

Modélisation des glaces de rive à fine échelle à proximité d'infrastructures
maritimes au Nunavik en contexte des changements climatiques :
Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtac et Aupaluk

Projet de recherche no. CC05.1



<http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/NSVS~3~3~13288~113288:Annual-Sea-Ice-Cycle-over-Northern->

Rapport final

Rapport remis au

Bureau de la coordination du Nord-du-Québec

Ministère des Transports du Québec

Par

Simon Senneville

15 octobre 2018

Table des matières

1	Introduction.....	4
2	Bref historique des études de l'ISMER sur la modélisation des conditions de glaces au Nunavik 5	
3	Description du projet de recherche	6
4	Méthodologie du projet de recherche : Acquisition de données et simulateurs utilisés	8
4.1	Production des grilles bathymétriques (Étape 1).....	9
4.1.1	Données bathymétriques	9
4.1.2	Grilles bathymétriques	10
4.2	Modèle Océanique Régional, Baie d'Hudson (MOR-HB) (Étape 2)	17
4.2.1	Imbrication des sous-domaines de 2 km dans le domaine à 10 km de résolution et des sous-domaines de 400 m dans ceux à 2 km de résolution.	17
4.2.2	Schème couvrant/découvrant : prise en compte des régions où les marées ont de fortes amplitudes et les eaux sont peu profondes.....	18
4.3	Simulateur de glace : mise à jour du simulateur de glace de mer (CICE) et ajout de processus de glace de rive (Étape 3)	19
4.3.1	Couplage du simulateur de glace CICE5	20
4.3.2	Ajout de phénomènes physiques afin de simuler l'effet d'attachement et de formation de la glace de rive.....	20
4.4	Simulation réaliste : validation des simulateurs (Étape 4)	21
4.4.1	Incertitudes liées à la validité des simulations à fine échelle résultantes du projet CC05.1	21
4.4.2	Validation des simulations réalistes	22
4.5	Simulation climatique (Étape 5)	23
4.5.1	Forçages atmosphériques climatiques	24
5	Résultats	25
5.1	Simulations réalisées dans le cadre du projet de recherche.....	25
5.2	Résultats des simulations à 10 km de résolution : simulations réalistes et climatiques	25
5.2.1	Validation de MOR-HB 10 km de résolution	25

5.2.2	Simulations climatiques à 10 km de résolution.....	32
5.3	Résultats à 10 km et 2km montrant l'effet de l'augmentation de la résolution spatiale 38	
5.4	Résultats des simulations à 2 km de résolution et 400 m de résolution	42
5.4.1	Baie Déception	42
5.4.2	Aupaluk.....	44
5.4.3	Ivujivik.....	46
5.4.4	Kuujuaq et Umijuaq.....	48
5.4.5	Quaqtaq.....	50
5.5	Sommaire des résultats.....	50
6	Faits saillants, discussions et recommandations.....	52
6.1	Résultats attendus.....	52
6.2	Défis problématiques et solutions mises de l'avant.....	52
6.3	Problématique non résolue.....	52
6.3.1	Raison et explication	53
6.4	En résumé.....	55
7	Conclusions.....	56
8	Besoins en recherche	57
9	Lexique	59
10	Une synthèse des conclusions et des recommandations (750 mots)	62
11	Références.....	64
12	Annexe : Fichiers transmis au MTQ sur un NAS	66
12.1	Structure des répertoires et.....	66
12.2	Nomenclature des fichiers.....	66

1 Introduction

Voici le rapport final réalisé dans le cadre du projet « Modélisation des glaces de rive à fine échelle à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik en contexte des changements climatiques : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtac et Aupaluk. ».

L'objectif principal consiste à réaliser des simulations couplées océans-glace de mer à fine résolution spatiale, soit de l'ordre de 400 m de résolution horizontale, et ce, dans un contexte de changements climatiques, près des infrastructures maritimes ciblées au Nunavik. Ces résultats pourront servir à étudier la vulnérabilité des infrastructures maritimes et autres retombées pour les communautés, tel que le transport maritime.

Le modèle océanique utilisé dans le cadre de ce projet de recherche est MOR-HB (Modèle Océanique Régional – Baie d'Hudson). Le domaine du modèle couvre le système de la baie d'Hudson, incluant : la baie James, le bassin de Foxe, la baie d'Ungava et la baie et le détroit d'Hudson. Ce domaine couvre donc l'ensemble du Nunavik. Ce modèle fut développé par François Saucier et son équipe en 2004 (Saucier et al. 2004). Le développement du modèle s'est poursuivi au LASSO (Laboratoire d'analyse et de simulation des systèmes océaniques) et plus récemment au POLR (Physique des Océans ► Laboratoire de Rimouski) de l'ISMER (Institut des sciences de la mer de Rimouski). Ce modèle est constitué de deux composantes couplées: un simulateur océanique, nommé MOR, et un simulateur de glace de mer, nommé CICE. Le simulateur océanique est basé sur les équations du mouvement ainsi que la conservation de la masse. De plus, une équation d'état fait le lien entre la densité du fluide et certaines variables comme sa température et sa salinité. D'autres équations sont nécessaires pour déterminer les processus qui ne peuvent être résolus, comme la turbulence. Le simulateur de glace de mer (CICE) traite deux aspects : la thermodynamique et la dynamique des glaces de mer. La partie thermodynamique détermine la production ou la fonte des glaces de mer en fonction des échanges de chaleur entre l'eau, la glace et l'atmosphère. La dynamique des glaces détermine la façon dont réagissent les glaces en fonction des stress appliqués par l'eau et l'atmosphère (la rhéologie) et la façon dont s'empilent les glaces une fois que les pressions internes dépassent un seuil de rupture (empilement).

Certains processus de formation et de rétention des glaces liés à la présence de la côte ne sont pas actuellement pris en compte. Un autre objectif de ce projet est d'inclure certains de ces processus, comme le frottement des glaces sur le fond lié à la variation du niveau d'eau due aux marées. Évidemment, cette approche novatrice à fine résolution près des infrastructures maritimes nécessite une validation des résultats de glace. Cette validation sera produite à l'aide des photos de glaces de rives et des données issues des travaux d'interprétation d'images satellitaires de l'INRS-ETE (l'Institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre, environnement) (projet CC09.2). En effet, ces travaux ont permis d'obtenir des données de concentration de glace à diverses échelles spatiales (de la centaine de mètres à des dizaines de

kilomètres) et temporelles (de l'heure à la variabilité annuelle) qui sont comparées aux résultats des simulations.

Ce rapport comprend les éléments suivants :

- Bref historique des études de l'ISMER sur la modélisation des conditions de glaces au Nunavik;
- Une description du projet de recherche;
- Méthodologie du projet de recherche : Acquisition de données et simulateurs utilisés;
- Les résultats obtenus;
- Faits saillants, discussions et recommandations;
- Les conclusions;
- Les besoins futurs en recherche;
- Une synthèse des conclusions et des recommandations;
- Un lexique;
- L'annexe des figures de glace de mer pour le climat 1980-2010 et 2040-2070.

2 Bref historique des études de l'ISMER sur la modélisation des conditions de glaces au Nunavik

En 2009, le Ministère a mandaté l'Institut des Sciences de la mer de Rimouski (ISMER) pour réaliser un projet de recherche intitulé « Étude de la variation des glaces dans le système couplé glace de mer-océan de la baie d'Hudson ». Ce projet a été réalisé entre 2009 et 2013 (Senneville et St-Onge Drouin, 2013). Dans ce projet, des simulations de l'évolution du couvert de glace (concentration et épaisseur) à l'échelle de la Baie d'Hudson pour deux scénarios climatiques ont été réalisées à l'aide du simulateur MOR-HB à 10 km de résolution horizontale. Par la suite, pour les sites d'Umiujaq, Quaqtac et Kuujuaq, des relations empiriques furent élaborées entre les conditions de glace de rive observée et les paramètres environnementaux, tels que : la température de l'air, la température de l'eau et la concentration des glaces. Les observations des glaces de rive ont été faites par l'Institut national de recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE) (projet CC09.1). La glace de rive simulée à l'aide de ces relations empiriques reproduit 77 à 89 % de la variabilité des observations. Ces relations empiriques permettent d'anticiper une réduction de 9 à 19% de la période d'englacement des glaces de rive aux 3 stations observées (17 à 42 jours) pour l'horizon 2055 (période 2040-2070).

Cependant, bien que répondant au devis de ce premier projet, ces résultats n'étaient pas suffisants pour répondre aux besoins du ministère. Dès le début, ce projet représentait un pas dans la bonne direction, mais devait être suivi d'un second projet qui utiliserait une partie de ce travail, mais irait beaucoup plus loin dans la caractérisation de l'état des glaces de rive autour des infrastructures maritimes du Nunavik. En effet, afin de caractériser les relations vagues-glaces en

contexte de changement climatique, le ministère avait besoin d'une résolution suffisante pour déterminer les vagues incidentes aux infrastructures maritimes.

Dans ce second projet de recherche, qui est le projet actuel, les objectifs sont plus ambitieux. Au lieu d'établir une relation empirique pour déterminer la variabilité climatique moyenne, il fut proposé de faire des simulations imbriquées à très haute résolution (400 m) en utilisant des modèles numériques à la fine pointe du progrès disponible. La méthode empirique établit des relations entre la présence de glaces de rive et les paramètres environnementaux sans se soucier des processus impliqués. La méthode dans ce projet propose de raffiner les modèles existants afin d'inclure les processus qui contribuent à la formation des glaces de rive.

3 Description du projet de recherche

Ce projet de recherche comporte plusieurs objectifs. L'objectif principal est de déterminer la concentration et l'épaisseur de la glace près de certaines infrastructures sélectionnées du Nunavik, soit celle des villages de : Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq et Aupaluk. La sélection des sites a été réalisée par le Ministère des Transports du Québec (MTQ). Ces simulations doivent répondre principalement à deux besoins :

- Déterminer le climat de glace futur près de ces infrastructures en fonction des changements climatiques;
- Produire des résultats de simulateurs numériques afin de les utiliser dans le cadre du projet CC16.1 « Suivi, analyse et modélisation des conditions de vagues en milieu côtier au Nunavik en fonction des conditions de glace dans un contexte de changements climatiques » réalisé par l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) pour étudier les interactions vagues-glace et ce, dans un contexte de changements climatiques.

Pour réaliser nos objectifs principaux, la réalisation de plusieurs objectifs spécifiques est nécessaire :

- Obtenir les données bathymétriques nécessaires pour représenter adéquatement les abords des sites sélectionnés;
- Passer d'un modèle empirique, comme dans le premier projet (CC05.1), à un modèle diagnostique à fine résolution;
- Modifier le simulateur océanique afin de permettre l'imbrication des domaines à différentes résolutions spatiales;
- Améliorer les simulateurs de glace afin de s'assurer d'obtenir des simulations de glace numériquement stable, et ce, même avec une fine résolution spatiale horizontale de 2 km ou 400 m;

- Réaliser des analyses statiques sur l'évolution de la saison de glace en relation avec les changements climatiques, incluant une discussion sur l'évolution de la période sans glace ainsi qu'une discussion sur l'évolution de la concentration et l'épaisseur de la glace au cours des saisons.

La résolution spatiale des simulations effectuées pour les six sites à l'étude est représentée par des domaines à l'échelle de 2 km (rouge) et des sous-domaines à l'échelle de 400 m (noir) à la Figure 1. Le simulateur à 10 km de résolution couvre l'ensemble du système de la baie d'Hudson.

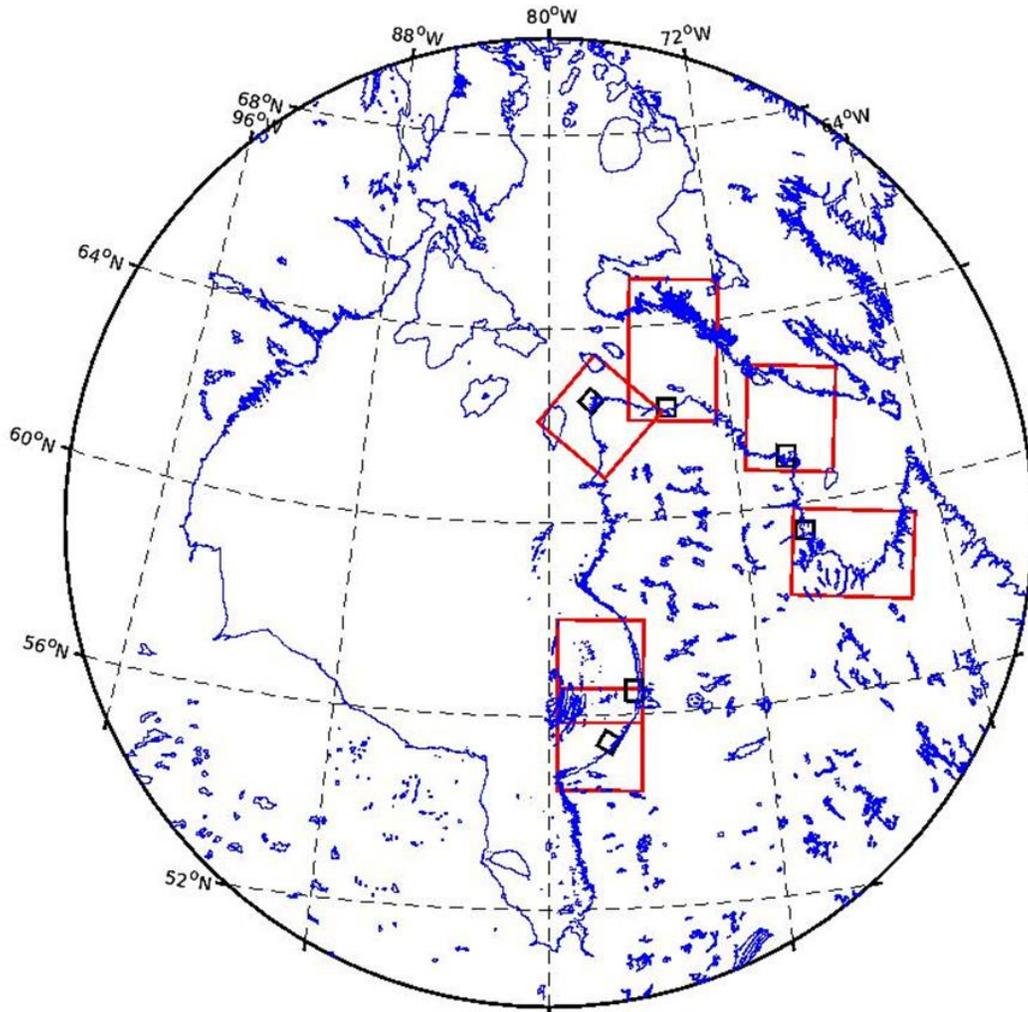


Figure 1 - Emplacement des six sites à l'étude au Nunavik, en partant du sud et progressant en sens horaire le long de la cote: Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq et Aupaluk. Les rectangles rouges et noirs correspondent aux sous-domaines à 2 km et 400 m de résolution, respectivement.

Malgré les ressemblances, ce projet comporte des différences importantes avec le projet précédent (CC05.1, 1Senneville & St-Onge Drouin, 2013). En effet, dans ce projet, les glaces près

des infrastructures sont produites à l'aide d'un simulateur de glace à la fine pointe de la technologie (CICE5), au lieu d'être déterminées par des relations empiriques, telles que dans le projet précédent. Non seulement la méthodologie est différente, mais les résultats attendus sont également différents, des cartes de concentration et épaisseur de glace sont produites au lieu des prédictions sans référence précise aux abords des infrastructures. De plus, nous avons maintenant 7 simulations climatiques (contrairement aux six prévus dans le devis), au lieu des deux précédemment utilisés. Ces nouvelles simulations, produites également par OURANOS, nous permettent de mieux représenter la variabilité naturelle liée à cet environnement nordique. La variabilité naturelle représente la gamme de tous les événements possibles due à la nature chaotique de l'atmosphère et l'océan.

4 Méthodologie du projet de recherche : Acquisition de données et simulateurs utilisés

Cette section présente les différentes étapes méthodologiques mises en œuvre pour produire des simulations de glaces de mer et de rives, près des infrastructures des six villages nordiques du Nunavik à l'étude.

La méthodologie générale du projet consiste à :

- Recueillir des données bathymétriques à proximité des six sites d'infrastructures à l'étude pour produire des grilles bathymétriques à 2 km et 400 m de résolution horizontale. Ces grilles bathymétriques sont essentielles à la conception des modèles numériques;
- Appliquer une cascade de simulateurs couplés océan-glace pour obtenir des concentrations et épaisseurs de glaces de rive à une fine résolution de 400 m. Pour ce faire, nous avons d'abord produit des simulations à 10 km de résolution sur l'ensemble des côtes du Nunavik. Ces simulations sont utilisées pour produire les données nécessaires à des simulations avec une résolution intermédiaire de 2km. Cette étape intermédiaire est nécessaire afin que les structures océaniques, telles que les fronts et les tourbillons, soient correctement transmises aux frontières du simulateur à plus haute résolution (400 m). Finalement, une simulation à 400 m de résolution horizontale qui couvre la zone d'intérêt, près de l'infrastructure, est produite à l'aide des résultats des simulations intermédiaires. Dans ces simulations à fine résolution (400 m), nous considérons également les phénomènes influençant la glace de rive, tel que les interactions entre la glace et le fond.

Passons en revue les différentes étapes de la méthodologie réalisées pour mener à bien le projet de recherche.

4.1 Production des grilles bathymétriques (Étape 1)

4.1.1 Données bathymétriques

Pour appliquer un simulateur numérique océanique à une région, nous devons connaître sa bathymétrie. De plus, l'ensemble des données bathymétriques doit être ajusté sur un même niveau de référence verticale. De cette façon, la base de données bathymétriques peut intégrer des données provenant de différentes sources. Les données bathymétriques utilisées, ainsi que le type de données obtenues, dans le cadre de ce projet proviennent des sources suivantes :

- Le service hydrographique canadien (SHC) a fourni : des points de sondage, des données d'échosondeur, des cartes bathymétriques numériques et de cartes bathymétriques qui ne sont pas en format numérique;
- Données d'échosondeur liées aux missions scientifiques d'ArcticNet obtenues du Ocean mapping group (OMG) (www.omg.unb.ca);
- Relevés bathymétriques et topographiques sous format Autocad des infrastructures et de leur environ obtenues du MTQ;
- Relevés bathymétriques et topographiques de certaines rivières obtenus d'Hydro-Québec (HQ).

Tel que spécifié dans le second rapport d'étape, suite à la demande des données de sondages faite au Service hydrographique canadien (SHC), il s'est avéré que l'ensemble de ces données contenait moins de points que ce qui était disponible sur leurs cartes bathymétriques. En effet, les ententes avec les partenaires du SHC ne permettaient pas le partage d'une partie de ces données en format numérique. Pour pallier à cette problématique, les cartes bathymétriques numériques disponibles sur le marché ont donc été acquises. De plus, une carte bathymétrique qui n'était pas encore publiée (carte électronique 5707) par le SHC a également été obtenue. Finalement, les cartes bathymétriques, en format papier, qui étaient pertinentes, mais qui n'étaient pas disponibles en format numérique ont été partiellement numérisées. Toutes les données bathymétriques disponibles accessibles publiquement ont donc été acquises et considérées dans le projet. Voici donc une liste des ajouts qui ont été faits à notre base de données :

Kuujuarapik: Données numérisées de la carte bathymétrique 5476, points de sondage et isolignes de profondeur.

Ivujivik : Données numérisées de la carte bathymétrique 5412 (détails), points de sondage et isolignes de profondeur.

Données cartes numériques CA173378/ points de sondage (carte 5450), CA573372/ points de sondage (carte 5412).

Umiujaq : Données des cartes numériques CA373354/ points de sondage (carte 5505), CA273352/ points de sondage (carte 5505).

Baie Déception : Données des cartes numériques CA573360/ points de sondage (carte 5457), CA473379/ points de sondage (carte 5457), CA173378/ points de sondage (carte 5450).

Quaqtaq : Données numérisées de la carte bathymétrique 5442 (détails), points de sondage et isolignes de profondeur.

Données cartes numériques CA573370/ points de sondage (carte 5452), CA173369/ points de sondage (carte 5450).

Aupaluk : Données cartes numériques CA473413/ Points de sondage (carte 5349), CA173369/ points de sondage

De plus, toutes les données de Ocean Mapping Group (OMG) pertinentes, c'est-à-dire, couvertes par l'une ou l'autre de nos grilles bathymétriques, ont été téléchargées à l'adresse suivante : (<http://www.omg.unb.ca/>).

4.1.2 Grilles bathymétriques

La prochaine section présente les grilles bathymétriques qui ont été développées à partir des sources de données bathymétriques présentées dans la section précédente pour les sites d'infrastructures maritimes des six villages nordiques du Nunavik à l'étude.

A. Kuujjuarapik

La figure 2 présente les grilles bathymétriques à une échelle de 2 km et de 400 m de résolution horizontale associée au site de l'infrastructure maritime de Kuujjuarapik.

Il est difficile de déterminer un nombre de données bathymétriques suffisantes pour bien représenter la distribution statistique de la bathymétrie dans chaque cellule. Selon la « loi des grands nombres », les caractéristiques d'un échantillonnage aléatoire se rapprochent des caractéristiques statistiques de la population lorsque la taille de l'échantillon augmente. Par exemple, combien de fois doit être lancée une pièce de monnaie pour que l'échantillonnage soit face à 50%? La théorie dit que l'écart à cette statistique sera de l'ordre de \sqrt{N}/N , où N est le nombre de tirages. Lors de la conception l'ensemble des grilles, nous avons choisi un nombre de données minimal (N) de 16. Ce qui implique que nous acceptons que de l'ordre de 25% des cellules ainsi déterminées ne représentent pas la distribution réelle de la bathymétrie pour ces cellules.

La grille bathymétrique à 2 km de résolution (Figure 2a) contient suffisamment de données pour permettre la modélisation. Toutefois, pour la grille bathymétrique à 400 m de résolution (Figure 2b), le nombre de données est faible, selon nos critères de 16 données par cellule, près de l'infrastructure (Figure 3). Les simulations témoins ont tout de même été réalisées. Nous

discuterons des conséquences dans la section 5.4.4. L'échelle maximale du nombre de données à la figure 3 a été limitée à 25 pour illustrer précisément les secteurs où il y a moins de données disponibles.

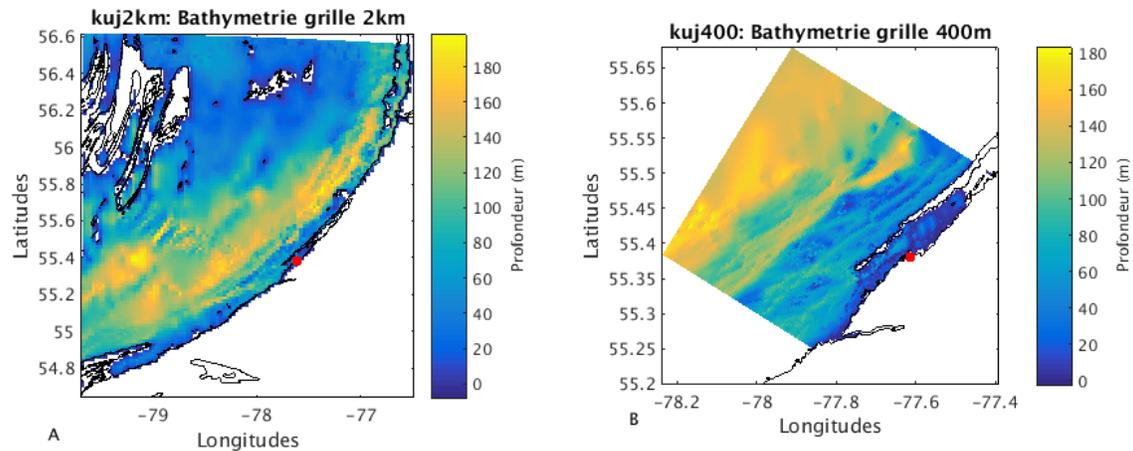


Figure 2 - Grilles bathymétriques à 2 km de résolution (A) et à 400 m de résolution (B) pour le village de Kuujuarapik. Le point rouge illustre la position de l'infrastructure maritime.

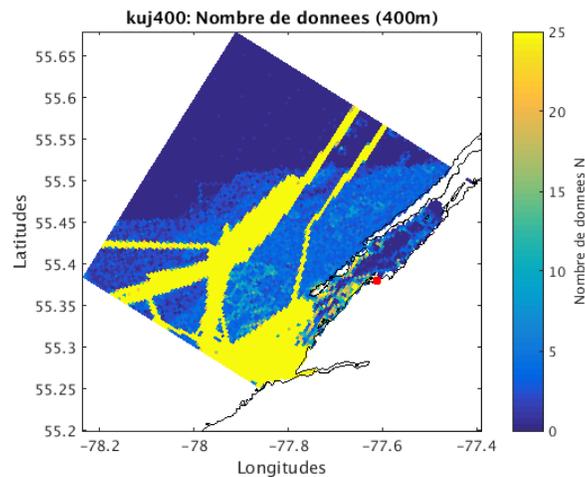


Figure 3 - Nombre de données disponibles par cellule d'une résolution horizontale de 400 m pour Kuujuarapik. L'axe des couleurs a été limité à 25 pour permettre de bien visualiser les endroits où il y a moins de données disponibles.

B. Umiujaq

La Figure 4 présente les grilles bathymétriques à 2 km (Figure 4a) et 400 m (Figure 4b) de résolution horizontale associées au site d'Umiujaq. La Figure 5 montre le nombre de données disponibles par cellule pour la grille de 400 m de résolution. Les deux grilles bathymétriques (2 km et 400 m) contiennent suffisamment d'information pour faire les simulations.

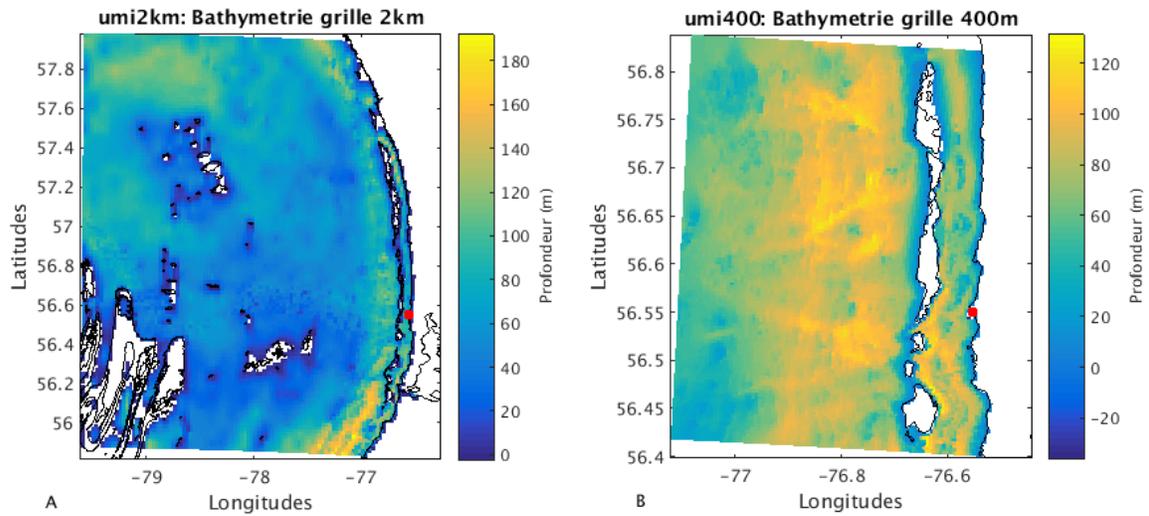


Figure 4 - Grilles bathymétriques à 2 km de résolution (A) et à 400 m de résolution (B) pour le village d’Umiujaq. Le point rouge illustre la position de l’infrastructure maritime.

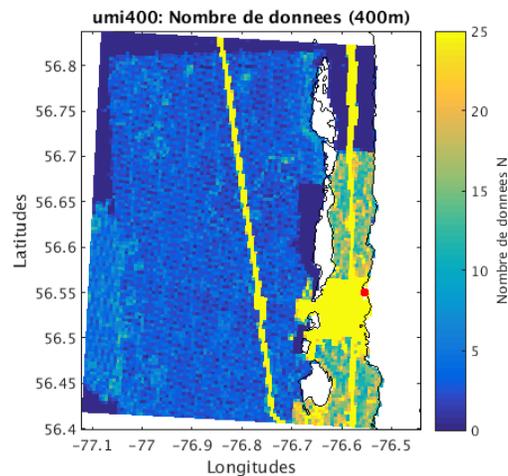


Figure 5 - Nombre de données disponibles par cellule d’une résolution horizontale de 400 m pour Umiujaq. L’axe des couleurs a été limité à 25 pour permettre de bien visualiser les endroits où il y a moins de données disponibles.

C. Ivujivik

La Figure 6 présente les grilles bathymétriques à 2 km (Figure 6a) et 400 m (Figure 6b) de résolution horizontale associées au site d’Ivujivik. La Figure 7 montre le nombre de données disponibles par cellule pour la grille de 400 m de résolution. Les deux grilles bathymétriques (2 km et 400 m) contiennent suffisamment d’information pour faire les simulations.

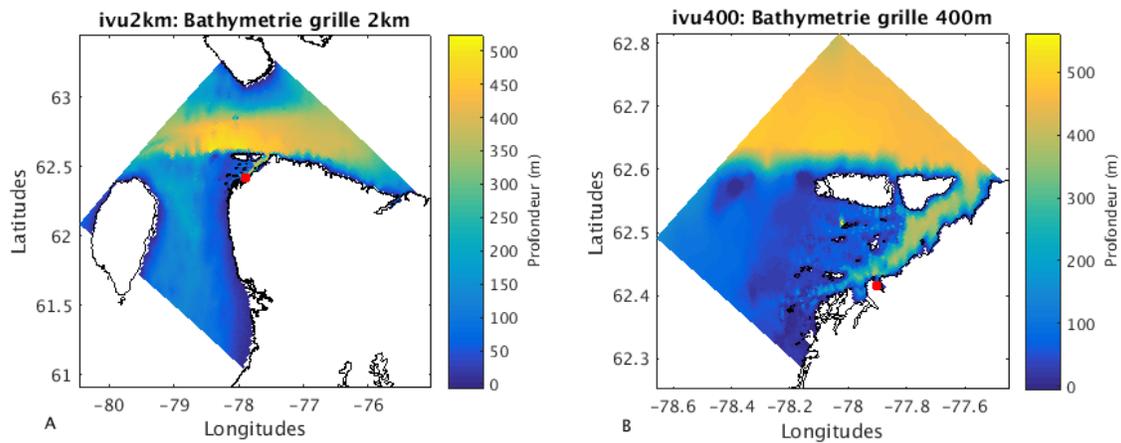


Figure 6 - Grilles bathymétriques à 2 km de résolution (A) et à 400 m de résolution (B) pour le village d'Iqviuq. Le point rouge illustre la position de l'infrastructure maritime.

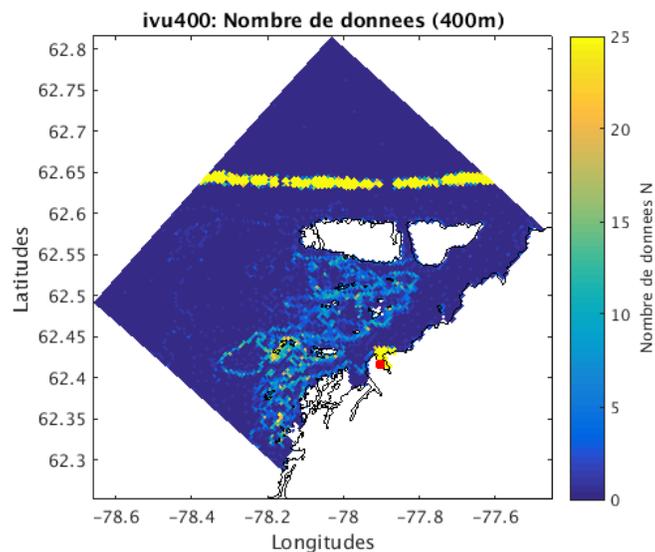


Figure 7 - Nombre de données disponibles par cellule d'une résolution horizontale de 400 m pour Iqviuq. L'axe des couleurs a été limité à 25 pour permettre de bien visualiser les endroits où il y a moins de données disponibles.

D. Baie Déception

La Figure 8 présente les grilles bathymétriques à 2 km (Figure 8a) et 400 m (Figure 8b) de résolution horizontale associées au site de Baie Déception. La Figure 9 montre le nombre de données disponibles par cellule pour la grille de 400 m de résolution. Chacune des grilles bathymétriques (2 km et 400 m) contient suffisamment d'information pour le site de Baie Déception pour faire les simulations.

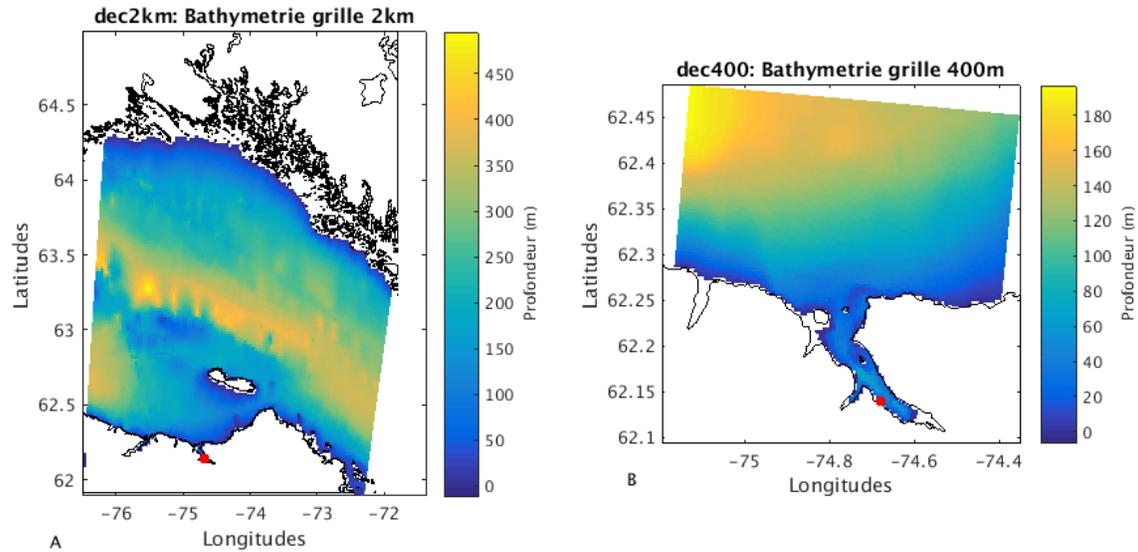


Figure 8 - Grilles bathymétriques à 2 km de résolution (A) et à 400 m de résolution (B) pour le site de Baie Déception. Le point rouge illustre la position de l'infrastructure maritime.

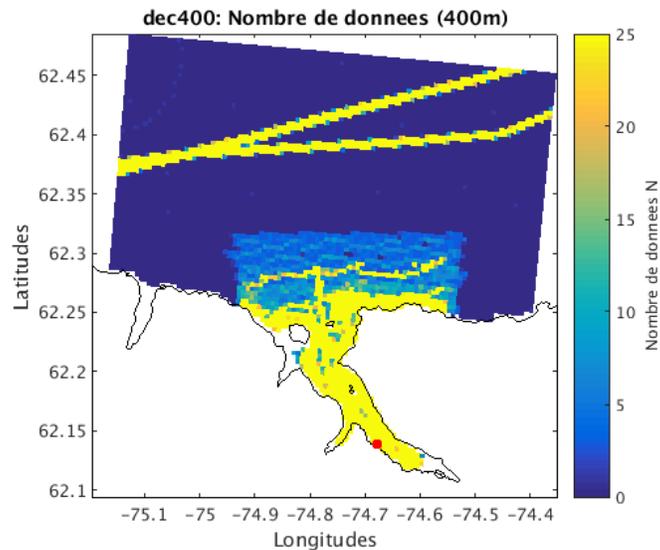


Figure 9- Nombre de données disponibles par cellule d'une résolution horizontale de 400 m pour le site de Baie Déception. L'axe des couleurs a été limité à 25 pour permettre de bien visualiser les endroits où il y a moins de données disponibles.

E. Quaqtqaq

La Figure 10 présente les grilles bathymétriques à 2 km (Figure 10a) et 400 m (Figure 10b) de résolution horizontale associées au site de Quaqtqaq. La Figure 11 montre le nombre de données disponibles par cellule pour la grille de 400 m de résolution. Chacune des grilles bathymétriques (2 km et 400 m) contient suffisamment d'information pour faire les simulations.

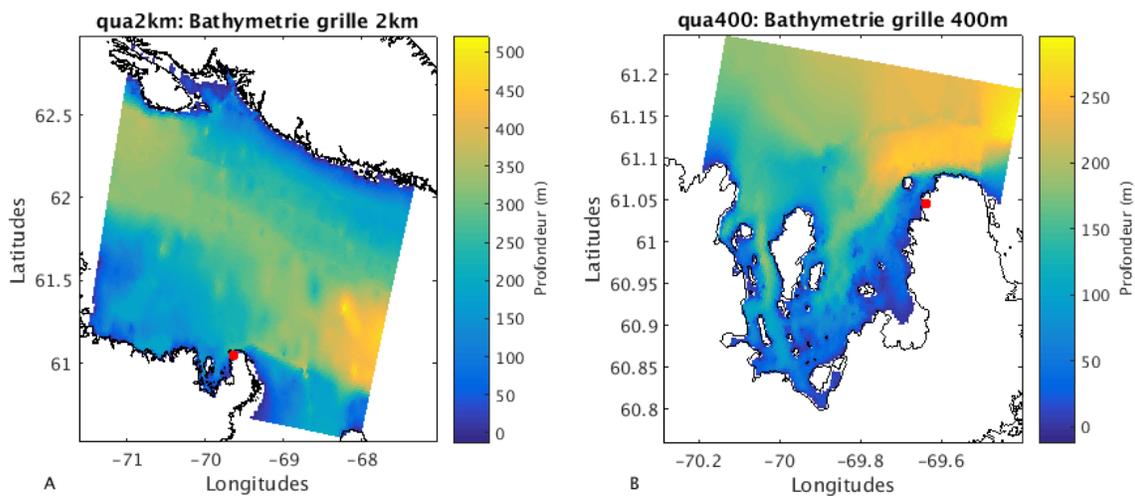


Figure 10 - Grilles bathymétriques à 2 km de résolution (A) et à 400 m de résolution (B) pour le village de Quaqtaq. Le point rouge illustre la position de l’infrastructure maritime.

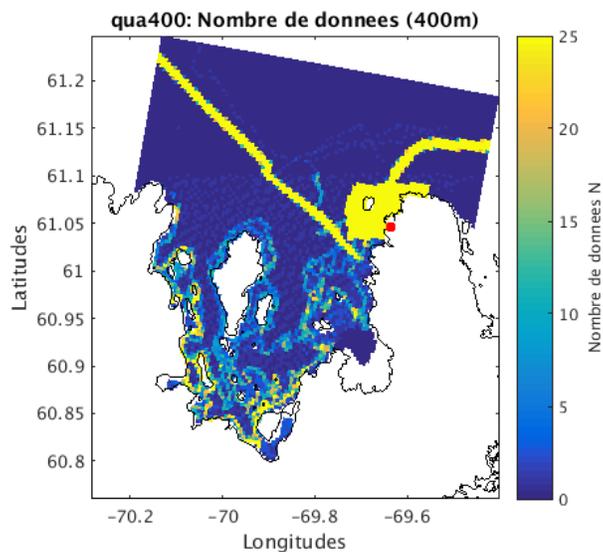


Figure 11- Nombre de données disponibles par cellule d’une résolution horizontale de 400 m pour Quaqtaq. L’axe des couleurs a été limité à 25 pour permettre de bien visualiser les endroits où il y a moins de données disponibles.

F. Aupaluk

La Figure 12 présente les grilles bathymétriques à 2 km (Figure 12a) et 400 m (Figure 12b) de résolution horizontale associées au site d’Aupaluk. Au démarrage du projet, le site d’Aupaluk était celui où le manque de données bathymétriques était la plus important. Cependant, grâce aux données supplémentaires décrites précédemment, la quantité de données s’est avérée suffisante

et aucune nouvelle campagne d’acquisition de données n’a été requise. Il a donc été possible de maintenir ce site d’infrastructures dans le projet. La Figure 13 présente le nombre de données disponibles par cellule pour la grille de 400 m de résolution, nous y voyons que le nombre de données est suffisant pour faire les simulations.

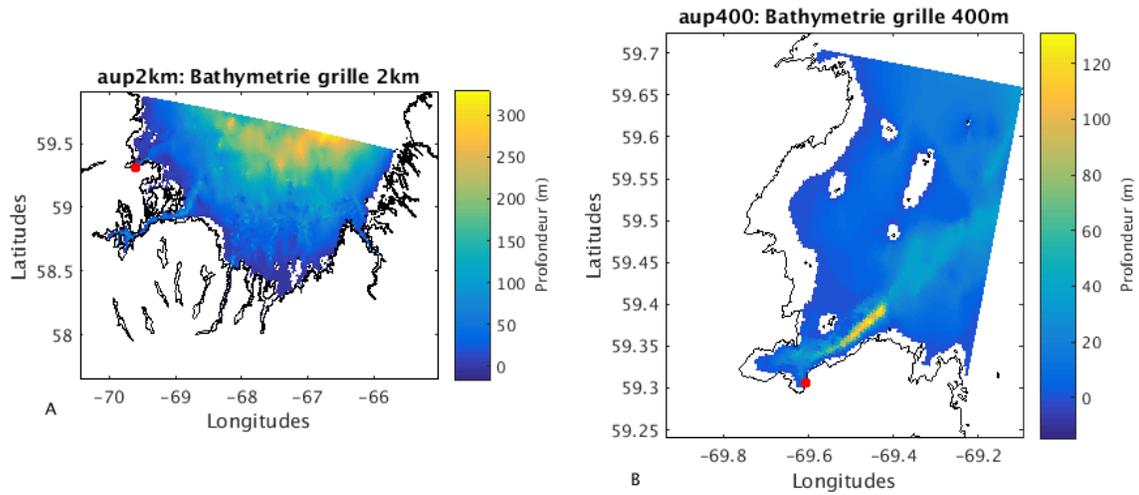


Figure 12 – Grilles bathymétriques à 2 km de résolution (A) et à 400 m de résolution (B) pour le village d’Aupaluk. Le point rouge illustre la position de l’infrastructure maritime.

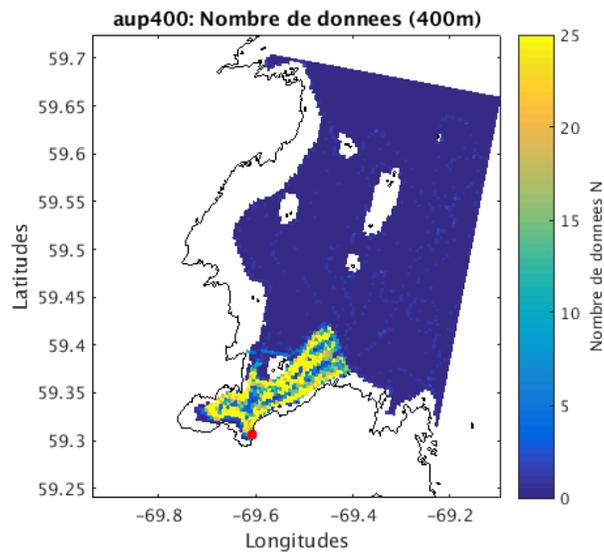


Figure 13- Nombre de données disponibles par cellule d’une résolution horizontale de 400 m pour Aupaluk. L’axe des couleurs a été limité à 25 pour permettre de bien visualiser les endroits où il y a moins de données disponibles.

En conclusion, en acceptant la limite de 16 points de sondage par cellule, près des infrastructures maritimes, nous avons suffisamment de données bathymétriques pour poursuivre notre étude. Comme mentionnée précédemment, le cas de Kuujuarapik sera discuté dans les sections 5.4.4

4.2 Modèle Océanique Régional, Baie d’Hudson (MOR-HB) (Étape 2)

Dans le cadre de ce projet de recherche, le modèle océanique est essentiel. En effet c’est lui qui fournit les variables océaniques nécessaires au modèle des glaces de mer. Cette section traite des améliorations spécifiques apportées au simulateur océanique dans le cadre de ce projet.

4.2.1 Imbrication des sous-domaines de 2 km dans le domaine à 10 km de résolution et des sous-domaines de 400 m dans ceux à 2 km de résolution.

Afin de bien comprendre l’importance de l’imbrication d’un sous-domaine dans un autre domaine, nous devons d’abord comprendre l’impact de la condition initiale et des conditions aux frontières du modèle sur les résultats de la simulation. De façons générales, un modèle numérique, comme le modèle MOR-HB utilisé dans ce projet, nécessite une condition initiale et des conditions aux frontières. La théorie stipule que ces conditions, initiale et aux frontières, sont nécessaires afin d’avoir une solution unique à notre problème. En effet, si ces conditions restent les mêmes d’une simulation à l’autre, la solution sera elle aussi la même. Par exemple, si nous démarrons une simulation le 1 janvier 1980 et utilisons les mêmes conditions initiale et conditions aux frontières, les résultats de la simulation seront les mêmes à chaque fois que nous reprendrons cette simulation. Par contre, si ces conditions, initiale et aux frontières, changent, la solution sera représentative de ces changements. Ce qui doit être retenu, c’est que les conditions aux frontières sont essentielles pour bien reproduire la réalité et les simulations climatiques.

Pour MOR-HB, la condition initiale est constituée de l’état de la salinité et de la température, au départ de la simulation, sur l’ensemble du système de la baie d’Hudson, incluant toutes les côtes du Nunavik. Les variables nécessaires aux frontières océaniques ouvertes sont : la salinité, la température et les niveaux d’eau.

Pour un modèle océanique global (planétaire), traitant tous les océans sur la terre, les frontières sont le fond de la mer, allant jusqu’à la côte ainsi que l’atmosphère. La frontière au fond de la mer prend seulement en compte le frottement (il n’y a pas d’échange de sel ou de chaleur). Pour la cote, il faut tenir compte des apports des rivières et du frottement latéral entre l’eau et la côte. En ce qui concerne la frontière de l’atmosphère, il faut tenir compte des échanges de sel et d’eau douce (précipitation - évaporation), les échanges de quantité de mouvement (vents) et les échanges de chaleur (rayonnement long, court, différence de température entre l’atmosphère et l’océan, changement de phase de l’eau).

En ce qui concerne les modèles régionaux, qui ne tiennent en compte que d’une partie de l’ensemble des mers et océans, il s’ajoute ce qui s’appelle les frontières ouvertes. Pour le système de la baie d’Hudson, qui inclut toute la région du Nunavik, ces frontières ouvertes sont situées à

l'entrée des détroits d'Hudson et de Fury & Hecla. Ces frontières sont verticales, tel un rideau qui coupe la colonne d'eau jusqu'au fond. À ces frontières, nous devons y indiquer la salinité, la température et les niveaux d'eau à une fréquence horaire (conditions aux frontières ouvertes) tout au long de la simulation. Pour chacun des 12 sous-domaines (2km et 400m pour les 6 sites), les conditions aux frontières spécifiques devront être définies. Une fois de plus, rappelons que le système de la baie d'Hudson inclut l'ensemble des côtes du Nunavik.

Dans le cadre du projet, pour définir les conditions frontières des sous-domaines (2 km et 400 m de résolution), nous avons automatisé la production et la lecture des conditions aux frontières à partir des solutions à plus faible résolution (10 km de résolution pour les sous-domaines à 2 km de résolution et 2 km de résolution pour les sous-domaines à 400 m de résolution). Cette étape consiste à lire les solutions de salinité, température et niveaux d'eau du domaine à plus faible résolution et de les interpoler sur les cellules du sous-domaine à plus haute résolution. Lors de cette étape, une attention particulière doit être apportée à la géométrie de chacune des grilles afin que les domaines et sous-domaines soient compatibles. Ces travaux sont répétés, en modifiant légèrement la géométrie, jusqu'à ce que le modèle soit numériquement stable. C'est-à-dire que le simulateur peut produire de longues simulations, disons une année, sans être arrêté par une instabilité numérique du simulateur. Pour ne donner qu'un exemple, la position de la frontière est un de ces aspects géométriques. Dans le cas où la géométrie de la frontière à haute résolution contiendrait une baie qui n'est pas représenté dans la bathymétrie à faible résolution, cette discontinuité pourrait causer des instabilités. Il faudra alors faire le choix de retirer la baie de la grille à haute résolution ou de modifier la position de la frontière. Chacune des frontières ouvertes doit être vérifiée individuellement.

4.2.2 Schème couvrant/découvrant : prise en compte des régions où les marées ont de fortes amplitudes et les eaux sont peu profondes.

Le marnage des marées dans la région de la baie d'Ungava est très important (plus de 16 mètres) (Pêches et Océans Canada, <http://www.waterlevels.gc.ca/fra/info/faq>). La glace de rive qui s'y forme est influencée par l'action des marées et la présence d'estrans d'une superficie importante. Afin de pouvoir tenir compte de l'absence d'eau sur les estrans à marée basse, nous avons développé un algorithme qui permet d'assécher certaines cellules du modèle lorsque le niveau d'eau de ces cellules diminue en deçà d'un niveau seuil. Ainsi, lors des simulations océaniques, le modèle est en mesure de considérer le fait que la glace de rive qui se forme peut se déposer sur des estrans, phénomène et contexte qui n'étaient pas pris en compte jusqu'à maintenant.

A. Description de l'algorithme

L'état au repos de notre modèle océanique régionale (MOR) est le niveau moyen des mers (NMM). C'est à partir de ce niveau que la grille est déterminée : chaque cellule de la grille est définie comme étant une cellule d'eau ou une cellule de terre, et cet attribut est fixe pour la durée de la simulation. Dans un environnement où les variations de niveau d'eau causées par les marées sont importantes, comme c'est le cas à Aupaluk, des zones de terre peuvent s'inonder et des

zones normalement recouvertes par les eaux peuvent s'assécher, selon les marées. Dans le simulateur MOR-HB, cette situation pourrait se traduire par l'apparition ou la disparition de cellules d'eau. Initialement, cela n'était pas possible. Pour permettre ce phénomène, la stratégie adoptée est semblable à celle du modèle ROMS (Regional Ocean Modeling System) (Warner et al 2013) : une certaine quantité d'eau est toujours conservée dans chacune des cellules, cette quantité définissant l'épaisseur d'eau minimale. Lorsque cette épaisseur minimale est atteinte, tous les flux de masse qui entraineraient une diminution supplémentaire du niveau d'eau (courants sortants) sont mis à zéro. Par contre, les flux de masses permettant de remplir cette même cellule sont conservés (courants entrants). Cet algorithme peut être comparé à une rizière en terrasse à flanc de montagne (Figure 14): chaque palier retient un minimum d'eau, mais une montée des eaux pourrait inonder successivement chaque palier, les uns après les autres.



Figure 14: Rizières en terrasse: Longji, Chine. (<https://viago.ca/top-10-des-plus-belles-cultures-en-terrasses/>)

4.3 Simulateur de glace : mise à jour du simulateur de glace de mer (CICE) et ajout de processus de glace de rive (Étape 3)

Cette section traite de deux sujets : la mise à jour du simulateur de glace de mer et l'ajout de processus lié à la glace de rive. La mise à jour de la version initiale de CICE à la cinquième version (CICE5) permet une meilleure stabilité numérique du modèle de glace à haute résolution (400 m), ce qui est essentielle dans le cadre de ce projet de recherche. Par expérience, nous savons que la version initiale de CICE n'était pas stable à long terme. De plus, l'ajout des interactions entre la glace et le fond océanique s'est avéré une amélioration des résultats de simulateur de glace

(Lemieux et coll., 2016), nous l'avons donc également ajouté à notre simulateur à haute résolution (400 m).

4.3.1 Couplage du simulateur de glace CICE5

La mise à jour du simulateur de glace de la version initiale (CICE) du simulateur à la cinquième version (CICE5) fut le défi technique qui a été le plus exigeant dans l'ensemble du projet. Les différences entre la version précédente du modèle de glace et CICE5 étaient telles que nous avons dû traiter CICE5 comme un tout nouveau modèle de glace. En effet, les calculs pour produire de la nouvelle glace, le transport de la glace et les flux échangés entre le modèle océanique (MOR) et le modèle de glace (CICE5) n'étaient plus les mêmes. Par la suite, plusieurs paramètres du modèle de glaces tels que les coefficients de frottement entre la glace et l'eau et celui entre la glace et l'air ont été testés pour trouver ceux qui se rapprochaient de ceux trouvés dans la littérature et qui reproduisaient le mieux les observations. Le comportement du nouveau modèle de glace a également nécessité de refaire les grilles en zone peu profonde. Chacune des cellules où il n'y avait qu'une cellule sur la verticale a dû être ajustée à deux couches afin de permettre une circulation des masses d'eau. Sans cette circulation, les quantités de sel associées à la formation de la glace pouvaient s'accumuler et rendaient le modèle océanique numérique instable.

Malgré tout, cette somme de travail s'est avérée très profitable, car les résultats que nous obtenons avec le nouveau modèle de glace (CICE5) sont meilleurs que ceux du modèle précédemment (CICE), et la stabilité du modèle de glace est maintenant satisfaisante à haute résolution (400m).

4.3.2 Ajout de phénomènes physiques afin de simuler l'effet d'attachement et de formation de la glace de rive

Le passage d'une résolution de 10 km à 2 km a immédiatement changé le comportement des glaces près des côtes. En effet, l'augmentation de la finesse de la résolution a permis l'ajout de baies et de bras de mer, créant ainsi des points d'ancrage pour la glace de mer, formant ainsi de la glace de rive. Sans même ajouter de nouveaux processus au modèle, tels que l'interaction avec le fond marin, des structures de glace de rive sont apparues et ont pu être validées à l'aide d'observations (voir section 5.3).

Par la suite, nous avons ajouté la possibilité aux glaces de mer de s'ancrer sur le fond marin. Selon la distribution statistique de la bathymétrie et celle de la glace, nous évaluons une possibilité de contact entre le fond marin et la glace. En combinant, la concentration de glace et cette probabilité, nous déterminons la surface de contact. Un frottement entre la glace et le fond peut alors être calculé. Ce frottement est comparé aux autres stress imposés sur la glace, soit par les courants, les vents ou les glaces environnantes. Cette glace sera libérée quand ces stress seront supérieurs à celui entre la glace et le fond marin. Un autre mécanisme permettant de remettre des glaces en mouvement est d'augmenter le niveau d'eau, par les marées par exemple. Une

augmentation du niveau diminuera la possibilité de contact entre la glace et le fond, ce qui permettra, éventuellement, de libérer la glace et la remettre en mouvement.

4.4 Simulation réaliste : validation des simulateurs (Étape 4)

À partir de cette étape, nous avons tous les outils nécessaires pour faire nos simulations. Cependant, ces simulateurs doivent être testés, cette étape essentielle est la validation de nos modèles. Avant de produire des simulations pour le climat futur qui ne pourront être validées, nous faisons des simulations réalistes qui peuvent être comparées à des observations. Ce n'est qu'une fois que ces simulations auront reproduit des observations que nous pourrions avoir confiance en ces résultats et produire des simulations climatiques.

4.4.1 Incertitudes liées à la validité des simulations à fine échelle résultantes du projet CC05.1

Avant de parler de la validation, évaluons les sources d'incertitude.

- 1 Dans un premier temps, il y a les erreurs liées aux simulateurs numériques. Ces modèles ne sont pas parfaits, c'est-à-dire qu'ils ne représentent pas parfaitement la réalité. Certaines approximations et hypothèses sont nécessaires pour obtenir des solutions numériques aux différents systèmes d'équations qui représentent l'océan, la glace et l'atmosphère. Par exemple, certains termes des équations peuvent être simplifiés ou retirés s'ils sont jugés négligeables. Cette première source d'incertitudes peut être quantifiée en validant les résultats à l'aide d'observations. En effet, en comparant ces observations (température, densité, vitesses, etc.) aux résultats d'une simulation forcée par une atmosphère, des rivières et des conditions frontière (niveau d'eau, salinité et température de l'eau) réalistes, nous pouvons déterminer la fiabilité et la précision du simulateur. Pour le simulateur atmosphérique climatique (MRCC5), ce travail est fait par OURANOS. Pour les simulateurs de glace et océanique, ce travail est fait dans le cadre de ce projet.
- 2 La seconde source d'incertitude est liée aux caractères chaotiques de nos environnements atmosphériques et océaniques. L'état de l'océan et de l'atmosphère, tel qu'observé, ne représente qu'un des états possibles de notre environnement. Par exemple, si la terre revenait dans le temps, disons deux semaines, et que nous recommençons cette période en introduisant une légère perturbation, de la température par exemple, la météorologie de la planète en serait modifiée. Cependant, l'ensemble des états possibles est contraint à l'intérieur de certaines limites, ces limites représentent la variabilité naturelle du système. C'est ici que le nombre de simulations climatiques utilisées prend toute son importance, plus le nombre est grand et meilleure sera la représentation de la variabilité naturelle et donc la gamme des états futurs de notre environnement en fonction des changements climatiques.

Il existe bien d'autres sources d'incertitudes sur les résultats, telles que : celles liées à la mesure des forçages et observations, les schémas numériques pour résoudre les équations et les erreurs

liées à la représentation numérique (par ex., la troncation). Cependant, comme dans le premier point, ces incertitudes sont également jugées acceptables, ou pas, lors de la validation des simulations témoins. Nous qualifions de témoins, les simulations qui sont forcées à partir de données réalistes ou observées.

4.4.2 Validation des simulations réalistes

Les simulations réalistes sont des simulations qui utilisent des données réalistes pour produire la condition initiale (salinité et température) et les conditions aux frontières (ouvert : salinité, température, niveau d'eau; atmosphérique : température de l'air, vent, précipitation et nébulosité). Cet ensemble de données constitue les « forçages du modèle ». Nous n'avons pas assez d'observations pour tous ces forçages. Dans ces conditions, nous utilisons les meilleures sources de données disponibles. Par exemple, pour les forçages atmosphériques, nous utilisons les résultats des meilleurs modèles numériques disponibles pour notre région, dans notre cas, ce sont les résultats du modèle GEM du centre météorologique canadien (CMC). Et comme nous avons mentionné précédemment, l'ensemble de ces forçages du modèle produiront une solution unique et cette solution devrait être la reproduction de la réalité. Si c'est le cas, cette simulation est validée.

Nous devons valider toutes les échelles simulées. Même si elles font partie de la méthodologie, ces simulations sont également des résultats produits dans le cadre du projet de recherche. Ils seront donc présentés dans la section des résultats (section 5).

Le Tableau 1 présente l'ensemble des forçages utilisé pour les simulations réalistes. L'ensemble des forçages atmosphériques, pour toutes les résolutions, provient des résultats des simulations de GEM produites au CMC. Les débits de rivière proviennent de la base de données HYDAT (<http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/hydrometrics/www>) et ce, également pour toutes les résolutions. Pour les forçages océaniques, seulement la simulation à 10 km est forcée à partir d'observation. Les conditions aux frontières de salinité et de température proviennent d'une climatologie mensuelle des observations faite à l'embouche des détroits d'Hudson et de Fury & Hecla. Les niveaux d'eau sont obtenus à partir d'analyse harmonique produite à l'aide des observations disponibles. Pour les sous-domaines, les forçages océaniques proviennent des simulations à plus grande échelle. Donc les simulations 10 km de résolution produisent les forçages océaniques pour les simulations à 2 km de résolution, de la même façon, les résultats des simulations à 2km de résolution produisent les forçages océaniques à 400 m de résolution.

Tableau 1: Source et type de données des forçages des simulateurs réalistes Forçages et résolution de la simulation	Variables	Sources	Type
Forçages atmosphériques			
10 km, 2 km et 400 m	Température de l'air	GEM (CMC)	Modèle validé
10 km, 2 km et 400 m	Précipitation	GEM (CMC)	Modèle validé

10 km, 2 km et 400 m	Couvert nuageux	GEM (CMC)	Modèle validé
10 km, 2 km et 400 m	Vents	GEM (CMC)	Modèle validé
Forçages océaniques			
10 km	Profil de salinité et température	MEDS	Climato. mensuelle (observations)
10 km	Niveau d'Eau	MPO	Analyse harmonique
2 km	Profil de salinité et température	ISMER	Simulation à 10 km
2 km	Niveau d'Eau	ISMER	Simulation à 10 km
400 m	Profil de salinité et température	ISMER	Simulation à 2 km
400 m	Niveau d'Eau	ISMER	Simulation à 2 km
Forçages de rivière			
10 km, 2 km et 400 m	Débit de rivière	HYDAT	observations

4.5 Simulation climatique (Étape 5)

Une fois que les simulateurs sont validés et que nous avons confiance en ces résultats. Nous pouvons produire les simulations climatiques. Comme pour les simulations réalistes, nous devons appliquer une cascade de simulation partant des plus grandes échelles (10 km de résolution) vers les plus fines (2km et 400 m). Comme précédent, cette étape est nécessaire, car les simulations à 10 km servent à produire les forçages pour les simulations à 2 km, et celle de 2 km pour les forçages de 400 m. Finalement, nous avons besoin de forçages atmosphériques. À l'instar des simulations réalistes, nous devons choisir les meilleurs forçages disponibles.

Dans le cadre de ce projet de recherche, nous avons choisi les simulations du Consortium OURANOS. Ces simulations sont détaillées dans la section suivante. Le Tableau 2 présente l'ensemble des forçages utilisés pour les simulations climatiques.

Tableau 2: Source et type de données des forçages des simulateurs climatiques Forçages et résolution de la simulation	Variables	Sources	Type
Forçages atmosphériques			
10 km, 2 km et 400 m	Température de l'air	MRCC 5 (Ouranos)	Modèle validé
10 km, 2 km et 400 m	Précipitation	MRCC 5 (Ouranos)	Modèle validé
10 km, 2 km et 400 m	Couvert nuageux	MRCC 5 (Ouranos)	Modèle validé
10 km, 2 km et 400 m	Vents	MRCC 5 (Ouranos)	Modèle validé
Forçages océaniques			
10 km	Profil de salinité et température	MEDS	Climatologie (observations)
10 km	Niveau d'Eau	MPO	Analyse harmonique
2 km	Profil de salinité et température	ISMER	Simulation à 10 km

2 km	Niveau d'Eau	ISMER	Simulation à 10 km
400 m	Profil de salinité et température	ISMER	Simulation à 2 km
400 m	Niveau d'Eau	ISMER	Simulation à 2 km
Forçages de rivière			
10 km, 2 km et 400 m	Débit de rivière	HYDAT	Climatologie (observations)

4.5.1 Forçages atmosphériques climatiques

Afin d'effectuer des projections des conditions de glaces sur un horizon 2055 (2040-2070), les projections climatiques futures, ici appelées « forçages atmosphériques » sont requis. Ces simulations climatiques sont produites par le Consortium OURANOS. Lors du démarrage du présent projet, 5 nouvelles simulations étaient disponibles. Ces simulations sont nommées à l'aide d'acronymes. Les acronymes commençant par BB référeront à ces nouveaux ensembles de données pour la suite de ce projet. Ces forçages couvrent les périodes 1950-2005 (F,H,J,K,N) et 2005-2100 (G,I,K,M,O). Une comparaison a été effectuée entre les résultats des simulations, soit lorsque le modèle MOR-HB est forcé par les forçages BBF, BBH, BBJ, BBk, BBN et lorsqu'il est forcé par GEM (Global Environmental Multiscale), notre simulation témoin. Ces comparaisons ont permis conclure qu'il n'est pas nécessaire d'appliquer une correction de biais à ces ensembles de données.

Avec les deux forçages atmosphériques climatiques du projet précédent, 7 jeux de données atmosphériques sont disponibles. Ces forçages atmosphériques proviennent des résultats de 7 simulations climatiques différentes générées par :

- La version 4.2.3 du Modèle Régional Climatique canadien (MRCC) (simulation **AEV**), piloté par le membre 5 du CGCM3.1/t47 suivant le scénario SRES A2 du GIEC;
- La version 4.2.3 du MRCC (simulation **AHJ**), pilotée ECHAM5 membre #3 1961 à 2100, SRES-A2, archivée aux 3 heures.
- La version 3.3.3.1 du MRCC5 (simulation **BBFG**), piloté par le membre 1 du modèle global CanESM2 suivant le scénario RCP 8.5 du GIEC.
- La version 3.3.3.1 du MRCC5 (simulation **BBHI**), piloté par le membre 2 du modèle global CanESM2 suivant le scénario RCP 8.5 du GIEC.
- La version 3.3.3.1 du MRCC5 (simulation **BBJK**), piloté par le membre 3 du modèle global CanESM2 suivant le scénario RCP 8.5 du GIEC.
- La version 3.3.3.1 du MRCC5 (simulation **BBLM**), piloté par le membre 4 du modèle global CanESM2 suivant le scénario RCP 8.5 du GIEC.
- La version 3.3.3.1 du MRCC5 (simulation **BBNO**), piloté par le membre 5 du modèle global CanESM2 suivant le scénario RCP 8.5 du GIEC.

Ce sont les séries de 3 ou 4 lettres (par exemple : AHJ et BBFF) qui seront utilisées pour identifier les forçages atmosphériques dans le reste du document.

5 Résultats

Cette section présente les résultats obtenus dans ce projet de recherche.

5.1 Simulations réalisées dans le cadre du projet de recherche

Cette section traite des simulations réalisées dans le cadre de ce projet de recherche. Les résultats de chacune des simulations n'ont pas la même utilité :

- Des simulations ont été réalisées afin de servir de base de données pour générer les forçages océaniques pour des sous-domaines (10 km vers 2km et 2km vers 400m de résolution);
- Certaines de ces simulations ont été réalisées dans le but de valider les différentes résolutions du modèle (10 km, 2km et 400 m);
- Et, finalement, des simulations ont été produites comme projections des conditions de glace aux abords des infrastructures pour les sites choisis.

5.2 Résultats des simulations à 10 km de résolution : simulations réalistes et climatiques

Dans un premier temps, nous avons produit une simulation réaliste de 2001 à 2017 à une résolution horizontale de 10 km. Cette simulation a servi à valider le simulateur MOR-HB.

5.2.1 Validation de MOR-HB 10 km de résolution

A. Volume et concentration de glace

En ce qui a trait à la concentration de glace de mer, le couplage MOR-CICE5 produit des résultats (Figure 15a) qui concordent mieux aux observations que ceux obtenus lorsque le modèle océanique est couplé avec CICE1, la version initiale de CICE. En effet, la concentration moyenne de glace sur l'ensemble du domaine, lorsque la couverture est presque totale, est toujours plus élevée lorsque le simulateur est couplé avec CICE5, ce qui reproduit mieux les observations obtenues du Service Canadien des Glaces (SCG). De plus, la prise et la fonte des glaces sont aussi mieux représentées par MOR-HB couplé à CICE5 (Figure 15a). Le volume total de glace est plus près des observations avec CICE1 (Figure 15b). Toutefois, les observations d'épaisseur de glace utilisées pour obtenir le volume total ont une fiabilité moindre que les observations de concentration de glace.

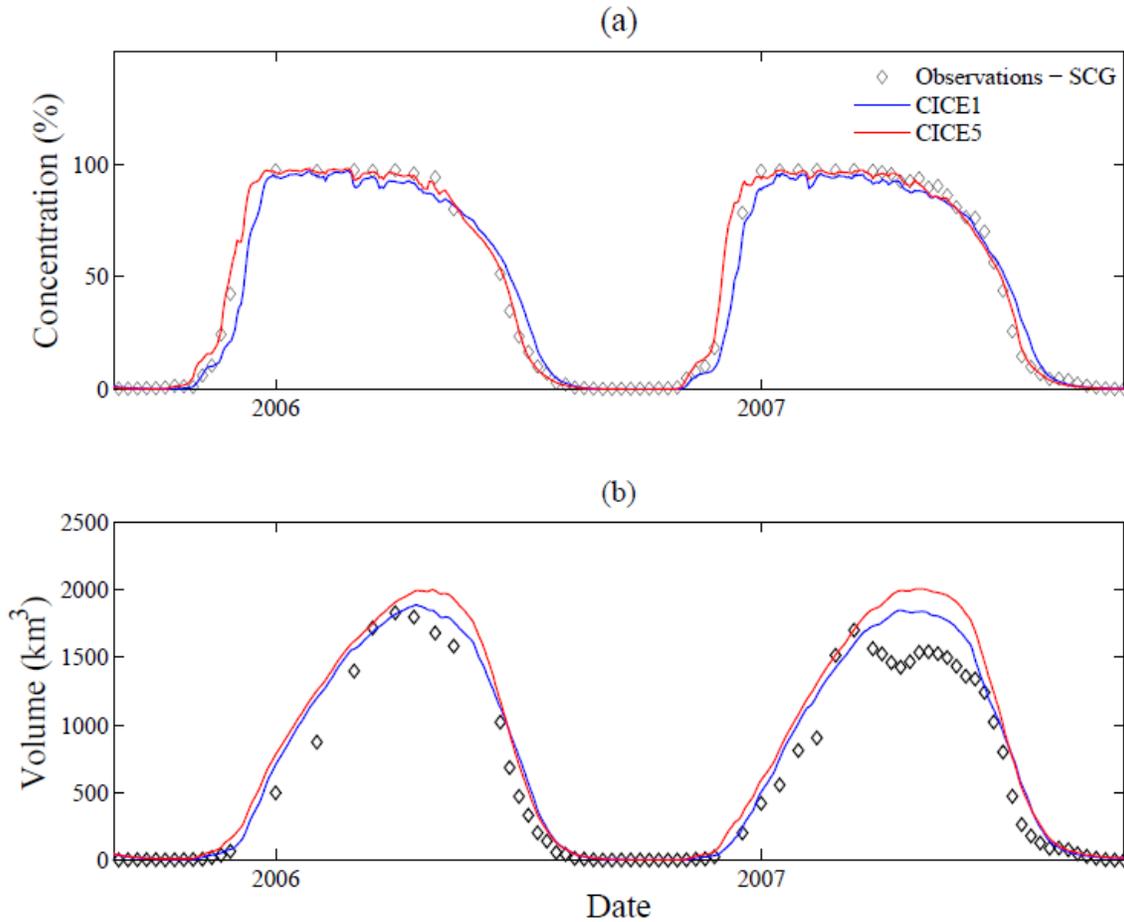


Figure 15 - Comparaison des résultats du modèle avec les observations du Service Canadien des Glaces (SCG) pour la (a) concentration moyenne de glace et (b) le volume total de glace sur l'ensemble des cellules mouillées du domaine. Le trait noir correspond aux observations, le trait rouge correspond aux résultats du modèle lorsqu'il est couplé avec CICE5 et le trait bleu lorsqu'il est couplé avec CICE1. La dernière catégorie de glace du SCG est fixée à 170 cm.

B. Température de l'eau - thermographes

La Figure 16 montre la comparaison des résultats du modèle MOR-HB couplé à CICE5 avec 14 séries temporelles de température pour l'année 2007 obtenues du réseau de thermographes côtiers de Pêches et Océans Canada. La première sous-figure en haut à gauche représente une carte de la Baie d'Hudson (BH). Les positions des stations présentées dans la figure y sont représentées par un numéro de couleur. Les axes sont mesurés en indices de grille du simulateur. Le titre de cette sous-figure représente l'année des résultats présentés dans la figure. La sous-figure suivante décrit le reste des sous-figures. Prenons, par exemple, la quatrième sous-figure de la première rangée de la Figure 16. On y voit, en bleu, la série temporelle de la température de l'eau obtenue du thermographe situé à la station 2, de janvier à avril 2007. Ce thermographe était situé à une profondeur 189.65 m. La ligne rouge représente la température modélisée à cet endroit, pour la même période. L'erreur moyenne du simulateur est de 0.06 °C en dessous de la

température observée. La déviation standard de l'erreur est de 0.06 °C. La distance entre le thermographe et le centre de la cellule la plus proche est de 0.0 km. Finalement, cette sous-figure fait référence au fichier 25.dat. Cette information n'est pas nécessaire dans le cadre de ce rapport, mais peut se révéler utile pour des vérifications ultérieures.

Les comparaisons permettent de voir que le simulateur reproduit bien la température de l'eau sur l'ensemble des stations du réseau de thermographes. De plus, le réchauffement lié à l'arrivée du printemps est bien représenté, tant en synchronisation qu'en valeur absolue.

C. Niveaux d'eau

Sur la Figure 17, la première sous-figure présente le positionnement des stations marégraphiques. Sur la seconde sous-figure, la série temporelle des variations du niveau d'eau simulé pour la station de Churchill, du 2 juillet au 1^{er} août 2007, est en rouge. Les observations, pour la même période, sont en bleu. La déviation standard de l'erreur du simulateur est de 0.49 m (comparativement à 0.53 m pour MOR-CICE1 (St-Onge Drouin et Senneville, 2011)) et la distance entre le marégraphe et le centre de la cellule la plus proche du simulateur est de 0 km.

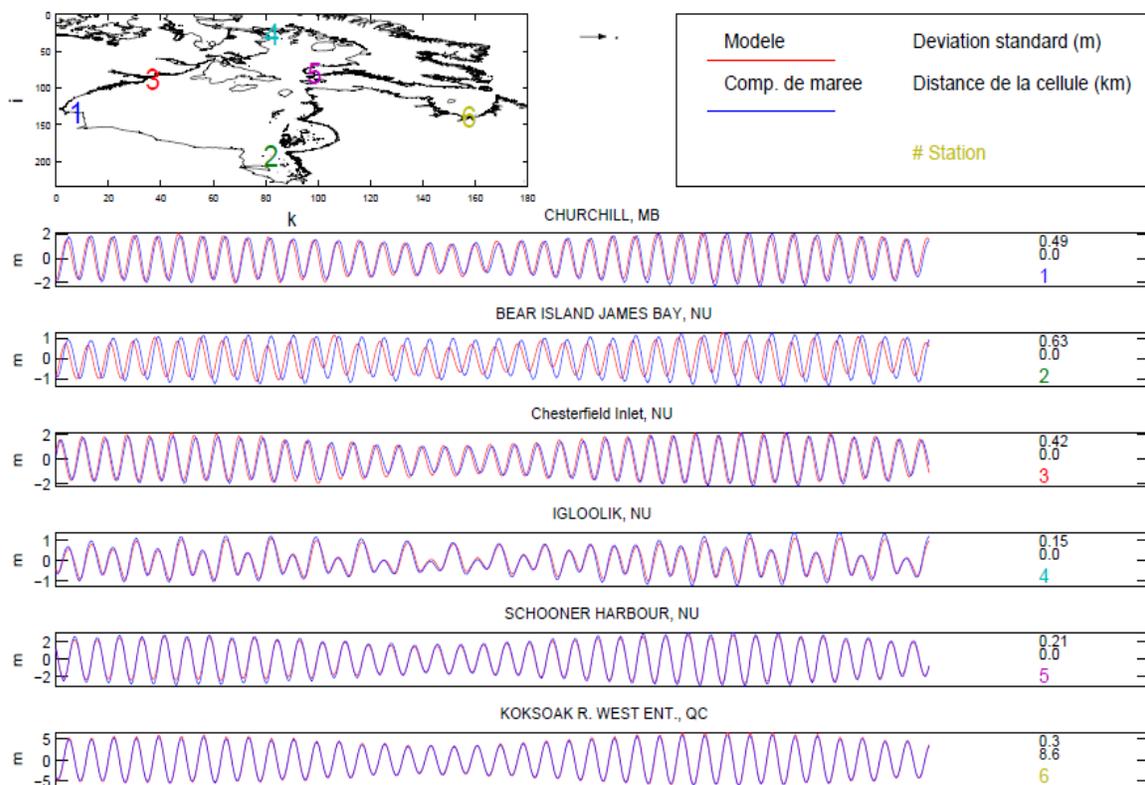


Figure 17 - Comparaison entre la variation du niveau d'eau du simulateur (en rouge) et la variation du niveau d'eau obtenu de reconstitutions harmoniques aux diverses stations (en bleu), représentées par un point rouge sur la carte à gauche.

La reconstitution harmonique du niveau d'eau à Bear Island, dans la Baie James, est celle qui diffère le plus du niveau d'eau simulé. Cela peut s'expliquer en partie par le fait que le niveau d'eau, à cet endroit, résulte de l'onde de marée qui est forcée à l'entrée du Détroit d'Hudson. La distance que l'onde doit parcourir est plus grande que, par exemple, pour les stations de Schooner

Harbour ou de Koksoak. Comme la distance parcourue par l'onde est plus grande, il y a une plus grande probabilité que des imperfections dans la bathymétrie altèrent la propagation de l'onde.

D. Profiles de salinité et température en fonction de la profondeur

Un profil de salinité et de température de l'eau en fonction de la profondeur est obtenu par un appareil appelé CTD (Conductivity Temperature Depth). Ce profil nous donne la salinité et la température entre la surface et le fond pour une position donnée. Les Figures 18 à 20, composées de 32 sous-figures, présentent la comparaison de salinité et de température du modèle MOR-CICE5 avec 32 profils CTD pour l'année 2006. La première sous-figure présente le positionnement des stations. La comparaison des profils CTD observés avec les sorties du modèle est présentée sur les sous-figures suivantes. Sur ces figures, la température est en noir et la salinité est en rouge. Les traits gras représentent les profils modélisés alors que les traits fins correspondent aux observations. Un numéro de couleur associé à chacune des sous-figures est reporté sur la carte.

Sur l'ensemble des sous-figures des Figures 18 à 20, on peut voir que le simulateur reproduit assez bien la stratification de la colonne d'eau. Les positions des thermoclines observées et simulées coïncident relativement bien. La salinité modélisée dans la partie inférieure de la colonne d'eau (de 250 à 370 m de profondeur) était plus faible que la salinité observée pour les stations dans le Détroit d'Hudson lorsque MOR-CICE1 était utilisé (St-Onge Drouin et Senneville, 2011, figure 3). Ce problème est réglé avec l'utilisation de MOR-CICE5. De plus, la température et la salinité de surface des stations de plusieurs stations reproduisent plus adéquatement les observations maintenant qu'avec l'utilisation de MOR-CICE1 (St-Onge Drouin et Senneville, 2011, figure 3).

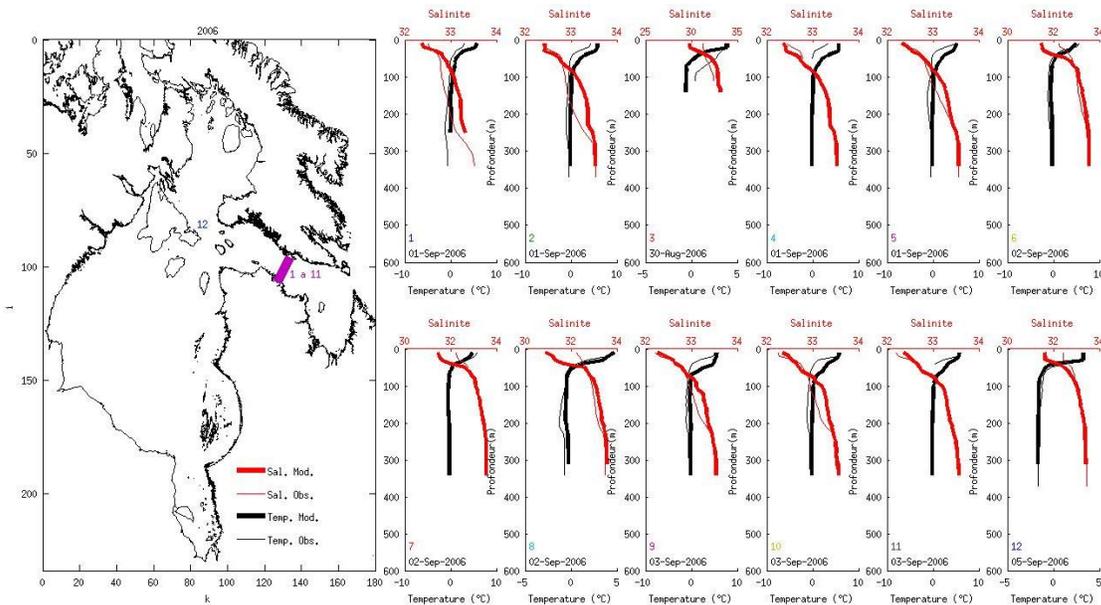


Figure 18 - Comparaison de profils de température (en noir) et de salinité (en rouge). Les traits gras représentent les résultats de la simulation et les traits fins sont les observations. Les positions des stations sont présentées sur la première sous-figure.

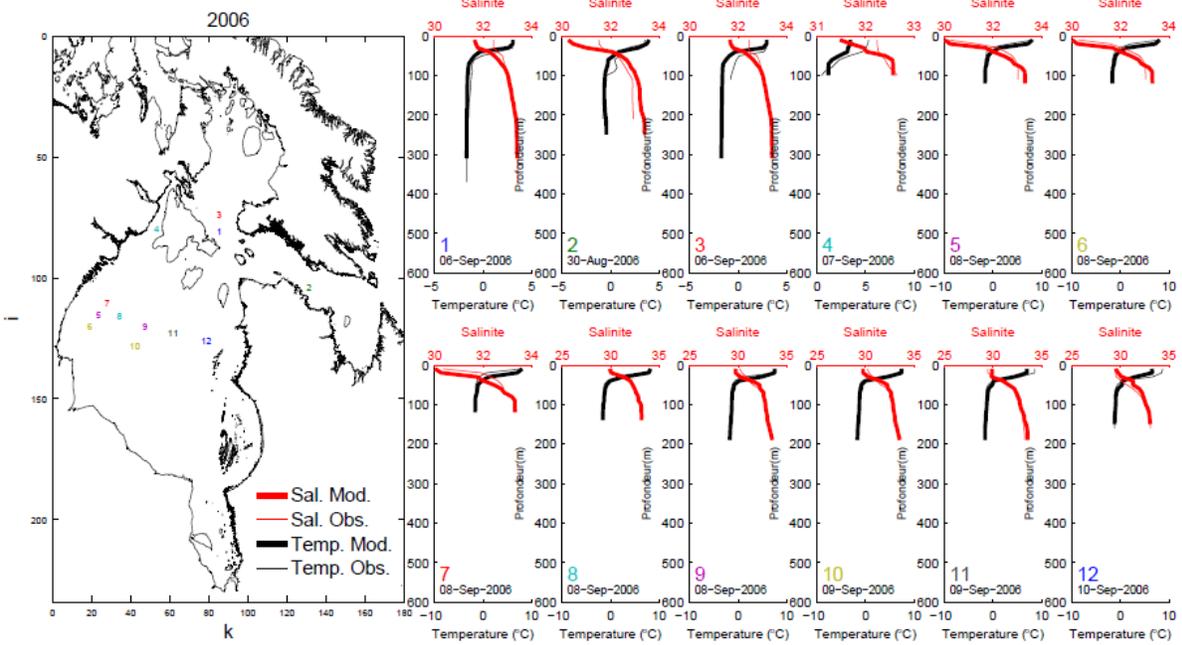


Figure 19 - Comparaison de profils de température (en noir) et de salinité (en rouge). Les traits gras représentent les résultats de la simulation et les traits fins sont les observations. Les positions des stations sont présentées sur la première sous-figure.

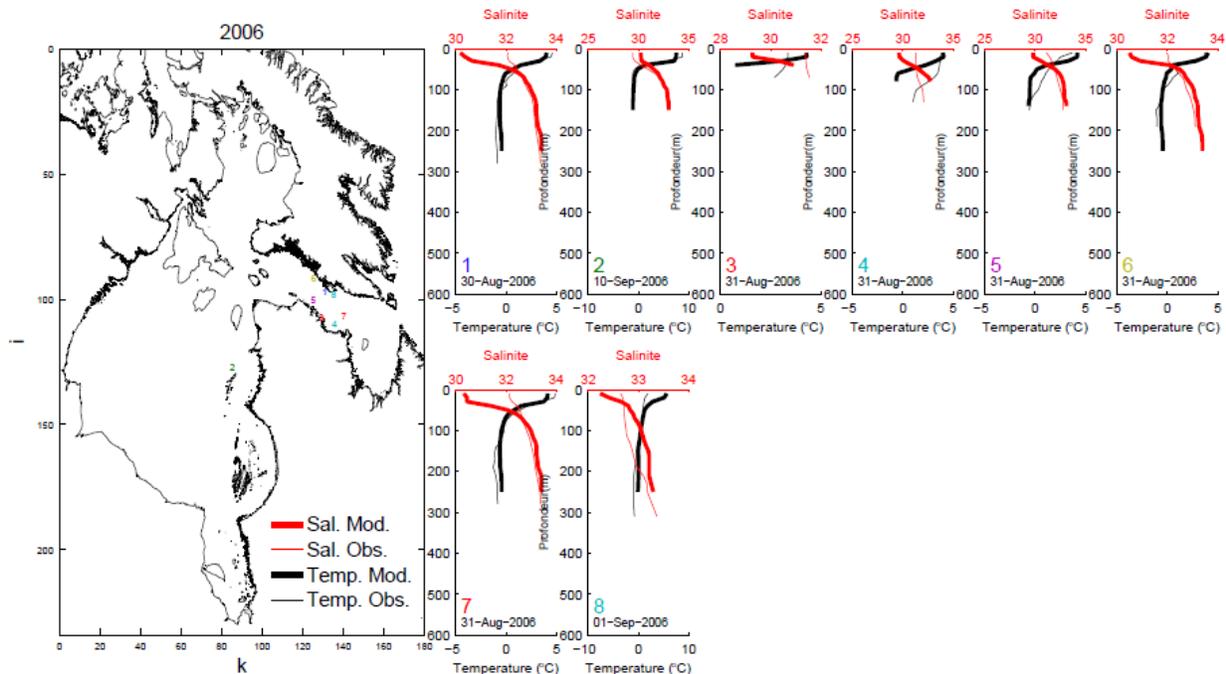


Figure 20 - Comparaison de profils de température (en noir) et de salinité (en rouge). Les traits gras représentent les résultats de la simulation et les traits fins sont les observations. Les positions des stations sont présentées sur la première sous-figure.

5.2.2 Simulations climatiques à 10 km de résolution

Le but premier des simulations climatiques à 10 km de résolution est de produire les forçages océaniques des simulations à 2km de résolution. À la demande du MTQ nous avons produit un atlas mensuel climatique des concentrations et épaisseurs de glace (Senneville, 2018).

Les simulations climatiques à 10 km de résolution horizontale représentent la meilleure source d'information pour produire le climat des glaces (concentration et épaisseur) pour la période 2040-2070. Dans ce projet de recherche, nous avons effectué les simulations avec sept climats du Consortium OURAO (AHJ, AEV, BCFG, BBHI, BBJK, BBLM, BBNO). Nous prétendons donc avoir une meilleure représentativité de la variabilité naturelle du climat que dans le projet précédent (Senneville et St-Onge Drouin, 2013) qui en comptait deux.

Sans prétendre avoir des résultats pour chacun des villages et sites d'intérêt, nous pouvons tout de même faire une analyse à l'échelle du Nunavik et tirer des conclusions à grande échelle pour certains sites. Par exemple les Figure 21, Figure 22 et Figure 23 démontrent bien que, selon nos simulations, l'ensemble des villages observeront une diminution de la concentration de glace moyenne de l'ordre de 30% pour le mois de mai. Nous pouvons également voir que les villages allant de Ivujivik à Kangiqsualajjuaq avaient, même dans le pire des évènements des glaces moyennes importantes au mois de mai (Figure 21, à droite en bas), et que la période 2040-2070

leur réserve des années où la côte sera, en moyenne, complètement dégagée de glace au mois de mai(Figure 22, à droite en bas).

Dans l'Atlas mensuel climatique de la concentration et épaisseur de glace au Nunavik, vous trouverez ces figures pour chaque mois, pour les variables de concentration de glace et d'épaisseur moyenne se glace.

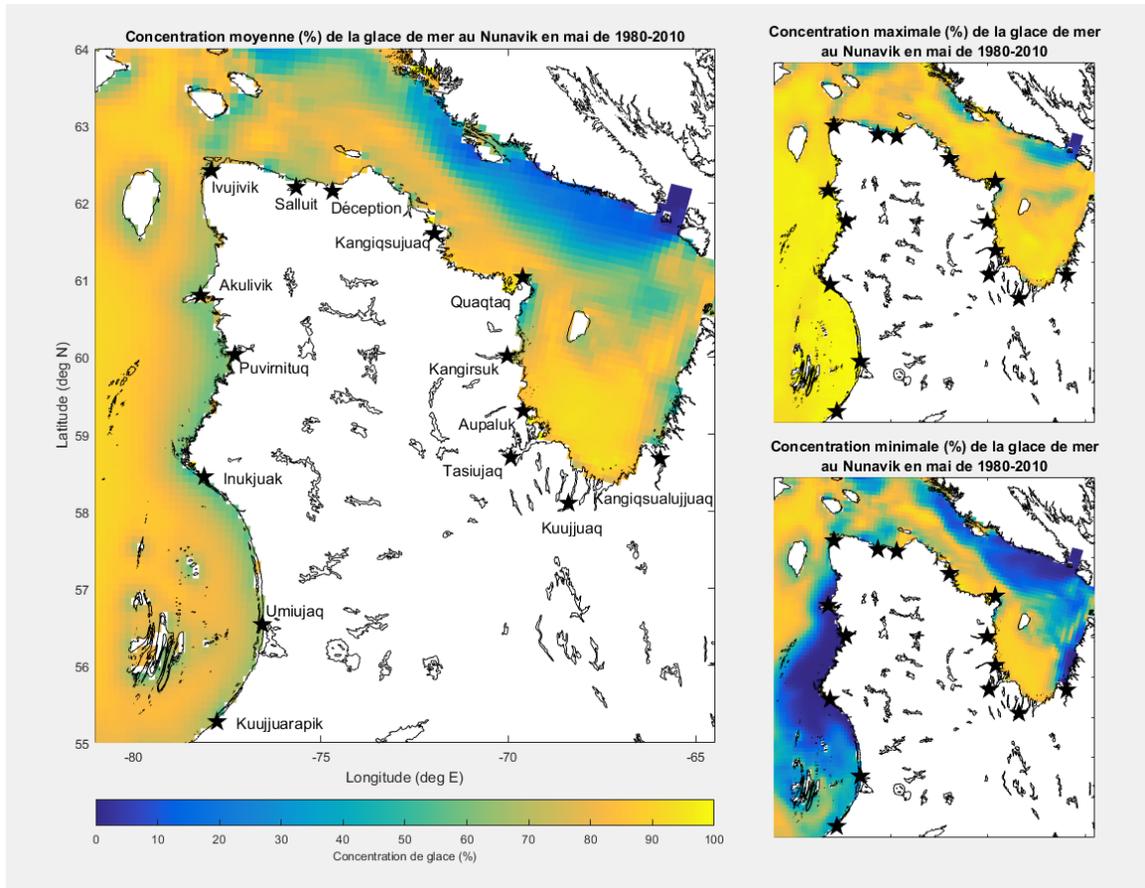


Figure 21: Concentration de glace du mois de mai pour le Nunavik pour la période de 1981-2010. À gauche est présenté la concentration moyenne des 7 simulations climatiques, à droite en haut l'évènement avec la concentration maximale et minimale en bas à droite.

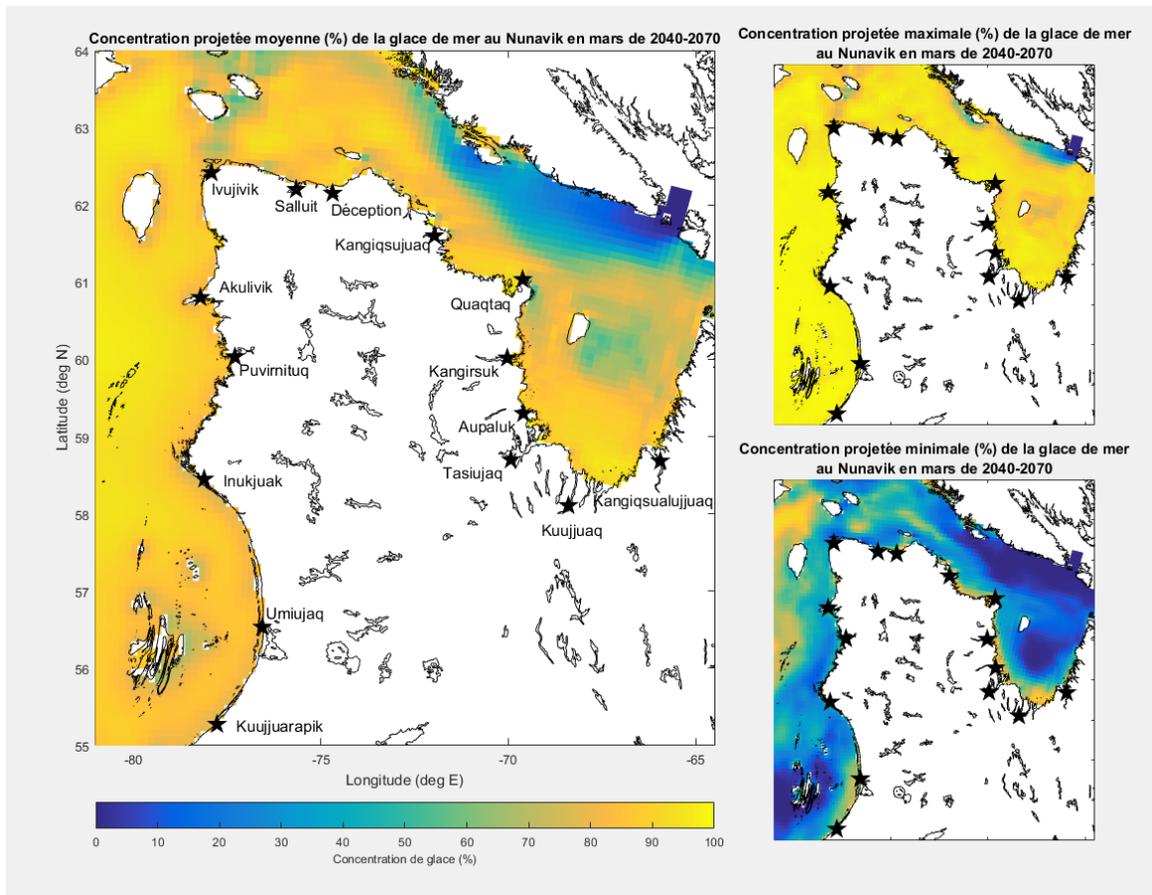


Figure 22: Concentration de glace du mois de mai pour le Nunavik pour la période de 2041-2070. À gauche est présenté la concentration moyenne des 7 simulations climatiques, à droit en haut l'évènement avec la concentration maximale et minimale en bas à droite.

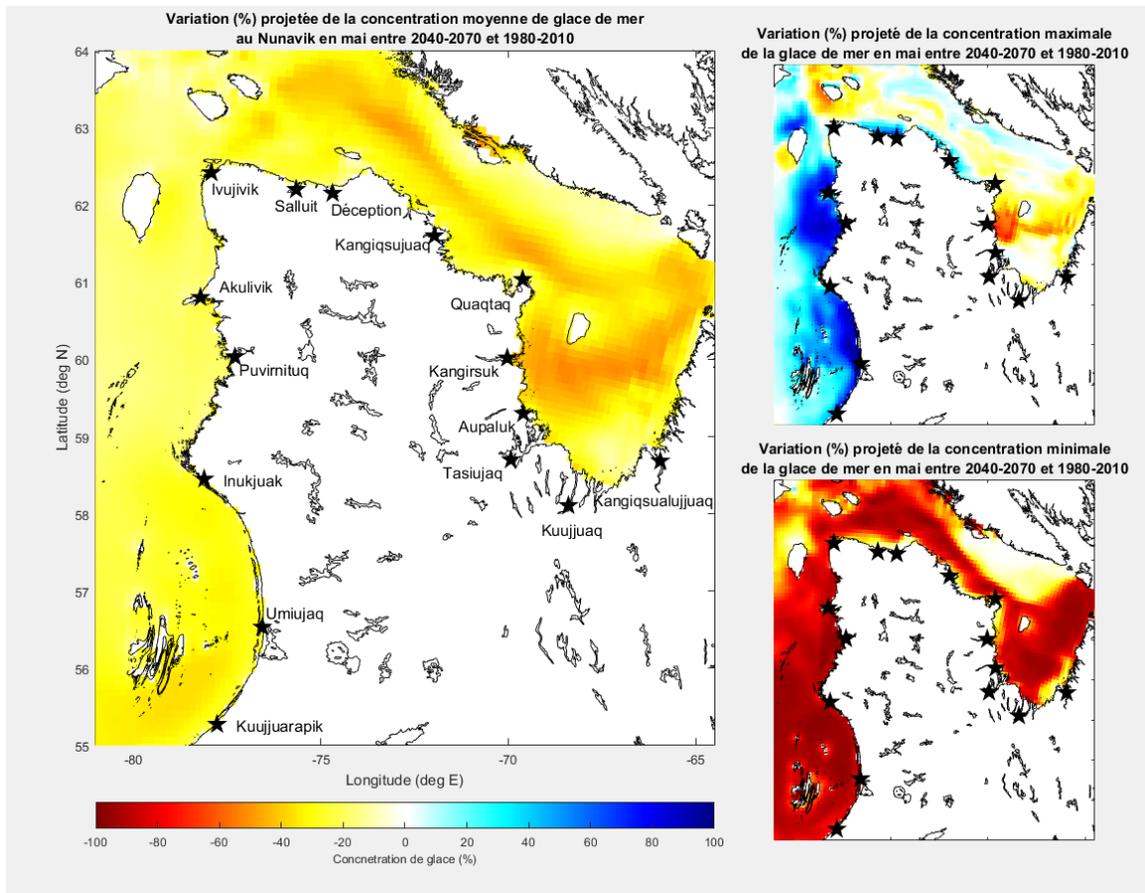


Figure 23: Variation de la concentration de glace du mois de mai pour le Nunavik entre le climat 2040-2070 et 1980-2010. À gauche est présenté la variation de concentration moyenne des 7 simulations climatiques, à droite en haut l'évènement avec la variation de concentration la plus positive et la plus négative en bas à droite.

Nous pouvons également faire la moyenne spatiale des climats mensuels de glace pour en extraire les tendances générales sur l'ensemble des côtes du Nunavik. De façon générale, les concentrations moyennes de seront plus faible de 10% à 40% pour le climat de 2040-2070, qu'il l'était de 1980-2010 avec des valeurs maximales durant l'englacement et la fonte des glaces, respectivement en décembre et juin. La variation climatique de l'épaisseur de glace moyenne de glace entre le futur (2040-2070) et le passé récent (1980-2010) croit de 15 cm en novembre pour atteindre une valeur maximale de 80 cm en juin, où l'épaisseur moyenne passe de 130 cm à 50 cm.

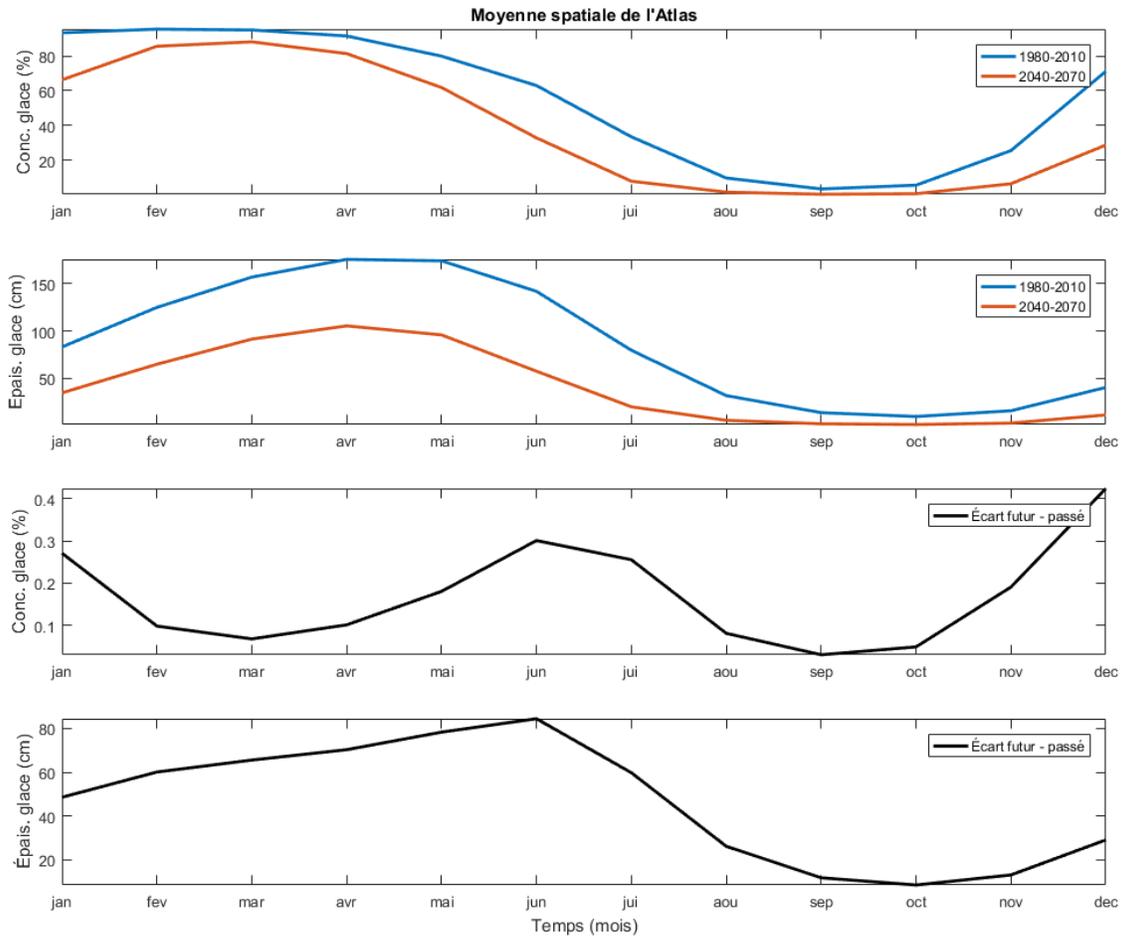


Figure 24: Moyenne spatiale de l'atlas mensuel des glaces au Nunavik. De haut en bas, nous voyons la concentration moyenne mensuelle pour la période 1980-2010 en bleu et le climat de la période 2040-2070 en orange. La seconde figure montre l'épaisseur moyenne de glace pour les périodes 1980-2010 (bleu) et 2040=2070 (orange). La troisième figure montre l'écart entre la concentration moyenne du futur – passé. Finalement, la quatrième figure montre l'écart de l'épaisseur moyenne du futur – passé.

La Figure 25 présente la plage de la variabilité naturelle du système entre deux simulations faite à partir de deux forçages d'OURANOS, soit simulations BBHI (La plus froide des 7 simulations) et BBLM (la plus chaude des 7 simulations). Nous voyons que les températures et les salinités moyennes du domaine océanique peuvent changer de près de 2 degrés et 0.3 PSU, respectivement. Les variations sur la concentration moyenne du domaine sont limitées (hormis les début et fin de saison de glace), mais l'impact sur l'épaisseur de glace est important, allant parfois du simple au double pour certaines saisons de glace (Figure 25).

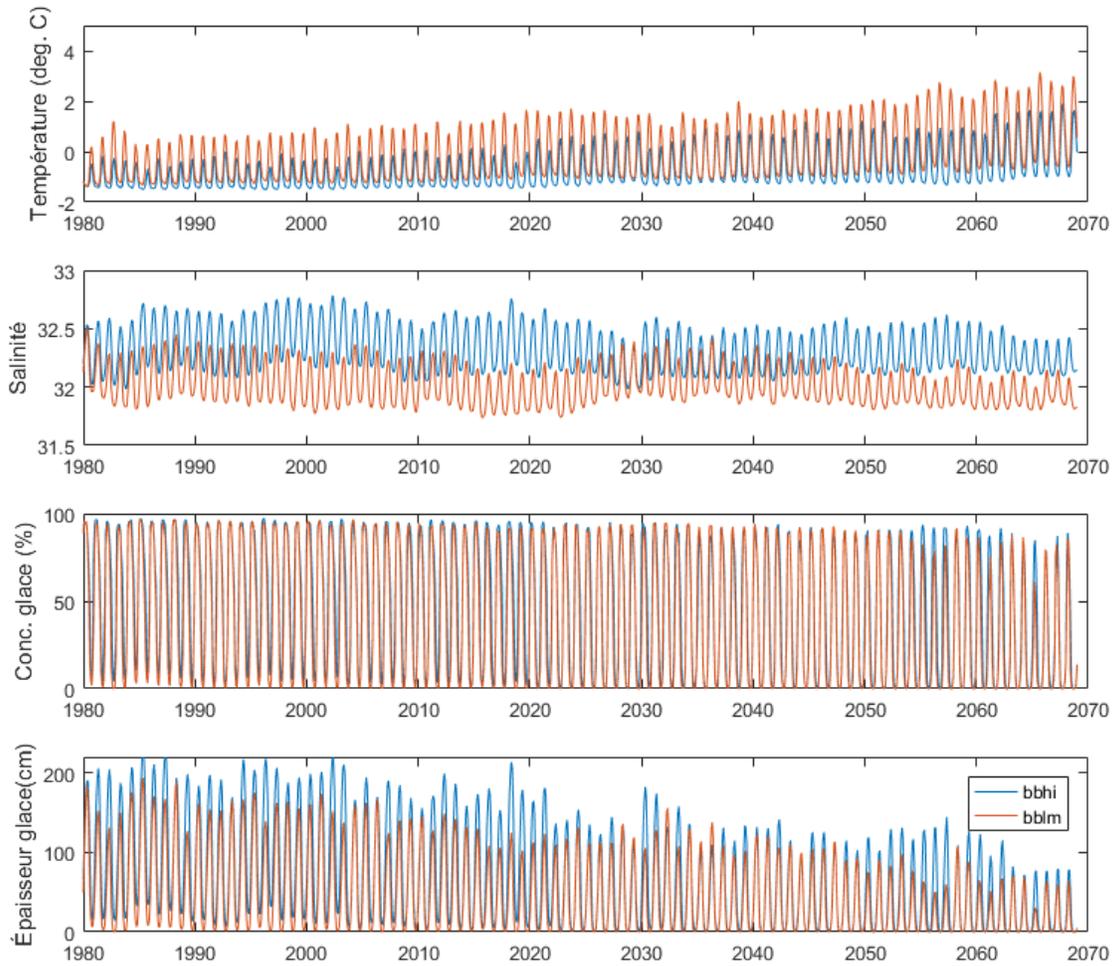


Figure 25: Comparaison des valeurs moyennes sur le domaine du système de la baie d'Hudson de la température et salinité de l'océan et de la concentration et épaisseur moyenne de la glace sur le domaine du système de la baie d'Hudson.

5.3 Résultats à 10 km et 2km montrant l'effet de l'augmentation de la résolution spatiale

En ce qui concerne les bénéfices d'augmenter la résolution spatiale, le premier signe encourageant est venu de la simulation de Baie Déception à 2 km de résolution. En effet, cette première simulation, à résolution intermédiaire (2km), avait permis, seulement en améliorant la résolution horizontale (de HB10km à DEC2km), d'obtenir de meilleures concordances avec les conditions observées.

Dans la zone de l'embouchure de la baie Déception, les données du Service canadien des glaces (Figure 26) indiquent une zone de glace de rive, identifiée par la zone de couleur grise. Cette zone de glace de rive n'est pas visible dans les résultats du modèle CICE5 à 10 km de résolution (Figure 27). Cependant, avec le même modèle de glace, mais une meilleure résolution spatiale (passant de 10 km à 2 km), incluant l'île Charles et la bathymétrie environnantes, il est possible de percevoir une zone de glaces qui demeure en place (Figure 28). Cette glace de rive est seulement produite par les effets de rhéologie de la glace et de la cote, car le module de frottement des glaces avec le fonds n'était pas encore inclus. Les résultats obtenus dans le cadre de cette première comparaison étaient très encourageants pour la suite des travaux.

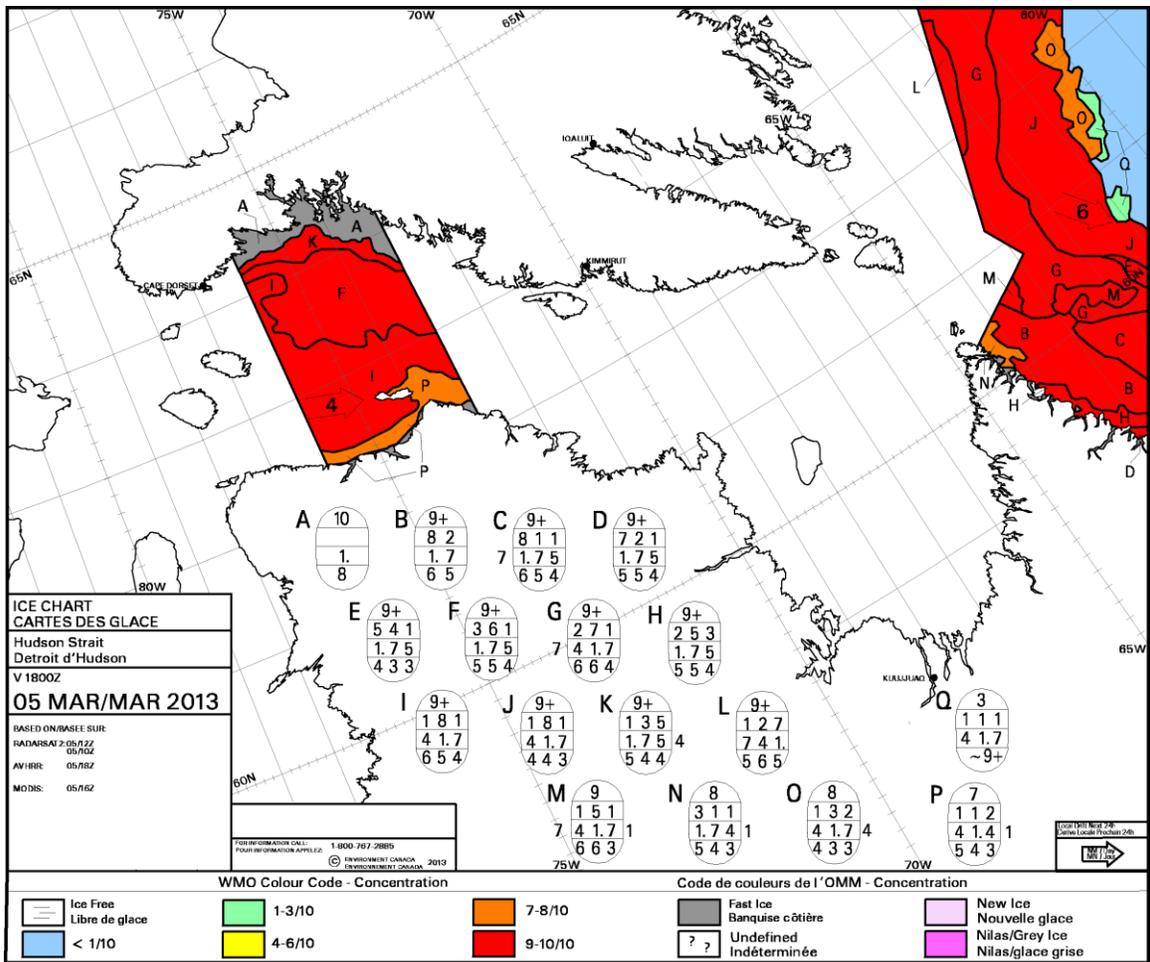


Figure 26: Carte de glace quotidienne du Service canadien des glaces obtenue à l'adresse suivante : <http://iceweb1.cis.ec.gc.ca/Archive/page1.xhtml>. Cette figure contient beaucoup d'informations, celles qui nous intéressent sont les zones: grise (banquise côtière), orange (concentration de glace de 7/10 et 8/10) et rouge (concentration de glace de 9/10 et +) au nord de la baie Déception le 5 mars 2013.

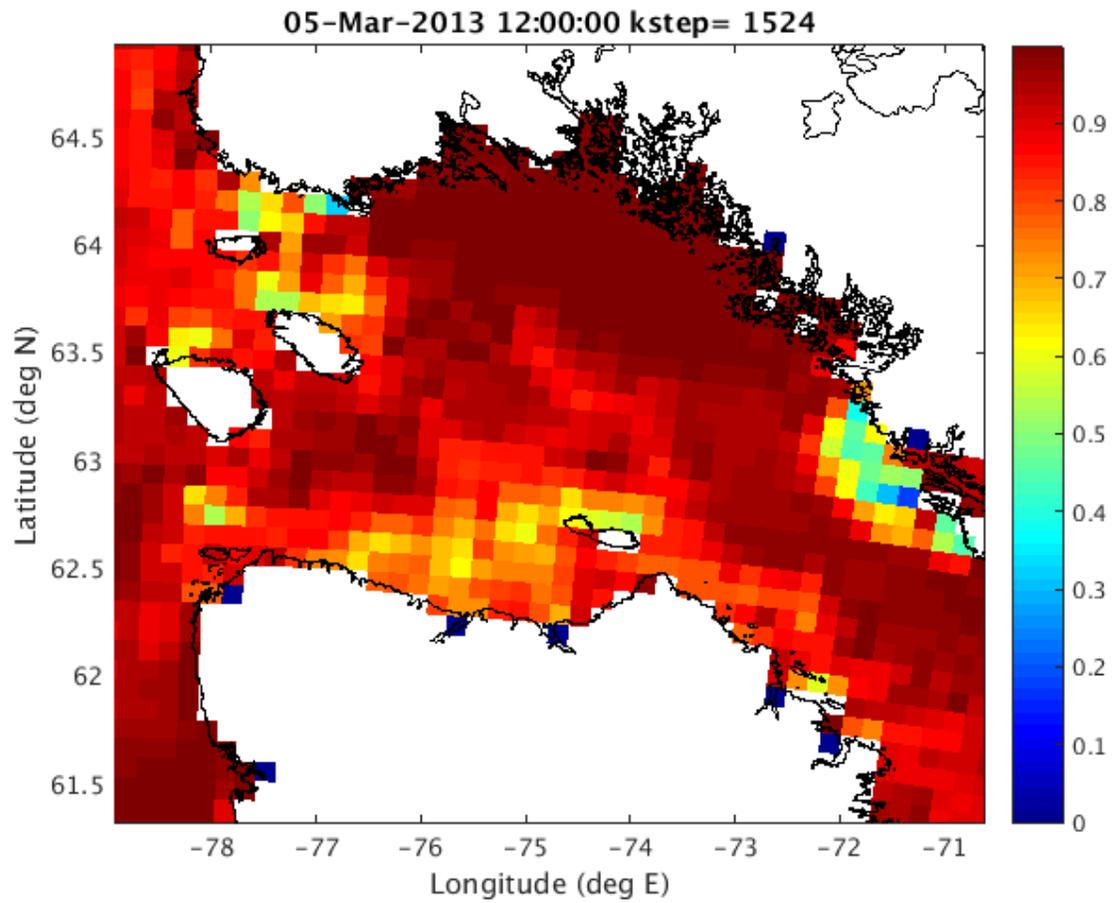


Figure 27: Résultats de la concentration de la glace de mer (fraction [0 à 1]) simulée par le modèle CICE5 à l'échelle de 10km (MOR-HB) pour le 5 mars 2013.

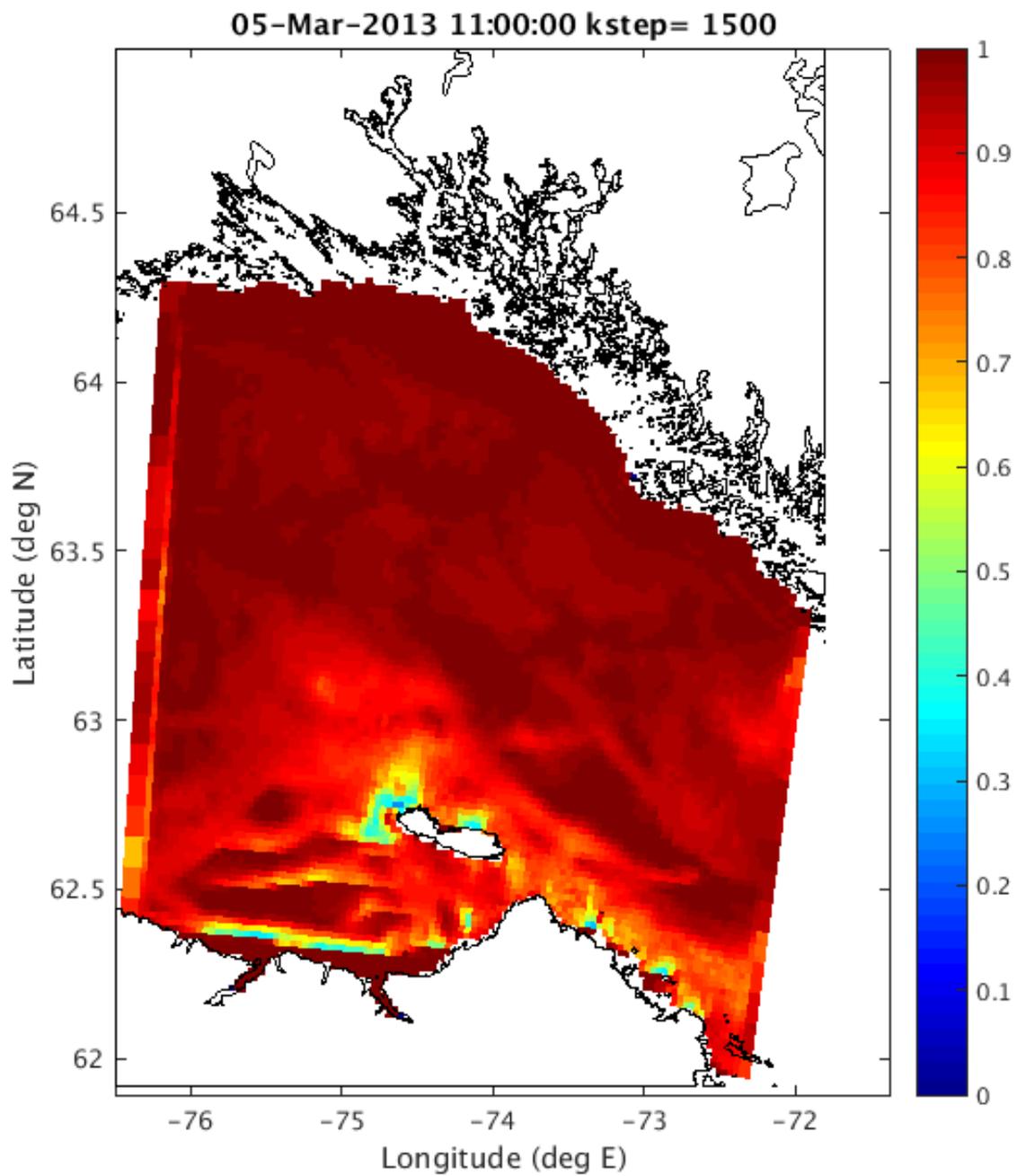


Figure 28: Résultats de la concentration de la glace de mer (fraction [0 à 1]) simulée par le modèle CICE5 à l'échelle de 2km (MOR-DEC) pour le 5 mars 2013.

5.4 Résultats des simulations à 2 km de résolution et 400 m de résolution

Pour chacun des domaines, nous avons comparé les observations provenant de l'INRS-ETE, soit les images satellitaires MODIS et Landsat et les photographies près des infrastructures maritimes pour la période d'englacement et de fonte. Ceci représente plus de 4 000 figures, et seul un petit aperçu est présenté dans ce rapport. Nous avons choisi les figures qui nous semblaient les plus appropriées pour soutenir nos conclusions.

5.4.1 Baie Déception

Les Figure 29, la Figure 30 et la Figure 31 montrent des exemples pour la baie Déception. Selon les observations disponibles, les simulations de ce site semblent bien reproduire les processus observés liés aux vents (Figure 29, Figure 30), mais la présence de glace trop importante aux conditions frontière limite la possibilité de reproduire les observations et donc d'avoir confiance en d'éventuelles simulations climatiques (Figure 31). Effectivement nous pouvons voir que la simulation prédit de la glace pour presque l'ensemble du domaine, mais que les observations CIS (Canadian Ice Service – Service canadien des glaces) donnent de très faible concentration (environ 10%). L'analyse de l'image Landsat semble confondre de la glace et des nuages.

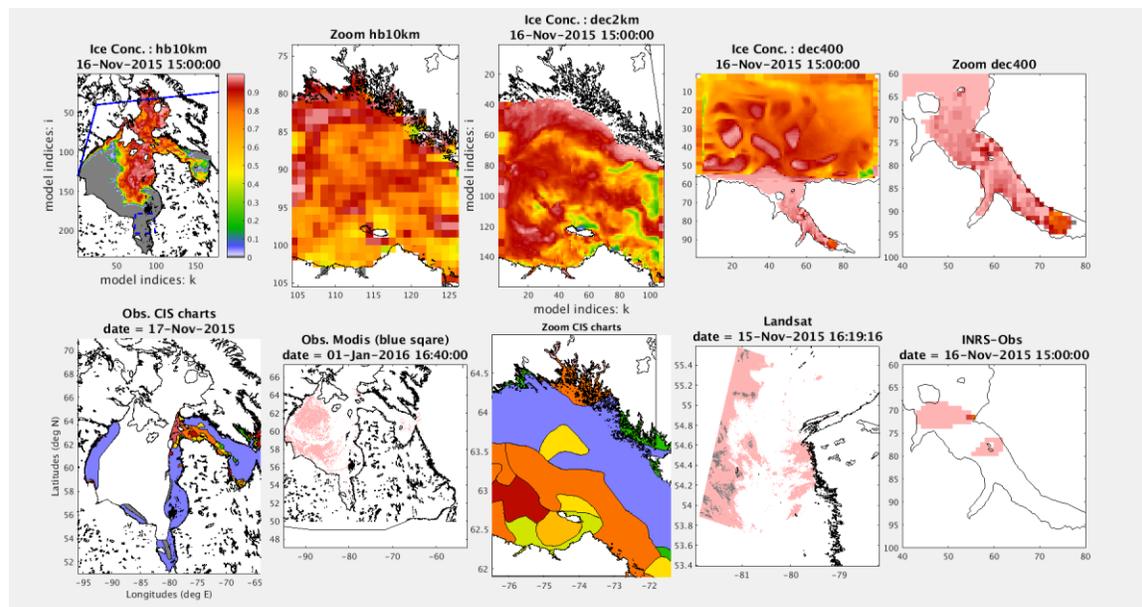


Figure 29: Cette figure présente la concentration moyenne de glace pour la baie Déception pour le 16 novembre 2015 à 15h00 GMT. La première rangée présente les résultats du simulateur pour les trois résolutions : domaine entier de hb10km, un zoom de hb10km sur le domaine de dec2km, domaine entier de dec2km, un zoom de dec2km sur le domaine de dec400 et un zoom de la baie Déception pour dec400. La seconde rangée présente les observations les plus synchrones: Observation SIGRID-3 du service des

glaces du Canada, image MODIS (fournie par INRS-ETE), zoom d'observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image LandSat (fournie par INRS-ETE), photo de l'INRS-ETE distribuée sur la grille dec400.

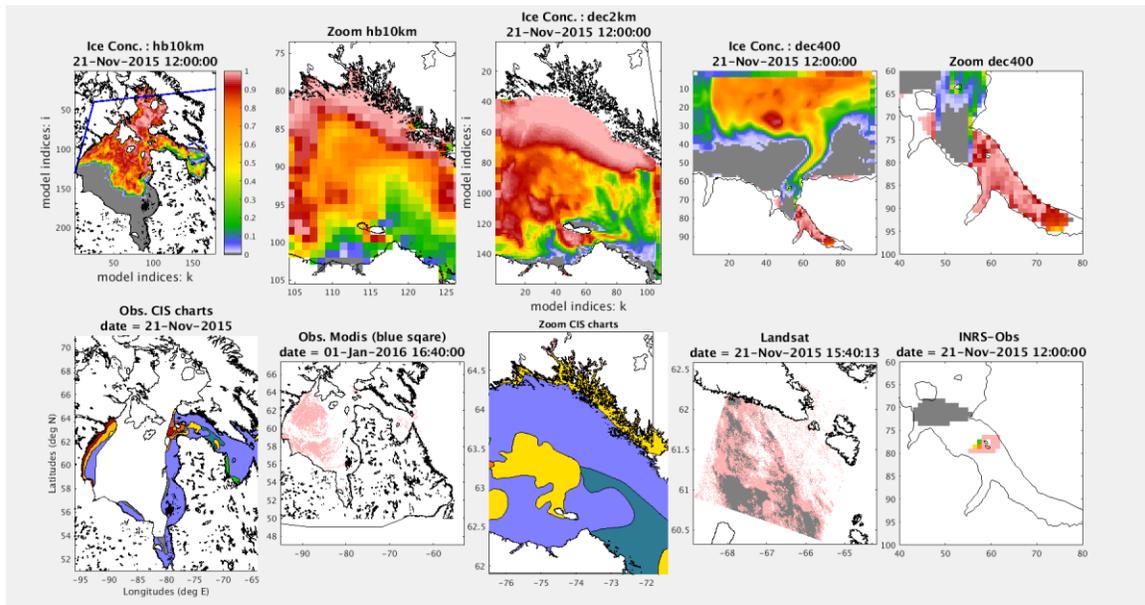


Figure 30: Cette figure présente la concentration moyenne de glace pour la baie Déception pour le 21 novembre 2015 à 12h00 GMT. La première rangée présente les résultats du simulateur pour les trois résolutions : domaine entier de hb10km, un zoom de hb10km sur le domaine de dec2km, domaine entier de dec2km, un zoom de dec2km sur le domaine de dec400 et un zoom de la baie Déception pour dec400. La seconde rangée présente les observations les plus synchrones : Observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image MODIS (fournie par INRS-ETE), zoom d'observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image LandSat (fournie par INRS-ETE), photo de l'INRS-ETE distribué sur le grille dec400.

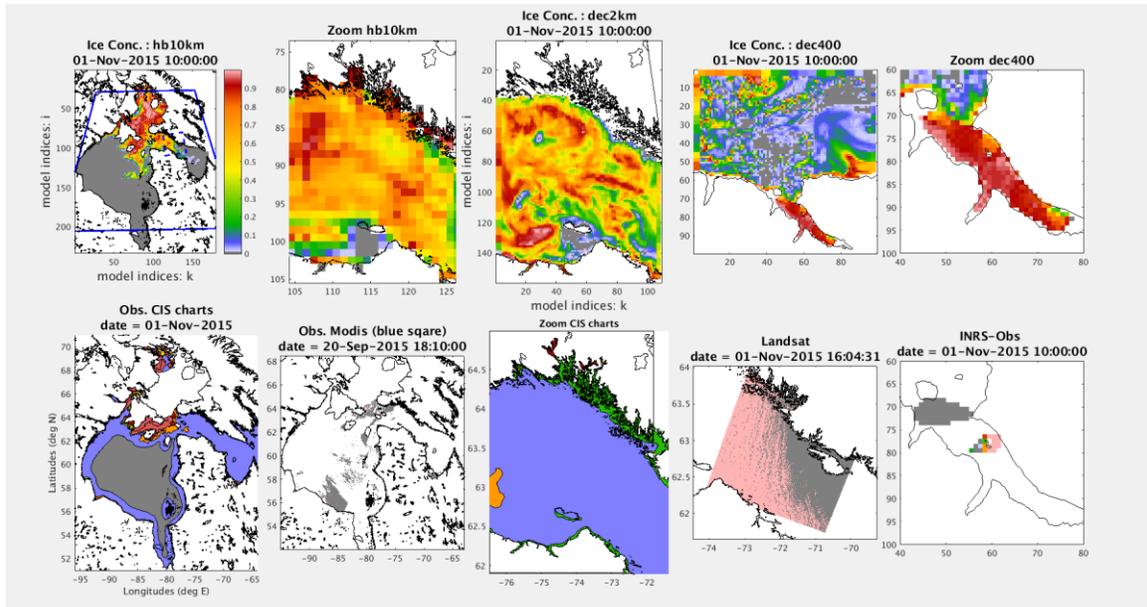


Figure 31: Cette figure présente la concentration moyenne de glace pour la baie Déception pour le 1er novembre 2015 à 10h00 GMT. La première rangée présente les résultats du simulateur pour les trois résolutions : domaine entier de hb10km, un zoom de hb10km sur le domaine de dec2km, domaine entier de dec2km, un zoom de dec2km sur le domaine de dec400 et un zoom de la baie Déception pour dec400. La seconde rangée présente les observations les plus synchrones: Observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image MODIS (fournie par INRS-ETE) de la date la plus près, zoom d'observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image LandSat (fournie par INRS-ETE), photo de l'INRS-ETE distribué sur le grille dec400.

5.4.2 Aupaluk

Les trois figures suivantes (Figure 32, Figure 33 et Figure 34) présentent un exemple pour la région d'Aupaluk. Les Figure 32 et Figure 33 montrent une prise de glace raisonnable pour la simulation à 400m de résolution. Par contre, la Figure 34 montre une concentration bien trop importante provenant des domaines à grande échelle qui n'est pas corroborée par les observations du SCG.

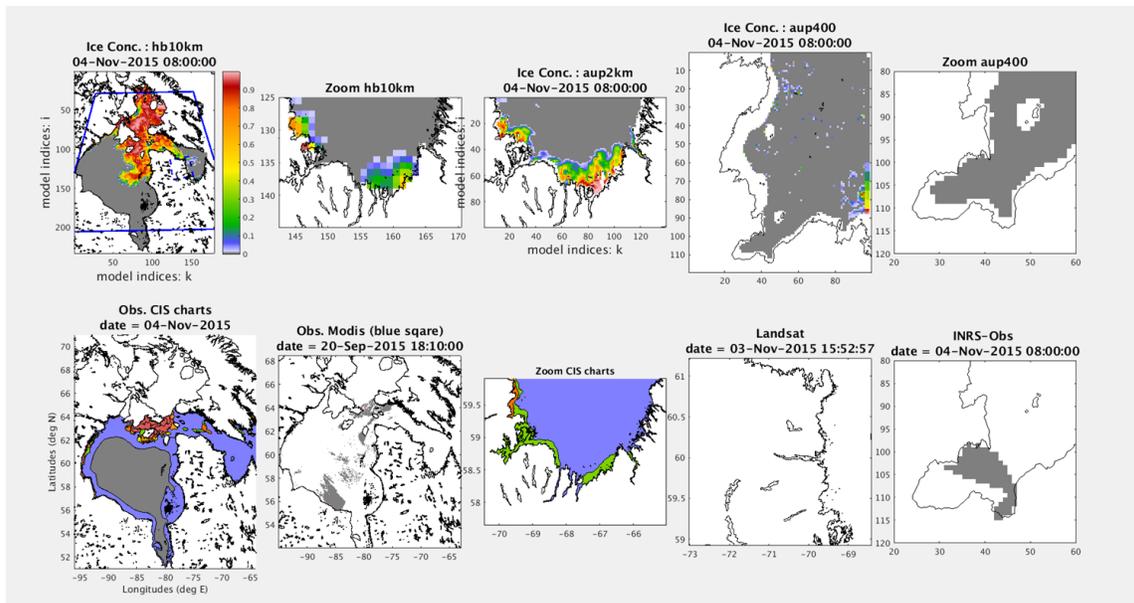


Figure 32 : Cette figure présente la concentration moyenne de glace pour la région d’Aupaluk pour le 4 novembre 2015 à 08h00 GMT. La première rangée présente les résultats du simulateur pour les trois résolutions : domaine entier de hb10km, un zoom de hb10km sur le domaine de aup2km, domaine entier de aup2km, un zoom de aup2km sur le domaine de aup400 et un zoom d’Aupaluk pour dec400. La seconde rangée présente les observations les plus synchrones: Observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image MODIS (fournie par INRS-ETE) de la date la plus près, zoom d’observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image LandSat (fournie par INRS-ETE), photo de l’INRS-ETE distribué sur la grille aup400.

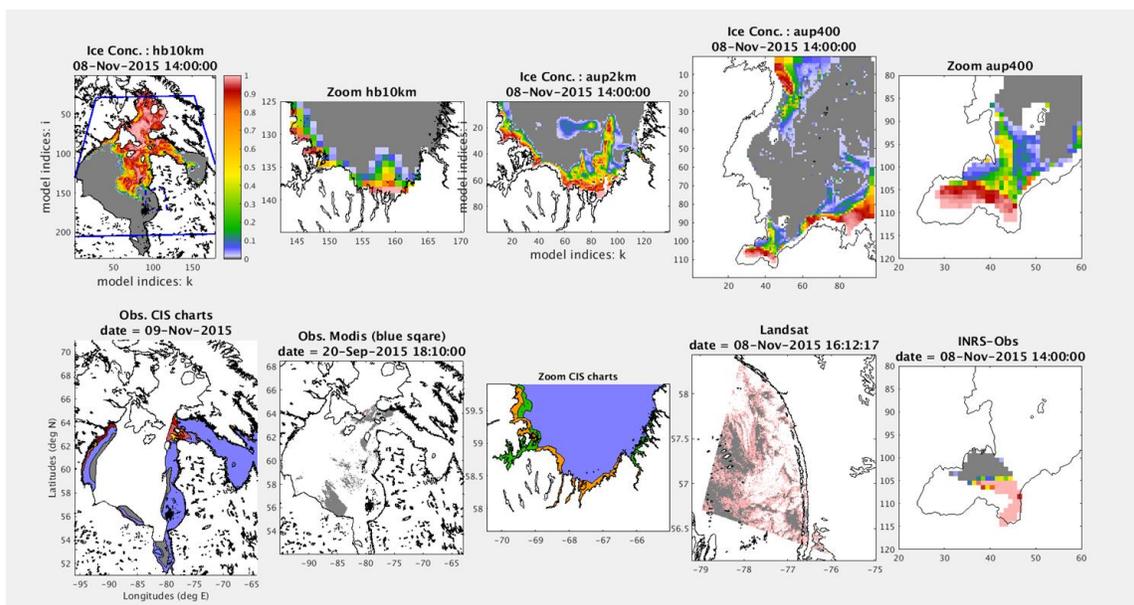


Figure 33 : Cette figure présente la concentration moyenne de glace pour la région d’Aupaluk pour le 8 novembre 2015 à 14h00 GMT. La première rangée présente les résultats du simulateur pour les trois résolutions : domaine entier de hb10km, un zoom de hb10km sur le domaine de aup2km, domaine entier

de aup2km, un zoom de aup2km sur le domaine de aup400 et un zoom d'Aupaluk pour aup400. La seconde rangée présente les observations les plus synchrones : Observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image MODIS (fournie par INRS-ETE) de la date la plus près, zoom d'observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image LandSat (fournie par INRS-ETE), photo de l'INRS-ETE distribué sur le grille aup400.

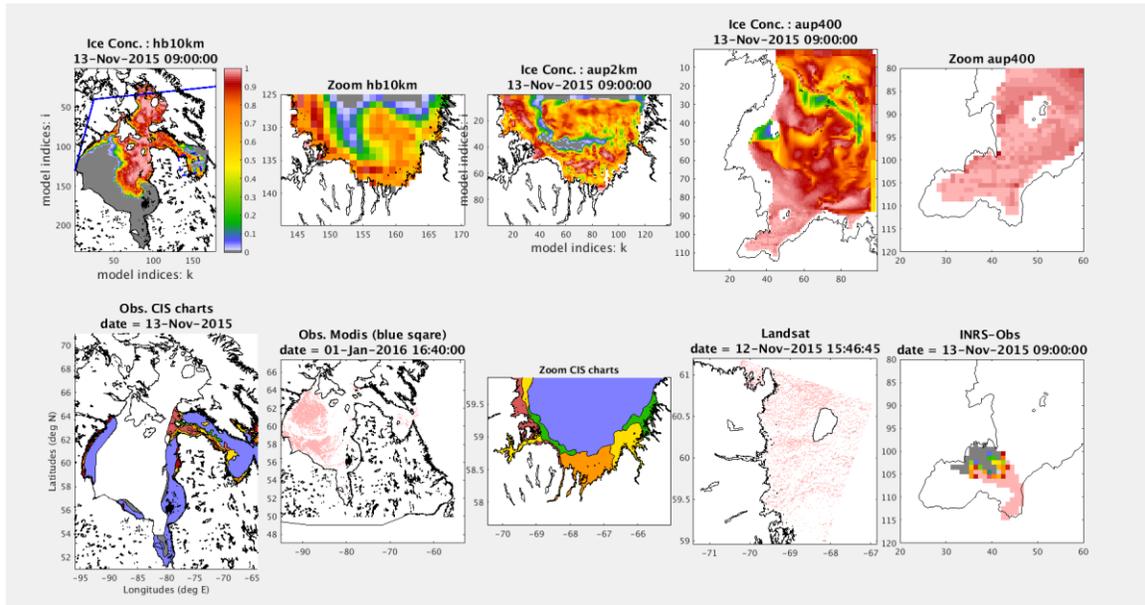


Figure 34 : Cette figure présente la concentration moyenne de glace pour la région d'Aupaluk pour le 13 novembre 2015 à 09h00 GMT. La première rangée présente les résultats du simulateur pour les trois résolutions : domaine entier de hb10km, un zoom de hb10km sur le domaine de aup2km, domaine entier de aup2km, un zoom de aup2km sur le domaine de aup400 et un zoom d'Aupaluk pour aup400. La seconde rangée présente les observations les plus synchrones: Observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image MODIS (fournie par INRS-ETE) de la date la plus près, zoom d'observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image LandSat (fournie par INRS-ETE), photo de l'INRS-ETE distribué sur le grille aup400.

5.4.3 Ivujivik

Le village d'Ivujivik est le site qui reproduit le mieux les observations. La Figure 35 représente le moment de la prise de glace observé par le traitement des photographies de l'INRS. Les Figure 36 et Figure 37 représentent le moment de la débâcle pour ce site. Cette validation adéquate est certainement liée à un meilleur agrément de la glace pour les grandes échelles avec les observations (voir Ivujivik, Figure 41).

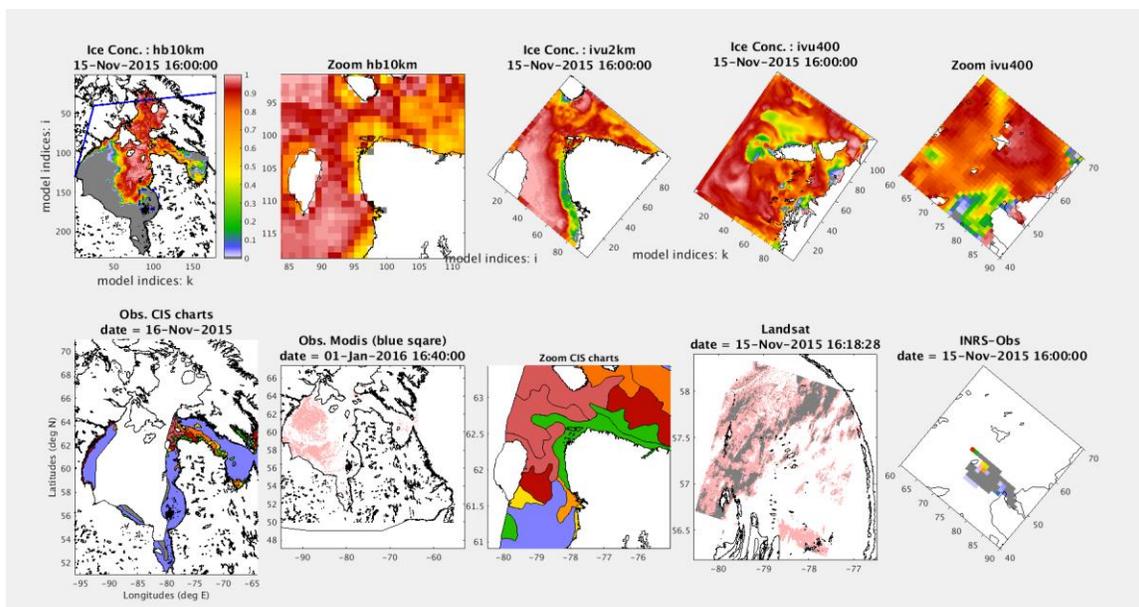


Figure 35: Cette figure présente la concentration moyenne de glace pour la région d'Ivujivik pour le 15 novembre 2015 à 16h00 GMT. La première rangée présente les résultats du simulateur pour les trois résolutions : domaine entier de hb10km, un zoom de hb10km sur le domaine de ivu2km, domaine entier de ivu2km, un zoom de ivu2km sur le domaine de ivu400 et un zoom d'Ivujivik pour ivu400. La seconde rangée présente les observations les plus synchrones: Observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image MODIS (fournie par INRS-ETE) de la date la plus près, zoom d'observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image LandSat (fournie par INRS-ETE), photo de l'INRS-ETE distribué sur la grille ivu400.

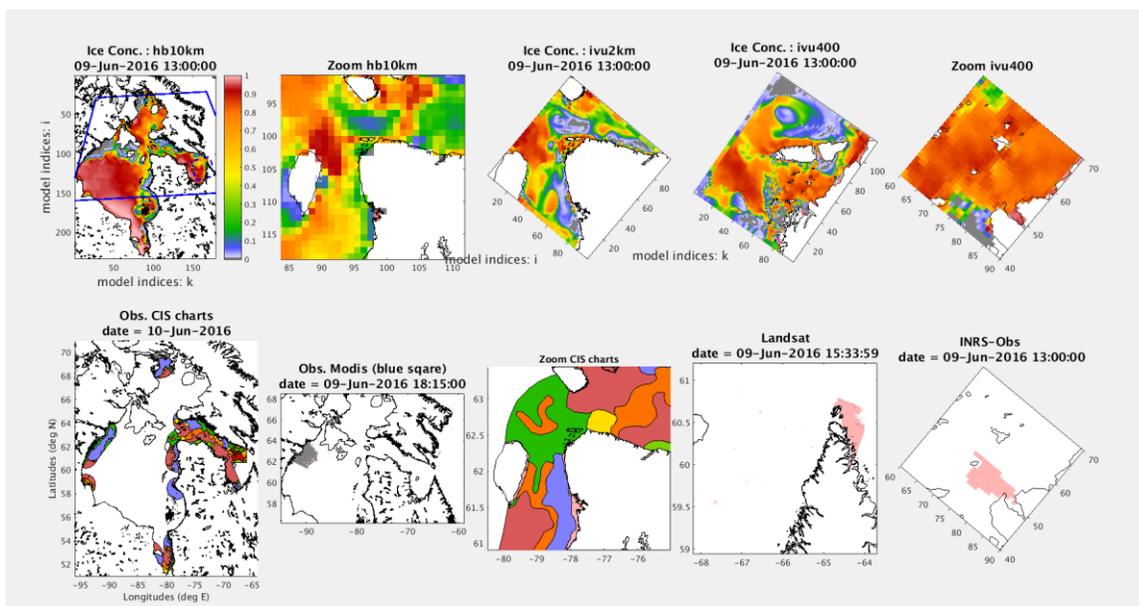


Figure 36 : Cette figure présente la concentration moyenne de glace pour la région d'Ivujivik pour le 9 juin 2016 à 13h00 GMT. La première rangée présente les résultats du simulateur pour les trois résolutions : domaine entier de hb10km, un zoom de hb10km sur le domaine de ivu2km, domaine entier de ivu2km,

un zoom de ivu2km sur le domaine de ivu400 et un zoom d'Ivujivik pour ivu400. La seconde rangée présente les observations les plus synchrones: Observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image MODIS (fournie par INRS-ETE) de la date la plus près, zoom d'observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image LandSat (fournie par INRS-ETE), photo de l'INRS-ETE distribué sur le grille ivu400.

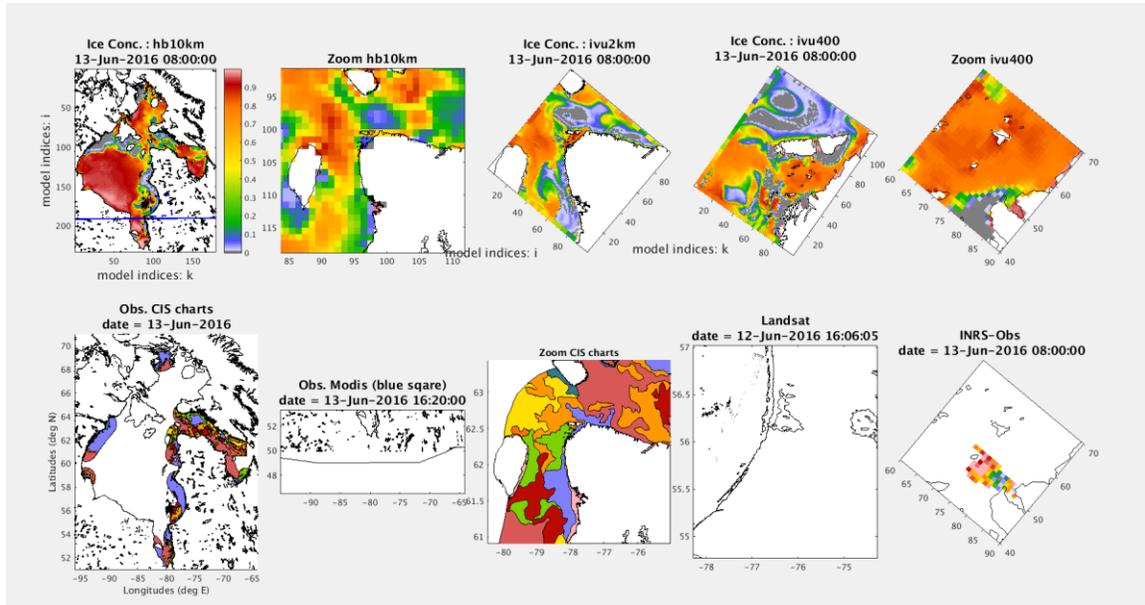


Figure 37 : Cette figure présente la concentration moyenne de glace pour la région d'Ivujivik pour le 13 juin 2016 à 08h00 GMT. La première rangée présente les résultats du simulateur pour les trois résolutions : domaine entier de hb10km, un zoom de hb10km sur le domaine de ivu2km, domaine entier de ivu2km, un zoom de ivu2km sur le domaine de ivu400 et un zoom d'Ivujivik pour ivu400. La seconde rangée présente les observations les plus synchrones: Observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image MODIS (fournie par INRS-ETE) de la date la plus près, zoom d'observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image LandSat (fournie par INRS-ETE), photo de l'INRS-ETE distribué sur le grille ivu400.

5.4.4 Kuujuaq et Umijuaq

Ces deux sites partagent le même problème. La configuration des îles près de la cote semble beaucoup trop efficace à retenir les glaces près de la cote. Pour chacun des sites (Figure 38 et Figure 39). Dans chacun des cas, un couvert complet de glace est simulé pendant que les observations des photographies de l'INRS n'indiquent aucune glace. Ce cas nous laisse croire qu'il reste encore du travail à faire pour la rhéologie des glaces à haute résolution.

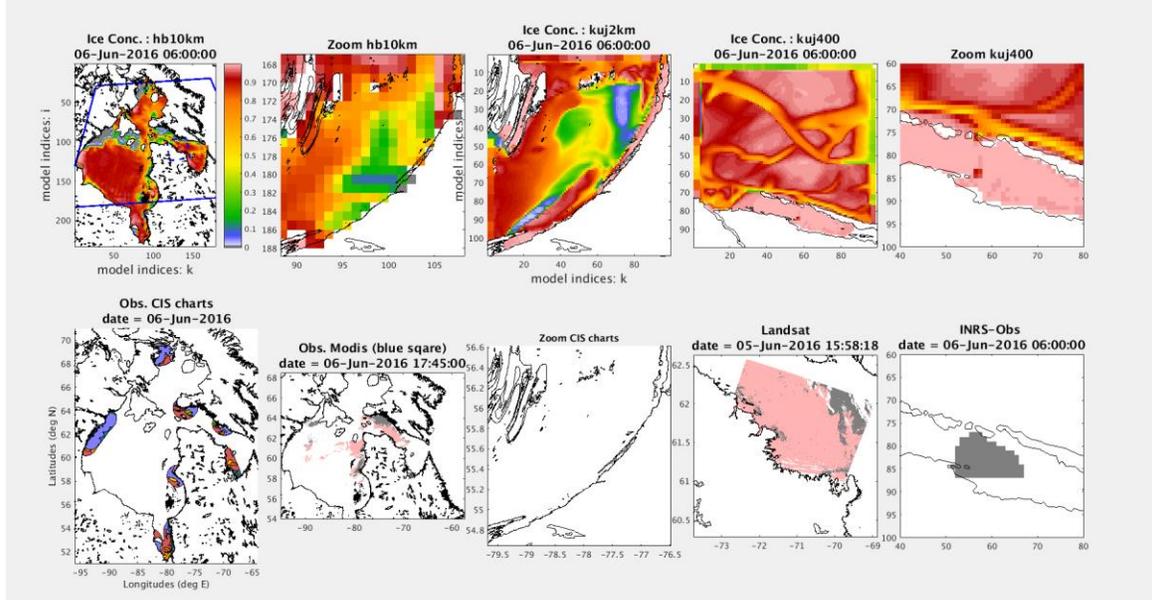


Figure 38 : Cette figure présente la concentration moyenne de glace pour la région de Kuujuaq pour le 6 juin 2016 à 06h00 GMT. La première rangée présente les résultats du simulateur pour les trois résolutions : domaine entier de hb10km, un zoom de hb10km sur le domaine de kuj2km, domaine entier de kuj2km, un zoom de kuj2km sur le domaine de kuj400 et un zoom de Kuujuaq pour kuj400. La seconde rangée présente les observations les plus synchrones: Observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image MODIS (fournie par INRS-ETE) de la date la plus près, zoom d'observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image LandSat (fournie par INRS-ETE), photo de l'INRS-ETE distribué sur le grille ivu400.

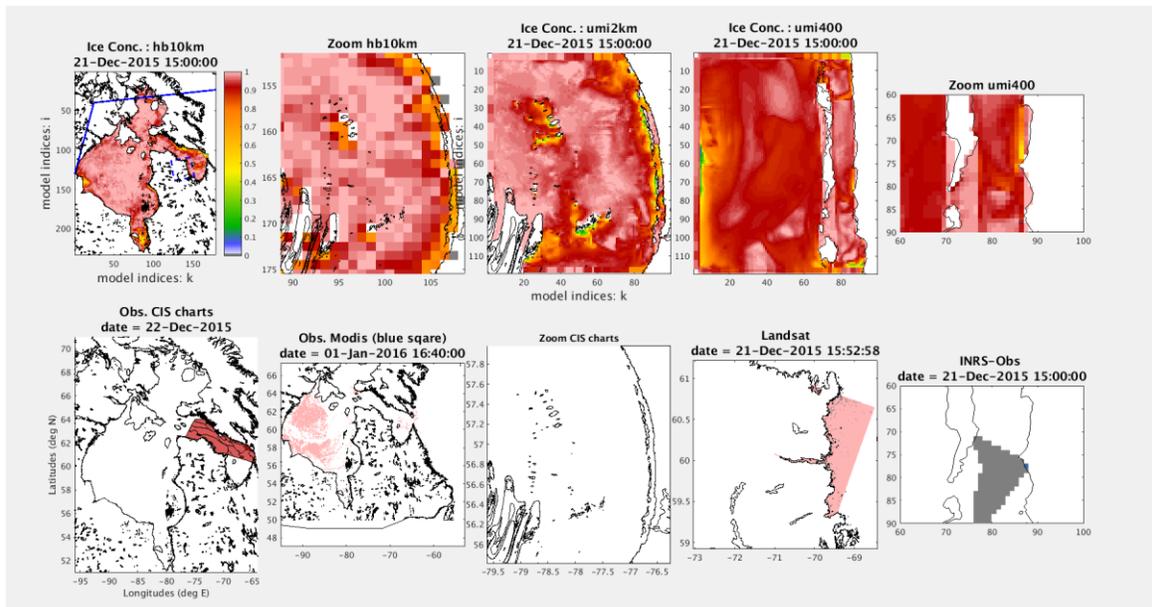


Figure 39 : Cette figure présente la concentration moyenne de glace pour la région d'Umiujaq pour le 21 décembre 2015 à 15h00 GMT. La première rangée présente les résultats du simulateur pour les trois résolutions : domaine entier de hb10km, un zoom de hb10km sur le domaine de umi2km, domaine entier de umi2km, un zoom de umi2km sur le domaine de umi400 et un zoom d'Umiujaq pour umi400. La

seconde rangée présente les observations les plus synchrones: Observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image MODIS (fournie par INRS-ETE) de la date la plus près, zoom d'observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image LandSat (fournie par INRS-ETE), photo de l'INRS-ETE distribué sur la grille ivu400.

5.4.5 Quaqtaq

Comme pour la plupart des autres sites, le site de Quaqtaq contient trop de glace dans la période de l'englacement. Même si la comparaison avec les données du service canadien des glaces semble acceptable. Les photographies de l'INRS restent longtemps sans glace après un couvert complet dans les simulations (Figure 40).

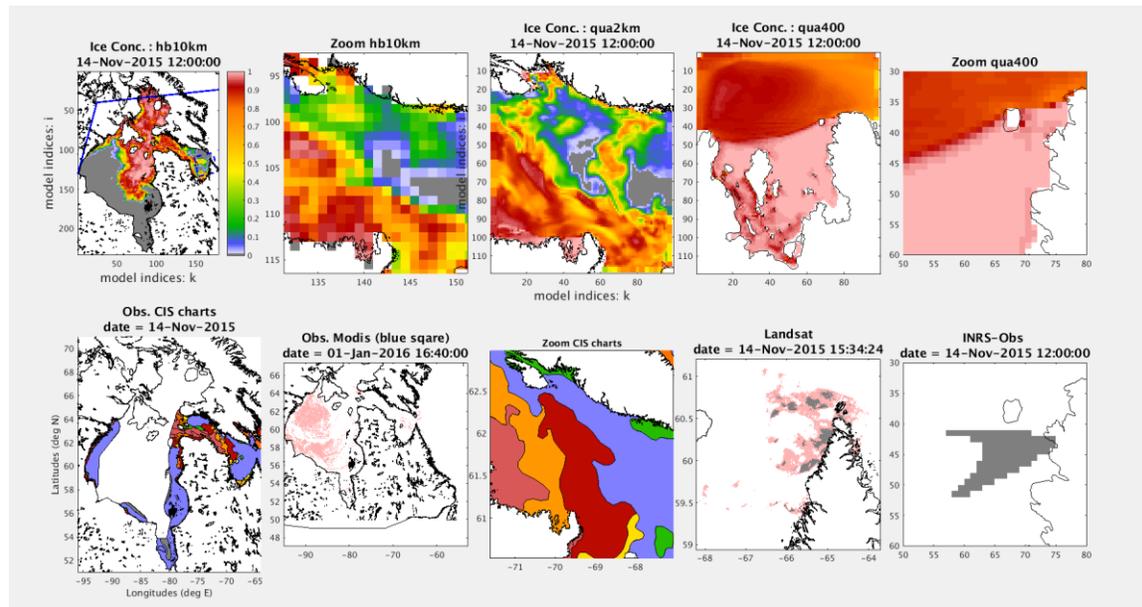


Figure 40 : Cette figure présente la concentration moyenne de glace pour la région d'Ivujivik pour le 14 novembre 2015 à 12h00 GMT. La première rangée présente les résultats du simulateur pour les trois résolutions : domaine entier de hb10km, un zoom de hb10km sur le domaine de qua2km, domaine entier de qua2km, un zoom de qua2km sur le domaine de qua400 et un zoom d'Ivujivik pour qua400. La seconde rangée présente les observations les plus synchrones: Observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image MODIS (fournie par INRS-ETE) de la date la plus près, zoom d'observation SIGRID-3 du service des glaces du Canada, image LandSat (fournie par INRS-ETE), photo de l'INRS-ETE distribué sur la grille ivu400.

5.5 Sommaire des résultats

- Comme mentionnée précédemment, l'ensemble des résultats présentés sont dans cette section afin de simplifier la structure du rapport. La liste suivante présente les simulations produites. Le volume de données est trop important pour être présenté dans son l'ensemble dans ce rapport. Par contre, l'ensemble des fichiers pertinents aux analyses présentées dans ce rapport, ou à de futures analyses du MTQ, ont été transféré au MTQ.

Une liste complète des fichiers transférés est disponible en annexe (section 12). Voici la liste des simulations produites et un tableau de l'espace de stockage nécessaire (

Tableau 3). Le choix des simulations a été motivé par l'analyse des résultats et les besoins du MTQ.

En résumé :

- Nous avons terminé toutes les simulations à 10 km de résolution pour les sept (7) climats probables disponibles (1980-2100) contrairement au devis qui prévoyait six (6) climats sur la période 1980-2070 .
- Nous avons fait la simulation réaliste du système de la baie d'Hudson, incluant toutes les côtes du Nunavik pour la période 2001-2017.
- Nous avons terminé une simulation (2015-2016) réaliste pour les 6 sous-domaines à 2 km et 400 m (12 au total).
- Nous avons également complété les simulations pour Kujjuurapik et Quaqtàq à 2km de résolution pour les années 1980-2100 pour AHJ.
- Nous continuons à produire, en date du 30 novembre 2018, les simulations pour Kuujjuarapik et Quaqtàq à 400 m de résolution pour les années 1980-2100 pour AHJ. Nous savons déjà que ses simulations seront incomplètes, car les modèles océaniques et de glace sont, tour à tour, instables pour certaines simulations. Les instabilités du modèle océanique sont liées aux conditions frontières, à des discontinuités apparaissant à la frontière ouverte EST du domaine. Les tests que nous avons faits démontraient une configuration stable pour plusieurs années. Nous n'expliquons pas ces instabilités. Le modèle de glace, quant à lui, génère des déplacements de glace instable dans des configurations qui me semblent normales, mes analyses ne m'ont pas permises de comprendre pourquoi.

Tableau 3: Simulations complétées au 30 novembre 2018.

Climat OURANOS	Domaine	Période	Espace disque
AEV	HB10km	1980-2100	6.9 Tb
AHJ	HB10km, KUJ2KM, QUA2KM	1980-2100, 1980-2100, 1980-2100	6.9 Tb, 3 Tb, 5Tb
BBFG	HB10km	1980-2100	6.9 Tb
BBHI	HB10km	1980-2100	6.9 Tb
BBJK	HB10km	1980-2100	6.9 Tb
BBLM	HB10km	1980-2100	6.9 Tb
BBNO	HB10km	1980-2100	6.2 Tb
GEM	HB10KM, tous 2km, tous 400 m	2001-2018, 2015-2016, 2015-2016	1.6Tb, ~240gb, ~500gb

6 Faits saillants, discussions et recommandations

Dans cette section, à partir des résultats et des problématiques rencontrées, nous expliquerons les points qui ont bien fonctionné et ceux pour lesquels nous n'avons pas obtenu les résultats escomptés. Nous relaterons également la chronologie des faits qui nous mène à ces constats.

6.1 Résultats attendus

6.2 Défis problématiques et solutions mises de l'avant

Dues à la nature exploratoire et ambitieuse de ce projet, ce type de simulations imbriquées avec des modèles de glace à haute résolution n'avaient pas été tentées auparavant à notre connaissance. De plus, en raison des défis techniques tels que la stabilité des simulations de glace à haute résolution, nous étions conscients des risques de ne pas obtenir tous les résultats escomptés. Cependant, grâce aux projets que nous avons réalisés par le passé nous étions confiants de pouvoir mener à bien ce projet. Notre problématique principale au début du projet était d'avoir un simulateur de glace stable à fine résolution.

C'est donc l'une des premières tâches à laquelle nous nous sommes attaqués. Cette étape fut beaucoup plus longue prévue et a entraîné des modifications que nous ne pouvions pas prévoir, tel que de devoir générer de nouvelle grille pour les zones peu profondes. En effet, le nouveau modèle de glace (CICE5) nécessite une circulation à deux couches en régions peu profondes. Finalement, après l'implantation et la validation des paramètres du modèle de glace CICE5, nous étions pleinement satisfaits du travail accompli. Pendant cette période nous avons également traité les données atmosphériques provenant de OURANOS et récolté les données bathymétriques indispensables à la création des grilles.

L'étape suivante fut l'imbrication des sous-grilles et des modifications du simulateur océanique tel que le schéma couvrant/découvrant et l'ajout de la friction entre la glace et le fond dans le nouveau modèle de glace.

6.3 Problématique non résolue

Par la suite, nous sommes passés à la validation. En effet, pour prétendre qu'une simulation est réaliste, elle doit être comparée avec des observations tels que les mesures de température, salinité et niveaux d'eau et le couvert de glace. C'est ici que les choses se compliquent. En ce qui concerne la physique de l'océan, nous avons confiance que le modèle MOR pouvait reproduire correctement les variables relatives à l'océan. Plusieurs validations ont été faites à l'échelle de 10 km et les modèles à haute résolution (400 m) ont été validés avec succès pour d'autres domaines tels que l'estuaire du Saint-Laurent ou l'archipel de Mingan (Senneville et coll. 2018). Cependant, pour les glaces des sous-domaines à 400 m et 2 km de résolution horizontale, les

solutions du simulateur de glaces ne se sont pas avérées assez performantes pour poursuivre ces simulations.

6.3.1 Raison et explication

La physique régissant les fluides est relativement bien connue. Cependant, nous ne pouvons pas en dire autant de la glace. Outre le projet auquel j'ai participé sur la pression interne de glace à Gros-Cacouna (Senneville et coll., 2007), nous ne connaissons pas d'autres projets qui ont utilisé ce type de modèle pour la prévision de glace à une résolution de 400 m. De façon générale, les modèles actuels modélisent la glace à des échelles de l'ordre de quelques kilomètres et plus.

Jusqu'à présent, nous avons toujours validé le modèle du système de la baie d'Hudson dans son ensemble. Les très bons résultats de concentration de glace, à l'échelle de 10 km de résolution, tel que présenté dans la Figure 41, nous ont toujours laissé croire qu'il serait adéquat pour contraindre des simulations à plus fine échelle. Une des nouveautés du projet de recherche est d'également introduire la glace à toutes les échelles, ce qui est l'intérêt principal de ce projet. Quand nous regardons cette même validation, mais à l'échelle des domaines à 2 km de résolution (Figure 42), nous remarquons que les résultats sont moins probants qu'à grande échelle, surtout si nous focalisons sur une période (Figure 43). Ces résultats représentent les meilleures données disponibles pour forcer les sous-domaines à 2 km de résolution, de plus avec l'ajout des phénomènes liés aux fines résolutions, nous visions une amélioration de ces résultats, afin de contraindre les sous-domaines à 400 m de résolution par la suite. Cependant, malgré tous les efforts déployés dans ce projet de recherche, les contraintes à grande échelle (10 km et 2 km) sur les sous-domaines (2 km, 400 m) se sont avérées dominantes. Les améliorations apportées aux simulateurs de glace (CICE5) se sont avérées inefficaces à corriger ces résultats. À partir de ces résultats, nous avons donc dû juger les performances des simulateurs à haute résolution inadéquates dans les périodes d'englacement et de débâcle pour poursuivre les simulations climatiques à haute résolution près des infrastructures maritimes.

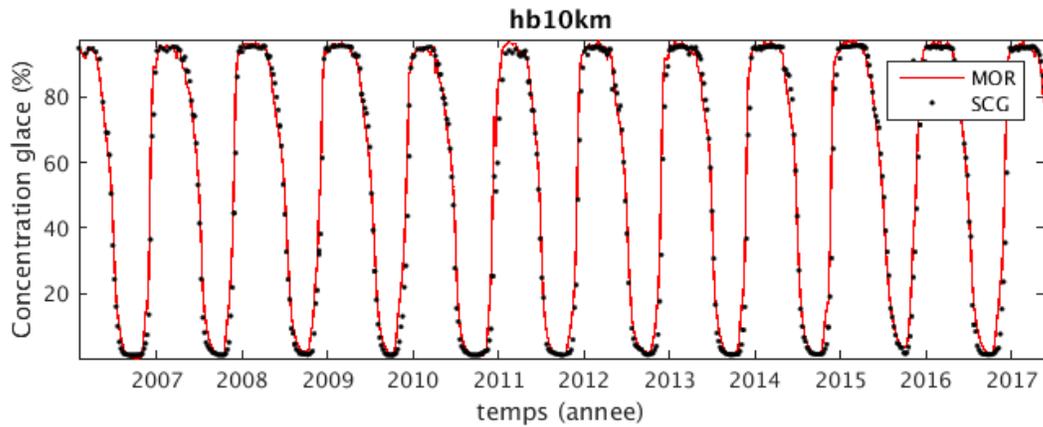


Figure 41: Validation de la concentration de la glace de mer moyenne pour le système de la baie d'Hudson à 10km de résolution horizontale. La ligne rouge représente les résultats de la baie d'Hudson (MOR) et les points noirs les observations du Service des glaces canadien (SGC).

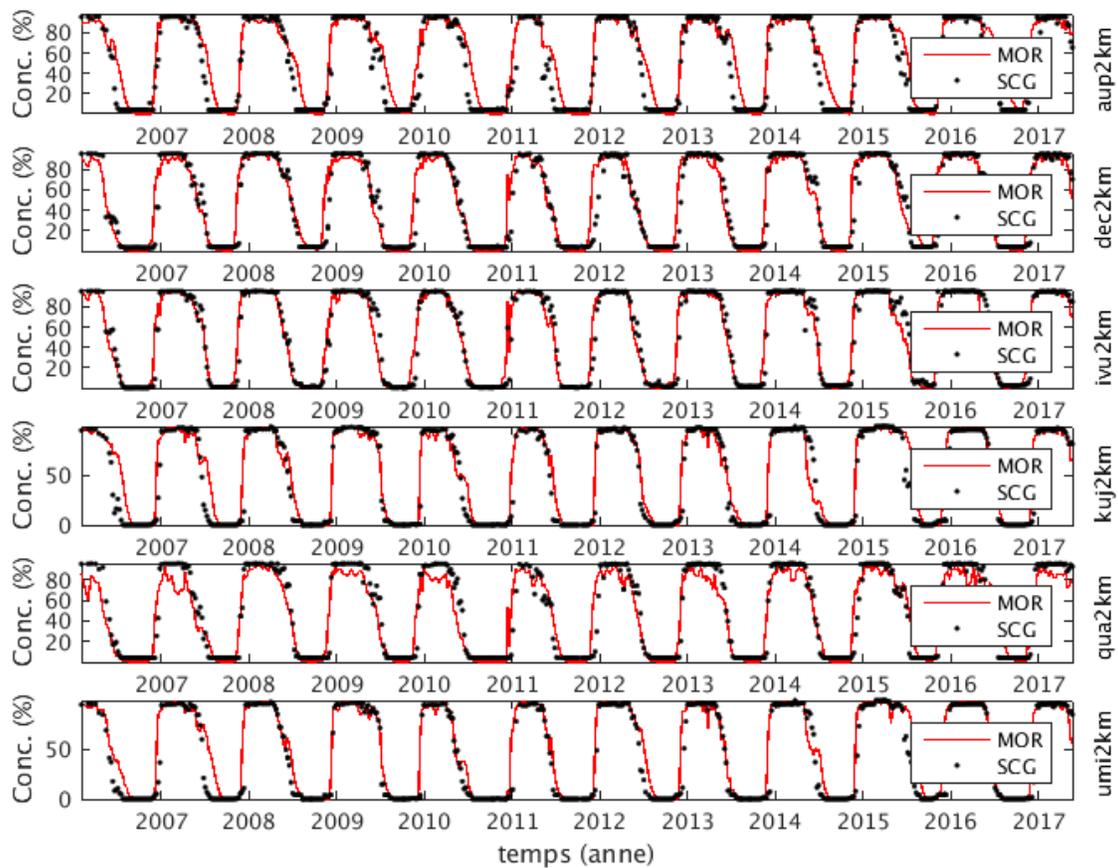


Figure 42: Validation de la concentration de la glace de mer sur les différents domaines. La ligne rouge représente les résultats de la baie d'Hudson (MOR) et les points noirs les observations du Service des glaces canadien (SGC).

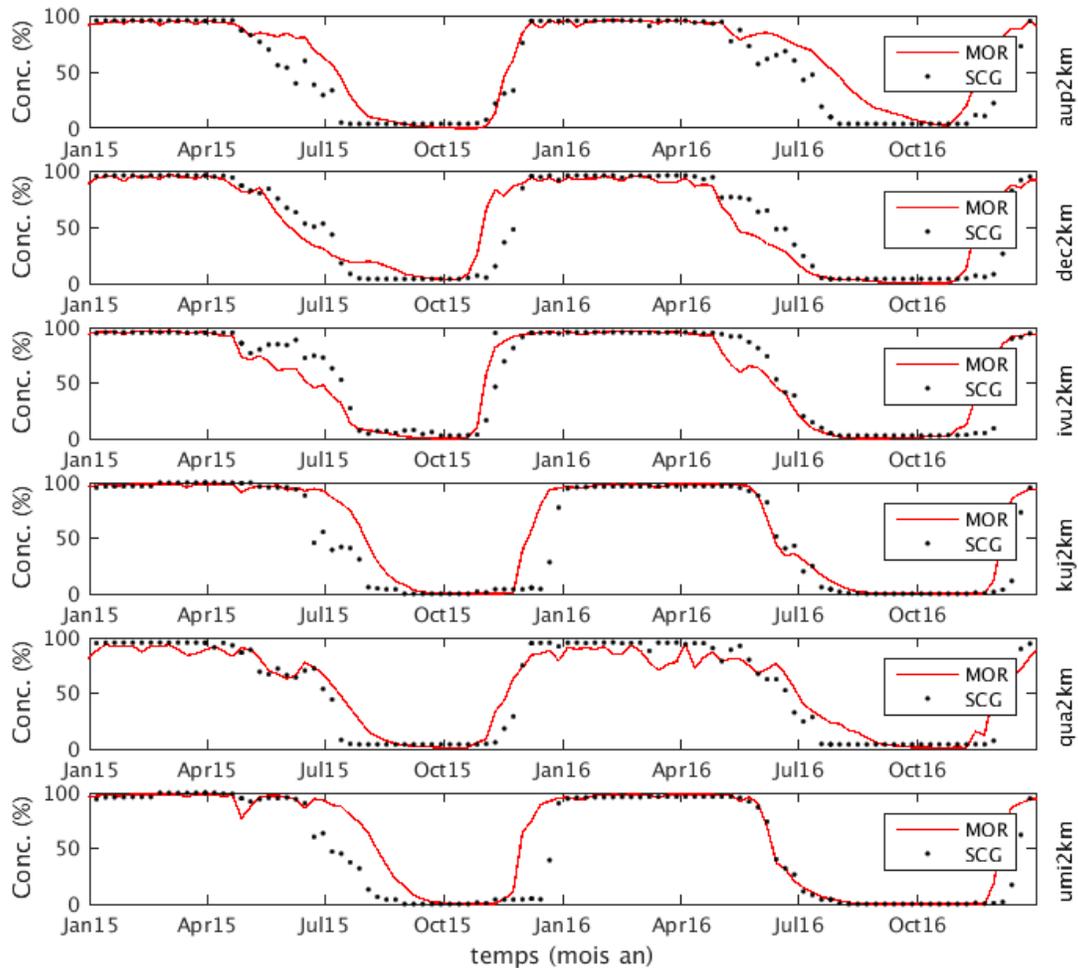


Figure 43: Validation de la concentration de la glace de mer sur les différents domaines pour 2015 et 2016. La ligne rouge représente les résultats de la baie d'Hudson (MOR) et les points noirs les observations du Service des glaces canadien (SGC).

6.4 En résumé

Somme toute, les simulations réalistes, pour la période de l'englacement et la débâcle, ont été décevantes. Effectivement, les validations sur les sous-domaines (400 m) à l'aide des données à fine résolution de l'INRS (photo) ne permettent pas de croire que les simulations climatiques à fine échelle donneraient des résultats en lesquels nous pourrions avoir confiance. Le problème est principalement lié dans les périodes de transition de glace (englacement et fonte des glaces). Malgré les très bons résultats de la simulation à HB10km (Figure 41), la position des fronts de glace à une influence trop grande par rapport au gain qui sont faite par l'augmentation de la résolution.

Comme ce point est important, nous nous permettons d'y mettre de l'emphase. Le but premier du modèle est d'évaluer ce qui advient des glaces près des infrastructures pendant l'englacement

et la débâcle. Comme les années réalistes simulées ne nous permettent pas de reproduire les observations avec une précision plus fine que celle des changements escomptés, il n'est donc pas utile de produire des simulations dans ces conditions.

Nous avons tout de même produit certaines de ces simulations pour servir d'intrant pour un autre projet. Ces simulations restent le meilleur jeu de données pour étudier l'effet des changements climatiques sur les infrastructures maritimes du Nunavik. Cependant, il faut que les résultats soient utilisés en tenant compte des validations faites dans le cadre du projet de recherche actuel.

Sur une note plus positive, ce projet a tout de même permis de tripler le nombre de simulations climatiques du système de la baie d'Hudson, qui nous le rappelons couvre l'ensemble des côtes du Nunavik.

7 Conclusions

En sommes, bien qu'il n'a pas été possible de simuler les conditions de glace de rive à une résolution spatiale de 2km et 400m, les objectifs ambitieux de ce projet étaient initialement réalistes à la lumière des résultats obtenus dans le cadre de travaux scientifiques crédibles sur l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent réalisés antérieurement. Malgré l'ensemble des améliorations techniques apportées aux modèles océaniques (MOR) et de glace (CICE), nous n'avons pas été en mesure de rencontrer l'objectif principal du projet, soit la production de simulations de condition de glace à haute résolution en contexte de changements climatiques près des infrastructures maritimes du Nunavik.

Les deux principales raisons pour lesquelles les simulations climatiques sur chacun des sous-domaines (400 m) n'ont pu être réalisées sont les suivantes :

- Les forçages de glace de mer à grande échelle (10 km) imprécis pour les sous-échelles (2k km et 400 m) dominent complètement les glaces produites à l'intérieur des sous-domaines (2 km et 400 m).
- Comme le montrent deux des sites, la production de glace dans des régions confinées semble non adéquate. Le modèle de glace, dans l'état actuel, malgré les modifications ne semble pas s'appliquer à des zones confinées de fine échelle.

Une autre cause peut-être la résolution trop faible des forçages atmosphériques près des côtes. Effectivement, les forçages atmosphériques sont très importants pour la production de glace. Il est malheureusement impossible, pour le moment, d'évaluer les effets qu'ont les phénomènes atmosphériques à fine échelle près des villages (par exemple, la différence des processus au-dessus de la terre vs au-dessus de l'océan).

Finalement, le présent projet a permis d'améliorer la qualité des projections des conditions de glace de mer à 10 km de résolution horizontale. Également, pour faciliter la diffusion et l'utilisation des nouvelles connaissances développées sur les projections des conditions de glaces de mer à une résolution spatiale de 10 km au Nunavik, un atlas mensuel de la glace de mer pour les périodes de 1980-2010 et 2040-2070 a été produit. Cet atlas exploite une meilleure variabilité des futurs possibles que les informations provenant du projet précédent. Les résultats des simulations demeurent disponibles et une copie des variables pertinentes a été remise au MTQ. Cette base de données virtuelles, malgré ces limitations, est la meilleure pour faire des études liées aux changements climatiques. D'ores et déjà, un projet peut en profiter, soit le projet CC16.1, dirigé par Urs Neumeier, professeur régulier en géologie marine à l'UQAR-ISMER.

8 Besoins en recherche

Ce projet nous a permis de réaliser que malgré les résultats globaux probants du simulateur à 10km, la stratégie d'imbriqué des sous-domaines n'était pas convenable dû à l'imprécision du modèle à 10km pour chaque sous-région. Nous aurions pu croire que l'ajout de nouveau mécanisme de rétention de glace près des côtes dans ces sous-domaines aurait pu améliorer les résultats, mais les contraintes exercées par les grandes échelles sont trop fortes. L'effet de cette dernière contrainte ne pouvait pas être anticipé avant la réalisation de ce projet de recherche.

Une nouvelle possibilité serait de simuler l'ensemble du domaine de la baie d'Hudson, incluant toutes les côtes du Nunavik, à une résolution nécessaire pour que les glaces de rive soient présentes. Pour ce faire, il faut utiliser des simulateurs où la décomposition du domaine est possible. Cette décomposition du domaine géographique permet de le diviser en partie, les équations de chacune des parties sont alors résolues sur différents processeurs en parallèle. Ce type de calcul permet d'optimiser les grappes de calcul disponible actuellement.

L'architecture du simulateur MOR n'est pas adaptée à faire des simulations avec une décomposition du domaine. Cependant, l'ISMER prendra sous peu ce virage en adoptant le simulateur NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean). Les travaux des dernières années effectués par les équipes d'environnement Canada et le Ministère Pêches et océans montrent que ce simulateur arrive maintenant à des résultats semblables à MOR dans le golfe du Saint-Laurent. Nous croyons que ces travaux pourraient aussi être réalisés dans le système de la baie d'Hudson.

L'observation des glaces à de fines résolutions est un élément essentiel pour la validation des résultats et l'amélioration des modèles de glace utilisés à de fines échelles. Dany Dumont, professeur en océanographie physique à l'Université du Québec à Rimouski-ISMER, dirige depuis 2014 un programme d'observation de la dynamique de la banquise à fine échelle (résolution entre 1-10 m sur une zone de quelques km² dans l'estuaire du Saint-Laurent) qui pourrait servir de banc

d'essai pour des modèles de prévision de glace à haute résolution qui pourrait être utilisée dans des environnements nordiques. Cet observatoire, situé dans le parc national du Bic, a permis d'acquérir une vaste quantité de données de fracture, de déformation et de dérive de la banquise dans une grande diversité de conditions. Des observations in situ en présence de vagues ont notamment permis de mieux comprendre le forçage des vagues et son impact sur la distribution d'épaisseur de la glace (Sutherland et Dumont, en révision). Dans ce contexte, une discussion avec différents intervenants intéressés par le développement technologique des simulateurs de glace à haute résolution serait souhaitable pour discuter et explorer les partenariats possibles pour financer la réalisation de ce projet.

9 Lexique

A

AEV : La version 4.2.3 du MRCC, piloté par le membre 5 du CGCM3.

AHJ : La version 4.2.3 du MRCC, piloté par le membre 3 du modèle global ECHAM5.

AUP2KM : domaine d'Aupaluk à 2 km de résolution.

AUP400 : domaine d'Aupaluk à 400 m de résolution.

B

BBFG : La version 3.3.3.1 du MRCC5, piloté par le membre 1 du modèle global CanESM2 suivant le scénario RCP 8.5 du GIEC.

BBHI : La version 3.3.3.1 du MRCC5, piloté par le membre 2 du modèle global CanESM2 suivant le scénario RCP 8.5 du GIEC.

BBJK : La version 3.3.3.1 du MRCC5, piloté par le membre 3 du modèle global CanESM2 suivant le scénario RCP 8.5 du GIEC.

BBLM : La version 3.3.3.1 du MRCC5, piloté par le membre 4 du modèle global CanESM2 suivant le scénario RCP 8.5 du GIEC.

BBNO : La version 3.3.3.1 du MRCC5, piloté par le membre 5 du modèle global CanESM2 suivant le scénario RCP 8.5 du GIEC.

C

CICE : Modèle de glace de mer.

CICE5 : CICE version 5

Conditions aux frontières : Valeurs données aux variables sur les cellules situées aux limites du domaine. Ces valeurs sont nécessaires pour obtenir une solution unique du système d'équations,

Conditions aux frontières : Valeurs données aux variables sur les cellules situées aux limites du domaine. Ces valeurs sont nécessaires pour obtenir une solution unique du système d'équations.,

D

DEC2KM : domaine de la baie Déception à 2 km de résolution.

DEC400 : domaine de la baie Déception à 400 m de résolution.

Domaine : Subdivision d'une zone géographique.

G

Glace de mer : Elle fait référence à la glace qui se déplace sans subir l'effet direct de la rive.

Glace de rive : Elle est partiellement ou complètement retenue, que ce soit l'effet de la cote elle-même ou bien les interactions entre la glace et le fond. Ces mécanismes ont pour effet de garder la glace attachée à la rive ou au fond, d'où le nom de glace de rive (en anglais, « landfast ice »).

I

Instabilité : Une instabilité est une perturbation qui, sous certaines conditions, croît de façon exponentielle.

Instabilité numérique : À l'instar de l'instabilité, sous certaines conditions, une variable croît de façon exponentielle jusqu'à ne plus avoir de sens physique (un salinité négative) ou ne plus pouvoir être représentée par un nombre informatique (NaN, « not a number »).

IVU2KM : domaine d'Ivujivik à 2 km de résolution.

IVU400 : domaine d'Ivujivik à 400 m de résolution.

K

KUJ2KM : domaine de Kuujjuarapik à 2 km de résolution.

KUJ400 : domaine de Kuujjuarapik à 400 m de résolution.

M

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

MOR : Modèle Océanique Régional

P

POLR : Physique des Océans ► Laboratoire de Rimouski.

Projet no. CC09.1 : Suivi des conditions de glaces de rives à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtak et Aupaluk.

Projet no. CC09.2 : Suivi des conditions de glaces de rive et de vagues à l'aide de caméras et d'imagerie satellitaire à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtak et Aupaluk (2017-2020).

Projet no. CC16.1 : Suivi et modélisation des vagues au Nunavik

Q

QUA2KM : domaine de Quaqtq à 2 km de résolution.

QUA400 : domaine de Quaqtq à 400 m de résolution.

S

Simulation : Représentation numérique du comportement des processus physiques.

Système de la baie d'Hudson : inclus la baie James, le bassin de Foxe, la baie d'Ungava et la baie et le détroit d'Hudson.

U

UMI2KM : domaine de Umiujaq à 2 km de résolution.

UMI400 : domaine de Umiujaq à 400 m de résolution.

UQAR-ISMER : Université du Québec à Rimouski – Institut des sciences de la mer de Rimouski.

10 Une synthèse des conclusions et des recommandations (750 mots)

Ce projet de recherche (CC05.1) avait pour but de produire des prédictions à haute résolution près des infrastructures maritimes. Les objectifs ambitieux de ce projet étaient initialement réalistes à la lumière des résultats obtenus dans le cadre de travaux scientifiques crédibles sur l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent réalisés antérieurement. Malgré l'ensemble des améliorations techniques apportées aux modèles océaniques (MOR) et de glace (CICE), nous n'avons pas été en mesure de rencontrer l'objectif principal du projet, soit la production de simulations de condition de glace à haute résolution en contexte de changements climatiques près des infrastructures maritimes du Nunavik.

Les deux principales raisons pour lesquelles les simulations climatiques sur chacun des sous-domaines (400 m) n'ont pu être réalisées sont les suivantes :

- Les forçages de glace de mer à grande échelle (10 km) imprécis pour les sous-échelles (2 km et 400 m) dominent complètement les glaces produites à l'intérieur des sous-domaines (2 km et 400 m).
- Comme le montrent deux des sites, la production de glace dans des régions confinées semble non adéquate. Le modèle de glace, dans l'état actuel, malgré les modifications ne semble pas s'appliquer à des zones confinées de fine échelle.

Une autre cause peut-être la résolution trop faible des forçages atmosphériques près des côtes. Effectivement, les forçages atmosphériques sont très importants pour la production de glace. Il est malheureusement impossible, pour le moment, d'évaluer les effets qu'ont les phénomènes atmosphériques à fine échelle près des villages (par exemple, la différence des processus au-dessus de la terre vs au-dessus de l'océan).

Cependant, le présent projet a permis de produire un atlas mensuel de la glace de mer à une résolution de 10 km pour les périodes de 1980-2010 et 2040-2070 qui pourra être utilisé par différents usagers. Cet atlas exploite une meilleure variabilité des futurs possibles que les informations provenant du projet précédent X.0006.1 (Senneville et St-Onge Drouin, 2013).

Les résultats des simulations demeurent disponibles, une copie des variables pertinentes a été remise au MTQ. Cette base de données virtuelles, malgré ces limitations, est la meilleure pour faire des études liées aux changements climatiques. D'ores et déjà, un projet peut en profiter, soit le projet CC16.1, dirigé par Urs Neumeier, professeur régulier en géologie marine à l'UQAR-ISMER.

Afin de pouvoir réaliser ce projet de recherche tel qu'initialement prévu, il faudra améliorer les résultats des concentrations et épaisseurs de glace des simulateurs. Nous avons deux recommandations qui, nous croyons, devraient améliorer les deux principales lacunes observées lors de ce projet de recherche.

1. Une première possibilité serait de simuler l'ensemble du domaine de la baie d'Hudson, incluant toutes les côtes du Nunavik, à une résolution nécessaire pour que les glaces de rive soient présentes, disons au moins 2 km de résolution. Pour ce faire, il faut utiliser des simulateurs où la décomposition du domaine est possible. Cette décomposition du domaine géographique permet de le diviser en partie, les équations de chacune des parties sont alors résolues sur différents processeurs en parallèle. Ce type de calcul permet d'optimiser les grappes de calcul disponible actuellement.

L'architecture du simulateur MOR n'est pas adaptée à faire des simulations avec une décomposition du domaine. Cependant, l'ISMER prendra sous peu ce virage en adoptant le simulateur NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean). Les travaux des dernières années effectués par les équipes d'environnement Canada et le Ministère Pêches et océans montrent que ce simulateur arrive maintenant à des résultats semblables à MOR dans le golfe du Saint-Laurent. Nous croyons que ces travaux pourraient aussi être réalisés dans le système de la baie d'Hudson.

2. L'observation des glaces à de fines résolutions est un élément essentiel pour la validation des résultats et l'amélioration des modèles de glace utilisés à de fines échelles. Dany Dumont, professeur en océanographie physique à l'Université du Québec à Rimouski-ISMER, dirige depuis 2014 un programme d'observation de la dynamique de la banquise à fine échelle (résolution entre 1-10 m sur une zone de quelques km² dans l'estuaire du Saint-Laurent) qui pourrait servir de banc d'essai pour des modèles de prévision de glace à haute résolution qui pourrait être utilisée dans des environnements nordiques. Cet observatoire, situé dans le parc national du Bic, a permis d'acquérir une vaste quantité de données de fracture, de déformation et de dérive de la banquise dans une grande diversité de conditions. Des observations in situ en présence de vagues ont notamment permis de mieux comprendre le forçage des vagues et son impact sur la distribution d'épaisseur de la glace (Sutherland et Dumont, en révision). Dans ce contexte, une discussion avec différent intervenant intéressé par le développement technologique des simulateurs de glace à haute résolution serait souhaitable pour discuter et explorer les partenariats possibles pour financer la réalisation de ce projet.

11 Références

Hunke, E. C., & Dukowicz, J. K. (1997). An elastic-viscous-plastic model for sea ice dynamics. *Journal of Physical Oceanography*, 27(9), 1849-1867.

Hunke, E. C., Lipscomb, W. H., & Turner, A. K., Jeffery, N., Elliot, S. (2013). CICE: the Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software User's Manual Version 5.0 LA-CC-06-012. T-3 Fluid Dynamics Group, Los Alamos National Laboratory.

Lemieux, J. F., Knoll, D. A., Tremblay, B., Holland, D. M., & Losch, M. (2012). A comparison of the Jacobian-free Newton–Krylov method and the EVP model for solving the sea ice momentum equation with a viscous-plastic formulation: A serial algorithm study. *Journal of Computational Physics*, 231(17), 5926-5944.

Lemieux, J.-F., Dupont, P. Blain, F. Roy, G. C. Smith, and G. M. Flato (2016), Improving the simulation of landfast ice by combining tensile strength and a parameterization for grounded ridges, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 7354–7368, doi: 10.1002/2016JC012006.

Lemieux, J. F., Tremblay, L. B., Dupont, F., Plante, M., Smith, G. C., & Dumont, D. (2015). A basal stress parameterization for modeling landfast ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(4), 3157-3173.

Olason, E. (2016). A dynamical model of Kara Sea land-fast ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(5), 3141–3158. <https://doi.org/10.1002/2016JC011638>

Saucier, F. J., Senneville, S., Prinsenber, S., Roy, F., Smith, G., Gachon, P., Laprise, R. (2004). Modelling the sea ice-ocean seasonal cycle in Hudson Bay, Foxe Basin and Hudson Strait, Canada. *Climate Dynamics*, 23(3-4), 303-326.

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

Simon Senneville, Irene R. Schloss, Simon St-Onge Drouin, Simon Bélanger, Gesche Winkler, Dany Dumont, Patricia Johnston, Isabelle St-Onge, Moderate effect of damming the Romaine River (Quebec, Canada) on coastal plankton dynamics, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 203, 5 April 2018, Pages 29-43, ISSN 0272-7714, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.02.006>

Senneville, S., & St-Onge Drouin, S. X.006.1 : Étude de la variation des glaces dans le système couplé océan — glace de mer de la baie d'Hudson, Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec, 2013, 63 pages.

Senneville, S., Saucier, F., & Wright, B. (2007). Numerical study of Ice Conditions, Ice Dynamics and Ice Pressure Events near the Gros Cacouna Site in the St. Lawrence Estuary (winters 1996/97 through). In CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment 14th Workshop on

the Hydraulics of Ice Covered Rivers (pp. 1–24). Retrieved from http://cripe.civil.ualberta.ca/Downloads/14th_Workshop/Senneville-et-al-2007.pdf

Warner, J. C., Defne, Z., Haas, K., & Arango, H. G. (2013). A wetting and drying scheme for ROMS. *Computers & Geosciences*, 58, 54-61.

12 Annexe : Fichiers transmis au MTQ sur un NAS

Il y a plusieurs milliers de fichiers sur le NAS, une liste complète des fichiers serait trop longue pour être incluse dans ce document.

12.1 Structure des répertoires

Nous allons donc décrire la structure des répertoires. Dans le répertoire /mnt/HD/HD_a2/Data du NAS, il y a trois répertoires : `oceanique`, `atmosphérique` et `m_files`. Ces répertoires contiennent :

- `oceanique` contient les résultats des simulations océanique et de glace;
 - Qui contient des répertoires au nom des domaines et sous-domaines : `hb10km`, `aup2km`, `aup400`, etc;
 - Qui eux, à leurs tours, contiennent des répertoires `climat` et/ou `temoin`;
 - Donc le chemin complet des résultats de la simulation témoin pour Aupaluk à 400 m de résolution se trouvera dans :
`/mnt/HD/HD_a2/Data/oceanique/aup400/temoin`
- `atmosphérique` contient les forçages atmosphérique;
 - Qui contient des répertoires au nom des domaines et sous-domaines : `hb10km`, `aup2km`, `aup400`, etc;
 - Qui eux, à leurs tours, contiennent des répertoires identifiant le forçage atmosphérique utilisé, de la nomenclature suivante : `atmosphere_type_scénario`.
 - Donc le chemin complet des forçages atmosphériques climatiques de `bbhi` pour `hb10km` est :
`/mnt/HD/HD_a2/Data/atmosphérique/hb10km/atmosphère_climat_bbhi`
- `m_files` contient les « `m_files` » pour la lecture des fichiers en format NetCDF à l'aide de MATLAB.

12.2 Nomenclature des fichiers

Il y a deux nomenclatures différentes, soit une pour les forçages atmosphériques et une autre pour les solutions du simulateur MOR. Pour les détails, chaque fichier est auto-documenté.

- Solutions : `nomdelasolution_année_variable.nc`
 - Variables :
 - IAHI : épaisseur de glace moyenne;
 - ICON : concentration de glace moyenne;
 - SALT : salinité;
 - TEMP : température;

- UICE : vitesse de glace vers l'est;
 - VICE : vitesse de glace vers le nord;
 - UWAT : courant vers l'est;
 - VWAT : courant vers le nord;
 - WLEV : niveau d'eau;
- Atmosphérique : *fatm_nomdedomaine_annéemois_variable.nc*
 - Variables :
 - ES : point de rosée;
 - NT : couvert nuageux;
 - PR : précipitation;
 - TT : température de l'air (2m);
 - UU : vent vers l'est (10 m);
 - VV : vent vers le nord (10 m);