aurait une épaisseur de glace de rive semblable à celle de la zone D. Inversement, un PPB situé à l'ouest de la lisière des glaces aurait une épaisseur de glace de rive semblable à celle de la zone B. Par prudence, l'épaisseur nominale de glace de rive sera la même pour toutes les zones.
- d. Saison d'exploitation – Un PPB situé à l'est de la lisière de glace aurait une saison d'exploitation semblable à celle de la zone D. Inversement, un PPB situé à l'ouest de la lisière de glace aurait une saison d'exploitation semblable à celle de la zone B.
- e. Charges de glace et actions de la glace sur les structures du PPB – Un PPB situé à l'est de la lisière de glace serait semblable à la zone D. Inversement, un PPB situé à l'ouest de la lisière de glace serait semblable à la zone B.

GÉOMORPHOLOGIE CÔTIÈRE

- a. Stabilité du littoral – La plus grande partie du littoral de la zone C est composée de roches et de plages de poche. Le littoral rocheux est stable dans le contexte des processus d'érosion, tandis que les plages peuvent être potentiellement sensibles aux processus d'érosion.
- b. Processus d'accrétion – Il est probable que la plupart des sédiments provenant de la Grande rivière de la Baleine soient poussés vers le nord-est par les courants littoraux. Il existe donc un potentiel important de processus d'accrétion autour d'une structure portuaire en eau profonde dans la zone C.
- c. Topographie – Il y a une topographie à faible gradient le long de la côte dans la zone C, similaire à celle des zones B et D.
- d. En général, la bathymétrie littorale est peu profonde dans la zone C, avec une marge d'environ 0,5 km jusqu'au contour de 20 m de bathymétrie. Toutefois, dans la partie nord-est de la zone C (à la limite de la zone D), les îles Maver, un affleurement rocheux de faible altitude relié au continent par un replat de marée, présentent une bathymétrie littorale à gradient plus élevé.
- e. Pergélisol – Pour les zones de terrain situées au-dessus de 20 m d'altitude du côté terre de la zone côtière C, la teneur totale estimée en pergélisol est supérieure à 10-20 %, ce qui est similaire à la zone D et inférieur aux zones A et B.
- f. Archéologie – Dans le contexte des considérations géomorphologiques, il est possible qu'il existe des sites archéologiques non perturbés dans la région, mais une enquête plus approfondie est nécessaire. Les sites archéologiques potentiels peuvent être enfouis près du rivage compte tenu des processus d'accrétion impliqués dans la formation des dunes de sable dans la région.

VENT/VAGUES/COURANT

- a. Exposition – L'absence de protection contre le vent dominant saisonnier de l'ouest présent pendant les périodes libres de glaces, entraîne une plus grande exposition au vent et aux vagues dans les zones A, B et C que dans la zone D.

ACCESSIBILITÉ

- a. Des infrastructures de transport existent près du rivage. D'après l'imagerie aérienne, il y a une route à une distance de 0,3 km à 0,7 km du rivage dans la zone C. La communauté de Whapmagoostui/Kuujuarapik se trouve dans un rayon de 2 km à 6 km de tout site de la zone C.

5.2.4 ZONE D

Les éléments clés de la zone D sont résumés ci-dessous :

CONDITIONS DE LA GLACE

- a. Régime des glaces – Il s'agit de la zone la plus protégée. La glace se forme le plus tôt dans la zone D et persiste le plus tard. La débâcle se produit par voie thermique, la glace fondant principalement sur place. La zone D n'est pas exposée aux incursions de radeaux glaciels provenant du large.
- b. Régime des glaces – Aucun embâcle n'est prévu dans la zone D.
- c. Épaisseur de la glace – L'épaisseur de la glace de rive serait contrôlée par la croissance thermique pendant tout l'hiver, de sorte qu'entre les quatre zones, c'est dans la zone D qu'elle atteindrait la plus grande épaisseur.
- d. Saison d'exploitation – Un PPB situé dans la zone D aurait la saison d'exploitation la plus courte, en raison de : (i) de l'englacement précoce, et ; (ii) de la probabilité que la débâcle se produise principalement par la fonte des glaces.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

- e. Charges de glace et actions de la glace sur les structures d'un PPB – Comme la zone D est protégée, les charges de glace et les actions de la glace seraient les moins graves pour un PPB situé dans cette zone.

GÉOMORPHOLOGIE CÔTIÈRE

- a. Stabilité du littoral – La plus grande partie du littoral de la zone D est composée de roches et de petites plages de poche dans la partie sud-ouest de la zone D. Le littoral de roches est stable dans le contexte des processus d'érosion, alors que les plages peuvent être sensibles aux processus d'érosion.
- b. Processus d'accrétion – Il est probable que la plupart des sédiments de la Grande rivière de la Baleine sont entraînés vers le nord-est par les courants littoraux, bien que moins que dans la zone A ou la zone B en raison de sa position protégée contre les vents dominants de l'ouest pendant les conditions libres de glaces.
- c. Topographie – La zone côtière de la zone D présente une topographie à faible gradient, similaire à celle de la zone B et de la zone C.
- d. Bathymétrie – La bathymétrie du littoral présente un gradient plus élevé dans la zone D que dans les zones B ou C, avec une marge d'environ 0,1 à 0,2 km par rapport au contour de 20,0 m de bathymétrie.
- e. Pergélisol - Pour les zones de terrain situées au-dessus de 20 m d'altitude du côté terre de la zone côtière D, la teneur totale estimée en pergélisol est supérieure à 10-20 %, ce qui est similaire à la zone C et inférieur aux zones A et B.
- f. Archéologie - Dans le contexte des considérations géomorphologiques, il est possible qu'il existe des sites archéologiques non perturbés dans la région, mais une enquête plus approfondie est nécessaire. Les sites archéologiques potentiels peuvent être enfouis près du littoral, compte tenu des processus d'accrétion impliqués dans la formation des dunes de sable dans la région.

VENT/VAGUES/COURANTS

- a. Exposition - La zone D est la plus abritée du vent dominant saisonnier de l'ouest, présent pendant les périodes libres de glaces, ce qui indique que l'exposition au vent et aux vagues est moindre dans la zone D que dans les autres zones d'étude.

ACCESSIBILITÉ

- a. Il existe des infrastructures de transport à proximité du littoral. D'après l'imagerie aérienne, il y a une route à une distance de 0,3 km à 1,0 km du rivage dans la zone D. La communauté de Whapmagoostui/Kuujuarapik se trouve dans un rayon de 6 km à 14 km de tout site de la zone D.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

5.3 PORT EN EAU PROFONDE

Les principales considérations relatives à un port en eau profonde sont résumées dans le tableau 5-2.

Tableau 5-2 Considérations clés pour un port en eau profonde

FACTEURS GÉNÉRAUX		IMPORTANCE
Conditions de la glace	Profondeur de l'eau et régime des glaces	<p>La profondeur d'eau pour le port en eau profonde serait de 18,0 m ou plus; Par conséquent, le port serait exposé aux caractéristiques de la glace et aux actions de la glace provenant du large.</p> <ul style="list-style-type: none"> – Il est à noter que l'importance du régime des glaces varie selon le type de port et le type de navires qui y font escale. Dans le cas d'un port ouvert toute l'année, les navires qui y font escale doivent pouvoir traverser la glace toute l'année. Dans ce cas, les transits de navires au port briseraient la couverture de glace, ce qui entraînerait probablement des conditions de glace plus dynamiques selon la fréquence des transits. – Dans le cas d'un port saisonnier, les transits de navires seraient limités à la saison des eaux libres, ou peut-être aussi à la saison intermédiaire de la prise des glaces. Dans ce cas, la couverture de glace se formerait en grande partie naturellement.
	Épaisseur de la glace	On ne s'attend pas à ce qu'il s'agisse d'un facteur déterminant pour les quatre zones, car l'épaisseur nominale de la glace ne sera probablement pas très différente pour les quatre zones.
	Embâcle et rupture de la glace	La zone A est située à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine où une débâcle et un embâcle potentiel peuvent se produire. Une analyse supplémentaire de la glace de rivière serait nécessaire si la zone A est sélectionnée.
	Structures portuaires et actions préoccupantes liées à la glace	<ul style="list-style-type: none"> – Seuls des commentaires généraux peuvent être formulés, car les paramètres du port ne sont pas encore précisés (eau profonde, type d'exploitation - saisonnière ou à l'année, etc.) Les structures portuaires influencent les actions sur les glaces qui sont significatives et non significatives. – Les actions de la glace les plus significatives pour les structures portuaires devraient être : (a) les charges et actions de la glace sur les structures portuaires; et (b) le chevauchement et l'empiètement de la glace sur la plateforme ce qui pourrait menacer des installations telles qu'un chargeur de navires.
Coastal Geomorphology	Topographie	La pente de la topographie du littoral est un facteur à considérer pour l'aménagement, car les endroits plus abrupts peuvent nécessiter un nivellement et un dynamitage du substrat rocheux.
	Bathymétrie	La distance entre le littoral et la profondeur d'eau de 18,0 m requise pour un port en eau profonde doit être réduite au minimum. Ainsi, le gradient et la profondeur de la bathymétrie du littoral sont à prendre en considération pour la conception des structures portuaires.
	Pergélisol	On ne s'attend pas à ce que cela soit un facteur déterminant pour le littoral parmi les quatre zones, car il n'y a pas de pergélisol à moins de 20 m du niveau de la mer. Au-dessus de 20 m d'altitude, le pergélisol est un facteur à prendre en considération, mais il ne s'agit pas d'un facteur déterminant, car les pourcentages de pergélisol à l'intérieur des terres sont similaires dans toute la zone. Une analyse supplémentaire du pergélisol serait nécessaire pour toute zone sélectionnée.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

FACTEURS GÉNÉRAUX		IMPORTANCE
	Composition du littoral	L'emplacement du port doit prendre en compte la stabilité du littoral par rapport aux effets de l'érosion et de la progradation du littoral.
	Processus de transport des sédiments	La conception du port en eau profonde doit prendre en compte le potentiel de transport des sédiments par la dérive littorale.
	Archéologie	Le choix de l'emplacement du port doit tenir compte de la présence éventuelle de sites archéologiques sur la côte. Une analyse archéologique supplémentaire serait nécessaire pour toute zone sélectionnée.
Vent/Vagues/Courants		L'impact des conditions météorologiques et hydrodynamiques est minimisé dans les emplacements favorables à un port en eau profonde.
Accessibilité		La distance entre la communauté locale et le site portuaire est essentielle pour l'accessibilité. De même, la distance entre le site portuaire et les infrastructures de transport est un facteur à prendre en compte pour réduire les coûts d'infrastructure liés à la construction de nouvelles routes.

5.3.1 ZONE A

Les éléments clés de la zone A sont résumés ci-dessous.

CONDITIONS DE LA GLACE

- a. Régime des glaces - Il s'agit du site le plus exposé parmi les quatre zones, ce qui a une incidence sur le régime naturel des glaces, comme nous l'avons vu précédemment. Toutefois, cet effet peut être significatif ou non selon le type de port (annuel ou saisonnier) et, bien sûr, selon le type de navires faisant escale dans le port.
- b. Régime des glaces - La zone A est située à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine, où une débâcle et un embâcle potentiel peuvent se produire. Une analyse supplémentaire de la glace de rivière serait nécessaire si la zone A est sélectionnée.
- c. Épaisseur de la glace - L'épaisseur nominale de la glace au large (pour les structures comprenant le port) sera contrôlée par l'épaisseur des radeaux glaciels amenés sur le site depuis le large par des incursions de glace. Par mesure de prudence, l'épaisseur nominale de la glace en mer sera la même pour toutes les zones.
- d. Saison d'exploitation - Cela dépend du type de port (annuel ou saisonnier). Dans le cas d'un port ouvert toute l'année, les navires qui y font escale doivent être capables de traverser toutes les conditions de glace, de sorte que la saison d'exploitation ne soit pas affectée. Un port saisonnier dans la zone A aurait probablement la saison d'exploitation la plus longue parmi les quatre zones. Toutefois, une évaluation plus poussée est nécessaire pour en juger de manière définitive, car il pourrait être affecté par des incursions de glace provenant du large.
- e. Charges de glace et actions de la glace sur les structures portuaires - Parce que la zone A est exposée et que souvent, la glace de rive se dégage, un port situé à cet endroit connaîtrait les charges de glace et les actions de la glace les plus sévères.
- f. Soutien des brise-glace - Les besoins en brise-glace sont davantage régis par la saison d'exploitation du port (c.-à-d., eaux libres de glaces seulement, eaux libres de glaces avec une prolongation jusqu'à l'englacement, ou toute l'année) que par son emplacement géographique (c.-à-d., zone A ou B ou C ou D). Par conséquent, bon nombre des points soulevés ci-dessous concernant les exigences en matière de brise-glace pour la zone A s'appliquent également aux autres zones.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

- g. La zone A est le site le plus exposé; elle est donc susceptible d'être touchée par des incursions de glace, ce qui pourrait nécessiter le soutien d'un brise-glace pour rouvrir le port. Étant donné que le site est exposé, un soutien important de brise-glace ne serait probablement pas nécessaire pour ouvrir le port (disons à la débâcle), ou à l'englacement.
- h. Le besoin d'un soutien tactique par brise-glace dans un port de la zone A dépendra de la saison d'exploitation du port, tel que résumé ci-dessous :
 - Port limité aux eaux libres de glaces - Le port n'aurait qu'un besoin minime de l'aide d'un brise-glace. On s'attend à ce qu'en cas de besoin de gestion des glaces (par exemple en raison d'une incursion de ces glaces), le port puisse probablement fonctionner en faisant appel à la GCC pour obtenir l'aide d'un brise-glace.
 - Port limité aux eaux libres de glaces et à l'intersaison au moment de la prise des glaces - ce type de port aurait besoin de l'appui d'un brise-glace de « service léger », car le calendrier d'exploitation du port amènerait probablement les navires à faire escale dans le port dans des épaisseurs de glace allant jusqu'à environ 0,3 m à 0,5 m, selon les horaires du port.
 - Port exploité toute l'année - Ce type de port aurait besoin de l'appui important d'un brise-glace pendant tout l'hiver, car le calendrier d'exploitation du port amènera probablement les navires à faire escale dans des épaisseurs de glace allant jusqu'au maximum pour l'hiver.

GÉOMORPHOLOGIE CÔTIÈRE

- a. Stabilité du littoral - La majeure partie du littoral au sud du delta de la Grande rivière de la Baleine est composée de roche-mère, qui est stable dans le contexte des processus d'érosion.
- b. Processus d'accrétion - L'embouchure de la Grande rivière de la Baleine dans la zone A est susceptible de subir des processus d'accrétion. Cependant, il est probable qu'il y ait moins de sédiments de la Grande rivière de la Baleine poussés vers le sud par les courants littoraux que vers le nord-est, ce qui réduit le potentiel de processus d'accrétion autour d'une structure portuaire en eau profonde dans la zone A au sud du delta de la rivière.
- c. Topographie - La topographie est plus abrupte le long de la côte dans la zone A que dans les autres zones, ce qui peut nécessiter un nivellement pour les infrastructures.
- d. Bathymétrie - Au sud de la Grande rivière de la Baleine, dans la zone A, la bathymétrie du littoral présente un gradient plus prononcé que dans les zones situées au nord-est; la marge du littoral correspond à un contour bathymétrique d'environ 0,1 km à 20 m selon les cartes de navigation.
- e. Pergélisol - Pour les terres situées au-dessus de 20 m d'altitude du côté terre de la zone côtière A, la teneur totale estimée en pergélisol est supérieure à 0-5 %, ce qui est similaire à la zone B et inférieur aux zones C et D.
- f. Archéologie - Dans le contexte des considérations géomorphologiques, il existe un potentiel pour des sites archéologiques non perturbés dans la zone, cependant des investigations supplémentaires sont nécessaires.

VENT/VAGUES/COURANT

- a. Exposition - L'absence de protection contre le vent dominant saisonnier de l'ouest, présent pendant les périodes libres de glaces, entraîne une plus grande exposition au vent et aux vagues dans les zones A, B et C que dans la zone D.

ACCESSIBILITÉ

- a. L'accessibilité est actuellement faible, car il n'existe aucune route près du rivage au sud de la Grande rivière de la Baleine.

5.3.2 ZONE B

Les éléments clés de la zone B sont résumés ci-dessous :

CONDITIONS DE LA GLACE

- a. Régime des glaces - L'exposition aux glaces pour la zone B est intermédiaire, entre la zone A (qui est la plus exposée) et la zone D (qui est la plus protégée). Toutefois, comme pour la zone A (voir ci-dessus), l'importance de ce facteur dépend du type de port. Dans le cas d'un port ouvert toute l'année, le régime des glaces n'aurait qu'une importance mineure, car les navires faisant escale dans ce port devraient être capables de traverser toutes les conditions de glace. Pour un port saisonnier, le régime des glaces se développerait plus ou moins naturellement, ce qui aurait une incidence sur les paramètres ci-dessous.
- b. Régime des glaces - Aucun embâcle n'est prévu dans la zone B.
- c. Épaisseur de la glace - L'épaisseur nominale de la glace au large (pour les structures comprenant le port) sera contrôlée par l'épaisseur des radeaux glaciels amenés sur le site depuis le large par des incursions de glace. Par mesure de prudence, l'épaisseur nominale de la glace au large sera la même pour toutes les zones.
- d. Saison d'exploitation - La saison d'exploitation d'un port dans la zone B dépendrait des paramètres du port (eau profonde, navires faisant escale au port, si le port est ouvert toute l'année ou saisonnier, etc.) Ces enjeux ont été abordés précédemment.
- e. Charges de glace et actions de la glace sur les structures portuaires - Étant donné que la zone B est presque aussi exposée que la zone A et que la glace de rive se dégage souvent, un port situé à cet endroit connaîtrait de fortes charges de glace et des actions de la glace.
- f. Appui des brise-glace - Les mêmes commentaires que ceux formulés ci-dessus au sujet du soutien des brise-glace pour la zone A s'appliquent généralement à la zone B, car cette dernière est aussi relativement exposée. Le soutien d'un brise-glace, s'il est nécessaire, résulterait principalement d'incursions de glace, par opposition à la nécessité de maintenir un chenal dans la glace feuilletée. Les besoins en brise-glace dépendraient de la saison d'exploitation du port, comme décrit pour la zone A.

GÉOMORPHOLOGIE CÔTIÈRE

- a. Stabilité du rivage - Le rivage est composé principalement de sédiments deltaïques et est potentiellement sensible aux processus d'érosion.
- b. Processus d'accrétion - L'embouchure de la Grande rivière de la Baleine, dans la zone B, est susceptible de subir des processus d'accrétion, et il est probable que la plupart des sédiments de la Grande rivière de la Baleine sont poussés vers le nord-est par les courants littoraux, d'où un potentiel important de processus d'accrétion autour d'une structure portuaire en eau profonde n'importe où dans la zone B.
- c. Topographie - La topographie le long de la côte dans la zone B est à faible gradient, comme dans les zones C et D.
- d. Bathymétrie - La bathymétrie littorale est moins profonde dans la zone B que dans les autres zones d'intérêt, avec des bancs d'embouchure de rivière de moins de 2 m de profondeur. La marge entre le littoral et le contour bathymétrique de 20 m, basée sur les cartes de navigation, peut atteindre 1 km. La zone B nécessiterait un développement important vers le large pour les infrastructures portuaires en eau profonde.
- e. Pergélisol - Pour les terres situées au-dessus de 20 m d'altitude du côté terre de la zone B, la teneur totale estimée en pergélisol est supérieure à 0-5 %, ce qui est similaire à la zone A et inférieur aux zones C et D.
- f. Archéologie - Dans le contexte des considérations géomorphologiques, il est possible qu'il existe des sites archéologiques non perturbés dans la région, mais une enquête plus approfondie est nécessaire. Les sites archéologiques potentiels peuvent être enfouis près du rivage compte tenu des processus d'accrétion impliqués dans la formation des dunes de sable dans la région.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

VENT/VAGUES/COURANTS

- a. Exposition - L'absence de protection contre le vent dominant saisonnier de l'ouest, présent pendant les périodes libres de glaces, entraîne une plus grande exposition au vent et aux vagues dans les zones A, B et C que dans la zone D.

ACCESSIBILITÉ

- a. Une infrastructure de transport existe dans les communautés adjacentes de Whapmagoostui/Kuujuarapik; les communautés de Whapmagoostui/Kuujuarapik sont facilement accessibles.

5.3.3 ZONE C

Les éléments clés de la zone C sont résumés ci-dessous :

CONDITIONS DE LA GLACE

Le facteur clé est que le régime des glaces dépend de l'emplacement exact du port dans la zone C. Pendant l'englacement, une lisière de glace avait tendance à se former, plus ou moins dans l'axe d'une diagonale N-S à travers la zone C. De la glace feuilletée avait tendance à se former à l'est de la lisière de glace, tandis que les conditions de glace à l'ouest de celle-ci étaient plus dynamiques. Des comparaisons sont faites ci-dessous :

- a. Régime des glaces - Un port à l'est de la lisière des glaces connaîtrait un régime des glaces comme celui de la zone D. Inversement, un port à l'ouest de la lisière des glaces connaîtrait un régime des glaces comme celui de la zone B.
- b. Régime des glaces - Aucun embâcle n'est prévu dans la zone C.
- c. Épaisseur de la glace - Un port situé à l'est de la lisière des glaces aurait une épaisseur de glace de rive nominale comme celle de la zone D. Inversement, un port situé à l'ouest de la lisière des glaces aurait une épaisseur de glace de rive comme celle de la zone B. Par prudence, l'épaisseur nominale de glace de rive sera la même pour toutes les zones.
- d. Saison d'exploitation - La saison d'exploitation d'un port dans la zone C dépendrait des paramètres du port (cargaison, navires faisant escale au port, si le port est ouvert toute l'année ou saisonnier, etc.) Ces enjeux ont été abordés précédemment.
- e. Charges et actions des glaces sur les structures portuaires - Un port à l'est de la lisière des glaces serait comme la zone D. Inversement, un port à l'ouest de la lisière des glaces serait comme la zone B.
- f. Soutien d'un brise-glace – Différents phénomènes affectant les conditions de glace se produisent dans la zone C, tel que décrit précédemment. À l'ouest d'une diagonale N-S, la zone est relativement exposée, de sorte que les incursions de glace seraient probablement le facteur qui entraînerait le besoin d'un brise-glace. La zone située à l'est d'une diagonale N-S est plus protégée, de sorte que la présence de glace feuilletée serait probablement la raison pour laquelle un brise-glace serait nécessaire, le cas échéant. Cependant, les besoins en brise-glace dépendraient de la saison d'exploitation du port, de la même manière générale que celle décrite pour la zone A.

GÉOMORPHOLOGIE CÔTIÈRE

- a. Stabilité du littoral - La plus grande partie du littoral de la zone C est composée de roches et de plages de poche. Le littoral rocheux est stable dans le contexte des processus d'érosion, tandis que les plages peuvent être potentiellement sensibles aux processus d'érosion.
- b. Processus d'accrétion - Il est probable que la plupart des sédiments provenant de la Grande rivière de la Baleine soient poussés vers le nord-est par les courants littoraux, il existe donc un potentiel important de processus d'accrétion autour d'une structure portuaire en eau profonde dans la zone C.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

- c. Topographie - La topographie le long de la côte dans la zone C comporte un faible gradient, similaire à celui de la zone B et de la zone D. La bathymétrie du littoral est peu profonde dans la zone C, avec une marge d'environ 0,5 km par rapport au contour de 20 m de bathymétrie.
- d. Bathymétrie - En général, la bathymétrie du littoral est peu profonde dans la zone C, avec une marge d'environ 0,5 km par rapport au contour de 20 m de bathymétrie. Toutefois, dans la partie nord-est de la zone C (à la limite de la zone D), les îles Maver, un affleurement rocheux de faible altitude relié au continent par un replat de marée, présentent une bathymétrie littorale à gradient plus élevé. À l'ouest des îles Maver, il existe une marge d'environ 0,1 à 0,2 km par rapport au contour bathymétrique de 20 m basé sur les cartes de navigation.
- e. Pergélisol - Pour les zones de terrain situées au-dessus de 20 m d'altitude du côté terre de la zone côtière C, la teneur totale estimée en pergélisol est supérieure à 10-20 %, ce qui est similaire à la zone D et inférieur aux zones A et B.
- f. Archéologie - Dans le contexte des considérations géomorphologiques, il est possible qu'il existe des sites archéologiques non perturbés dans la région, mais une enquête plus approfondie est nécessaire. Les sites archéologiques potentiels peuvent être enfouis près du littoral, compte tenu des processus d'accrétion impliqués dans la formation des dunes de sable dans la région.

VENT/VAGUES/COURANTS

- a. Exposition - L'absence de protection contre le vent dominant saisonnier de l'ouest, présent pendant les périodes libres de glaces, entraîne une plus grande exposition au vent et aux vagues dans les zones A, B et C que dans la zone D.

ACCESSIBILITÉ

- a. Des infrastructures de transport existent près du rivage. D'après l'imagerie aérienne, il y a une route à une distance de 0,3 km à 0,7 km du rivage dans la zone C. La communauté de Whapmagoostui/Kuujuarapik se trouve dans un rayon de 2 km à 6 km de tout site de la zone C.

5.3.4 ZONE D

Les éléments clés de la zone D sont résumés ci-dessous :

CONDITIONS DE LA GLACE

- a. Régime des glaces – Celle-ci est la mieux protégée des quatre zones. La glace se forme plus tôt dans la zone D et persiste le plus tard. La débâcle se produit par voie thermique, la glace fondant principalement sur place. La zone D n'est pas exposée aux incursions de radeaux glaciels provenant du large.
- b. Régime des glaces - Aucun embâcle n'est prévu dans la zone D.
- c. Épaisseur de la glace - L'épaisseur de la glace de rive serait contrôlée par la croissance thermique pendant tout l'hiver, de sorte qu'entre les quatre zones, c'est dans la zone D qu'elle atteindrait la plus grande épaisseur.
- d. Saison d'exploitation - La saison d'exploitation d'un port dans la zone D dépendrait des caractéristiques du port (cargaison, navires faisant escale au port, si le port est ouvert toute l'année ou saisonnier, etc.) Ces enjeux ont été abordés précédemment. Un port saisonnier dans la zone D aurait la saison d'exploitation la plus courte des quatre zones, en raison : (i) de l'englacement précoce, et; (ii) de la probabilité que la débâcle se produise principalement par la fonte des glaces. Un port ouvert toute l'année ne serait pas touché, car les navires qui y font escale devraient avoir une capacité suffisante pour traverser toutes les conditions de glace.
- e. Charges de glace et actions de la glace sur les structures portuaires - Comme la zone D est protégée, les charges de glace et les actions de la glace seraient les moins graves pour un port situé dans cette zone.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

- f. Soutien des brise-glaces - La zone D est abritée, car elle se trouve à l'intérieur du chenal Manitounuk. Par conséquent, un port dans la zone D ne connaîtrait pas d'incursions de glace, mais il devra faire face à une croissance constante de la glace tout au long de l'hiver. Le soutien d'un brise-glaces serait nécessaire pour ouvrir le chenal d'accès à un port qui s'y trouve (à travers la glace feuilletée), et pour l'entretenir, tout au long de l'hiver. Les besoins en brise-glaces dépendront de la saison d'exploitation du port, comme décrit pour la zone A.

GÉOMORPHOLOGIE CÔTIÈRE

- a. Stabilité du littoral - La plus grande partie du littoral de la zone D est composée de roches et de petites plages de poche dans la partie sud-ouest de la zone D. Le littoral de roches est stable dans le contexte des processus d'érosion, alors que les plages peuvent être sensibles aux processus d'érosion.
- b. Processus d'accrétion - Il est probable que la plupart des sédiments de la Grande rivière de la Baleine sont entraînés vers le nord-est par les courants littoraux, bien que moins que dans la zone A ou la zone B en raison de la protection face aux vents dominants de l'ouest pendant les conditions libres de glaces.
- c. Topographie - La topographie le long de la côte dans la zone D est à faible gradient, comme dans les zones B et C.
- d. Bathymétrie - La bathymétrie du littoral présente des gradients plus élevés dans la zone D que dans les zones B ou C, avec une marge d'environ 0,1 à 0,2 km par rapport au contour de 20 m de bathymétrie.
- e. Pergélisol - Pour les zones de terrain situées au-dessus de 20 m d'altitude du côté terre de la zone D, la teneur totale estimée en pergélisol est supérieure à 10-20 %, ce qui est similaire à la zone C et inférieur aux zones A et B.
- f. Archéologie - Dans le contexte des considérations géomorphologiques, il est possible qu'il existe des sites archéologiques non perturbés dans la région, mais une enquête plus approfondie est nécessaire. Les sites archéologiques potentiels peuvent être enfouis près du littoral, compte tenu des processus d'accrétion impliqués dans la formation des dunes dans la région.

VENT/VAGUES/COURANTS

- a. Exposition - La zone D est la plus protégée du vent dominant saisonnier de l'ouest, présent pendant les périodes libres de glaces, ce qui indique que l'exposition au vent et aux vagues est moindre dans la zone D que dans les autres zones d'étude.

ACCESSIBILITÉ

- a. Il existe des infrastructures de transport à proximité du littoral. D'après l'imagerie aérienne, il y a une route à une distance de 0,3 km à 1,0 km du rivage dans la zone D. La communauté de Whapmagoostui/Kuujuarapik se trouve dans un rayon de 6 km à 14 km de tout site de la zone D.

5.4 EMPLACEMENT PRIVILÉGIÉ POUR UN PORT POUR PETITS BATEAUX

Pour évaluer le site le plus approprié pour un PPB, chaque zone a été classée en fonction des critères présentés à la section 5.2 : i) état des glaces, ii) géomorphologie côtière, iii) proximité de la profondeur d'eau requise par rapport au rivage, iv) vent, vagues, courants, v) accessibilité. Chaque zone est classée sur une échelle de 1 à 4 et présentée dans le tableau 5-3. Une valeur de 1 correspond à la zone la plus favorable pour un PPB et 4 à la zone la moins favorable. Un pointage global est présenté, le pointage le plus bas représentant la zone la plus favorable. Les quatre critères principaux sont pondérés de manière égale dans cette évaluation.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

Tableau 5-3 Classement de chaque zone pour un PPB.

CLASSEMENT DE CHAQUE ZONE DE LA ZONE D'ÉTUDE POUR UN PPB				
CRITÈRE	ZONE A	ZONE B	ZONE C	ZONE D
Conditions de glace	4	2	2	4
Géomorphologie côtière	3	4	2	1
Proximité de la profondeur d'eau requise par rapport au rivage	1	4	2(1*)	1
Vent, vagues, courants	4	3	2	1
Accessibilité	4	1	2	3
Pointage global	16	14	10 (9*)	10

* Le pointage de 1 n'est valable que si les îles Maver sont utilisées comme pont terrestre pour accéder aux eaux profondes.

À la lumière de cette analyse, les îles Maver, dans la zone C, obtiennent le meilleur pointage global et sont considérées comme l'emplacement le plus favorable pour un PPB.

5.4.1 RÉSUMÉ DES CRITÈRES PRINCIPAUX

- Dans le contexte des conditions de glace, la zone C ou la zone B (c.-à-d. à l'ouest de la lisière des glaces) serait l'emplacement privilégié pour un PPB. Les inconvénients des autres zones sont les suivants :
 - Zone A - Il s'agit de la zone la plus exposée des quatre, de sorte qu'un PPB y serait le plus vulnérable aux actions des glaces en mer, ce qui pourrait gêner les bateaux qui tentent de sortir du PPB et d'y entrer. La zone A est également exposée à la dynamique des glaces de la Grande rivière de la Baleine.
 - La zone D et la partie orientale de la zone C - Ces zones sont les plus protégées des quatre zones, ce qui fait qu'un PPB qui y est situé aura la saison d'exploitation la plus courte.
- Du point de vue de la géomorphologie, l'emplacement le plus favorable est la zone D, car l'influence des courants littoraux sur le transport des sédiments est probablement moindre que dans les zones B ou C. En outre, à la frontière entre les zones C et D, les affleurements rocheux du littoral des îles Maver constituent un brise-lames naturel qui peut être utilisé dans la conception du port.
- En ce qui concerne la bathymétrie, la proximité de la profondeur d'eau requise est la plus proche dans la zone D, et suffisante dans la zone C. L'exception dans la zone C est l'île Maver, un affleurement rocheux de faible altitude relié au continent par un replat de marée, comme le montre la figure 5-1. La bathymétrie du littoral de l'île Maver se rapproche davantage des profondeurs d'eau requises que dans les autres portions de la zone C.
- En ce qui concerne le vent, les vagues et les courants, il y a une certaine protection contre le vent dominant saisonnier de l'ouest pendant les conditions libres de glaces dans la zone D. Les zones A, B et C sont plus exposées pendant les conditions libres de glaces.
- L'accessibilité est favorisée près de Whapmagoostui/Kuujjuarapik, mais la proximité de l'accès routier au nord-est de Whapmagoostui/Kuujjuarapik est un élément favorable par rapport à la zone A, dont l'accès est difficile. En général, l'accès routier est plus éloigné du rivage dans la zone D que dans la zone C.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

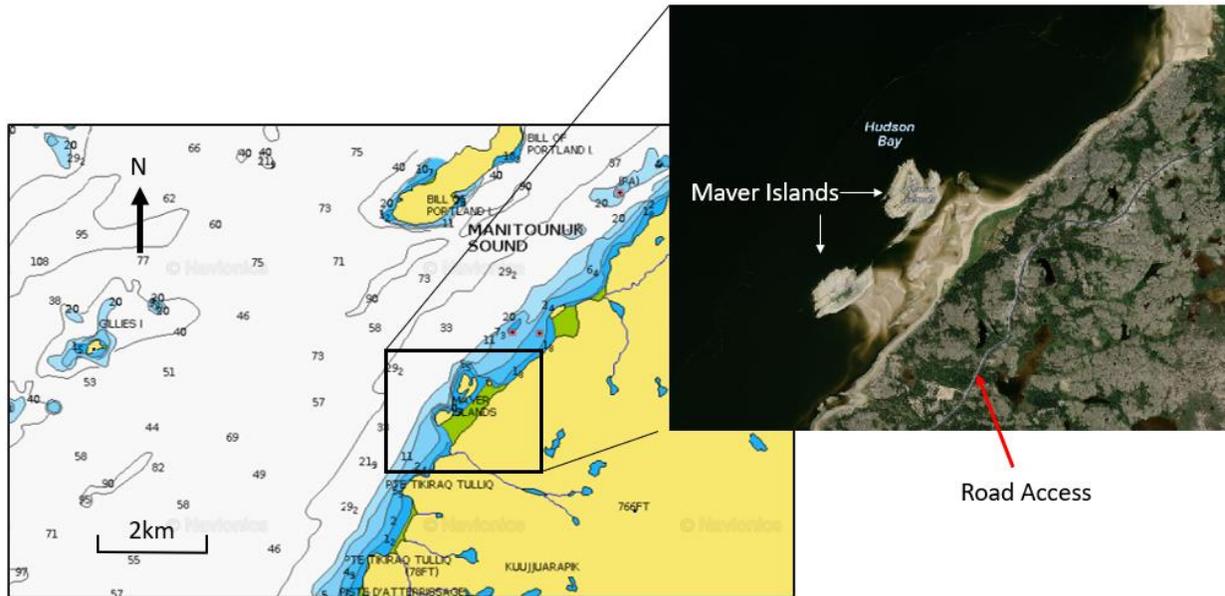


Figure 5-1 Emplacement des îles Maver sur la carte bathymétrique et l'imagerie satellite.

5.5 EMLACEMENT PRIVILÉGIÉ POUR UN PORT EN EAU PROFONDE

Pour évaluer le site le plus approprié pour un port en eau profonde, chaque zone a été classée en fonction des critères présentés à la section 5.3 : i) état des glaces, ii) géomorphologie côtière, iii) vent, vagues, courants, iv) accessibilité. Chaque zone est classée sur une échelle de 1 à 4 et présentée dans le tableau 5-4. Une valeur de 1 correspond à la zone la plus favorable pour un port en eau profonde et une valeur de 4 à la zone la moins favorable. Un pointage global est présenté, le pointage le plus bas représentant la zone la plus favorable. Les quatre critères principaux sont pondérés de manière égale dans cette évaluation.

Tableau 5-4 Classement de chaque zone pour un port en eau profonde.

CLASSEMENT DE CHAQUE ZONE DE LA ZONE D'ÉTUDE POUR UN PORT EN EAU PROFONDE				
CRITÈRE	ZONE A	ZONE B	ZONE C	ZONE D
Conditions de glace	4	2	1	3
Géomorphologie côtière	3	4	2	1
Proximité de la profondeur d'eau requise par rapport au rivage	2	4	3 (1*)	1
Vent, vagues, courants	4	3	2	1
Accessibilité	4	1	2	3
Pointage global	15	10	10 (8*)	9

* Le pointage de 1 n'est valable que si les îles Maver sont utilisées comme pont terrestre pour accéder aux eaux profondes.

À la lumière de cette analyse, les îles Maver, dans la zone C, obtiennent le meilleur pointage global et sont considérées comme l'emplacement le plus favorable pour un port en eau profonde.

5.5.1 RÉSUMÉ DES CRITÈRES PRINCIPAUX

- Dans le contexte des conditions de glace, la zone D devrait être évitée, bien que, comme il s'agit du site le plus protégé, les charges de glace et les actions sur un port qui s'y trouve (p. ex. le chevauchement et l'empiètement de la glace) seront moins sévères pour celle-ci. Toutefois, la gestion des glaces et les opérations portuaires seront probablement les plus difficiles pour un port de la zone D, car la glace ne se dégage pas naturellement.
- De plus, on estime que la zone A devrait être évitée parce que cette zone est la plus vulnérable à la dynamique des glaces en raison de la présence de glace provenant du large. Les incursions de packs glaciels sont les plus susceptibles d'interférer avec les opérations portuaires dans la zone A.
- La zone B ou la zone C serait probablement l'emplacement privilégié pour un port. Ces sites sont plutôt protégés des incursions de packs glaciels, mais en même temps, ils sont suffisamment exposés pour que la dynamique des packs glaciels aide à maintenir le port ouvert.
- La carte de navigation (figure 5-2) montre que les eaux profondes sont plus près du rivage dans la zone C que dans la zone B. Les 60 pieds (18,3 m) sont à environ 0,5 km du rivage dans la zone C et à 1,1 km dans la zone B. Cette caractéristique pourrait être un avantage pour la zone C.

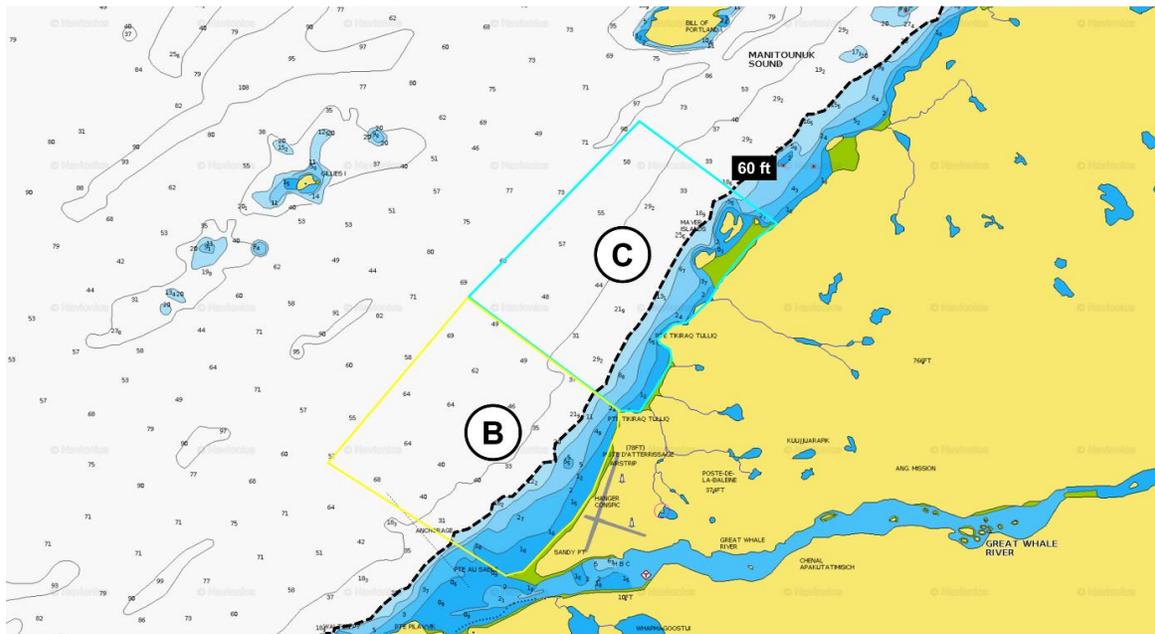


Figure 5-2 Carte de navigation près de Whapmagoostui/Kuujuarapik

- Du point de vue de la géomorphologie, l'emplacement le plus favorable est la zone D, car l'influence des courants littoraux sur le transport des sédiments est probablement moindre que dans les zones B ou C. En outre, à la frontière entre les zones C et D, des affleurements rocheux dans la zone littorale des îles Maver pourraient servir de brise-lames naturels pouvant être utilisés dans la conception du port, et éventuellement de pont terrestre pour l'accès aux eaux plus profondes.
- En ce qui concerne la bathymétrie, l'emplacement le plus favorable pour un port en eau profonde est la zone D, car la profondeur d'eau requise est plus proche du rivage que dans les zones B ou C. La seule exception dans la zone C est constituée par les îles Maver, un affleurement rocheux de faible altitude relié au continent par un replat de marée, dont le gradient de bathymétrie littorale est plus élevé, tel qu'illustré à la figure 5-1. À l'ouest des îles Maver, il existe une marge d'environ 0,1 à 0,2 km par rapport au contour bathymétrique de 20 m selon les cartes de navigation.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

- En ce qui concerne le vent, les vagues et les courants, il y a une certaine protection contre le vent dominant saisonnier de l'ouest pendant les conditions libres de glaces dans la zone D. Les zones A, B et C sont plus exposées pendant les conditions libres de glaces.
- L'accessibilité est favorisée près de Whapmagoostui/Kuujuarapik et au nord-est en raison de la proximité de l'accès routier.

6 CONCLUSIONS ET CONSIDÉRATIONS SUPPLÉMENTAIRES

L'emplacement privilégié pour un port pour petits bateaux et un port en eau profonde est une zone située juste au nord-est des îles Maver (limite des zones C et D) pour les raisons suivantes :

- Les îles constituent une barrière naturelle contre les radeaux glaciels provenant du sud-ouest pour un port pour petits bateaux abrité derrière les îles;
- Les îles Manitounuk représentent une protection importante contre les vagues venant du nord;
- La structure du brise-lames pour un port pour petits bateaux nécessitera moins de roches puisque la forme des îles est partiellement utilisée comme port naturel;
- Le brise-lames du port pour petits bateaux pourrait éventuellement être agrandi pour devenir une chaussée ou un pont-jetée pour un port en eau profonde, ce qui rapprocherait le contour de 18 m du rivage en raison d'une bathymétrie à gradient plus élevé juste à côté de l'affleurement rocheux;
- Le régime sédimentaire (remblai) est considéré comme mineur, surtout avec la protection supplémentaire d'un brise-lames pour le port pour petits bateaux;
- La couverture de glace sur la côte semble se former plus tard et se briser plus tôt que sur la côte ouest; par conséquent, le port pour petits bateaux proposé devrait connaître une saison libre de glace plus longue (probablement 7 mois) par rapport aux infrastructures maritimes situées le long de la côte ouest, par exemple le port actuel de Churchill (Manitoba);
- Aucun embâcle n'est prévu dans la partie nord de la zone C;
- L'accès routier passant au nord de la Grande rivière de la Baleine pourrait être un atout;
- Des carrières de roche (brise-lames) sont potentiellement disponibles à proximité;
- Des terrains de plus faible élévation du côté terre du port semblent disponibles pour la construction de terminal(aux) sur des sols rocheux (et non sur des dépôts deltaïques);
- Dans le contexte des considérations géomorphologiques, il est possible que des sites archéologiques non perturbés existent dans la région, mais une étude plus approfondie est nécessaire. Les sites archéologiques potentiels peuvent être enfouis près du littoral, compte tenu des processus d'accrétion impliqués dans la formation des dunes de sable dans la région;
- Quelques petits bâtiments (probablement communautaires) sont visibles sur Google Earth dans la zone. Leur fonction n'est pas claire et une consultation supplémentaire est nécessaire pour vérifier que leur usage n'interfère pas avec l'utilisation prévue du port.

D'autres enquêtes, études environnementales et géotechniques, ainsi que des consultations avec la communauté seront nécessaires pour confirmer les résultats et les conclusions ci-dessus.

7 RÉFÉRENCES

- Allard M, Lemay M, Barrett C, L'Hérault, Sarrazin D, Bell T, and Doré G. 2012. "Chapitre 6. Permafrost and climate change in Nunavik and Nunatsiavut: Importance for municipal and transportation infrastructures". Dans *Nunavik and Nunatsiavut: From science to policy. An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of climate change and modernization*, p. 171-197.
- Allard M, Michaud Y, Ruz M, Héquette A. 1998. "Ice foot, freeze-thaw of sediments, and platform erosion in a subarctic microtidal environment, Manitousuk Strait, northern Quebec, Canada". *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35, p. 965-979.
- Atlas climatique du Canada* - version 2. 2019. Utilisant les données du modèle climatique BCCAQv2. <https://atlasclimatique.ca/>.
- Bélanger S, Filion L. 1991. "Niveo-aeolian sand deposition in subarctic dunes, eastern coast of Hudson Bay, Quebec, Canada". *Journal of Quaternary Science*, 6, p. 27-37
- Bhiry N, Delwaide A, Allard M, Bégin Y, Filion L, Lavoie M, Nozais C, Payette S, Pienitz R, Saulnier-Talbot É, Vincent W. 2011. "Environmental Change in the Great Whale Reiver Region, Hudson Bay: Five decades of multidisciplinary research by Centre d'études nordiques (CEN)". *Ecoscience* 18, p. 182-203.
- Boisson A, Allard M. 2018. "Quaternary Hydrodynamic Contexts of the Emerging Coasts of Nunavik (Northern Québec, Canada)". *Journal of Coastal Research*: numéro spécial 85, Actes du 15^e symposium côtier international, p. 616-620.
- Boisson A, Allard M. 2018. *Chapter 4: Nunavik's Coastal Systems in a Changing Climate. Caractérisation et modèles d'évolution des environnements côtiers du Nunavik, Québec, Canada*. Université Laval, Thèse de doctorat, p. 174-230.
- Brouard E, Roy M, Dubé-Loubert H, Lamarche O, Hébert S. 2020. *Carte des dépôts de surface de la province de Québec, rapport sur les méthodes et les données*, Le Bureau de la Connaissance géoscientifique du Québec (BCGQ), Énergie et Ressources naturelles, Québec, 1 carte.
- Canadian Committee in River Ice Processes and the Environment (CRIPE). 1996. *A Primer on Hydraulics of Ice Covered Rivers*. Union géophysique canadienne, section hydrologie. Canada.donneesclimatiques.ca/, consulté 2022.
- Environnement Canada. 2021. *Normales climatiques des glaces sur 30 ans*. Page Web consultée le 20 janvier 2022: <https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/30Atlas/page1.xhtml?lang=fr>
- Fournier A, Allard M. 1992. "Periglacial Shoreline erosion of a rocky coast estuary: Riviere George, Northern Quebec". *Journal of Coastal Research*, 8, p. 926-942.
- Gouvernement du Canada. 2022. *Données sur l'épaisseur de la glace*. Date de modification : 2022-01-18. Page Web consultée le 25 janvier 2022 : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/previsions-observations-glaces/conditions-glaces-plus-recentes/archives-aperçu/donnees-epaisseur.html>
- GRID-Arendal. 2020. *Permafrost in the Northern Hemisphere*, GRID-Arendal/Nunataryuk, available at: <https://www.grida.no/resources/13519>
- Hequette A, Tremblay P. 2009. "Effects of low water temperature on longshore sediment transport on a subarctic beach, Hudson Bay, Canada". *Journal of Coastal Research*, 25, p. 171-180.
- Syvitski JPM, Milliman JD. 2007. "Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean". *The Journal of Geology*, 115, p. 1-19.
- Hill P, Meule S, Longuepee H. 2003. "Combined-flow processes and sedimentary structures on the shoreface of the wave-dominated Grande-Riviere-De-La-Baleine Delta". *Journal of Sedimentary Research*, 73, p. 217-226.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

- Hillaire-Marcel C. 1976. “La déglaciation et le relèvement isostatique sur la côte est de la baie d’Hudson”. *Cahiers de géographie du Québec*, 20, p. 185–220.
- Hulse P, Bentley SJ. 2012. “A 210Pb sediment budget and granulometric record of sediment fluxes in a subarctic deltaic system: The Great Whale River, Canada”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 109, p. 41-52.
- Hydro-Québec. 1993. “Complexe Grande Baleine, complexe hydroélectrique, Livre 2, Description de l’environnement”, Volume 1 – *Environnement terrestre, Étude de faisabilité d’Hydro-Québec*.
- Hydro-Québec. 1993. “Complexe Grande Baleine, complexe hydroélectrique, Livre 2, Description de l’environnement”, Volume 1 – *Environnement marin . Étude de faisabilité d’Hydro-Québec*.
- Ingram RG. (1981) “Characteristics of the Great Whale River plume”. *Journal of Geophysical Research*, 86 (C3), p. 2017 – 2023.
- James TS, Henton JA, Leonard LJ, Darlington A, Forbes DL, Craymer M. 2014. *Relative Sea-level Projections in Canada and the Adjacent Mainland United States*, Commission géologique du Canada, Rapport public 7737, 72 p.
- Joly S, Senneville S, Caya D, Saucier F. 2011. “Sensitivity of Hudson Bay Sea ice and ocean climate to atmospheric temperature forcing”. *Climate Dynamics*, 36 (9), p. 1835-1849.
- Josenhans HW, Zevenhuizen J. 1990. “Dynamics of the Laurentide Ice Sheet in Hudson Bay, Canada”. *Mar. Geol.*, 92, p. 1-26.
- Lavoie C, Allard M, Duhamel D. 2012. “Deglaciation landforms and C-14 chronology of the Lac Guillaume-Delisle area, eastern Hudson Bay: A report on field evidence”. *Geomorphology*, p. 159-160: 142-155.
- Lee HA. 1960. “Late glacial and postglacial Hudson Bay sea episode”. *Science*, 131, p. 1609-1611.
- Lochte AA, Repschläger J, Kienast M, Garbe-Schönberg D, Andersen N, Hamann C, Schneider R. 2019. “Labrador Sea freshening at 8.5 ka BP caused by Hudson Bay Ice Saddle collapse”. *Nat. Commun.* 10, p. 5869.
- Longuepee H. 2000. *Distribution des figures et faciès sédimentaires d’un delta en régression forcée, Grande-rivière-de-la-Baleine, Nouveau-Québec*. Mémoire de maîtrise en océanographie. Université du Québec à Rimouski, 181 p.
- Massé A, 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 pages.
- Michaud Y, Frobel D. 1994. *Aerial video survey of the southeastern Hudson Bay coastline*. Commission géologique du Canada, Rapport public No. 2895, 35 p. et 3 cassettes vidéo d’une heure.
- Ministère des Pêches et des Océans. 1996. *Hypothèses reliées aux effets environnementaux du projet Grande Baleine sur l’écosystème marin côtier du sud-est de la baie d’Hudson*. Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques, p. 2127.
- OURANOS. 2020. *Knowledge Synthesis: Impact of Climate change on Nunavik’s Marine and Coastal Environment*. Rapport présenté au Ministère des Transports du Québec, Juillet 2020.
- ONeil HB, Wolfe SA, Duchesne C. 2019. “New ground ice maps for Canada using a paleogeographic modelling approach”. *The Cryosphere*, 13, p. 753-773.
- Owczarek P, Opala-Owczarek M, Boudreau S, Lajeunesse P, Stachnik L. 2020. “Re-activation of landslide in sub-Arctic areas due to extreme rainfall and discharge events (the mouth of the Great Whale River, Nunavik, Canada)”. *Science of the Total Environment*, 744: 1440991.
- Percy JA. 1990. “Geography and Bathymetry”, Dans J.A. Percy (éd.). Actes de l’atelier: *Marine Ecosystem Studies in Hudson Strait*. 9-10 novembre, 1989, Montréal, Québec. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1770. p. 72-77.

NOTE TECHNIQUE 13A – Port en eau profonde – Conditions environnementales physiques

- RNCan. 2020. *Index des cartes de géologie de surface (géodatabase fichier), données géospatiales*. Ressources naturelles Canada. Date de publication : 2015-01-01. Date de modification : 2020-12-10. Disponible à : <https://open.canada.ca/data/fr/dataset/cebc283f-bae1-4eae-a91f-a26480cd4e4a>
- Ruz M-H, Allard M. 1994a. “Coastal dune development in cold-climate environments”. *Physical Geography*, 15, p. 372-380.
- Ruz M-H, Allard M. 1994 b. “Foredune development along a subarctic emerging coastline, eastern Hudson Bay, Canada”. *Marine Geology*, 117, p. 57-74.
- Ruz MH, Allard M, Michaud Y, Hequette A. 1998. “Sedimentology and evolution of subarctic tidal flats along a rapidly emerging coast, Eastern Hudson Bay, Canada”. *Journal of Coastal Research*, 14, p. 1242 – 1254.
- Ropars Y. 2011. *Erosion de berge, Salluit, Québec*. Rapport pour le Ministère de la Sécurité publique du Québec, 24 p.
- Senneville S. 2018a. *Modélisation des glaces de rive à fine échelle à proximité d’infrastructures maritimes au Nunavik en contexte de changements climatiques : Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception 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 pages.
- Senneville S. 2018b. *Atlas mensuel climatique de la concentration et épaisseur de glace au Nunavik*. Annexe au rapport final MTQ, projet CC05.1. 74 pages.
- Senneville S, St-Onge Drouin S. 2013. *Étude de la variation des glaces dans le système couplé océan-glace de mer de la baie d’Hudson*, Rapport final remis au Ministère des Transports du Québec et au Consortium Ouranos, 109 pages.
- Syvitski JPM, Milliman JD. 2007. “Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean”. *The Journal of Geology*, 115, p. 1-19.
- Tivy A, Howell SEL, Alt B, McCourt S, Chagnon R, Crocker G, Carrieres T, Yackel JJ. 2011. “Trends and variability in summer sea ice cover in the Canadian Arctic based on the Canadian Ice Service Digital Archive, 1960–2008 and 1968–2008”. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116 (C3), 25 p.
- Wynja V, Demers AM, Laforest S, Lacelle M, Pasher J, Duffe J, Chaudhary B, Wang H, Giles T. 2015. “Mapping coastal information across Canada’s northern regions based on low-altitude helicopter videography support of environmental emergency preparedness efforts”. *Journal of Coast Research*, 31, p. 276-290.
- Zevenhuizen J, Amos CL, Asprey K, Michaud Y, Ruz M-H, Sutherland TF, Tremblay C. 1994. *The sediment budget of Manitounuk Sound, southeastern Hudson Bay*. Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada, Rapport public No. 2941, 141p.