



**Rapport final : Étude de la variation des glaces dans le système couplé
océan – glace de mer de la baie d’Hudson**



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

Rapport final MTQ-Ouranos dans le cadre du projet

**Impacts des changements climatiques sur les infrastructures maritimes du Nunavik et solutions
d’adaptation**

Simon Senneville et Simon St-Onge Drouin

31 mars 2013

Table des matières

Table des figures.....	4
Liste des tableaux.....	8
Résumé.....	9
1 Introduction.....	11
2 Méthodes	11
2.1 Simulations climatiques.....	12
2.2 Méthode des deltas (Rapport mars 2010, juin 2011 et mars 2013)	13
2.2.1 Calcul des deltas	13
2.3 Débiaisage des solutions MRCC-AEV (Rapport juin 2011)	15
2.3.1 Biais de température	15
2.3.2 Débiaisage par quantiles	18
2.3.3 Résultats du débiaisage	21
3 Validation de la simulation témoin glace de mer - océan 2001-2012.....	22
3.1 Observations.....	22
3.1.1 Thermographes	22
3.1.2 Niveaux d'eau	22
3.1.3 Niveaux d'eau à partir des composantes de marée.....	22
3.1.4 Profils CTD (conductivity – temperature - depth)	23
3.1.5 Glace	23
3.2 Validation.....	23
3.2.1 Thermographes	23
3.2.2 Niveaux d'eau	25
3.2.3 Niveaux d'eau à partir des composantes de marée.....	26
3.2.4 Profils CTD (conductivity – temperature - depth)	28
3.2.5 Glace	29
3.2.6 Climat.....	30

4	Résultats – Glace de mer	30
4.1	Simulations climatiques (Rapport mars 2012)	30
4.1.1	Tendances globales, température de l’air et volume de glace	34
4.2	Méthode des deltas (Rapport mars 2012)	35
4.3	Comparaison : Méthode des deltas et simulations climatiques (Rapport mars 2012) .	37
5	Résultats — Océan	40
6	Résultats — Relations empiriques glace de rive	45
6.1	Relations empiriques	45
6.1.1	Quaqtaq	45
6.1.2	Umiujaq	46
6.1.3	Kuujuaq	46
6.2	Comparaison	47
6.3	Séries temporelles des concentrations de GDR du futur et du passé récent	48
6.4	Climatologies de la concentration de GDR	51
6.5	Durée de la saison de GDR	53
6.6	Discussion	58
7	Conclusion	59
	Annexe	60
	Références	63

Table des figures

Figure 1 — Température de l'air à 2 mètres simulée par MRCC-AHJ.	12
Figure 2 — Deltas de température de l'air à la surface pour les périodes 1981-2010 et 2041-2070 pour la simulation MRCC-AHJ. Les valeurs présentées correspondent aux valeurs futures auxquelles sont soustraites les valeurs du passé récent.....	14
Figure 3 — Les différents deltas moyennés sur l'ensemble du domaine sont en noir, les forçages atmosphériques actuels sont en bleu et les forçages atmosphériques modifiés sont en rouge. Sur les 2 dernières sous-figures, l'échelle de droite est associée aux deltas et celle de gauche aux forçages atmosphériques. Les champs atmosphériques sont (a) la température de l'air, (b) la couverture nuageuse, (c) les précipitations et (d) la norme des vents.....	15
Figure 4 — (a) Concentration de glace moyennée sur l'ensemble du domaine pour la période allant de janvier 2007 à janvier 2009. Le trait rouge représente la simulation dont les forçages proviennent de MRCC-AEV et le trait bleu, la simulation témoin. (b) Anomalie entre la simulation climatique et la simulation témoin.....	16
Figure 5 — Biais mensuels de température (MRCC – GEM) moyennés sur l'ensemble du domaine du modèle numérique pour la simulation forcée par (a) MRCC-AEV, (b) MRCC-AHJ.	17
Figure 6 — (a) Concentration de glace moyennée sur l'ensemble du domaine pour la période allant de janvier 2007 à janvier 2009. Le trait rouge représente la simulation dont les forçages proviennent de MRCC-AHJ et le trait bleu, la simulation témoin. (b) Anomalie entre la simulation climatique et la simulation témoin.....	18
Figure 7 — Biais par quantile pour la simulation forcée par MRCC-AEV.	20
Figure 8 — Biais par quantile pour la simulation forcée par MRCC-AHJ.....	20
Figure 9 — (a) Concentration de glace de mer moyennée sur l'ensemble du domaine pour la simulation témoin (trait bleu); la simulation forcée par MRCC-AHJ (trait rouge); la simulation forcée par MRCC-AEV (trait noir) et la simulation forcée par MRCC-AEV débiaisée par quantiles (trait vert). (b) Anomalie (MRCC – témoin) pour la concentration de glace de mer moyennée sur l'ensemble du domaine pour chacune de ces simulations.	21
Figure 10 — Comparaison entre les résultats du modèle (en rouge) et les observations (en bleu) pour l'ensemble des données de thermographes disponibles en 2007. Une carte en haut à gauche et l'encadré à sa droite permettent de positionner et d'interpréter les comparaisons. .	24
Figure 11 — Comparaison entre la variation du niveau d'eau du simulateur (en rouge) et du niveau d'eau à la station de Churchill (en bleu), représentée par un point rouge sur la carte à gauche.	26

Figure 12 — Comparaison entre la variation du niveau d'eau du simulateur (en rouge) et du niveau d'eau reconstitué à partir des composantes de marée (en bleu).	27
Figure 13 — Comparaison de profils de température (en noir) et de salinité (en rouge). Les positions des stations sont présentées sur la première sous-figure. La moyenne (en bleu) et la déviation standard (en rouge) de l'erreur sur la température et la salinité sont présentées sur les deux dernières sous-figures.	28
Figure 14 — Comparaison des résultats du modèle avec les observations du SCG pour (a) la concentration moyenne de glace et (b) le volume de glace total sur l'ensemble des cellules mouillées du domaine. Les observations sont en noir et les résultats du modèle sont en rouge. La dernière catégorie de glace du SCG est fixée à 170 cm.....	29
Figure 15 — Concentration (a) et volume total de glace de mer (b) des simulations climatiques pour le domaine entier.....	31
Figure 16 – Moyennes mensuelles de la concentration de glace pour le passé récent (1981-2010) (1 ^e rangée) et l'horizon 2055 (2041-2070) (2 ^e rangée) pour décembre (a et e), janvier (b et f), juin (c et g) et juillet (d et h) (MRCC-AHJ).....	32
Figure 17 – Anomalie relative de l'épaisseur de glace moyennée sur la période hivernale (janvier-février-mars-avril) entre l'horizon 2055 (2041-2070) et le passé récent (1981-2010) (MRCC-AHJ).	33
Figure 18 — Moyennes mobiles de 30 ans du volume maximal annuel de glace (a) et de la température de l'air (b).	34
Figure 19— Régression linéaire de type $y=a(x-b)$ de la moyenne mobile de 30 ans du volume maximal annuel de glace de mer en fonction de la moyenne mobile de 30 ans de la température de l'air à 2m.	35
Figure 20 — Concentration (a) et volume de glace de mer (b) des simulations des deltas pour le domaine entier.	37
Figure 21 — Comparaison des concentrations (a) et volumes de glace de mer (b) des simulations climatiques et des deltas pour le domaine entier.....	39
Figure 22 – Cycle annuel de la température de l'eau des 10 premiers mètres (a) de la baie James; (b) de la baie d'Hudson; (c) du détroit d'Hudson; (d) du bassin de Foxe; (e) de l'ensemble du domaine et (f) température moyenne de l'ensemble du domaine intégré sur toute la profondeur (MRCC-AHJ).	40
Figure 23 — Température de l'eau de surface (10 premiers mètres) moyennée de 2002 à 2012 pour la simulation témoin (1 ^e rangée) et variation de la température de l'eau de surface entre le passé récent (1981-2010) et l'horizon 2055 (2041-2070) (2 ^e rangée) pour janvier-février-mars	

(a), avril-mai-juin (b), juillet-août-septembre (c) et octobre-novembre-décembre (d) (MRCC-AHJ)..... 42

Figure 24 – Moyennes saisonnières de la différence de quantité de chaleur normalisée par rapport à la profondeur entre l’horizon 2055 (2041-2070) et le passé récent (1981-2010) pour janvier-février-mars (a), avril-mai-juin (b), juillet-août-septembre (c) et octobre-novembre-décembre (d) (MRCC-AHJ)..... 43

Figure 25 – (a) Profils moyens de la température de l’eau pour la cellule $i = 115$ et $k = 53$ (point P1 sur la Figure 26) pour le passé récent (trait bleu) et l’horizon 2055 (trait rouge). (b) Profil de la différence de température de l’eau (horizon 2055 – passé récent). 44

Figure 26 — Carte de la bathymétrie du SBH. Le point P1 est celui où le profil moyen présenté sur la Figure 25 a été calculé. 44

Figure 27 — Séries temporelles de la GDR observée à l’aide des appareils photo (cercles rouges) et de la GDR modélisées à partir des relations empiriques et des sorties du simulateur (ligne bleue)..... 47

Figure 28 — Séries temporelles de la GDR pour Quaqtq, de la simulation MRCC-AHJ. Les années sont sur l’axe vertical (de 1981 à 2070), les mois sur l’axe horizontal et l’échelle de couleurs représente la fraction de la région couverte par la GDR..... 49

Figure 29 — Séries temporelles de la GDR pour Umiujaq, de la simulation MRCC-AHJ. Les années sont sur l’axe vertical (de 1981 à 2070), les mois sur l’axe horizontal et l’échelle de couleurs représente la fraction de la région couverte par la GDR..... 50

Figure 30 — Séries temporelles de la GDR pour Kuujjuaq, de la simulation MRCC-AHJ. Les années sont sur l’axe vertical (de 1981 à 2070), les mois sur l’axe horizontal et l’échelle de couleurs représente la fraction de la région couverte par la GDR..... 51

Figure 31 — Climatologie des concentrations de GDR pour Quaqtq, Umiujaq et Kuujjuaq. 52

Figure 32 – Durée, en jours, de la saison de GDR de 1981 à 2070 pour le village de Quaqtq. Le trait gras en rouge est une moyenne mobile sur une période de 30 ans. 54

Figure 33 — Durée, en jours, de la saison de GDR de 1981 à 2070 pour le village d’Umiujaq. Le trait gras en rouge est une moyenne mobile sur une période de 30 ans. 54

Figure 34 — Durée, en jours, de la saison de GDR de 1981 à 2070 pour le village de Kuujjuaq. Le trait gras en rouge est une moyenne mobile sur une période de 30 ans. 55

Figure 35 – Nombre de jours pour lesquels la concentration de GDR est comprise entre 1 % et 30 % pour le village de Quaqtq. Le trait gras en rouge est une moyenne mobile sur une période de 30 ans. 56

Figure 36 — Nombre de jours pour lesquels la concentration de GDR est comprise entre 1 % et 30 % pour le village d’Umiujaq. Le trait gras en rouge est une moyenne mobile sur une période de 30 ans.	56
Figure 37 — Nombre de jours pour lesquels la concentration de GDR est comprise entre 1 % et 30 % pour le village de Kuujjuaq. Le trait gras en rouge est une moyenne mobile sur une période de 30 ans.	57
Figure 38 — Séries temporelles de la GDR pour Quaqtuaq, de la simulation MRCC-AEV-bTq. Les années sont sur l’axe vertical (de 1981 à 2070), les mois sur l’axe horizontal et l’échelle de couleurs représente la fraction de la région couverte par la GDR.....	60
Figure 39 — Séries temporelles de la GDR pour Umiujaq, de la simulation MRCC-AEV-bTq. Les années sont sur l’axe vertical (de 1981 à 2070), les mois sur l’axe horizontal et l’échelle de couleurs représente la fraction de la région couverte par la GDR.....	61
Figure 40 — Séries temporelles de la GDR pour Kuujjuaq, de la simulation MRCC-AEV-bTq. Les années sont sur l’axe vertical (de 1981 à 2070), les mois sur l’axe horizontal et l’échelle de couleurs représente la fraction de la région couverte par la GDR.....	62

Liste des tableaux

Tableau 1 — Régression linéaire de type $y = a(x - b)$ de la moyenne mobile du volume maximal de glace de mer en fonction de la température de l'air	35
Tableau 2 — Sommaire des moyennes sur le domaine	38
Tableau 3 — Augmentation de la température de l'eau.....	41
Tableau 4 — Coefficients de corrélation entre la GDR observée et la GDR obtenue des relations empiriques.....	48
Tableau 5 – Taux de diminution de la durée de la saison de GDR	53
Tableau 6 — Variation de la saison de GDR	57

Résumé

Cette étude est réalisée dans le cadre d'un projet dirigé depuis 2009 par le ministère des Transports du Québec. Ce projet s'intitule : «Impacts des changements climatiques sur les infrastructures maritimes du Nunavik et solutions d'adaptation». Les infrastructures choisies sont situées à Umiujaq, Quaqaq et Kuujuaq.

Notre étude dans ce projet comporte deux objectifs. Le premier objectif consiste à déterminer le climat des glaces de mer à l'aide d'un simulateur numérique dans la perspective des changements climatiques. Les deux périodes visées sont 1981-2010 et 2041-2070. Le second objectif est d'établir une relation entre la glace de rive et les variables du simulateur océan – glace de mer afin de simuler la glace de rive dans un climat futur.

Pour ce faire, nous utilisons les résultats provenant de deux simulations atmosphériques climatiques pour forcer deux simulations océan-glace de mer sur une période de 90 années chacune. Les forçages atmosphériques proviennent du consortium OURANOS. Ces simulations sont nommées MRCC-AEV et MRCC-AHJ.

Dans le passé, dû à des temps de calcul beaucoup trop importants, nous utilisons la méthode des deltas afin de faire des études de sensibilité du simulateur à une variation des forçages atmosphériques. Cependant, cette technique a des lacunes, tant au niveau de la fréquence des événements météorologiques futurs que de l'évolution de l'océan. Pour ce projet, nous avons produit des simulations complètes sur une période de 90 années. Les résultats obtenus de ces simulations climatiques sont différents de ceux obtenus des analyses de sensibilité. Ces différences sont visibles lors de l'analyse des variables océaniques et des variables associées à la glace de mer. Cela confirme l'importance de faire des simulations complètes maintenant que la technologie le permet.

Les principaux résultats de ces simulations prédisent une diminution de la durée de la saison de glace de mer de 41.5 et 36.5 jours, respectivement pour les simulations MRCC-AHJ et MRCC-AEV-bTq. En ce qui concerne la diminution du volume maximal de glace de mer, nous obtenons une diminution de 23 % (MRCC-AHJ) et 22 % (MRCC-AEV-bTq) des valeurs maximales atteintes dans le passé récent. Nous avons également établi une relation importante entre la température de l'air à 2 m et le volume maximal annuel de glace de mer.

En ce qui a trait à la glace de rive, nous avons établi des relations empiriques entre les variables environnementales observées et modélisées et les observations de glaces de rive. La glace de rive simulée, à l'aide de cette relation empirique, reproduit de 77 % à 89 % de la variabilité des observations. Cela nous permet de projeter ces relations pour l'horizon 2055 et d'anticiper un retard de 20, 22 et 12 jours de l'apparition des glaces de rive ainsi qu'un retrait avancé de 9, 17 et 4 jours aux abords des infrastructures des villages d'Umiujaq, Quaqaq et Kuujuaq. Les saisons de glaces de rive seront donc respectivement écourtées de 29, 39 et 16 jours.

Ces travaux sont originaux et nous sommes les premiers, à notre connaissance, à disposer des outils pour produire ces simulations climatiques régionales de glace de la baie d'Hudson pour l'horizon 2055.

1 Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet « Impacts des changements climatiques sur les infrastructures maritimes du Nunavik et solutions d'adaptation » du Ministère des Transports du Québec (MTQ) et comporte deux objectifs principaux. Le premier objectif consiste à déterminer le climat des glaces de mer à l'aide d'un simulateur numérique dans la perspective des changements climatiques. Les deux périodes visées sont 1981-2010 et 2041-2070. Une simulation complète a été produite afin de représenter correctement l'inertie du milieu océanique. Le second objectif est d'établir une relation entre la glace de rive et les variables du simulateur océan – glace de mer afin de simuler la glace de rive dans un climat futur.

Pour ce faire, le programme de recherche comprend 3 volets. Le premier volet est l'établissement d'un climat des glaces de mer du passé récent, 1981-2010. Le second volet est l'étude du climat des glaces de mer pour les années centrées sur 2055, soit 2041-2070 (voir section 4). Le troisième volet consiste en une étude empirique des relations entre les glaces de rive et les variables du simulateur océan – glace de mer (voir section 6).

Ce rapport fait la synthèse des 4 rapports d'étapes et annexe précédents en plus d'ajouter de nouveaux éléments sur le climat de la partie océanique du système de la baie d'Hudson (SBH). À la section 2, nous introduisons les méthodes utilisées afin de prédire les glaces de mer. À la section 3, nous validons le simulateur océan — glace de mer à l'aide de la simulation témoin. À la section 4, nous présentons les résultats de la glace de mer. La section 5 s'attarde aux résultats océaniques du SBH. Finalement, à la section 6, nous présentons les relations empiriques ainsi que leurs prédictions. Une conclusion soulignant les principaux résultats suit à la section 7.

2 Méthodes

Dans le cadre de ce projet, 2 méthodes ont été utilisées pour prédire le climat de glace de mer pour l'horizon 2055 : la méthode des simulations climatiques et la méthode des deltas. Ces deux méthodes sont décrites dans les deux sous-sections suivantes.

2.1 Simulations climatiques

Pour cette première méthode, nous utilisons les résultats provenant de deux simulations atmosphériques climatiques pour forcer deux simulations océan-glace de mer sur une période de 90 années chacune. Les champs atmosphériques utilisés sont les suivants :

1. La température de l'air à 2 m (Figure 1);
2. La couverture nuageuse totale;
3. Le module et la direction des vents à 10 m;
4. Les précipitations cumulées;
5. La température du point de rosée.

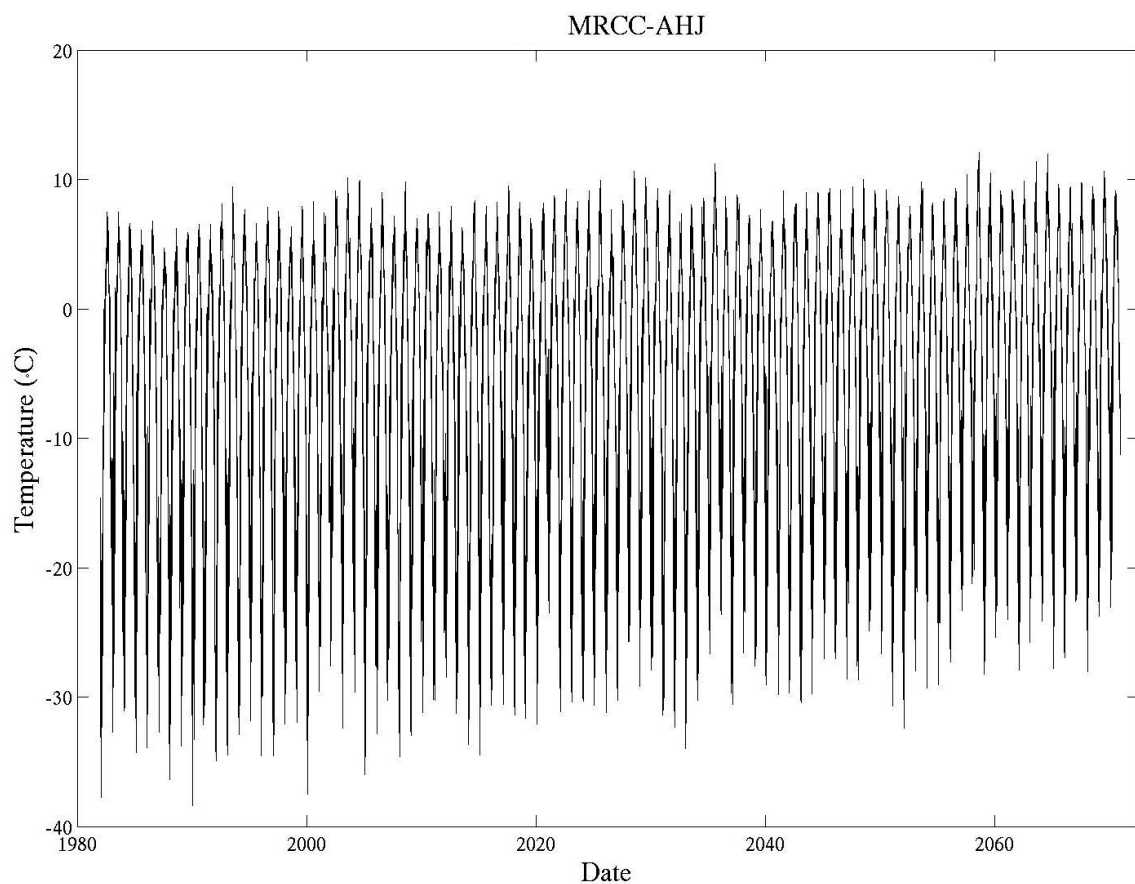


Figure 1 — Température de l'air à 2 mètres simulée par MRCC-AHJ.

Les forçages atmosphériques utilisés dans ces simulations proviennent des résultats de deux simulations climatiques différentes générées par :

1. La version 4.2.3 du Modèle Régional Climatique Canadien (simulation MRCC-AEV), piloté par le membre 5 du CGCM3.1/t47 suivant le scénario SRES A2 du GIEC;

2. La version 4.2.3 du MRCC (simulation MRCC-AHJ), piloté par le membre 3 de modèle global ECHAM5 suivant le scénario 20C3M du GIEC;

L'appellation MRCC-AEV et MRCC-AHJ sera utilisée, dans la suite du rapport, pour référer à chacune de ces simulations climatiques. Le suffixe bTq est ajouté à la suite de MRCC-AEV lorsqu'il est question de la simulation pour laquelle la température de l'air est débiaisée par quantiles (voir section 2.3). Il est à noter que seules ces deux simulations étaient disponibles lors de la phase de démarrage des simulations océan — glace de mer. Les forçages atmosphériques climatiques sont fournis par le consortium OURANOS.

2.2 Méthode des deltas (Rapport mars 2010, juin 2011 et mars 2013)

La méthode des deltas est la seconde méthode utilisée dans le cadre de ce projet pour évaluer l'impact des changements climatiques sur la dynamique des glaces dans le SBH. C'est en fait un analyse de sensibilité du simulateur océan – glace de mer à des forçages externes.

Comme présentés dans le rapport d'étape II, les deltas ont été calculés à partir des résultats de la simulation MRCC-AHJ. En effet, les résultats de MRCC-AEV comportent un biais froid de température d'environ 3° Celsius (voir section 2.3). Étant donné l'absence de biais de température de MRCC-AHJ pour le passé récent, il nous paraissait adéquat d'utiliser MRCC-AHJ plutôt que MRCC-AEV.

Dans le texte qui suit, le terme delta ne désigne pas toujours une différence de deux champs, mais peut référer au facteur multiplicatif imposé à un champ. Le delta est additif pour la température de l'air et est multiplicatif pour les autres forçages atmosphériques.

2.2.1 Calcul des deltas

Une première simulation, la simulation témoin, se doit d'être le plus réaliste possible afin d'être validée à l'aide d'observations. La seconde simulation, la simulation delta, est en tout point identique mis à part un ou plusieurs champs atmosphériques qui sont modifiés par une variation de ce champ en fonction du mois et de la position géographique. Les détails pour obtenir les deltas de température sont explicités dans Joly et coll. (2009) en annexe III du rapport I (Senneville et Demers, 2011). En résumé, il s'agit de la moyenne mensuelle, sur 30 ans, des différences entre les champs de température de surface provenant de la simulation MRCC_AHJ pour la période 1981-2010 et la période 2041-2070.

En observant la valeur des deltas de température, l'inhomogénéité spatiale de ces deltas pour les mois de décembre, janvier et février est marquante (Figure 2). Nous croyons que cette inhomogénéité spatiale est fortement liée au passage, pour une sous-région, d'un état où elle est couverte de glace à un état où elle est libre de glace pour un mois donné. Les échanges thermodynamiques résultants font en sorte que l'eau, libre de glace, réchauffe l'air à la surface. Toutefois, pour valider cette hypothèse, il aurait fallu être en possession des résultats du modèle de glace utilisé par le MRCC.

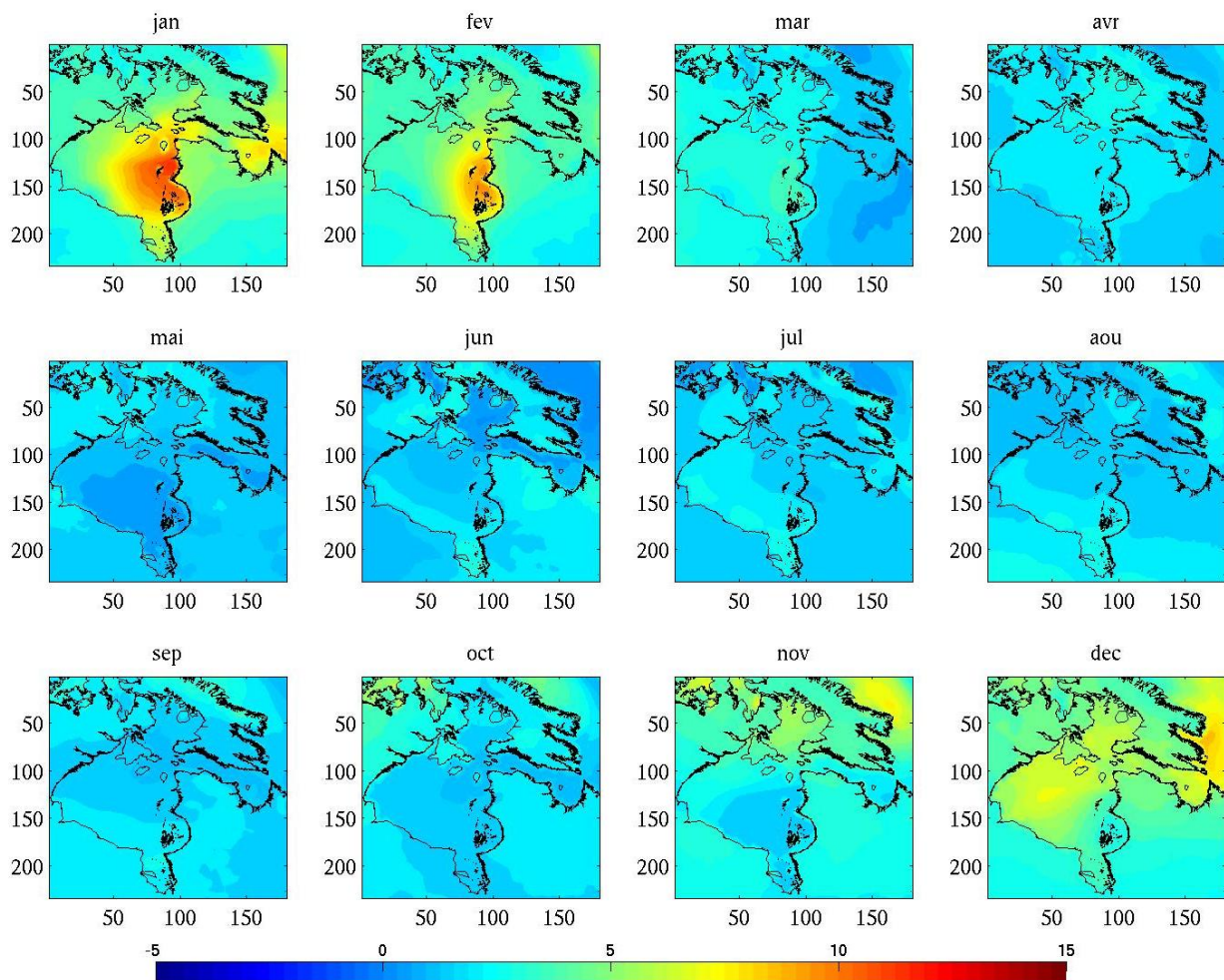


Figure 2 — Deltas de température de l'air à la surface pour les périodes 1981-2010 et 2041-2070 pour la simulation MRCC-AHJ. Les valeurs présentées correspondent aux valeurs futures auxquelles sont soustraites les valeurs du passé récent.

La Figure 3 présente les différents deltas moyennés sur l'ensemble du domaine (trait noir) ainsi que les séries temporelles des forçages atmosphériques moyens pour une période allant d'août 2002 à août 2003. Les forçages atmosphériques moyens actuels sont en bleu et les forçages atmosphériques moyens modifiés par l'application des deltas sont en rouge.

On peut voir que les valeurs moyennes des deltas de température, de couverture nuageuse et de précipitation ont un maximum pour les mois de janvier. En juin, les deltas de précipitations et de couverture nuageuse atteignent à nouveau des valeurs relativement élevées, et les deltas du module des vents sont à leur maximum.

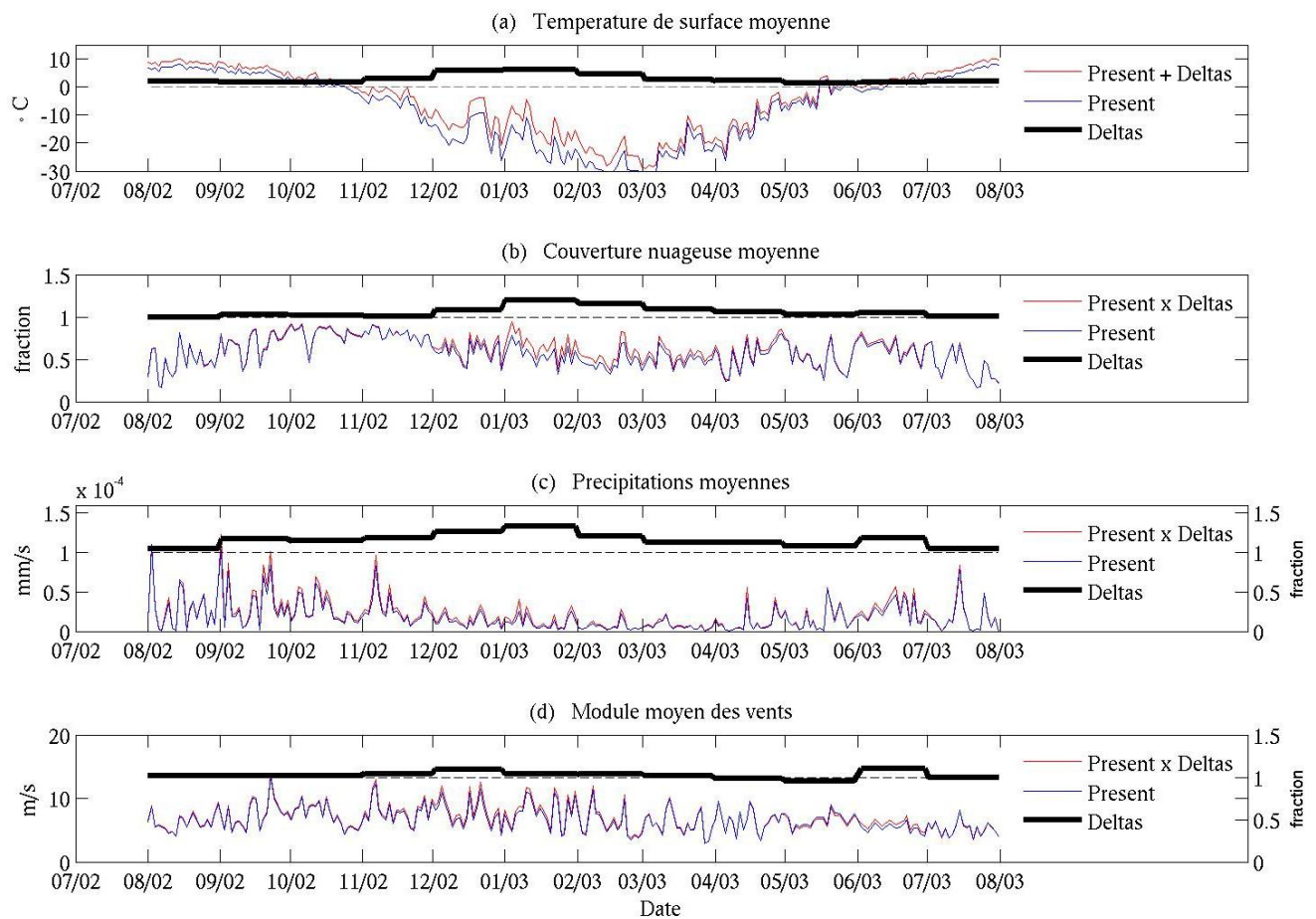


Figure 3 — Les différents deltas moyennés sur l'ensemble du domaine sont en noir, les forçages atmosphériques actuels sont en bleu et les forçages atmosphériques modifiés sont en rouge. Sur les 2 dernières sous-figures, l'échelle de droite est associée aux deltas et celle de gauche aux forçages atmosphériques. Les champs atmosphériques sont (a) la température de l'air, (b) la couverture nuageuse, (c) les précipitations et (d) la norme des vents.

2.3 Débiaisage des solutions MRCC-AEV (Rapport juin 2011)

2.3.1 Biais de température

Une première simulation a été effectuée en utilisant les forçages MRCC-AEV. La comparaison avec la simulation témoin a permis de mettre en évidence une forte anomalie entre la concentration moyenne de glace de la simulation témoin et celle de la simulation forcée par

MRCC-AEV (Figure 4). La simulation forcée par MRCC-AEV a une couverture de glace anormalement élevée durant la période allant de juillet-août à décembre. Cette anomalie est observée pour toutes les années simulées (seulement 2007 et 2008 sont présentées sur la figure) alors que, en temps normal, le SBH se découvre presque totalement durant cette période. Seul le bassin de Foxe y conserve occasionnellement une légère couverture de glace.

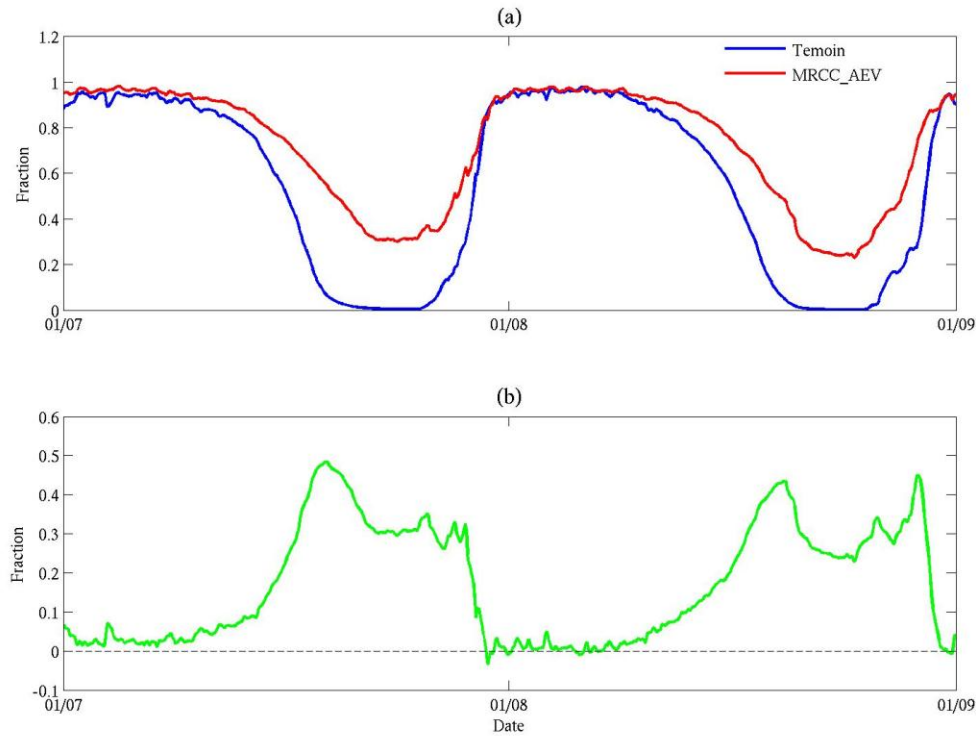


Figure 4 — (a) Concentration de glace moyennée sur l'ensemble du domaine pour la période allant de janvier 2007 à janvier 2009. Le trait rouge représente la simulation dont les forçages proviennent de MRCC-AEV et le trait bleu, la simulation témoin. (b) Anomalie entre la simulation climatique et la simulation témoin.

Après investigation, il s'est avéré évident que cette anomalie est causée, en partie du moins, par un biais froid de la température de l'air : les températures générées par les simulations climatiques étant plus froides que la température observée, du moins pour MRCC-AEV (Figure 5). Malgré les inconvénients associés à cette constatation, cela a tout de même permis de réaliser que le SBH est un système très sensible. En effet, une légère baisse de la température de l'air permet de passer d'un système sans glace pluriannuelle à un système avec glace pluriannuelle.

Les biais mensuels de température de l'air présentés sur la Figure 5 représentent une moyenne mensuelle sur 9 années des différences de température (moyennées spatialement sur l'ensemble du domaine) entre les résultats d'une simulation climatique et les réanalyses de

Global environmental multi-scale (GEM) du Centre Météorologique Canadien (CMC) utilisé pour la simulation témoin. Cette moyenne est calculée sur la période allant de 2001 à 2009.

La simulation climatique pilotée par le CGCM3.1, soit MRCC-AEV, a un biais froid de température de l'air. Ce biais atteint une valeur maximale de -6°C en août et la moyenne est légèrement en deçà de -3°C . Pour la simulation climatique MRCC-AHJ, qui est pilotée par ECHAM5, la moyenne annuelle du biais est pratiquement nulle avec une valeur de 0.1°C . Toutefois, ce biais est d'environ $+1.5^{\circ}\text{C}$ pour les mois de mars, avril et mai et il est compris entre -1°C et -2°C pour les mois de juillet à octobre.

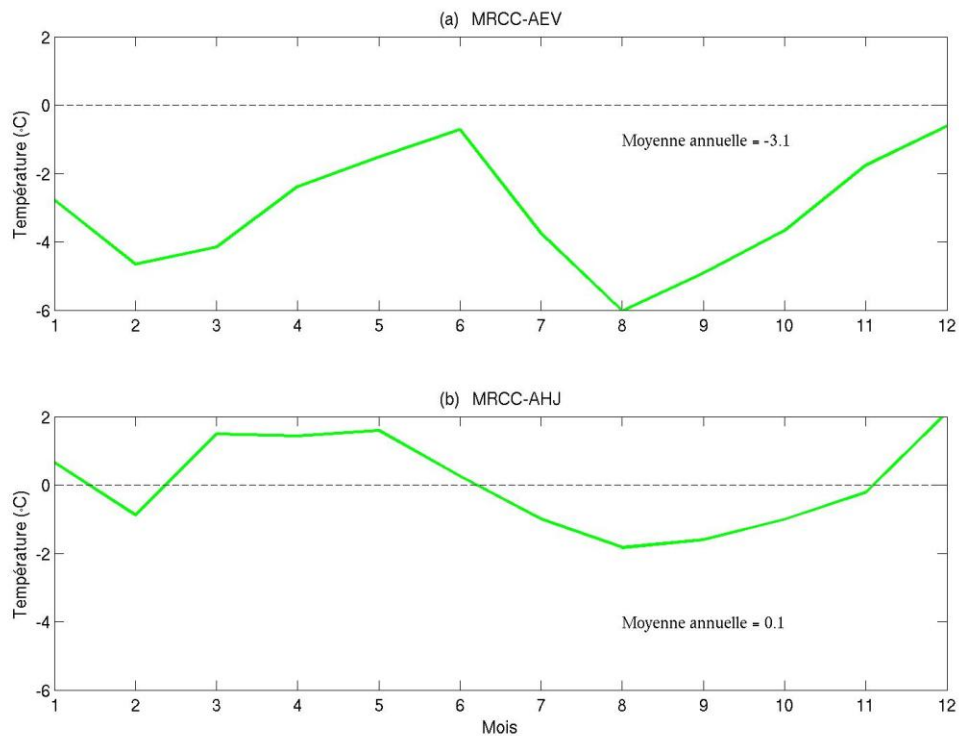


Figure 5 — Biais mensuels de température (MRCC – GEM) moyennés sur l'ensemble du domaine du modèle numérique pour la simulation forcée par (a) MRCC-AEV, (b) MRCC-AHJ.

La concordance avec la simulation témoin de la concentration moyenne de glace lorsque le modèle est forcé par MRCC-AHJ est nettement supérieure (Figure 6).

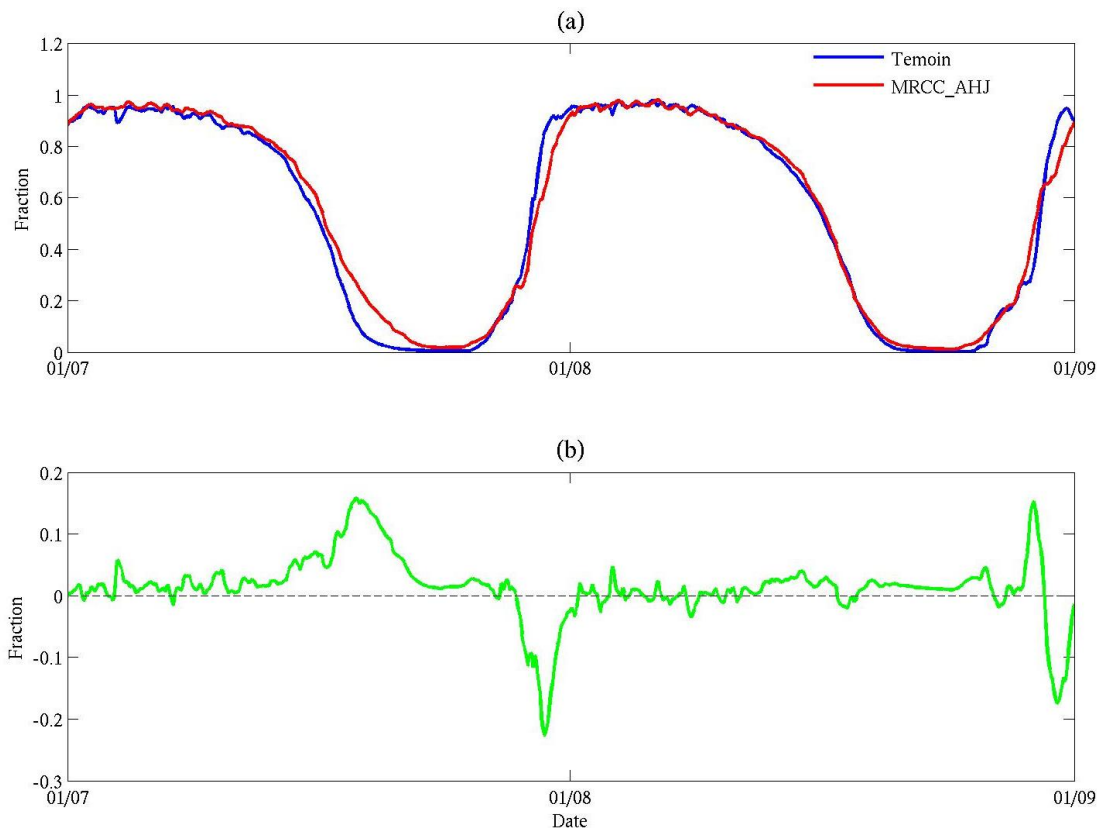


Figure 6 — (a) Concentration de glace moyennée sur l'ensemble du domaine pour la période allant de janvier 2007 à janvier 2009. Le trait rouge représente la simulation dont les forçages proviennent de MRCC-AHJ et le trait bleu, la simulation témoin. (b) Anomalie entre la simulation climatique et la simulation témoin.

2.3.2 Débiaisage par quantiles

Dans le but de parer au problème du biais froid de température, 3 méthodes de débiaisage ont été évaluées sur les forçages atmosphériques générés par MRCC-AHJ et par MRCC-AEV :

1. biais moyens;
2. biais spatiaux;
3. biais par quantiles.

La méthode de débiaisage par quantiles s'est avérée être la plus efficace. Nous ne décrivons donc que cette méthode et ses résultats dans ce rapport. Le lecteur est référé au rapport d'étape II pour une définition des autres méthodes et une comparaison des résultats.

Tout d'abord, les biais sont calculés mensuellement. Les biais ne sont pas fonction de la position géographique, mais plutôt du quantile associé à une température donnée. L'intérêt de cette méthode tient dans le fait que les valeurs extrêmes ont tendance à être biaisées différemment

des autres. Le détail de la méthode est décrit par Anandhi, Frei et coll. (2011 a) dans le cadre de l'application de la méthode des deltas. Les principales étapes sont décrites ci-dessous :

1. Lire l'ensemble des valeurs de température à débiaiser pour un mois donné et pour l'ensemble des cellules au-dessus d'un point mouillé du domaine, puis diviser cette série de données en un certain nombre de sous-ensembles, appelés quantiles (25 dans notre cas, tel que suggéré par Anandhi, Frei et coll. (2011);
2. Répéter pour chacune des années (2001 à 2009), puis faire la moyenne de chaque quantile;
3. Répéter les étapes 1 et 2 pour la température de l'air à la surface des données témoin;
4. Calculer les biais de température en soustrayant séparément chaque quantile de ces moyennes mensuelles:

$$B_{m,q} = \overline{T_{bad,m,q}} - \overline{T_{t,m,q}}$$

où $B_{m,q}$ est le biais pour le mois m et le quantile q ; $\overline{T_{bad,m,q}}$ est la moyenne mensuelle de la température des données à débiaiser pour le mois m et le quantile q ; et $\overline{T_{t,m,q}}$ est la moyenne mensuelle de la température des données témoin pour le mois m et le quantile q (Figure 7 et Figure 8).

5. Pour chaque mois de chacune des années des forçages à débiaiser, répéter l'étape 1;
6. Soustraire les biais pour chacun des 25 quantiles :

$$T_{q,t} = T_{bad,q,t} - B_{m,q}$$

où $T_{q,t}$ est la température débiaisée au temps t pour le quantile q ; $T_{bad,q,t}$ est la température des données à débiaiser au temps t pour le quantile q et $B_{m,q}$ est le biais pour le mois m et le quantile q .

7. Remplacer les nouvelles données de température de surface débiaisées au bon endroit (spatialement et temporellement).

Cette méthode est plus longue à appliquer puisqu'elle nécessite la construction de nouveaux fichiers de forçages atmosphériques. Avec les 2 autres méthodes, le modèle numérique applique « au vol » les biais aux forçages atmosphériques à débiaiser.

Les biais par quantile calculés pour MRCC-AHJ et MRCC-AEV présentent plusieurs similarités de structures mais l'amplitude des biais est plus élevée pour MRCC-AEV (Figure 7 et Figure 8).

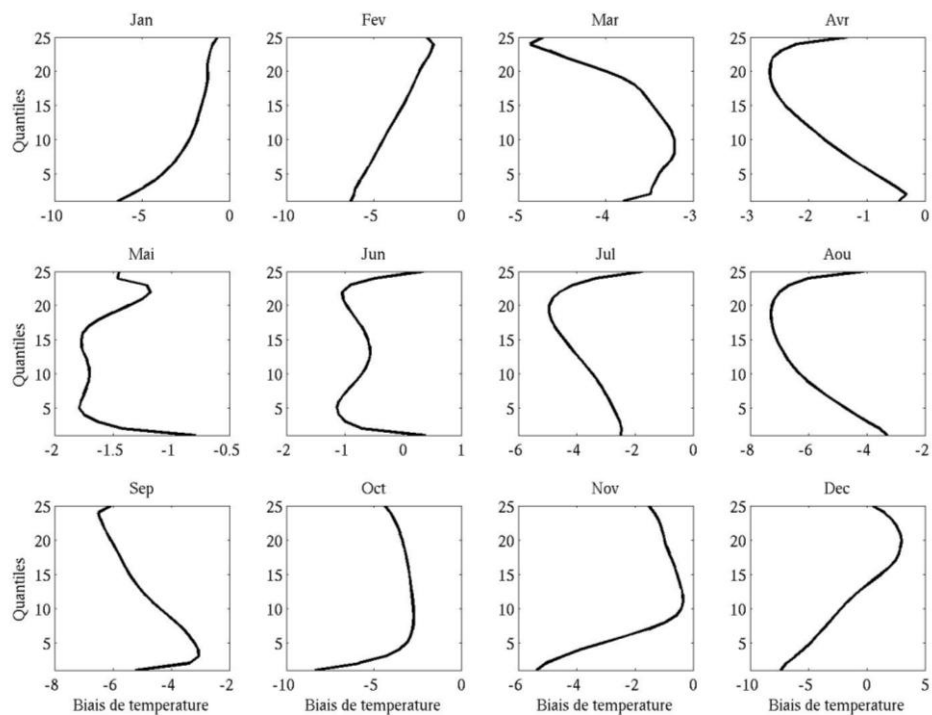


Figure 7 — Biais par quantile pour la simulation forcée par MRCC-AEV.

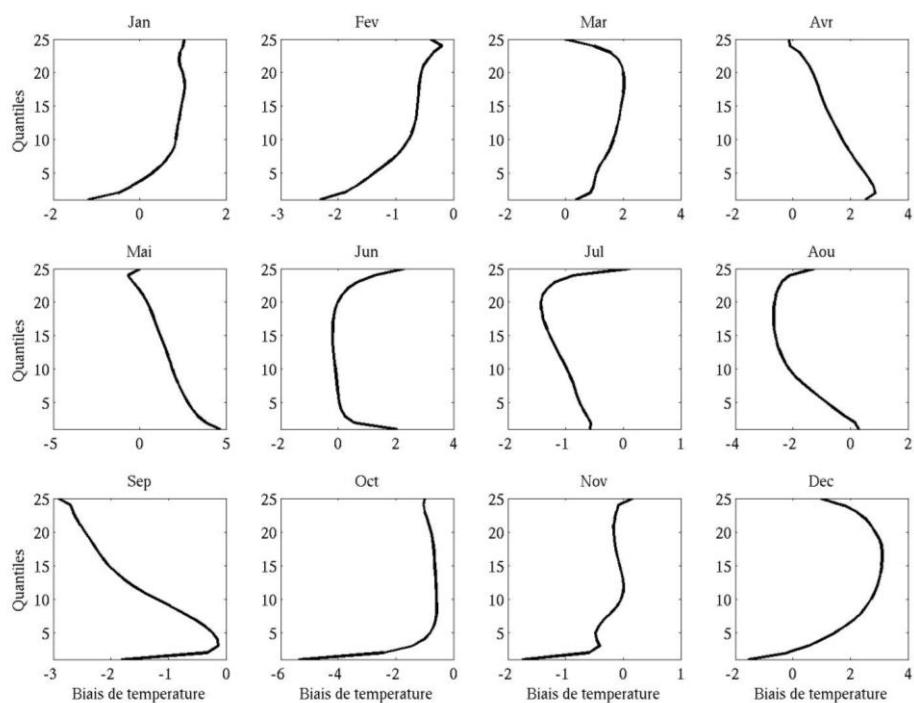


Figure 8 — Biais par quantile pour la simulation forcée par MRCC-AHJ.

2.3.3 Résultats du débiaisage

Si le débiaisage des solutions climatiques améliore la prédiction de la concentration de la glace de mer, il diminue en même temps la cohérence physique entre les différents champs atmosphériques. Le choix de débiaiser doit donc corriger une lacune importante pour justifier de sacrifier la cohérence physique des champs atmosphériques. L'amélioration des résultats de concentration de glace obtenus par le débiaisage par quantiles de MRCC-AHJ étant moindres (voir le Rapport II pour les détails), seule MRCC-AEV a été débiaisée de cette façon. En effet, nous considérons les résultats de MRCC-AHJ satisfaisant.

Le débiaisage par quantiles des solutions de température de l'air produites par MRCC-AEV améliore nettement la prédiction de la concentration de glace de mer (Figure 9). Sur la période de 2001 à 2010, la déviation standard de l'anomalie passe de 0.1607 à 0.0652 lorsque MRCC-AEV est débiaisée pas quantiles, et l'erreur moyenne passe de 0.1676 à 0.0128. Pour MRCC-AHJ, la déviation standard de l'anomalie est de 0.1009 et l'erreur moyenne est de -0.0188.

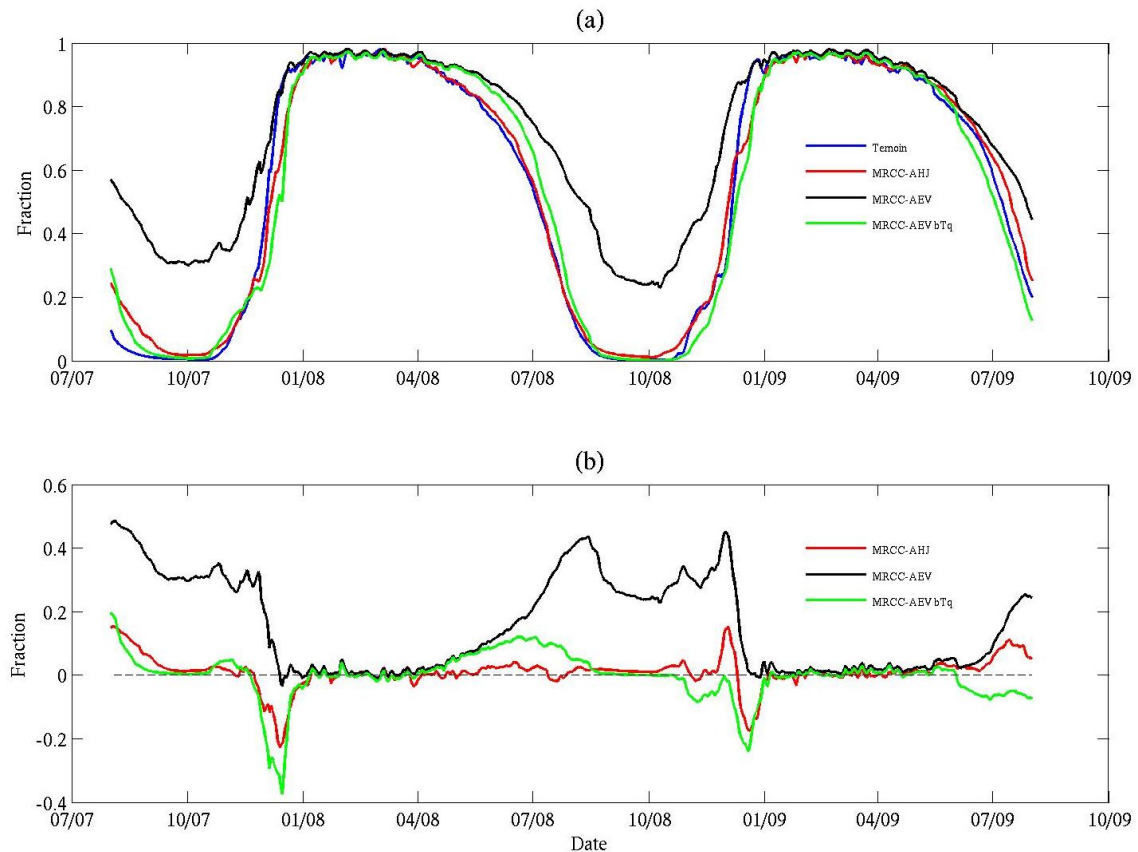


Figure 9 — (a) Concentration de glace de mer moyennée sur l'ensemble du domaine pour la simulation témoin (trait bleu); la simulation forcée par MRCC-AHJ (trait rouge); la simulation forcée par MRCC-AEV (trait noir) et la simulation forcée par MRCC-AEV débiaisée par quantiles (trait vert). (b) Anomalie (MRCC – témoin) pour la concentration de glace de mer moyennée sur l'ensemble du domaine pour chacune de ces simulations.

3 Validation de la simulation témoin glace de mer - océan 2001-2012

Dans le cadre d'une étude basée sur des simulations numériques, une étape essentielle est de valider les modèles utilisés. Cette étape est nécessaire afin d'avoir confiance dans les prédictions produites par ce modèle. Au moment de l'écriture de ce rapport, la simulation témoin océan — glace de mer était complétée jusqu'au 31 août 2012. Cette section présente une validation générale des résultats du simulateur pour la période 2001-2012. Toutefois, à l'exception des données de concentration et d'épaisseur de glace, peu d'observations sont disponibles au-delà de 2007.

3.1 Observations

Cette sous-section décrit le type d'observations utilisées afin de valider le simulateur et permet d'établir la provenance de ces observations.

3.1.1 Thermographes

Les résultats du modèle ont été comparés avec les données de thermographes mouillés extraites du SGDO et celles provenant des missions MERICA. La totalité des données à l'intérieur du domaine du modèle, pour la période allant d'août 2001 à août 2012, a été retenue. Les solutions du modèle ont été interpolées linéairement sur la verticale afin que la profondeur concorde avec celle des observations. Lorsque la position des observations ne correspondait pas à une cellule mouillée du modèle, la cellule mouillée la plus proche a été utilisée.

Référence : Pêches et Océans Canada — région du Québec
Système de gestion des données océanographiques (SGDO)
Adresse : Institut Maurice-Lamontagne, Mont-Joli (Québec) Canada
<<http://www.osl.gc.ca/sgdo>>

3.1.2 Niveaux d'eau

Les résultats du modèle ont été comparés avec les données de mouillage d'enregistreurs de niveau d'eau extraites du MPO. Une seule station, la station de Churchill, est disponible pour la période de la simulation. Les données comparées sont en fait l'écart au niveau d'eau moyen, défini comme la moyenne du niveau d'eau sur la totalité de la série temporelle, modélisée ou observée.

Référence : Pêches et Océans Canada — région du Québec
Archives canadiennes des données sur les marées et niveaux d'eau
<http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca>

3.1.3 Niveaux d'eau à partir des composantes de marée

Les résultats du modèle ont été comparés avec les séries temporelles de niveaux d'eau générés à partir des composantes de marée à différentes stations. Ces composantes ont été obtenues du Service Hydrographique Canadien (SHC). Les données comparées sont en fait l'écart au niveau d'eau moyen, défini comme la moyenne du niveau d'eau sur la totalité de la série temporelle, modélisée ou observée.

Référence: Pêches et Océans Canada — région du Québec
Service Hydrographique Canadien
Adresse : Institut Maurice-Lamontagne, Mont-Joli (Québec) Canada

3.1.4 Profils CTD (conductivity – temperature - depth)

Les résultats du modèle ont été comparés avec les données de CTD extraites du SGDO et celles provenant des missions MERICA. La totalité des données à l'intérieur du domaine du modèle, pour la période allant d'août 2001 à août 2012, a été retenue. Les données dont le sémaphore du contrôle de qualité indiquait une valeur correcte (égale à 1) ont été retenues, les autres ont été rejetées.

Les données ont été moyennées sur la verticale de façon à obtenir 36 couches d'épaisseur allant de 10 à 50 m, épaisseur concordant avec l'épaisseur des cellules du modèle.

Référence : Pêches et Océans Canada — région du Québec
Système de gestion des données océanographiques (SGDO)
Adresse : Institut Maurice-Lamontagne, Mont-Joli (Québec) Canada
<<http://www.osl.gc.ca/sgdo>>

3.1.5 Glace

Les résultats du modèle ont été comparés avec les données de concentration et d'épaisseur de glace obtenues des cartes de glace du Service Canadien des Glaces (SCG). Ces données ont d'abord été traitées puis interpolées sur la grille du modèle par l'équipe de l'INRS. Pour les données d'épaisseur de glace obtenues du SCG, la dernière catégorie de glace a été fixée à 170 cm.

Référence: Environnement Canada
Service Canadien des Glaces

3.2 Validation

3.2.1 Thermographes

La Figure 10 montre la comparaison des résultats du simulateur océan – glace de mer avec 14 séries temporelles de température pour l'année 2007. La première sous-figure en haut à gauche représente une carte du SBH. 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 10. On y voit, en bleu, la série temporelle de la température obtenue du thermographe situé à la station 3, 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 0.08089 °C au-dessus de la température observée. La déviation standard de l'erreur est de 0.066268 °C. La déviation standard de la température est de 0.085371 °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.

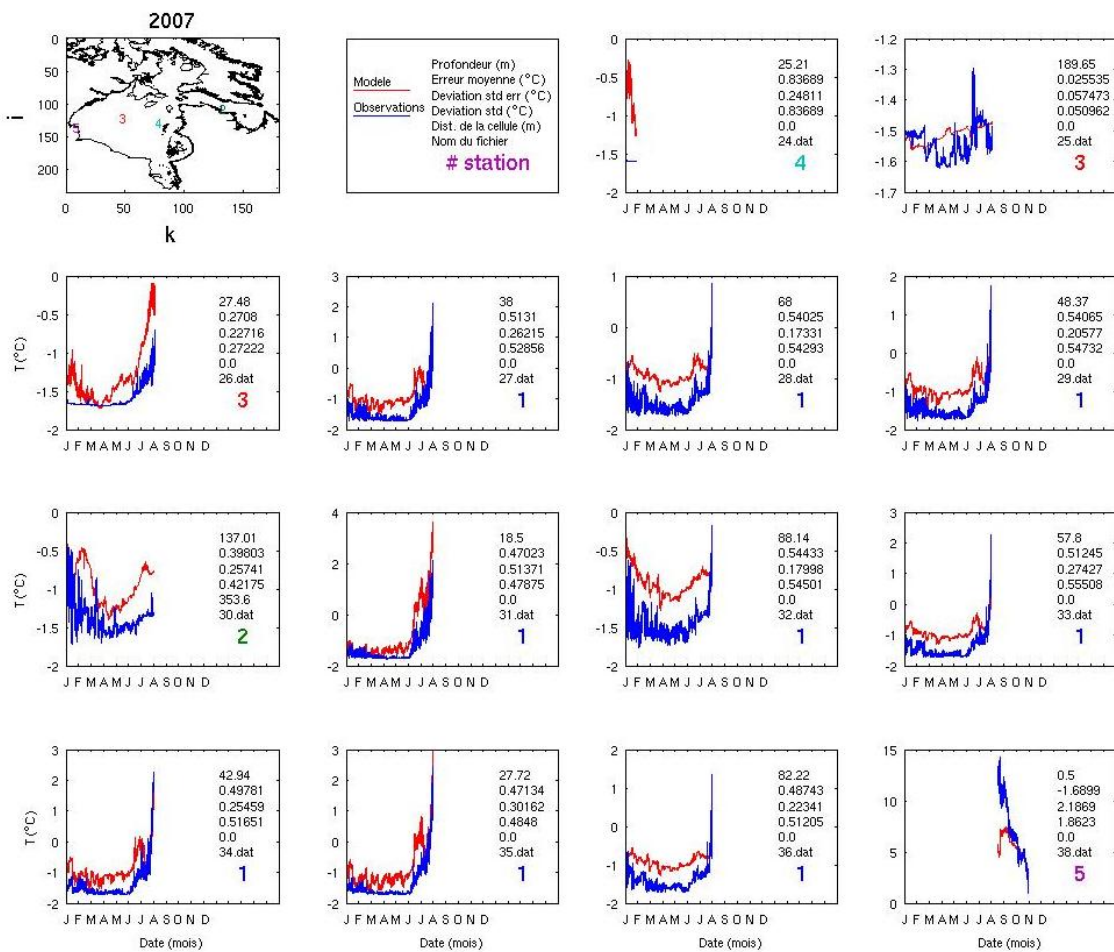


Figure 10 — Comparaison entre les résultats du modèle (en rouge) et les observations (en bleu) pour l'ensemble des données de thermographes disponibles en 2007. Une carte en haut à gauche et l'encadré à sa droite permettent de positionner et d'interpréter les comparaisons.

Les comparaisons permettent de voir que le simulateur reproduit bien la température 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.

De façon générale, les séries temporelles de température simulées sont légèrement plus chaudes que les observations : la moyenne de l'écart pour l'ensemble des thermographes est de + 0.13 °C.

Finalement, il est à noter que les champs de sortie du modèle ont été interpolés linéairement sur la verticale de façon à déterminer la température à la profondeur où se trouvait le thermographe, le simulateur étant limité par sa résolution verticale (10 à 50 m). Cette interpolation peut engendrer des erreurs en fonction de la profondeur de la thermocline.

3.2.2 Niveaux d'eau

Pour comparer les résultats du simulateur en ce qui a trait aux niveaux d'eau, les niveaux moyens des séries temporelles modélisées et observées ont d'abord été calculés. Ce sont les variations par rapport à ce niveau moyen (modélisé et observé) qui ont ensuite été comparées. Deux raisons, principalement, justifient ce choix. Premièrement, il est difficile de positionner l'ensemble des stations d'observation les unes par rapport aux autres afin d'avoir des valeurs absolues. Deuxièmement, certains processus de pression atmosphérique ne sont pas pris en compte dans le simulateur, ce qui fausserait la comparaison à des valeurs absolues. C'est, de toute façon, l'énergie introduite par les marées dans le SBH qui nous intéresse. La variation des niveaux d'eau par rapport au niveau moyen est donc un bon moyen de validation.

Sur la Figure 11, la première sous-figure présente le positionnement de la station. 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 août 2007, est en rouge. Les observations, pour la même période, sont en bleu. La déviation standard de l'erreur du simulateur est de 0.52778 m et la distance entre le marégraphe et le centre de la cellule la plus proche du simulateur est de 353.6 m. Finalement, cette sous-figure fait référence au fichier 1.dat.

Une déviation standard de l'erreur d'environ 0.5 m peut sembler élevée. Toutefois, cette discordance est principalement causée par un décalage d'environ 0.5 heure entre les niveaux d'eau observés et simulés à cette station, ceux simulés étant en avance sur ceux observés.

Pour le SBH, des données pour la période 2001-2012 ne sont disponibles que pour la station de Churchill (voir l'annexe 1 pour les autres figures).

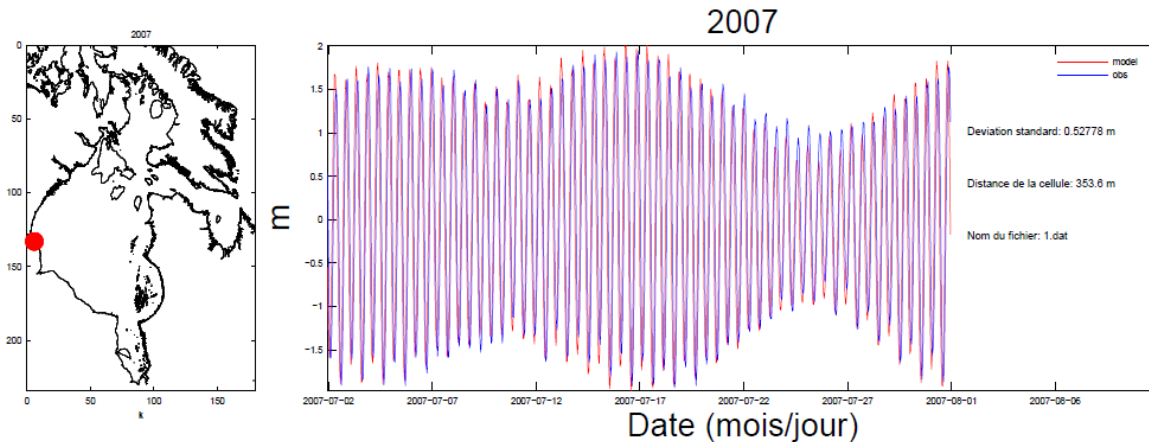


Figure 11 — Comparaison entre la variation du niveau d'eau du simulateur (en rouge) et du niveau d'eau à la station de Churchill (en bleu), représentée par un point rouge sur la carte à gauche.

3.2.3 Niveaux d'eau à partir des composantes de marée

Les composantes de marée ont été utilisées pour construire des séries temporelles de niveaux d'eau à différentes stations. Tout comme pour la section précédente, ce sont les variations par rapport au niveau moyen qui ont été comparées (Figure 12).

Sur la Figure 12, la première sous-figure présente une carte où sont positionnées les stations. Les positions de ces stations y sont représentées par un numéro de couleur. Les axes sont mesurés en indices de grille du simulateur. La sous-figure suivante décrit le reste des sous-figures. Sur chacune des 8 sous-figures qui suivent, on voit la série temporelle modélisée (en rouge) et celle obtenue des composantes de marée (en bleu). À droite de chacune de ces sous-figures, le premier chiffre correspond à la déviation standard ; le second à la distance entre la station et la cellule mouillée du modèle la plus proche ; le troisième au déphasage des composantes M2 des 2 signaux ; le quatrième au déphasage des composantes S2 des 2 signaux et le dernier au numéro de la station (qui correspond à celui sur la carte).

Pour les stations dans le détroit d'Hudson et dans la baie d'Ungava, la concordance des 2 signaux est bonne. Par contre, il semble y avoir un déphasage important pour les stations du sud-est de la baie d'Hudson et dans la baie James. Nous croyons que ce déphasage se cumule tout au long de la propagation de l'onde en sens antihoraire dans la baie d'Hudson. Des efforts ont été faits afin de réduire ce déphasage, mais les améliorations obtenues l'étaient au détriment de l'amplitude de la marée. Nous avons fait le choix de conserver l'énergie liée à l'amplitude afin de bien reproduire la cisaille causée par le frottement sur le fond.

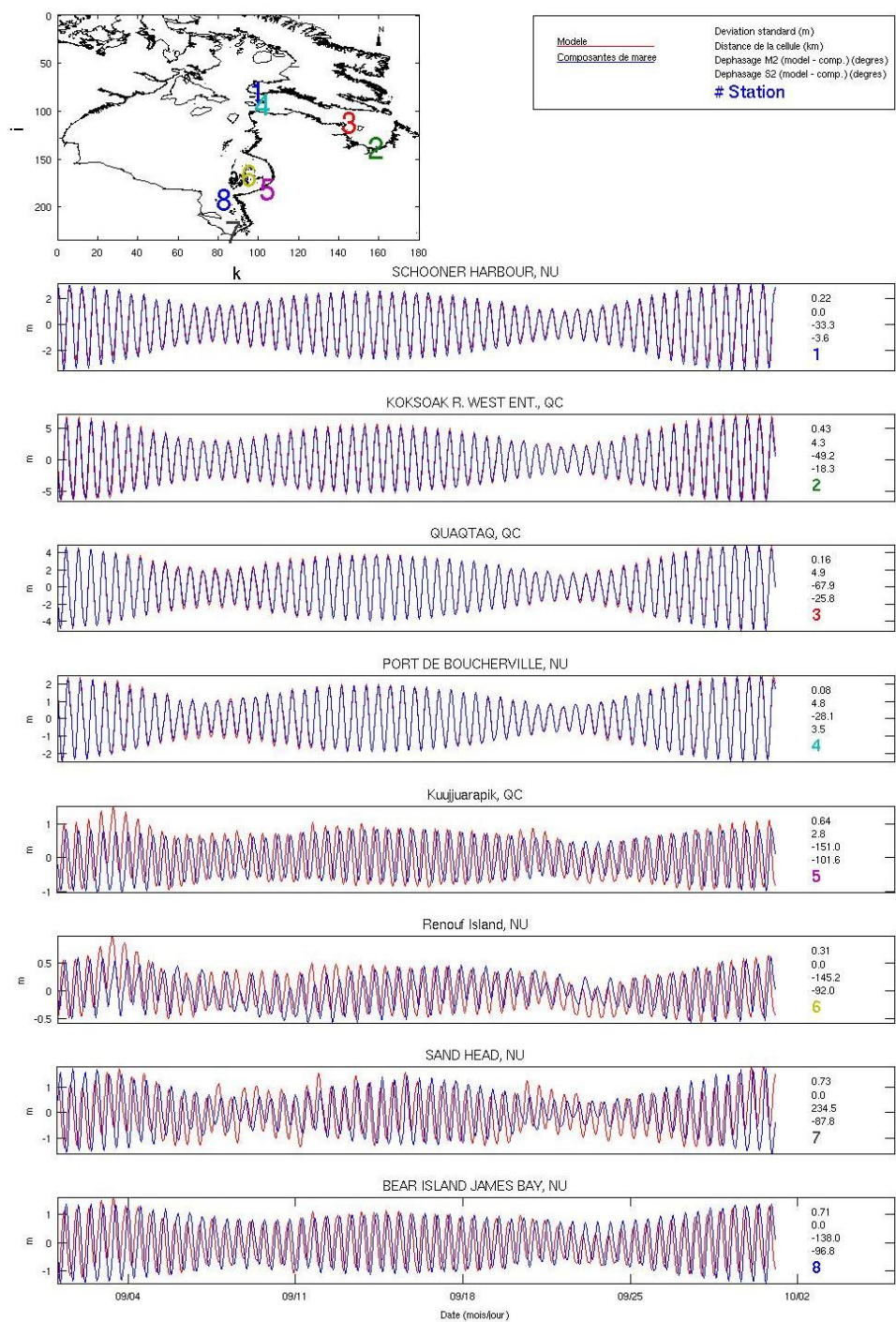


Figure 12 — Comparaison entre la variation du niveau d'eau du simulateur (en rouge) et du niveau d'eau reconstitué à partir des composantes de marée (en bleu).

3.2.4 Profils CTD (conductivity – temperature - depth)

La Figure 13, composée de 26 sous-figures, présente la comparaison du simulateur avec 23 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 23 sous-figures suivantes. Sur ces sous-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. Les deux dernières sous-figures présentent l'erreur moyenne (en bleu), sur toute la colonne d'eau, pour la température et la salinité, et ce pour les 23 profils CTD sur la figure. La déviation standard de l'erreur moyenne est en rouge, additionnée et soustraite à l'erreur moyenne. Le nombre de profils (n) utilisés dans ce calcul est indiqué dans le coin droit, au bas de chacune de ces deux sous-figures.

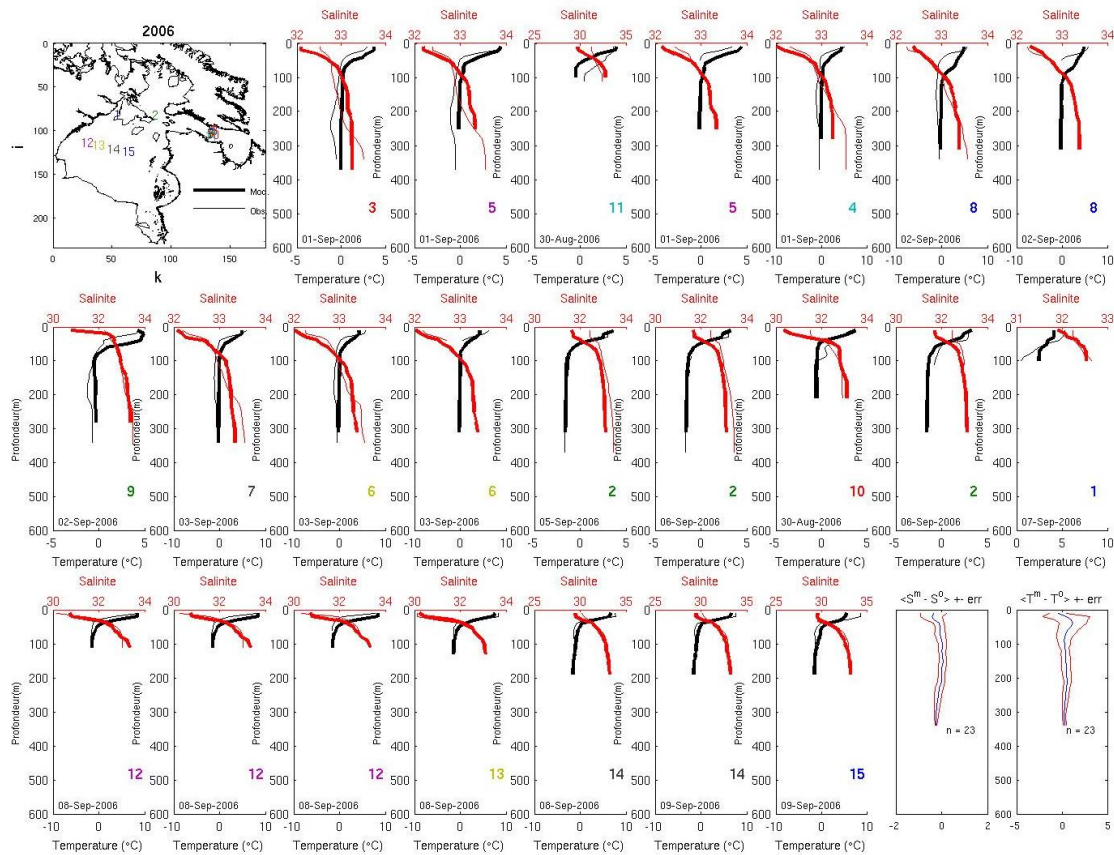


Figure 13 — Comparaison de profils de température (en noir) et de salinité (en rouge). Les positions des stations sont présentées sur la première sous-figure. La moyenne (en bleu) et la déviation standard (en rouge) de l'erreur sur la température et la salinité sont présentées sur les deux dernières sous-figures.

Sur l'ensemble des figures, 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. Toutefois, la salinité modélisée dans la partie inférieure de la colonne d'eau (de 250 à 370 m de profondeur) est plus faible que la salinité observée pour les stations dans le Détroit d'Hudson (stations 2 à 9). De plus, sur les sous-figures présentant l'erreur moyenne sur la température et la salinité, on voit que la température modélisée autour de 50 m est trop chaude de 1 à 2 °C.

3.2.5 Glace

Le modèle océanique est couplé à un modèle de glace de mer. Cette distinction est importante car nous ne prenons pas en compte tous les processus liés à la glace de rive (« landfast ice »). Ce modèle de glace est composé de 11 catégories. Chaque catégorie est déterminée par une épaisseur de glace. La première catégorie a une épaisseur de 7.5 cm.

La Figure 14 présente la concentration moyenne de glace de mer sur l'ensemble des cellules mouillées du domaine et le volume de glace (en km³) sur l'ensemble du domaine. Sur la figure, les observations sont en noir et les résultats du modèle sont en rouge.

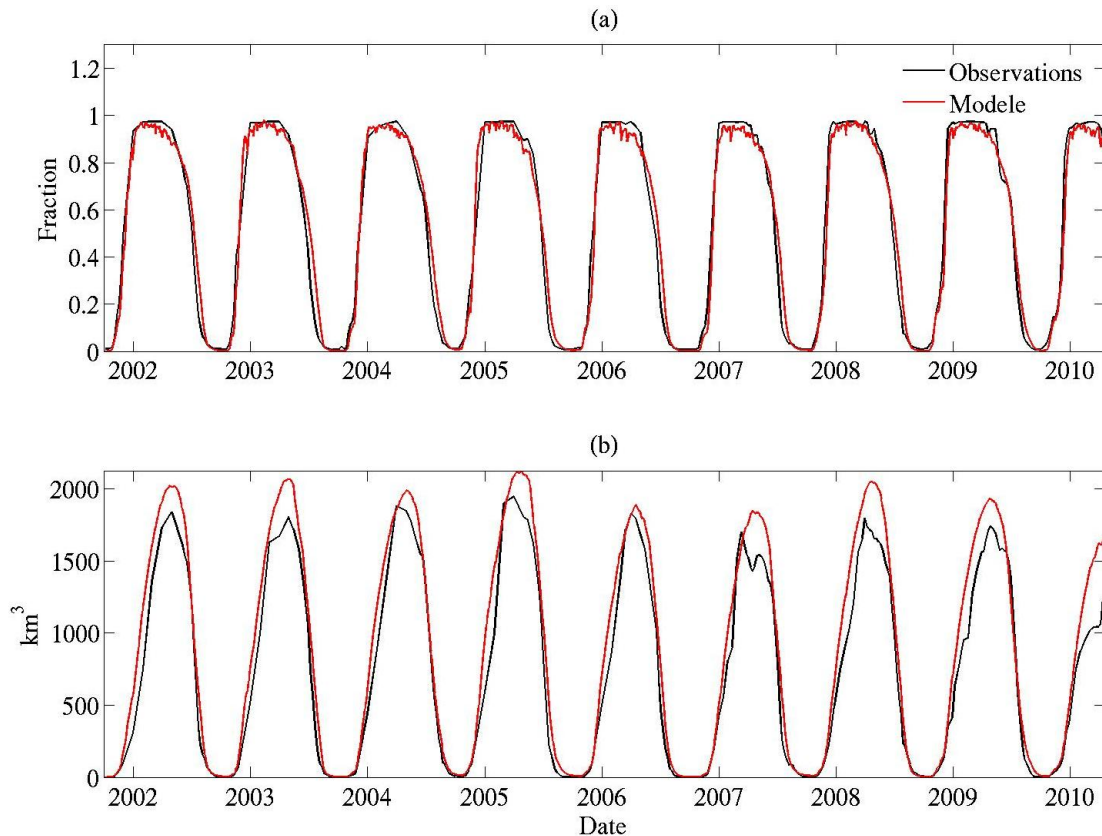


Figure 14 — Comparaison des résultats du modèle avec les observations du SCG pour (a) la concentration moyenne de glace et (b) le volume de glace total sur l'ensemble des cellules mouillées du domaine. Les observations sont en noir et les résultats du modèle sont en rouge. La dernière catégorie de glace du SCG est fixée à 170 cm.

De façon générale, le simulateur semble bien reproduire la concentration moyenne et le volume de glace totale observé ainsi que les variations interannuelles de ces paramètres. Toutefois, le modèle sous-estime légèrement la concentration de glace. Cela peut être expliqué, en partie du moins, par le fait que la première catégorie de glace (la plus mince) est de 7.5 cm. Une fois formée, cette glace aura donc une concentration plus faible puisque c'est le volume de glace qui est lié à l'énergie extraite par l'atmosphère.

3.2.6 Climat

Les simulations climatiques doivent reproduire la moyenne du climat observé et la fréquence des événements extrêmes, et non un état ponctuel. Comme nous ne possédons pas de séries temporelles suffisamment longues (30 ans), il nous est impossible de valider les résultats de nos simulations forcées par les simulations climatiques. Toutefois, nous avons montré que, en ce qui a trait à la concentration de glace, les prédictions de MRCC-AHJ et MRCC-AEV-bTq collent très bien à la réalité.

4 Résultats – Glace de mer

4.1 Simulations climatiques (Rapport mars 2012)

La Figure 15 (a) montre la concentration et (b) le volume de glace de mer sur le domaine entier du SBH. Le trait pointillé représente le passé récent, soit une climatologie de 30 ans sur la période 1981-2010. Le trait plein représente le futur, également une climatologie de trente ans, mais sur la période 2041-2070. La simulation MRCC-AEV-bTq est en noir et la simulation MRCC-AHJ est en rouge. Dans chacun des graphiques, nous avons défini un seuil. Pour la concentration, ce seuil est de 30 %. Il définit la limite inférieure où la présence des glaces de mer amortit la propagation des vagues. Ce n'est peut-être pas un facteur crucial dans le cadre de cette étude, mais, à défaut de critère plus pertinent, nous avons choisi celui-ci. Nous utilisons donc ce seuil pour définir le nombre de jours d'écart entre la prise et la fonte des glaces dans le climat actuel et le climat futur. Pour le volume, ce seuil est de 30 % du volume maximum de glace de mer du passé récent. Ce seuil est actuellement choisi de façon arbitraire. Cette valeur pourrait être choisie en fonction des activités sur la glace des populations locales.

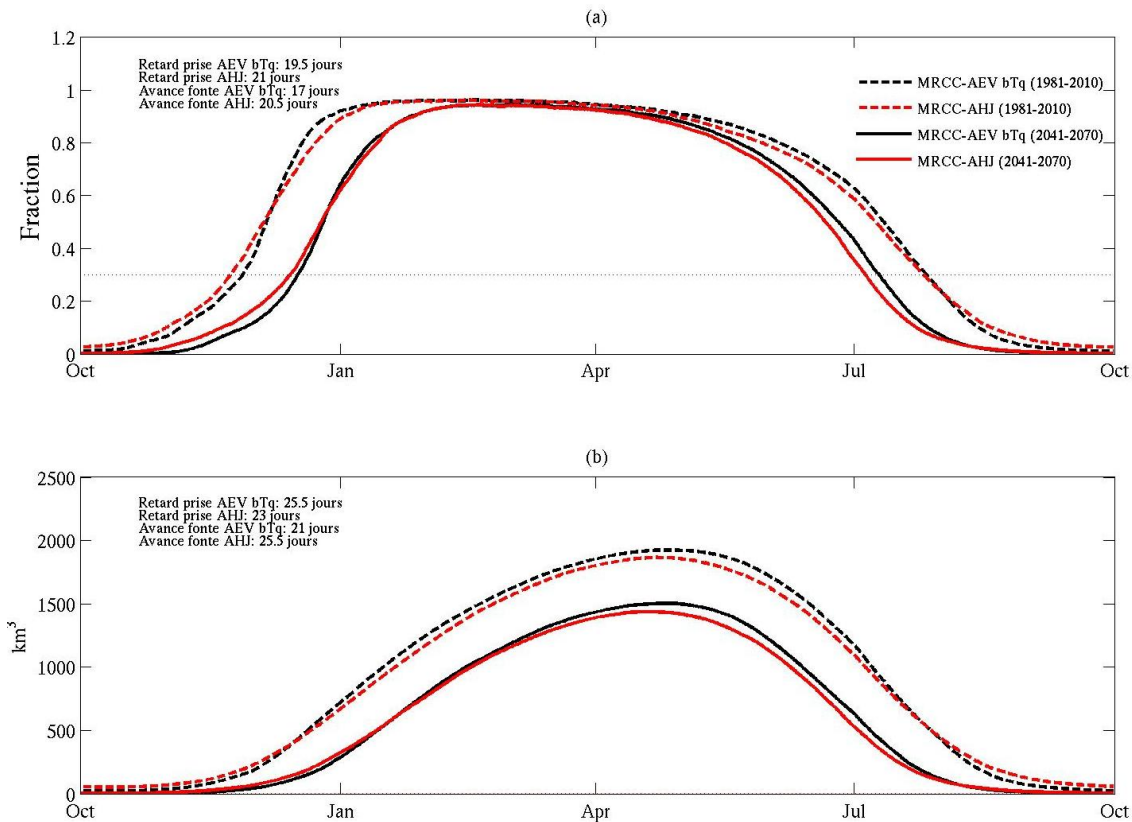


Figure 15 — Concentration (a) et volume total de glace de mer (b) des simulations climatiques pour le domaine entier.

Tout d'abord, en ce qui a trait à la concentration de glace, les résultats nous montrent que les changements climatiques entraîneront un retard de 19.5 jours (MRCC-AEV-bTq) et de 21 jours (MRCC-AHJ) pour la prise des glaces en fonction du seuil de 30 % de la concentration. De plus, la fonte se produira entre 17 (MRCC-AEV-bTq) et 20.5 jours (MRCC-AHJ) plus tôt. Nous aurons donc une diminution de 36.5 (MRCC-AEV-bTq) et de 41.5 jours (MRCC-AHJ) de la période d'englacement entre le climat actuel et le climat prévue pour l'horizon 2055. Finalement, nous observons une diminution de 1.68 % (MRCC-AHJ) et de 1.77 % (MRCC-AEV-bTq) de la concentration maximale atteinte (Tableau 2 de la section 4.3).

Pour ce qui est des volumes de glace de mer, les changements climatiques entraîneront un retard de 25.5 jours (MRCC-AEV-bTq) et de 23 jours (MRCC-AHJ) pour la prise des glaces en fonction du seuil de 30 % du volume maximum. De plus, la fonte se produira entre 21 (MRCC-AEV-bTq) et 25.5 jours (MRCC-AHJ) plus tôt. Nous aurons donc une diminution de 46.5 (MRCC-AEV-bTq) et de 48.5 jours (MRCC-AHJ) de la période au-delà du seuil entre le climat actuel et le climat prévue pour l'horizon 2055. De plus, nous observons une diminution de 428.66 km³ (MRCC-AHJ) et 420.48 km³ (MRCC-AEV-bTq) du volume maximum atteint. Ces écarts de volumes

représentent 22.98 % (MRCC-AHJ) et 21.85 % (MRCC-AEV-bTq) du volume maximum de la simulation du passé récent (1981-2010) (Tableau 2 de la section 4.3).

La Figure 16 montre les moyennes mensuelles de la concentration de glace pour le passé récent (1981-2010) (1^e rangée) et l'horizon 2055 (2041-2070) (2^e rangée) lors de la prise (décembre et janvier, sous figures a, b, e et f) et de la fonte (juin et juillet, sous-figures c, d, g et h). Ces 2 périodes (prise et fonte) sont celles pour lesquelles la concentration de glace est la plus affectée par les changements climatiques.

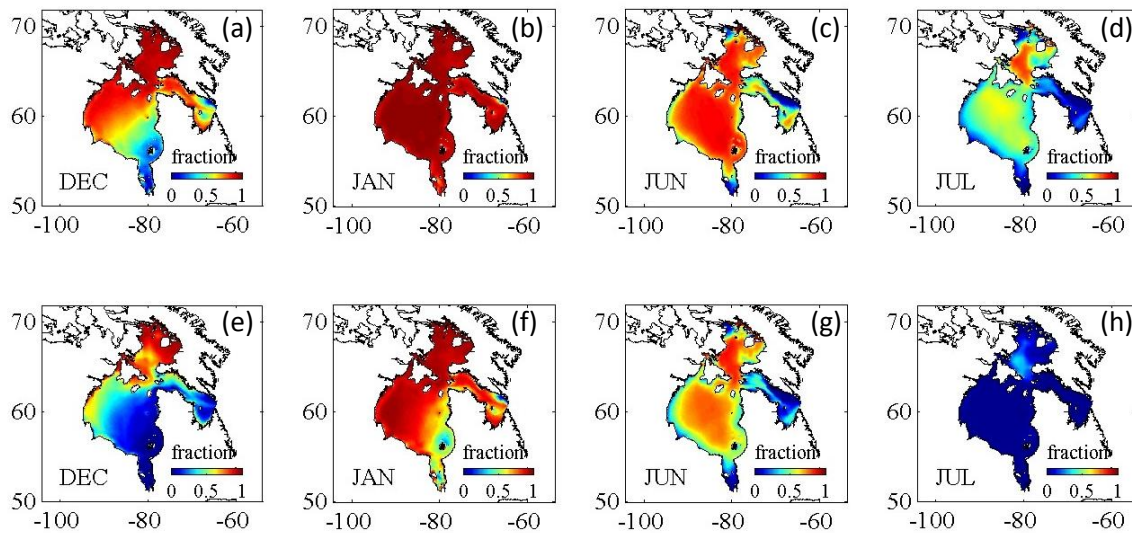


Figure 16 – Moyennes mensuelles de la concentration de glace pour le passé récent (1981-2010) (1^e rangée) et l'horizon 2055 (2041-2070) (2^e rangée) pour décembre (a et e), janvier (b et f), juin (c et g) et juillet (d et h) (MRCC-AHJ).

Lors de la prise, l'érosion de la superficie couverte de glace se fait du sud-est au nord-est. Lors de la fonte, l'érosion de la superficie couverte de glace semble se produire de la côte vers le large, du moins pour la Baie d'Hudson. La distribution spatiale de l'érosion de la superficie couverte de glace se produit donc différemment lors de la prise et de la fonte.

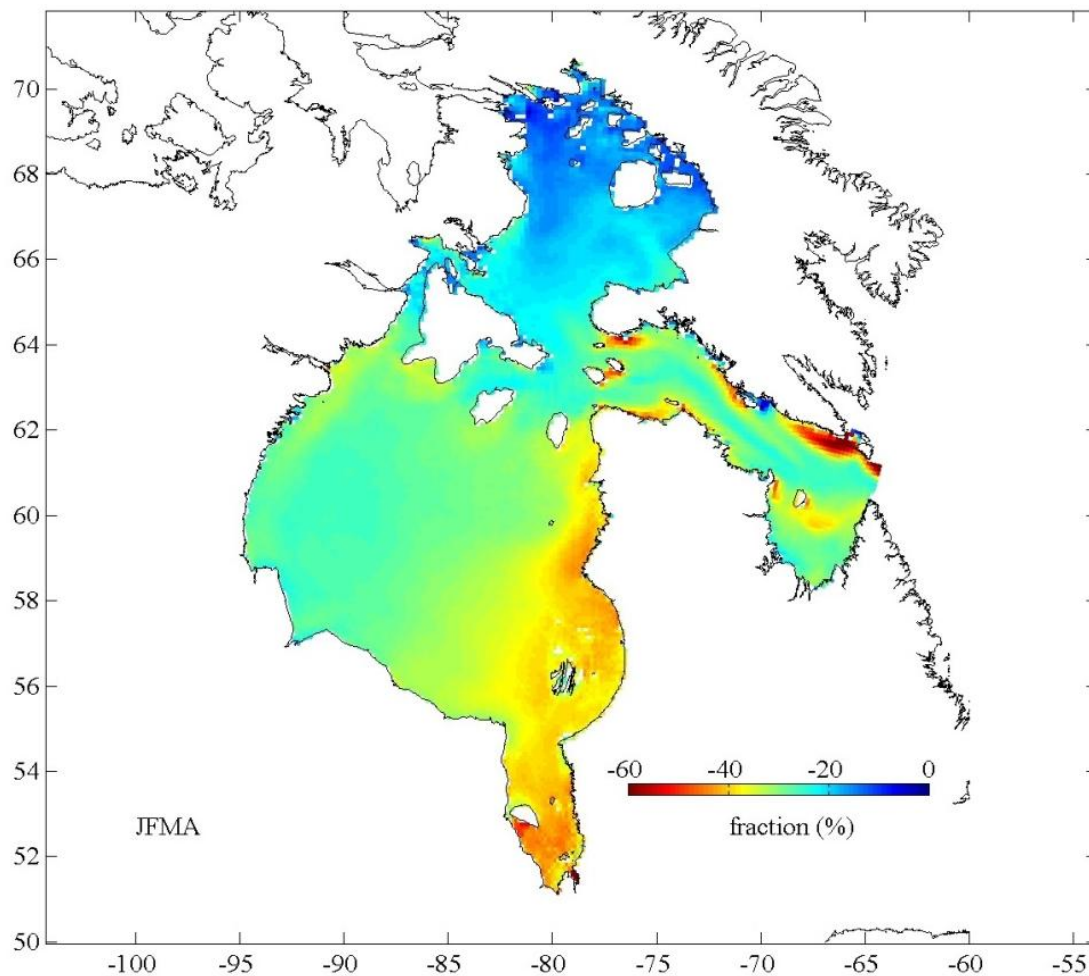


Figure 17 – Anomalie relative de l'épaisseur de glace moyennée sur la période hivernale (janvier-février-mars-avril) entre l'horizon 2055 (2041-2070) et le passé récent (1981-2010) (MRCC-AHJ).

La Figure 17 montre l'anomalie relative de l'épaisseur de glace moyennée sur la période hivernale (janvier-février-mars-avril) entre l'horizon 2055 et le passé récent. Cette anomalie relative (ΔEp) est définie de la façon suivante :

$$\Delta Ep = \frac{Ep(futur) - Ep(passé récent)}{Ep(passé récent)}$$

où Ep est l'épaisseur de glace.

La baie James, l'est de la baie d'Hudson, une partie du détroit d'Hudson et une bande entre la baie d'Ungava et le détroit d'Hudson sont les régions où l'épaisseur de la glace est la plus affectée par le réchauffement climatique. L'impact du réchauffement climatique sur le Bassin de Foxe est moins important.

4.1.1 Tendances globales, température de l'air et volume de glace

Les résultats du rapport II nous ont permis de conclure que la température de l'air est le facteur atmosphérique dominant pour le volume de glace de mer produit par notre simulateur océanique. Nous commençons donc cette section par l'analyse du volume de la glace de mer en fonction de la température de l'air. Sur la Figure 18, on retrouve des moyennes mobiles de 30 ans du volume de glace de mer (km^3) et de la température de l'air (K).

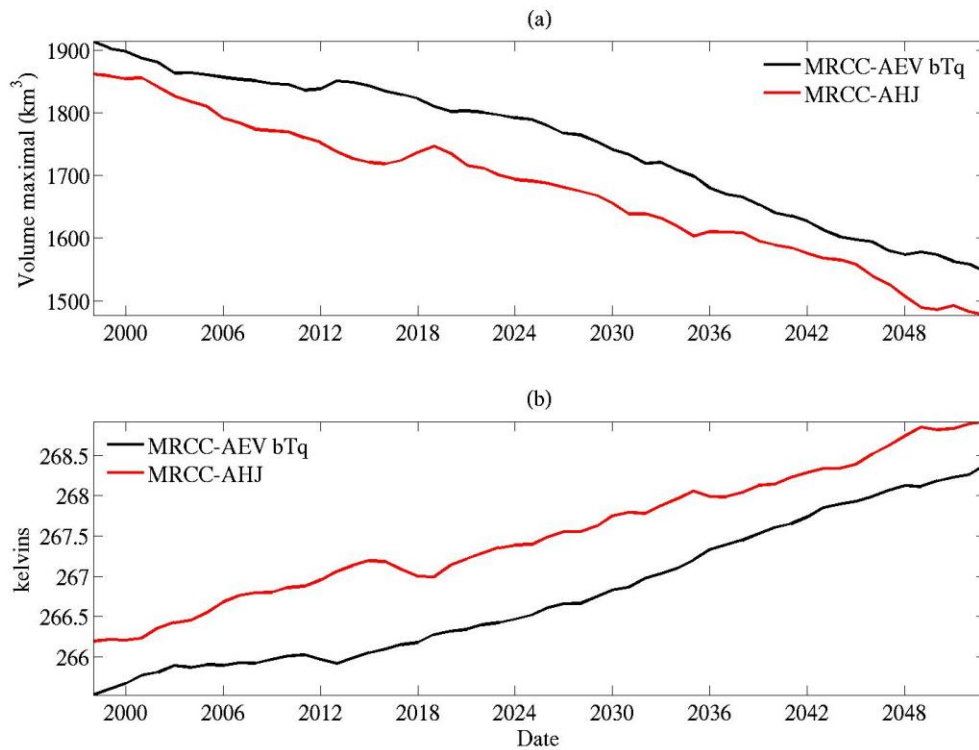


Figure 18 — Moyennes mobiles de 30 ans du volume maximal annuel de glace (a) et de la température de l'air (b).

Nous voyons que les volumes de glace de mer des simulations MRCC-AHJ et MRCC-AEV-bTq sont semblables. Dans les 2 cas, on observe une diminution d'environ 20 % du volume total. De plus, il apparaît clairement que les moyennes mobiles de la température de l'air et du volume de glace sont fortement corrélées. En appliquant une régression linéaire aux données présentées sur la Figure 18, on obtient le taux annuel de perte de volume. Pour MRCC-AEV-bTq, ce taux est de $-6.7 \text{ km}^3/\text{an}$. Si cette tendance se maintient, cela implique que la glace sera complètement disparue en l'an 2288. Toutefois, une autre étude en cours dans le golfe du Saint-Laurent nous porte à croire que cette tendance linéaire ne perdure qu'un certain temps. Le taux annuel de perte de volume s'estompe par la suite. Pour MRCC-AHJ, ce taux est de $-6.7 \text{ km}^3/\text{an}$. L'extrapolation de la droite linéaire passe donc par zéro en l'an 2276.

Sur la Figure 19, nous avons tracé la moyenne mobile du volume maximal de glace en fonction de la moyenne mobile de la température de l'air pour MRCC-AEV-bTq en noir et MRCC-AHJ en rouge. Les droites pointillées bleues représentent une régression linéaire de type $y = a(x - b)$.

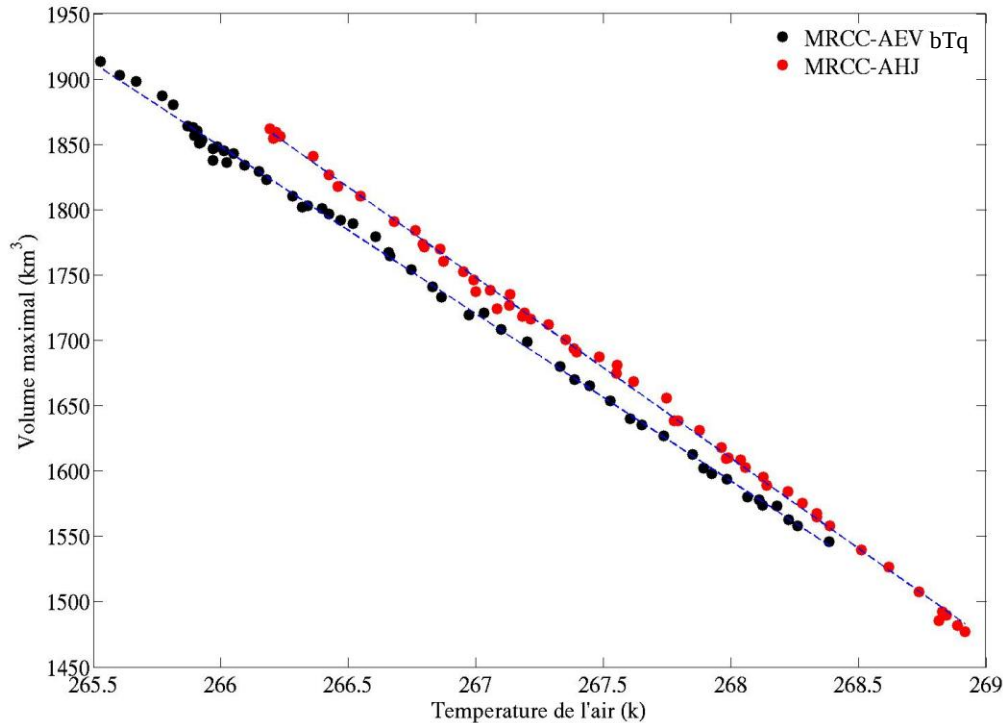


Figure 19— Régression linéaire de type $y=a(x-b)$ de la moyenne mobile de 30 ans du volume maximal annuel de glace de mer en fonction de la moyenne mobile de 30 ans de la température de l'air à 2m.

Les résultats de la régression linéaire sont donnés dans le Tableau 1. Les valeurs de R^2 permettent d'affirmer que plus de 99 % de la variation de la moyenne mobile du volume de glace de mer est due à la variation de la moyenne mobile de la température de l'air. Il aurait été intéressant d'avoir plus de 2 simulations afin de vérifier la robustesse de cet énoncé.

Tableau 1 — Régression linéaire de type $y = a(x - b)$ de la moyenne mobile du volume maximal de glace de mer en fonction de la température de l'air.

Simulation	a	b	r^2
MRCC-AEV-bTq	-127.92	280.45	0.9983
MRCC-AHJ	-138.17	279.75	0.9982

4.2 Méthode des deltas (Rapport mars 2012)

La description de la Figure 20 est essentiellement la même que celle de la Figure 15. Par contre, les retards et les avances sont définis par rapport à la simulation témoin.

Tout d'abord, en ce qui a trait à la concentration de glace, l'application des deltas cause un retard de 9 jours (DTEM) et de 8.5 jours (DALL) pour la prise des glaces en fonction du seuil de 30 % de la concentration. De plus, la fonte se produira avec une avance de 12.5 jours (DTEM et DALL). Nous aurons donc une diminution de 21.5 (DTEM) et de 21 jours (DALL) de la période d'englacement entre le climat actuel et le climat prévue pour l'horizon 2055. Finalement, nous observons une diminution de 1.99 % (DTEM) et de 1.92 % (DALL) de la concentration maximale atteinte par rapport à la simulation témoin (Tableau 2).

Pour ce qui est des volumes de glace de mer, l'application des deltas cause un retard de 16 jours (DTEM) et de 15.5 jours (DALL) pour le passage au-delà du seuil de 30 % du volume maximum. De plus, la fonte se produira avec une avance de 16 jours (DTEM) et de 15.5 jours (DALL). Nous aurons donc une diminution de 32.5 jours (DTEM) et de 31 jours (DALL) de la période au-delà du seuil entre le climat actuel et le climat prévue pour l'horizon 2055. Finalement, nous observons une diminution de 353.66 km³ (DTEM) et de 315.87 km³ (DALL) du volume maximum atteint. Ces écarts de volumes représentent 18.24 % (DTEM) et 16.29 % (DALL) du volume maximum de la simulation témoin (Tableau 2).

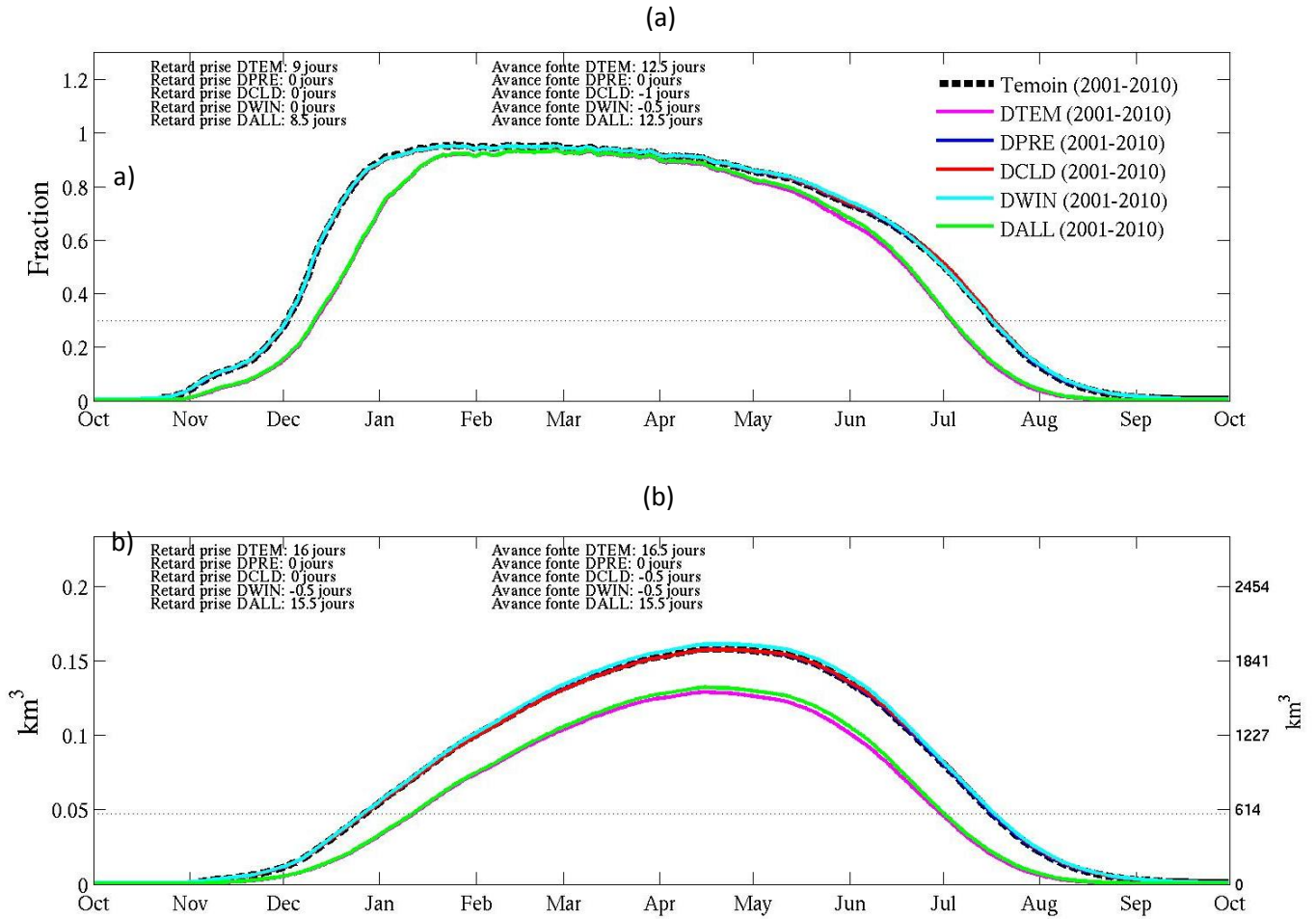


Figure 20 — Concentration (a) et volume de glace de mer (b) des simulations des deltas pour le domaine entier.

4.3 Comparaison : Méthode des deltas et simulations climatiques (Rapport mars 2012)

Dans cette section, nous discutons de la comparaison entre les résultats de la méthode des deltas par rapport aux simulations climatiques océan-glace de mer.

Le Tableau 2 résume l'ensemble des résultats moyens sur le domaine complet. On peut voir que la méthode des deltas sous-estime l'effet des changements climatiques sur la production de glace. Pourtant, si l'on trace la concentration moyenne et le volume moyen pour l'horizon 2055 obtenus des deux différentes méthodes (*DALL* pour la méthode des deltas, MRCC-AHJ et MRCC-AEV-bTq pour les simulations climatiques), les 2 méthodes semblent produire des résultats

comparables (lignes pleines sur la Figure 21). Pour comprendre ce résultat, qui semble contradictoire, il faut d'abord rappeler comment sont calculés les avances et les retards présentés dans le Tableau 2 :

1. Dans le cas de la méthode des deltas, on compare la date pour laquelle les climatologies de glace des simulations du futur passent au-delà d'un seuil avec la date pour laquelle la climatologie de glace de la simulation témoin passe au-delà de ce même seuil. Les climatologies de glace sont obtenues d'une moyenne sur 10 ans (2001-2010).
2. Dans le cas des simulations climatiques, on compare la date pour laquelle les climatologies de glace du futur (MRCC-AHJ et MRCC-AEV-bTq 2041-2070) passent au-delà d'un seuil avec la date pour laquelle les climatologies de glace du passé récent (MRCC-AHJ et MRCC-AEV-bTq 1981-2010) passent au-delà de ce même seuil.

Donc, même si les périodes d'englacement futur semblent similaires, c'est leurs écarts avec le présent (méthode des deltas) ou le passé récent (simulations climatiques) que l'on doit comparer.

Tableau 2 — Sommaire des moyennes sur le domaine

Simulation	Retard prise ICON (jours)	Avance fonte ICON (jours)	ΔT ICON (jours)	ΔMax ICON (%)	Retard prise IVOL (jours)	Avance fonte IVOL (jours)	ΔT IVOL (jours)	ΔMax IVOL moyen (km^3)	ΔMax IVOL total (km^3)	ΔMax IVOL (%)
MRCC-AHJ	21.0	20.5	-41.5	-1.68	23.0	25.5	-48.5	-0.035	-428.66	-22.98
MRCC-AEV-bTq	19.5	17.0	-36.5	-1.77	25.5	21.0	-46.5	-0.034	-420.48	-21.85
DWIN	0.0	-0.5	0.5	-0.19	-0.5	-0.5	1.0	0.003	41.28	2.13
DTEM	9.0	12.5	-21.5	-1.99	16.0	16.5	-32.5	-0.029	-353.66	-18.24
DALL	8.5	12.5	-21.0	-1.92	15.5	15.5	-31.0	-0.026	-315.87	-16.29

Bref, la méthode des deltas se base sur 10 années (2001-2010) de la simulation témoin et les simulations climatiques sur 30 années de simulation climatique (1981-2010). Si la Figure 21 donne l'impression que la méthode des deltas simule l'effet des changements climatiques sur la glace de façon adéquate (en concordance avec les simulations climatiques), c'est que les 10 années de la simulation témoin ne sont pas représentatives des 30 années (1981-2010) des simulations climatiques. Cette différence s'additionne à l'erreur introduite par l'utilisation de la méthode des deltas et masque en partie cette erreur.

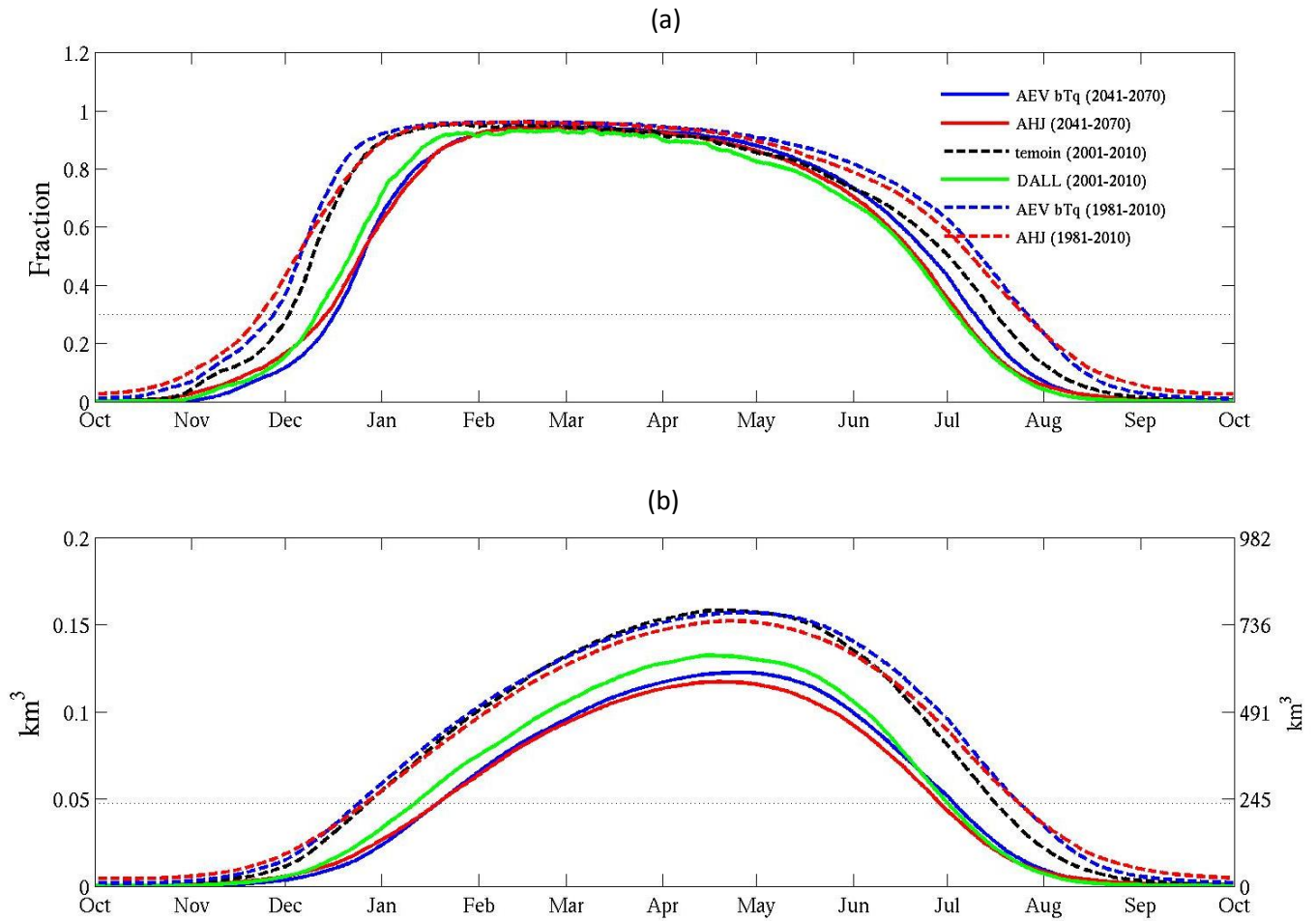


Figure 21 — Comparaison des concentrations (a) et volumes de glace de mer (b) des simulations climatiques et des deltas pour le domaine entier.

Regardons, par exemple, le volume moyen pour le mois de juillet (Figure 21): la courbe verte (DALL) se superpose presque aux courbes bleue (MRCC-AEV-bTq) et rouge (MRCC-AHJ). Cependant, on voit que la simulation témoin (ligne pointillée noire), à ce moment, ne coïncide pas avec les simulations climatiques du passé récent (lignes pointillées rouge et bleue). Par ailleurs, lorsque la simulation témoin coïncide avec les simulations climatiques du passé récent (le volume moyen au mois de janvier, par exemple), les résultats prédits par la méthode des deltas ne concordent plus avec les résultats prédits par les simulations climatiques.

La méthode des deltas ne semble donc pas reproduire adéquatement l'effet des changements climatiques sur la glace de mer. Nous croyons que cela est attribuable à l'inertie du système océanique face à un changement de température. De plus, comme nous l'avons constaté lors de

l'application des biais sur les forçages atmosphériques générés par la simulation MRCC-AEV-bTq, l'application de deltas par quantiles risque d'améliorer les résultats de cette méthode.

À la lumière de ces résultats, dans le cadre de ce projet, seuls les résultats obtenus des simulations climatiques doivent être utilisés.

5 Résultats — Océan

Malgré que ce soit les données de glace qui importent dans le cadre de cette étude, nous croyons qu'il est important de discuter brièvement des modifications sur le système océanique afin de bien comprendre ses répercussions sur les glaces produites par le simulateur couplé.

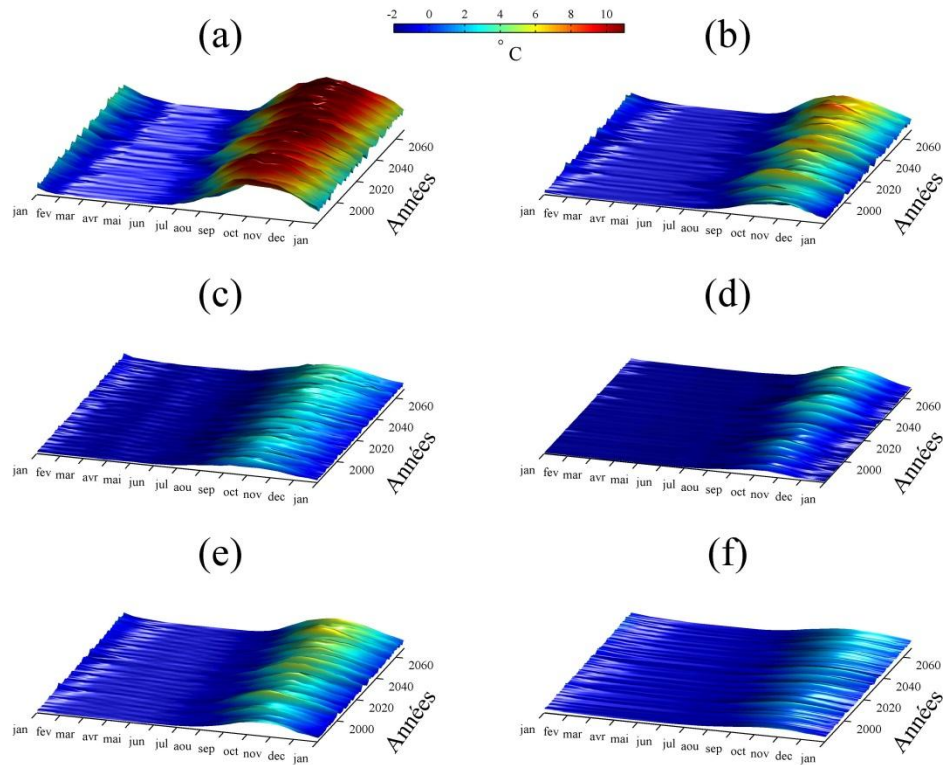


Figure 22 – Cycle annuel de la température de l'eau des 10 premiers mètres (a) de la baie James; (b) de la baie d'Hudson; (c) du détroit d'Hudson; (d) du bassin de Foxe; (e) de l'ensemble du domaine et (f) température moyenne de l'ensemble du domaine intégrée sur toute la profondeur (MRCC-AHJ).

La Figure 22 présente le cycle annuel de la température de l'eau pour différentes régions et différentes profondeurs, sur une période de 90 ans allant de 1981 à 2070. Cette présentation tridimensionnelle a l'avantage de mettre en évidence la variabilité intra et interannuelle de ce

cycle. Le cycle annuel de chacune des sous-figures a une allure plus ou moins sinusoïdale avec un plateau froid en hiver. Toutes les régions se réchauffent. Les variations de température sont indiquées dans le Tableau 3. Ces valeurs sont obtenues de la différence d'une moyenne de 30 ans de l'horizon 2055 (2041-2070) et d'une moyenne de 30 ans du passé récent (1981-2010). La région de la baie James est celle où la température de l'eau de surface est la plus affectée par les changements climatiques. Suivent la baie d'Hudson, le Bassin de Foxe et le détroit d'Hudson.

Tableau 3 — Augmentation de la température de l'eau

Région	Profondeur (m)	Variation de température (°C)
Baie James	1-10	1.26
Baie d'Hudson	1-10	0.92
Détroit d'Hudson	1-10	0.46
Bassin de Foxe	1-10	0.50
Domaine complet	1-10	0.72
Domaine complet	Toute la profondeur	0.41

Il est intéressant de noter qu'il y a une légère hausse de température à la fin février dans le détroit d'Hudson. Cette hausse a une valeur moyenne de 0.05 °C lorsque moyennée sur 90 ans. Cette hausse de température ne semble pas liée aux forçages. Nous croyons qu'elle est liée à l'évacuation des eaux côtières plus chaudes produites en été dans le sud-est du SBH. Cette affirmation demanderait l'ajout de traceurs passifs afin de calculer le temps de transit de ces eaux.

La Figure 23 nous présente les moyennes saisonnières de température de surface pour la simulation témoin (première rangée) et les écarts de température entre le passé récent et l'horizon 2055 (seconde rangée).

Les variations de température de surface sont minimales en hiver puisque le point de congélation est atteint dans les régions où la glace est produite. Toutefois, la région des îles Belcher et de la baie James présente une légère hausse de température. Cette hausse de température produit un retard dans la formation de la glace qui concorde avec la concentration de glace simulée au mois de janvier (Figure 16).

Au printemps, la baie James et les côtes de la baie d'Hudson sont plus affectées que le reste de la région dû au retrait précoce des glaces.

La période estivale (les mois JAS) est celle qui est la plus affectée avec des variations maximales de température de 4 °C le long de la côte sud-est de la Baie d'Hudson et dans la baie James.

Pour les périodes estivales et automnales, nous observons un gradient sud-est/nord-ouest pour le réchauffement des températures. Nous croyons que cette structure est liée à la présence d'eau douce qui crée une stratification permettant un réchauffement efficace des eaux de surface.

Finalement, notons que la température de surface du détroit d'Hudson est peu affectée, sauf au printemps. C'est certainement lié aux conditions frontière ouvertes qui sont constante pour la durée de la simulation.

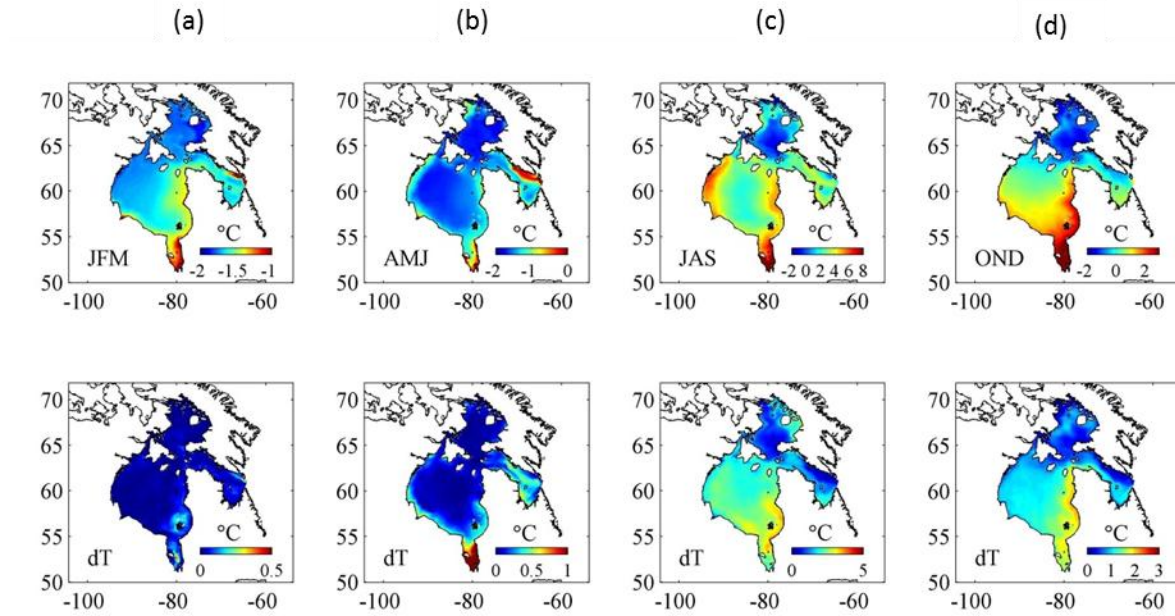


Figure 23 — Température de l'eau de surface (10 premiers mètres) moyennée de 2002 à 2012 pour la simulation témoin (1^e rangée) et variation de la température de l'eau de surface entre le passé récent (1981-2010) et l'horizon 2055 (2041-2070) (2^e rangée) pour janvier-février-mars (a), avril-mai-juin (b), juillet-août-septembre (c) et octobre-novembre-décembre (d) (MRCC-AHJ).

L'anomalie de quantité de chaleur moyenne par mètre cube (Q) est présentée à la Figure 24. Q est défini ici comme l'énergie qui doit être extraite de la colonne d'eau pour l'emmener au point de congélation lorsque la pression est égale à la pression de surface :

$$Q = \frac{1}{z} \int_z^0 \rho(z) C_p \delta T dz$$

où ρ est la densité à la profondeur z , C_p est la chaleur spécifique de l'eau de mer et δT est la différence de température par rapport au point de congélation. Cette figure peut sembler intrigante. En effet, malgré le fait que les valeurs soient normalisées par la profondeur, ces valeurs semblent affectées par la bathymétrie (Figure 26). L'explication réside dans le réchauffement inhomogène de la colonne d'eau. Comme on le voit à la Figure 25, le réchauffement est accentué à la surface et au fond. C'est donc cette distribution qui accentue la bathymétrie dans le champ d'anomalie de Q . Ce fait permet d'illustrer une différence importante entre l'utilisation d'une simulation climatique et la méthode des deltas : l'inertie du

système océanique face à un changement de température. En effet, Q n'est pas affecté par la bathymétrie à ce point lorsque la méthode des deltas est utilisée (Figure 4 de Joly et al., 2010).

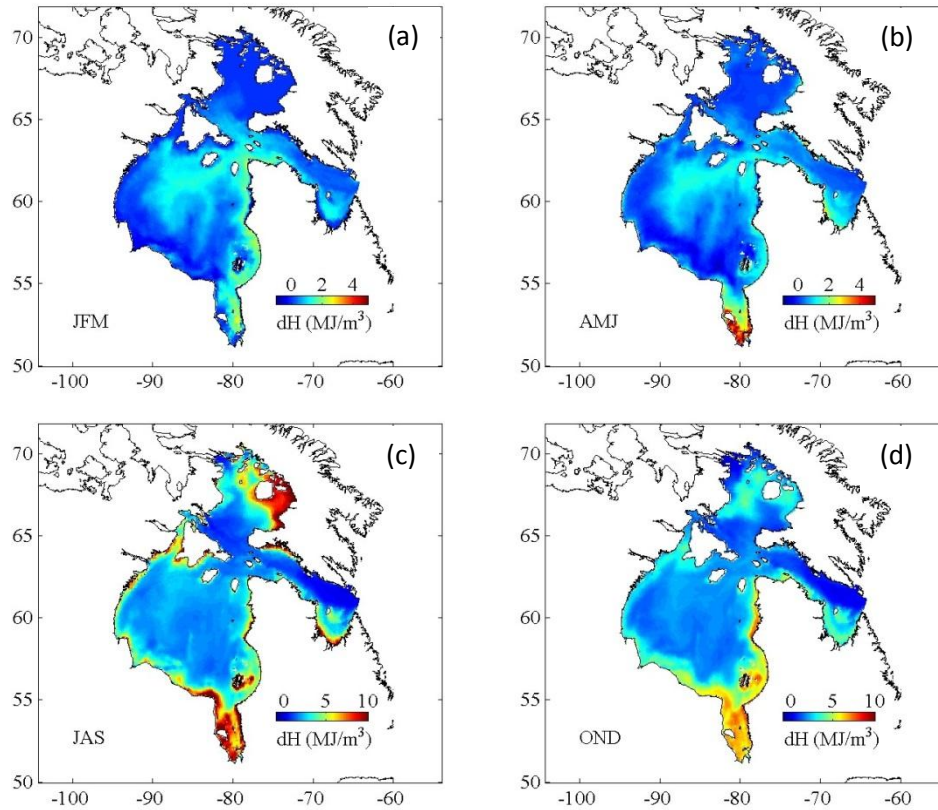


Figure 24 – Moyennes saisonnières de la différence de quantité de chaleur normalisée par rapport à la profondeur entre l'horizon 2055 (2041-2070) et le passé récent (1981-2010) pour janvier-février-mars (a), avril-mai-juin (b), juillet-août-septembre (c) et octobre-novembre-décembre (d) (MRCC-AHJ).

En hiver (Figure 24 a), malgré une très faible anomalie de la température de surface (Figure 23), les côtes est de la baie James et de la baie d'Hudson emmagasinent une plus grande quantité de chaleur par m^3 par rapport au reste du SBH, dans le futur. Cette différence est associée à une différence de stratification (Saucier et al., 2004). Les régions plus profondes du centre de la Baie d'Hudson, pour la raison mentionnée plus haut, emmagasinent aussi une quantité de chaleur par m^3 importante par rapport au reste du SBH. Cette remarque s'applique d'ailleurs pour chaque saison.

Au printemps (Figure 24 b), la baie James emmagasine une quantité de chaleur par m^3 importante, avec des valeurs excédant 7.9 MJ/m^3 . Cela est attribuable au retrait précoce des glaces, qui permet à la colonne d'eau d'absorber davantage d'énergie des ondes courtes

(rayonnement solaire). À l'été et à l'automne, l'anomalie de Q est maximale le long des côtes, dans les régions peu profondes.

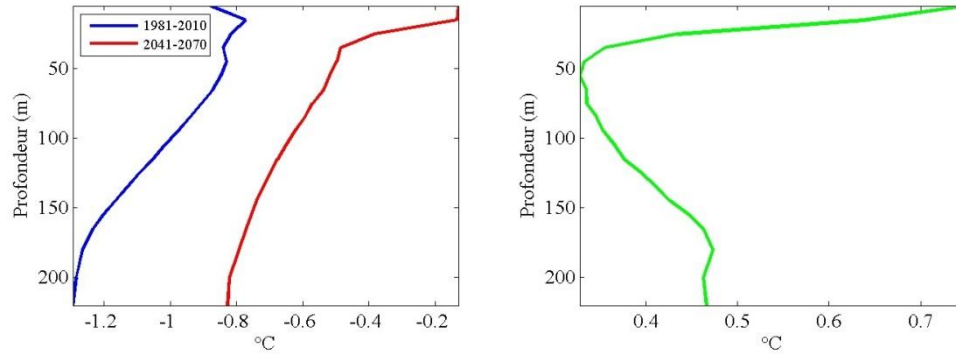


Figure 25 – (a) Profils moyens de la température de l'eau pour la cellule $i = 115$ et $k = 53$ (point P1 sur la Figure 26) pour le passé récent (trait bleu) et l'horizon 2055 (trait rouge). (b) Profil de la différence de température de l'eau (horizon 2055 – passé récent).

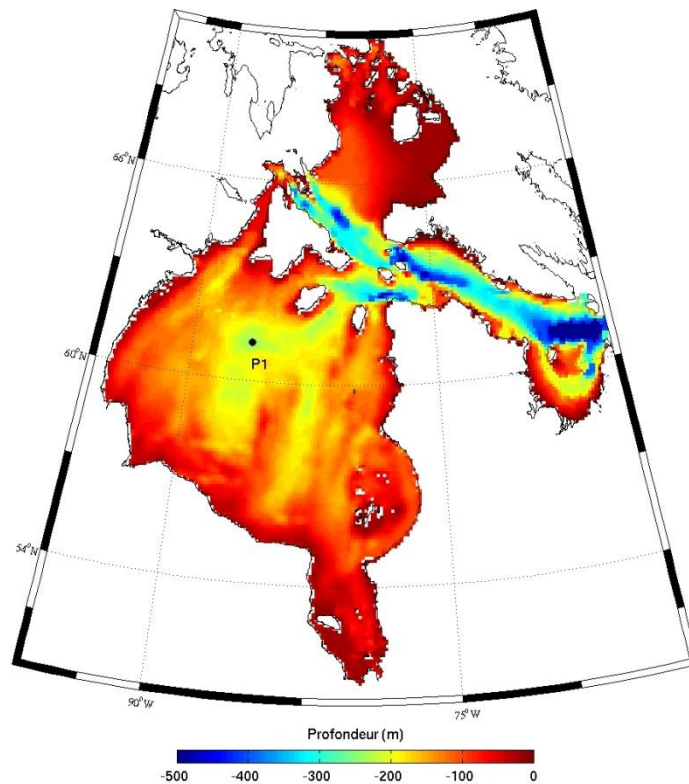


Figure 26 — Carte de la bathymétrie du SBH. Le point P1 est celui où le profil moyen présenté sur la Figure 25 a été calculé.

6 Résultats — Relations empiriques glace de rive

Cette section présente le travail qui a permis d'établir des relations empiriques entre les champs modélisés par le simulateur couplé, glace de mer — océan, et la glace de rive (GDR) observée près des infrastructures aux abords de trois villages : Quaqtuq, Umiujaq et Kuujuaq. Ces relations ont été établies sur la base d'observations de la GDR recueillies par l'INRS de 2009 à 2011. Pour chacun des villages, une série temporelle de chaque champ modélisé par le simulateur a été extraite. L'analyse de ces séries temporelles a permis de mettre en évidence les champs déterminants pour la modélisation de la GDR. Les champs retenus et la relation empirique reliant ces champs avec la GDR diffèrent d'un village à l'autre. Toutefois, nous avons favorisé l'épaisseur et la concentration de glace de mer (GDM) puisque ces champs sont intégrateurs des autres variables : le modèle de GDM modélise celle-ci à partir des conditions atmosphériques et océaniques.

6.1 Relations empiriques

Commençons par décrire quelles sont les relations empiriques pour chacun des villages retenus. Pour ce faire, dans chaque cas, nous utilisons les termes « prise » et « retrait », afin de parler du moment où les glaces apparaissent et disparaissent, indépendamment du fait qu'il s'agisse d'un processus d'advection ou d'un processus thermodynamique.

Afin de bien comprendre les relations établies par la suite, précisons que les observations disponibles, à une fréquence suffisante, proviennent des photographies horaires des infrastructures maritimes. Le traitement actuel de ces photographies nous donne l'information suivante, soit : absence de glace, présence de glace ou couverture complète de glace.

6.1.1 Quaqtuq

Prise

À Quaqtuq, la concentration de GDR (CGDR) semble bien corrélée avec la concentration de GDM (CGDM) lors de la prise. La CGDR modélisée est donc égale à la CGDM jusqu'à la dernière fois où l'épaisseur de GDM (EGDM) passe sous le seuil de 95 % de l'épaisseur maximale pour la saison de glace en cours.

$$CGDR = CGDM \text{ jusqu'à la dernière fois où EGDM descend sous } 95\% EGDM_{\max}$$

Retrait

La CGDR semble bien corrélée à l'EGDM pour le début du retrait et être complètement disparue lorsque l'EGDM est égale à 50 % de l'épaisseur maximale pour la saison de glace en cours. Donc, une fois passé le dernier seuil de 95 % de l'épaisseur maximale, la CGDR passe de 1 à 0 lorsque l'EGDM passe de 95 % et 50 % de l'épaisseur maximale. Finalement, la CGDR est nulle lorsque l'EGDM est inférieure à 50 % de l'épaisseur maximale.

$$CGDR = \begin{cases} \sim EGDM \text{ normalisé si } 50\% EGDM_{\max} < EGDM < 95\% EGDM_{\max} \\ 0 \text{ si } EGDM < 50\% EGDM_{\max} \end{cases}$$

6.1.2 Umiujaq

Prise

À Umiujaq, la CGDR semble bien corrélée avec la CGDM lors de la prise. La CGDR modélisée est donc égale à la CGDM jusqu'à ce que l'EGDM atteigne la valeur maximale pour la saison de glace en cours.

$$CGDR = CGDM \text{ tant que } EGDM < EGDM_{\max}$$

Retrait

La CGDR semble bien corrélée à l'EGDM pour le début du retrait et avoir complètement disparu après la moitié du temps requis pour que l'EGDM soit pratiquement nulle. Donc, une fois l'épaisseur maximale atteinte, la CGDR passe de 1 à 0 lorsque EGDM passe de $EGDM_{\max}$ à $EGDM_{T1/2}$, $EGDM_{T1/2}$ étant la valeur de l'EGDM après la moitié du temps requis pour que l'EGDM passe sous le seuil de 0.004 (EGDM est normalisé par rapport à la valeur maximale).

$$CGDR = \begin{cases} \sim EGDM \text{ normalisé si } EGDM_{T1/2} < EGDM < EGDM_{\max} \\ 0 \text{ si } EGDM < 50\% EGDM_{T1/2} \end{cases}$$

6.1.3 Kuujjuaq

Prise

Étant donné la distance entre les infrastructures de Kuujjuaq et la position de la première cellule mouillée du simulateur, l'EGDM et la CGDM ne permettent pas de bien reproduire la CGDR à Kuujjuaq. Par contre, la CGDR semble bien corrélée avec les degrés*heures de gel (DHGE) lors de la prise. Elle commence en moyenne après 691 DHGE et la couverture est totale après 21 250 DHGE. La GDR est donc proportionnelle aux DHGE pour les mois d'octobre à mars et passe de 0 à 1 lorsque DHGE passe de 691 à 21 250. Les DHGE sont cumulés à partir du premier octobre de chaque année.

$$CGDR \sim DHGE \text{ si } 691 < DHGE < 21250$$

Retrait

De façon similaire, la CGDR semble bien corrélée avec les degrés*heures de dégel (DHDG) lors du retrait. Elle commence à fondre en moyenne après 177 DHDG et a complètement disparu après 789 DHDG. La GDR est donc proportionnelle au DHDG pour les mois d'avril à septembre et passe de 1 à 0 lorsque DHDG passe de 177 à 789. Les DHDG sont cumulés à partir du premier janvier de chaque année.

$$CGDR \sim DHGE \text{ si } 6177 < DHDG < 789$$

6.2 Comparaison

Ces relations empiriques sont utilisées pour reproduire une série temporelle de la GDR pour chacun des 3 villages (Figure 27). Les observations sont discrètes : à partir des photos utilisées, il a été déterminé s'il y avait absence, couverture partielle ou couverture totale de GDR. Il est intéressant de noter qu'au moment de construire la relation, seules les saisons de glace 2009-2010 et 2010-2011 étaient disponibles. Les résultats obtenus pour la saison 2011-2012 permettent donc une certaine validation des relations.

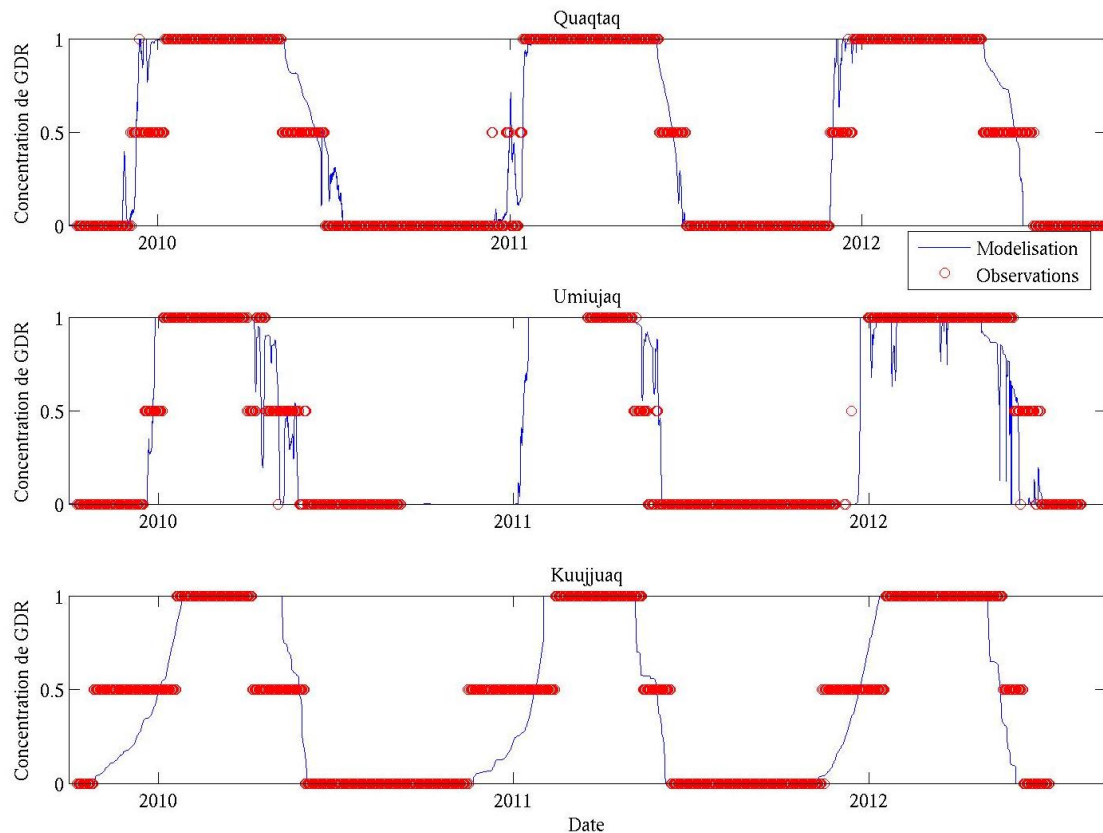


Figure 27 — Séries temporelles de la GDR observée à l'aide des appareils photo (cercles rouges) et de la GDR modélisées à partir des relations empiriques et des sorties du simulateur (ligne bleue).

Pour Quaqtuaq, la relation empirique semble bien modéliser la prise et le retrait de la GDR (Figure 27). La synchronisation entre les observations et la modélisation est bonne pour ces 2 évènements. Selon la valeur du coefficient de corrélation R^2 pour ce village (Tableau 4), la relation empirique reproduit 89.3 % de la variabilité de la GDR. Pour la saison 2009-2010, les observations montrent une brève couverture totale au début de la saison suivie d'une couverture partielle avant de redevenir complètement couverte. Cette suite d'évènements est reproduite par la relation empirique. Il en est de même pour la saison 2010-2011 : l'alternance entre absence de GDR et couverture partielle lors de la prise est aussi reproduite par la relation

empirique. La relation empirique a également permis de bien prédire la saison de GDR 2011-2012.

Pour Umiujaq, la relation empirique semble bien modéliser la prise et le retrait de la GDR. La synchronisation entre les observations et la modélisation est bonne pour ces 2 évènements. Par contre, aucune photo n'est disponible pour la prise de GDR de la saison 2010-2011, ce qui diminue la robustesse et la validation de la relation empirique. Toutefois, selon la valeur du coefficient de corrélation R^2 pour ce village (Tableau 4), la relation empirique reproduit tout de même 84.8 % de la variabilité de la GDR. Pour la saison 2009-2010, les observations montrent une alternance entre absence de GDR, couverture partielle et couverture totale qui est bien reproduite par la relation empirique. La relation empirique a également permis de bien prédire la saison de GDR 2011-2012.

Pour Kuujjuaq, la relation empirique semble bien modéliser la prise et le retrait de la GDR, à l'exception du retrait pour la saison 2009-2010. Toujours selon la valeur du coefficient de corrélation R^2 pour ce village (Tableau 4), la relation empirique reproduit tout de même 78.1 % de la variabilité de la GDR, et la prédiction pour 2011-2012 est acceptable.

Tableau 4 — Coefficients de corrélation entre la GDR observée et la GDR obtenue des relations empiriques

Village	R^2
Quaqtaq	0.8930
Umiujaq	0.8475
Kuujjuaq	0.7814

6.3 Séries temporelles des concentrations de GDR du futur et du passé récent

Ces relations empiriques sont appliquées sur les résultats du simulateur pour les simulations climatiques. Nous obtenons donc des séries temporelles de la GDR, pour chacun des 3 villages, sur une période allant d'octobre 1981 à décembre 2070 (Figure 28, Figure 29 et Figure 30). Ces 3 figures sont produites à partir des résultats de MRCC-AHJ. Les figures produites à partir des résultats de MRCC-AEV-bTq sont en annexe.

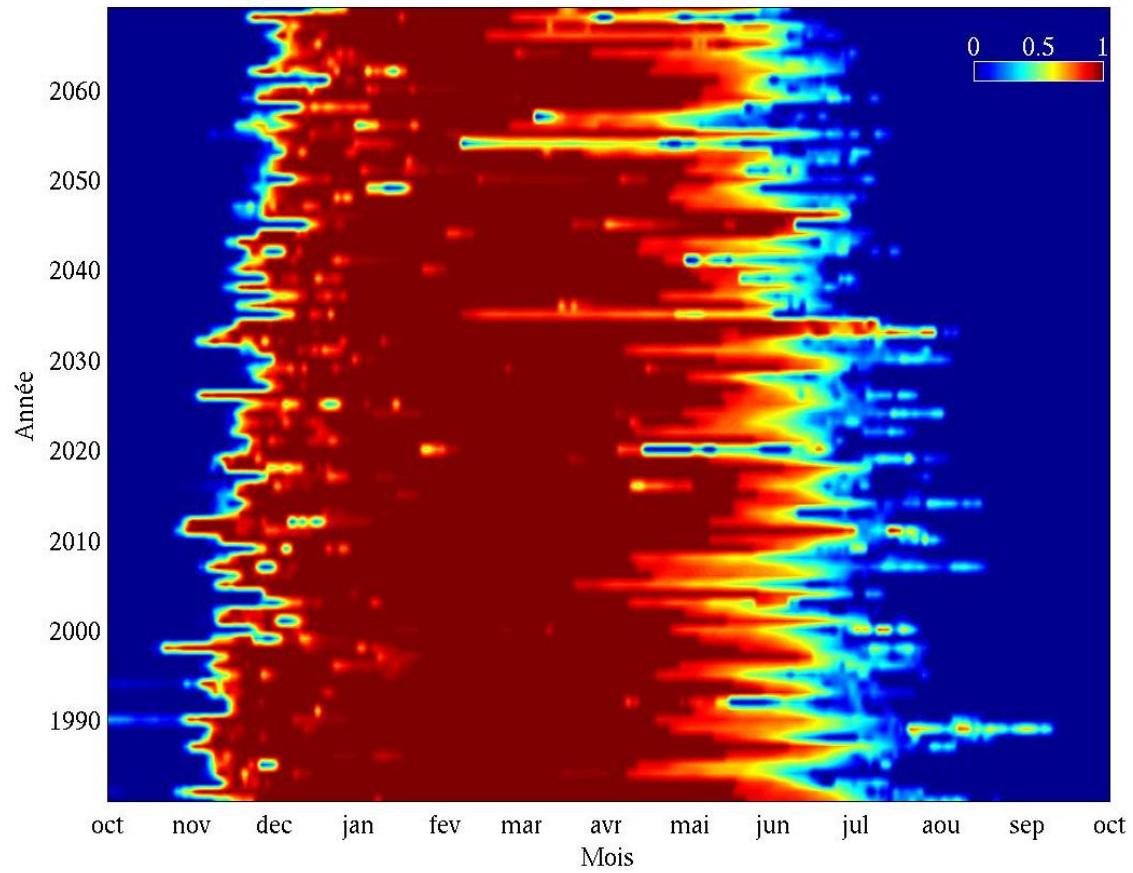


Figure 28 — Séries temporelles de la GDR pour Quaqtq, de la simulation MRCC-AHJ. Les années sont sur l'axe vertical (de 1981 à 2070), les mois sur l'axe horizontal et l'échelle de couleurs représente la fraction de la région couverte par la GDR.

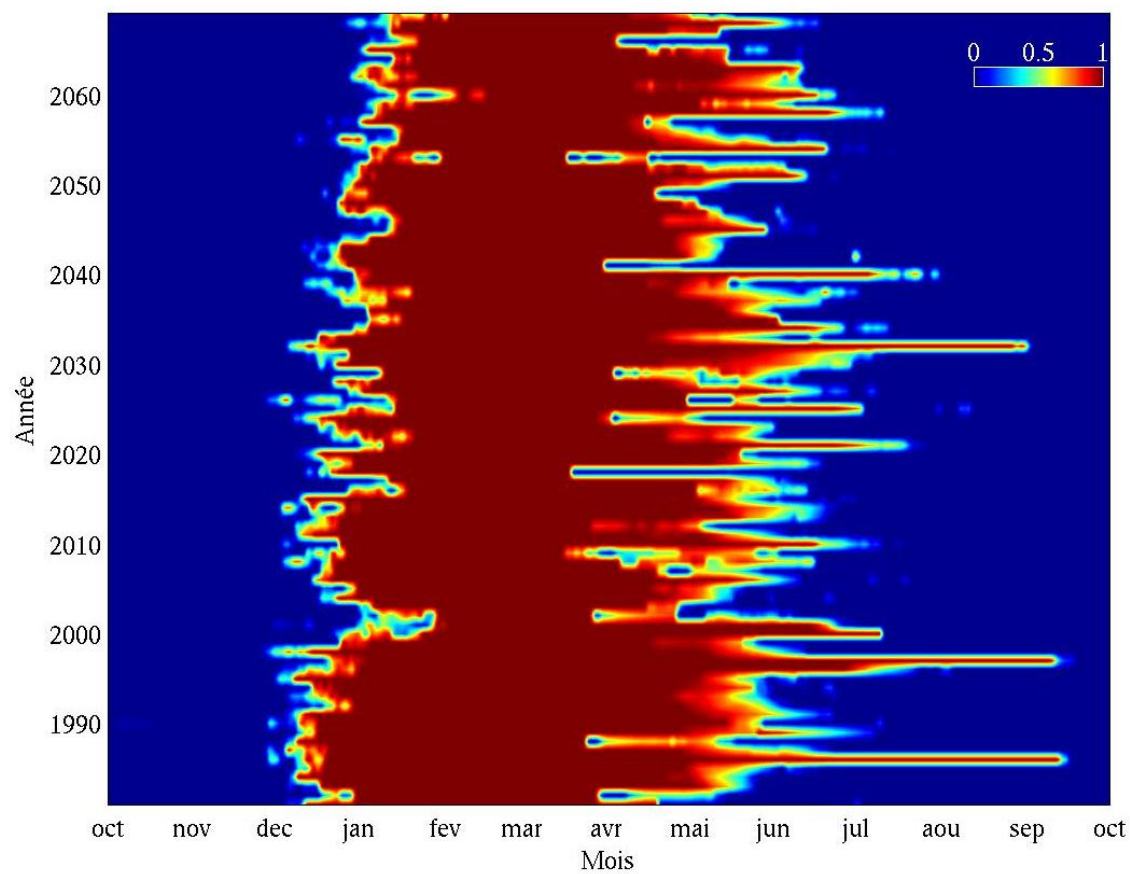


Figure 29 — Séries temporelles de la GDR pour Umiujaq, de la simulation MRCC-AHJ. Les années sont sur l'axe vertical (de 1981 à 2070), les mois sur l'axe horizontal et l'échelle de couleurs représente la fraction de la région couverte par la GDR.

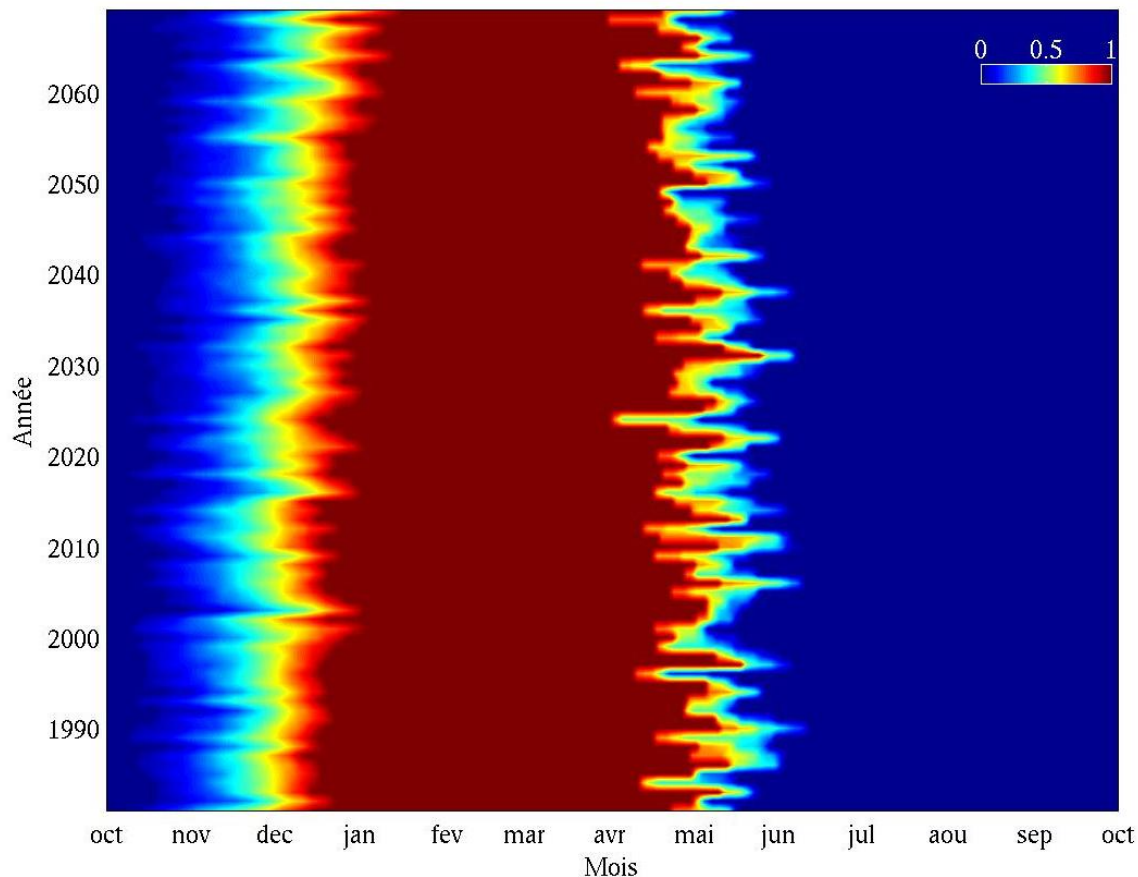


Figure 30 — Séries temporelles de la GDR pour Kuujuaq, de la simulation MRCC-AHJ. Les années sont sur l'axe vertical (de 1981 à 2070), les mois sur l'axe horizontal et l'échelle de couleurs représente la fraction de la région couverte par la GDR.

Les figures 28, 29 et 30 montrent clairement une diminution de la saison de GDR. C'est ce que nous verrons plus en détail dans les 2 sections suivantes. Il est à noter que nous observons également une forte variabilité interannuelle qui peut même être supérieure à la variation causée par les changements climatiques.

6.4 Climatologies de la concentration de GDR

Pour synthétiser l'information de la section précédente, des climatologies de concentration GDR pour le futur (2041-2070) et le passé récent (1981-2010) sont calculées à partir des séries temporelles de GDR, pour chacun des villages (Figure 31).

Ces climatologies sont calculées de la façon suivante :

1. Des séries temporelles horaires sont extraites pour chaque année de glace, une année de glace étant définie comme allant du 1^{er} octobre au 1^{er} octobre suivant;

2. Pour chaque pas de temps (une heure) d'une année, une moyenne de la concentration de GDR est faite sur une période de 30 ans (1981-2010 ou 2041-2070) pour ce même pas de temps.

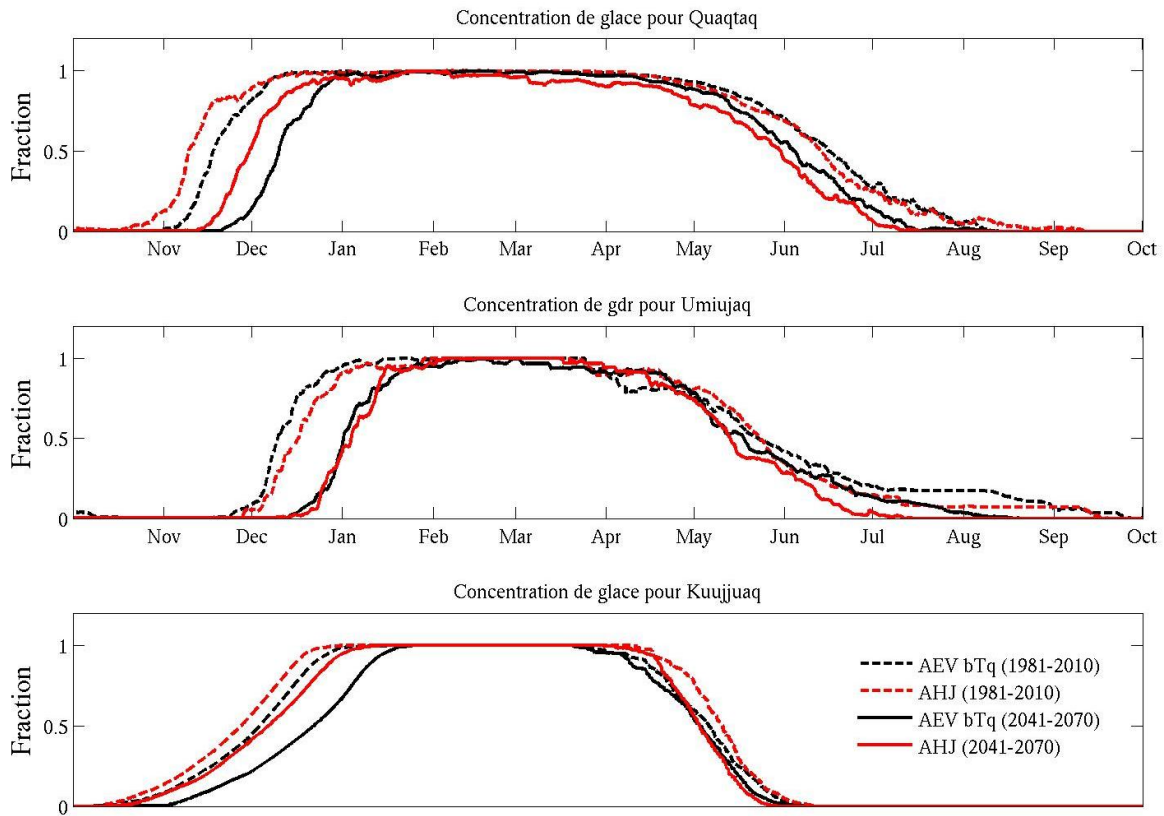


Figure 31 — Climatologie des concentrations de GDR pour Quaqtq, Umiujaq et Kuujuaq.

De façon générale, la différence entre le futur et le passé récent est plus prononcée lors de la prise que lors du retrait. Ceci peut s'expliquer en partie par l'effet tampon de l'océan. Lors de la prise des glaces, une plus grande quantité de chaleur devra être extraite de l'océan avant d'atteindre le point de congélation dans un climat plus chaud. Cependant, à la fonte, malgré le réchauffement, la température de l'eau en surface atteindra tout de même le point de congélation.

Pour Quaqtq, on observe des différences notables entre aev et ahj lors de la prise. Toutefois, l'écart entre le futur et le passé récent est du même ordre. De plus, le temps de retrait de la GDR est plus long que le temps de prise de la GDR.

Pour Umiujaq, les divergences entre aev et ahj sont beaucoup plus faibles. De plus, tout comme Quaqtq, le temps de retrait de la GDR est plus long que le temps de prise de la GDR.

Pour Kuujjuaq, les divergences entre aev et ahj sont relativement faibles pour le présent, mais augmentent dans le futur. De plus, à l'inverse des 2 autres villages, le temps de retrait de la GDR est plus court que le temps de prise de la GDR.

Il est important de noter qu'une climatologie de la concentration de GDR sur une période de 30 ans agit comme un filtre passe-bas sur le signal de concentration de GDR : les variations à haute fréquence sont perdues lors de l'opération. Par exemple, des périodes d'alternances entre présence de GDR, couverture partielle et couverture totale, comme cela a été observé (voir section 6.2), ne seront pas visibles sur ces climatologies. Ces périodes d'alternances surviennent néanmoins, comme en témoignent les séries temporelles de GDR (Figure 28, Figure 29 et Figure 30). Il est donc inapproprié de calculer les écarts temporels entre la saison de GDR du passé récent et celle du futur à partir de ces climatologies de concentration de GDR : la saison de GDR est définie à partir d'une valeur seuil, et les opérations effectuées pour obtenir une climatologie ne sont pas compatibles avec cette définition. En fait, la moyenne doit être faite sur la durée elle-même, ce qui est fait dans la section suivante. Dans les rapports antérieurs, ces subtilités n'avaient pas été prises en compte dans le calcul de la durée des saisons de glace de mer (à l'exception de l'annexe remise au mois de septembre 2012).

6.5 Durée de la saison de GDR

Tout d'abord, afin de comparer la durée de la saison de GDR entre le futur et le passé récent, nous définissons la durée de la saison de GDR comme le nombre de jours avec une couverture supérieure à 30 % pour une année de glace donnée (Parkinson, 1992). Il est donc possible d'obtenir une série temporelle de la durée de la saison de GDR allant de 1981 à 2070. La moyenne du passé récent (1981-2010) peut ainsi être comparée avec la moyenne du futur (2040-2071). La Figure 32, la Figure 33 et la Figure 34 présentent les séries temporelles de la durée de la saison de GDR ainsi qu'une moyenne mobile de 30 ans de cette durée.

À partir d'une régression linéaire, nous avons déterminé la diminution moyenne de la durée de la saison de GDR pour chaque village. Ces taux sont présentés au Tableau 5.

Tableau 5 – Taux de diminution de la durée de la saison de GDR

Village	Taux (jours/année)
Quaqtaq	0.64
Umiujaq	0.56
Kuujjuaq	0.28

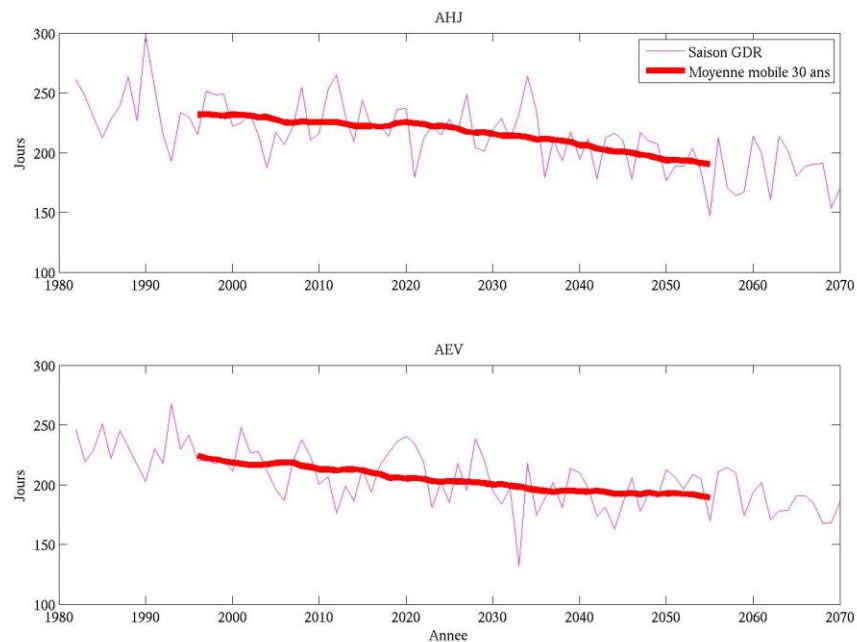


Figure 32 – Durée, en jours, de la saison de GDR de 1981 à 2070 pour le village de Quaqtak. Le trait gras en rouge est une moyenne mobile sur une période de 30 ans.

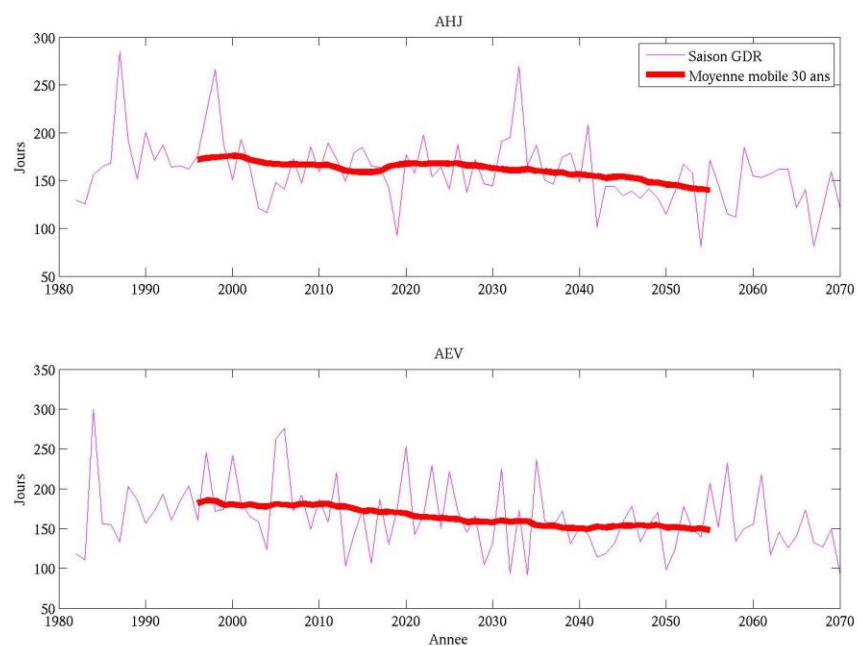


Figure 33 — Durée, en jours, de la saison de GDR de 1981 à 2070 pour le village d’Umiujaq. Le trait gras en rouge est une moyenne mobile sur une période de 30 ans.

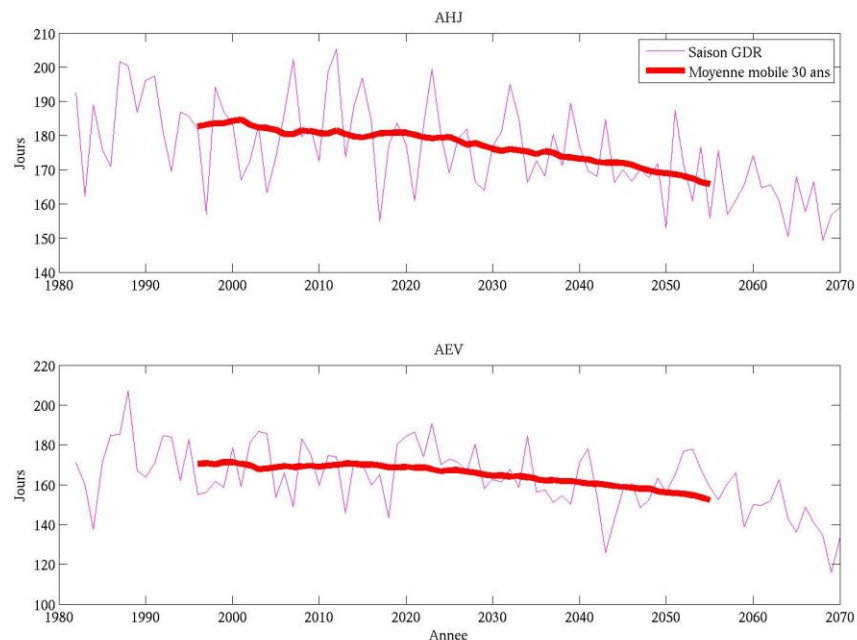


Figure 34 — Durée, en jours, de la saison de GDR de 1981 à 2070 pour le village de Kuujjuaq. Le trait gras en rouge est une moyenne mobile sur une période de 30 ans.

Les figures 35 à 37 présentent les séries temporelles du nombre de jours où la concentration de GDR est comprise entre 1 % et 30 %.

Nous avons choisi ces seuils et critères pour exprimer les différences entre le passé récent et le futur. Cependant, il est possible de changer ces critères pour d'autres qui seraient plus appropriés dans le cadre d'une étude d'ingénierie de la glace auprès des infrastructures. Nous laisserons le soin aux utilisateurs de ces résultats de nous guider vers la formulation qui leur conviendra le mieux.

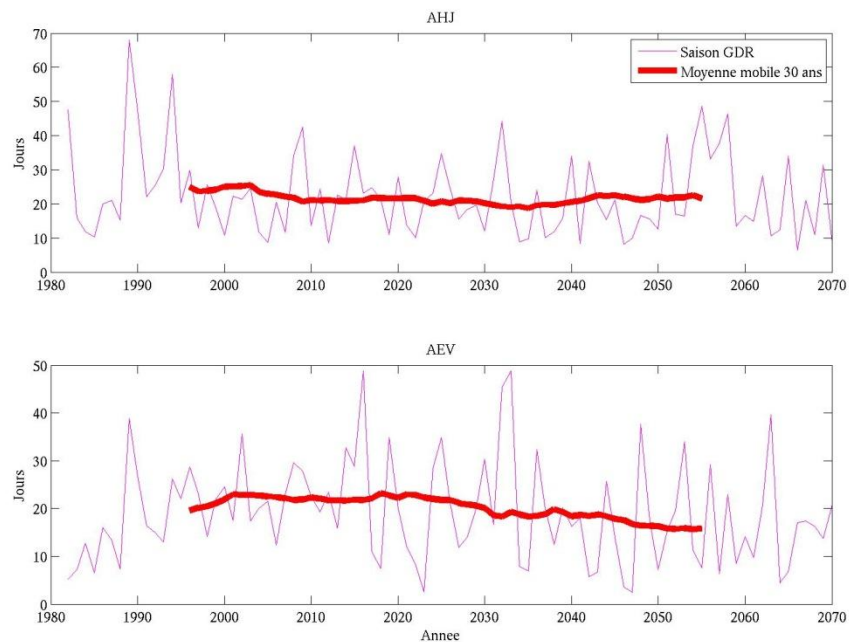


Figure 35 – Nombre de jours pour lesquels la concentration de GDR est comprise entre 1 % et 30 % pour le village de Quaqtq. Le trait gras en rouge est une moyenne mobile sur une période de 30 ans.

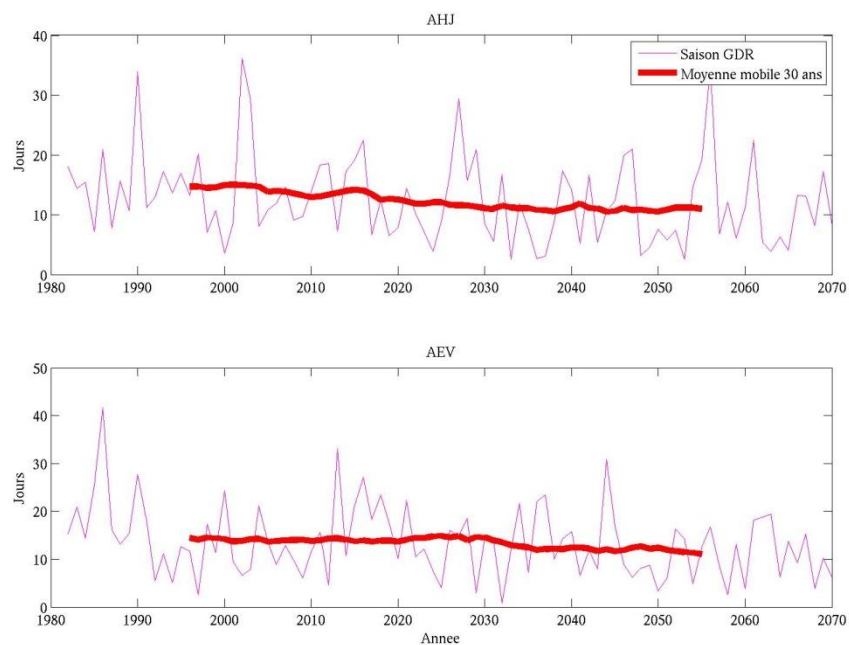


Figure 36 — Nombre de jours pour lesquels la concentration de GDR est comprise entre 1 % et 30 % pour le village d’Umiujaq. Le trait gras en rouge est une moyenne mobile sur une période de 30 ans.

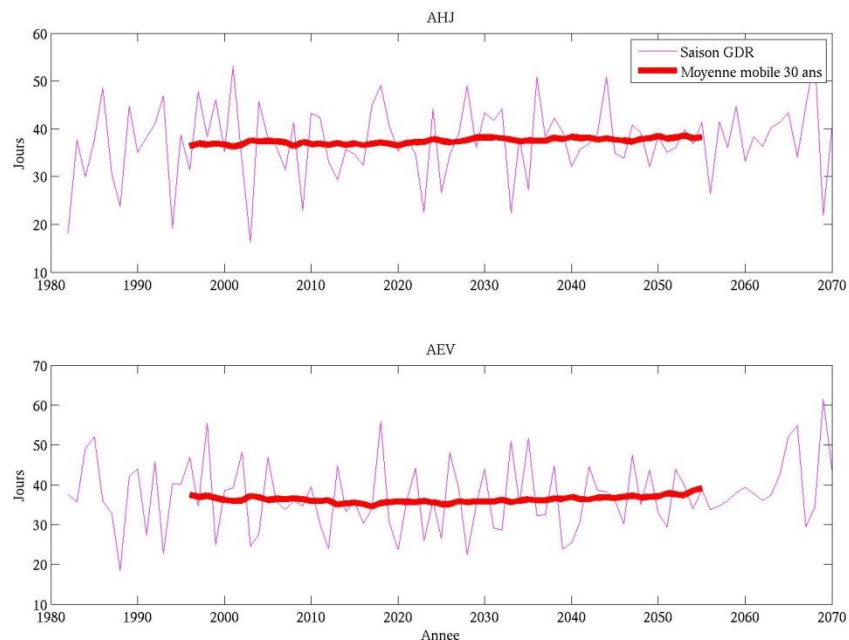


Figure 37 — Nombre de jours pour lesquels la concentration de GDR est comprise entre 1 % et 30 % pour le village de Kuujuaq. Le trait gras en rouge est une moyenne mobile sur une période de 30 ans.

Le Tableau 6 présente en détail les différences entre le passé récent et le futur pour chacun des villages.

Tableau 6 — Variation de la saison de GDR

Village	Simulation	Variation Saison GDR (j)	Valeur relative (%)	Variation GDR entre 1 % et 30 % (j)	Valeur relative (%)
Quaqtaq	ahj	-41.6	-18.0	-3.3	-13.4
	aev	-34.7	-15.5	-3.7	-19.2
Umiujaq	ahj	-32.1	-18.7	-3.7	-25.4
	aev	-33.7	-18.6	-3.4	-23.7
Kuujuaq	ahj	-17.0	-9.3	+1.9	+5.1
	aev	-18.2	-10.7	+1.8	+4.8

Pour Quaqtaq, la saison de GDR diminue en moyenne de 38.2 jours. Cela correspond à une diminution relative de 16.8 % par rapport à la moyenne de la durée de la saison de GDR du passé récent. Le nombre de jours où la concentration de GDR est comprise entre 1 % et 30 % diminue en moyenne de 3.5 jours, ce qui correspond à une diminution relative de 16.3 % par rapport à la moyenne du passé récent.

Pour Umiujaq, la saison de GDR diminue en moyenne de 32.9 jours. Cela correspond à une diminution relative de 18.7 % par rapport à la moyenne de la durée de la saison de GDR du

passé récent. Le nombre de jours où la concentration de GDR est comprise entre 1 % et 30 % diminue en moyenne de 3.6 jours, ce qui correspond à une diminution relative de 24.6 % par rapport à la moyenne du passé récent.

Pour Kuujuaq, la saison de GDR diminue en moyenne de 17.6 jours. Cela correspond à une diminution relative de 10 % par rapport à la moyenne de la durée de la saison de GDR du passé récent. À l'inverse des 2 autres villages, le nombre de jours où la concentration de GDR est comprise entre 1 % et 30 % en moyenne de 1.9 jour, ce qui correspond à une augmentation relative de 5 % par rapport à la moyenne du passé récent.

6.6 Discussion

Un objectif important dans ce projet était de prévoir le climat des glaces de rive autour des infrastructures maritimes dans le Nunavik pour l'horizon 2055. Malgré la lacune de notre simulateur couplé (glace de mer – océan) à prédire la glace de rive et notre résolution spatiale grossière à l'échelle d'une infrastructure, nous sommes parvenus à une solution acceptable intégrant le maximum d'information actuellement disponible. Pour y parvenir, nous avons utilisé des relations empiriques basées sur des observations de glace de rive, produite par l'INRS-ÉTÉ, et les résultats de notre simulateur numérique. Ces travaux sont originaux et nous sommes les premiers, à notre connaissance, à disposer des outils pour produire ces simulations climatiques régionales de glace de la baie d'Hudson pour l'horizon 2055.

7 Conclusion

Puisque les différents résultats ont été clairement discutés à même chacune des sections, nous passons directement à la conclusion. Nous énumérerons, dans cette section, les principaux résultats obtenus dans cette étude.

Premièrement, la validation du simulateur à l'aide d'une simulation témoin nous permet de l'utiliser en mode prédictif. Ce projet nous a également permis de mettre en évidence l'importance d'utiliser des simulations climatiques plutôt que la méthode des deltas, méthode utilisée lors de nos études précédentes. Ce fait est appuyé par l'analyse des variables océaniques et des variables associées à la glace de mer.

En ce qui concerne la glace de mer, nous anticipons une diminution d'environ 20 % du volume maximal de glace de mer (376 km^3) et une diminution d'environ 15 % de la période d'englacement (39 jours). De plus, nous observons une forte corrélation entre la moyenne mobile de la température de l'air à 2 m et la moyenne mobile du volume maximal annuel de glace de mer ($r^2 = 0.998$).

Par la suite, nous avons établi des relations empiriques entre les variables environnementales observées et modélisées et les observations de glaces de rive. La glace de rive simulée, à l'aide de ces relations empiriques, reproduit de 77 % à 89 % de la variabilité des observations. Cela nous permet 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.

Nous tenons à rappeler que ces résultats sont partiels et déterminés selon certains critères qui nous semblent pertinents au moment de la rédaction de ce rapport. Cependant, si d'autres analyses plus appropriées à des fins d'ingénierie (ou autre) sont requises, il nous sera possible de les refaire à partir de notre base de données exhaustive.

Ces travaux nous guident également vers des perspectives intéressantes. En effet, nous croyons que ces résultats pourraient bénéficier de quelques améliorations au niveau des observations et des simulations numériques. En ce qui a trait aux observations, nous pensons que des valeurs de concentration continues (de 0 à 100 % de CGDR) au lieu de valeurs discrètes (absence, présence, couverture totale) seraient un avantage considérable lors de l'analyse. Nous croyons que ce serait possible à l'aide de la géorectification d'images. Cependant plusieurs paramètres viennent compliquer cette analyse, soit : la hauteur de l'appareil photo, la disponibilité des points de repère, la variation des niveaux d'eau, la variation de l'intensité lumineuse et sûrement bien d'autres paramètres qui nous échappent. Du côté des simulations numériques, une amélioration du modèle de glace (rhéologie, interaction avec le fond) et du modèle océanique (éléments couvrant-découvrant) ainsi que l'utilisation de sous-région à forte résolution spatiale seraient appropriées pour améliorer la justesse des résultats de cette étude.

Annexe

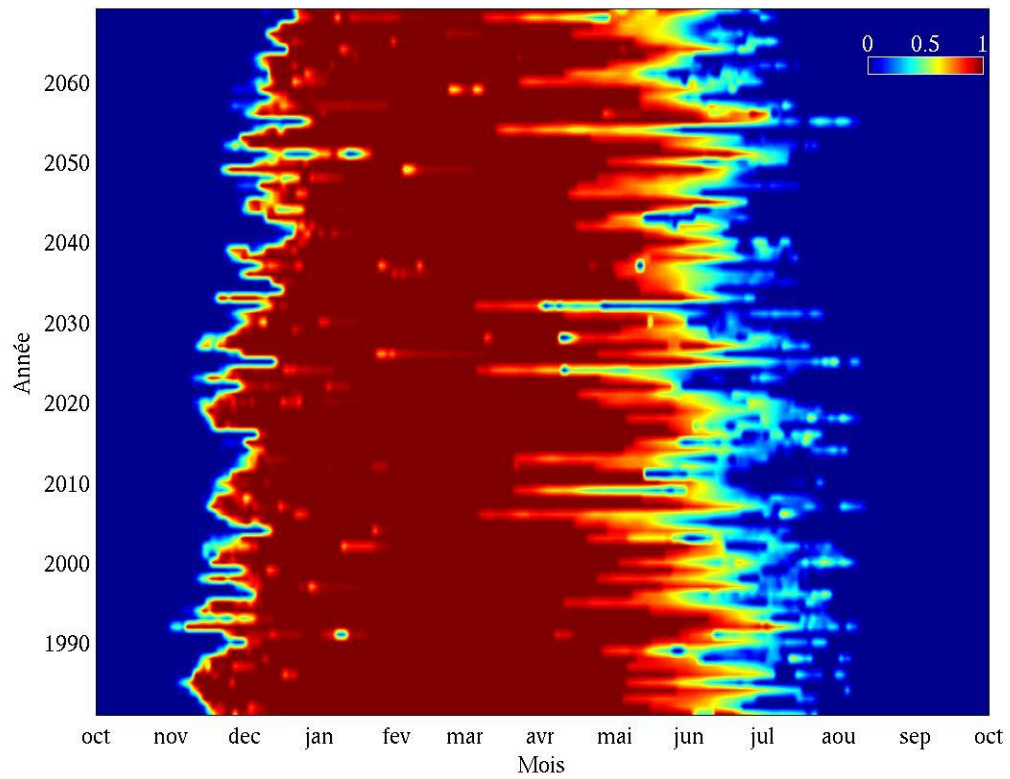


Figure 38 — Séries temporelles de la GDR pour Quaqtaq, de la simulation MRCC-AEV-bTq. Les années sont sur l'axe vertical (de 1981 à 2070), les mois sur l'axe horizontal et l'échelle de couleurs représente la fraction de la région couverte par la GDR.

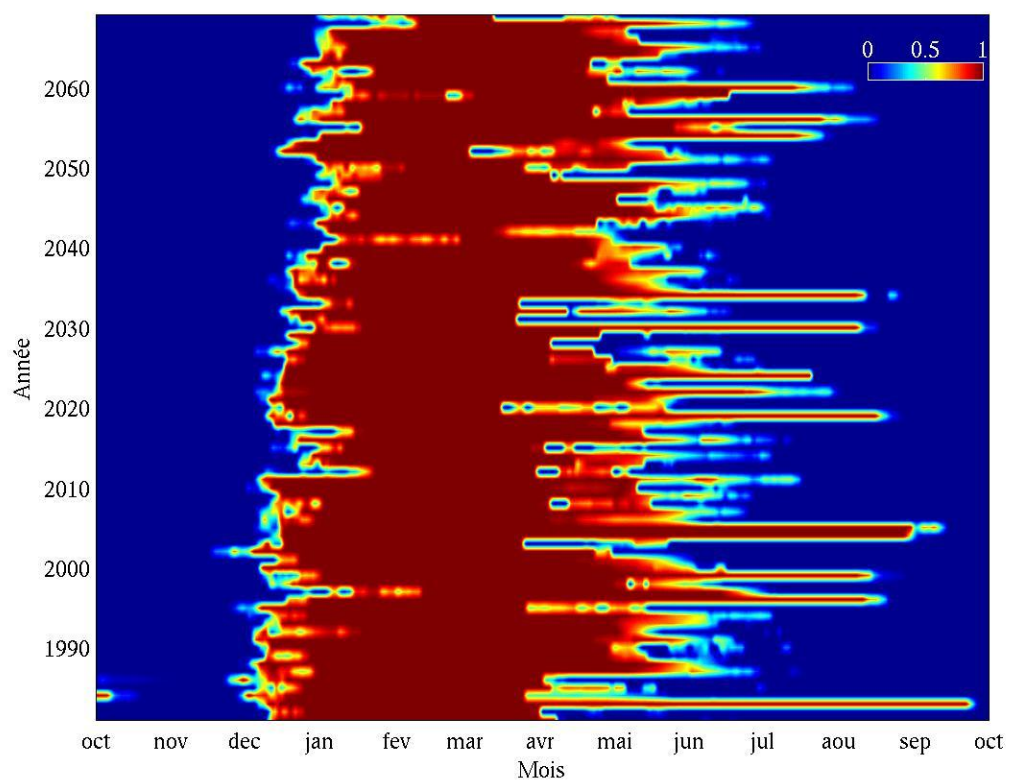


Figure 39 — Séries temporelles de la GDR pour Umiujaq, de la simulation MRCC-AEV-bTq. Les années sont sur l'axe vertical (de 1981 à 2070), les mois sur l'axe horizontal et l'échelle de couleurs représente la fraction de la région couverte par la GDR.

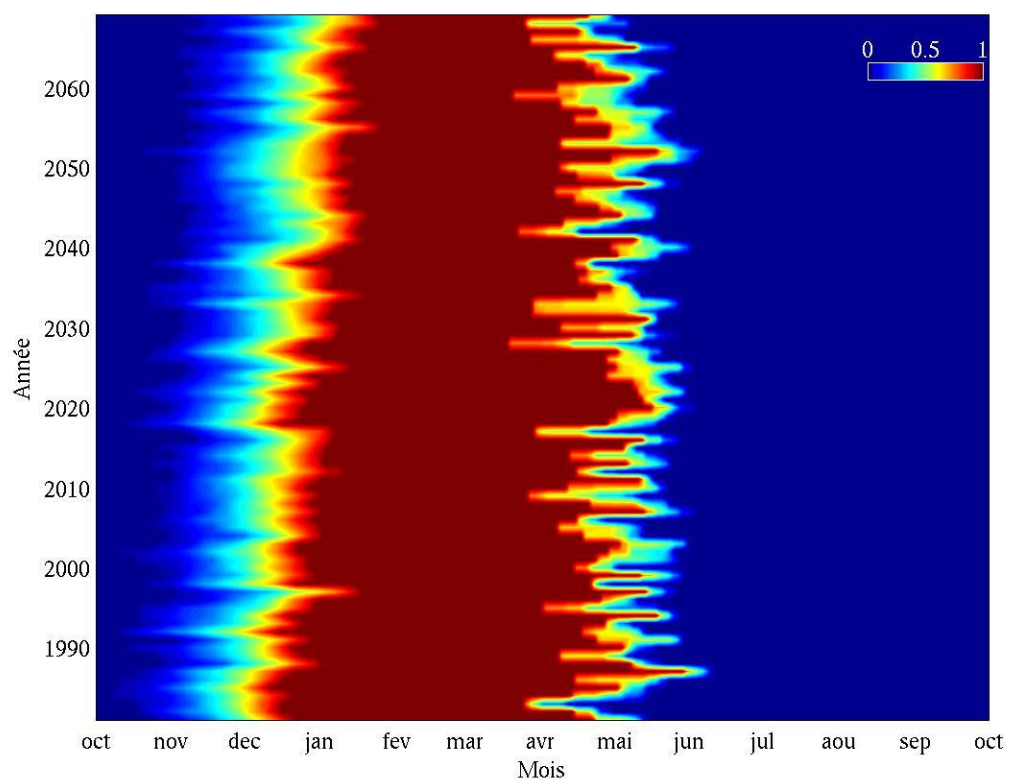


Figure 40 — Séries temporelles de la GDR pour Kuujuaq, de la simulation MRCC-AEV-bTq. Les années sont sur l'axe vertical (de 1981 à 2070), les mois sur l'axe horizontal et l'échelle de couleurs représente la fraction de la région couverte par la GDR.

Références

- Anandhi, A., Frei, A., Pierson, D.C., Schneiderman, E.M., Zion, M.S., Lounsbury, D., Matonse, A.H., 2011. Examination of change factor methodologies for climate change impact assessment. *Water Resources Research* 47, W03501.
- Joly, S., Senneville, S., Caya, D., Saucier, F., 2010. Sensitivity of Hudson Bay Sea ice and ocean climate to atmospheric temperature forcing. *Climate Dynamics*, 1-15.
- Parkinson, C., 1992. Spatial patterns of increases and decreases in the length of the sea ice season in the north polar region, 1979-1986. *Journal of Geophysical Research* 97, 14377-14388.
- Saucier, F., Senneville, S., Prinsenberg, S., Roy, F., Smith, G., Gachon, P., Caya, D., Laprise, R., 2004. Modelling the sea ice-ocean seasonal cycle in Hudson Bay, Foxe Basin and Hudson Strait, Canada. *Climate Dynamics* 23, 303-326.