



## Table des matières

1. Introduction .....	5
2. Objectifs .....	6
3. Méthodes .....	6
3.1 Approche générale .....	6
3.2 Couverture spatiale du projet .....	7
3.2.1 Aire d'étude : la toundra arbustive et herbacée du Nunavik .....	7
3.2.2 Aire de modélisation : le nord du Québec et le Labrador .....	8
3.3 Données climatiques .....	9
3.3.1 Période de référence (1981-2010) .....	9
3.3.2 Périodes futures (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) .....	9
3.4 Données biologiques .....	10
3.4.1 Données de répartition .....	10
3.4.1.1 Mammifères et oiseaux .....	10
3.4.1.2 Arthropodes et plantes .....	10
3.4.2 Traits fonctionnels et données biologiques et écologiques .....	11
3.5 Relations trophiques .....	11
3.6 Modélisation de niche climatique .....	12
3.6.1 Choix des algorithmes .....	13
3.6.2 Calibration du modèle de niche .....	13
3.6.3 Évaluation de la performance du modèle mathématique .....	13
3.6.4 Projection de l'enveloppe climatique .....	13
3.7 Indice de vulnérabilité écosystémique .....	15
4. Résultats .....	16
4.1 Climat .....	16
4.1.1 Période de référence (1981-2010) .....	16
4.1.2 Périodes futures (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) .....	17
4.2 Projection des niches climatiques .....	19
4.3 Richesse spécifique .....	21
4.4 Relations trophiques .....	23
4.5 Vulnérabilité écosystémique .....	27
5. Discussion .....	28

5.1	Les difficultés d'acquisition de données en territoire nordique.....	29
5.1.1	Données météorologiques .....	29
5.1.2	Données de biodiversité.....	29
5.2	L'interprétation des résultats de modélisation.....	30
5.2.1	Portée et limites de la modélisation des niches climatiques .....	30
5.2.2	Portée et limites de la modélisation écosystémique .....	30
5.2.3	Portée et limites de l'indice de vulnérabilité .....	31
6.	Conclusions et recommandations .....	31
7.	Remerciements .....	32
8.	Références bibliographiques .....	32
9.	Références aux données et métadonnées .....	34
10.	Annexes.....	35
	Annexe 1 : Portrait du climat du nord du Québec et du Labrador pour la période 1981-2010 .....	35
	Annexe 2 : Portrait du climat du nord du Québec et du Labrador pour la période 2071-2100 .....	35
	Annexe 3 : Portrait potentiel de la biodiversité de la toundra du Nunavik pour la période 2071-2100.	35

## Liste des figures

- Figure 1.** Schématisation des grandes étapes de réalisation du projet.....7
- Figure 2.** Régions étudiées : L'Aire d'étude (hachurée) est la région à l'intérieur de laquelle nous sommes intéressés aux résultats de la modélisation écosystémique. Cette aire d'étude est incluse dans une Aire de modélisation (en blanc, avec et sans hachures) à l'intérieur de laquelle nous avons modélisé les niches climatiques des espèces. ....8
- Figure 3.** Extrait de la matrice des relations prédateurs-proies. Chaque colonne représente un prédateur et chaque ligne représente une proie. 0 = pas de lien, 1 = lien de prédation. ....12
- Figure 4.** Schématisation des étapes nécessaires à l'élaboration d'un modèle de niche climatique et à la projection de la répartition potentielle future d'une espèce. Les étapes pour la modélisation future doivent être répétées pour chacun des 10 scénarios climatiques et pour chacun des trois horizons temporels. Le schéma a été modifié à partir de celui présenté dans Berteaux et al. (2014).....14
- Figure 5.** Changements projetés dans la température annuelle moyenne (°C) sous deux RCP pour le Québec nordique et le Labrador. Les températures moyennes annuelles pour la période de référence (1981-2010) sont représentées dans le panneau de gauche, tandis que celles projetées pour la période 2071-2100 sont représentées en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes à droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas.....18
- Figure 6.** Changements projetés dans la date de dernier gel printanier (jours de l'année) sous deux RCP pour le Québec nordique et le Labrador. Les dates de dernier gel printanier pour la période de référence (1981-2010) sont représentées dans le panneau de gauche, tandis que celles projetées pour la période 2071-2100 sont représentées en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes de droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas.....19
- Figure 7.** Changements potentiels projetés dans la répartition du Lagopède alpin (*Lagopus muta*) sous deux RCP. La répartition modélisée du Lagopède alpin (en haut à droite) pour la période de référence (en haut à gauche) a été utilisée pour projeter sa répartition potentielle à l'horizon 2071-2100 sous le RCP 4,5 (en bas à gauche) et le RCP 8,5 (en bas à droite). ....20
- Figure 8.** Changements potentiels projetés dans le nombre d'espèces de mammifères et d'oiseaux sous deux RCP pour la toundra de la péninsule d'Ungava, au Nunavik. Le nombre d'espèces observé dans la période de référence (1981-2010) est représenté dans le panneau de gauche, tandis que celui projeté pour la période 2071-2100 est représenté en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes de droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas. ....21
- Figure 9.** Changements potentiels projetés dans la répartition des espèces sous deux RCP pour la toundra de la péninsule d'Ungava, au Nunavik. Les gains (cartes de gauche) et les pertes (cartes de droites) potentielles en espèces entre 2071-2100 et 1981-2010 sont représentés pour le RCP 4,5 (cartes du haut) et le RCP 8,5 (cartes du bas). Les gains et les pertes sont représentés en pourcentage. ....22
- Figure 10.** Changements potentiels projetés dans le nombre de liens au sein des réseaux trophiques sous deux RCP pour la toundra de la péninsule d'Ungava, au Nunavik. Le nombre de liens trophiques pour 1981-2010 est représenté dans le panneau de gauche, tandis que celui projeté pour 2071-2100 est représenté en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes de droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas. ....23
- Figure 11.** Changements potentiels projetés dans la connectance des réseaux trophiques sous deux RCP pour la toundra de la péninsule d'Ungava, au Nunavik. Les valeurs de connectance pour 1981-2010 sont représentées dans le panneau de gauche, tandis que celles projetées pour 2071-2100 sont représentées en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes de droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas. ....24

**Figure 12.** Changements potentiels projetés dans la généralité des prédateurs sous deux RCP pour la toundra de la péninsule d’Ungava, au Nunavik. La généralité des prédateurs pour 1981-2010 est représentée dans le panneau de gauche, tandis que celle projetée pour 2071-2100 est représentée en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes de droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas. ....25

**Figure 13.** Changements potentiels projetés dans la précarité des proies sous deux RCP pour la toundra de la péninsule d’Ungava, au Nunavik. La précarité des proies pour 1981-2010 est représentée dans le panneau de gauche, tandis que celle projetée pour 2071-2100 est représentée en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes de droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas.....26

**Figure 14.** Regroupement hiérarchique circulaire représentant les changements potentiels projetés dans la structure des réseaux trophiques de la toundra de la péninsule d’Ungava, au Nunavik, sous un RCP 8,5. Le disque de gauche représente la situation de 1981-2010 alors que celui de droite représente la situation projetée pour 2071-2100. Chaque disque se lit de l’extérieur vers l’intérieur à l’aide des légendes qui figurent en bas de la figure. Les chiffres et la couleur des bandes autour de chaque disque permettent d’identifier les différents groupes fonctionnels étudiés. Chaque espèce (ou, pour les arthropodes et les plantes, chaque entité taxonomique ou sous-groupe fonctionnel) appartenant à un groupe fonctionnel donné est représentée par un point, dont la grosseur montre le nombre de liens trophiques qu’elle possède avec d’autres espèces. Les traits représentent les liens trophiques et la couleur de ces traits reflète la proportion de cellules de 10 km x 10 km où chaque lien trophique est présent. ....27

**Figure 15.** Indice de vulnérabilité aux changements climatiques des écosystèmes terrestres de la toundra de la péninsule d’Ungava (Nunavik, Québec) sous le RCP 4,5 à gauche et le RCP 8,5 à droite, à l’horizon 2071-2100. ....28

## 1. Introduction

Les impacts environnementaux des changements climatiques affectent tous les écosystèmes, qu'ils soient terrestres, marins ou d'eau douce. Ceci a des conséquences sur les bénéfices que les êtres humains peuvent tirer des écosystèmes. Ces conséquences sont d'autant plus importantes que le climat change fortement ou que les services écologiques rendus sont élevés. À cause de l'amplification polaire, c'est dans l'Arctique que l'amplitude des changements climatiques est la plus grande (McBean et al. 2005). D'autre part, les écosystèmes arctiques sont fortement structurés par la neige, la glace, et la phénologie des saisons de croissance (Berteaux et al. 2017), ce qui ajoute à l'ampleur des impacts écologiques attendus. Finalement, l'Arctique est une des régions du monde où les populations humaines dépendent le plus fortement des écosystèmes locaux, particulièrement de la faune, pour leur alimentation et leur bien-être (Gagnon et al. 2018).

Dans ce contexte, une surveillance serrée (monitoring) des écosystèmes et populations animales est nécessaire pour déceler les changements en cours (Christensen et al. 2013) et une bonne compréhension des mécanismes écologiques qui régissent la dynamique des écosystèmes et des populations est primordiale pour interpréter les variations observées (Van der Putten et al. 2010, van Oudenhove et al. 2014). Ceci dit, notre capacité à projeter ces dynamiques dans l'avenir est un enjeu majeur. En effet, les scénarios de changement écologique sont parmi les outils les plus efficaces pour aider à atténuer les impacts de ces changements, ou s'y adapter (Berteaux et al. 2014).

Les systèmes naturels sont trop complexes pour que des prédictions fiables de leurs changements futurs soient possibles à toutes les échelles d'organisation, d'espace et de temps (Berteaux et al. 2006). Par exemple, il est impossible de prédire un siècle à l'avance la taille d'une population animale donnée. Trop de facteurs sont en jeu et ces facteurs ont trop d'interactions entre eux. Cependant, des projections précises sont possibles à certaines échelles. Par exemple, on peut prédire l'évolution d'une communauté végétale plusieurs dizaines d'années à l'avance si quelques connaissances clefs sont disponibles.

Ce projet repose sur la prémisse qu'il est possible de bâtir des scénarios, imprécis mais raisonnables, de la répartition future d'un grand nombre d'espèces à l'aide de scénarios de changement climatique couplés à des modèles de niche écologique (Berteaux et al. 2010). Nous avons étudié la toundra arctique du Québec, qui couvre l'essentiel de la péninsule d'Ungava à l'extrémité nord de la province. Bien qu'étrangère à la réalité quotidienne de la plupart des québécois, la toundra arctique représente 12% du territoire du Québec (CCE 1997). Elle est la plus vaste des deux écorégions arctiques de niveau I représentées au Québec (l'autre, la cordillère arctique, couvre moins de 1% du territoire). Comme les autres parties de l'Arctique, la toundra du Nunavik n'échappe pas aux changements climatiques observés et projetés (Allard et Lemay 2012, Charron 2015, Maihot et Chaumont 2017).

La toundra arctique est d'une grande importance car ses ressources matérielles et spirituelles sont utilisées abondamment par plusieurs communautés inuit du Nunavik, ainsi que par des visiteurs venus d'autres parties du Québec et du monde. De plus, le Plan Nord, qui stimule et encadre un développement à grande échelle du nord du Québec, comprend des initiatives pour la conservation de la biodiversité et l'intégrité écologique et culturelle de la région (Berteaux 2013). Un tel plan repose sur de nombreuses couches d'information, parmi lesquelles doivent figurer des connaissances sur l'évolution de la biodiversité nordique dans un climat changeant. Il est donc clair que des recherches à l'échelle écosystémique sont maintenant nécessaires pour comprendre les changements écologiques en cours, puisque les écosystèmes futurs et les bénéfices qu'ils procureront aux êtres humains sont tributaires de ces changements.

## 2. Objectifs

Nous avons établi deux objectifs de travail afin de répondre à la problématique exposée ci-dessus:

- i) Identifier par modélisation les expositions et sensibilités de la toundra arctique québécoise aux changements climatiques.
- ii) Estimer puis cartographier la vulnérabilité de la toundra arctique québécoise aux changements climatiques.

Conformément à la littérature du domaine (Berteaux et al. 2014, page 120), nous nommons « exposition » le degré auquel la toundra est soumise à des variations climatiques, et « sensibilité » le potentiel de changement de la toundra à la suite d'une exposition aux changements climatiques.

## 3. Méthodes

### 3.1 Approche générale

Notre approche a combiné la modélisation climatique, la modélisation de niche climatique et la modélisation écosystémique, ce qui a permis d'évaluer les changements potentiels qu'enregistreront les écosystèmes terrestres de la toundra arbustive et herbacée du Nunavik durant le 21<sup>e</sup> siècle. Plus spécifiquement, nous souhaitons :

- i) Reconstruire, pour l'ensemble de la toundra du Nunavik, le climat pour la période que nous avons choisie comme référence (1981-2010).
- ii) Projeter, pour l'ensemble de la toundra du Nunavik, les climats potentiels futurs pour trois horizons (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100).
- iii) Colliger l'ensemble des données biologiques, écologiques et de répartition disponibles pour chaque espèce de mammifère et d'oiseau dans notre aire d'étude.
- iv) Modéliser la répartition actuelle et potentielle future de chaque espèce de mammifère et d'oiseau.
- v) Reconstruire les réseaux trophiques (ou relations prédateurs-proies) actuels et potentiels futurs pour chacune des 4 315 cellules de 100 km<sup>2</sup> de l'aire d'étude.
- vi) Quantifier les changements potentiels que subiront les réseaux trophiques.
- vii) Traduire ces modifications en un indice écosystémique de vulnérabilité aux changements climatiques.

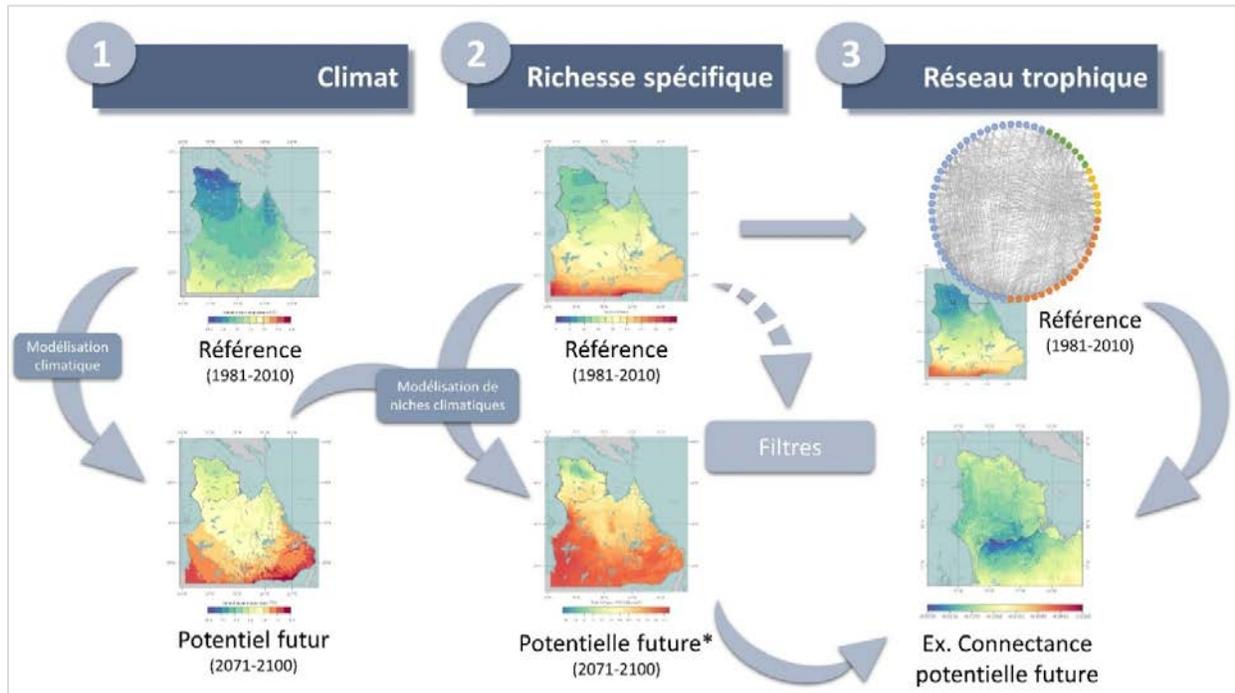
Afin de mener à terme ce projet d'envergure, nous avons donc suivi trois grandes étapes qui se retrouvent dans la structure du rapport (Figure 1):

- i) Étape 1 : Caractérisation du climat, pour la période de référence et les périodes futures.
- ii) Étape 2 : Caractérisation de la richesse spécifique de notre aire d'étude, pour la période de référence et les périodes futures.
- iii) Étape 3 : Caractérisation des réseaux trophiques pour la période de référence et pour les périodes futures, suivie de la construction d'un indice de vulnérabilité.

Les résultats du projet sont ou seront disponibles sous 4 formats:

- i) Dans ce rapport et ses trois annexes, qui présentent un condensé des résultats obtenus (horizon 2071-2100 seulement).
- ii) Dans un site web (<https://ahasverus.shinyapps.io/bioclimateatlas/>) qui rend disponibles les résultats détaillés du projet pour les trois horizons temporels évalués (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100). Ce site web rend également possible le téléchargement libre de centaines de cartes en haute résolution.
- iii) Dans une série d'articles scientifiques publiés dans des revues internationales avec comité de lecture, qui présenteront les avancées scientifiques les plus pertinentes pour la communauté scientifique. La liste préliminaire des articles est disponible à la section D.

- iv) Dans des archives reconnues utilisant les standards mondiaux d'archivage de données, soit le Polar Data Catalogue (<https://www.polardata.ca/>) pour les métadonnées du projet et Nordicana D (<http://www.cen.ugr.ca/nordicanad/>) pour les bases de données complètes. Cet archivage permettra à d'autres équipes de s'appuyer sur nos travaux pour approfondir les directions de recherche que nous avons tracées.



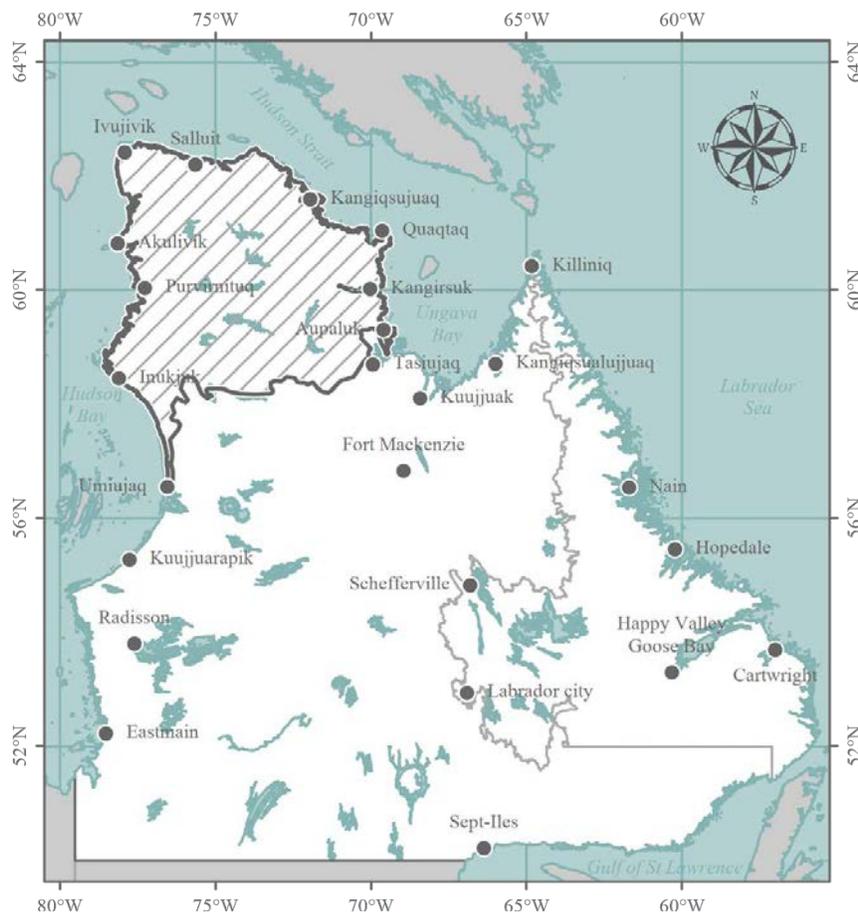
**Figure 1.** Schématisation des grandes étapes de réalisation du projet.

### 3.2 Couverture spatiale du projet

Nous avons travaillé à deux échelles spatiales différentes. Nous appelons Aire d'étude la région à l'intérieur de laquelle nous nous sommes intéressés aux résultats de la modélisation écosystémique (Figure 2; région hachurée). Cette aire d'étude est incluse dans une Aire de modélisation (Figure 2; région en blanc avec et sans hachures) à l'intérieur de laquelle nous avons modélisé les niches climatiques des espèces.

#### 3.2.1 Aire d'étude : la toundra arbustive et herbacée du Nunavik

Nous avons concentré nos recherches sur la portion arctique (située au nord de la limite des arbres) de la péninsule de l'Ungava (Nunavik, Québec). Cette aire d'étude s'étend de 69°13'37''W à 78°35'47''W en longitude et de 56°31'41''N à 62°34'45''N en latitude, selon la classification des écorégions développée par la Commission de coopération environnementale (CCE 1997; données téléchargées à <https://www.epa.gov/eco-research/ecoregions-north-america>). Sa superficie est de 188 847 km<sup>2</sup> (voir annexe 1 pour les détails sur la grille climatique utilisée). Avec une altitude moyenne de 206 m (min = 0 m, max = 682 m, SD = 111), l'aire d'étude est caractérisée par un climat polaire, des précipitations modérées et une saison de croissance courte à très courte (Charron 2015).



**Figure 2.** Régions étudiées : L'Aire d'étude (hachurée) est la région à l'intérieur de laquelle nous sommes intéressés aux résultats de la modélisation écosystémique. Cette aire d'étude est incluse dans une Aire de modélisation (en blanc, avec et sans hachures) à l'intérieur de laquelle nous avons modélisé les niches climatiques des espèces.

### 3.2.2 Aire de modélisation : le nord du Québec et le Labrador

Nous avons déterminé une aire de modélisation, incluant l'aire d'étude mais beaucoup plus grande que celle-ci, afin de modéliser adéquatement la répartition des espèces dans notre aire d'étude au cours du 21<sup>e</sup> siècle. L'aire de modélisation s'étend vers le sud jusqu'au 50<sup>e</sup> parallèle. Cette limite sud correspond, pour la période 1981-2010, à l'isotherme qui formera approximativement la limite sud de l'aire d'étude à l'horizon 2071-2100. Ceci nous permet d'inclure dans notre effort de modélisation à peu près toutes les espèces susceptibles de se retrouver dans l'aire d'étude à la fin du siècle (pour une description plus complète de cet argumentaire, voir page 78 de Berteaux et al. (2014)). L'aire de modélisation est comprise entre 55°37'13''W et 79°43'44''W (longitude) et entre 50°00'00''N et 62°34'45''N (latitude). Sa superficie est de 1 359 474 km<sup>2</sup>. Du nord au sud, la région est recouverte par la toundra herbacée, la toundra arbustive, la toundra forestière, la forêt boréale ouverte puis la forêt boréale fermée. L'altitude moyenne de la région est de 356 m (min = 0 m, max = 1 500 m, SD = 180).

### 3.3 Données climatiques

#### 3.3.1 Période de référence (1981-2010)

La réanalyse *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) du *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP; Saha et al. 2010) a été retenue comme source de données pour le climat de référence, car elle est appropriée pour les analyses liant la faune au climat dans les régions où, comme le Nord québécois, les stations météorologiques sont peu nombreuses (Charron 2015). Les grilles climatiques de cette réanalyse ont une résolution horizontale de 0,3° et nous ont permis d'obtenir, pour l'ensemble de la période considérée et pour chacune des cellules, les valeurs mensuelles de trois variables climatiques de base : (1) la température minimale de l'air, (2) la température maximale de l'air et (3) les précipitations totales. Afin d'obtenir une résolution plus fine correspondant aux cellules de notre grille d'étude (0,08333333°, soit 10 km x 10 km), les données de la réanalyse CFSR ont été interpolées par la méthode des voisins naturels, méthode d'interpolation simple mais tridimensionnelle qui prend en compte l'altitude.

Au total 27 variables bioclimatiques ont été dérivées à partir de ces trois variables de base, nous permettant de décrire les gradients climatiques de différentes variables comme les tendances annuelles, les saisonnalités et les facteurs environnementaux limitants pour les espèces (voir le tableau 1 de l'annexe 1 pour la liste complète des variables bioclimatiques et la façon dont elles ont été calculées). Afin d'éviter un sur-ajustement des modèles de niche tout en sélectionnant les principaux axes climatiques susceptible d'expliquer la répartition des espèces étudiées, six variables ont été retenues pour les analyses subséquentes, soit l'écart diurne moyen des températures, la saisonnalité des températures, la température moyenne du trimestre le plus humide, les précipitations du mois le plus humide, la saisonnalité des précipitations et les degrés-jours de croissance annuels.

#### 3.3.2 Périodes futures (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100)

Nous avons utilisé 10 simulations climatiques afin de modéliser le climat potentiel futur de notre aire d'étude. Ces simulations offrent une bonne couverture de l'incertitude présente dans les changements projetés par un grand nombre de simulations climatiques (Travis Logan, comm. pers.). Toutes ces simulations sont issues de modèles régionaux du climat (MRC), lesquels sont obtenus à partir d'interpolations dynamiques de modèles globaux. Notons aussi que tous ces MRC ont été couplés aux scénarios de forçage radiatif de nouvelle génération, les RCP (*Representative Concentration Pathway*). Ici, les RCP les plus communs ont été retenus, soit le RCP 4,5 (correspondant à un forçage radiatif de +4,5 W/m<sup>2</sup> par rapport à 1750) et le RCP 8,5 (+8,5 W/m<sup>2</sup>). Les 10 simulations climatiques utilisées dans ce projet sont présentées au tableau 1.

**Tableau 1.** Informations sur les simulations de climats futurs utilisées dans notre étude. Les modèles régionaux du climat (MRC) proviennent de deux sources différentes, soit le consortium Ouranos pour le modèle régional canadien MRCC5 (Martynov et al. 2013, Separovic et al. 2013) et le programme CORDEX (Giorgi et al. 2009) pour les autres simulations.

MRC	Centre	Source des données	Run	Résolution	GCM pilote	RCP
CANRCM4	CCCMA	CORDEX	-	0,44	CANESM2	RCP 4,5
CANRCM4	CCCMA	CORDEX	-	0,44	CANESM2	RCP 8,5
RCA4	SMHI	CORDEX	-	0,44	CANESM2	RCP 4,5
RCA4	SMHI	CORDEX	-	0,44	CANESM2	RCP 8,5
RCA4	SMHI	CORDEX	-	0,44	EC-EARTH	RCP 4,5

RCA4	SMHI	CORDEX	-	0,44	EC-EARTH	RCP 8,5
MRCM5	UQAM	CORDEX	-	0,44	CANESM2	RCP 4,5
MRCM5	UQAM	CORDEX	-	0,44	MPI-ESM-LR	RCP 4,5
MRCM5	Ouranos	Ouranos	bbf/bbg	0,22	CANESM2	RCP 8,5
MRCM5	Ouranos	Ouranos	bbh/bbi	0,22	CANESM2	RCP 8,5

Après un post-traitement (détaillé à l'annexe 2), nous avons obtenu les valeurs futures pour chacune des variables bioclimatiques retenues, et ce, pour chacune des 10 simulations climatiques (Tableau 1). Nous avons ensuite construit trois horizons futurs: 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100. Ainsi, les modèles de niche ont été projetés dans le futur sous dix scénarios de changements climatiques pour chacun des trois horizons temporels futurs. Comme pour la période de référence (section précédente), nous avons retenu six variables bioclimatiques, soit l'écart diurne moyen des températures, la saisonnalité des températures, la température moyenne du trimestre le plus humide, les précipitations du mois le plus humide, la saisonnalité des précipitations et les degrés-jours de croissance annuels.

### 3.4 Données biologiques

#### 3.4.1 Données de répartition

##### 3.4.1.1 Mammifères et oiseaux

Étant donné la rareté de l'information relative à la répartition des espèces au Nunavik, nous avons utilisé les zones d'occurrence (ou polygones de répartition) des différentes espèces étudiées. Bien que moins précises que des données ponctuelles récoltées sur le terrain, les zones d'occurrence ont néanmoins l'avantage de permettre de modéliser l'ensemble des espèces présentes dans l'aire d'étude. Pour les mammifères, les données proviennent de la base de données *Digital Distribution Maps* de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (IUCN 2014), tandis que pour les oiseaux, nous avons utilisé la base de données *Bird Species Distribution Maps of the World*, administrée conjointement par BirdLife International et NatureServe (BirdLife International et NatureServe 2015). Ces deux bases de données sont très similaires et contiennent pour chaque espèce des polygones spatiaux (*shapefiles*) pour chaque période phénologique importante (migration, nidification, hivernage, etc.).

La procédure de sélection des espèces de mammifères et d'oiseaux comportait 4 étapes :

- i) Sélection des aires de résidence et de nidification (exclusion des couloirs migratoires).
- ii) Intersection des polygones spatiaux avec la grille climatique.
- iii) Rasterisation des polygones (toutes les cellules de la grille superposant le(s) polygone(s) ont été considérées comme des présences et toutes les autres comme des absences).
- iv) Sélection des espèces dont la prévalence (nombre d'occurrences) était suffisante (examen visuel) et inférieure à 100% (si la prévalence était de 100%, l'espèce n'était pas modélisée mais elle était incluse dans les analyses de vulnérabilité).

La distribution spatiale de 183 espèces (37 mammifères et 146 oiseaux) a été modélisée et projetée dans le futur sous les divers scénarios de changements climatiques. Pour les analyses de réseaux trophiques, 194 espèces ont été utilisées (ajout de 6 espèces de mammifères et de 5 espèces d'oiseaux dont la prévalence dans l'aire d'étude était de 100%).

##### 3.4.1.2 Arthropodes et plantes

Nous avons inclus les grands groupes taxonomiques ou fonctionnels de plantes et d'arthropodes dans les analyses de réseaux trophiques (mais pas dans l'exercice de modélisation). Pour ce faire, nous

avons assumé que chacun des groupes était présent sur l'ensemble de l'aire d'étude, autant lors de la période de référence que lors des périodes futures. Les groupes taxonomiques ou fonctionnels retenus pour l'analyse de réseaux trophiques sont les suivants :

- i) Arthropodes :
  - a. Arachnides (*Arachnida*)
  - b. Coléoptères (*Coleoptera*)
  - c. Diptères (*Diptera*)
  - d. Lépidoptères (*Lepidoptera*)
  - e. Hyménoptères (*Hymenoptera*)
- ii) Plantes :
  - a. Arbustes rampants (incluant les arbustes à fruits comestibles)
  - b. Arbustes érigés
  - c. Cypéracées (*Cyperaceae*)
  - d. Lichens
  - e. Herbacées
  - f. Mousses (*Bryophyta*)
  - g. Poacées (*Poaceae*)

### 3.4.2 Traits fonctionnels et données biologiques et écologiques

Plusieurs informations biologiques et écologiques ont été colligées pour chacune des espèces de mammifères et d'oiseaux d'intérêt. À notre connaissance, l'ensemble de ces données représente à ce jour le plus grand effort de recensement et de caractérisation de la biodiversité faunique du nord du Québec.

Les données colligées pour chacune des espèces sont les suivantes :

- i) Noms (latin, français, anglais, inuktitut)
- ii) Alimentation principale (omnivore, insectivore, carnivore, piscivore, herbivore, etc.)
- iii) Masse corporelle moyenne
- iv) Période d'activité (diurne/crépusculaire/nocturne)
- v) Longévité
- vi) Type d'habitats
- vii) Lieu de nidification (structure utilisée, hauteur minimale et maximale des nids)

Les informations colligées ici sont le fruit d'une revue de littérature exhaustive, rassemblant la quasi-totalité des données disponibles dans la littérature scientifique et dans les grandes bases de données *Birds of North America* et *Mammals of North America*.

### 3.5 Relations trophiques

Nous avons réalisé une revue de littérature exhaustive afin d'établir les relations trophiques qui existent entre chacune des espèces (43 mammifères et 151 oiseaux) et chacun des groupes étudiés (5 groupes d'arthropodes et 7 groupes de plantes). Comme les informations disponibles sont limitées pour le nord du Québec et comme la couverture spatiale de notre étude est étendue, il était difficile de caractériser tous les liens trophiques existant. Nous nous sommes donc limités aux liens pour lesquels l'information était la plus disponible, à savoir les relations prédateurs-proies. Les autres liens, comme le parasitisme, le commensalisme, le mutualisme ou la symbiose jouent également un rôle écologique de premier plan (en particulier chez les plantes), mais trop peu d'information était disponible à leur sujet pour les prendre en compte.

Les liens prédateurs-proies ont été colligés sur une matrice binaire de relations trophiques (0 = pas de lien, 1 = lien de prédation), dont la figure 3 présente un extrait. La matrice complète est archivée dans Nordicana D (sous presse). En plus des liens binaires décrits ci-haut, les relations entretenues par les espèces présentes dans l'aire d'étude pour la période 1981-2010 ont été précisées selon trois catégories (proie importante, proie courante, proie accidentelle).

		Prédateur 1 Falco peregrinus	Prédateur 2 Aquila chrysaetos	Prédateur 3 Bubo scandiacus	Prédateur 4 Corvus corax	Prédateur 5 Dicrostonyx hudsonius	Prédateur 6 Lepus americanus	Prédateur 7 Lepus arcticus	Prédateur n-1 Vulpes vulpes	Prédateur n Vulpes lagopus
Proie 1	Falco peregrinus	0	0	0	0	0	0	0	0	
Proie 2	Aquila chrysaetos	0	0	0	0	0	0	0	0	
Proie 3	Bubo scandiacus	0	0	0	0	0	0	0	0	
Proie 4	Corvus corax	0	1	0	0	0	0	0	0	
Proie 5	Dicrostonyx hudsonius	1	1	1	1	0	0	1	1	
Proie 6	Lepus americanus	0	1	0	0	0	0	0	0	
Proie 7	Lepus arcticus	0	1	0	0	0	0	1	1	
...	...									
Proie n-1	Vulpes vulpes	0	0	0	0	0	0	0	0	
Proie n	Vulpes lagopus	0	0	0	0	0	0	0	0	

**Figure 3.** Extrait de la matrice des relations prédateurs-proies. Chaque colonne représente un prédateur et chaque ligne représente une proie. 0 = pas de lien, 1 = lien de prédation.

La description des liens trophiques nous a permis de reconstruire le réseau trophique propre à chacune des cellules de l'aire d'étude pour la période 1981-2010. Elle nous a aussi permis de projeter les réseaux trophiques potentiels dans chacune des cellules de l'aire d'étude pour trois horizons temporels futurs. Nous avons ensuite calculé les indicateurs de réseaux trophiques suivants (tous ces indicateurs sont importants d'un point de vue écologique):

- i) Nombre de nœuds: équivalent au nombre d'espèces, cet indicateur a aussi été décliné en nombre de carnivores, granivores, herbivores, insectivores, omnivores et piscivores.
- ii) Connectance: cet indicateur est une mesure du degré de connectivité entre les espèces d'un réseau trophique.
- iii) Précarité des proies: plus largement connu sous le nom de « vulnérabilité des proies », cet indicateur représente le nombre moyen de prédateurs par proie.
- iv) Généralité des prédateurs: cet indicateur représente le nombre moyen de proies par prédateur.

### 3.6 Modélisation de niche climatique

La modélisation de niche climatique suit quatre grandes étapes schématisées à la Figure 4: (1) choisir les algorithmes qui relient la répartition de l'espèce aux variables climatiques, (2) traduire, en termes mathématiques, la relation entre la répartition de l'espèce et le climat de la période de référence, (3)

évaluer la performance du modèle mathématique et (4) projeter l'enveloppe climatique potentielle de l'espèce, sous chacun des scénarios climatiques retenus. Les étapes suivies, qui sont fortement inspirées de l'approche utilisée dans Berteaux et al. (2014, 2018), sont résumées ci-dessous.

### **3.6.1 Choix des algorithmes**

Plusieurs algorithmes permettent d'établir un lien mathématique entre la répartition d'une espèce et des variables climatiques. Aucun algorithme n'est systématiquement meilleur que les autres et il est donc recommandé d'en utiliser plusieurs puis de tirer le résultat le plus consensuel. Nous avons sélectionné 7 algorithmes: deux méthodes de régression (modèle linéaire généralisé et modèle additif généralisé), deux approches de classification (analyse factorielle discriminante et arbre de classification) et trois techniques d'apprentissage automatique, ou *machine learning* (forêts aléatoires, réseaux de neurones artificiels et *generalized boosted models*).

### **3.6.2 Calibration du modèle de niche**

Cette étape consiste à décrire mathématiquement les liens entre la répartition d'une espèce et les conditions climatiques en vigueur dans une période de référence. Elle permet ainsi de pondérer, sous forme de coefficients ou de déterminants, l'influence de chaque variable environnementale sur la répartition de l'espèce. Déterminées statistiquement, ces relations sont établies à partir du jeu de données initial, c'est-à-dire l'ensemble des données climatiques et de répartition à l'échelle de l'aire d'étude. Cependant, une partie de ce jeu de données doit être mise de côté afin d'évaluer la performance du modèle de niche (voir étape 3 ci-dessous). Cette séparation aléatoire du jeu de données initial a été effectuée 10 fois, nous permettant ainsi de calibrer 70 modèles pour chaque espèce d'intérêt (7 algorithmes x 10 jeux de données). À partir de ces 70 modèles calibrés, nous avons projeté la répartition potentielle pour la période de référence, conduisant à 70 répartitions potentielles différentes. Nous avons ensuite résumé l'information portée par les 70 répartitions possibles en utilisant une moyenne pondérée avec les métriques de performance des modèles (voir étape 3).

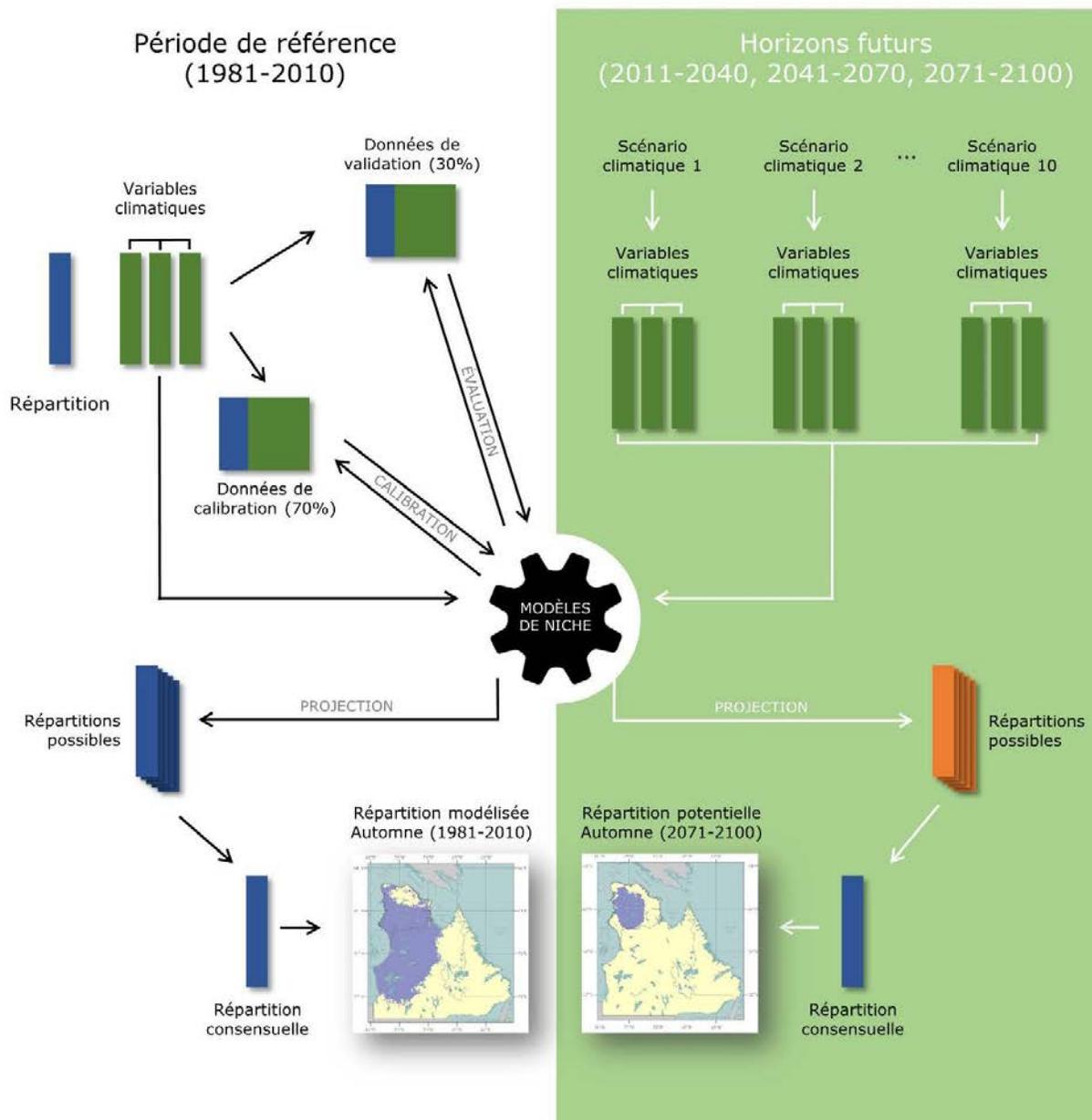
### **3.6.3 Évaluation de la performance du modèle mathématique**

L'évaluation de la performance du modèle de niche permet d'évaluer la fidélité avec laquelle celui-ci reproduit la répartition observée de l'espèce. Idéalement, cette évaluation se ferait avec des données indépendantes de celles ayant servi à sa calibration, mais celles-ci sont rarement disponibles. Comme dans le projet CC-Bio (Berteaux et al. 2014, 2018), nous avons donc utilisé un rééchantillonnage qui sépare aléatoirement le jeu de données initial en deux parties : un jeu de calibration qui comprend 70% des données et un jeu de validation qui comprend le 30% restant. Tel que mentionné à l'étape précédente, cette séparation aléatoire du jeu de données initial a été répétée dix fois. Les performances prédictives du modèle ont ensuite été quantifiées en comparant les répartitions modélisées pour la période de référence aux répartitions observées à l'aide de deux métriques, le *true skill statistic* (TSS) et le coefficient Kappa.

### **3.6.4 Projection de l'enveloppe climatique**

La dernière étape de la modélisation de niche climatique consiste à substituer les valeurs des variables climatiques de la période de référence par celles des différents scénarios climatiques retenus. Nous avons projeté la répartition potentielle de chacune des espèces d'intérêt sous 10 scénarios de changements climatiques pour chacun des 70 modèles calibrés, produisant 700 répartitions futures potentielles pour chaque horizon temporel. Comme pour la modélisation de la répartition actuelle,

nous avons résumé l'information portée par les projections potentielles en utilisant une moyenne pondérée, mais en agrégeant l'information au niveau des scénarios de forçage radiatif (RCP 4,5 et 8,5). Ainsi, pour un horizon futur donné, deux projections potentielles moyennes ont été générées, une pour le scénario RCP 4,5 et une autre pour le scénario RCP 8,5. Toutes les étapes de modélisation ont été réalisées grâce au logiciel libre d'accès R.



**Figure 4.** Schématisation des étapes nécessaires à l'élaboration d'un modèle de niche climatique et à la projection de la répartition potentielle future d'une espèce. Les étapes pour la modélisation future doivent être répétées pour chacun des 10 scénarios climatiques et pour chacun des trois horizons temporels. Le schéma a été modifié à partir de celui présenté dans Berteaux et al. (2014).

### 3.7 Indice de vulnérabilité écosystémique

Le développement d'un bon indice de vulnérabilité écosystémique est complexe et plusieurs approches sont possibles, sans qu'aucune ne puisse être pleinement validée. Nous avons exploré de multiples possibilités, avant d'en adopter une qui est à la fois conforme à la littérature scientifique, applicable aux données à notre disposition, calculable à l'échelle de chaque cellule de la grille d'étude et relativement intuitive d'un point de vue conceptuel. Dans l'approche retenue :

- i) L'exposition reflète simplement l'ampleur des changements climatiques projetés.
- ii) La sensibilité reflète la distribution géographique des espèces durant la période de référence et les liens trophiques qu'elles entretiennent entre elles. En effet, la position d'une cellule par rapport aux aires de répartition des espèces qui y sont présentes peut grandement influencer les effets des changements climatiques sur le taux de renouvellement potentiel des espèces dans cette cellule. De plus, l'ampleur des réorganisations attendues au sein des réseaux trophiques dépendra aussi des liens existant entre les espèces.
- iii) La vulnérabilité, enfin, exprime à la fois le déplacement potentiel des aires de répartition des espèces (estimé par modélisation de niche) et le réarrangement potentiel des liens trophiques que ces déplacements devraient provoquer.

En termes simples, **nous supposons que plus les changements climatiques provoqueront la modification d'une proportion importante des liens trophiques dans un écosystème, plus cet écosystème sera vulnérable aux changements climatiques.**

Plus formellement, nous avons défini la vulnérabilité des écosystèmes terrestres du Nunavik comme étant, pour chaque cellule, le degré de dissemblance entre la structure du réseau trophique de la période de référence et celle d'un horizon futur. Ce degré de dissemblance a été estimé dans chaque cellule grâce à la projection des répartitions potentielles futures des espèces et de la matrice des relations trophiques entre espèces. L'approche est basée sur le cadre conceptuel de Poisot et al. (2012) (voir aussi Koleff et al. 2003) qui divise les interactions trophiques en trois groupes:

- i) Les interactions présentes dans le réseau à la fois lors la période de référence et lors de la période future, noté *a*.
- ii) Les interactions présentes dans le réseau seulement lors de la période de référence, noté *b*.
- iii) Les interactions présentes dans le réseau seulement lors de la période future, noté *c*.

Le degré de dissemblance (ou dissimilarité) entre le réseau de référence et le réseau potentiel futur (noté ici *V* pour *Vulnérabilité*) est calculé par une formule basée sur l'indice de diversité  $\beta$  de Whittaker (1960):

$$V = \frac{a + b + c}{(2a + b + c)/2} - 1$$

*V* varie de 0 à 1. *V* = 0 indique que l'on retrouve exactement les mêmes interactions trophiques entre la période de référence et la période future. *V* = 1 indique que l'on ne retrouve, durant la période future, aucune des interactions trophiques qui existaient durant la période de référence.

## 4. Résultats

### 4.1 Climat

La caractérisation des climats pour la période de référence (1981-2010) et les périodes futures (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) constitue un élément essentiel de notre modélisation de niche climatique. Elle permet de dresser un portrait climatique exhaustif de l'ensemble du territoire du Québec nordique et du Labrador, à une échelle écologiquement pertinente (cellules de 10 km x 10 km). Nos résultats complètent ceux réalisés pour le Nunavik par Ouranos lors de l'élaboration du portrait climatique de référence (Charron 2015) et projeté au 21<sup>e</sup> siècle (Maihot et Chaumont 2017). Notre analyse étend géographiquement la région étudiée, caractérise certaines variables bioclimatiques supplémentaires et permet surtout une étude écologique détaillée des réseaux tropiques des écosystèmes terrestres.

Nous présentons ici les faits saillants du climat de la période de référence et de son évolution projetée au cours du 21<sup>e</sup> siècle. Des tableaux de valeurs moyennes et des atlas cartographiques donnent un portrait beaucoup plus détaillé en annexe 1 (climat de référence) et en annexe 2 (climats projetés). D'autre part, une version en haute définition (PNG en 800 DPI) de toutes les cartes que nous avons créées est disponible pour téléchargement libre à l'adresse suivante :

<https://ahasverus.shinyapps.io/bioclimaticatlas/>.

#### 4.1.1 Période de référence (1981-2010)

##### Aire de modélisation (nord du Québec et Labrador)

Le nord du Québec et le Labrador forment un vaste territoire qui s'étend sur plus de 1 300 000 km<sup>2</sup>, permettant à plusieurs climats de coexister. Il existe un fort gradient nord-sud dans la spatialisation des variables bioclimatiques (surtout celles liées à la température), mais également un certain gradient est-ouest pour celles associées aux précipitations. La moyenne des températures annuelles pour l'aire de modélisation est de -3,6°C ( $\pm 2,4$ ), mais elles s'étendent de -9,9°C à la pointe nord de la péninsule de l'Ungava jusqu'à 3,1°C dans la forêt boréale (Figure 5, panneau de gauche). Ces écarts de températures moyennes à l'échelle de la région se traduisent notamment par un décalage dans la date du dernier jour de gel printanier (valeurs minimale et maximale, en jours de l'année : 133 et 191, pour une moyenne de  $160 \pm 8,4$ ; Figure 6, panneau de gauche). La longueur de la période sans gel avoisine 100 jours ( $\pm 16,5$ ), et s'étend de 37 à 163 jours du nord au sud. Les précipitations totales annuelles atteignent quant à elles 1596 mm dans la partie sud-est de la région, mais sont considérablement plus faibles dans la partie la plus au nord ( $1077 \text{ mm} \pm 200$ ).

Longtemps reconnu pour son inertie thermique, le nord du Québec connaît depuis le début des années 1990 un important changement dans son régime climatique (Chouinard et al. 2007, Bhiry et al. 2011). Ce changement se reflète dans les tendances climatiques calculées pour 1981-2010. En effet, nous observons une augmentation moyenne des températures de près de 1,0°C/décennie ( $\pm 0,2$ ). Cette augmentation se traduit par l'allongement de la période sans gel (8,7 jours/ décennies  $\pm 1,7$ ) qui se fait davantage sentir au printemps qu'à l'automne. Pendant la même période, les précipitations totales ont augmenté en moyenne de 36,4 mm/décennie ( $\pm 16,3$ ).

##### Aire d'étude (toundra arbustive et herbacée du Nunavik)

Située à l'extrémité nord de l'aire de modélisation, l'aire d'étude de caractériser de cette dernière par des températures moyennes plus froides (-7,0°C  $\pm 1,1$ ) et des précipitations annuelles moins abondantes ( $717 \text{ mm} \pm 59,8$ ). La longueur de la période sans gel est également plus courte (82,0 jours  $\pm 11,3$ ) et les derniers gels printaniers sont plus tardifs (168 jours de l'année  $\pm 5$ ).

En raison de l'amplification polaire, la pointe de la péninsule de l'Ungava se réchauffe plus rapidement que la partie sud de la province. Les tendances observées entre 1981 et 2010 dans l'aire d'étude sont de ce fait plus marquées que dans l'ensemble de l'aire de modélisation. Par exemple, l'augmentation moyenne des températures est de 1,2°C/décennie  $\pm$  0,1 et la longueur de la période sans gel augmente en moyenne de 9,2 jours/décennies  $\pm$  1,7.

#### **4.1.2 Périodes futures (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100)**

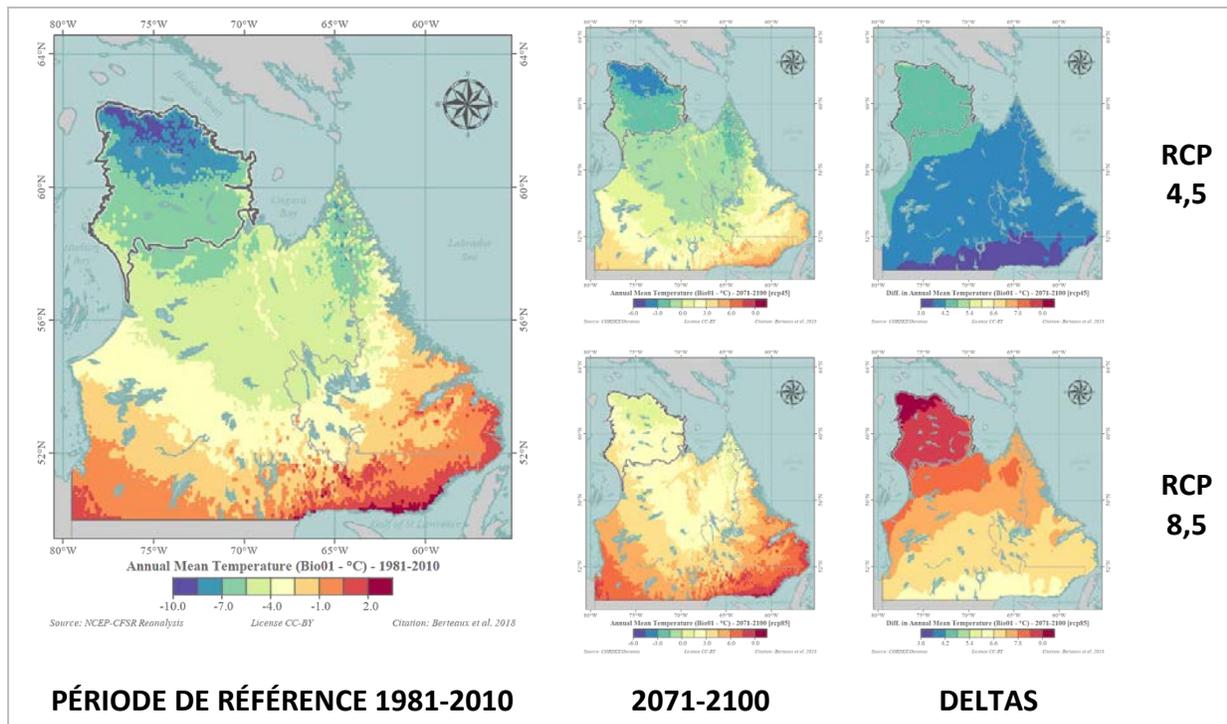
##### Aire de modélisation (nord du Québec et Labrador)

Le climat du nord du Québec et du Labrador a été projeté pour trois périodes futures, sous deux RCP différents. Nous ne détaillons ici que les résultats obtenus pour la période la plus lointaine, sous les deux RCP. Pour les résultats obtenus aux deux autres périodes, il est possible de consulter le site web mentionné au début de la section 3.1.

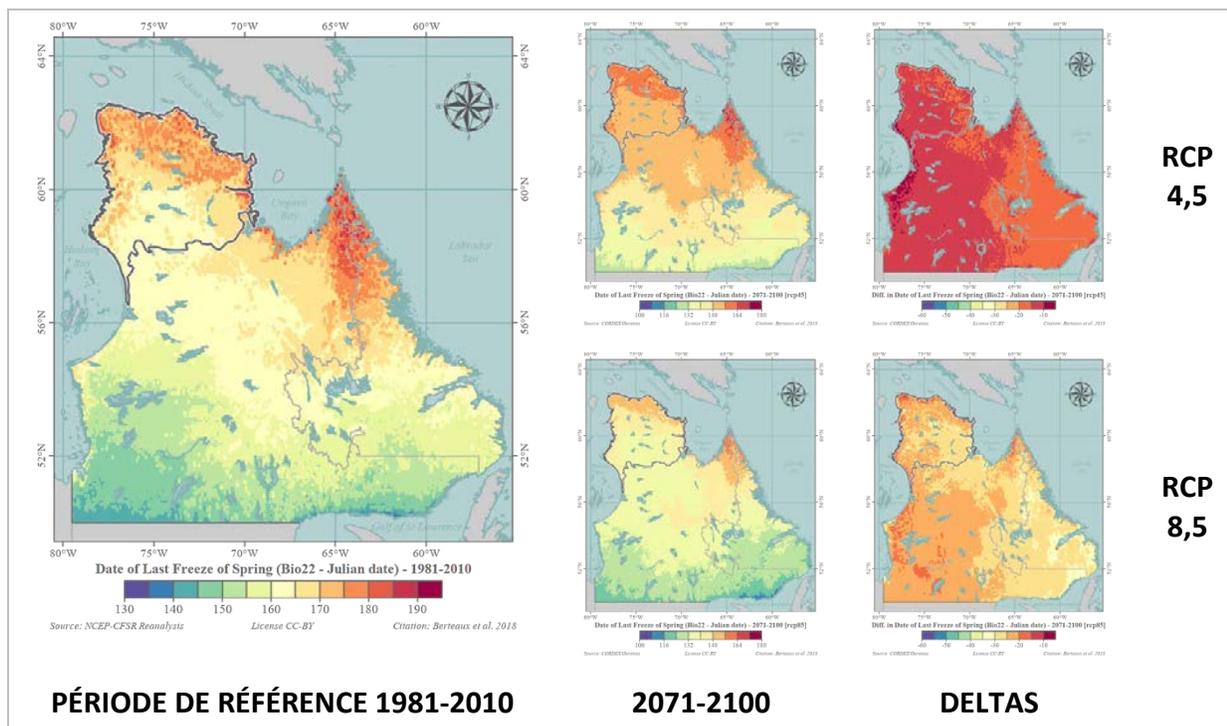
La température moyenne projetée pour la période 2071-2100 se situe entre 0,3°C  $\pm$  2,6 (RCP 4,5) et 3,8°C  $\pm$  1,8 (RCP 8,5), ce qui représente une augmentation de 3,9°C à 7,4°C par rapport à la période de référence (Figure 5, cartes du centre et de droite). La date projetée du dernier jour de gel printanier est estimée en moyenne au jour de l'année 145 ( $\pm$  7,8) pour le RCP 4,5 et au jour de l'année 134 ( $\pm$  7,9) pour le RCP 8,5 (Figure 6, cartes du centre et de droite). Ces dates correspondent à un recul de 2 à 3 semaines par rapport à la période de référence. En moyenne, les projections climatiques montrent également une augmentation des précipitations annuelles totales, passant de 1077,0 mm pour la période de référence à 1255,7 mm ( $\pm$  205,3) sous le RCP 4,5 et 1372,8 mm ( $\pm$  210,3) sous le RCP 8,5.

##### Aire d'étude (toundra arbustive et herbacée du Nunavik)

La température moyenne projetée pour l'aire d'étude en 2071-2100 se situe entre -2,5°C  $\pm$  1,0 (RCP 4,5) et 1,8°C  $\pm$  0,9 (RCP 8,5), une augmentation de 4,5°C à 8,8°C par rapport à la période de référence (Figure 5, cartes du centre et de droite, région entourée en gris). La date projetée du dernier jour de gel printanier est au jour de l'année 153 ( $\pm$  3,4) pour le RCP 4,5 et au jour de l'année 142 ( $\pm$  4,6) pour le RCP 8,5 (Figure 6, cartes du centre et de droite, région entourée en gris). Ces dates correspondent à un recul de 2 à 4 semaines par rapport à la période de référence. En moyenne, les projections climatiques montrent également une augmentation des précipitations annuelles totales, passant de 717 mm pour la période de référence à 876,6 mm ( $\pm$  73,3) sous le RCP 4,5 et 986,2 mm ( $\pm$  78,9) sous le RCP 8,5.



**Figure 5.** Changements projetés dans la température annuelle moyenne (°C) sous deux RCP pour le Québec nordique et le Labrador. Les températures moyennes annuelles pour la période de référence (1981-2010) sont représentées dans le panneau de gauche, tandis que celles projetées pour la période 2071-2100 sont représentées en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes à droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas.



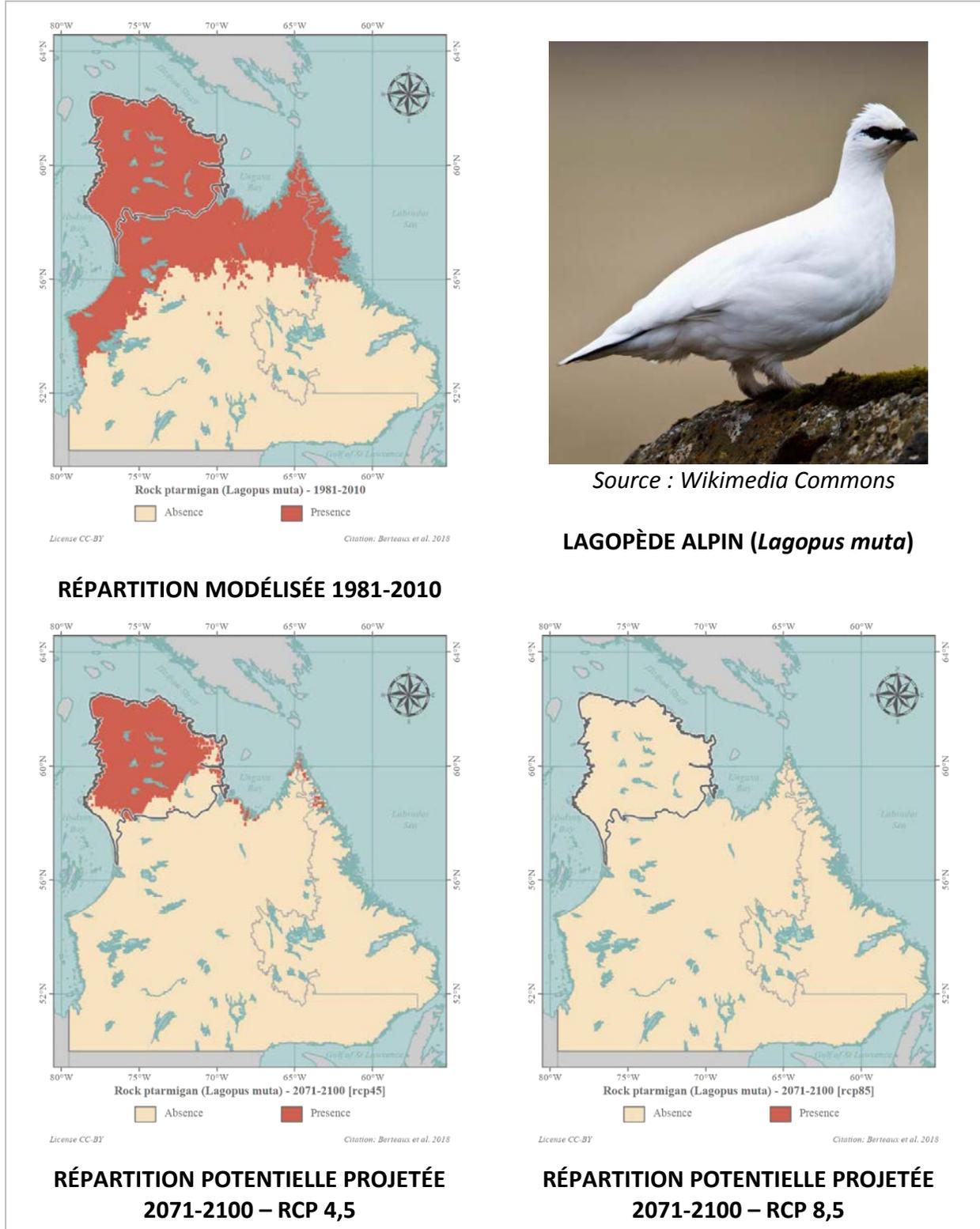
**Figure 6.** Changements projetés dans la date de dernier gel printanier (jours de l’année) sous deux RCP pour le Québec nordique et le Labrador. Les dates de dernier gel printanier pour la période de référence (1981-2010) sont représentées dans le panneau de gauche, tandis que celles projetées pour la période 2071-2100 sont représentées en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes de droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas.

#### 4.2 Projection des niches climatiques

Afin de bien illustrer les résultats de la modélisation des niches climatiques, nous débutons cette section par un exemple détaillé, celui du lagopède alpin (*Lagopus muta*). Cette espèce résidente bien adaptée aux conditions arctiques pourrait voir son aire de répartition repoussée vers le nord, ce qui en fait une espèce pour laquelle l’interprétation des résultats obtenus est facilitée.

La répartition du lagopède alpin observée pour la période de référence est tout d’abord reportée en données binaires sur notre grille climatique; cette répartition modélisée représente sa niche climatique (Figure 7, en haut à gauche). En substituant les données climatiques de la période de référence par celles modélisées pour une période future, nous pouvons apprécier la contraction projetée de la niche climatique du lagopède alpin sous le RCP 4,5 (Figure 7, en bas à gauche) et l’exclusion complète de celle-ci sous le RCP 8,5 (Figure 7, en bas à droite).

Cet exercice a été répété pour 183 espèces (37 espèces de mammifères et 146 espèces d’oiseaux). Ainsi, nous avons pu comptabiliser les espèces dont la niche climatique se retrouve dans chacune des cellules de notre grille climatique pour les périodes de référence et futures, et en dériver de nombreuses synthèses cartographiques quant à l’évolution potentielle de la biodiversité (annexe 3).

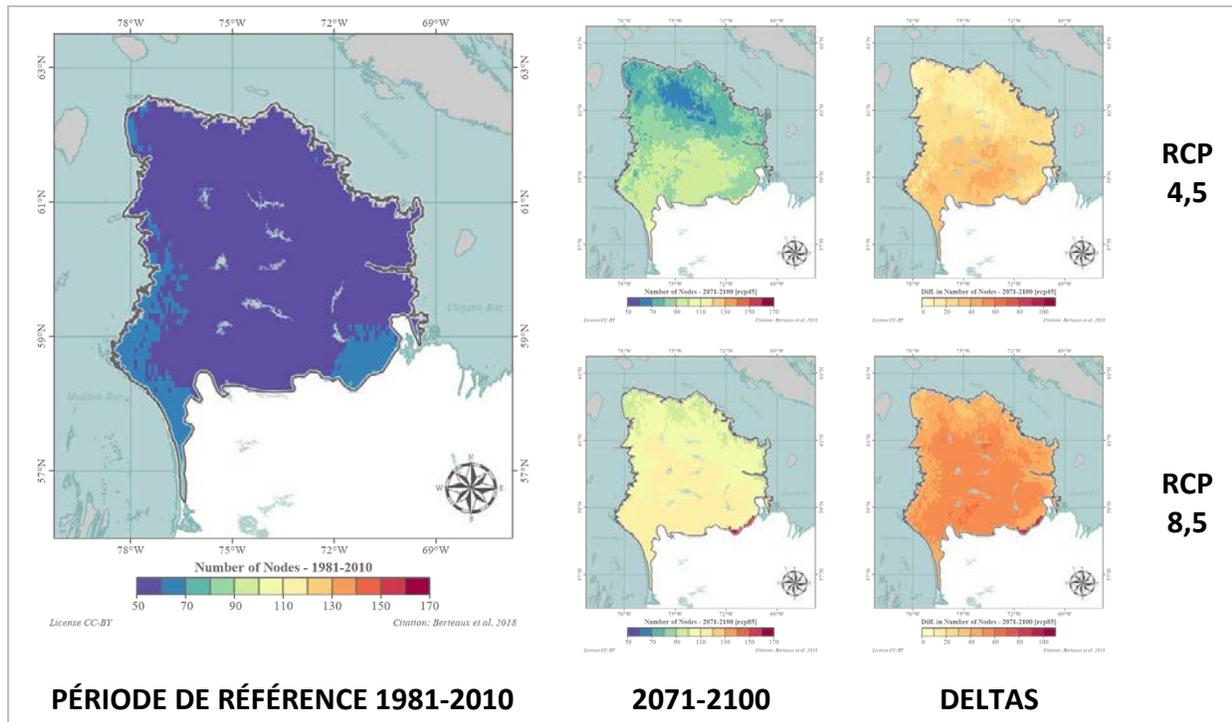


**Figure 7.** Changements potentiels projetés dans la répartition du Lagopède alpin (*Lagopus muta*) sous deux RCP. La répartition modélisée du Lagopède alpin (en haut à droite) pour la période de référence

(en haut à gauche) a été utilisée pour projeter sa répartition potentielle à l’horizon 2071-2100 sous le RCP 4,5 (en bas à gauche) et le RCP 8,5 (en bas à droite).

### 4.3 Richesse spécifique

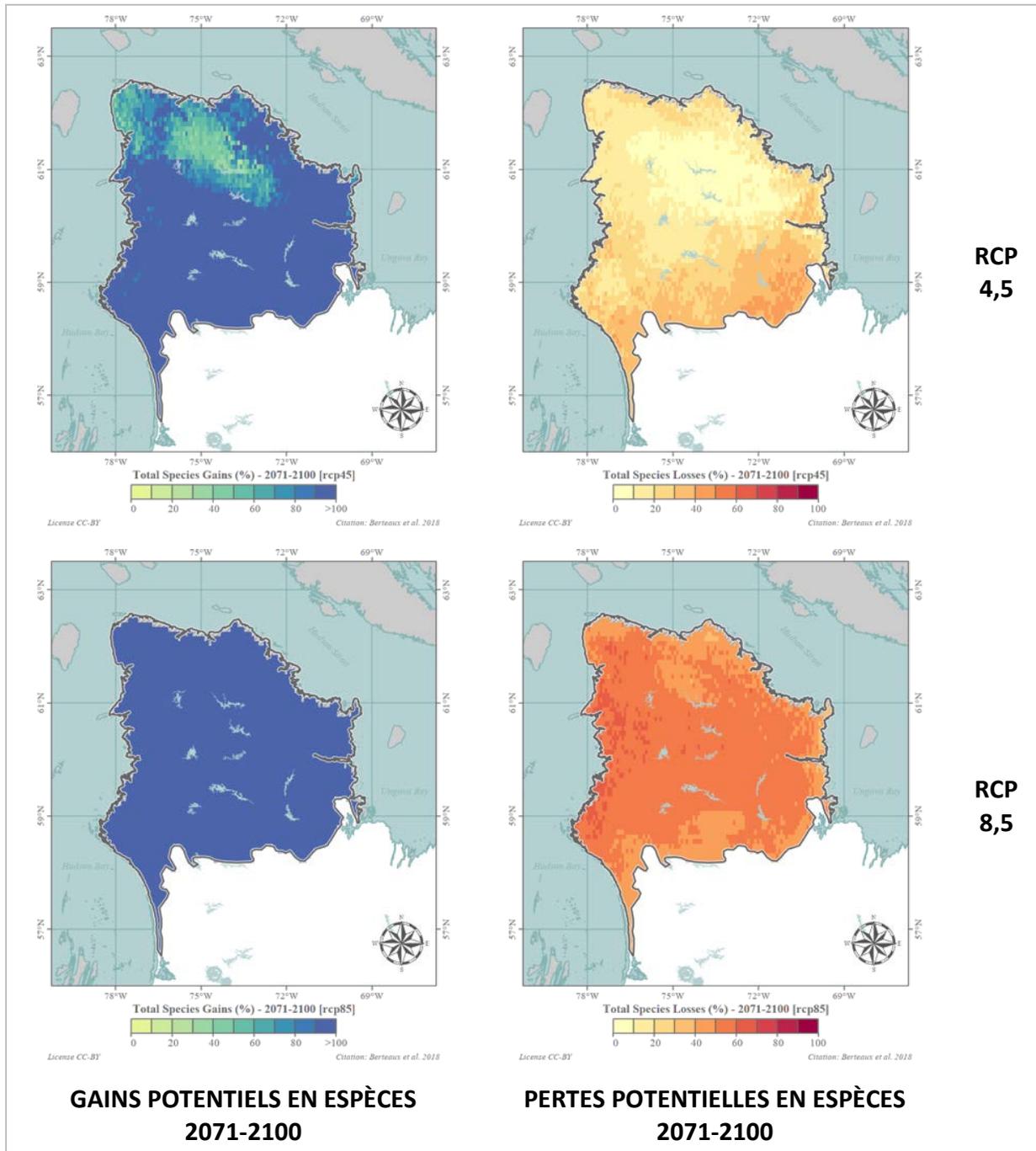
La richesse spécifique (ou nombre d’espèces) des mammifères et des oiseaux diminue du sud vers le nord du Québec. Ce gradient s’explique entre autres par la rigueur du climat qui limite la répartition d’un bon nombre d’espèces vers le nord. Parmi les espèces de mammifères recensés dans notre aire de modélisation, nous retrouvons néanmoins une grande diversité de tailles (des micromammifères au bœuf musqué), de préférences alimentaires (des carnivores comme le loup gris aux insectivores comme la chauve-souris cendrée) et d’habitats préférentiels (des milieux fortement anthropisés chez la souris grise à la toundra arbustive prisée par le caribou migrateur). Les espèces aviaires montrent également un large éventail d’habitudes (migratrice ou résidente, diurne ou nocturne ou crépusculaire), se retrouvent à tous les niveaux du réseau trophique (proies, proies et prédateurs, prédateurs) et colonisent une multitude d’habitats (marins, aquatiques et terrestres). Une liste exhaustive des 196 espèces d’intérêt est archivée dans Nordicana D (sous presse).



**Figure 8.** Changements potentiels projetés dans le nombre d’espèces de mammifères et d’oiseaux sous deux RCP pour la toundra de la péninsule d’Ungava, au Nunavik. Le nombre d’espèces observé dans la période de référence (1981-2010) est représenté dans le panneau de gauche, tandis que celui projeté pour la période 2071-2100 est représenté en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes de droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas.

Le nombre d’espèces de mammifères et d’oiseaux dont la niche climatique chevauche l’aire d’étude augmente entre 1981-2010 et 2071-2100, que ce soit pour le RCP 4,5 (Figure 8, cartes du haut) ou le RCP 8,5 (Figure 8, cartes du bas). Les gains et pertes en espèces sont plus faibles dans la région

correspondant aux hauts plateaux de l'Ungava pour l'horizon 2071-2100 RCP 4,5 (au centre, légèrement désaxée vers le nord; Figure 9, cartes du haut), mais ceci est moins marqué sous le scénario RCP 8,5 (Figure 9, cartes du bas).

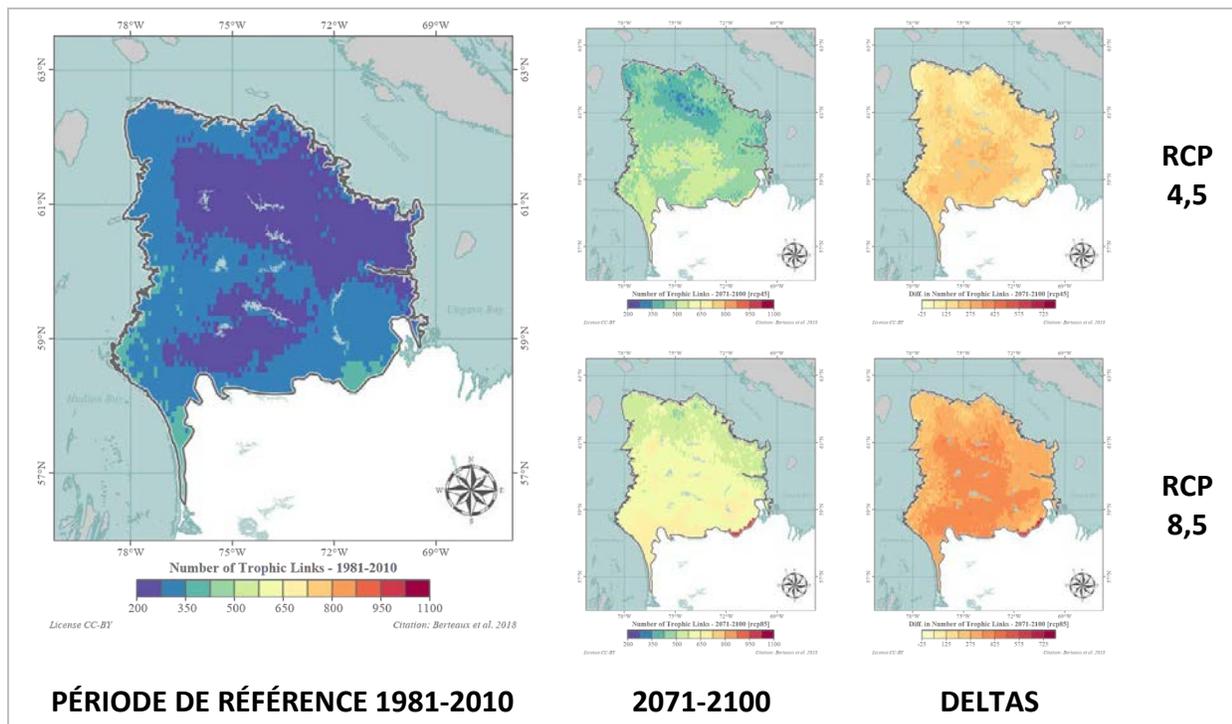


**Figure 9.** Changements potentiels projetés dans la répartition des espèces sous deux RCP pour la toundra de la péninsule d'Ungava, au Nunavik. Les gains (cartes de gauche) et les pertes (cartes de

droites) potentielles en espèces entre 2071-2100 et 1981-2010 sont représentés pour le RCP 4,5 (cartes du haut) et le RCP 8,5 (cartes du bas). Les gains et les pertes sont représentés en pourcentage.

#### 4.4 Relations trophiques

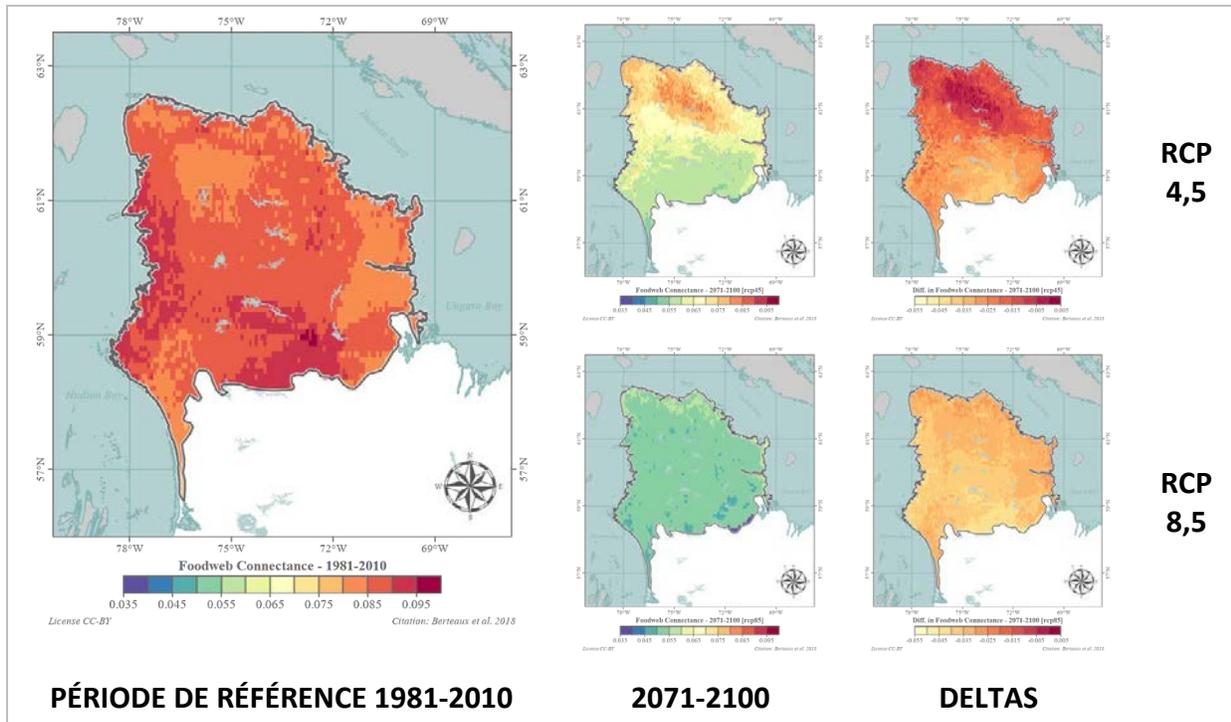
Grâce à la projection des niches climatiques de chacune des espèces de mammifères et d'oiseaux étudiées et à la matrice des relations trophiques, nous avons reconstruit le réseau trophique pour chacune des 4 258 cellules de 10 x 10 km de la grille climatique et ce, sous les deux RCP pour la période de référence et les périodes futures. Nous avons ensuite caractérisé et spatialisé ces réseaux trophiques à l'aide de différents indices, illustrés dans les quatre prochaines figures.



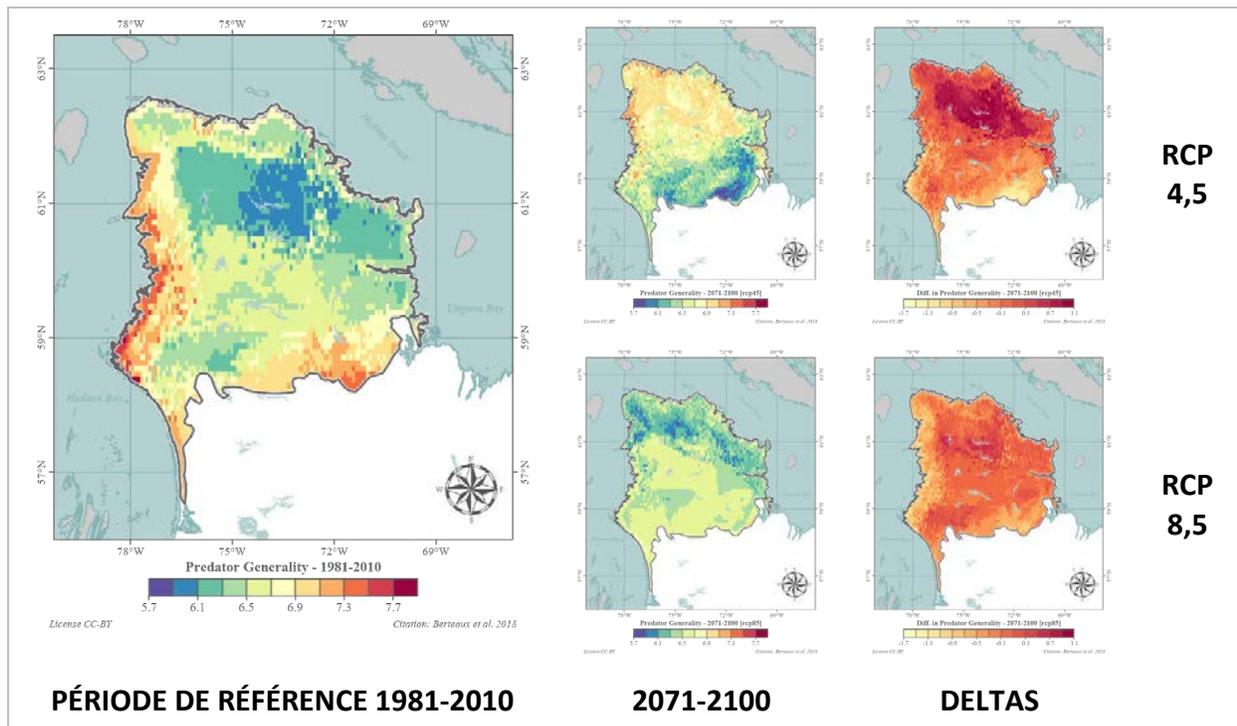
**Figure 10.** Changements potentiels projetés dans le nombre de liens au sein des réseaux trophiques sous deux RCP pour la toundra de la péninsule d’Ungava, au Nunavik. Le nombre de liens trophiques pour 1981-2010 est représenté dans le panneau de gauche, tandis que celui projeté pour 2071-2100 est représenté en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes de droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas.

Tel qu’illustré à la figure 10, le nombre de liens trophiques projetés augmente entre 1981-2010 et 2071-2100 pour les deux RCP. Cette augmentation est plus importante au centre de l’aire d’étude. La connectance, qui représente l’importance de la connectivité entre les différentes espèces d’un réseau, diminue sous les deux RCP à l’horizon 2071-2100 (Figure 11). Cependant, sous le RCP 4,5, la connectance demeure plus importante au nord de l’aire d’étude qu’au sud. Sous ce même scénario, la généralité des prédateurs (c’est-à-dire le nombre moyen de proies par prédateur) augmente dans la portion nord de l’aire d’étude tandis qu’elle diminue plus au sud (Figure 12, cartes du haut). Toutefois, sous le RCP 8,5 la généralité des prédateurs diminue de façon plus importante le long de la côte de la baie d’Hudson et demeure inchangée pour une grande partie de l’aire d’étude (Figure 12, cartes du

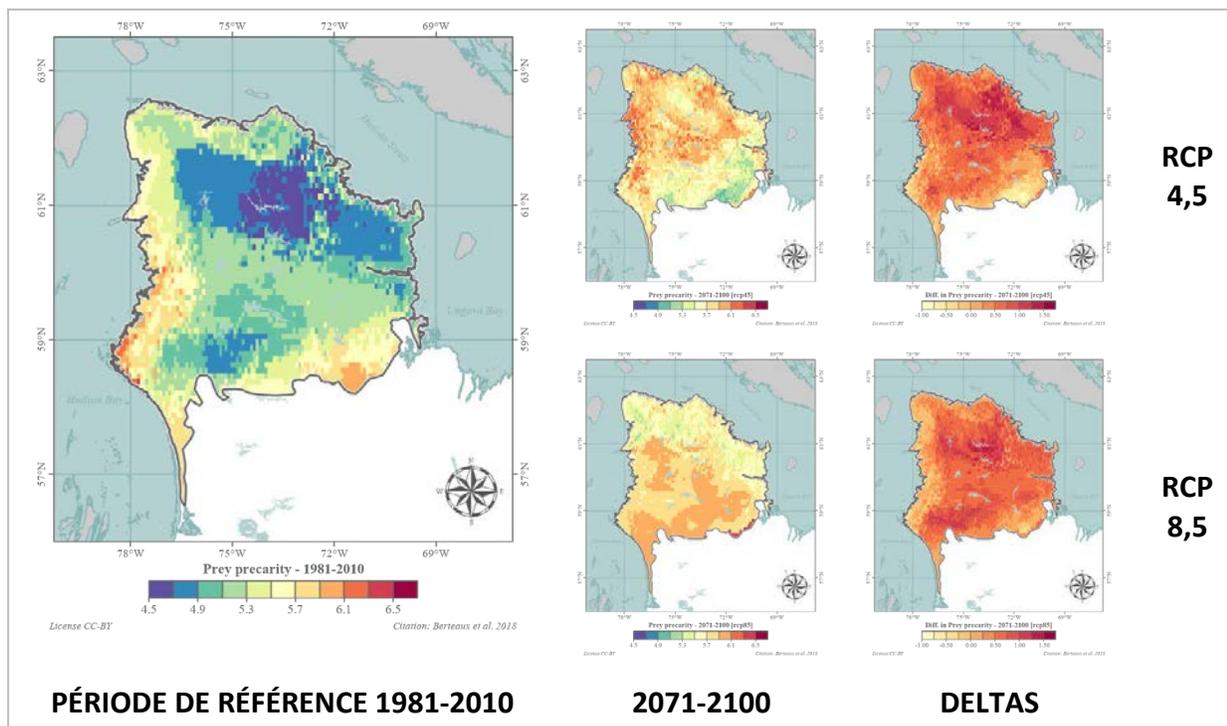
bas). La précarité des proies est moindre sur les hauts plateaux de l'Ungava pour la période de référence et suit sensiblement les mêmes patrons de différences que la généralité des prédateurs (Figure 13).



**Figure 11.** Changements potentiels projetés dans la connectance des réseaux trophiques sous deux RCP pour la toundra de la péninsule d'Ungava, au Nunavik. Les valeurs de connectance pour 1981-2010 sont représentées dans le panneau de gauche, tandis que celles projetées pour 2071-2100 sont représentées en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes de droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas.

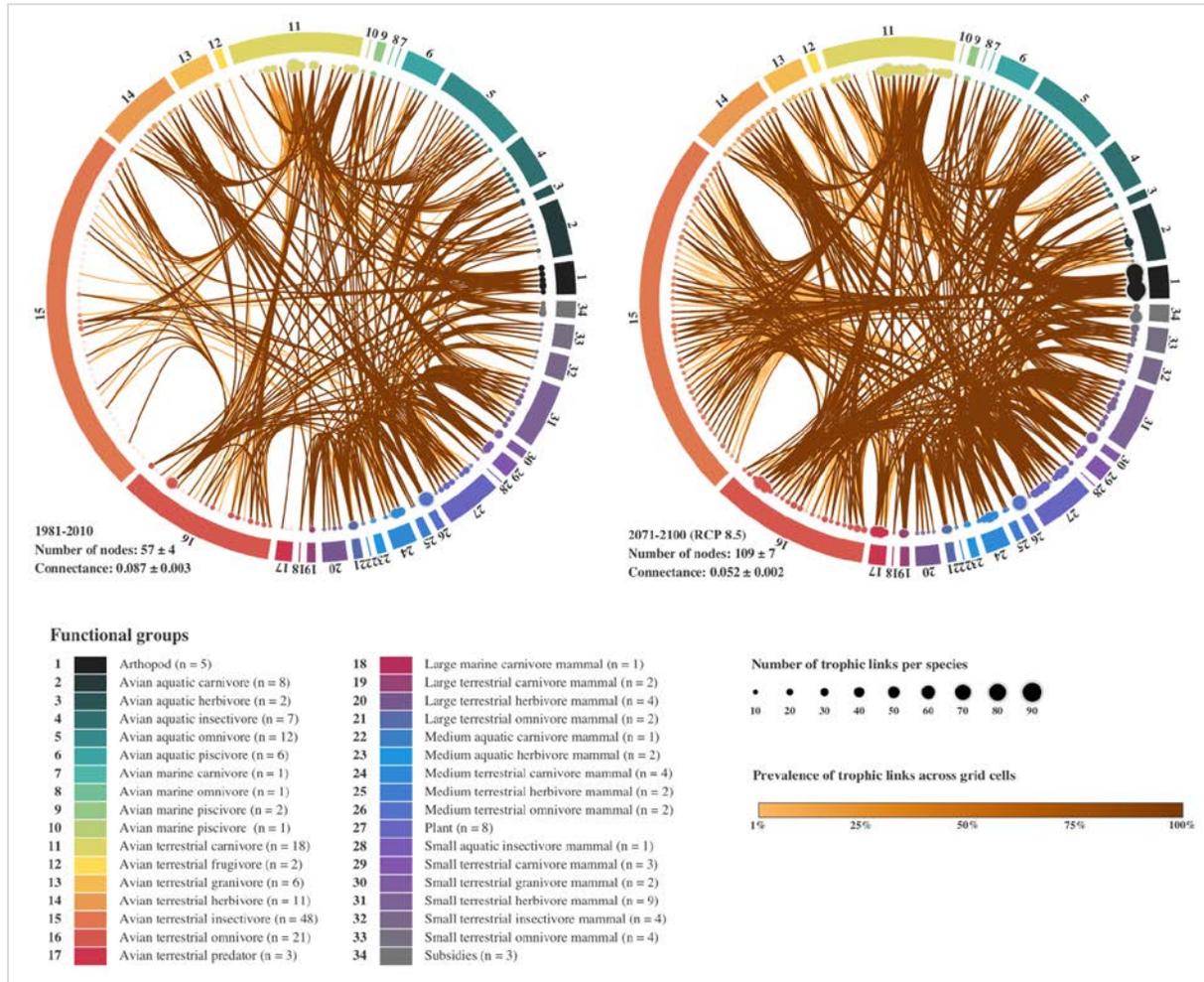


**Figure 12.** Changements potentiels projetés dans la généralité des prédateurs sous deux RCP pour la toundra de la péninsule d’Ungava, au Nunavik. La généralité des prédateurs pour 1981-2010 est représentée dans le panneau de gauche, tandis que celle projetée pour 2071-2100 est représentée en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes de droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas.



**Figure 13.** Changements potentiels projetés dans la précarité des proies sous deux RCP pour la toundra de la péninsule d’Ungava, au Nunavik. La précarité des proies pour 1981-2010 est représentée dans le panneau de gauche, tandis que celle projetée pour 2071-2100 est représentée en valeurs absolues (cartes du centre) et relatives à la période de référence (cartes de droite) sous le RCP 4,5 en haut et le RCP 8,5 en bas.

Les changements attendus dans la structure des réseaux trophiques de la toundra de la péninsule d’Ungava peuvent être synthétisés grâce à un regroupement hiérarchique circulaire (en anglais, *Hierarchical edge building*; Figure 14). La figure 14 synthétise une partie considérable des résultats du projet et son analyse attentive permet de reconnaître de nombreux changements projetés, parmi lesquels certains ont déjà été mentionnés plus haut. Il est ainsi clairement visible que certains groupes fonctionnels devraient être mieux représentés à l’avenir dans la toundra du Nunavik. Par exemple, notons le plus grand nombre d’oiseaux insectivores (groupe fonctionnel 15, couleur orange) présents en 2071-2100 par rapport à 1981-2010. Notons également l’augmentation du nombre de liens trophiques, en particulier pour certains groupes comme les arthropodes (groupe fonctionnel 1, couleur noir), malgré une connectance en diminution comme nous l’avons vu précédemment. Cet apparent paradoxe (plus de liens trophiques mais connectance réduite) s’explique par le fait que dans un contexte d’augmentation de richesse spécifique, le nombre de liens trophiques n’augmente pas assez pour que chaque espèce reste connectée à une proportion constante d’espèces dans l’écosystème.



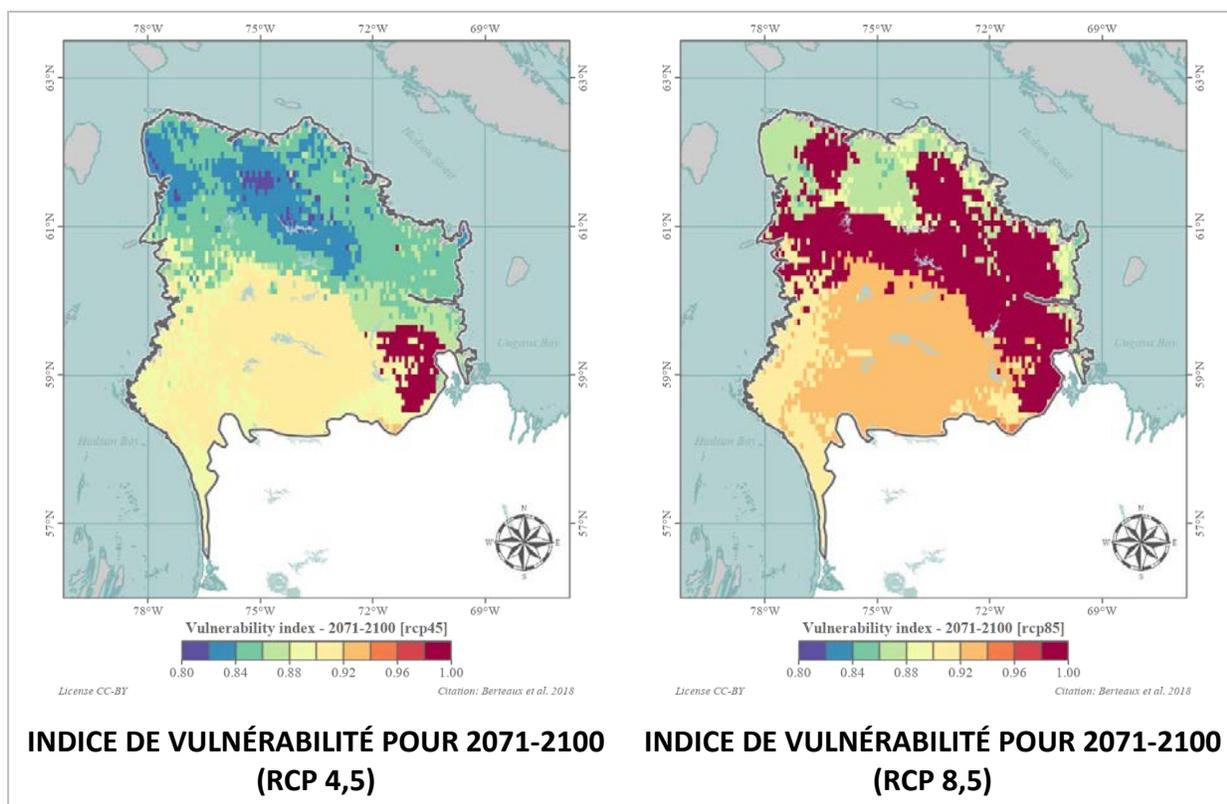
**Figure 14.** Regroupement hiérarchique circulaire représentant les changements potentiels projetés dans la structure des réseaux trophiques de la toundra de la péninsule d’Ungava, au Nunavik, sous un RCP 8,5. Le disque de gauche représente la situation de 1981-2010 alors que celui de droite représente la situation projetée pour 2071-2100. Chaque disque se lit de l’extérieur vers l’intérieur à l’aide des légendes qui figurent en bas de la figure. Les chiffres et la couleur des bandes autour de chaque disque permettent d’identifier les différents groupes fonctionnels étudiés. Chaque espèce (ou, pour les arthropodes et les plantes, chaque entité taxonomique ou sous-groupe fonctionnel) appartenant à un groupe fonctionnel donné est représentée par un point, dont la grosseur montre le nombre de liens trophiques qu’elle possède avec d’autres espèces. Les traits représentent les liens trophiques et la couleur de ces traits reflète la proportion de cellules de 10 km x 10 km où chaque lien trophique est présent.

#### 4.5 Vulnérabilité écosystémique

L’indice de vulnérabilité ( $V$ ) calculé pour 2071-2100 varie, selon les cellules, entre 0,80 et 1 pour le RCP 4,5 et entre 0,84 et 1 pour le RCP 8,5. Pour l’ensemble de notre aire d’étude, l’indice de vulnérabilité est en moyenne élevé (RCP 4,5 :  $0,87 \pm 0,03$  ; RCP 8,5 :  $0,94 \pm 0,05$ ), ce qui suggère que les changements climatiques entraîneront une réorganisation très importante des réseaux trophiques

de la toundra de la péninsule d'Ungava au Nunavik si les espèces se déplacent conformément aux projections des niches climatiques.

Nous observons également une variabilité spatiale de l'indice de vulnérabilité à l'échelle de l'aire d'étude. La région pour laquelle la vulnérabilité est la plus forte (Figure 15, couleur grenat) se situe dans la partie sud-est sous le scénario RCP 4,5 (carte de gauche) et s'étend dans tout l'est et le centre de la péninsule d'Ungava sous le RCP 8,5 (carte de droite). Les hauts plateaux de cette péninsule ainsi que la pointe nord-ouest de l'aire d'étude demeurent les régions les moins vulnérables sous les deux scénarios, bien que les valeurs de l'indice soient, dans tous les cas, élevées.



**Figure 15.** Indice de vulnérabilité aux changements climatiques des écosystèmes terrestres de la toundra de la péninsule d'Ungava (Nunavik, Québec) sous le RCP 4,5 à gauche et le RCP 8,5 à droite, à l'horizon 2071-2100.

## 5. Discussion

Le projet *Changements climatiques et toundra du Nunavik: exposition, sensibilité et vulnérabilité* propose le premier portrait des effets des changements climatiques sur la structure (composition en espèces) et le fonctionnement (liens entre espèces) de la toundra de la péninsule d'Ungava, au Nunavik. Il a exigé la mise en commun et la synthèse de très nombreuses données climatiques et écologiques, en plus de nécessiter un traitement très poussé de ces données par modélisation. Nous nous sommes appuyés sur l'expérience du projet CC-Bio (Berteaux et al. 2010, 2014, 2018), mais nous avons utilisé des jeux de données complètement différents et avons ajouté une dimension supplémentaire à notre démarche scientifique, soit l'analyse et la projection des liens trophiques

(alimentaires) entre diverses espèces d'oiseaux et de mammifères, des taxons d'invertébrés et les principaux groupes fonctionnels de plantes.

Produit moins de trois ans après le début du projet, ce rapport résume les méthodes choisies et les résultats obtenus. L'archivage de toutes les données associées au projet sera terminé sous peu, ce qui rendra celles-ci publiques et accessibles à toute personne désirant les utiliser. La discussion qui suit résume quelques points saillants, notamment la pauvreté des données écologiques disponibles en milieu nordique, l'importance de bien interpréter les résultats de modélisation et les étapes ultérieures requises pour passer de la modélisation écologique à la planification écologique.

Soulignons que l'interprétation approfondie des résultats obtenus et leur apport dans la communauté scientifique seront exposés en anglais dans des articles publiés au sein de revues internationales avec comité de lecture. L'interprétation complète des résultats et la production de ces articles nécessiteront encore plusieurs mois. Quant à l'intégration des résultats aux décisions de gestion ou de conservation de la biodiversité, elle demandera des années de travail avec les partenaires gouvernementaux. En clair, la phase d'analyse du projet est terminée, mais la phase d'interprétation se poursuit.

Les résultats clés obtenus sont les suivants:

- i) L'amplitude des changements climatiques sera élevée dans la toundra de la péninsule d'Ungava et cette amplitude sera d'autant plus forte que l'on se déplace vers le nord;
- ii) Une importante réorganisation spatiale de nombreuses espèces végétales et animales est attendue;
- iii) Un gain en espèces est projeté dans la toundra de la péninsule d'Ungava;
- iv) Une forte réorganisation des réseaux trophiques sera provoquée par les changements climatiques, ce qui implique une vulnérabilité importante des écosystèmes;
- v) La région de toundra du Nunavik est hétérogène et sa partie Est semble écologiquement plus vulnérable aux changements climatiques que sa partie Ouest.

## **5.1 Les difficultés d'acquisition de données en territoire nordique**

### **5.1.1 Données météorologiques**

Une des principales difficultés rencontrées en début de projet fut de trouver une source non biaisée de données décrivant le climat de 1981 à 2010 pour notre aire d'étude. En effet, une contrainte majeure associée à l'Arctique est le manque de stations météorologiques. De ce fait, de nombreux jeux de données climatiques mondiaux, interpolés à partir d'observations de stations météo, présentent un biais important pour les régions les plus nordiques. En attendant que des efforts plus grands soient dévolus tant à l'installation de nouvelles stations météo dans l'Arctique qu'à leur maintenance, des sources de données alternatives existent, comme les réanalyses climatiques. Pour notre étude, la solution a été mise de l'avant par Charron (2015) qui a identifié la réanalyse NCEP-CFSR comme étant la plus appropriée pour notre aire d'étude.

### **5.1.2 Données de biodiversité**

Il existe peu de données écologiques sur le Québec nordique, que ce soit des données de présence spatialisées ou des données de régime alimentaire, d'utilisation d'habitats, etc. Lorsque ces données existent, elles portent le plus souvent sur un nombre restreint d'espèces (comme, par exemple, le caribou migrateur; voir le programme Caribou-Ungava à l'adresse suivante : [www.caribou-ungava.ulaval.ca](http://www.caribou-ungava.ulaval.ca)) et sont souvent difficiles à accéder; notamment lorsqu'elles sont colligées dans les rapports d'études d'impacts des entreprises privées ou dans les rapports ministériels. Ce manque de

données nous a souvent obligés à utiliser des informations provenant d'autres régions nordiques ou recueillies sur des espèces apparentées, mais différentes de celles que nous avons ciblées.

Néanmoins, des efforts sont en cours pour améliorer les cartes de répartition des espèces animales et végétales, notamment l'Atlas des oiseaux nicheurs du Québec ([www.atlas-oiseaux.qc.ca](http://www.atlas-oiseaux.qc.ca)) et le projet de Flore nordique du Québec et du Labrador ([www.herbier.ulaval.ca/projets/flore\\_nordique\\_du\\_quebec\\_et\\_du\\_labrador](http://www.herbier.ulaval.ca/projets/flore_nordique_du_quebec_et_du_labrador)). Bien que notre projet ait propulsé vers l'avant notre conceptualisation des effets écosystémiques des changements climatiques, il n'en demeure pas moins que l'acquisition de données beaucoup plus précises sur la biodiversité est primordiale pour valider *in situ* les impacts des changements climatiques que nous avons modélisés.

## **5.2 L'interprétation des résultats de modélisation**

### **5.2.1 Portée et limites de la modélisation des niches climatiques**

La modélisation des niches climatiques est un outil essentiel pour éclairer de nombreuses décisions, notamment en ce qui a trait à la conservation (Berteaux et al. 2014). Cette approche comporte plusieurs avantages : elle requiert peu d'informations sur les espèces modélisées, elle est applicable à n'importe quelle espèce et elle permet une représentation visuelle concrète des effets potentiels des changements climatiques sur la biodiversité. En raison de la vaste étendue de son territoire, de la difficulté d'y accéder et du désir politique de développer son potentiel économique tout en assurant une certaine conservation de sa biodiversité, le territoire du Nunavik est approprié pour ce type d'analyse.

Les modèles de niche s'appuient toutefois sur des prémisses qu'il faut connaître et comprendre afin d'éviter les fausses interprétations. Nous demandons au lecteur qui n'est pas familier avec ces prémisses de lire au minimum le résumé de la question publié dans Berteaux et al. (2014) aux pages 74-76 (section *Les avantages et les inconvénients des modèles de niche*) et 97-98 (section *Des prévisions spectaculaires à interpréter avec justesse*).

Tout d'abord, les modèles de niche supposent que les espèces soient en équilibre avec les conditions climatiques de la période de référence, c'est-à-dire qu'elles occupent tous les habitats qui leur sont favorables et sont absentes de ceux qui leur sont défavorables (Guisan et Theurillat 2000). Cette prémisses n'est pas respectée dans certains cas, notamment pour les espèces introduites qui sont en phase de colonisation (par exemple, le bœuf musqué au Nunavik). De plus, ces modèles supposent que les espèces n'évolueront pas durant la période couverte par la projection (Berteaux et al. 2014). Ceci est généralement vrai, car la vitesse d'évolution de la plupart des espèces est suffisamment lente pour ne pas être problématique à l'échelle temporelle considérée. Cependant, les individus pourront dans certains cas modifier leur utilisation de l'habitat si bien qu'ils pourront possiblement s'acclimater en partie aux changements et persister dans l'environnement, du moins jusqu'à une certaine limite, encore inconnue. Pour terminer, la répartition potentielle future prédite par la modélisation de niche climatique doit être interprétée comme étant l'ensemble des conditions climatiques qui seront favorables à une espèce donnée. Telle que nous l'avons utilisée, la modélisation de niche ne tient pas compte, par exemple, des capacités de dispersion des taxons.

### **5.2.2 Portée et limites de la modélisation écosystémique**

Les études relatant les impacts des changements climatiques sur différentes espèces ou taxons sont de plus en plus nombreuses (biodiversité marine: Wassmann et al. 2011; espèces végétales: Parmesan 2006; faune terrestre: Descamps et al. 2017; biodiversité terrestre: Berteaux et al. 2018). Néanmoins, les liens entre les espèces ne sont presque jamais analysés et projetés dans l'avenir. Nous avons

intégré notre analyse au niveau écosystémique pour palier autant que possible à ce manque en estimant les changements potentiels dans les liens qui unissent les différentes espèces (Dale et Fortin 2010). Notre approche a ainsi tenté d'intégrer les effets des changements climatiques sur la structure des réseaux trophiques à grande échelle, dans une région qui subira fortement les changements climatiques. À notre connaissance, ce type d'étude a été réalisé en milieu marin (Albouy et al. 2014, Kortsch et al. 2015), sur des systèmes hôtes-parasites (Poisot et al. 2017), mais jamais en milieu terrestre pour un réseau trophique de type prédateurs-proies.

Les approches de modélisation écosystémique deviennent possibles grâce à l'augmentation rapide de la puissance des ordinateurs, mais elles présentent aussi de nombreux défis. Entre autres, il est primordial d'enclencher une réflexion sérieuse sur les approches méthodologiques qui permettent d'exprimer correctement les réalités écologiques que nous souhaitons décrire ou projeter. Divers cadres conceptuels ont été proposés dans les dernières années (ex. théorie des graphes: Dale et Fortin 2010; distribution de fréquences des motifs à l'intérieur d'un réseau trophique: Przulj 2007; diversité bêta entre réseaux trophiques semblables: Poisot et al. 2012), mais la réflexion doit se poursuivre puisque le domaine n'en est qu'à ses premiers balbutiements.

### **5.2.3 Portée et limites de l'indice de vulnérabilité**

L'indice de vulnérabilité choisi nous a permis de comparer la composition en espèces et la structure des liens qui unissent ces dernières entre deux réseaux trophiques, l'un représentatif de notre période de référence et l'autre d'une période future. Contrairement aux études d'Albouy et al. (2014) et de Kortsch et collaborateurs (2015), nous avons poussé l'analyse de la vulnérabilité des réseaux trophiques jusqu'à comparer directement les deux réseaux plutôt que de comparer leurs caractéristiques dérivées (connectance, nombre de liens, modularité, etc.). En utilisant une approche basée sur la diversité bêta, nous pouvons avoir une meilleure compréhension de la dynamique et des processus des écosystèmes qui supportent les réseaux trophiques étudiés (Munkemuller et al. 2012).

Il est important de noter que l'indice de vulnérabilité utilisé doit être interprété avec prudence. Il ne représente qu'une des nombreuses façons de caractériser la vulnérabilité des écosystèmes terrestres, et ne permet pas de brosser un portrait complet des impacts des changements climatiques à l'échelle de l'écosystème. Il n'en demeure pas moins un des outils les plus avancés actuellement disponibles.

## **6. Conclusions et recommandations**

Considérant les principaux résultats de cette étude listés en début de discussion, nous concluons avec les recommandations suivantes que nous jugeons importantes pour les futures recherches et leurs applications:

- i) Favoriser l'acquisition de nouvelles données sur la biodiversité du Québec nordique.
- ii) Ajouter les informations dérivées de ce projet aux couches d'information déjà disponibles afin qu'elles puissent appuyer la planification écologique associée au Plan Nord.
- iii) Obliger les projets de recherche en cours et futurs à enregistrer leurs métadonnées et données dans des archives reconnues et pérennes, afin que les équipes successives qui étudieront la biodiversité puissent s'appuyer sur les travaux effectués précédemment.
- iv) Approfondir considérablement le développement et la validation d'indices de vulnérabilité aux changements climatiques à l'échelle écosystémique.

## 7. Remerciements

Le travail colossal accompli au cours de ce projet n'aurait pas été possible sans l'aide précieuse de nombreux collaborateurs. Nous tenons donc à remercier chaleureusement Travis Logan et Isabelle Charron (Ouranos) pour leur aide avec le traitement des données climatiques; Pierre Legagneux, Joël Béty, Nicolas Lecomte, Alastair Franke, Grant Gilchrist et Gilles Gauthier (co-chercheurs au sein d'ArcticNet) pour leur soutien dans l'acquisition des données écologiques; Dominique Gravel et Guillaume Blanchet (co-chercheurs au sein d'ArcticNet) pour leur aide dans le développement de l'approche de modélisation écosystémique; Marianne Ricard, Camille Legall-Payne, Élise Rioux-Paquette (Administration régionale Kativik) pour les échanges stimulants sur les besoins des communautés du Nord, ainsi que tous les membres du comité de suivi du projet (Robert Siron, Jean-François Bergeron, Mélanie Veilleux-Nolin, Benoît Tremblay, Steeve Côté et Esther Lévesque) pour leur conseils et oreilles attentives malgré leurs horaires parfois surchargés.

## 8. Références bibliographiques

- Albouy, C., L. Velez, M. Coll, F. Colloca, F. Le Loc'h, D. Mouillot, and D. Gravel. 2014. From projected species distribution to food-web structure under climate change. *Global Change Biology* 20:730–741.
- Allard, M., and M. Lemay. 2012. Nunavik and Nunatsiavut: From science to policy. An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of climate change and modernization. 303 pages. ArcticNet Inc., Quebec City, Quebec, Canada.
- Berteaux, D. 2013. Québec's Large-Scale Plan Nord. *Conservation Biology (Letters)* 27:242–247.
- Berteaux, D., N. Casajus, and S. de Blois. 2014. Changements climatiques et biodiversité du Québec: vers un nouveau patrimoine naturel. Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada.
- Berteaux, D., S. DeBlois, J.-F. Angers, J. Bonin, N. Casajus, M. Darveau, F. Fournier, M. M. Humphries, B. McGill, J. Larivée, T. Logan, P. Nantel, C. Périé, F. Poisson, D. Rodrigue, S. Rouleau, R. Siron, W. Thuiller, and L. Vescovi. 2010. The CC-Bio Project: Studying the Effects of Climate Change on Quebec Biodiversity. *Diversity* 2:1181–1204.
- Berteaux, D., G. Gauthier, F. Domine, R. A. Ims, S. F. Lamoureux, E. Lévesque, and N. Yoccoz. 2017. Effects of changing permafrost and snow conditions on tundra wildlife: critical places and times. *Arctic Science* 3:65–90.
- Berteaux, D., M. M. Humphries, C. J. Krebs, M. Lima, A. G. McAdam, N. Pettoirelli, D. Réale, T. Saitoh, E. Tkadlec, R. B. Weladji, and others. 2006. Constraints to projecting the effects of climate change on mammals. *Climate Research* 32:151–158.
- Berteaux, D., M. Ricard, M.-H. St-Laurent, N. Casajus, C. Périé, F. Beauregard, and S. de Blois. 2018. Northern protected areas will become important refuges for biodiversity tracking suitable climates. *Scientific Reports* 8:4623.
- Bhiry, N., A. Delwaide, M. Allard, Y. Bégin, L. Filion, M. Lavoie, C. Nozais, S. Payette, R. Pienitz, É. Saulnier-Talbot, and W. F. Vincent. 2011. Environmental Change in the Great Whale River Region, Hudson Bay: Five Decades of Multidisciplinary Research by Centre d'études Nordiques (CEN). *Ecoscience* 18:182–203.
- BirdLife International, and NatureServe. 2015. Bird Species Distribution Maps of the World, version 5.0. BirdLife International, Cambridge, UK and NatureServe, Arlington, USA.
- CCE Commission de coopération environnementale. 1997. Les régions écologiques de l'Amérique du Nord : vers une perspective commune. 62 pages. Montréal, Canada.
- Charron, I. 2015. Élaboration du portrait climatique régional du Nunavik. 86 pages. Ouranos, Montréal, Canada.

- Chouinard, C., R. Fortier, and J.-C. Mareschal. 2007. Recent climate variations in the subarctic inferred from three borehole temperature profiles in northern Quebec, Canada. *Earth and Planetary Science Letters* 263:355–369.
- Christensen, T., J. Payne, M. Doyle, G. Ibarra, J. Taylor, N. M. Schmidt, M. Gill, M. Svoboda, M. Aronsson, C. Behe, C. Buddle, C. Cuyler, A. M. Fosaa, A. D. Fox, S. Heiðmarsson, P. Henning Krogh, J. Madsen, D. McLennan, J. Nyman, C. Rosa, J. Salmela, R. Shuchman, M. Soloviev, and M. Wedege. 2013. The Arctic Terrestrial Biodiversity Monitoring Plan. Page 163. CAFF International Secretariat, Akureyri, Iceland.
- Dale, M. R. T., and M. J. Fortin. 2010. From Graphs to Spatial Graphs. Pages 21–38 *in* D. J. Futuyma, H. B. Shafer, and D. Simberloff, editors. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Vol 41. Annual Reviews, Palo Alto.
- Descamps, S., J. Aars, E. Fuglei, K. M. Kovacs, C. Lydersen, O. Pavlova, A. O. Pedersen, V. Ravolainen, and H. Strom. 2017. Climate change impacts on wildlife in a High Arctic archipelago - Svalbard, Norway. *Global Change Biology* 23:490–502.
- Gagnon, C. A., S. Hamel, D. E. Russell, T. Powell, M. Y. Svoboda, and D. Berteaux. 2018. Climate, biodiversity, and human well-being: merging scientific and indigenous knowledge. *Nature*.
- Giorgi, F., C. Jones, and G. R. Asrar. 2009. Addressing climate information needs at the region level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin* 58:175–183.
- Guisan, A., and J. P. Theurillat. 2000. Equilibrium modeling of alpine plant distribution: how far can we go? *Phytocoenologia* 30:353–384.
- IUCN. 2014. The IUCN Red List of Threatened Species, version 2014.1. [www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org), downloaded on 2016/01/25.
- Koleff, P., K. J. Gaston, and J. J. Lennon. 2003. Measuring beta diversity for presence-absence data. *Journal of Animal Ecology* 72:367–382.
- Kortsch, S., R. Primicerio, M. Fossheim, A. V. Dolgov, and M. Aschan. 2015. Climate change alters the structure of arctic marine food webs due to poleward shifts of boreal generalists. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 282:31–39.
- Maihot, A., and D. Chaumont. 2017. Élaboration du portrait bioclimatique futur du Nunavik – Tome I. Rapport présenté au Ministère de la forêt, de la faune et des parcs. 216 pages. Ouranos.
- Martynov, A., R. Laprise, L. Sushama, K. Winger, L. Separovic, and B. Dugas. 2013. Reanalysis-driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model version 5: Model performance evaluation. *Climate Dynamics* 41:2973–3005.
- McBean, G., G. Alekseev, D. Chen, E. Førlund, J. Fyfe, P. Y. Groisman, R. King, H. Melling, R. Vose, and P. H. Whitfield. 2005. Arctic Climate: Past and Present. Pages 21–60 *Arctic Climate Impact Assessment - Scientific Report*. Cambridge University Press.
- Munkemuller, T., F. de Bello, C. N. Meynard, D. Gravel, S. Lavergne, D. Mouillot, N. Mouquet, and W. Thuiller. 2012. From diversity indices to community assembly processes: a test with simulated data. *Ecography* 35:468–480.
- van Oudenhove, L., G. Gauthier, and J.-D. Lebreton. 2014. Year-round effects of climate on demographic parameters of an arctic-nesting goose species. *Journal of Animal Ecology* 83:1322–1333.
- Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 37:637–669.
- Poisot, T., E. Canard, D. Mouillot, N. Mouquet, and D. Gravel. 2012. The dissimilarity of species interaction networks. *Ecology Letters* 15:1353–1361.

- Poisot, T., C. Gueveneux-Julien, M. J. Fortin, D. Gravel, and P. Legendre. 2017. Hosts, parasites and their interactions respond to different climatic variables. *Global Ecology and Biogeography* 26:942–951.
- Przulj, N. 2007. Biological network comparison using graphlet degree distribution. *Bioinformatics* 23:E177–E183.
- Saha, S., S. Moorthi, H.-L. Pan, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, R. Kistler, J. Woollen, D. Behringer, H. Liu, D. Stokes, R. Grumbine, G. Gayno, J. Wang, Y.-T. Hou, H.-Y. Chuang, H.-M. Juang, J. Sela, M. Iredell, R. Treadon, D. Kleist, P. Van Delst, D. Keyser, J. Derber, M. Ek, J. Meng, H. Wei, R. Yang, S. Lord, H. Van Den Dool, A. Kumar, W. Wang, C. Long, M. Chelliah, Y. Xue, B. Huang, J.-K. Schemm, W. Ebisuzaki, R. Lin, P. Xie, M. Chen, S. Zhou, W. Higgins, C.-Z. Zou, Q. Liu, Y. Chen, Y. Han, L. Cucurull, R. W. Reynolds, G. Rutledge, and M. Goldberg. 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91:1015–1057.
- Separovic, L., A. Alexandru, R. Laprise, A. Martynov, L. Sushama, K. Winger, K. Tete, and M. Valin. 2013. Present climate and climate change over North America as simulated by the fifth-generation Canadian Regional Climate Model. *Climate Dynamics* 41:3167–3201.
- Van der Putten, W. H., M. Macel, and M. E. Visser. 2010. Predicting species distribution and abundance responses to climate change: why it is essential to include biotic interactions across trophic levels. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365:2025–2034.
- Wassmann, P., C. M. Duarte, S. Agusti, and M. K. Sejr. 2011. Footprints of climate change in the Arctic marine ecosystem. *Global Change Biology* 17:1235–1249.
- Whittaker, R. H. 1960. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs* 30:279–338.

## 9. Références aux données et métadonnées

### Données archivées dans la collection Nordicana D (<http://www.cen.uqar.ca/nordicanad/>)

- Berteaux, D., Casajus, N. and Ropars, P. (2018) Tundra Nunavik: Set of 27 interpolated bioclimate variables (1981-2010) derived from NCEP CFSR Reanalysis for Labrador and the province of Quebec north of 50°N. *Nordicana D*, vol. 32, DOI: 10.5885/45530CE-A3ED9387879F4B55.
- Berteaux, D., Casajus, N. and Ropars, P. (2018) Tundra Nunavik: Set of 27 gridded bioclimate variables projected during the 21<sup>st</sup> century under 10 climate change scenarios for Labrador and the province of Quebec north of 50°N. *Nordicana D*, sous presse.
- Berteaux, D., Casajus, N. and Ropars, P. (2018) Tundra Nunavik: Observed and modelled distribution of 183 species of birds and mammals in Labrador and the province of Quebec north of 50°N during the period 1981-2010. *Nordicana D*, sous presse.
- Berteaux, D., Casajus, N. and Ropars, P. (2018) Tundra Nunavik: Potential future distribution of 183 species of birds and mammals in Labrador and the province of Quebec north of 50°N projected during the 21<sup>st</sup> century under climate change scenarios. *Nordicana D*, sous presse.
- Berteaux, D., Ropars, P. and Casajus, N. (2018) Tundra Nunavik: Functional traits of common mammal and bird species in Labrador and the province of Quebec north of 50°N. *Nordicana D*, sous presse.
- Berteaux, D., Ropars, P. and Casajus, N. (2018) Tundra Nunavik: Matrix of trophic relations of the terrestrial ecosystem of Labrador and the province of Quebec north of 50°N. *Nordicana D*, sous presse.

### Métadonnées inscrites au Polar Data Catalogue (<https://www.polardata.ca/>)

- Berteaux, D., Casajus, N. and Ropars, P. (2018) Tundra Nunavik: Set of 27 gridded climate variables representative of 1981-2010. Waterloo, Canada: Canadian Cryospheric Information Network (CCIN) # 12890.
- Berteaux, D., Casajus, N. and Ropars, P. (2018) Tundra Nunavik: Set of 27 gridded climate variables projected during the 21st century under 10 climate change scenarios. Waterloo, Canada: Canadian Cryospheric Information Network (CCIN) # 12893.
- Berteaux, D., Casajus, N. and Ropars, P. (2018) Tundra Nunavik: Distribution of birds and mammals in Nunavik during 1981-2010. Waterloo, Canada: Canadian Cryospheric Information Network (CCIN) # 12891.
- Berteaux, D., Casajus, N. and Ropars, P. (2018) Tundra Nunavik: Potential future distribution of birds and mammals in Nunavik projected during the 21st century under climate change. Waterloo, Canada: Canadian Cryospheric Information Network (CCIN) # 12894.
- Berteaux, D., Ropars, P. and Casajus, N. (2018) Tundra Nunavik: Functional traits of mammal and bird species. Waterloo, Canada: Canadian Cryospheric Information Network (CCIN) # 12892.
- Berteaux, D., Ropars, P. and Casajus, N. (2018) Tundra Nunavik: Matrix of trophic relations. Waterloo, Canada: Canadian Cryospheric Information Network (CCIN) # 12895.

## **10. Annexes**

### **Annexe 1 : Portrait du climat du nord du Québec et du Labrador pour la période 1981-2010**

Voir fichier joint.

### **Annexe 2 : Portrait du climat du nord du Québec et du Labrador pour la période 2071-2100**

Voir fichier joint.

### **Annexe 3 : Portrait potentiel de la biodiversité de la toundra du Nunavik pour la période 2071-2100**

Voir fichier joint.

# Portrait du climat du nord du Québec et du Labrador pour la période 1981–2010

*Dominique Berteaux, Nicolas Casajus et Pascale Ropars*

*Université du Québec à Rimouski*

## Résumé

Ce document dresse un portrait général du climat du nord du Québec et du Labrador pour la période 1981-2010 (dite période de référence) dans le cadre du projet *Changements climatiques et toundra du Nunavik : exposition, sensibilité et vulnérabilité*. Il se divise en quatre parties : 1) présentation de la couverture géographique ; 2) description des données climatiques ; 3) synthèse climatique du territoire étudié ; 4) atlas bioclimatique.

## Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>1 Couverture géographique</b>	<b>3</b>
1.1 Région toundrique . . . . .	4
1.2 Nord du Québec et Labrador . . . . .	4
<b>2 Description des données climatiques</b>	<b>4</b>
2.1 Source des données . . . . .	4
2.2 Liste des variables bioclimatiques . . . . .	5
2.3 Calcul des variables bioclimatiques . . . . .	6
<b>3 Synthèse climatique du territoire étudié</b>	<b>15</b>
3.1 Tendances climatiques entre 1981 et 2010 . . . . .	15
3.2 Portrait climatique pour la période 1981-2010 . . . . .	16
<b>4 Atlas bioclimatique</b>	<b>18</b>
<b>Références aux données et métadonnées</b>	<b>33</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>33</b>

**Citation suggérée :** Berteaux D., N. Casajus et P. Ropars (2018) Portrait du climat du nord du Québec et du Labrador pour la période 1981–2010. *Rapport présenté au Consortium Ouranos sur la climatologie régionale et les changements climatiques*. Université du Québec à Rimouski, Québec, Canada, 33 pages.

## Introduction

Le projet *Changements climatiques et toundra du Nunavik : exposition, sensibilité et vulnérabilité* a dressé un portrait des effets potentiels des changements climatiques sur les écosystèmes de la toundra arctique du Nunavik. Pour ce faire, des modèles de niche ont été construits afin de modéliser la répartition des espèces présentes dans la toundra arctique du Nunavik. Les espèces actuellement absentes de cette région, mais qui pourraient potentiellement retrouver leurs conditions climatiques favorables dans cette région à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle ont également été considérées. À partir des modèles de niche construits, ces répartitions ont par la suite été projetées dans le futur sous différents scénarios de changements climatiques. Dans une seconde étape, des réseaux trophiques entre espèces ont été bâtis à partir des aires de répartition modélisées (période de référence) et projetées (périodes futures) et les effets potentiels des changements climatiques sur les écosystèmes ont alors été quantifiés. Ce document brosse un portrait du climat de la toundra arctique du Nunavik pour la période 1981-2010 qui nous a servi période de référence.



FIGURE 1 – Aires d'étude du projet. La région en blanc (avec et sans hachures) représente l'ensemble du Québec nordique au-delà du 50<sup>e</sup> parallèle Nord, ainsi que le Labrador, et correspond à l'aire de modélisation. La région hachurée correspond à la région toundrique du Nunavik. Cette dernière est la seule pour laquelle des projections d'aires de répartition potentielles futures ont été réalisées.

# 1 Couverture géographique

Bien que ce projet s'intéresse à l'écorégion toundriqué arctique du Nunavik, la couverture géographique des modèles de niche a été élargie vers le sud afin de prendre en compte une plus grande portion des aires de répartition des espèces. Ceci permet de ne pas surestimer les effets potentiels des changements climatiques sur la répartition des espèces (en négligeant une trop grande partie des conditions climatiques qui leur sont favorables). Ceci présente en outre l'avantage de pouvoir inclure un plus grand nombre d'espèces, notamment celles actuellement absentes de la toundra arctique. La figure 1 présente les deux régions d'intérêt qui ont été utilisées. La partie en blanc correspond à la région à l'intérieur de laquelle les modèles de niche ont été calibrés et comprend les deux-tiers nord du Québec et l'ensemble du Labrador. La région hachurée recouvre la toundra arctique du Nunavik et a servi de lieu d'étude pour les analyses de vulnérabilité. Les deux sous-sections suivantes présentent quelques caractéristiques physiques de ces deux régions, l'altitude pouvant être visualisée à la Fig. 2. Il est à noter que les données, libres de droits d'accès, ayant servi à cartographier l'altitude proviennent du jeu de données CGIAR-SRTM, DEM disponible à une résolution de 30 secondes. Ces données ont été téléchargées sur le site [DIVA-GIS](#). Il est également important de noter que, pour des raisons techniques, les cartes comportent parfois des éléments de légende en anglais.

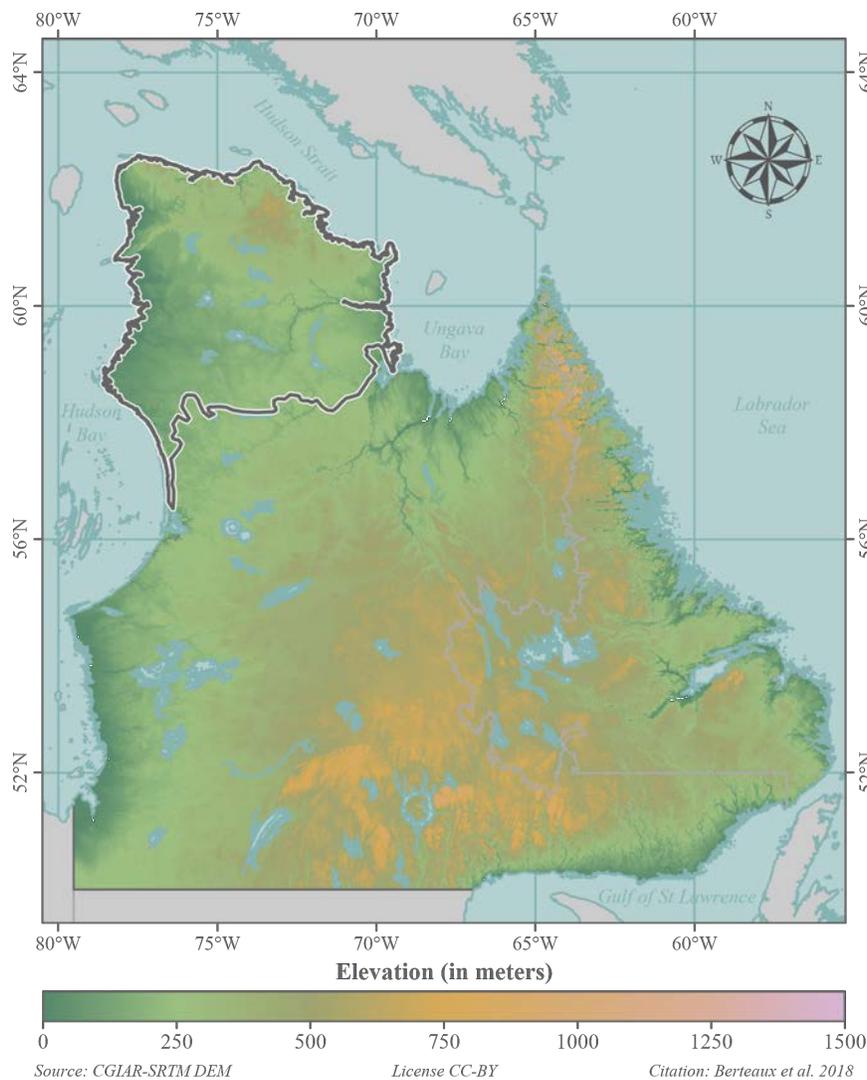


FIGURE 2 – Topographie du nord du Québec et du Labrador

## 1.1 Région toundrique

L'analyse des relations entre espèces au sein de réseaux trophiques (analyse de sensibilité) s'est restreinte à l'écorégion de la toundra arctique du Nunavik. La délimitation de cette écorégion est basée sur la classification des écorégions développée par la Commission de coopération environnementale (CEC) et les données ont été téléchargées sur le site de l'[US Environmental Protection Agency](#).

Cette région, appelée par la suite *Toundra*, s'étend de 69°13'37''W à 78°35'47''W en longitude et de 56°31'41''N à 62°34'45''N en latitude. Sa superficie est d'environ 188 847 km<sup>2</sup>, et lorsqu'on superpose la grille climatique, 4 315 cellules la recouvrent. La résolution horizontale des cellules de la grille climatique est de 0,08333333° x 0,08333333°, soit environ 10 km x 10 km. L'altitude moyenne est de 206 m ± 111SD (min=0 m ; max=682 m). Les caractéristiques climatiques de l'aire d'étude sont présentées plus bas.

## 1.2 Nord du Québec et Labrador

La limite sud de l'aire d'étude utilisée pour construire les modèles de niche a été repoussée au 50<sup>e</sup> parallèle de latitude Nord. Pour déterminer cette limite, nous avons regardé où se trouve, pour la période 1981-2010, l'isotherme (isocline des températures annuelles moyennes, ici -0,5°C) qui intersecte le sud de la région toundrique arctique à l'horizon 2071-2100. Ceci nous permet d'éviter le problème des analogues spatiaux, du moins pour la température.

Cette aire d'étude s'étend de 55°37'13''W à 79°43'44''W en longitude et de 50°00'00''N à 62°34'45''N en latitude. Sa superficie est d'environ 1 359 474 km<sup>2</sup>, et lorsqu'on superpose la grille climatique, 27 568 cellules la recouvrent. L'altitude moyenne est de 356 m ± 180SD (min=0 m ; max=1 500 m). Les caractéristiques climatiques globales sont présentées ci-après.

# 2 Description des données climatiques

Dans cette partie, la provenance des données climatiques et leurs traitements pour construire les normales climatiques pour la période de référence (définie comme la moyenne des valeurs annuelles entre 1981 et 2010), sont décrites. Ces mêmes variables ont servi à l'étude des tendances climatiques historiques entre 1981 et 2010.

## 2.1 Source des données

La réanalyse est une méthode qui consiste à combiner un modèle de prévision météorologique et des observations existantes pour produire des archives d'un grand nombre de variables atmosphériques et océaniques sur des grilles à une résolution temporelle de quelques heures pour plusieurs décennies du passé (Charron & Chaumont, 2015). L'étude de Charron & Chaumont (2015) montre le potentiel des réanalyses comme source de valeurs "observées" dans les régions où les stations météo font souvent défaut, comme c'est le cas du Nord Québécois.

Dans l'étude de Charron & Chaumont (2015), la réanalyse CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) du NCEP (Saha *et al.*, 2010) représente le jeu de données disposant de la plus fine résolution spatiale (0,3°). Ainsi, avec cette réanalyse, une méthode d'interpolation simple vers une résolution plus fine (10 km x 10 km) est jugée moins problématique que dans le cas d'autres réanalyses.

Les grilles climatiques initiales (résolution de 0,3°), disponibles pour les valeurs mensuelles de température de l'air et de précipitations totales pour la période 1981-2010, ont été interpolées par la méthode des voisins naturels, méthode d'interpolation simple mais tridimensionnelle prenant en compte l'altitude, pour produire des données climatiques à une résolution horizontale plus fine (0,08333333°). L'interpolation des données climatiques a été effectuée par Travis Logan du Consortium Ouranos.

C'est à partir de ces trois variables mensuelles de base (températures minimale et maximale de l'air et précipitations totales) que des variables bioclimatiques ont été dérivées. Ces dernières permettent de décrire différents gradients climatiques : tendances annuelles, saisonnalités, facteurs environnementaux limitants pour les espèces, etc.

## 2.2 Liste des variables bioclimatiques

Le Tableau 1 liste l'ensemble des variables bioclimatiques dérivées à partir des trois variables mensuelles de base : température mensuelle minimale ( $T_{\min}$ ), température mensuelle maximale ( $T_{\max}$ ) et précipitation mensuelle totale ( $P_{\text{tot}}$ ). Un total de 27 variables bioclimatiques a été construit. Cependant, afin d'éviter un sur-ajustement des modèles de niche et l'apparition de biais dans l'estimation des paramètres dus à une trop forte autocorrélation entre prédicteurs, seules certaines de ces variables seront retenues.

TABLE 1 – Variables bioclimatiques dérivées pour le projet

Code	Variable bioclimatique	Unité
Bio01	Température annuelle moyenne	Degrés Celsius
Bio02	Écart diurne moyen des températures	Degrés Celsius
Bio03	Isothermalité	-
Bio04	Saisonnalité des températures	Degrés Celsius
Bio05	Température maximale du mois le plus chaud	Degrés Celsius
Bio06	Température minimale du mois le plus froid	Degrés Celsius
Bio07	Écart annuel des températures	Degrés Celsius
Bio08	Température moyenne du trimestre le plus humide	Degrés Celsius
Bio09	Température moyenne du trimestre le plus sec	Degrés Celsius
Bio10	Température moyenne du trimestre le plus chaud	Degrés Celsius
Bio11	Température moyenne du trimestre le plus froid	Degrés Celsius
Bio12	Précipitations annuelles totales	Millimètres
Bio13	Précipitations du mois le plus humide	Millimètres
Bio14	Précipitations du mois le plus sec	Millimètres
Bio15	Saisonnalité des précipitations	-
Bio16	Précipitations du trimestre le plus humide	Millimètres
Bio17	Précipitations du trimestre le plus sec	Millimètres
Bio18	Précipitations du trimestre le plus chaud	Millimètres
Bio19	Précipitations du trimestre le plus froid	Millimètres
Bio20	Degrés-jours de croissance annuel	Degrés Celsius
Bio21	Degrés-jours de gel annuel	Degrés Celsius
Bio22	Date de dernier gel printanier	Jours Julien
Bio23	Date de premier gel automnal	Jours Julien
Bio24	Longueur de la période sans gel	Nombre de jours
Bio25	Évapotranspiration potentielle annuelle	Millimètres
Bio26	Bilan hydrique annuel	Millimètres
Bio27	Indice d'humidité annuel	Degrés Celsius/Millimètres

Notons que les variables Bio01 à Bio19 ont été dérivées d'après la méthodologie utilisée dans ANUCLIM (Xu & Hutchinson, 2011) alors que les variables Bio20 à Bio27 ont été construites selon la procédure développée par Rehfeldt (2006). Ces dernières ont demandé plus de travail puisqu'elles ont été dérivées à partir de données mensuelles alors qu'elles nécessitent une information journalière.

## 2.3 Calcul des variables bioclimatiques

Cette section détaille le calcul des variables bioclimatiques dérivées pour permettre une bonne compréhension de leurs significations. Les calculs sont présentés pour les variables annuelles et pour chaque cellule de la grille climatique. Les variables bioclimatiques définissant le climat moyen de la période de référence 1981-2010 (normale climatique) correspondent aux moyennes de ces variables annuelles.

### 2.3.1 Température annuelle moyenne (Bio01)

Soit, la température mensuelle moyenne définie comme suit :

$$T_{avg_i} = \frac{(T_{max_i} + T_{min_i})}{2} \quad (1)$$

avec  $T_{max_i}$ , la température maximale du mois  $i$  et  $T_{min_i}$ , la température minimale du mois  $i$

Le calcul de la température annuelle moyenne (*annual mean temperature*) est donné par l'équation suivante :

$$Bio01 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{avg_i}}{n} \quad (2)$$

avec  $n$ , le nombre de mois dans une année (soit  $n = 12$ ) et  $T_{avg_i}$ , la température moyenne du mois  $i$  telle que donnée par l'équation 1.

**Signification :** La température annuelle moyenne représente l'énergie totale rentrant dans un écosystème.

### 2.3.2 Écart diurne moyen des températures (Bio02)

L'écart diurne moyen des températures (*annual mean diurnal range*) correspond à la moyenne des écarts mensuels des températures et est donné par l'équation suivante :

$$Bio02 = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{max_i} - T_{min_i})}{n} \quad (3)$$

avec  $n$ , le nombre de mois dans une année (soit  $n = 12$ ),  $T_{max_i}$ , la température maximale du mois  $i$  et  $T_{min_i}$ , la température minimale du mois  $i$ .

**Signification :** L'écart diurne moyen des températures constitue une information pertinente pour certaines espèces sur les fluctuations des températures entre le jour et la nuit. Puisque les données initiales sont mensuelles, cet indice utilise les fluctuations de températures enregistrées dans chaque mois pour capturer les écarts diurnes.

### 2.3.3 Isothermalité (Bio03)

L'isothermalité (*isothermality*) quantifie l'oscillation diurne des températures (écart jour-nuit) par rapport à l'oscillation intersaisonnière (écart été-hiver). Elle est donnée par l'équation 4 :

$$Bio03 = 100 \times \frac{Bio02}{Bio07} \quad (4)$$

avec *Bio02*, l'écart diurne moyen des températures (tel que donné par l'équation 3), et *Bio07*, l'écart annuel des températures (dont le calcul est donné par l'équation 8).

**Signification :** L'isothermalité est généralement utile pour les environnements insulaires, tropicaux et marins et quantifie les oscillations diurnes de températures par rapport aux oscillations annuelles.

### 2.3.4 Saisonnalité des températures (Bio04)

La saisonnalité des températures (*temperature seasonality*) est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 Bio04 &= 100 \times SD\{T_{avg_1}, \dots, T_{avg_{12}}\} \\
 Bio04 &= 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{avg_i} - \overline{T_{avg}})^2}{n}} \\
 Bio04 &= 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{avg_i} - Bio01)^2}{n}}
 \end{aligned} \tag{5}$$

avec  $SD$ , l'écart-type de la température annuelle moyenne, c.-à-d. la racine-carrée de la somme des écarts au carré des températures moyennes mensuelles ( $T_{avg_i}$ ) à la température annuelle moyenne  $\overline{T_{avg}}$  (soit *Bio01*, voir l'équation 1) divisée par le nombre de mois ( $n$ ) contenu dans une année (soit  $n = 12$ ).

**Signification :** Cet indice est une mesure du changement de la température tout au long d'une année. Plus la valeur de saisonnalité sera grande, plus la température fluctuera au cours d'une année.

### 2.3.5 Température maximale du mois le plus chaud (Bio05)

La température maximale du mois le plus chaud (*max temperature of warmest month*) est donnée par l'équation suivante :

$$Bio05 = \max(\{T_{max_1}, \dots, T_{max_{12}}\}) \tag{6}$$

avec  $T_{max_1}$ , la température maximale du mois de Janvier,  $T_{max_{12}}$ , la température maximale du mois de Décembre, et ..., les températures maximales des mois compris entre les mois de Janvier et de Décembre.

**Signification :** Cette information peut être utile lorsque la répartition de l'espèce est influencée par les anomalies des températures chaudes au cours d'une année.

### 2.3.6 Température minimale du mois le plus froid (Bio06)

La température minimale du mois le plus froid (*min temperature of coldest month*) est donnée par l'équation suivante :

$$Bio06 = \min(\{T_{min_1}, \dots, T_{min_{12}}\}) \tag{7}$$

avec  $T_{min_1}$ , la température minimale du mois de Janvier,  $T_{min_{12}}$ , la température minimale du mois de Décembre, et ..., les températures minimales des mois compris entre les mois de Janvier et de Décembre.

**Signification :** Cette information peut être utile lorsque la répartition de l'espèce est influencée par les anomalies des températures froides au cours d'une année.

### 2.3.7 Écart annuel des températures (Bio07)

L'écart annuel des températures (*annual temperature range*), une mesure de la variation de la température au cours d'une année, est donné par l'équation suivante :

$$Bio07 = Bio05 - Bio06 \quad (8)$$

avec  $Bio05$ , la température maximale du mois le plus chaud (telle que donnée par l'équation 6), et  $bio06$ , la température minimale du mois le plus froid (dont le calcul est donné par l'équation 7).

**Signification :** Cet indice peut être utile lorsque la répartition d'une espèce est affectée par les écarts des extrêmes de température.

### 2.3.8 Température moyenne du trimestre le plus humide (Bio08)

La température moyenne du trimestre le plus humide (*mean temperature of wettest quarter*) est une mesure approximant la température moyenne de la saison humide. L'identification de la saison humide est donnée par l'équation suivante :

$$Q_{P_{tot_{max}}} = \max \left( \left( \begin{array}{c} \sum_{i=1}^3 P_{tot_i}, \\ \sum_{i=2}^4 P_{tot_i}, \\ \dots, \\ \sum_{i=10}^{12} P_{tot_i}, \\ \sum_{i=11}^1 P_{tot_i}, \\ \sum_{i=12}^2 P_{tot_i} \end{array} \right) \right) \quad (9)$$

avec  $Q_{P_{tot_{max}}}$ , le trimestre le plus humide, c.-à-d. la suite de trois mois consécutifs dont la somme des précipitations totales est maximale (comparativement à toutes les autres suites de trois mois consécutifs).

Une fois la saison humide identifiée, la température moyenne du trimestre le plus humide est donnée par l'équation suivante :

$$Bio08 = \frac{\sum_{i=1}^3 T_{avg_i}}{3} \quad (10)$$

avec  $T_{avg_i}$ , la température moyenne du mois  $i$  et  $i$  correspondant aux trois mois consécutifs identifiés précédemment.

**Signification :** Cet indice peut être utile lorsque la répartition d'une espèce est conditionnée par les conditions régnant durant la saison humide.

### 2.3.9 Température moyenne du trimestre le plus sec (Bio09)

La température moyenne du trimestre le plus sec (*mean temperature of driest quarter*) est une mesure approximant la température moyenne de la saison sèche. L'identification de la saison sèche est donnée par

l'équation suivante :

$$Q_{P_{tot_{min}}} = \min \left( \left( \begin{array}{c} \sum_{i=1}^3 P_{tot_i}, \\ \sum_{i=2}^4 P_{tot_i}, \\ \dots, \\ \sum_{i=10}^{12} P_{tot_i}, \\ \sum_{i=11}^1 P_{tot_i}, \\ \sum_{i=12}^2 P_{tot_i} \end{array} \right) \right) \quad (11)$$

avec  $Q_{P_{tot_{min}}}$ , le trimestre le plus sec, c.-à-d. la suite de trois mois consécutifs dont la somme des précipitations totales est minimale (comparativement à toutes les autres suites de trois mois consécutifs).

Une fois la saison sèche identifiée, la température moyenne du trimestre le plus sec est donnée par l'équation suivante :

$$Bio09 = \frac{\sum_{i=1}^3 T_{avg_i}}{3} \quad (12)$$

avec  $T_{avg_i}$ , la température moyenne du mois  $i$  et  $i$  correspondant aux trois mois consécutifs identifiés précédemment.

**Signification :** Cet indice peut être utile lorsque la répartition d'une espèce est conditionnée par les conditions régnant durant la saison sèche.

### 2.3.10 Température moyenne du trimestre le plus chaud (Bio10)

La température moyenne du trimestre le plus chaud (*mean temperature of warmest quarter*) est une mesure approximant la température moyenne de la saison chaude. L'identification de la saison chaude est donnée par l'équation suivante :

$$Q_{T_{max}} = \max \left( \left( \begin{array}{c} \sum_{i=1}^3 T_{avg_i}, \\ \sum_{i=2}^4 T_{avg_i}, \\ \dots, \\ \sum_{i=10}^{12} T_{avg_i}, \\ \sum_{i=11}^1 T_{avg_i}, \\ \sum_{i=12}^2 T_{avg_i} \end{array} \right) \right) \quad (13)$$

avec  $Q_{T_{max}}$ , le trimestre le plus chaud, c.-à-d. la suite de trois mois consécutifs dont la somme des températures moyennes est maximale (comparativement à toutes les autres suites de trois mois consécutifs).

Une fois la saison chaude identifiée, la température moyenne du trimestre le plus chaud est donnée par l'équation suivante :

$$Bio10 = \frac{\sum_{i=1}^3 T_{avg_i}}{3} \quad (14)$$

avec  $T_{avg_i}$ , la température moyenne du mois  $i$  et  $i$  correspondant aux trois mois consécutifs identifiés précédemment.

**Signification :** Cet indice peut être utile lorsque la répartition d'une espèce est conditionnée par les conditions régnant durant la saison chaude.

### 2.3.11 Température moyenne du trimestre le plus froid (Bio11)

La température moyenne du trimestre le plus froid (*mean temperature of coldest quarter*) est une mesure approximant la température moyenne de la saison froide. L'identification de la saison froide est donnée par l'équation suivante :

$$Q_{Tmin} = \min \left( \left( \begin{array}{c} \sum_{i=1}^3 T_{avg_i}, \\ \sum_{i=2}^4 T_{avg_i}, \\ \dots, \\ \sum_{i=10}^{12} T_{avg_i}, \\ \sum_{i=11}^1 T_{avg_i}, \\ \sum_{i=12}^2 T_{avg_i} \end{array} \right) \right) \quad (15)$$

avec  $Q_{Tmin}$ , le trimestre le plus froid, c.-à-d. la suite de trois mois consécutifs dont la somme des températures moyennes est minimale (comparativement à toutes les autres suites de trois mois consécutifs).

Une fois la saison froide identifiée, la température moyenne du trimestre le plus froid est donnée par l'équation suivante :

$$Bio11 = \frac{\sum_{i=1}^3 T_{avg_i}}{3} \quad (16)$$

avec  $T_{avg_i}$ , la température moyenne du mois  $i$  et  $i$  correspondant aux trois mois consécutifs identifiés précédemment.

**Signification :** Cet indice peut être utile lorsque la répartition d'une espèce est conditionnée par les conditions régnant durant la saison froide.

### 2.3.12 Précipitations annuelles totales (Bio12)

Le calcul des précipitations annuelles totales (*annual precipitation*) est donné par l'équation suivante :

$$Bio12 = \sum_{i=1}^n P_{tot_i} \quad (17)$$

avec  $n$ , le nombre de mois dans une année (soit  $n = 12$ ) et  $P_{tot_i}$ , la précipitation totale du mois  $i$ .

**Signification :** Cet indice représente l'entrée totale d'eau dans un système, et est très utile lorsque la répartition d'une espèce est fortement influencée par la disponibilité en eau.

### 2.3.13 Précipitations du mois le plus humide (Bio13)

La précipitation du mois le plus humide (*precipitation of wettest month*) est donnée par l'équation suivante :

$$Bio13 = \max(\{P_{tot_1}, \dots, P_{tot_{12}}\}) \quad (18)$$

avec  $P_{tot_1}$ , la précipitation totale du mois de Janvier,  $P_{tot_{12}}$ , la précipitation totale du mois de Décembre, et ..., les précipitations totales des mois compris entre les mois de Janvier et de Décembre.

**Signification :** Cette information peut être utile lorsque la répartition de l'espèce est influencée par les conditions extrêmes de précipitation.

### 2.3.14 Précipitations du mois le plus sec (Bio14)

La précipitation du mois le plus sec (*precipitation of driest month*) est donnée par l'équation suivante :

$$Bio14 = \min(\{P_{tot_1}, \dots, P_{tot_{12}}\}) \quad (19)$$

avec  $P_{tot_1}$ , la précipitation totale du mois de Janvier,  $P_{tot_{12}}$ , la précipitation totale du mois de Décembre, et ..., les précipitations totales des mois compris entre les mois de Janvier et de Décembre.

**Signification :** Cette information peut être utile lorsque la répartition de l'espèce est influencée par les conditions extrêmes de précipitation.

### 2.3.15 Saisonnalité des précipitations (Bio15)

La saisonnalité des précipitations (*precipitation seasonality*) correspond au ratio de l'écart-type des précipitations totales mensuelles sur la moyenne des précipitations mensuelles totales (c.-à-d. le coefficient de variation). Cet indice, exprimé en pourcentage, est calculé de la manière suivante :

$$Bio15 = 100 \times \frac{SD\{P_{tot_1}, \dots, P_{tot_{12}}\}}{1 + \frac{Bio12}{n}} \quad (20)$$

$$Bio15 = 100 \times \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{tot_i} - \overline{P_{tot}})^2}{n}}}{1 + \frac{Bio12}{n}}$$

avec  $SD$ , l'écart-type des précipitations totales mensuelles, c.-à-d. la racine-carrée de la somme des écarts au carré des précipitations totales mensuelles ( $P_{tot_i}$ ) à la moyenne des précipitations mensuelles totales  $\overline{P_{tot}}$  (soit  $Bio12/n$ ,  $Bio12$  étant donné à l'équation 17) divisée par le nombre de mois ( $n$ ) contenu dans une année (soit  $n = 12$ ).

**Signification :** Cet indice est une mesure de la variation des précipitations mensuelles tout au long d'une année. Plus la valeur de saisonnalité sera grande, plus la précipitation fluctuera au cours d'une année.

### 2.3.16 Précipitations du trimestre le plus humide (Bio16)

La précipitation du trimestre le plus humide (*precipitation of wettest quarter*) est une mesure approximant les précipitations de la saison humide. Cet indice est donné par l'équation suivante :

$$Bio16 = \max \left( \left( \begin{array}{c} \sum_{i=1}^3 P_{tot_i}, \\ \sum_{i=2}^4 P_{tot_i}, \\ \dots, \\ \sum_{i=10}^{12} P_{tot_i}, \\ \sum_{i=11}^1 P_{tot_i}, \\ \sum_{i=12}^2 P_{tot_i} \end{array} \right) \right) \quad (21)$$

avec  $P_{tot_i}$ , la précipitation totale du mois  $i$ .

**Signification :** Cet indice peut être utile lorsque la répartition d'une espèce est conditionnée par les conditions régnant durant la saison humide.

### 2.3.17 Précipitations du trimestre le plus sec (Bio17)

La précipitation du trimestre le plus sec (*precipitation of driest quarter*) est une mesure approximant les précipitations de la saison sèche. Cet indice est donné par l'équation suivante :

$$Bio17 = \min \left( \left( \begin{array}{c} \sum_{i=1}^3 P_{tot_i}, \\ \sum_{i=2}^4 P_{tot_i}, \\ \dots, \\ \sum_{i=10}^{12} P_{tot_i}, \\ \sum_{i=11}^1 P_{tot_i}, \\ \sum_{i=12}^2 P_{tot_i} \end{array} \right) \right) \quad (22)$$

avec  $P_{tot_i}$ , la précipitation totale du mois  $i$ .

**Signification :** Cet indice peut être utile lorsque la répartition d'une espèce est conditionnée par les conditions régnant durant la saison sèche.

### 2.3.18 Précipitations du trimestre le plus chaud (Bio18)

La précipitation du trimestre le plus chaud (*precipitation of warmest quarter*) est une mesure approximant la précipitation de la saison chaude. L'identification de la saison chaude est donnée par l'équation suivante :

$$Q_{T_{max}} = \max \left( \left( \begin{array}{c} \sum_{i=1}^3 T_{avg_i}, \\ \sum_{i=2}^4 T_{avg_i}, \\ \dots, \\ \sum_{i=10}^{12} T_{avg_i}, \\ \sum_{i=11}^1 T_{avg_i}, \\ \sum_{i=12}^2 T_{avg_i} \end{array} \right) \right) \quad (23)$$

avec  $Q_{T_{max}}$ , le trimestre le plus chaud, c.-à-d. la suite de trois mois consécutifs dont la somme des températures moyennes est maximale (comparativement à toutes les autres suites de trois mois consécutifs).

Une fois la saison chaude identifiée, la précipitation du trimestre le plus chaud est donnée par l'équation suivante :

$$Bio18 = \sum_{i=1}^3 P_{tot_i} \quad (24)$$

avec  $P_{tot_i}$ , la précipitation totale du mois  $i$  et  $i$  correspondant aux trois mois consécutifs identifiés précédemment.

**Signification :** Cet indice peut être utile lorsque la répartition d'une espèce est conditionnée par les conditions régnant durant la saison chaude.

### 2.3.19 Précipitations du trimestre le plus froid (Bio19)

La précipitation du trimestre le plus froid (*precipitation of coldest quarter*) est une mesure approximant la précipitation de la saison froide. L'identification de la saison froide est donnée par l'équation suivante :

$$Q_{Tmin} = \min \left( \left( \begin{array}{c} \sum_{i=1}^3 T_{avg_i}, \\ \sum_{i=2}^4 T_{avg_i}, \\ \dots, \\ \sum_{i=10}^{12} T_{avg_i}, \\ \sum_{i=11}^1 T_{avg_i}, \\ \sum_{i=12}^2 T_{avg_i} \end{array} \right) \right) \quad (25)$$

avec  $Q_{Tmin}$ , le trimestre le plus froid, c.-à-d. la suite de trois mois consécutifs dont la somme des températures moyennes est minimale (comparativement à toutes les autres suites de trois mois consécutifs).

Une fois la saison froide identifiée, la précipitation du trimestre le plus froid est donnée par l'équation suivante :

$$Bio19 = \sum_{i=1}^3 P_{tot_i} \quad (26)$$

avec  $P_{tot_i}$ , la précipitation totale du mois  $i$  et  $i$  correspondant aux trois mois consécutifs identifiés précédemment.

**Signification :** Cet indice peut être utile lorsque la répartition d'une espèce est conditionnée par les conditions régnant durant la saison froide.

### 2.3.20 Potentiel d'évapotranspiration annuel (Bio25)

Le calcul du potentiel d'évapotranspiration annuel (*annual potential evapotranspiration*) est basé sur la formule de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) donnée par l'équation 29.

Soit  $I$ , un indice de chaleur définit comme suit :

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T_{avg_i}}{5} \right)^{1,514} \quad (27)$$

avec  $T_{avg_i}$ , la température moyenne du mois  $i$ .

Définissons maintenant le paramètre  $\alpha$  intégrant l'indice de chaleur  $I$  tel que :

$$\alpha = (6,75 \times 10^{-7})I^3 - (7,71 \times 10^{-5})I^2 + (1,79 \times 10^{-2})I + 0,49239 \quad (28)$$

Le potentiel d'évapotranspiration annuel s'obtient de la manière suivante :

$$Bio25 = \sum_{i=1}^{12} 16 \times \left( \frac{10 T_{avg_i}}{I} \right)^\alpha \quad (29)$$

**Signification :** Cet indice représente la demande en eau théorique (en conditions de disponibilité en eau non limitante), combinant l'évaporation du sol et du couvert végétal et la transpiration de la végétation

### 2.3.21 Bilan hydrique annuel (Bio26)

La bilan hydrique annuel (*annual water balance*) est défini comme suit :

$$Bio26 = Bio12 - Bio25 \quad (30)$$

avec  $Bio12$ , les précipitations annuelles totales (telles que définies par l'équation 17) et  $Bio25$ , le potentiel d'évapotranspiration annuel défini par l'équation 29.

**Signification :** Cet indice représente la quantité de pluie disponible pour les espèces, une fois les besoins en évaporation et en transpiration satisfaits.

### 2.3.22 Indice d'humidité annuel (Bio27)

L'indice d'humidité annuel (*annual moisture index*) est donné par l'équation suivante :

$$Bio27 = \frac{Bio20}{Bio12} \quad (31)$$

avec  $Bio20$ , le nombre de degrés-jours de croissance annuel et  $Bio12$ , les précipitations annuelles totales (telles que définies par l'équation 17).

**Signification :** Cet indice fournit une approximation de l'humidité disponible sur une base annuelle pour les espèces ce qui peut être utile notamment pour les plantes.

### 2.3.23 Autres variables bioclimatiques

La construction des variables bioclimatiques Bio20 à Bio24 repose sur la méthode développée par Rehfeldt (2006) que nous ne détaillerons pas ici.

- Degrés-jours de croissance annuels (Bio20) : représente l'accumulation de chaleur qui sert à estimer la durée d'un développement biologique ;
- Degrés-jours de gel annuels (Bio21) : représente l'accumulation de chaleur lorsque la température est en dessous de 0°C ;
- Date de dernier gel printanier (Bio22) : représente le dernier jour suivant l'hiver où la température minimale quotidienne est inférieure ou égale à un seuil de température gélive ;
- Date de premier gel automnal (Bio23) : représente le premier jour de l'automne où la température minimale quotidienne est inférieure ou égale à un seuil de température gélive ;
- Longueur de la période sans gel (Bio24) : représente le nombre de jours entre le dernier gel printanier et le premier gel automnal selon un seuil de température gélive.

### 3 Synthèse climatique du territoire étudié

Dans cette troisième partie, nous proposons des synthèses climatiques pour les deux régions considérées dans cette étude. Des statistiques synthétiques (moyenne, écart-type, minimum et maximum) ont été calculées sur l'ensemble des cellules formant chacune des deux régions pour 1) les tendances climatiques historiques entre 1981 et 2010, et 2) le climat moyen pour la période de référence.

#### 3.1 Tendances climatiques entre 1981 et 2010

Ici, nous nous proposons d'étudier les tendances climatiques historiques pour chaque variable bioclimatique entre les années 1981 et 2010. Une régression linéaire a été ajustée pour chaque cellule de la grille et pour chaque variable ( $n = 30$ ) et la pente a été extraite.

Les résultats de l'ensemble des régressions linéaires ont été agrégés pour chaque aire d'étude, et les résultats synthétiques sont présentés au Tableau 2 pour le nord du Québec et du Labrador. Notons que les résultats sont exprimés par décennie. Par ex., la température annuelle moyenne (Bio01) a augmenté de  $0,95^{\circ}\text{C} \pm 0,19\text{SD}$  par décennie sur l'ensemble du nord du Québec et du Labrador entre 1981 et 2010.

TABLE 2 – Tendances climatiques historiques pour le nord du Québec et du Labrador entre 1981 et 2010

Variable	Unités	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Bio01	$^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$	0,95	0,19	0,35	1,46
Bio02	$^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$	-0,36	0,10	-0,68	0,37
Bio03	1/décennie	-0,29	0,23	-0,86	1,52
Bio04	$^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$	-39,86	12,40	-82,38	-0,97
Bio05	$^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$	0,42	0,18	-0,28	1,11
Bio06	$^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$	1,77	0,29	0,53	3,43
Bio07	$^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$	-1,35	0,35	-3,26	-0,18
Bio08	$^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$	0,68	0,91	-3,31	3,60
Bio09	$^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$	1,36	1,24	-3,15	7,16
Bio10	$^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$	0,45	0,08	0,09	1,36
Bio11	$^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$	1,37	0,26	0,43	2,28
Bio12	mm/décennie	36,35	16,31	-7,57	90,78
Bio13	mm/décennie	6,16	5,07	-7,96	25,60
Bio14	mm/décennie	0,85	1,48	-4,08	6,45
Bio15	1/décennie	0,35	1,44	-3,30	3,98
Bio16	mm/décennie	15,15	8,95	-10,39	41,41
Bio17	mm/décennie	2,98	5,26	-11,99	20,22
Bio18	mm/décennie	13,99	13,55	-30,59	47,17
Bio19	mm/décennie	4,60	8,57	-11,43	47,38
Bio20	$^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$	63,71	14,84	14,95	153,52
Bio21	$^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$	-250,50	68,66	-413,25	-62,38
Bio22	Jours Julien/décennie	-6,44	1,74	-11,36	1,84
Bio23	Jours Julien/décennie	2,29	1,82	-2,04	16,63
Bio24	Nombre de jours/décennie	8,74	1,72	0,90	21,57
Bio25	mm/décennie	10,74	3,19	-0,46	22,01
Bio26	mm/décennie	25,61	15,81	-15,95	84,33
Bio27	$^{\circ}\text{C}/\text{mm}/\text{décennie}$	0,04	0,01	-0,02	0,10

La même synthèse a été réalisée pour l'écorégion toundrique arctique du Nunavik (Tableau 3). La température annuelle moyenne (Bio01) a augmenté de manière plus importante ( $1,18^{\circ}\text{C} \pm 0,07\text{SD}$  par décennie) et la date de dernier jour printanier (Bio22) a reculé en moyenne de 5,34 jours Julien par décennie entre 1981 et 2010.

TABLE 3 – Tendances climatiques historiques pour la toundra arctique du Nunavik entre 1981 et 2010

Variable	Unités	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Bio01	°C/décennie	1,18	0,07	0,89	1,46
Bio02	°C/décennie	-0,42	0,04	-0,60	-0,23
Bio03	1/décennie	-0,51	0,10	-0,86	-0,08
Bio04	°C/décennie	-55,47	4,33	-82,38	-34,94
Bio05	°C/décennie	0,56	0,11	-0,08	1,08
Bio06	°C/décennie	1,86	0,21	1,22	2,78
Bio07	°C/décennie	-1,30	0,17	-2,07	-0,56
Bio08	°C/décennie	0,99	0,64	-1,34	2,98
Bio09	°C/décennie	1,52	0,46	0,04	3,60
Bio10	°C/décennie	0,48	0,10	0,09	0,93
Bio11	°C/décennie	1,61	0,12	1,21	2,28
Bio12	mm/décennie	26,05	12,39	3,60	79,67
Bio13	mm/décennie	5,23	2,62	-0,30	12,50
Bio14	mm/décennie	0,17	0,81	-1,65	2,34
Bio15	1/décennie	0,48	1,29	-2,58	3,09
Bio16	mm/décennie	13,22	5,41	1,50	34,20
Bio17	mm/décennie	1,71	2,88	-2,54	12,57
Bio18	mm/décennie	15,21	9,19	-4,29	40,92
Bio19	mm/décennie	-0,34	3,70	-7,37	13,61
Bio20	°C/décennie	47,10	9,46	14,95	75,70
Bio21	°C/décennie	-349,62	18,94	-413,25	-258,93
Bio22	Jours Julien/décennie	-5,34	1,64	-10,57	1,30
Bio23	Jours Julien/décennie	3,86	1,90	0,54	11,41
Bio24	Nombre de jours/décennie	9,19	2,51	0,92	19,80
Bio25	mm/décennie	7,94	4,40	-0,46	16,84
Bio26	mm/décennie	18,11	10,24	-2,75	65,87
Bio27	°C/mm/décennie	0,05	0,01	0,00	0,09

Comme le montrent les Tableaux 2 et 3, des disparités locales existent puisque les écarts entre valeurs minimales et maximales (et les valeurs d'écart-type) peuvent être assez importantes. La section 4 présente les patrons spatiaux dans les tendances climatiques historiques pour chacune des 27 variables bioclimatiques.

### 3.2 Portrait climatique pour la période 1981-2010

Cette section présente le climat moyen (normales climatiques) du nord du Québec et du Labrador pour la période 1981-2010 (période de référence). Les valeurs annuelles des variables bioclimatiques ont été moyennées sur la période de référence (moyenne de 30 valeurs). Les résultats synthétiques pour le nord du Québec et du Labrador sont présentés au Tableau 4.

TABLE 4 – Portrait climatique de la région du nord du Québec et du Labrador pour 1981-2010

Variable	Unités	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Bio01	°C	-3,60	2,40	-9,94	3,07
Bio02	°C	7,78	0,80	3,45	9,74
Bio03	-	17,44	1,69	11,54	28,82
Bio04	°C	1251,27	119,29	670,34	1421,69
Bio05	°C	17,35	2,16	6,46	23,15
Bio06	°C	-27,48	3,76	-34,70	-11,13
Bio07	°C	44,83	3,86	24,58	49,62
Bio08	°C	5,26	2,31	-4,04	10,27
Bio09	°C	-16,79	5,97	-26,56	6,71
Bio10	°C	11,02	1,91	4,16	15,73
Bio11	°C	-19,51	3,54	-27,29	-6,66
Bio12	mm	1077,02	199,85	545,62	1596,38
Bio13	mm	162,83	22,90	89,22	216,55
Bio14	mm	35,73	11,09	13,32	67,44
Bio15	-	43,66	6,14	30,31	58,49
Bio16	mm	392,61	58,24	212,89	532,37
Bio17	mm	155,47	47,60	58,17	293,49
Bio18	mm	324,93	50,42	176,17	462,00
Bio19	mm	171,65	59,42	62,85	357,73
Bio20	°C	672,13	232,52	105,10	1344,52
Bio21	°C	2794,37	596,66	986,06	4424,60
Bio22	Jours Julien	160,07	8,38	133,19	190,77
Bio23	Jours Julien	259,69	8,90	226,49	302,47
Bio24	Nombre de jours	99,62	16,52	37,13	163,10
Bio25	mm	310,29	34,58	231,15	398,93
Bio26	mm	766,73	175,45	287,78	1282,15
Bio27	°C/mm	0,62	0,16	0,12	1,22

La même synthèse a été réalisée pour l'écorégion toundrique arctique du Nunavik (Tableau 5).

Même si les valeurs présentées dans les tableaux 4 et 5 permettent d'avoir une bonne idée du climat moyen dans ces deux régions, des disparités locales peuvent exister. Ainsi, la section 4 illustre les valeurs de chaque variable bioclimatique sur l'ensemble du territoire pour la période 1981-2010 (période de référence).

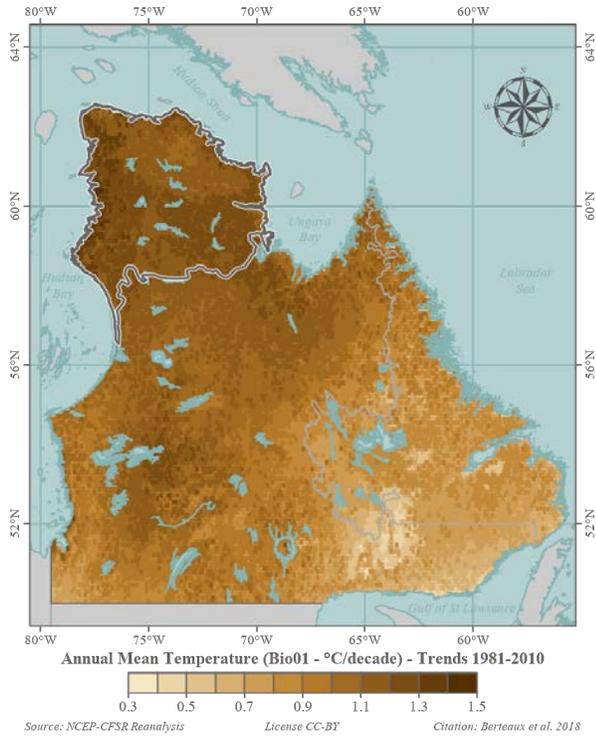
TABLE 5 – Portrait climatique de la toundra arctique du Nunavik pour 1981-2010

Variable	Unités	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Bio01	°C	-7,00	1,05	-9,94	-4,42
Bio02	°C	6,97	0,70	3,45	8,69
Bio03	-	15,12	0,82	11,54	19,66
Bio04	°C	1332,30	78,25	883,15	1421,69
Bio05	°C	15,16	1,81	6,89	18,29
Bio06	°C	-30,96	1,65	-34,70	-22,24
Bio07	°C	46,13	3,08	29,14	49,62
Bio08	°C	3,86	1,14	0,14	6,20
Bio09	°C	-22,57	1,78	-26,56	-14,84
Bio10	°C	8,65	1,14	4,38	11,27
Bio11	°C	-23,88	1,44	-27,29	-17,26
Bio12	mm	717,52	59,77	545,62	997,10
Bio13	mm	123,13	10,19	89,22	169,96
Bio14	mm	18,28	2,58	13,32	31,34
Bio15	-	53,44	3,18	42,61	58,49
Bio16	mm	290,40	23,55	212,89	400,17
Bio17	mm	80,32	10,60	58,17	126,20
Bio18	mm	237,98	19,14	176,17	309,57
Bio19	mm	86,33	11,82	62,85	143,59
Bio20	°C	400,79	96,80	109,30	663,64
Bio21	°C	3628,05	309,80	2593,90	4424,60
Bio22	Jours Julien	168,12	5,00	158,90	189,69
Bio23	Jours Julien	250,17	6,83	230,08	267,43
Bio24	Nombre de jours	82,05	11,31	42,32	103,62
Bio25	mm	264,63	12,64	231,15	303,81
Bio26	mm	452,90	53,92	287,78	706,02
Bio27	°C/mm	0,56	0,12	0,17	0,77

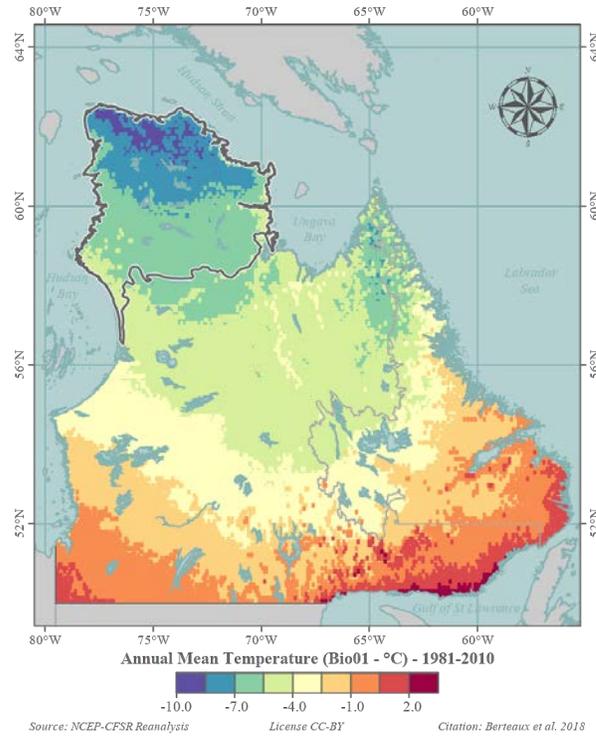
## 4 Atlas bioclimatique

Cette dernière partie se compose d'un atlas bioclimatique dans lequel deux types d'information par variable bioclimatique sont présentés par demi-page. Pour chaque variable, la carte de gauche illustre les tendances climatiques historiques entre 1981 et 2010 et celle de droite montre les valeurs moyennes pour la période de référence. Les variables sont listées selon le même ordre que dans les tableaux précédents.

Une version en haute définition des cartes est disponible à cette adresse : <https://ahasverus.shinyapps.io/bioclimaticatlas/>. À noter que pour des raisons techniques, les cartes comportent parfois des éléments de légende en anglais.

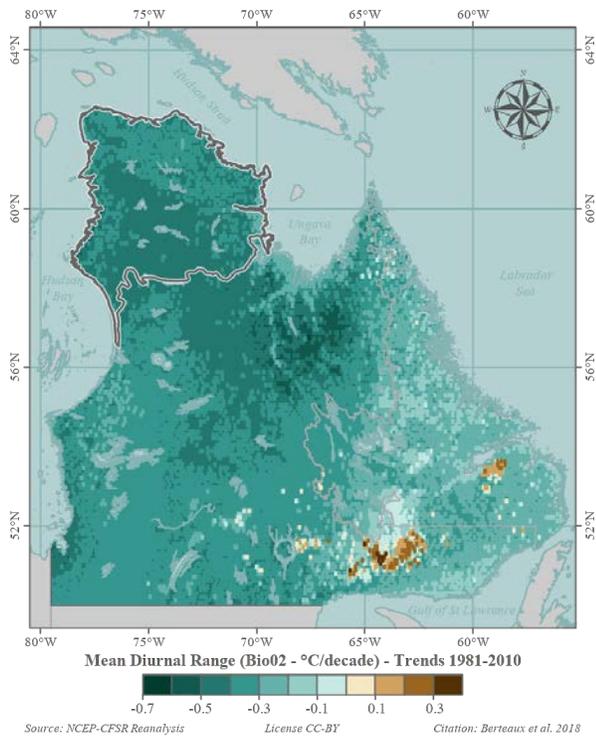


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

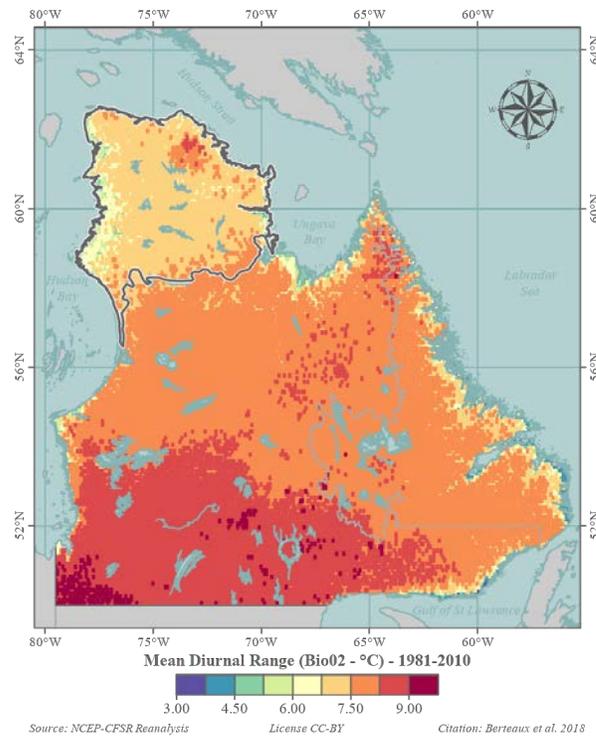


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 3 – Température annuelle moyenne (Bio01)

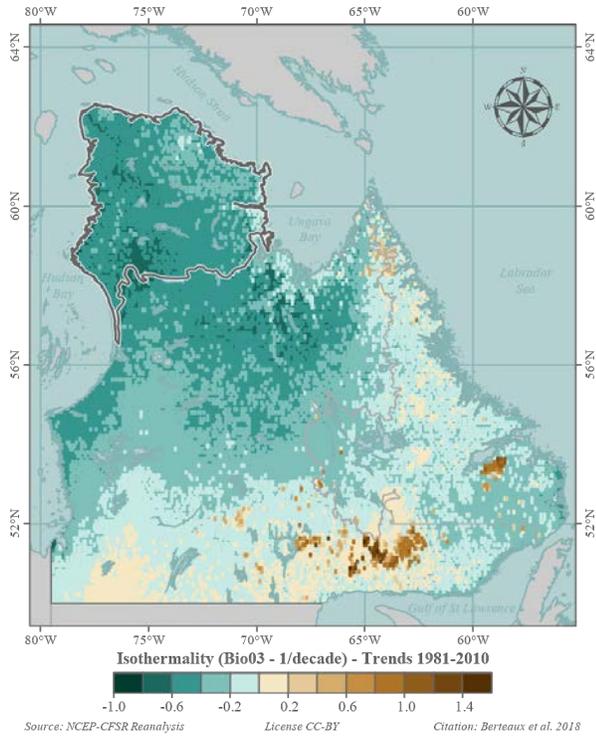


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

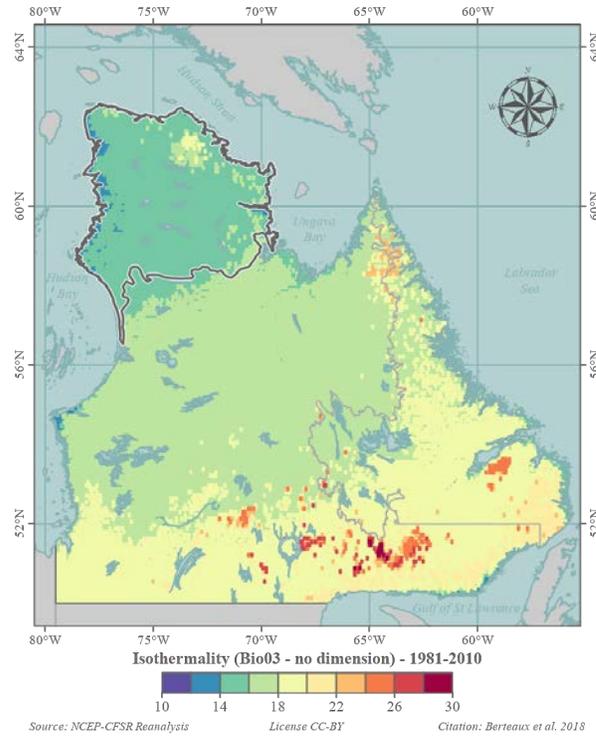


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 4 – Écart diurne moyen des températures (Bio02)

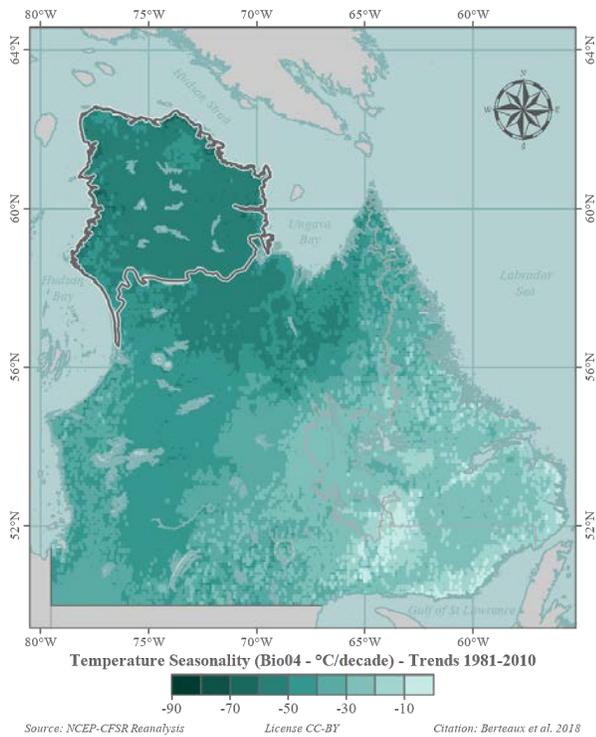


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

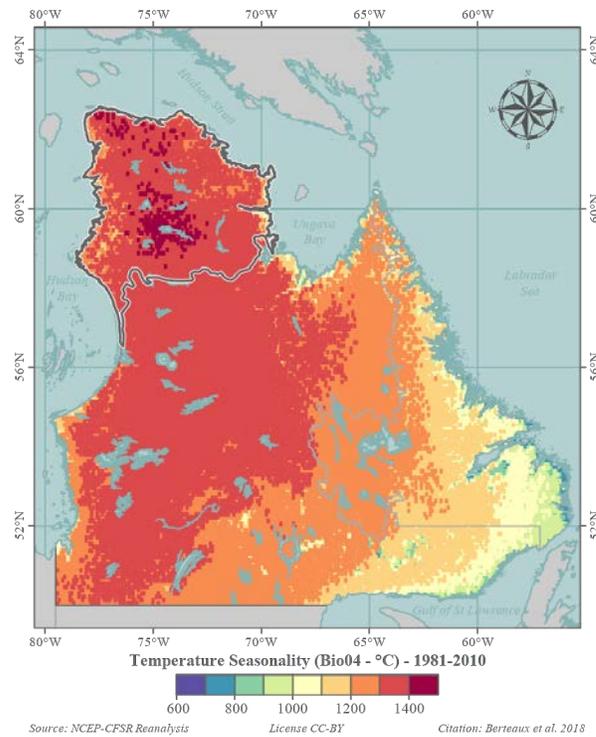


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 5 – Isothermalité (Bio03)

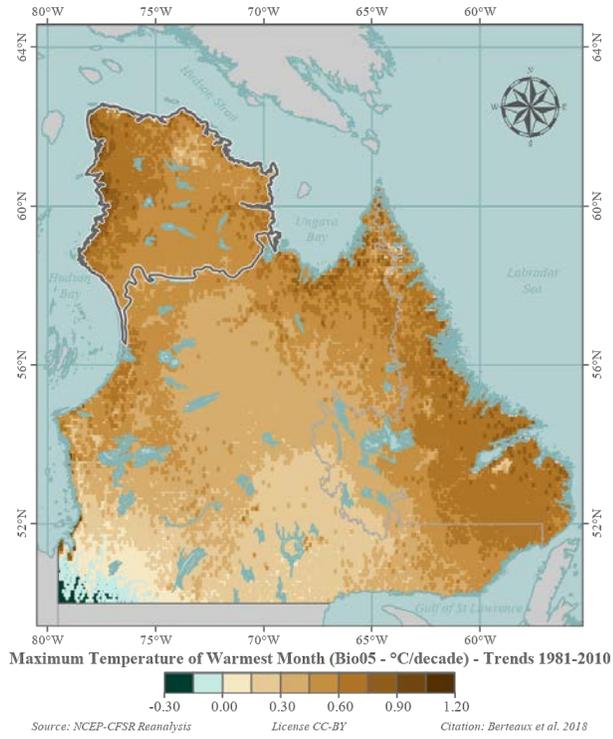


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

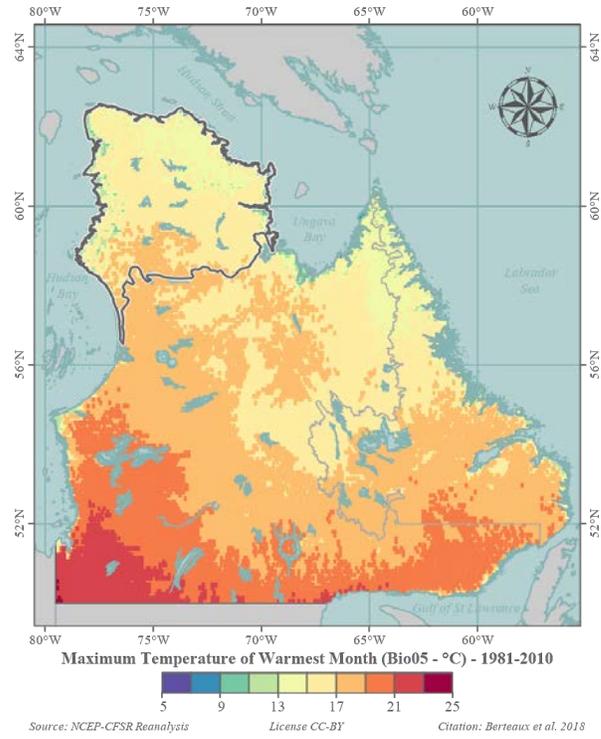


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 6 – Saisonnalité des températures (Bio04)

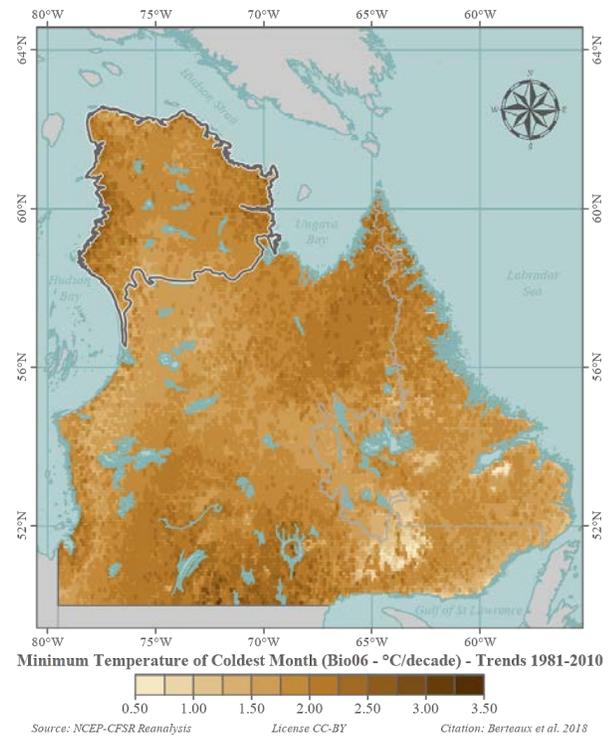


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

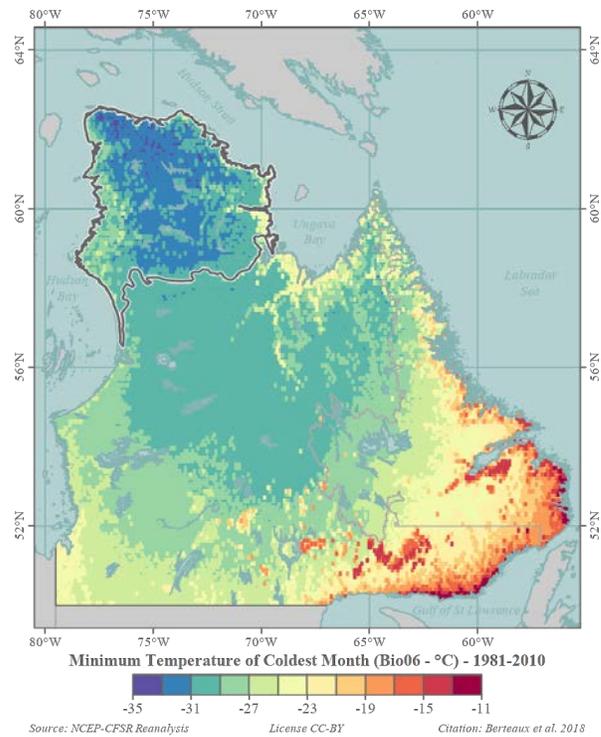


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 7 – Température maximale du mois le plus chaud (Bio05)

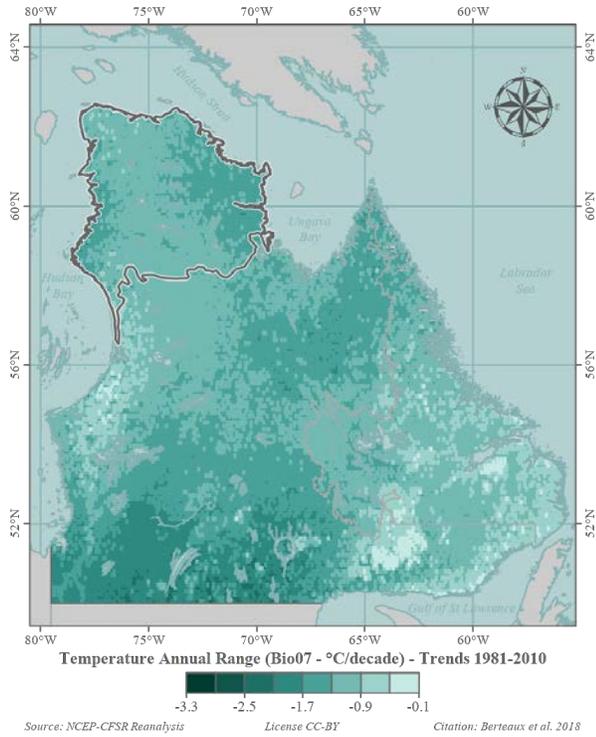


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

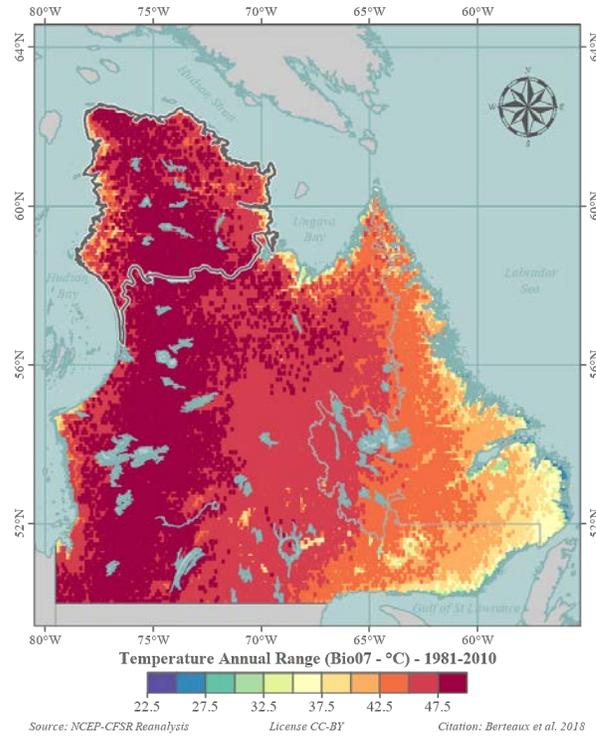


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 8 – Température minimale du mois le plus froid (Bio06)

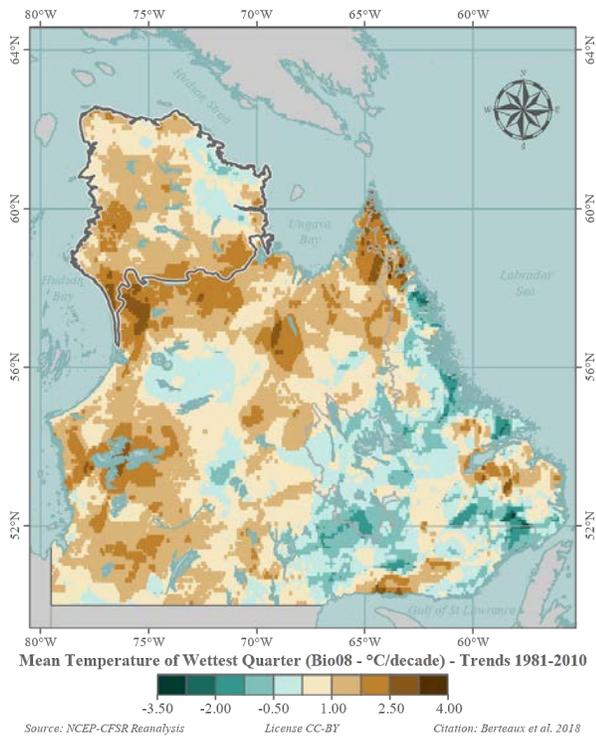


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

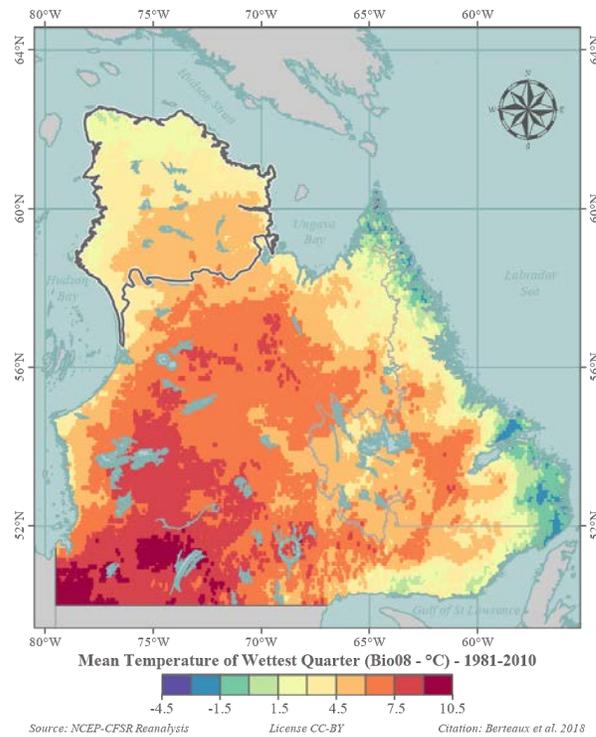


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 9 – Écart annuel des températures (Bio07)

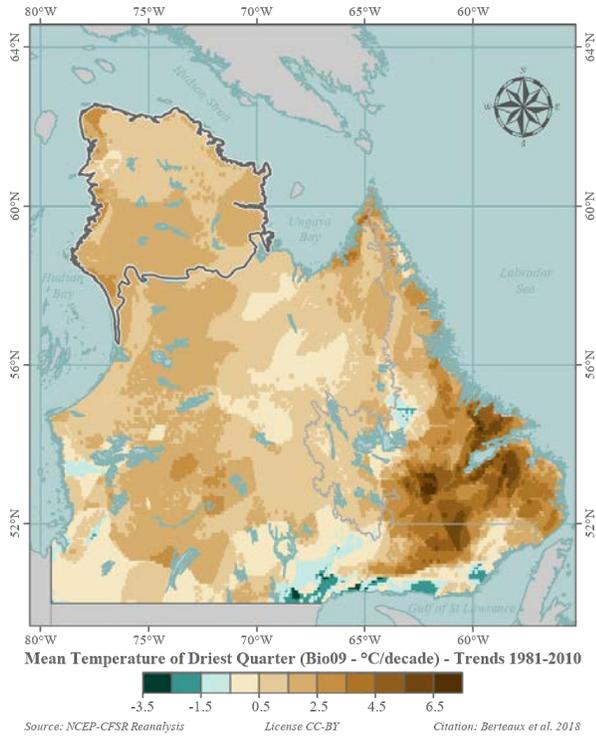


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

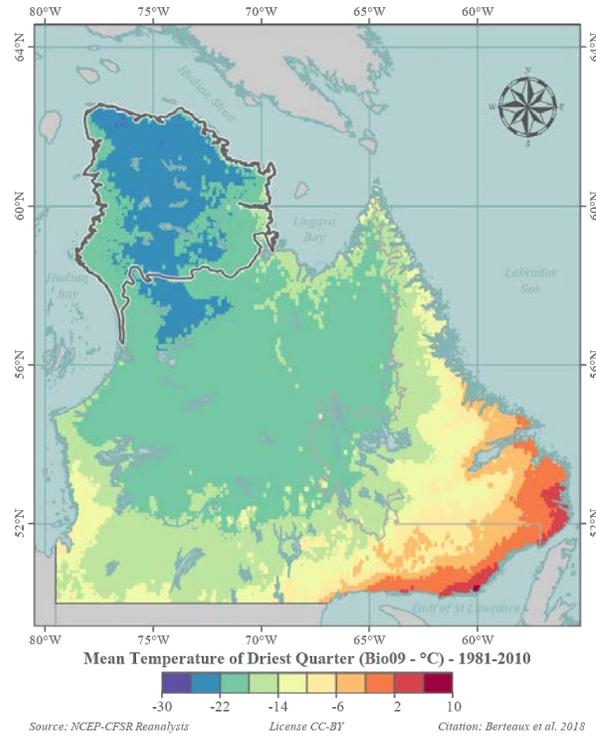


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 10 – Température moyenne du trimestre le plus humide (Bio08)

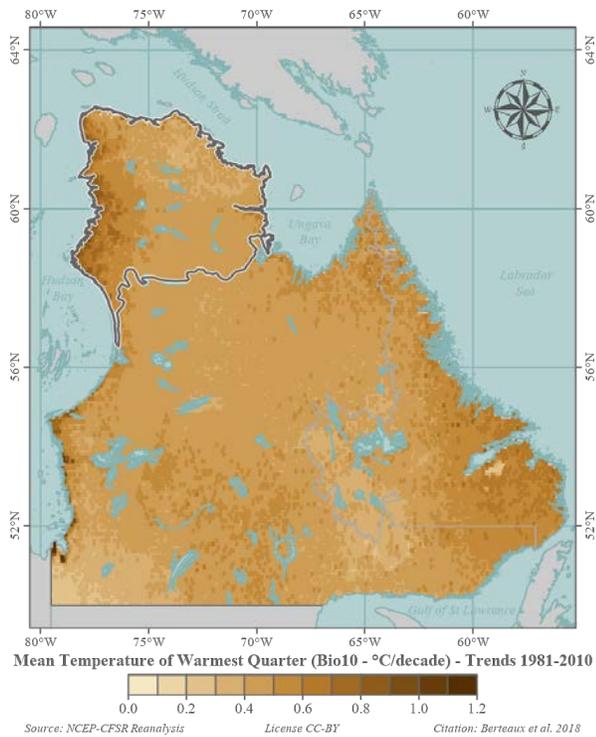


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

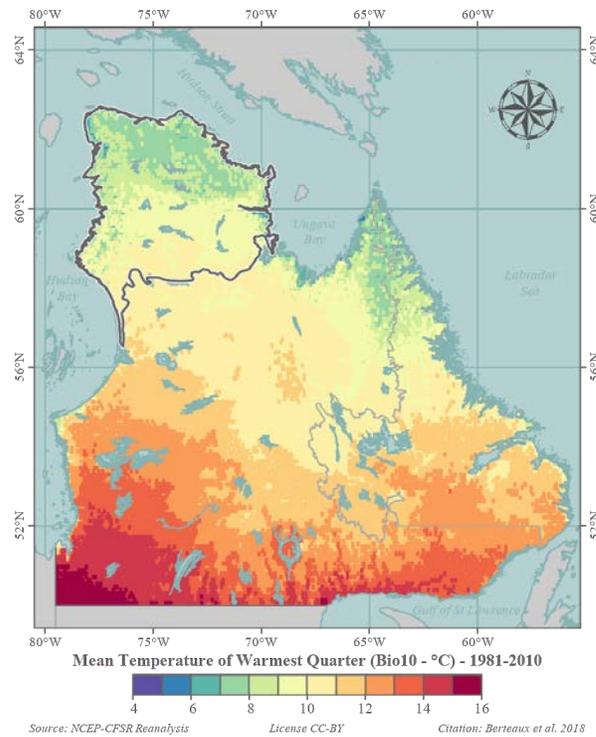


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 11 – Température moyenne du trimestre le plus sec (Bio09)

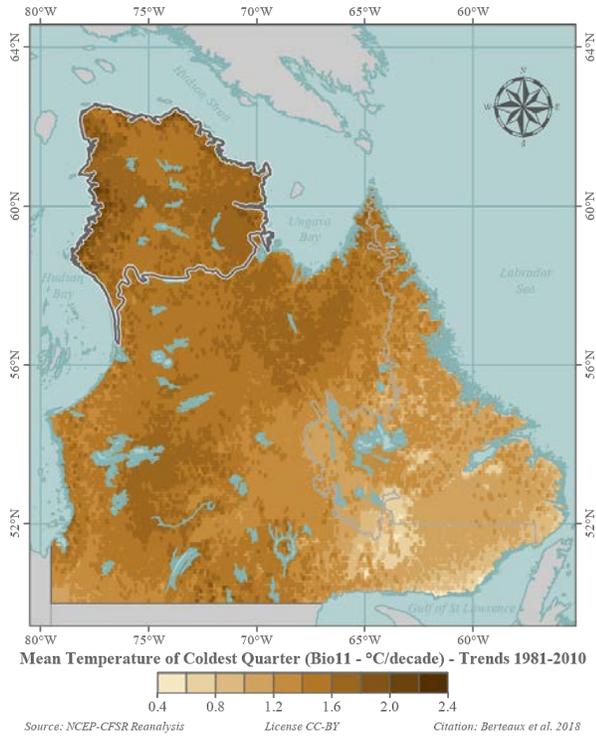


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

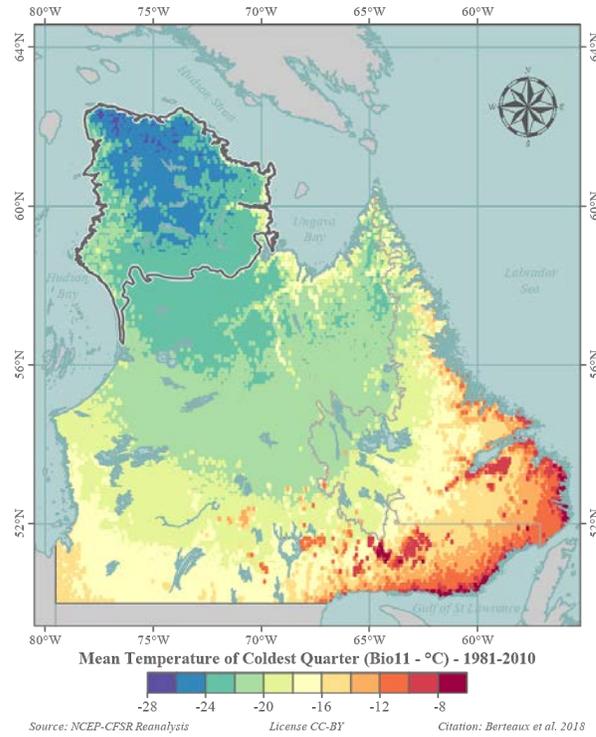


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 12 – Température moyenne du trimestre le plus chaud (Bio10)

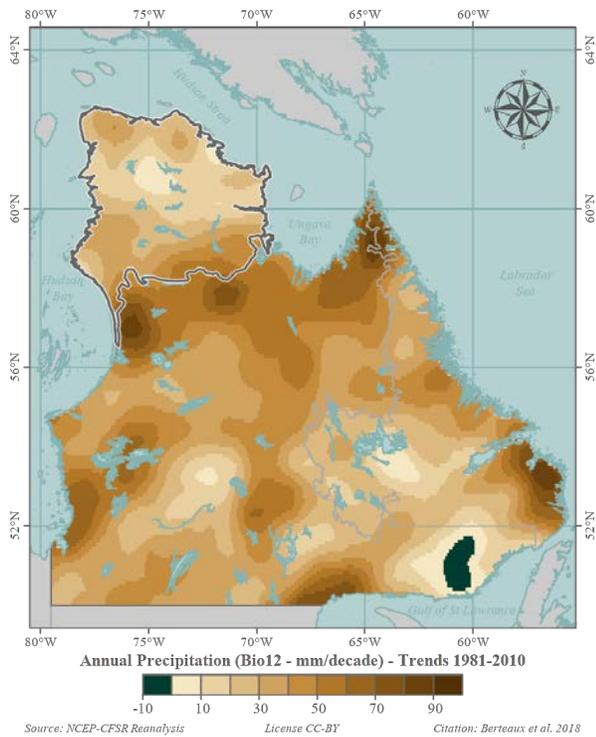


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

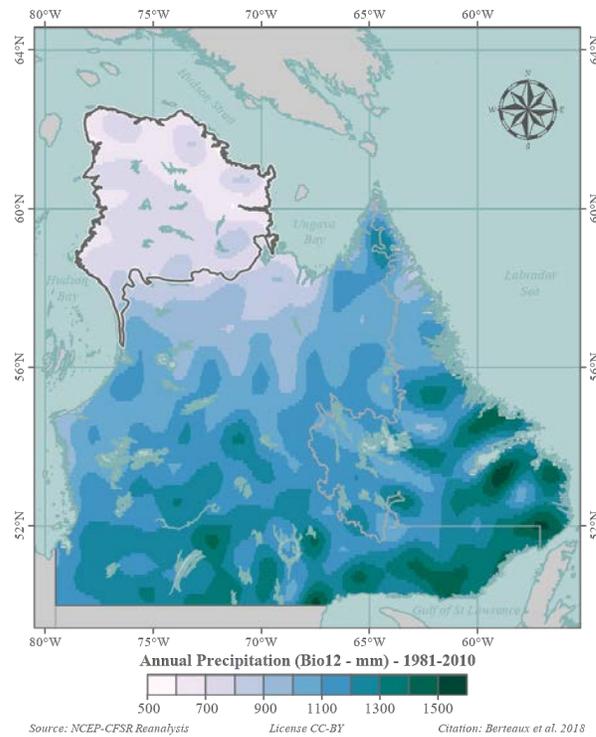


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 13 – Température moyenne du trimestre le plus froid (Bio11)

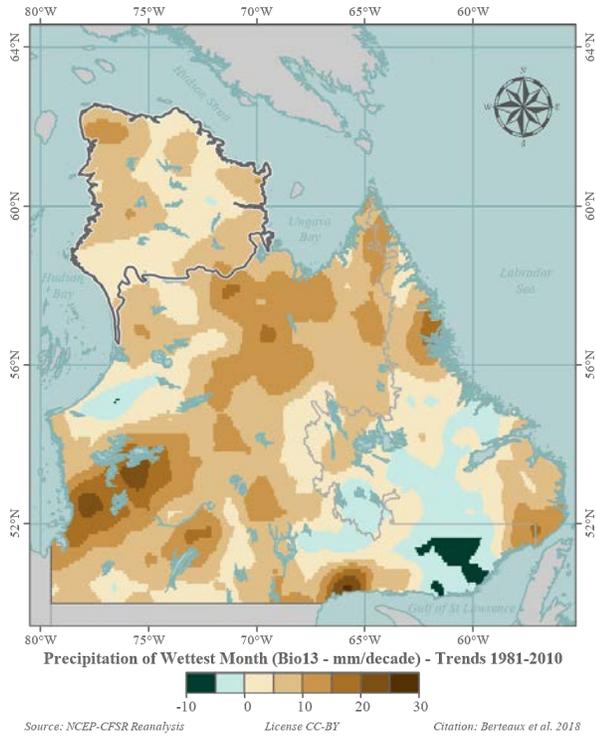


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

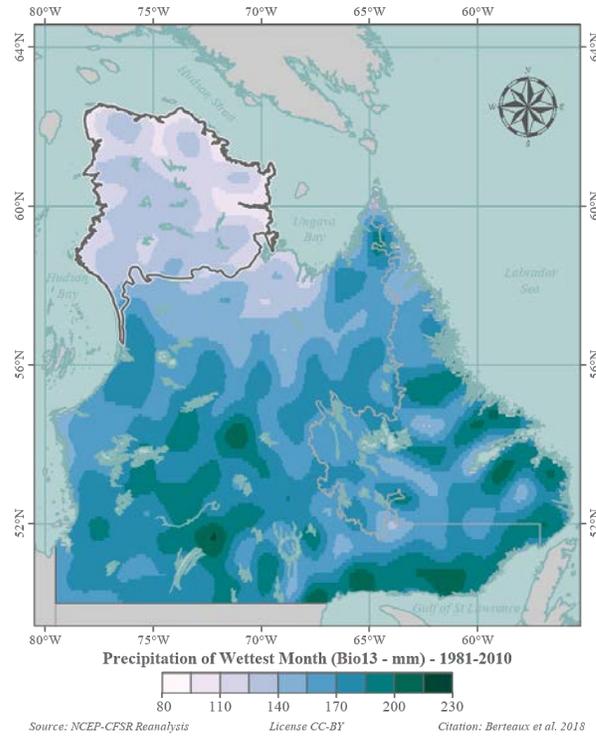


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 14 – Précipitations annuelles totales (Bio12)

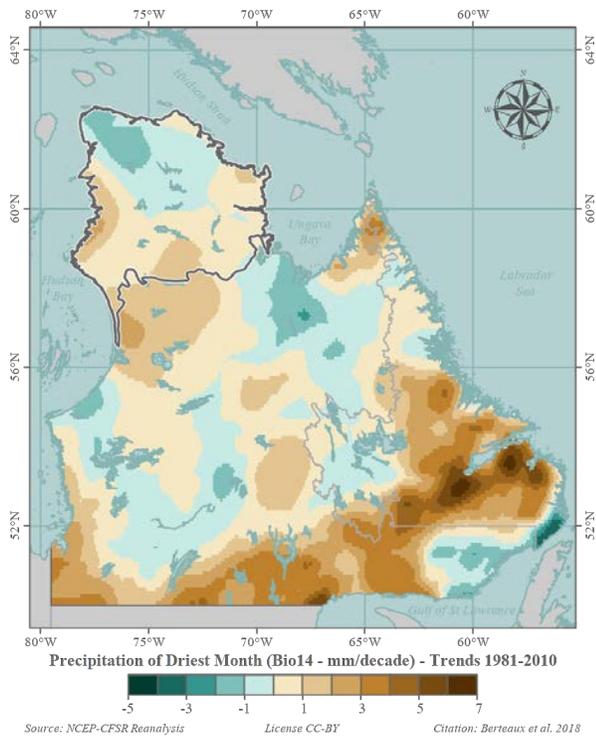


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

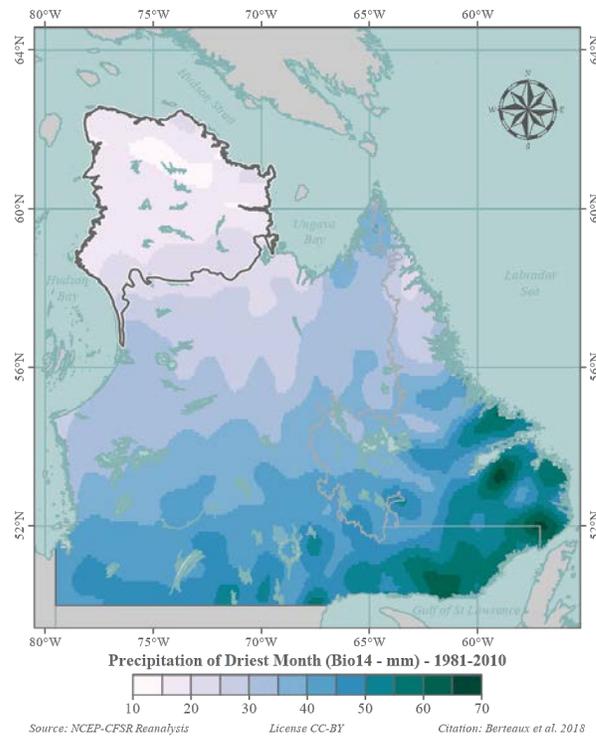


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 15 – Précipitations du mois le plus humide (Bio13)

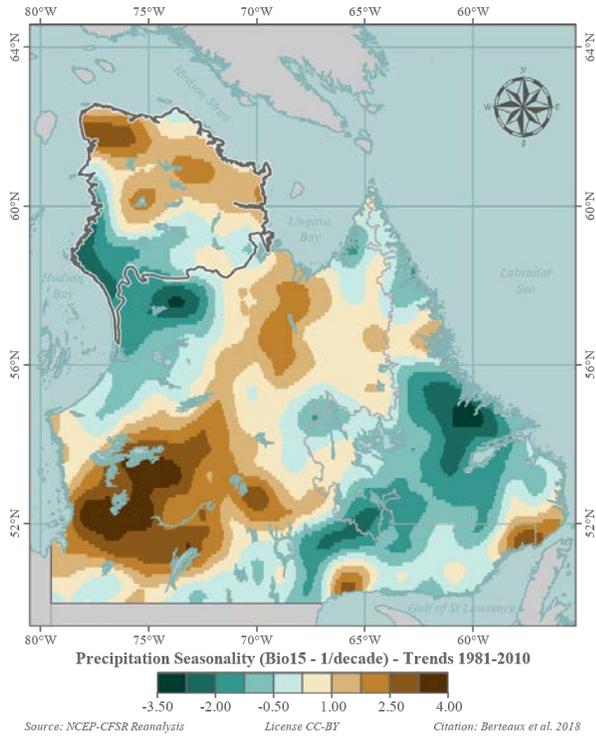


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

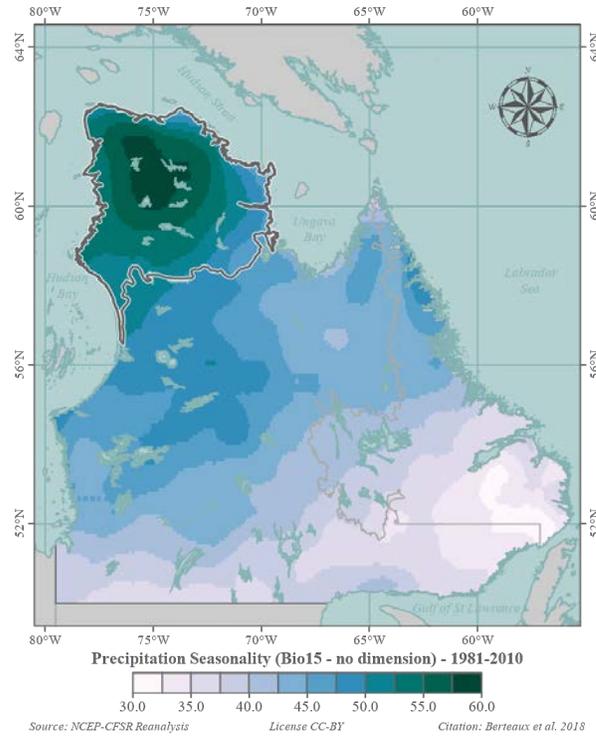


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 16 – Précipitations du mois le plus sec (Bio14)

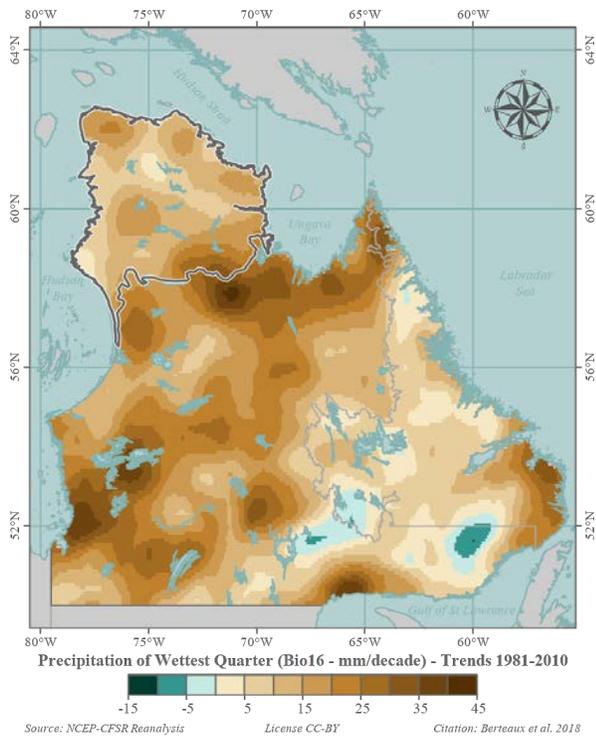


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

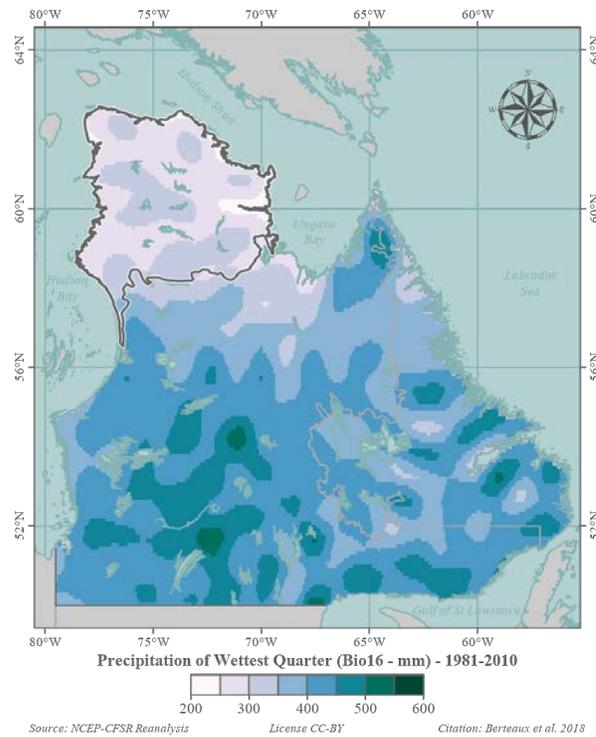


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 17 – Saisonnalité des précipitations (Bio15)

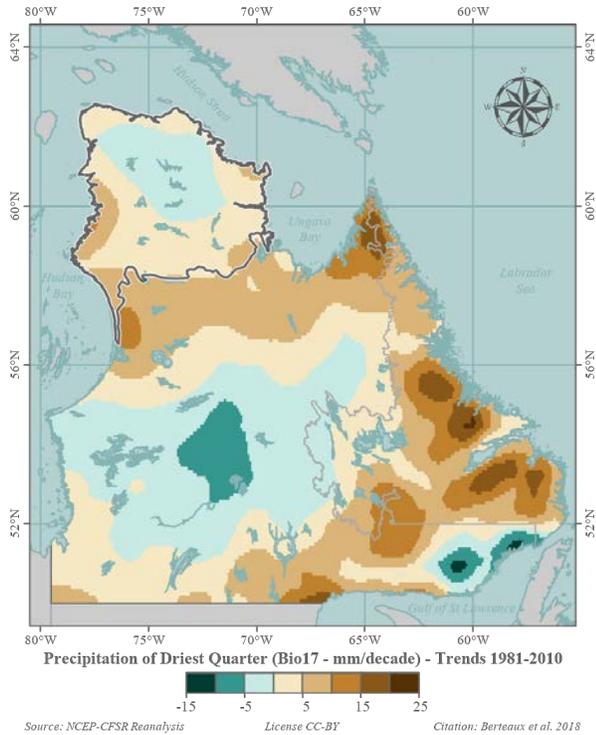


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

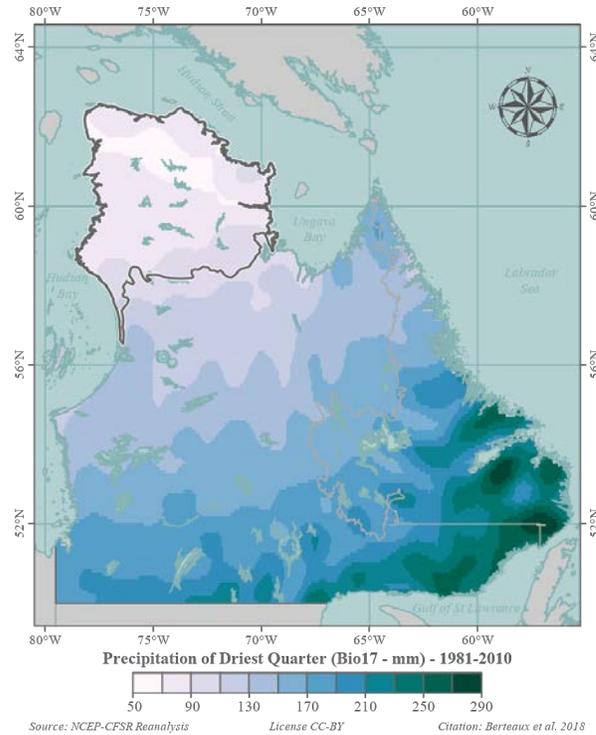


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 18 – Précipitations du trimestre le plus humide (Bio16)

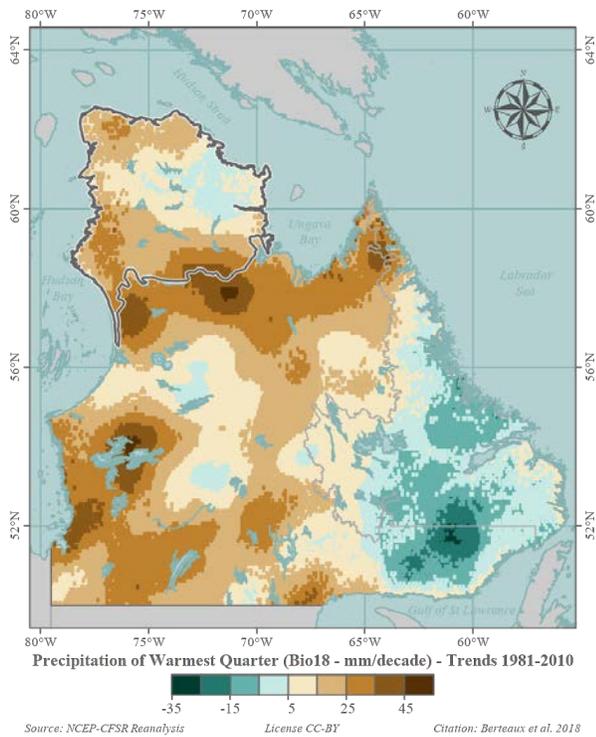


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

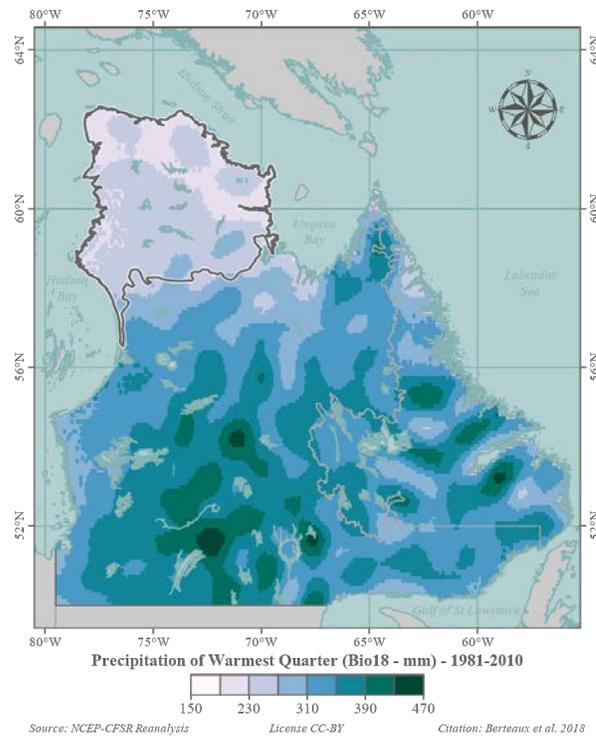


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 19 – Précipitations du trimestre le plus sec (Bio17)

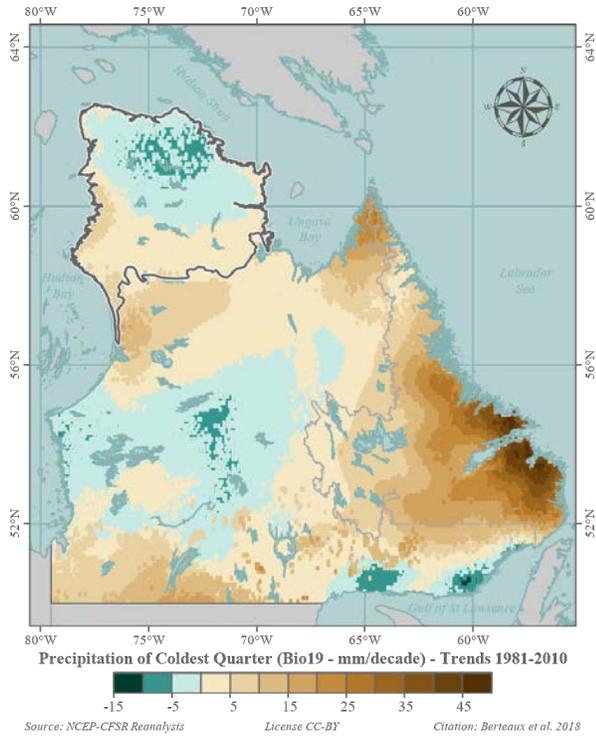


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

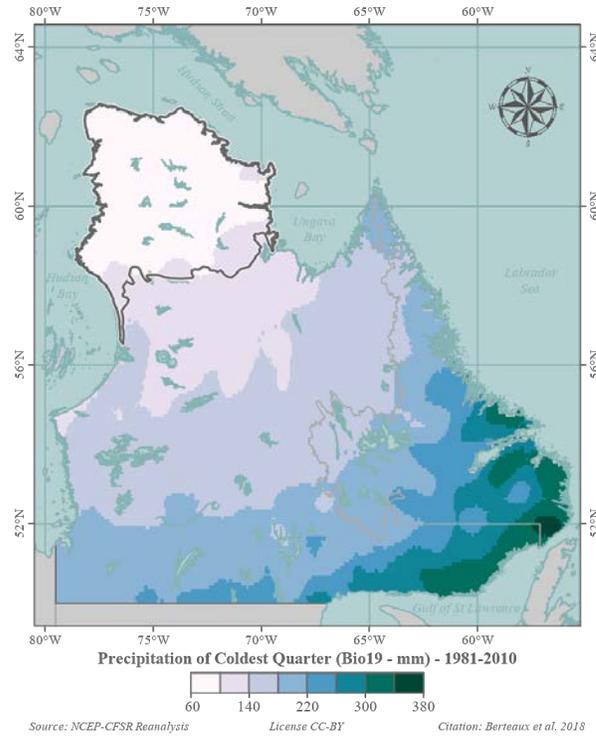


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 20 – Précipitations du trimestre le plus chaud (Bio18)

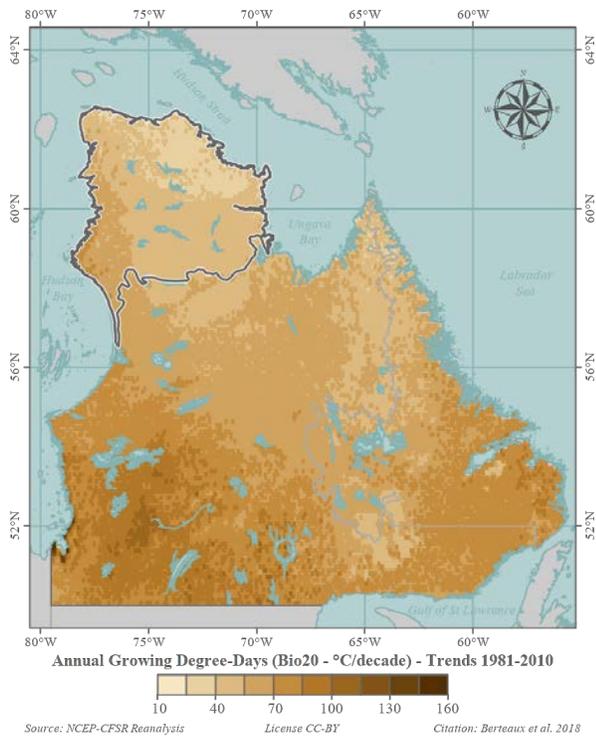


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

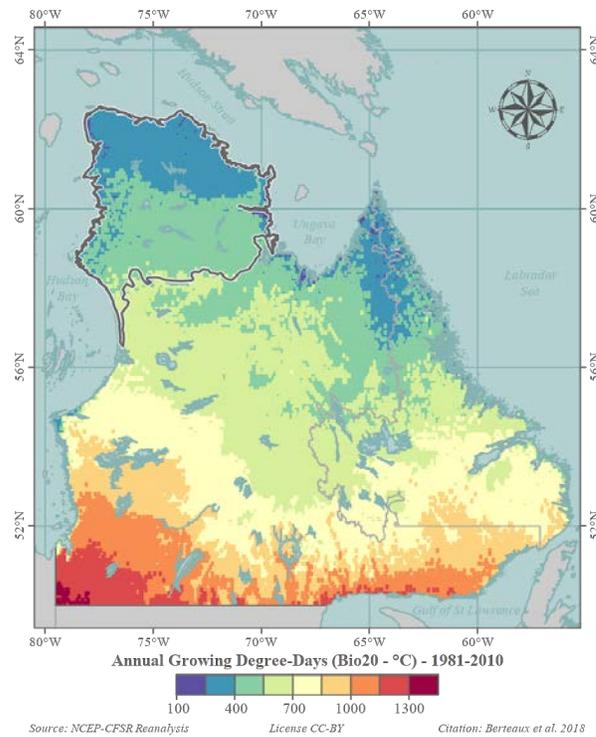


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 21 – Précipitations du trimestre le plus froid (Bio19)

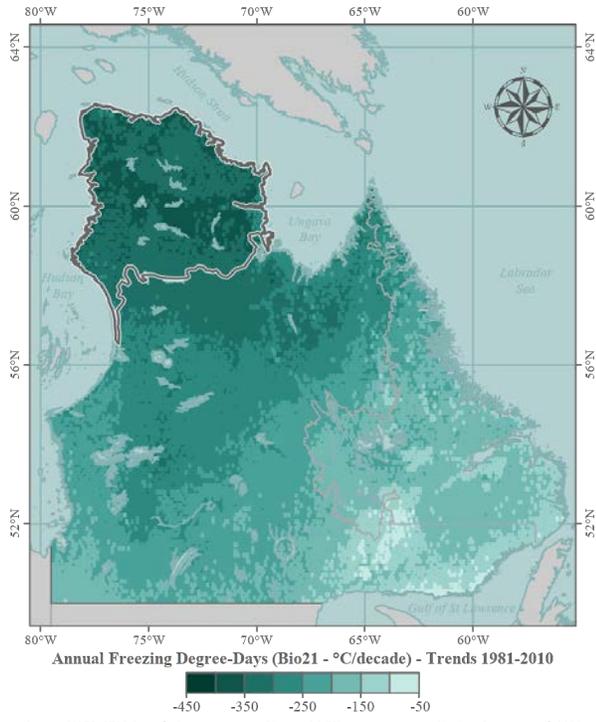


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

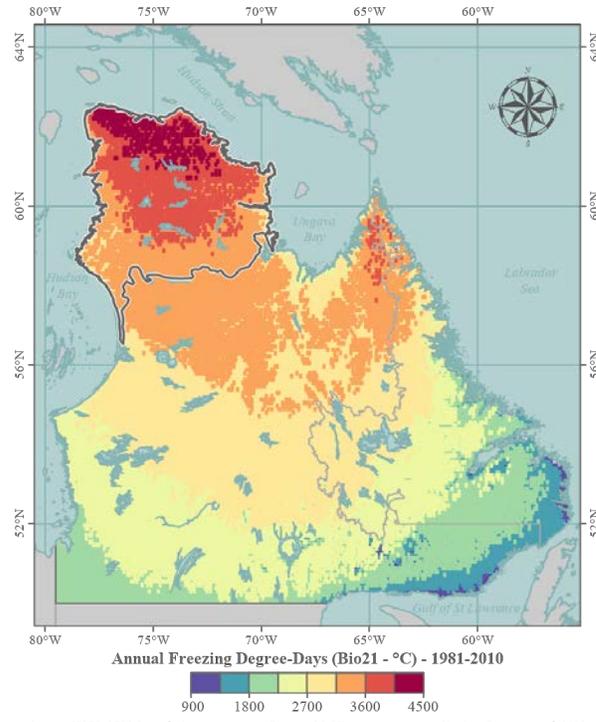


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 22 – Degrés-jours de croissance annuel (Bio20)

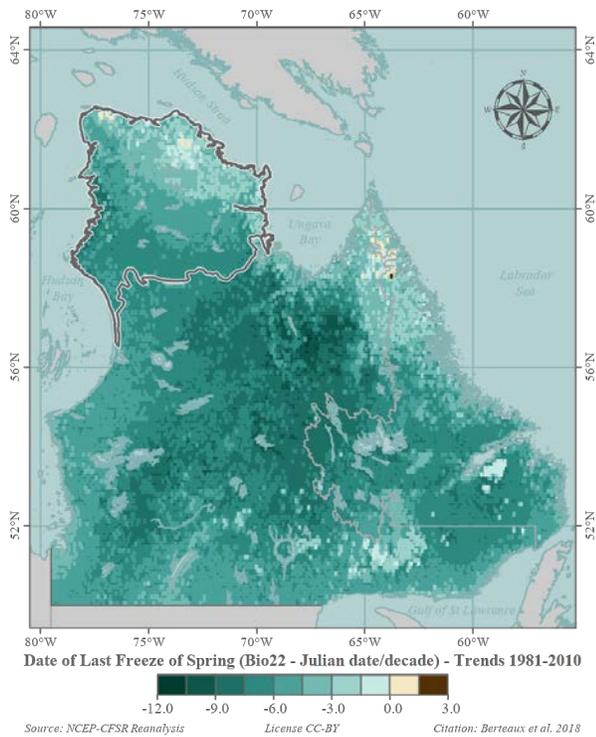


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

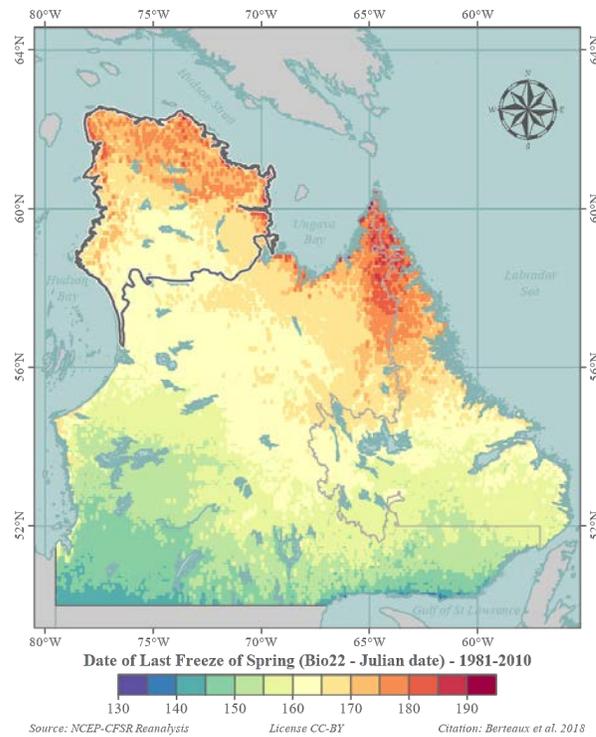


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 23 – Degrés-jours de gel annuel (Bio21)

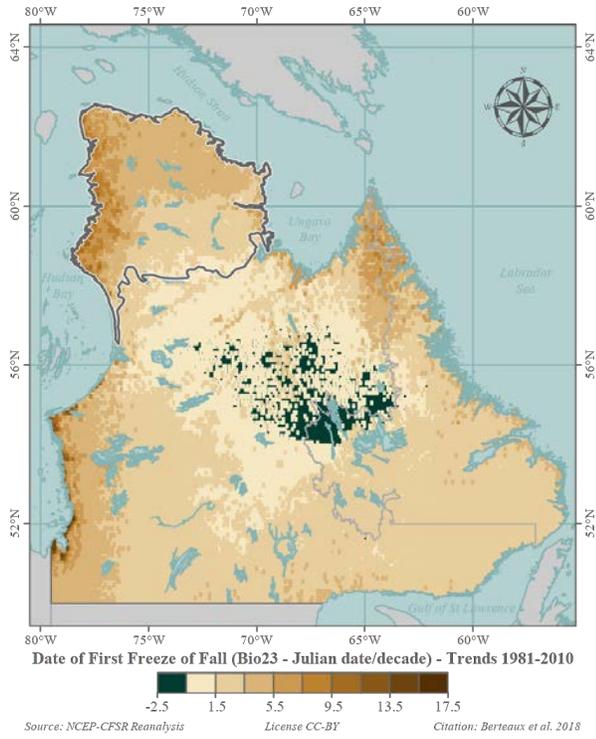


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

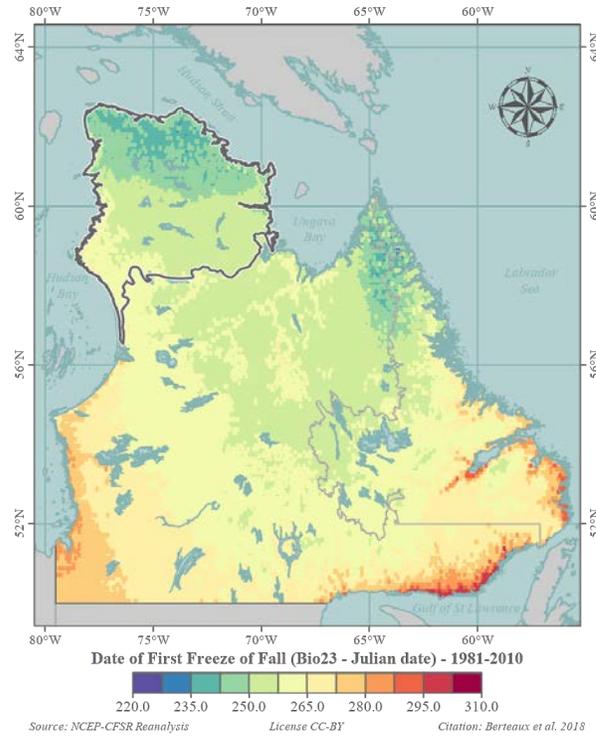


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 24 – Date de dernier gel printanier (Bio22)

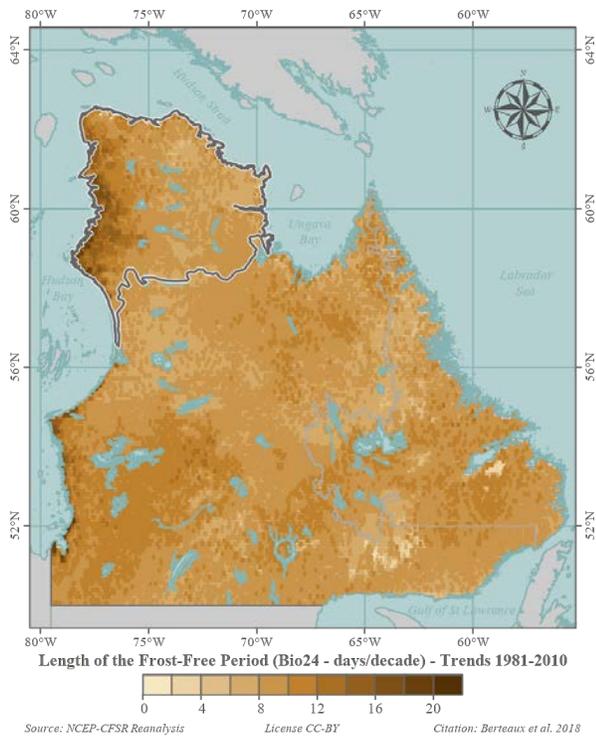


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

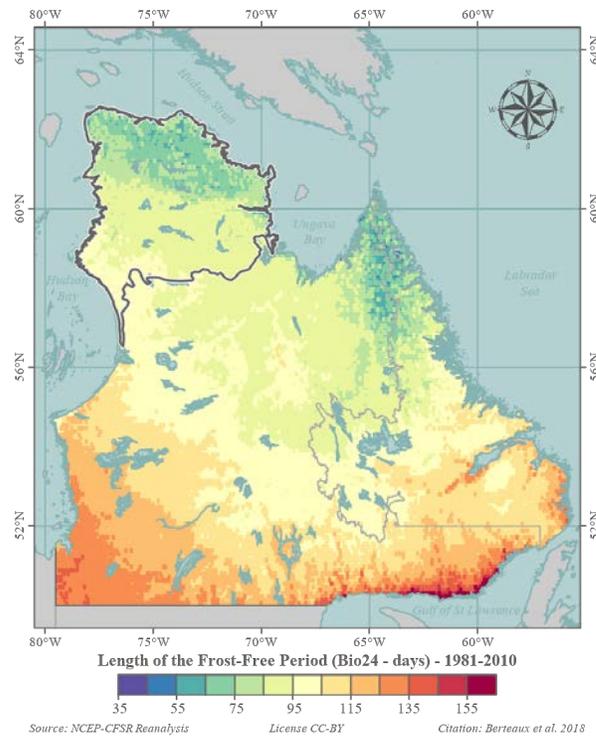


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 25 – Date de premier gel automnal (Bio23)

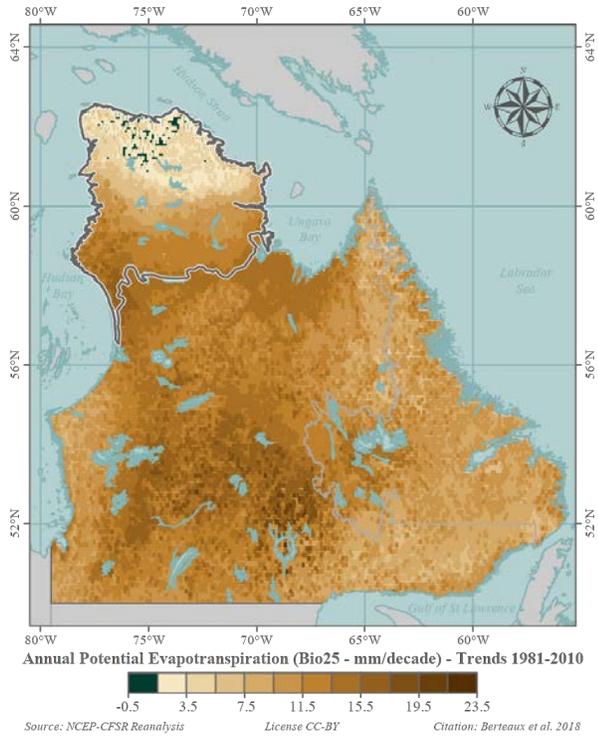


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

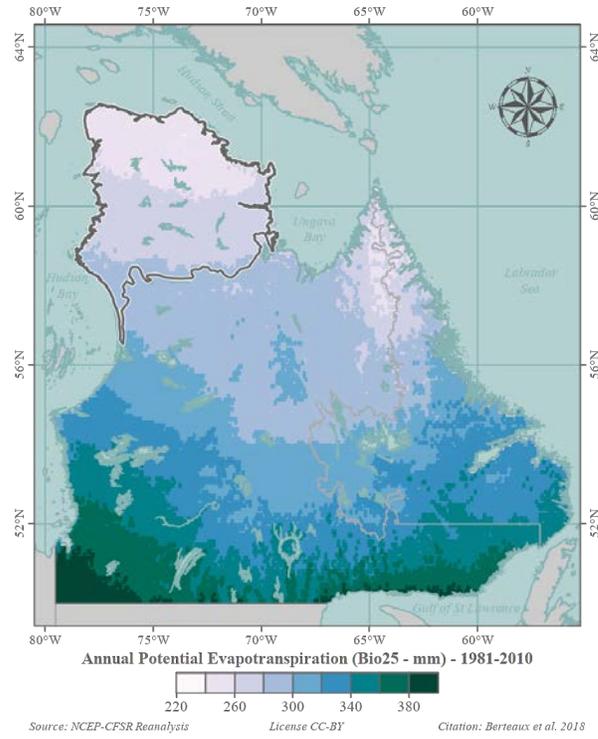


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 26 – Longueur de la période sans gel (Bio24)

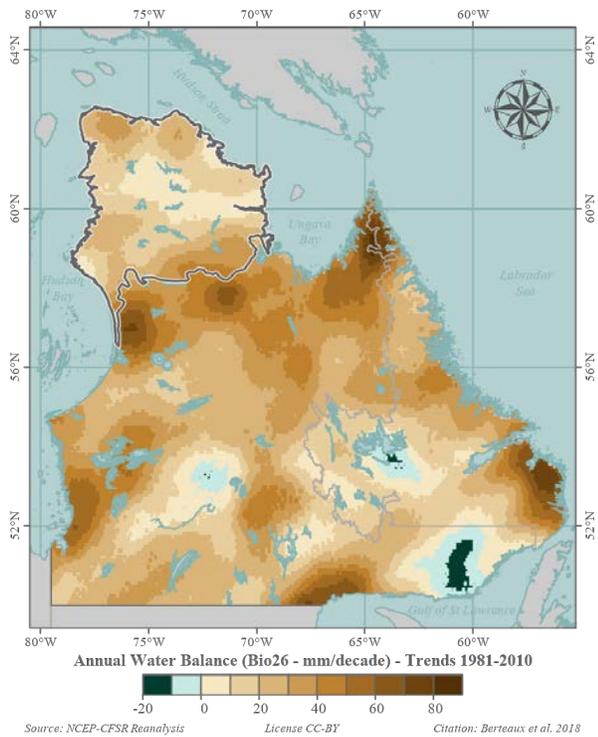


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

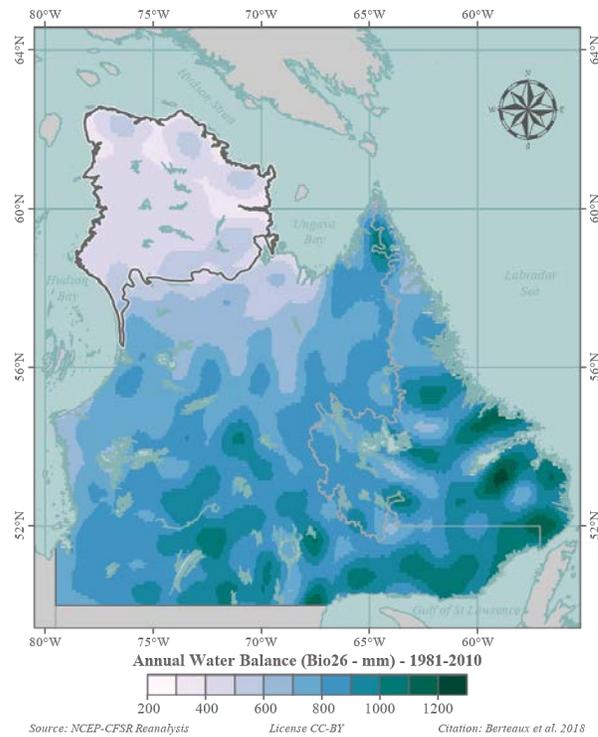


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 27 – Évapotranspiration potentielle annuelle (Bio25)

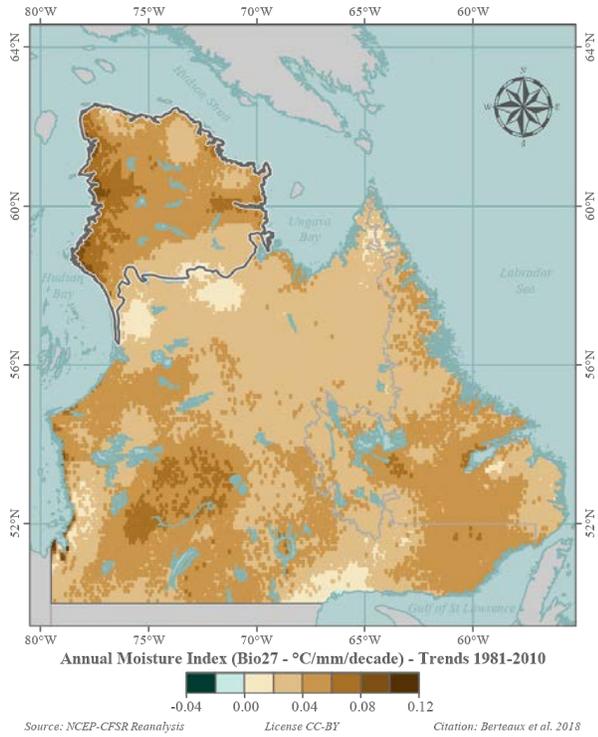


(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010

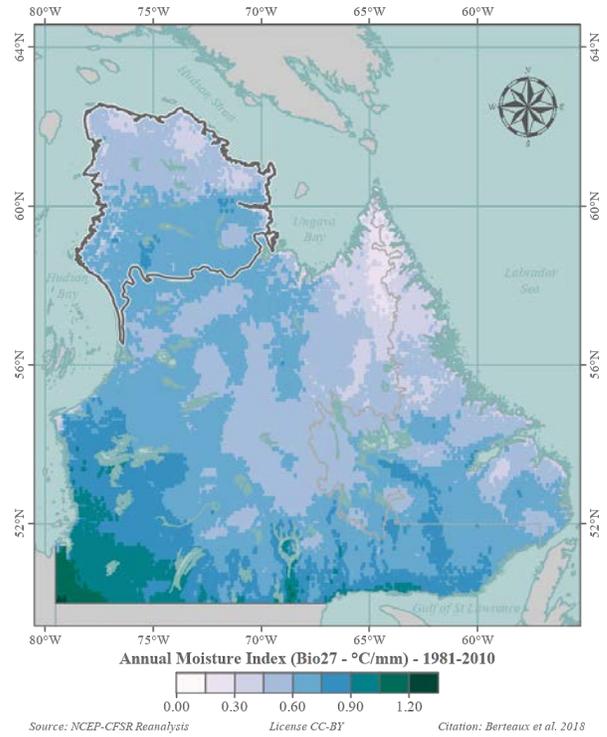


(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 28 – Bilan hydrique annuel (Bio26)



(a) Tendances historiques entre 1981 et 2010



(b) Conditions climatiques pour la période 1981-2010

FIGURE 29 – Indice d'humidité annuel (Bio27)

## Références aux données et métadonnées

**Métadonnées inscrites au Polar Data Catalogue** (<https://www.polardata.ca>)

Berteaux D., N. Casajus and P. Ropars (2018) Tundra Nunavik : Set of 27 gridded climate variables representative of 1981-2010. Waterloo, Canada : Canadian Cryospheric Information Network (CCIN) #12890.

**Données archivées dans la collection Nordicana D** (<http://www.cen.uqar.ca/nordicanad>)

Berteaux D., N. Casajus et P. Ropars (2018) Tundra Nunavik : Set of 27 interpolated bioclimate variables (1981-2010) derived from NCEP CFSR Reanalysis for Labrador and the province of Quebec north of 50°N, v.1.0. Nordicana DXX, sous presse.

## Références bibliographiques

Charron, I. & Chaumont, D. (2015) *Élaboration du portrait climatique régional du Nunavik*, Ouranos, Montréal, Canada.

Rehfeldt, G.E. (2006) *A spline model of climate for the Western United States*, Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.-T., Chuang, H.-Y., Juang, H.-M., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Van Delst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., Van Den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.-K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.-Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R.W., Rutledge, G. & Goldberg, M. (2010) The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **91**, 1015–1057.

Thorntwaite, C.W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, **38**, 55–94.

Xu, T. & Hutchinson, M. (2011) *ANUCLIM Version 6.1 User Guide*, The Australian National University, Canberra, Australia.

# Portrait du climat du nord du Québec et du Labrador pour la période 2071–2100

*Dominique Berteaux, Nicolas Casajus et Pascale Ropars*

*Université du Québec à Rimouski*

## Résumé

Ce document dresse un portrait général du climat du nord du Québec et du Labrador pour la période 2071-2100 dans le cadre du projet *Changements climatiques et toundra du Nunavik : exposition, sensibilité et vulnérabilité*. Il se divise en trois parties : 1) description des données climatiques ; 2) synthèse climatique du territoire étudié ; 3) atlas bioclimatique.

## Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>1 Description des données climatiques</b>	<b>2</b>
1.1 Source des données . . . . .	2
1.2 Post-traitement des données . . . . .	3
1.3 Construction des normales climatiques . . . . .	3
1.4 Construction des variables bioclimatiques . . . . .	4
<b>2 Synthèse climatique du territoire étudié</b>	<b>5</b>
2.1 Portrait climatique pour la période 2071-2100 . . . . .	5
2.2 Écarts par rapport à la période de référence . . . . .	6
<b>3 Atlas bioclimatique</b>	<b>8</b>
<b>Références aux données et métadonnées</b>	<b>36</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>36</b>

**Citation suggérée :** Berteaux D., N. Casajus et P. Ropars (2018) Portrait du climat du nord du Québec et du Labrador pour la période 2070–2100. *Rapport présenté au Consortium Ouranos sur la climatologie régionale et les changements climatiques*. Université du Québec à Rimouski, Québec, Canada, 36 pages.

# Introduction

Le projet *Changements climatiques et toundra du Nunavik : exposition, sensibilité et vulnérabilité* a dressé un portrait des effets potentiels des changements climatiques sur les écosystèmes de la toundra arctique du Nunavik. Pour ce faire, des modèles de niche ont été construits afin de modéliser la répartition des espèces présentes dans la toundra arctique du Nunavik. Les espèces actuellement absentes de cette région, mais qui pourraient potentiellement retrouver leurs conditions climatiques favorables dans cette région à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle ont également été considérées. À partir des modèles de niche construits, ces répartitions ont par la suite été projetées dans le futur sous différents scénarios de changements climatiques. Dans une seconde étape, des réseaux trophiques entre espèces ont été bâtis à partir des aires de répartition modélisées (1981-2010, période de référence) et projetées (périodes futures, 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100) et les effets potentiels des changements climatiques sur les écosystèmes ont alors été quantifiés. Ce présent document brosse un portrait du climat de la toundra arctique du Nunavik pour la période 2071-2100.

## 1 Description des données climatiques

Dans cette partie, la provenance des données climatiques et leur traitement pour construire les normales climatiques pour les périodes futures sont décrites.

### 1.1 Source des données

Les études d'impacts aux changements climatiques reposent sur l'utilisation de simulations dérivées de modèles climatiques couplés à des scénarios de forçage radiatif. Depuis la publication du cinquième rapport (AR5) du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), une grande quantité de simulations climatiques est disponible pour mener à bien de telles études.

Le GIEC recommande fortement d'utiliser un grand ensemble de modèles climatiques couplés à différents scénarios de forçage radiatif afin de prendre en compte l'incertitude dans les changements projetés du climat. Cependant, il peut s'avérer très coûteux en temps de calcul d'utiliser la panoplie entière de simulations climatiques disponibles.

Pour cette étude, nous nous sommes restreints à 10 simulations climatiques. Celles-ci offrent une bonne couverture de l'incertitude présente dans les changements projetés par un grand nombre de simulations climatiques (*Travis Logan, communic. pers.*). Toutes ces simulations sont issues de modèles régionaux du climat (MRC), lesquels sont obtenus à partir d'interpolation dynamique de modèles globaux. Notons aussi que tous ces MRC ont été couplés aux scénarios de forçage radiatif de nouvelle génération, les RCP (pour *Representative Concentration Pathway*). Ici, les RCP les plus communs ont été retenus, à savoir le RCP 4,5 (correspondant à un forçage radiatif de  $+4,5 \text{ W/m}^2$  par rapport à 1750) et le RCP 8,5 ( $+8,5 \text{ W/m}^2$ ). La liste des 10 simulations climatiques utilisés figure dans le Tableau 1.

Les simulations climatiques proviennent de deux organismes différents : le consortium Ouranos pour les simulations dérivées du modèle régional canadien MRCC5 (Martynov *et al.*, 2013; Separovic *et al.*, 2013) et le programme CORDEX (Giorgi *et al.*, 2009) pour les autres simulations. Ce dernier oeuvre à l'avancement de la modélisation régionale du climat à l'échelle de l'Amérique du Nord. Un des buts spécifiques de ce programme est la production d'ensembles coordonnés de projections climatiques régionales issues d'une multitude de centres de modélisation climatique.

TABLE 1 – Informations sur les simulations climatiques futures utilisées dans cette étude

RCM	Centre	Source des données	Run	Résolution	GCM	RCP
CANRCM4	CCCMA	CORDEX	-	0,44	CANESM2	RCP 4,5
CANRCM4	CCCMA	CORDEX	-	0,44	CANESM2	RCP 8,5
RCA4	SMHI	CORDEX	-	0,44	CANESM2	RCP 4,5
RCA4	SMHI	CORDEX	-	0,44	CANESM2	RCP 8,5
RCA4	SMHI	CORDEX	-	0,44	EC-EARTH	RCP 4,5
RCA4	SMHI	CORDEX	-	0,44	EC-EARTH	RCP 8,5
CRCM5	UQAM	CORDEX	-	0,44	CANESM2	RCP 4,5
CRCM5	UQAM	CORDEX	-	0,44	MPI-ESM-LR	RCP 4,5
CRCM5	Ouranos	Ouranos	bbf/bbg	0,22	CANESM2	RCP 8,5
CRCM5	Ouranos	Ouranos	bbh/bbi	0,22	CANESM2	RCP 8,5

## 1.2 Post-traitement des données

Les sorties des simulations climatiques (températures minimale et maximale de l'air et précipitations totales), qui ont une résolution temporelle variant de 3 à 24 heures selon la source des données, ont tout d'abord été ramenées à un pas de temps quotidien avant de calculer les moyennes (ou les sommes pour les précipitations) mensuelles pour chaque année de la période 1981-2100.

Une méthode simple de post-traitement a été employée pour corriger les biais mensuels présents dans les sorties brutes des simulations climatiques régionales. La correction a été effectuée en utilisant les données de la réanalyse du *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) de NCEP (Saha *et al.*, 2010) comme valeurs d'observations<sup>1</sup>. Voici la procédure mise en place<sup>2</sup> :

1. Données CFSR
  - calcul de la normale climatique mensuelle pour la période 1981-2005 pour chaque point de la grille et pour chaque variable.
2. Simulation climatique
  - calcul des anomalies mensuelles<sup>3</sup> par rapport à la normale mensuelle du CFSR pour 1981-2005 ;
  - interpolation des anomalies de la simulation climatique sur la grille CFSR ;
  - addition (températures) ou multiplication (précipitations) des normales climatiques du CFSR aux anomalies de la simulation climatique.

Il est important de noter que les données résultantes dans les scénarios climatiques futurs pour la période historique (1981-2005) correspondent aux données simulées corrigées par rapport aux données CFSR, et non les valeurs CFSR elles-mêmes. Ainsi, chaque scénario va avoir une séquence unique pour la période historique (même si les moyennes 1981-2005 sont très semblables).

## 1.3 Construction des normales climatiques

Puisque chaque scénario possède une séquence unique pour la période de référence, nous avons corrigé les scénarios par rapport aux données CFSR de la période de référence afin qu'ils soient comparables les uns aux autres. Pour ce faire, nous avons tout d'abord construit, pour chacune des 10 simulations climatiques, quatre horizons temporels : la période de référence (définie comme la normale climatique pour les années 1981-2010), l'horizon 2011-2040 (défini comme la normale climatique pour les années 2011-2040), l'horizon 2041-2070 (défini comme la normale climatique pour les années 2041-2070) et l'horizon 2071-2100 (défini

1. Ce sont ces données qui ont servies à définir le climat de la période de référence.  
 2. La préparation de ces données climatiques a été effectuée par Travis Logan du Consortium Ouranos.  
 3. L'anomalie correspond à la différence (températures) ou au ratio (précipitations) entre une valeur simulée, pour un mois d'une année donnée, par rapport à la moyenne 1981-2005 pour ce même mois.

comme la normale climatique pour les années 2071-2100). Pour chaque simulation, chaque horizon temporel, les moyennes mensuelles ont été moyennées au travers des trente années composant l’horizon (moyenne de trente valeurs), pour chaque variable de base. Ainsi, un horizon temporel d’une simulation climatique donnée est défini par 36 variables (3 variables de base x 12 mois).

Puis, pour une simulation et un horizon futur donnés, les valeurs futures des variables mensuelles ont été soustraites (températures) ou divisées (précipitations) aux valeurs de la période de référence simulées par le même scénario et ces écarts ont été appliqués (addition ou multiplication) aux valeurs mensuelles de la période de référence issues du CFSR. Cette méthode, appelée *Change Field* est celle utilisée dans Casajus *et al.* (2016). À la fin de cette correction, tous les scénarios climatiques sont comparables les uns aux autres, et chacun est défini sous trois horizons temporels futurs par 36 variables (mensuelles moyennes).

## 1.4 Construction des variables bioclimatiques

C’est à partir de ces variables mensuelles de base (températures minimale et maximale de l’air et précipitations totales) que les variables bioclimatiques ont été dérivées. Le Tableau 2 liste, pour rappel, l’ensemble des variables bioclimatiques dérivées à partir des trois variables mensuelles de base.

TABLE 2 – Variables bioclimatiques dérivées pour le projet

Code	Variable bioclimatique	Unité
Bio01	Température annuelle moyenne	Degrés Celsius
Bio02	Écart diurne moyen des températures	Degrés Celsius
Bio03	Isothermalité	-
Bio04	Saisonnalité des températures	Degrés Celsius
Bio05	Température maximale du mois le plus chaud	Degrés Celsius
Bio06	Température minimale du mois le plus froid	Degrés Celsius
Bio07	Écart annuel des températures	Degrés Celsius
Bio08	Température moyenne du trimestre le plus humide	Degrés Celsius
Bio09	Température moyenne du trimestre le plus sec	Degrés Celsius
Bio10	Température moyenne du trimestre le plus chaud	Degrés Celsius
Bio11	Température moyenne du trimestre le plus froid	Degrés Celsius
Bio12	Précipitations annuelles totales	Millimètres
Bio13	Précipitations du mois le plus humide	Millimètres
Bio14	Précipitations du mois le plus sec	Millimètres
Bio15	Saisonnalité des précipitations	-
Bio16	Précipitations du trimestre le plus humide	Millimètres
Bio17	Précipitations du trimestre le plus sec	Millimètres
Bio18	Précipitations du trimestre le plus chaud	Millimètres
Bio19	Précipitations du trimestre le plus froid	Millimètres
Bio20	Degrés-jours de croissance annuel	Degrés Celsius
Bio21	Degrés-jours de gel annuel	Degrés Celsius
Bio22	Date de dernier gel printanier	Jours Julien
Bio23	Date de premier gel automnal	Jours Julien
Bio24	Longueur de la période sans gel	Nombre de jours
Bio25	Évapotranspiration potentielle annuelle	Millimètres
Bio26	Bilan hydrique annuel	Millimètres
Bio27	Indice d’humidité annuel	Degrés Celsius/Millimètres

## 2 Synthèse climatique du territoire étudié

Dans cette seconde partie, nous proposons des synthèses climatiques pour les deux régions d'intérêt. Des statistiques synthétiques (moyenne et écart-type ( $\sigma$ ) pour chacun des deux RCP) ont été calculées sur l'ensemble des cellules formant chacune des deux aires d'étude pour 1) le climat moyen pour la période 2071-2100 et 2) les écarts à la période de référence.

Notons que les résultats ont été agrégés sur l'ensemble des scénarios climatiques pour chacun des deux RCP.

### 2.1 Portrait climatique pour la période 2071-2100

Cette section présente le climat moyen (normales climatiques) du nord du Québec et du Labrador pour l'horizon 2071-2100. Les résultats synthétiques pour le nord du Québec et du Labrador sont présentés au Tableau 3.

TABLE 3 – Portrait climatique de la région nord du Québec et du Labrador pour 2071-2100

Variable	Unités	Moyenne (RCP4,5)	$\sigma$ (RCP4,5)	Moyenne (RCP8,5)	$\sigma$ (RCP8,5)
Bio01	°C	0,34	2,15	3,83	1,83
Bio02	°C	7,12	0,76	6,54	0,78
Bio03	-	18,15	1,68	17,81	1,64
Bio04	°C	1100,99	107,52	1041,65	106,67
Bio05	°C	19,84	2,06	22,82	2,03
Bio06	°C	-19,50	3,25	-14,06	2,82
Bio07	°C	39,34	3,54	36,89	3,48
Bio08	°C	8,10	3,53	8,50	3,47
Bio09	°C	-11,64	6,29	-5,62	6,81
Bio10	°C	13,75	1,83	16,88	1,69
Bio11	°C	-13,24	2,92	-8,63	2,48
Bio12	mm	1255,69	205,34	1372,75	210,30
Bio13	mm	146,41	18,98	158,95	20,84
Bio14	mm	60,86	17,70	75,53	16,91
Bio15	-	26,31	7,99	23,21	5,62
Bio16	mm	404,16	53,08	429,65	54,10
Bio17	mm	219,43	60,18	257,06	58,43
Bio18	mm	354,75	53,90	365,69	54,16
Bio19	mm	226,04	67,21	274,68	74,59
Bio20	°C	1031,53	290,20	1522,14	322,56
Bio21	°C	1856,86	453,97	1208,55	323,80
Bio22	Jours Julien	145,40	7,83	134,32	7,88
Bio23	Jours Julien	272,49	10,22	287,75	9,97
Bio24	Nombre de jours	127,10	17,17	153,43	17,06
Bio25	mm	360,77	40,58	422,76	44,35
Bio26	mm	894,92	179,24	949,99	187,93
Bio27	°C/mm	0,82	0,17	1,12	0,19

La même synthèse a été réalisée pour l'écorégion toundrique arctique du Nunavik (Tableau 4).

Même si les valeurs présentées dans les Tableaux 3 et 4 permettent d'avoir une bonne idée du climat moyen du nord du Québec et du Labrador à l'horizon 2071-2100 sous les deux RCP considérés, des disparités locales peuvent exister. Ainsi, la section 3 illustre les valeurs de chaque variable bioclimatique sur l'ensemble du territoire à l'horizon 2071-2100.

TABLE 4 – Portrait climatique de la région tundra arctique du Nunavik pour 2071-2100

Variable	Unités	Moyenne (RCP4,5)	$\sigma$ (RCP4,5)	Moyenne (RCP8,5)	$\sigma$ (RCP8,5)
Bio01	°C	-2,48	0,98	1,75	0,91
Bio02	°C	6,43	0,73	5,76	0,76
Bio03	-	16,08	0,86	16,08	1,02
Bio04	°C	1127,71	83,81	1012,99	88,96
Bio05	°C	18,10	1,80	21,08	1,80
Bio06	°C	-21,91	1,69	-14,74	1,70
Bio07	°C	40,02	3,29	35,82	3,37
Bio08	°C	6,24	1,06	7,56	1,96
Bio09	°C	-15,97	1,58	-8,98	1,78
Bio10	°C	11,56	1,16	15,04	1,17
Bio11	°C	-16,15	1,43	-9,84	1,37
Bio12	mm	876,60	73,32	986,15	78,85
Bio13	mm	117,77	10,56	124,23	10,47
Bio14	mm	36,14	4,53	49,17	5,29
Bio15	-	36,73	3,53	30,66	2,96
Bio16	mm	323,79	29,63	344,17	29,71
Bio17	mm	125,16	14,96	162,65	17,56
Bio18	mm	263,10	22,30	272,71	27,22
Bio19	mm	126,50	16,50	168,08	20,98
Bio20	°C	686,34	123,52	1129,91	151,71
Bio21	°C	2419,08	272,08	1478,57	217,96
Bio22	Jours Julien	153,48	3,37	142,17	4,58
Bio23	Jours Julien	263,19	7,11	278,05	8,20
Bio24	Nombre de jours	109,71	8,70	135,88	11,19
Bio25	mm	305,18	22,58	367,72	22,73
Bio26	mm	571,42	66,20	618,43	77,68
Bio27	°C/mm	0,78	0,12	1,15	0,15

## 2.2 Écarts par rapport à la période de référence

À partir du climat pour la période de référence (1981-2010) et du climat moyen pour l’horizon 2071-2100, il est possible de calculer des écarts en soustrayant les valeurs futures aux valeurs de la période de référence pour chaque variable bioclimatique. Ainsi, une valeur positive indiquera que la variable bioclimatique en question a augmenté par rapport à la période de référence, et inversement si elle est négative.

Le Tableau 5 présente les écarts moyens pour chacune des 27 variables bioclimatiques pour le nord du Québec et du Labrador à l’horizon 2071-2100. Par ex., la température annuelle moyenne (Bio01) augmenterait de  $3,94^{\circ}\text{C} \pm 0,33\text{SD}$  sous le RCP 4,5 ( $7,42^{\circ}\text{C} \pm 0,75\text{SD}$  sous le RCP 8,5) entre la période de référence et l’horizon 2071-2100 pour le nord du Québec et du Labrador (Tableau 5) alors que cette augmentation atteindrait  $4,52^{\circ}\text{C} \pm 0,10\text{SD}$  sous le RCP 4,5 ( $8,75^{\circ}\text{C} \pm 0,24\text{SD}$  sous le RCP 8,5) dans l’écorégion toundrique du Nunavik (Tableau 6).

TABLE 5 – Différences entre l’horizon 2071-2100 et la période de référence pour le nord du Québec et du Labrador

Variable	Unités	Moyenne (RCP4,5)	$\sigma$ (RCP4,5)	Moyenne (RCP8,5)	$\sigma$ (RCP8,5)
Bio01	°C	3,94	0,33	7,42	0,75
Bio02	°C	-0,66	0,10	-1,24	0,14
Bio03	-	0,71	0,23	0,37	0,44
Bio04	°C	-150,28	34,55	-209,62	63,58
Bio05	°C	2,49	0,31	5,47	0,30
Bio06	°C	7,98	0,79	13,42	1,67
Bio07	°C	-5,49	0,71	-7,95	1,50
Bio08	°C	2,84	2,38	3,24	2,42
Bio09	°C	5,15	2,35	11,17	2,74
Bio10	°C	2,73	0,14	5,86	0,35
Bio11	°C	6,27	0,90	10,88	1,78
Bio12	mm	178,68	27,89	295,73	47,62
Bio13	mm	-16,42	10,55	-3,88	9,40
Bio14	mm	25,13	8,70	39,79	8,55
Bio15	-	-17,36	3,37	-20,45	2,85
Bio16	mm	11,55	21,62	37,05	22,58
Bio17	mm	63,97	15,53	101,59	19,33
Bio18	mm	29,82	11,73	40,76	16,72
Bio19	mm	54,38	11,69	103,03	22,79
Bio20	°C	359,40	60,57	850,01	98,78
Bio21	°C	-937,50	161,89	-1585,81	326,21
Bio22	Jours Julien	-14,67	2,40	-25,75	3,75
Bio23	Jours Julien	12,80	3,05	28,06	3,14
Bio24	Nombre de jours	27,48	3,56	53,81	5,18
Bio25	mm	50,49	8,12	112,47	11,81
Bio26	mm	128,19	28,99	183,26	53,72
Bio27	°C/mm	0,20	0,03	0,50	0,07

Même si les valeurs présentées dans les Tableaux 5 et 6 permettent d’avoir une bonne idée de l’ampleur des changements climatiques à l’horizon 2071-2100, des disparités locales peuvent exister. Ainsi, la section 3 illustre les changements de chaque variable bioclimatique sur l’ensemble du territoire à l’horizon 2071-2100.

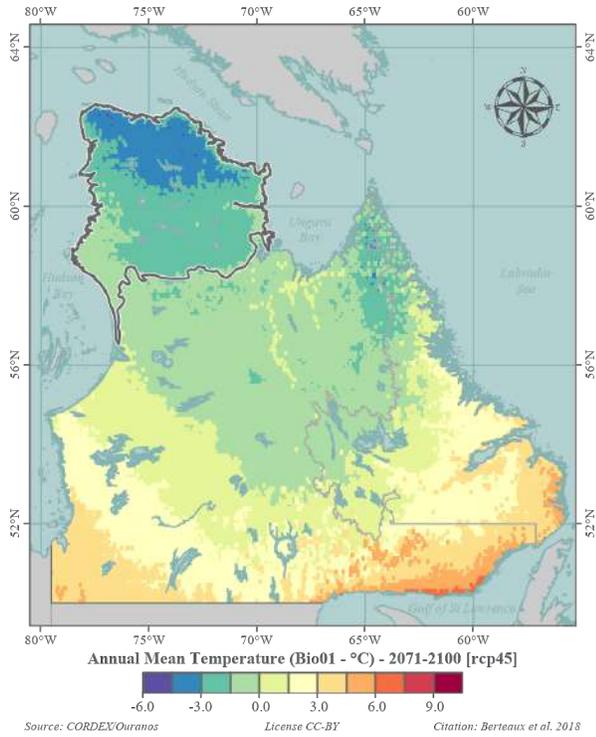
TABLE 6 – Différences entre l’horizon 2071-2100 et la période de référence pour la toundra arctique du Nunavik

Variable	Unités	Moyenne (RCP4,5)	$\sigma$ (RCP4,5)	Moyenne (RCP8,5)	$\sigma$ (RCP8,5)
Bio01	°C	4,52	0,10	8,75	0,24
Bio02	°C	-0,54	0,06	-1,20	0,14
Bio03	-	0,96	0,12	0,96	0,29
Bio04	°C	-204,60	12,79	-319,31	26,30
Bio05	°C	2,94	0,39	5,91	0,23
Bio06	°C	9,05	0,41	16,22	0,86
Bio07	°C	-6,11	0,50	-10,31	0,77
Bio08	°C	2,38	0,83	3,70	1,28
Bio09	°C	6,60	0,79	13,60	1,35
Bio10	°C	2,91	0,12	6,38	0,22
Bio11	°C	7,74	0,31	14,04	0,68
Bio12	mm	159,07	17,15	268,63	32,11
Bio13	mm	-5,35	2,73	1,10	3,85
Bio14	mm	17,86	2,41	30,89	3,92
Bio15	-	-16,70	1,28	-22,77	2,21
Bio16	mm	33,39	7,87	53,77	10,35
Bio17	mm	44,83	5,30	82,33	13,04
Bio18	mm	25,12	8,12	34,73	13,28
Bio19	mm	40,17	6,24	81,75	16,09
Bio20	°C	285,55	28,26	729,12	61,30
Bio21	°C	-1208,97	55,70	-2149,47	134,06
Bio22	Jours Julien	-14,64	2,54	-25,95	3,49
Bio23	Jours Julien	13,02	4,41	27,88	5,35
Bio24	Nombre de jours	27,66	5,85	53,83	7,65
Bio25	mm	40,55	10,30	103,10	10,64
Bio26	mm	118,52	19,16	165,53	38,41
Bio27	°C/mm	0,22	0,03	0,59	0,07

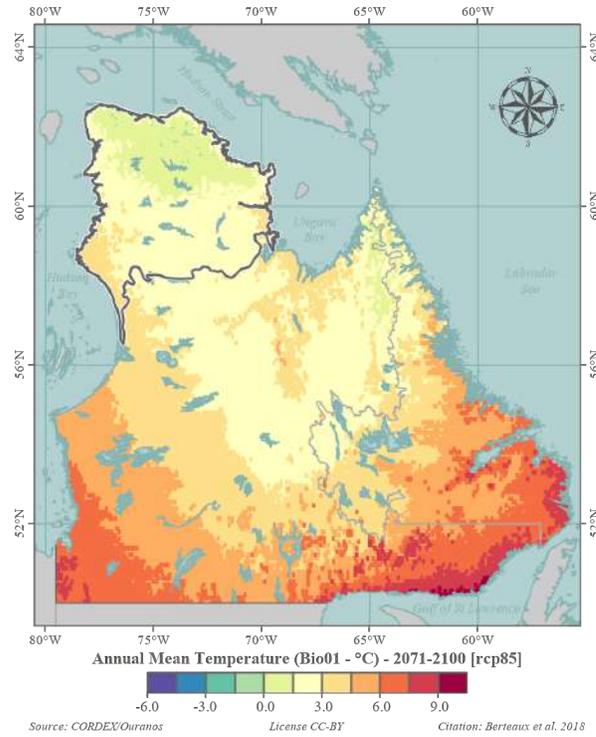
### 3 Atlas bioclimatique

Cette dernière partie se compose d’un atlas bioclimatique représentant l’information de chaque variable bioclimatique sur une même page. Les deux cartes du haut illustre, selon le même gradient de couleurs, les valeurs moyennes de la variable bioclimatique selon le RCP 4,5 (carte de gauche) et le RCP 8,5 (carte de droite) pour l’horizon 2071-2100. Les deux cartes du bas représentent les écarts des valeurs projetées pour l’horizon 2071-2100 par rapport à la période de référence (même gradient de couleurs pour ces deux cartes) selon le RCP 4,5 (carte de gauche) et le RCP 8,5 (carte de droite). Les variables sont listées selon le même ordre que dans les tableaux précédents.

Une version en haute définition des cartes est disponible à cette adresse : <https://ahasverus.shinyapps.io/bioclimaticatlas/>. À noter que pour des raisons techniques, les cartes comportent parfois des éléments de légende en anglais.

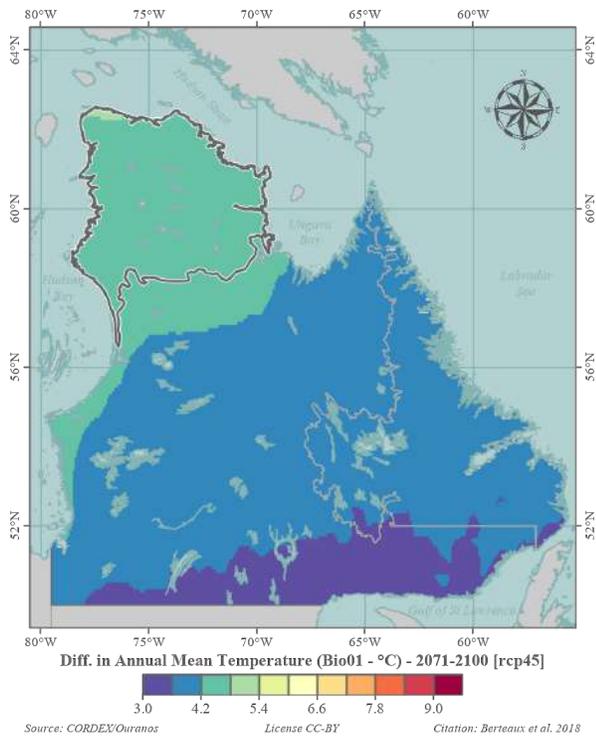


(a) RCP 4,5

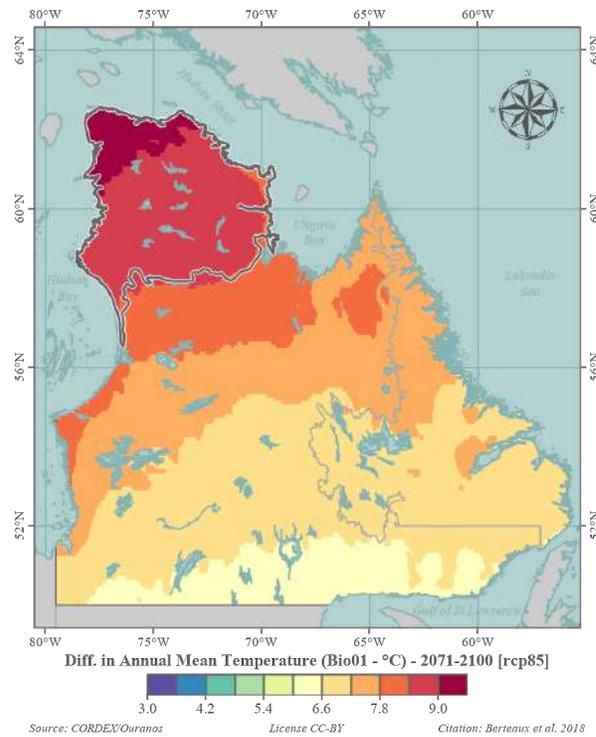


(b) RCP 8,5

FIGURE 1 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Température annuelle moyenne (Bio01)

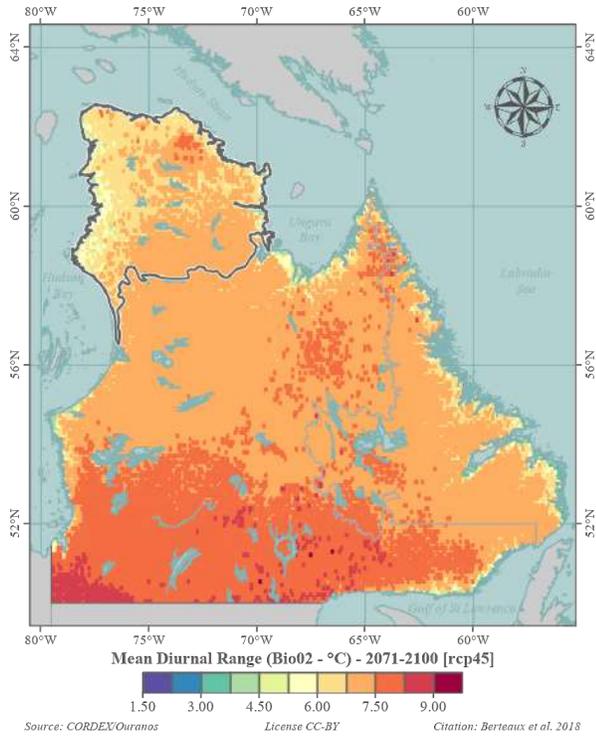


(a) RCP 4,5

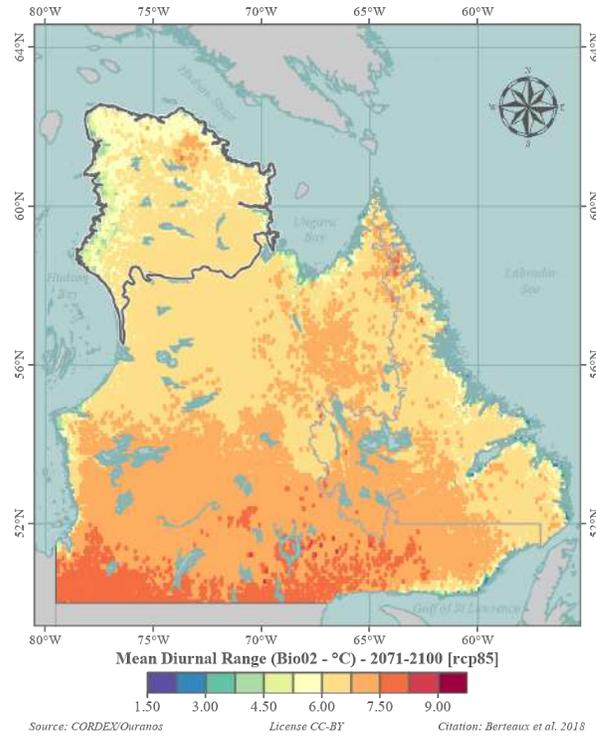


(b) RCP 8,5

FIGURE 2 – Écarts à la période de référence : Température annuelle moyenne (Bio01)

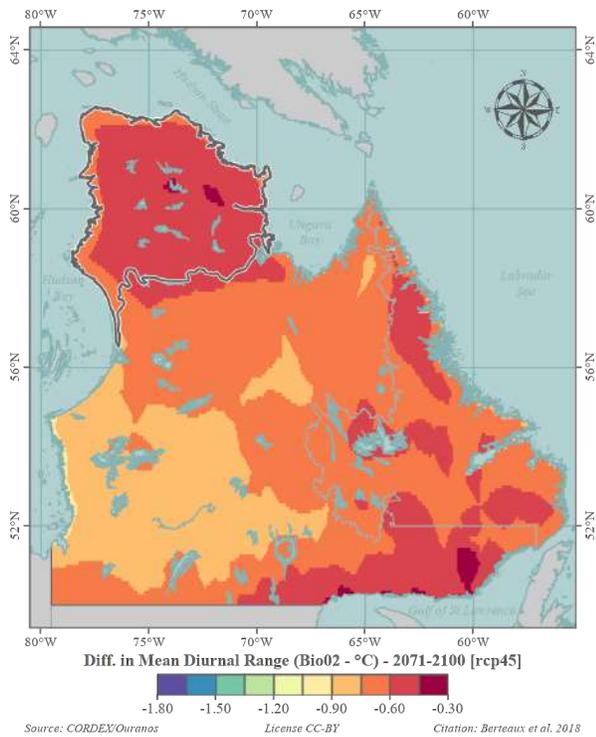


(a) RCP 4,5

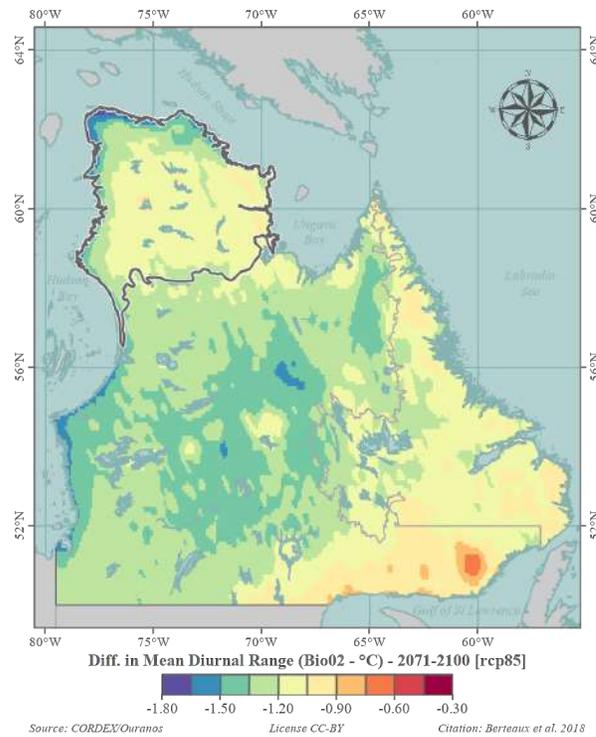


(b) RCP 8,5

FIGURE 3 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Écart diurne moyen des températures (Bio02)

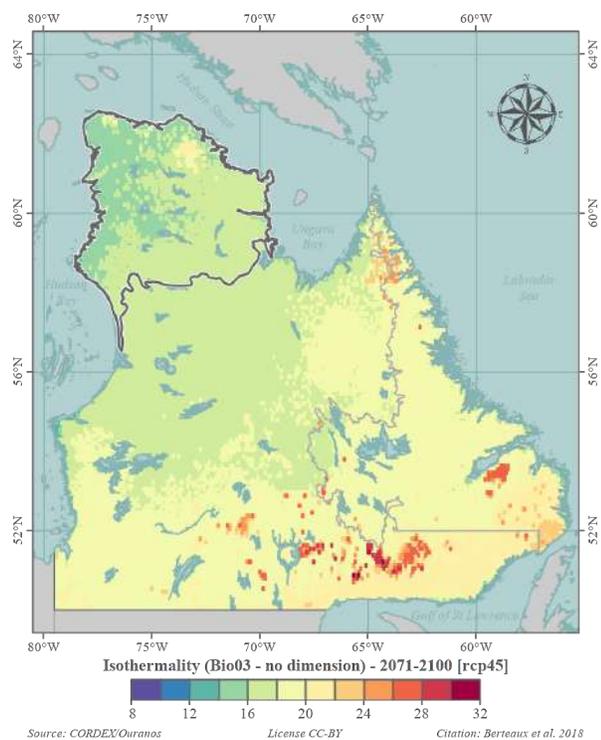


(a) RCP 4,5

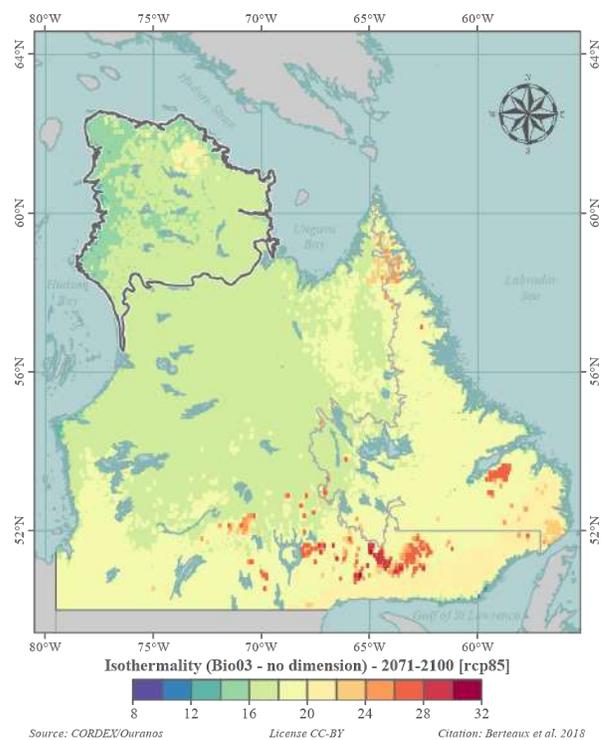


(b) RCP 8,5

FIGURE 4 – Écarts à la période de référence : Écart diurne moyen des températures (Bio02)

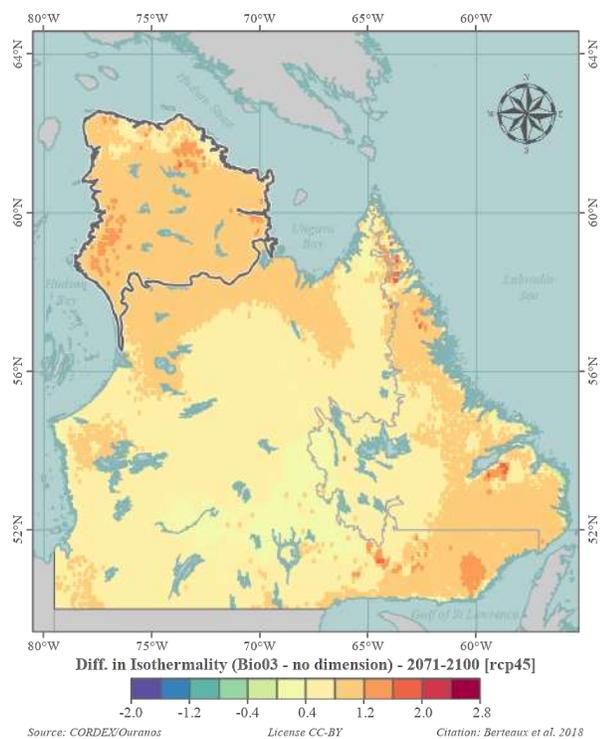


(a) RCP 4,5

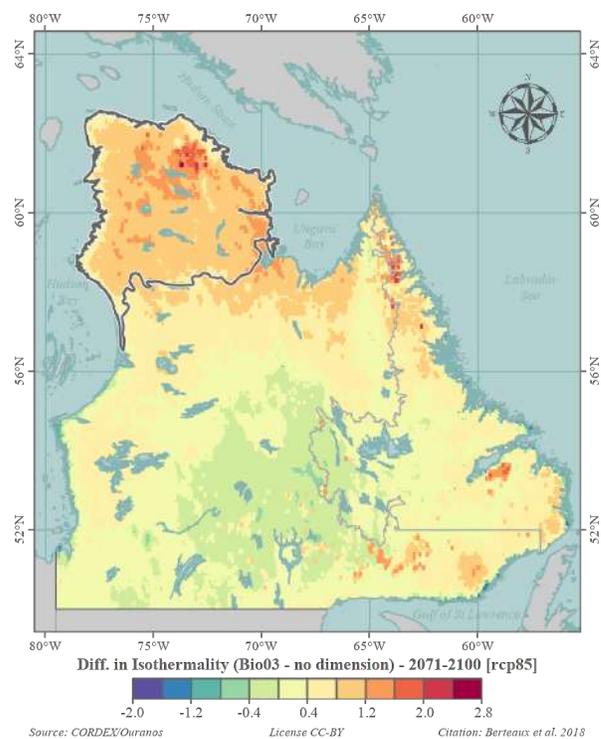


(b) RCP 8,5

FIGURE 5 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Isothermalité (Bio03)

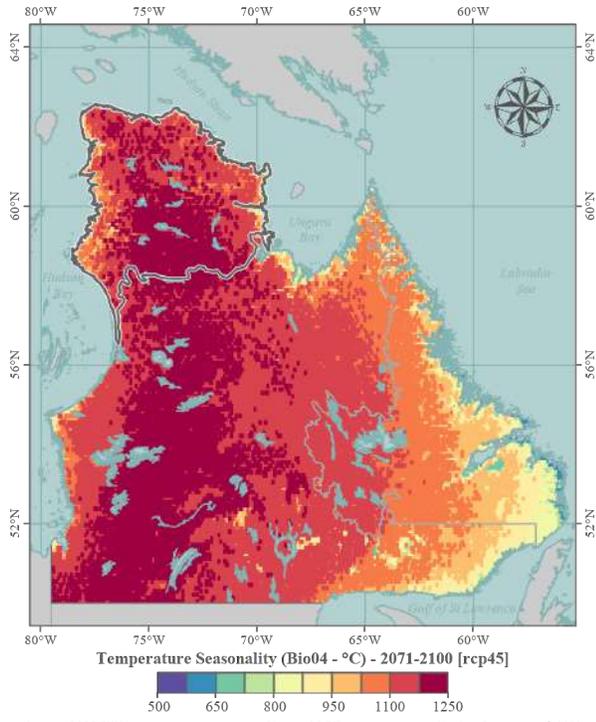


(a) RCP 4,5

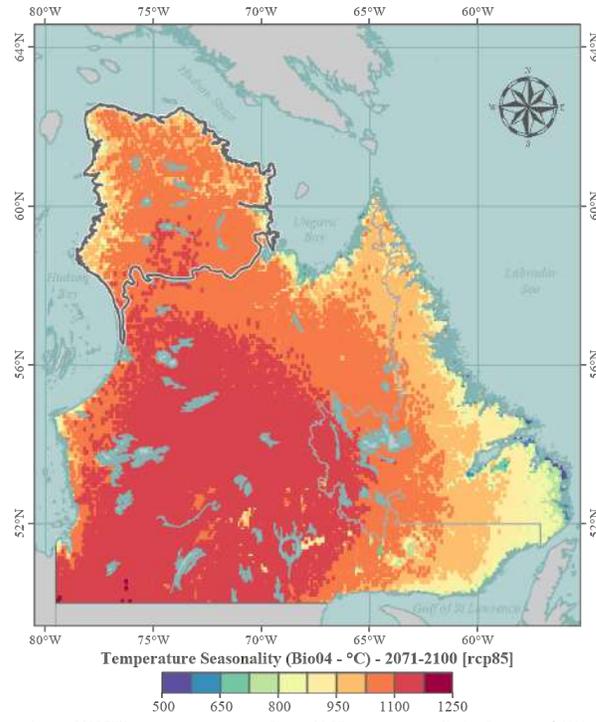


(b) RCP 8,5

FIGURE 6 – Écarts à la période de référence : Isothermalité (Bio03)

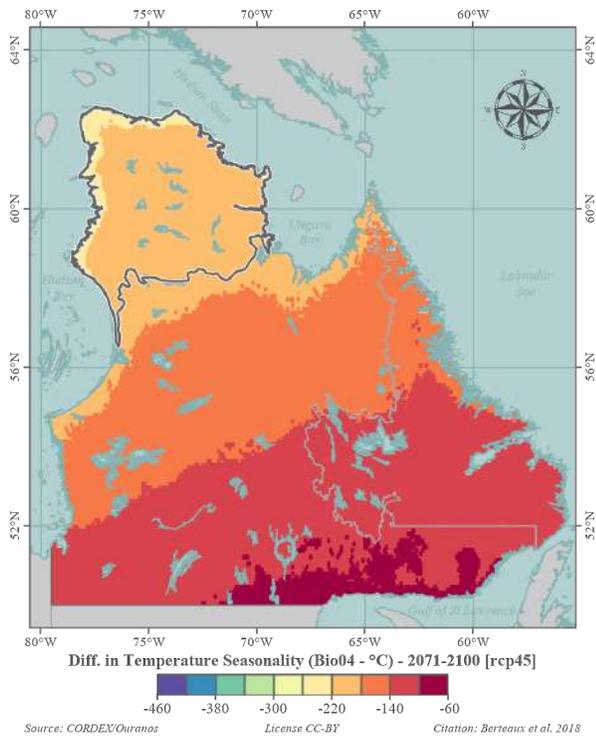


(a) RCP 4,5

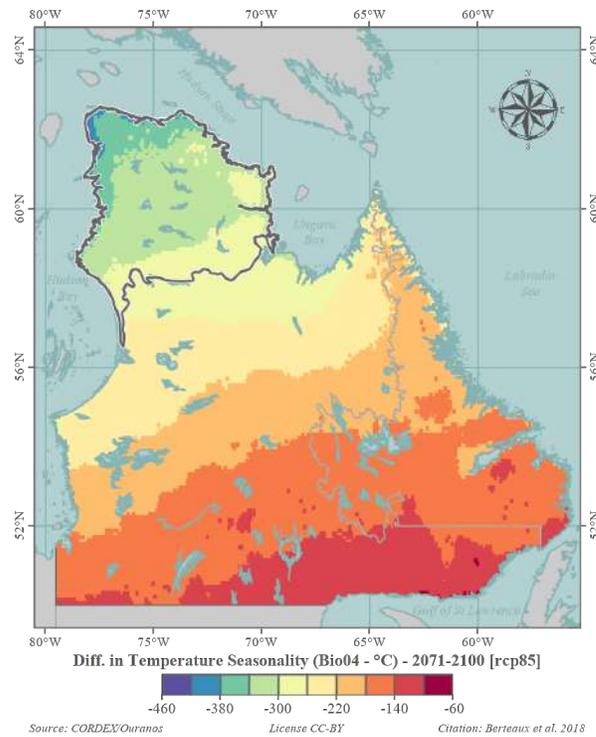


(b) RCP 8,5

FIGURE 7 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Saisonnalité des températures (Bio04)

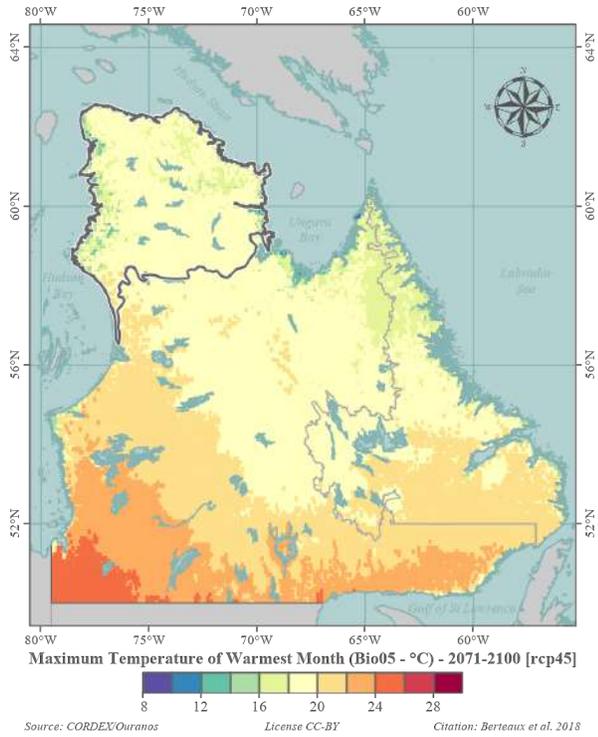


(a) RCP 4,5

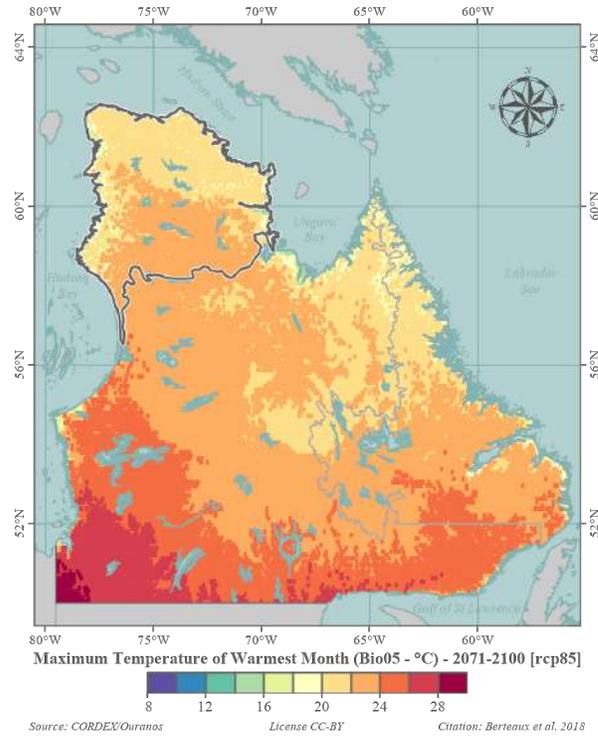


(b) RCP 8,5

FIGURE 8 – Écarts à la période de référence : Saisonnalité des températures (Bio04)

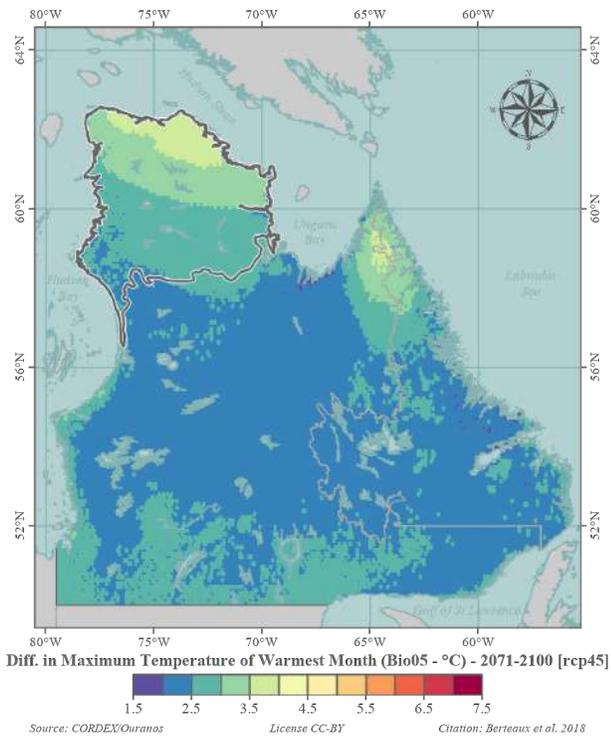


(a) RCP 4,5

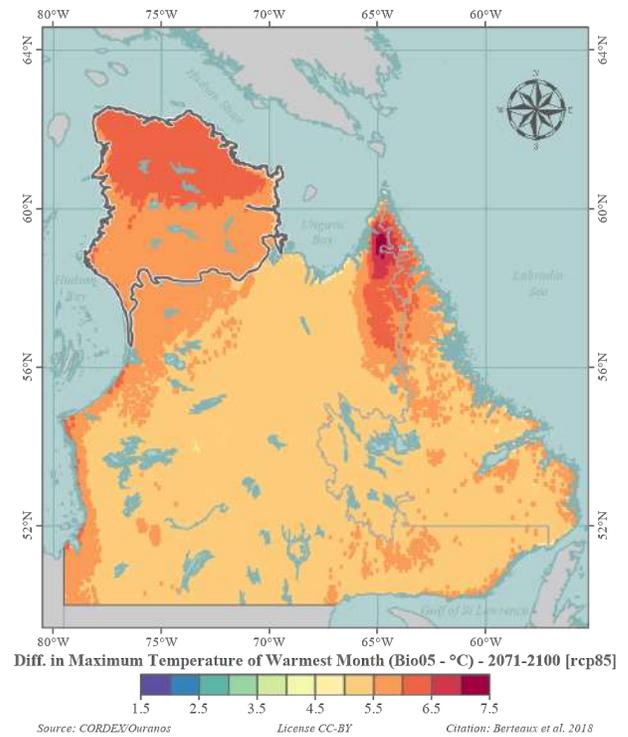


(b) RCP 8,5

FIGURE 9 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Température maximale du mois le plus chaud (Bio05)

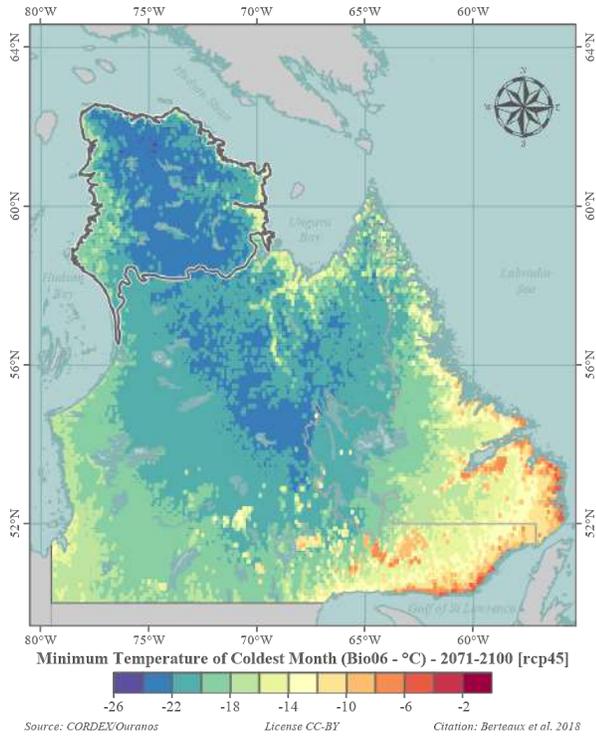


(a) RCP 4,5

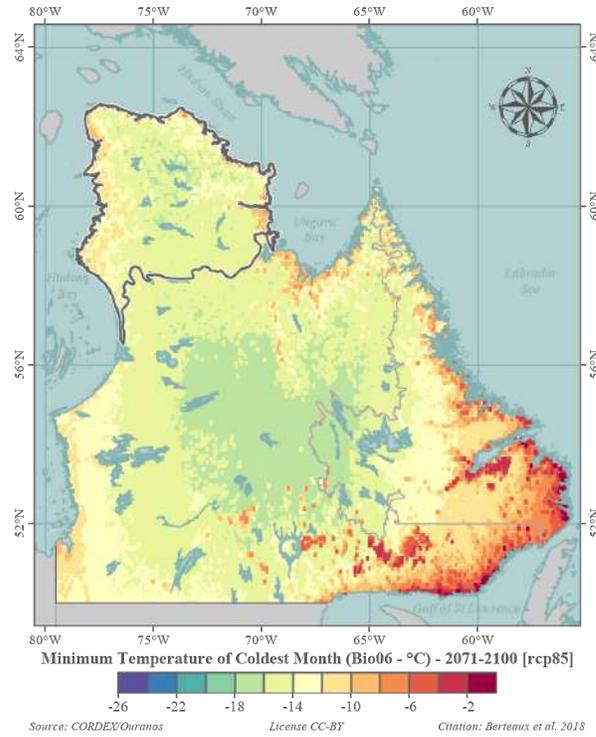


(b) RCP 8,5

FIGURE 10 – Écarts à la période de référence : Température maximale du mois le plus chaud (Bio05)

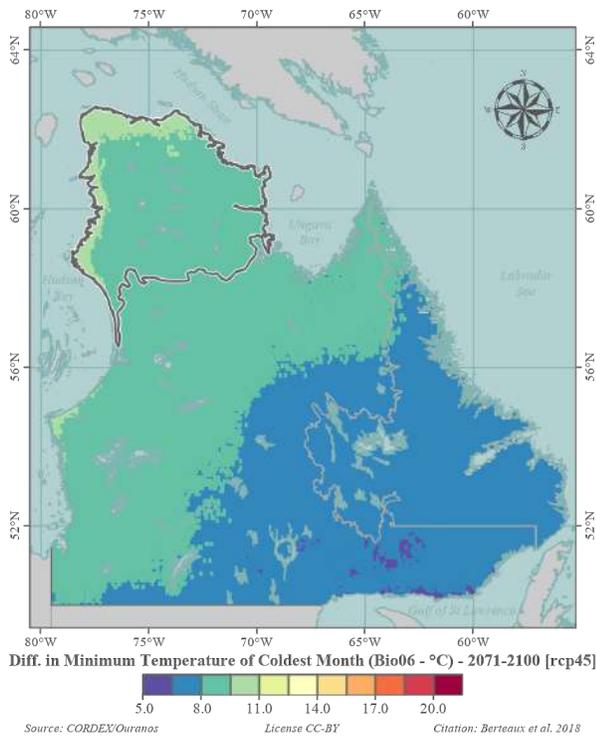


(a) RCP 4,5

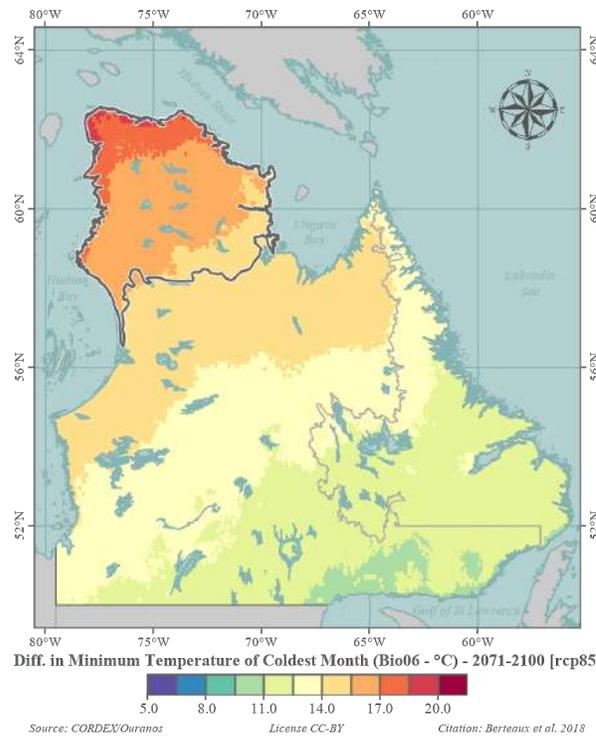


(b) RCP 8,5

FIGURE 11 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Température minimale du mois le plus froid (Bio06)

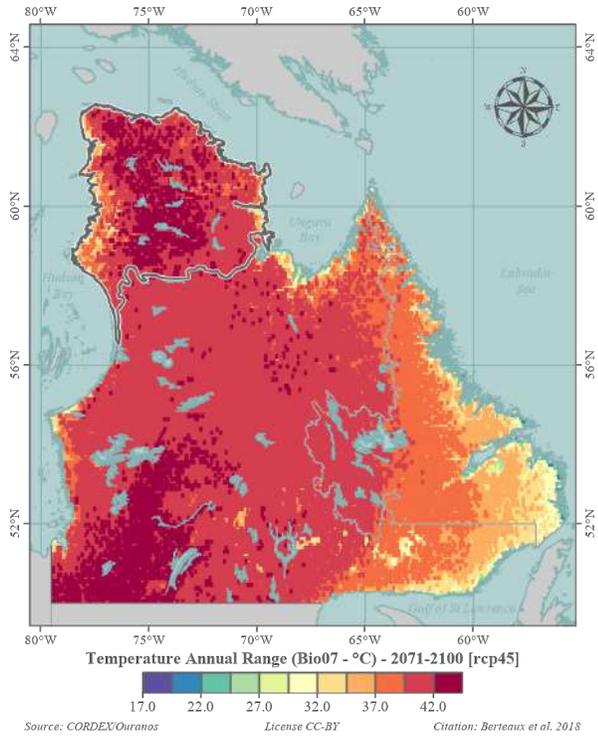


(a) RCP 4,5

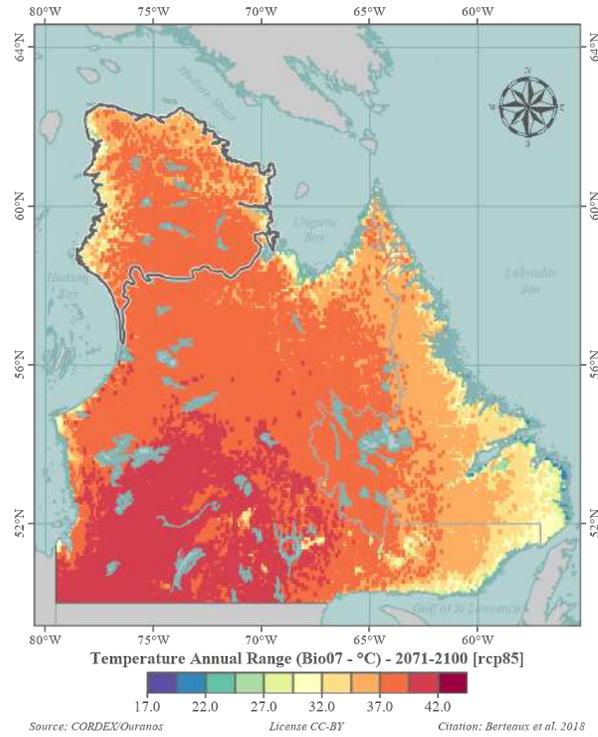


(b) RCP 8,5

FIGURE 12 – Écarts à la période de référence : Température minimale du mois le plus froid (Bio06)

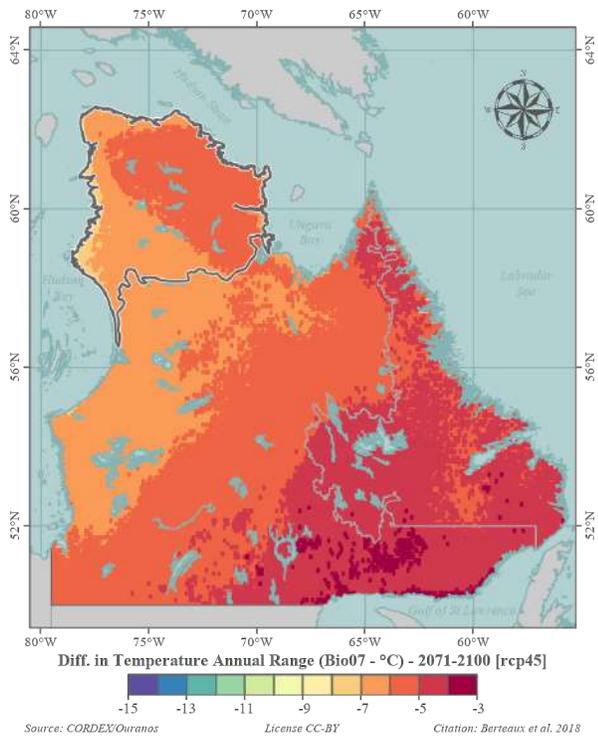


(a) RCP 4,5

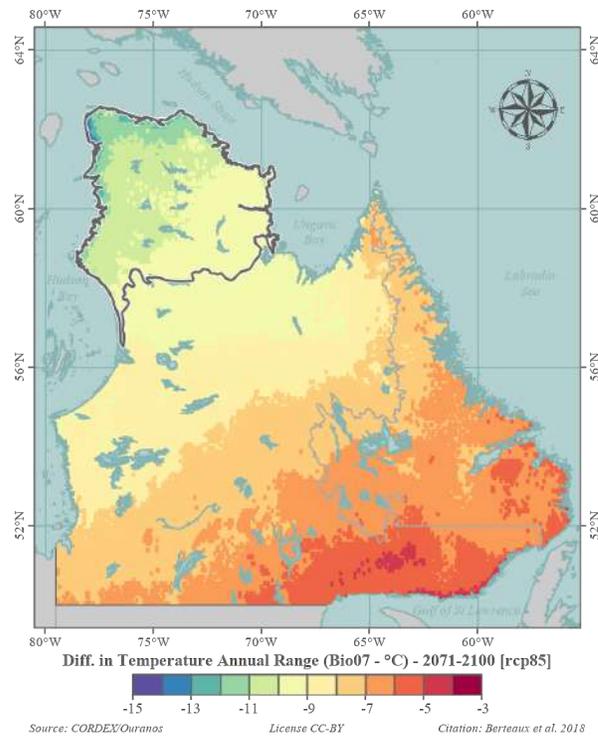


(b) RCP 8,5

FIGURE 13 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Écart annuel des températures (Bio07)

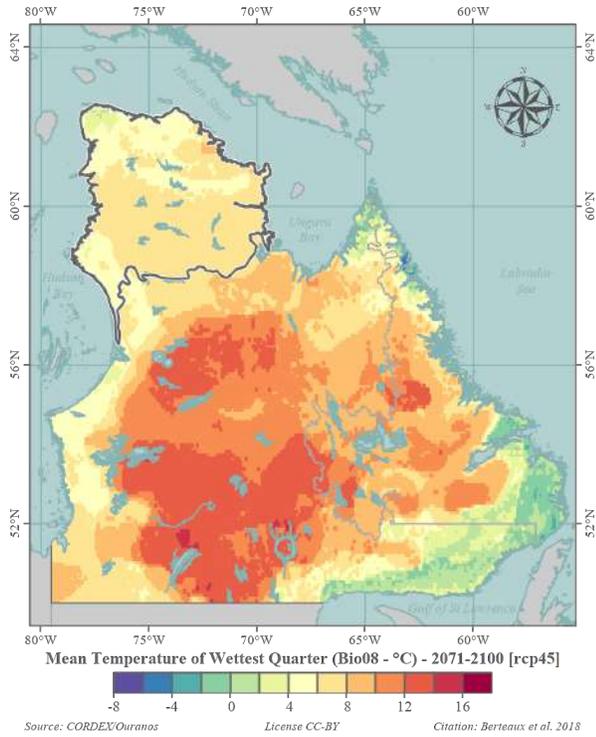


(a) RCP 4,5

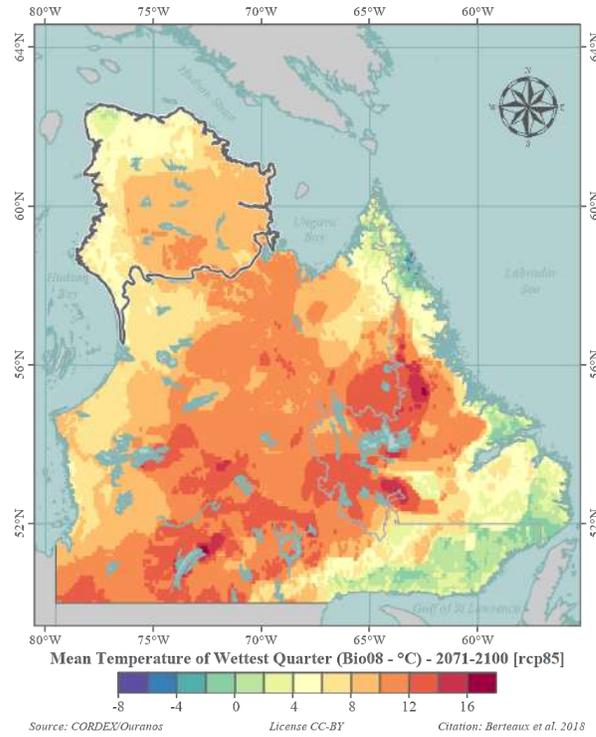


(b) RCP 8,5

FIGURE 14 – Écarts à la période de référence : Écart annuel des températures (Bio07)

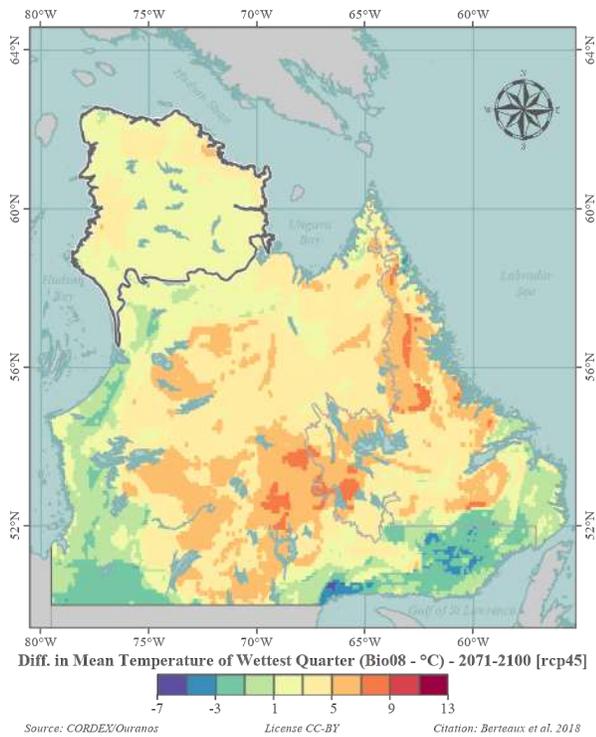


(a) RCP 4,5

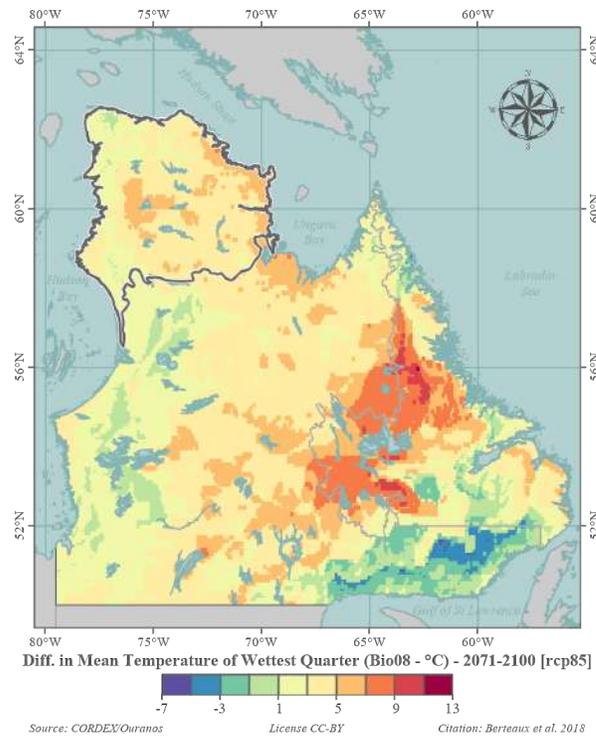


(b) RCP 8,5

FIGURE 15 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Température moyenne du trimestre le plus humide (Bio08)

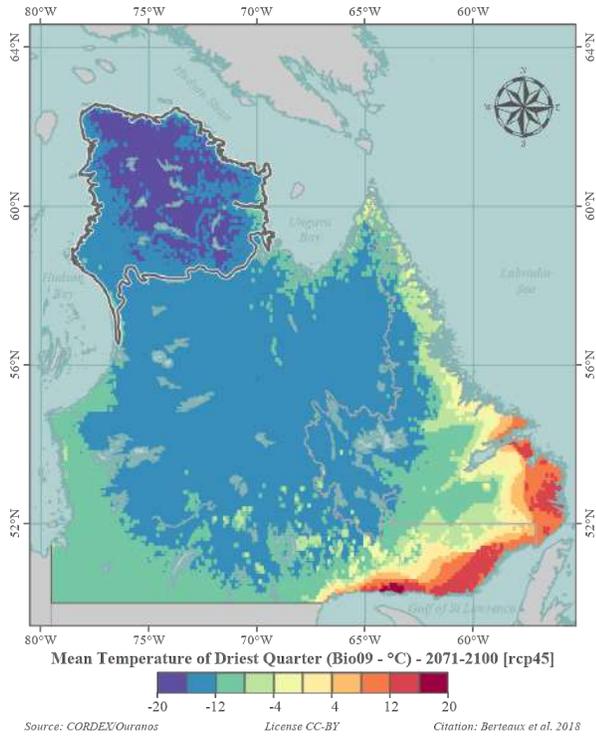


(a) RCP 4,5

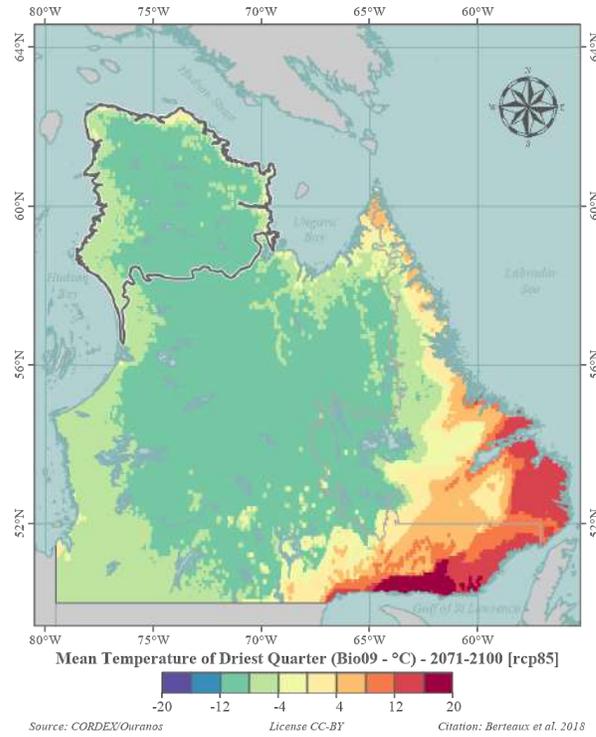


(b) RCP 8,5

FIGURE 16 – Écarts à la période de référence : Température moyenne du trimestre le plus humide (Bio08)

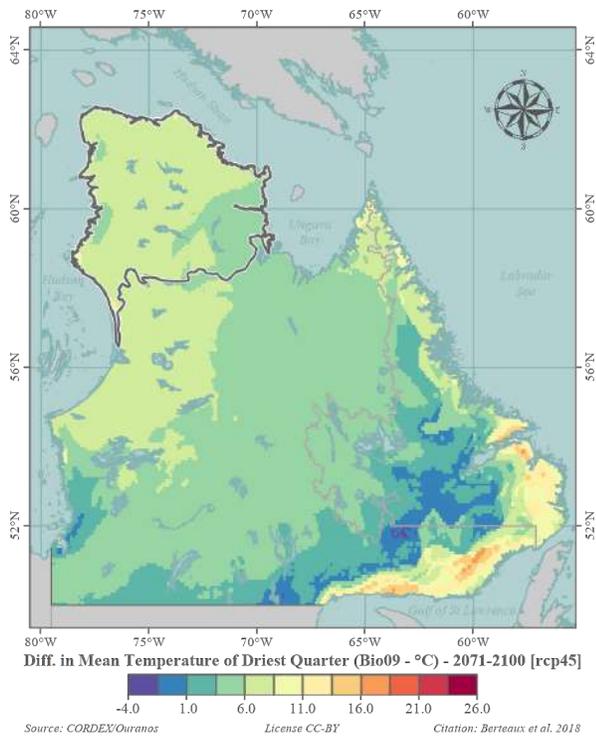


(a) RCP 4,5

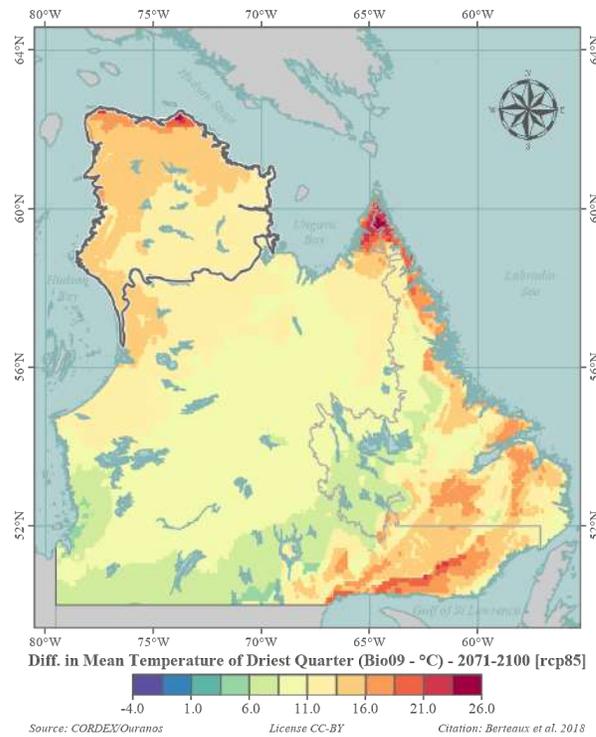


(b) RCP 8,5

FIGURE 17 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Température moyenne du trimestre le plus sec (Bio09)

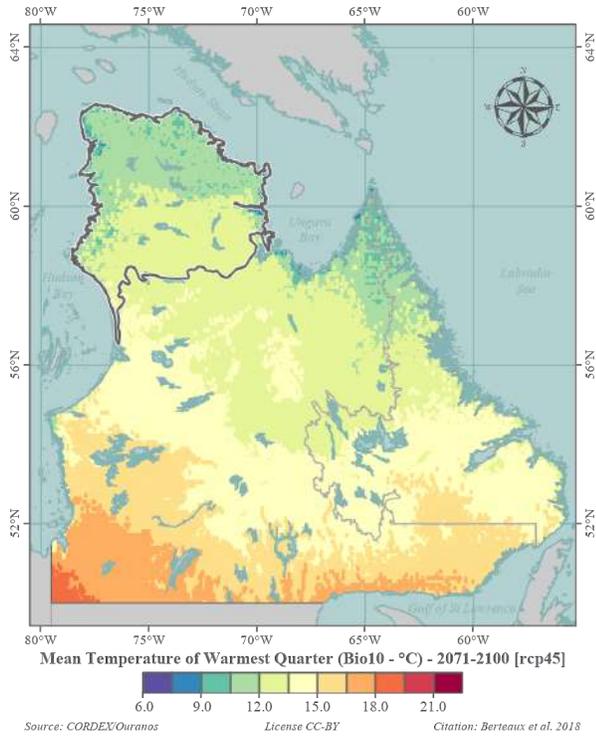


(a) RCP 4,5

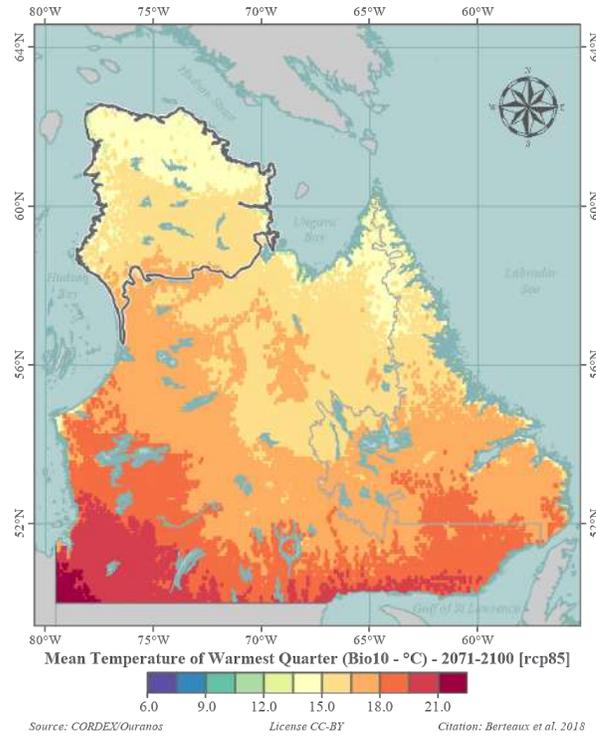


(b) RCP 8,5

FIGURE 18 – Écarts à la période de référence : Température moyenne du trimestre le plus sec (Bio09)

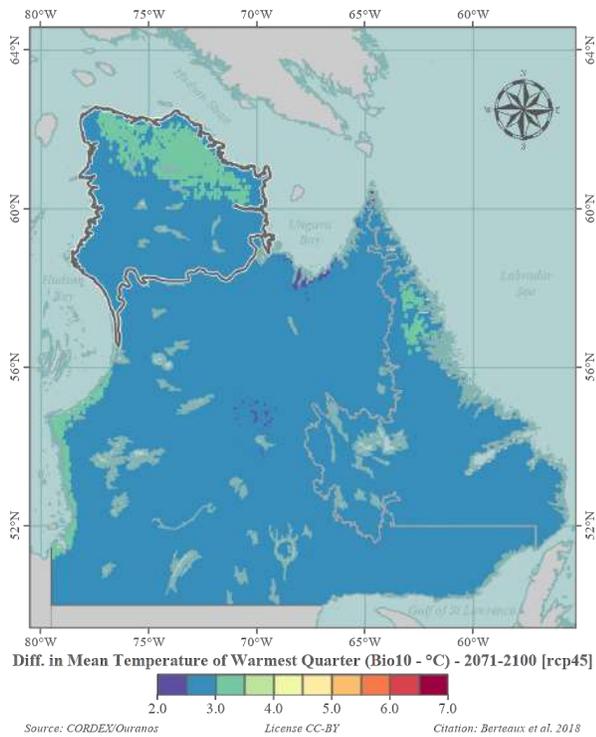


(a) RCP 4,5

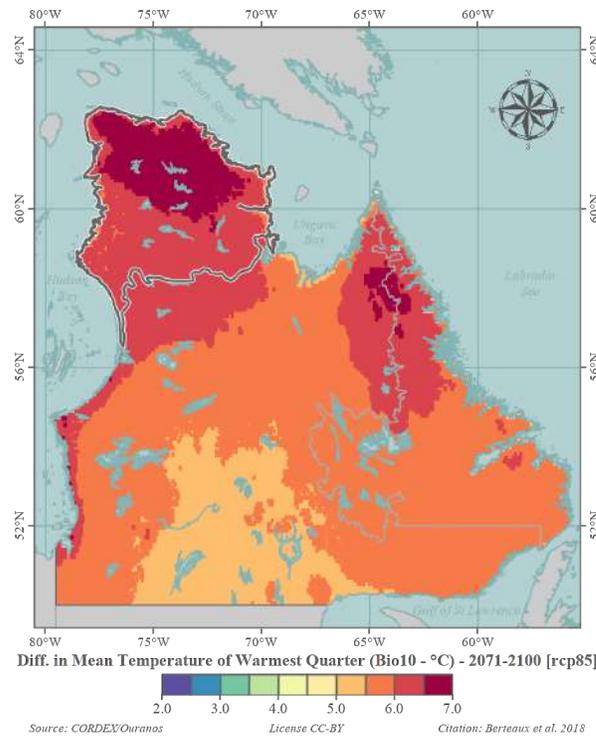


(b) RCP 8,5

FIGURE 19 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Température moyenne du trimestre le plus chaud (Bio10)

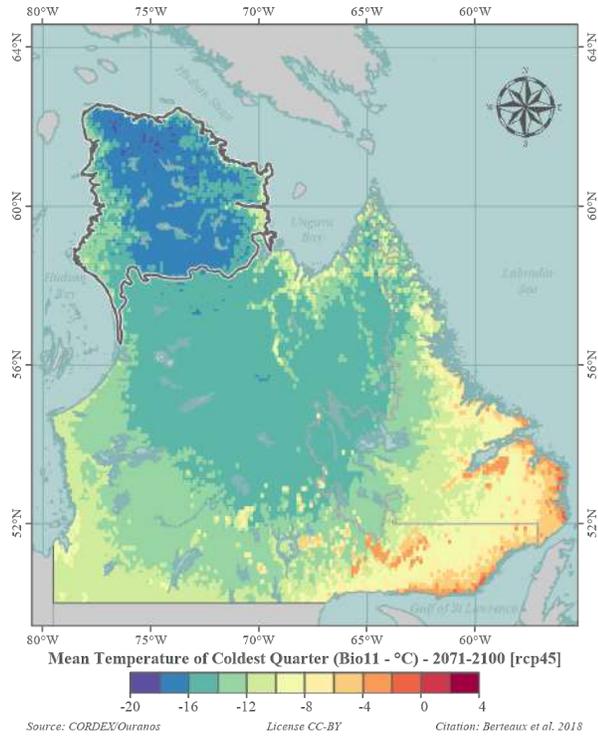


(a) RCP 4,5

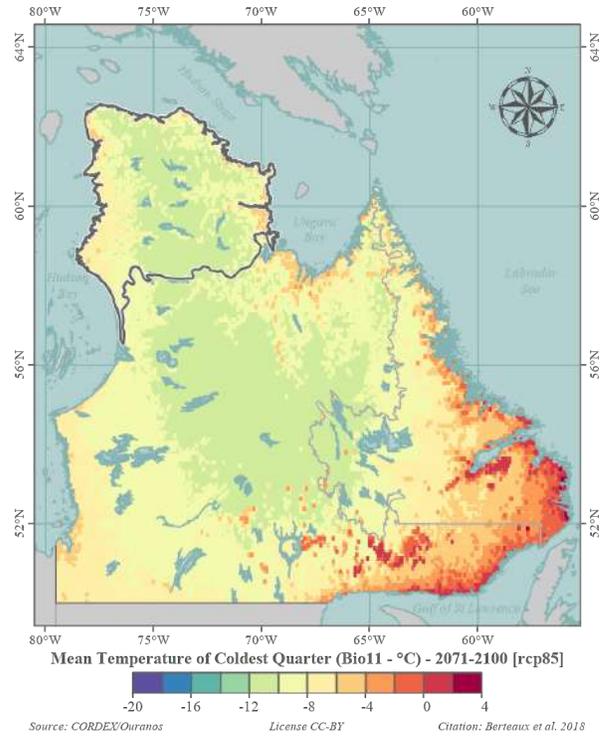


(b) RCP 8,5

FIGURE 20 – Écarts à la période de référence : Température moyenne du trimestre le plus chaud (Bio10)

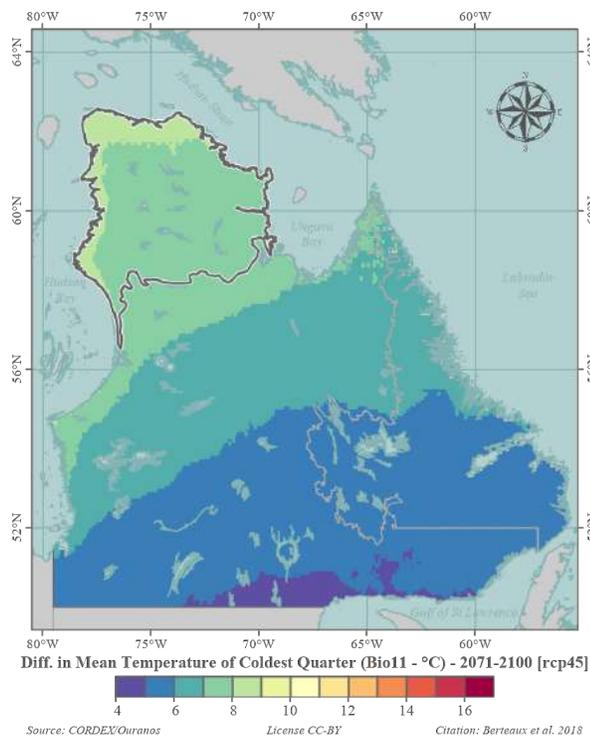


(a) RCP 4,5

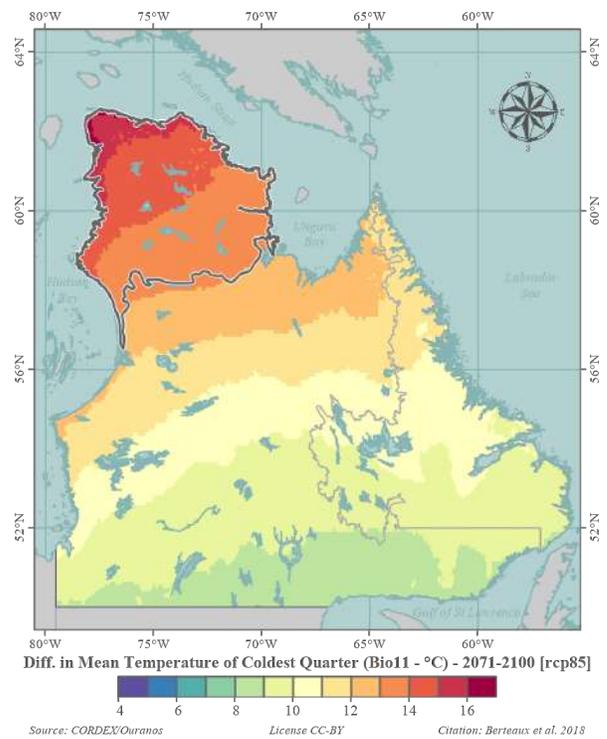


(b) RCP 8,5

FIGURE 21 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Température moyenne du trimestre le plus froid (Bio11)

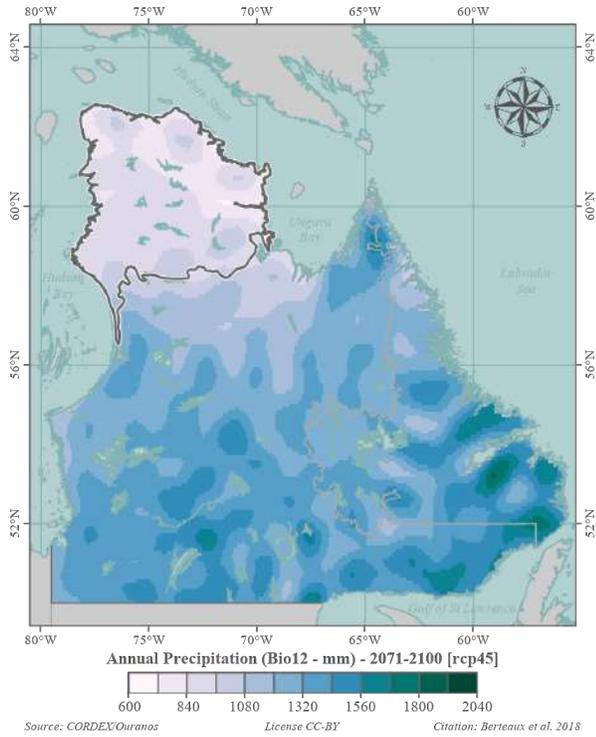


(a) RCP 4,5

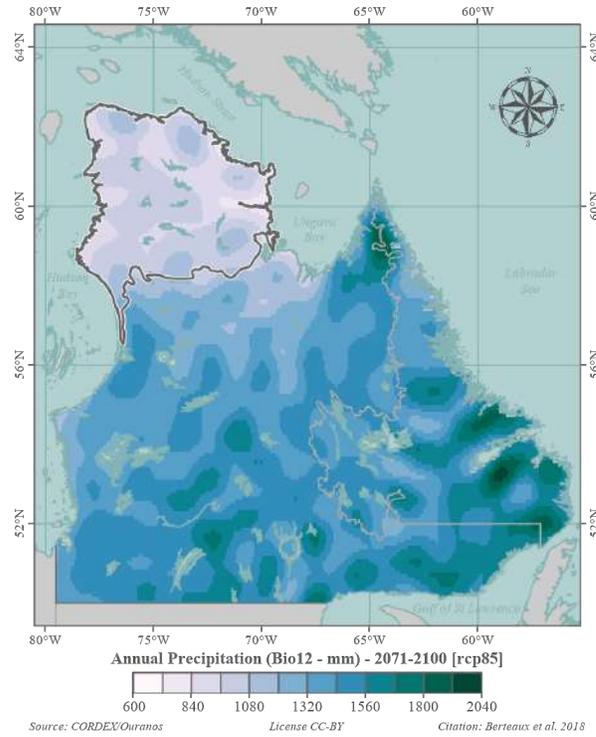


(b) RCP 8,5

FIGURE 22 – Écarts à la période de référence : Température moyenne du trimestre le plus froid (Bio11)

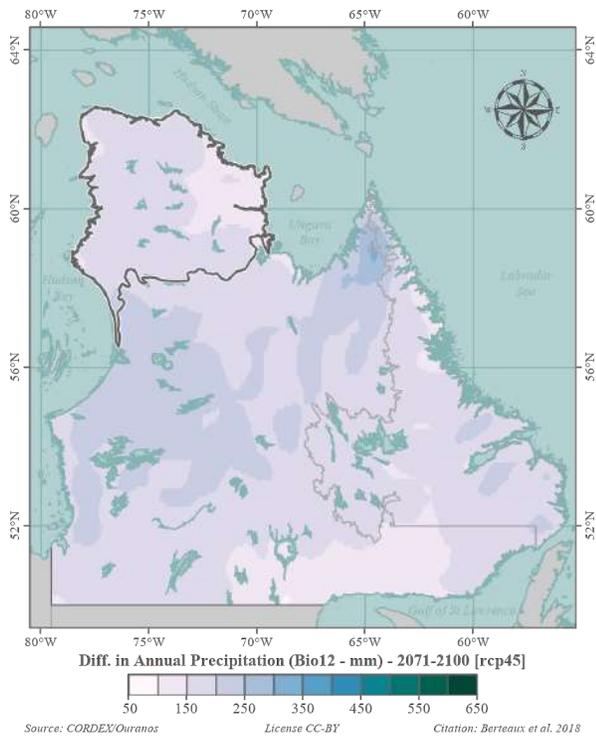


(a) RCP 4,5

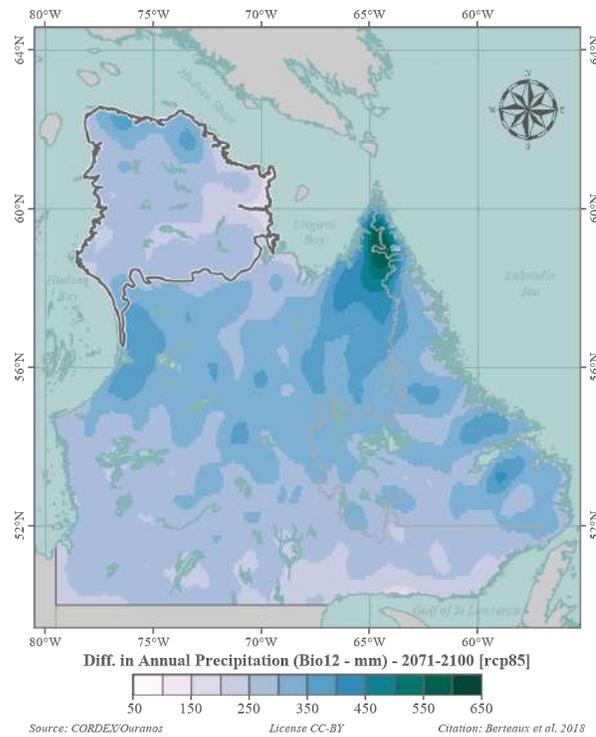


(b) RCP 8,5

FIGURE 23 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Précipitations annuelles totales (Bio12)

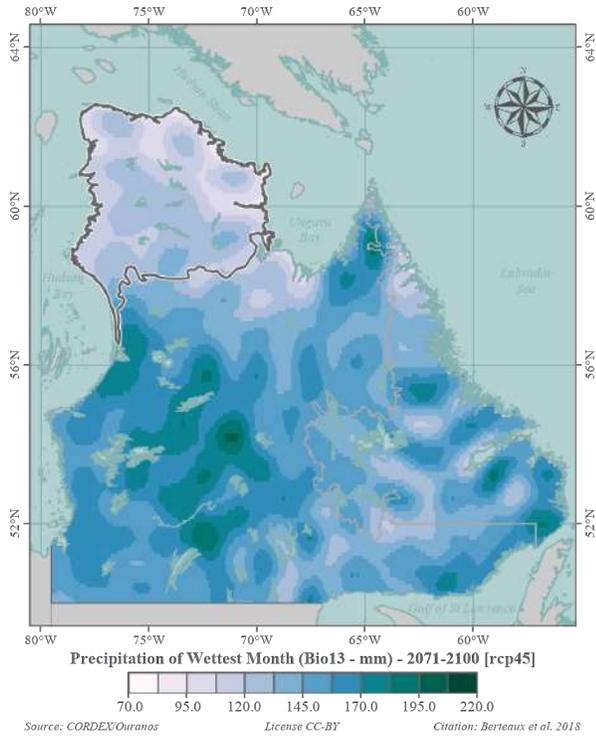


(a) RCP 4,5

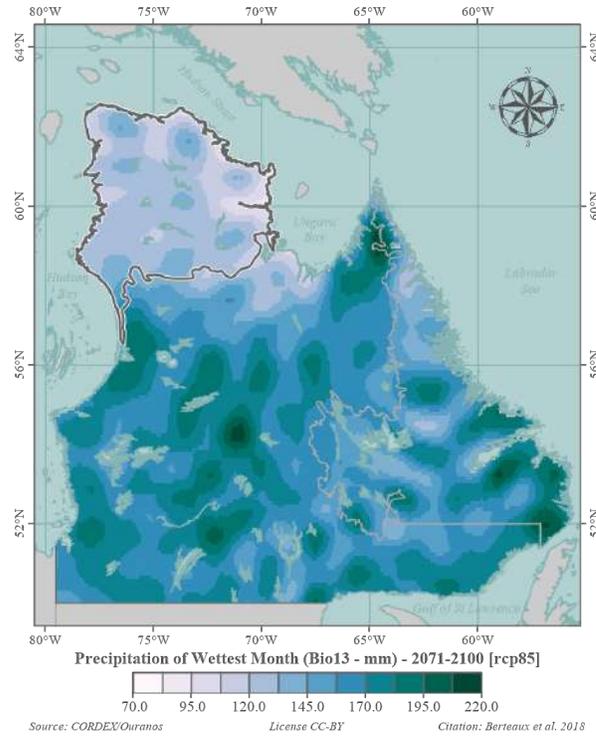


(b) RCP 8,5

FIGURE 24 – Écarts à la période de référence : Précipitations annuelles totales (Bio12)

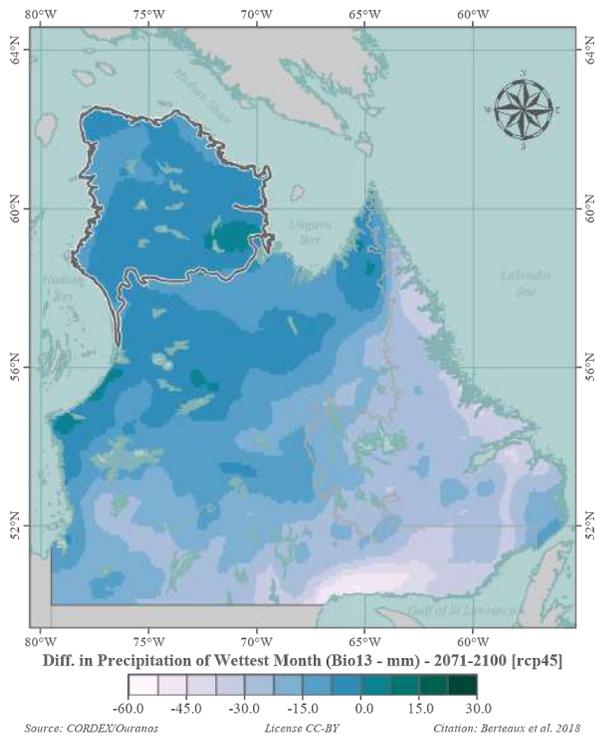


(a) RCP 4,5

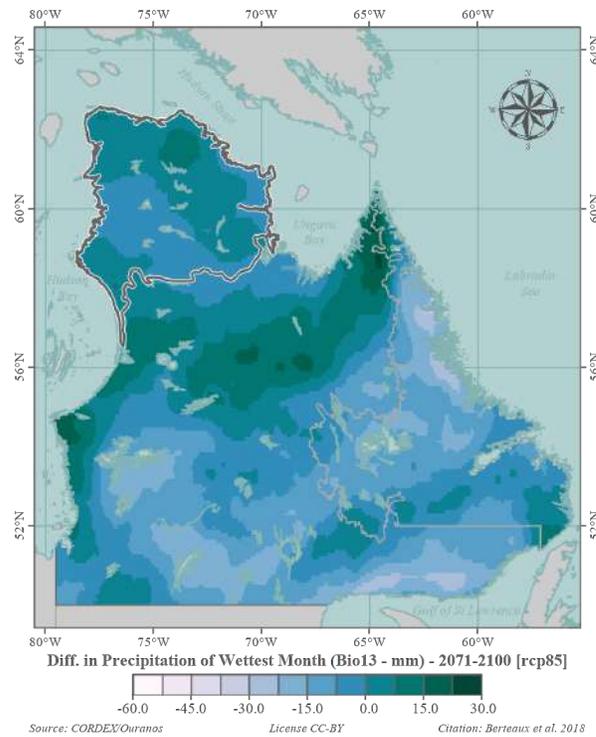


(b) RCP 8,5

FIGURE 25 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Précipitations du mois le plus humide (Bio13)

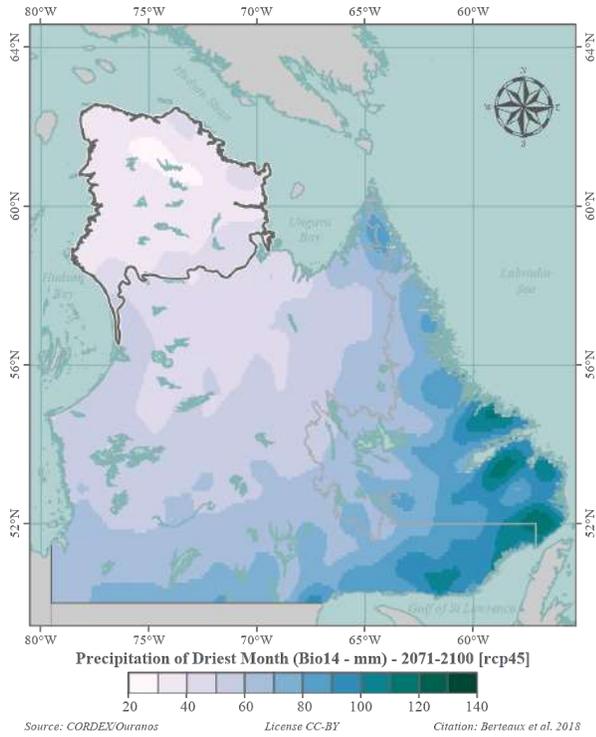


(a) RCP 4,5

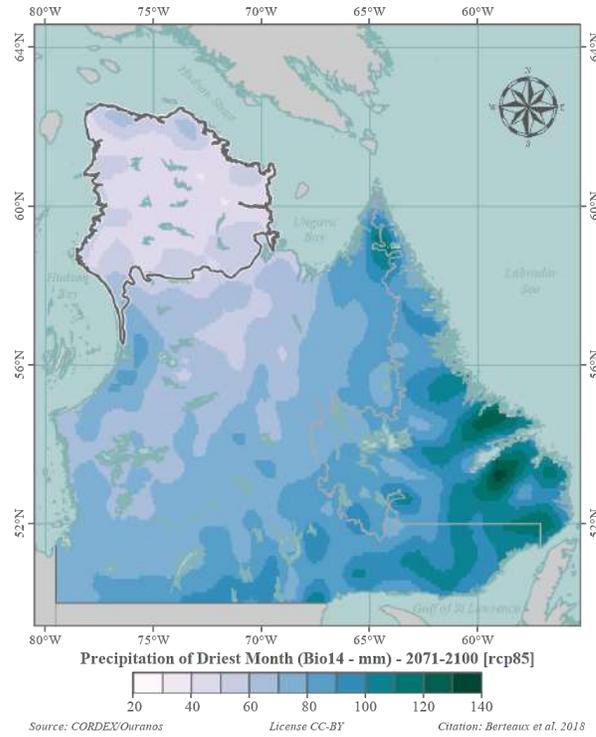


(b) RCP 8,5

FIGURE 26 – Écarts à la période de référence : Précipitations du mois le plus humide (Bio13)

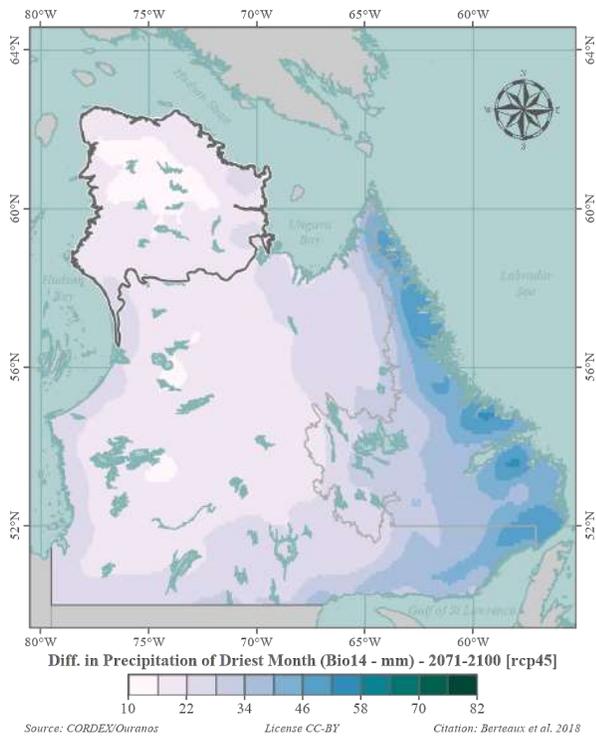


(a) RCP 4,5

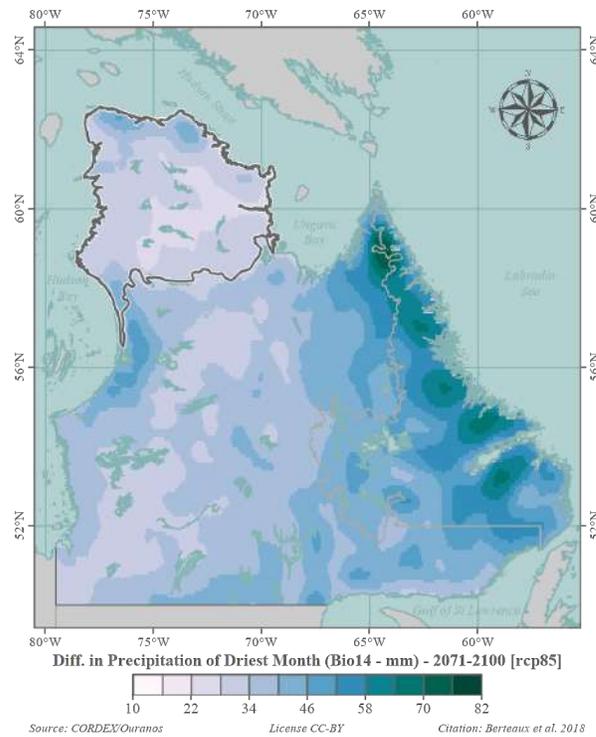


(b) RCP 8,5

FIGURE 27 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Précipitations du mois le plus sec (Bio14)

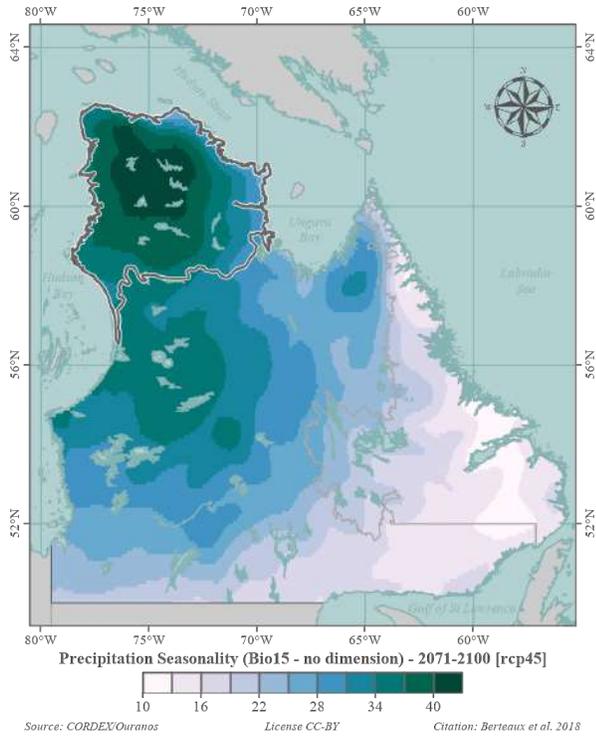


(a) RCP 4,5

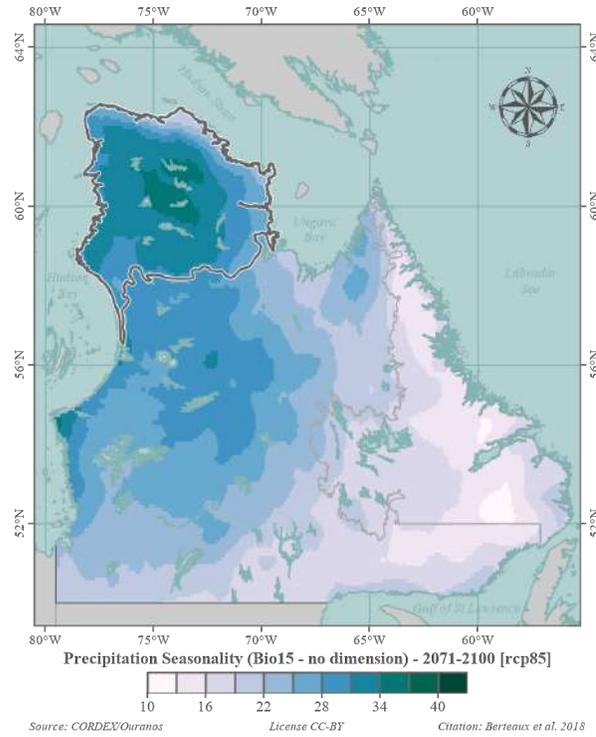


(b) RCP 8,5

FIGURE 28 – Écarts à la période de référence : Précipitations du mois le plus sec (Bio14)

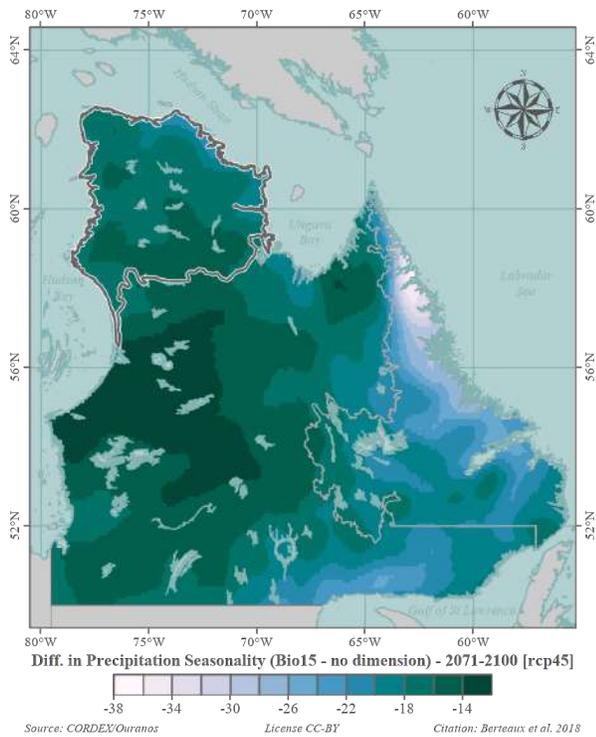


(a) RCP 4,5

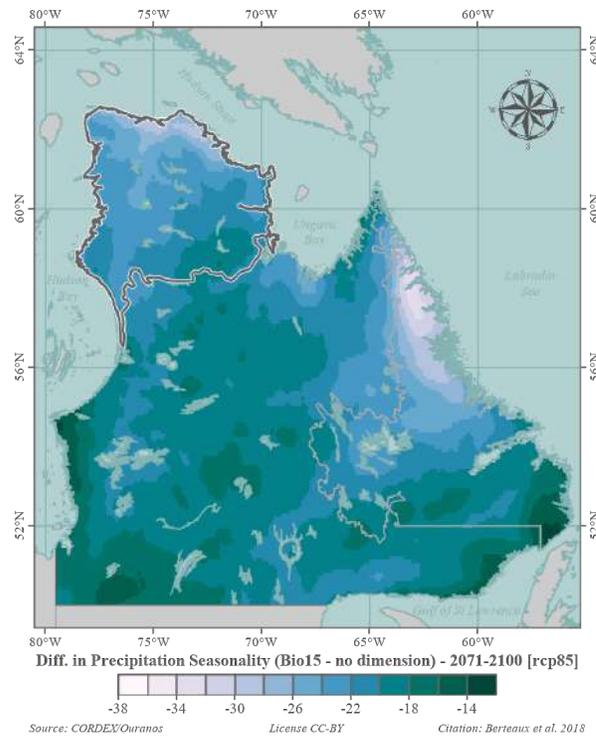


(b) RCP 8,5

FIGURE 29 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Saisonnalité des précipitations (Bio15)

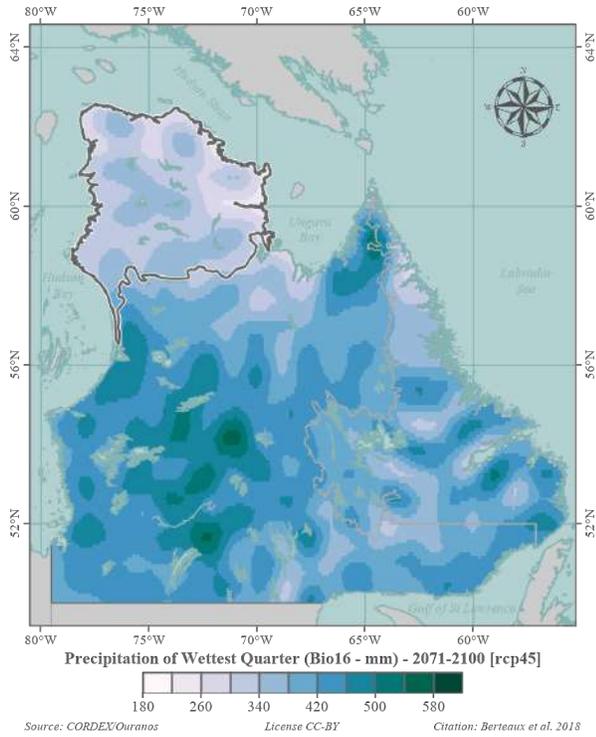


(a) RCP 4,5

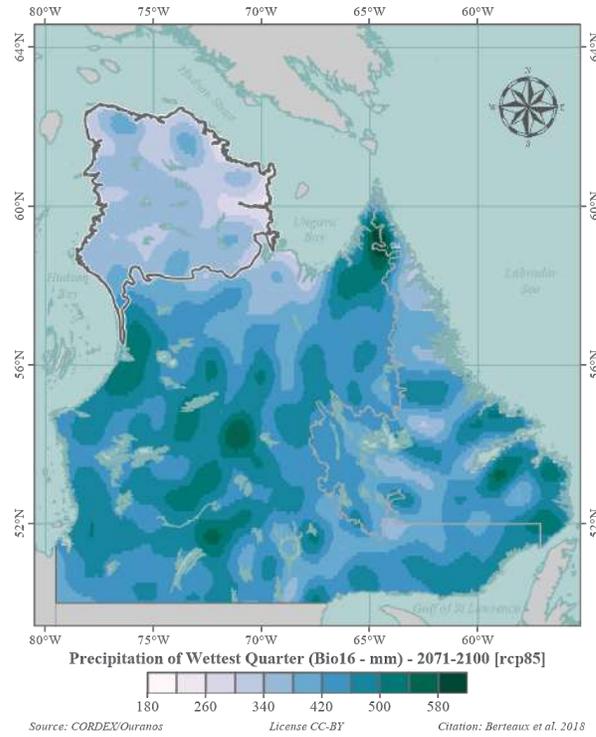


(b) RCP 8,5

FIGURE 30 – Écarts à la période de référence : Saisonnalité des précipitations (Bio15)

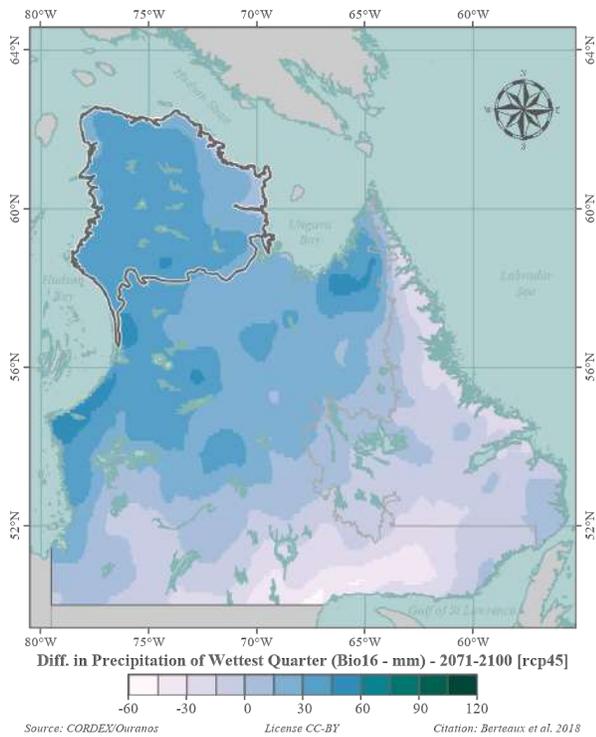


(a) RCP 4,5

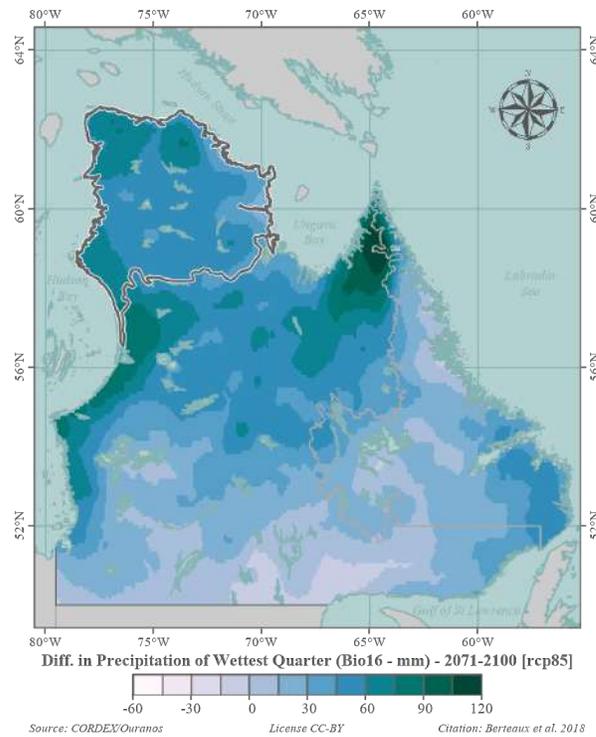


(b) RCP 8,5

FIGURE 31 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Précipitations du trimestre le plus humide (Bio16)

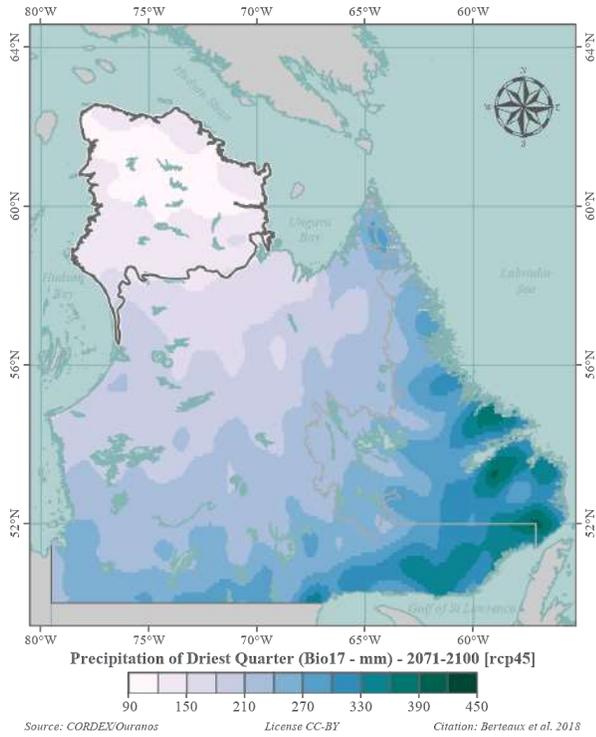


(a) RCP 4,5

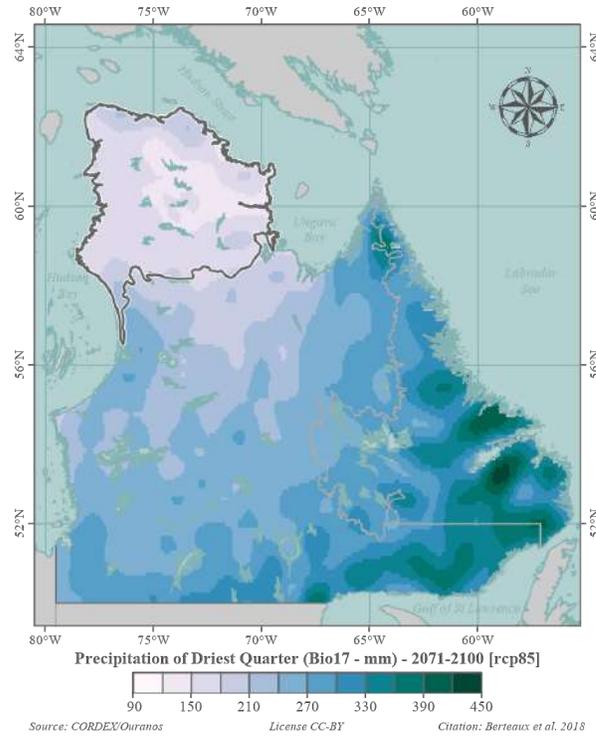


(b) RCP 8,5

FIGURE 32 – Écarts à la période de référence : Précipitations du trimestre le plus humide (Bio16)

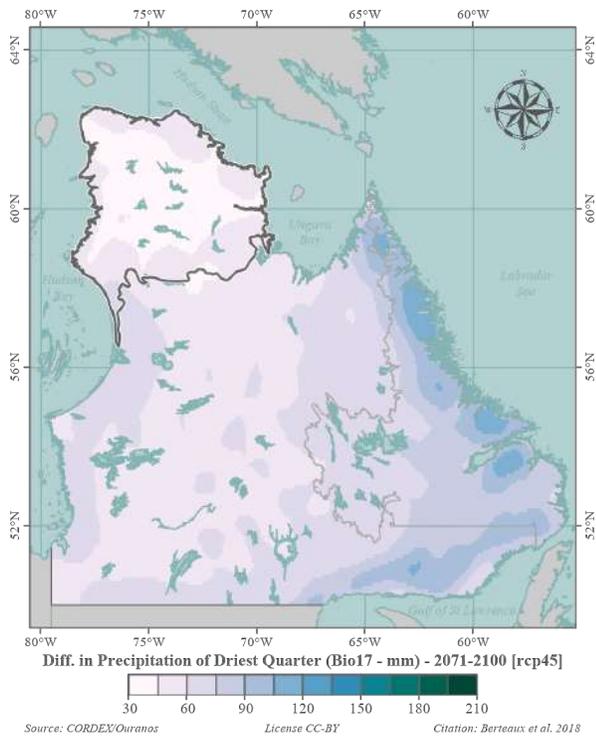


(a) RCP 4,5

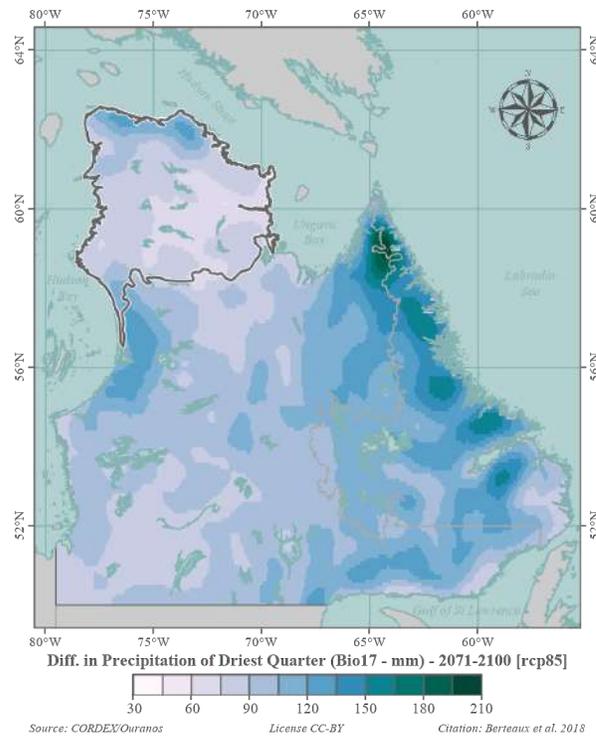


(b) RCP 8,5

FIGURE 33 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Précipitations du trimestre le plus sec (Bio17)

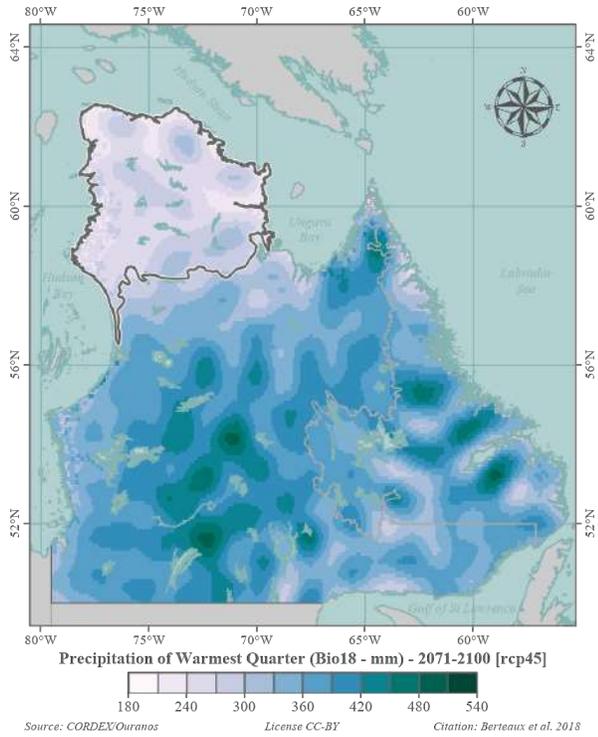


(a) RCP 4,5

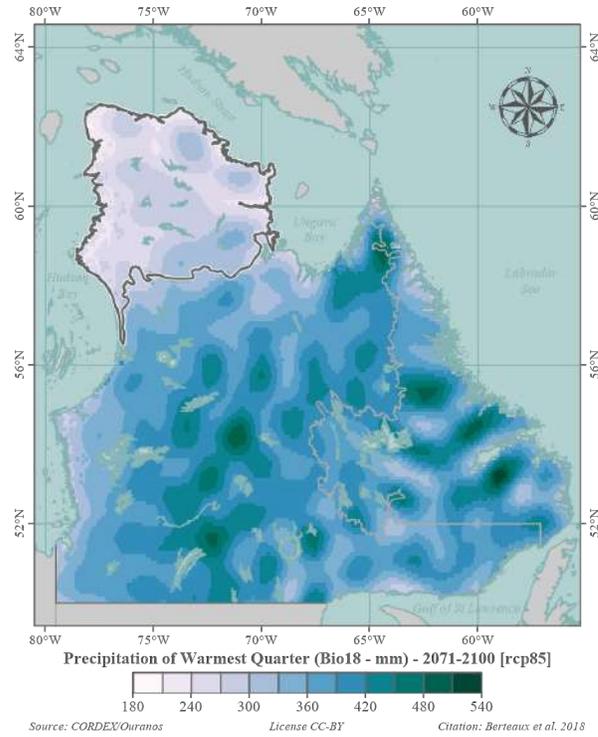


(b) RCP 8,5

FIGURE 34 – Écarts à la période de référence : Précipitations du trimestre le plus sec (Bio17)

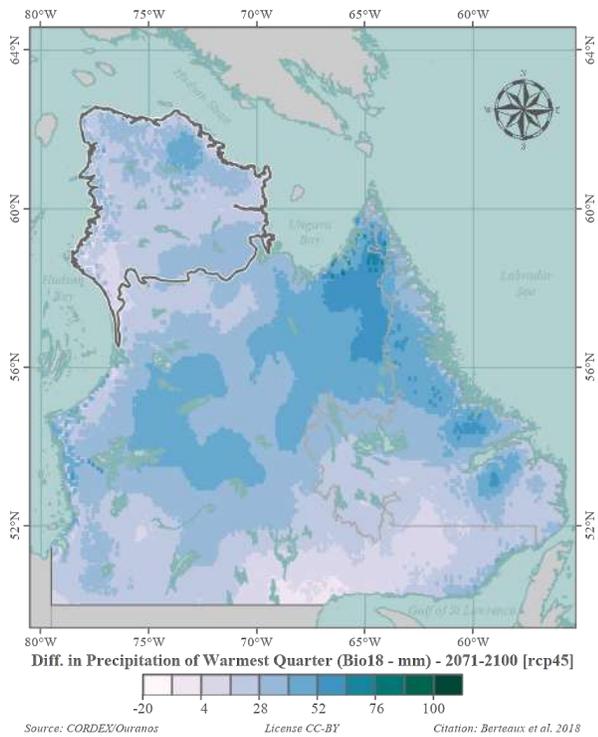


(a) RCP 4,5

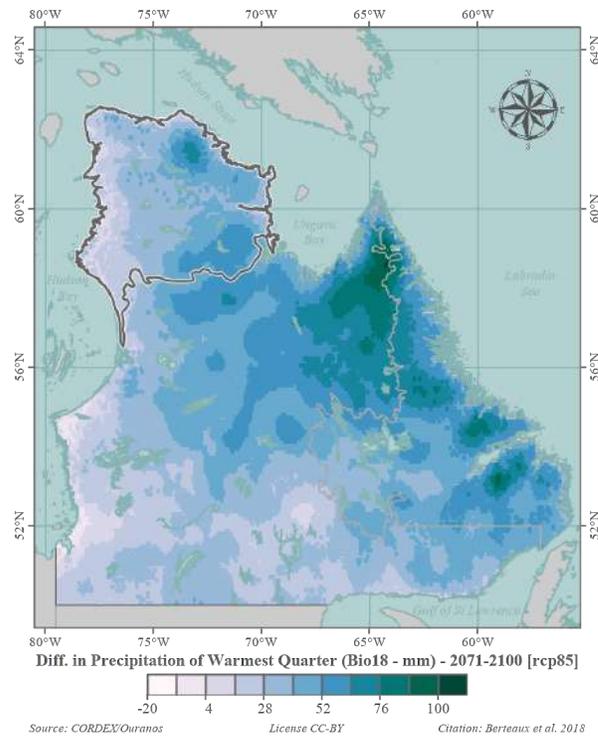


(b) RCP 8,5

FIGURE 35 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Précipitations du trimestre le plus chaud (Bio18)

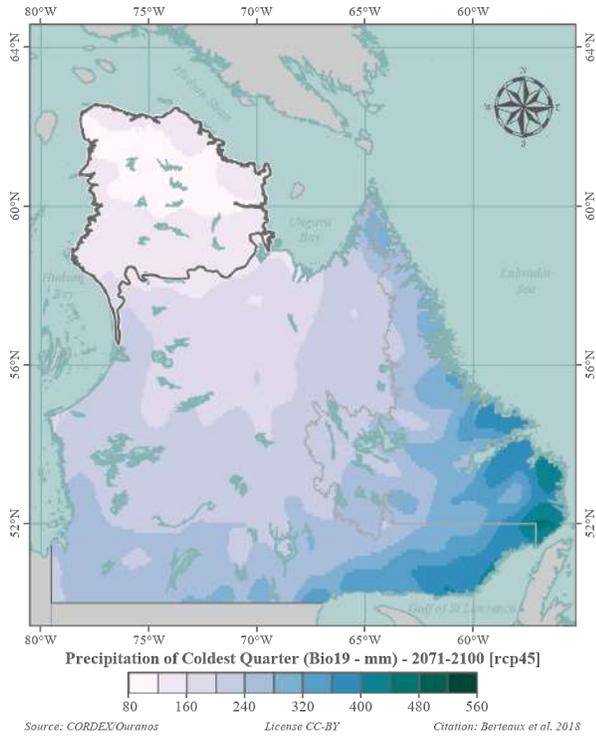


(a) RCP 4,5

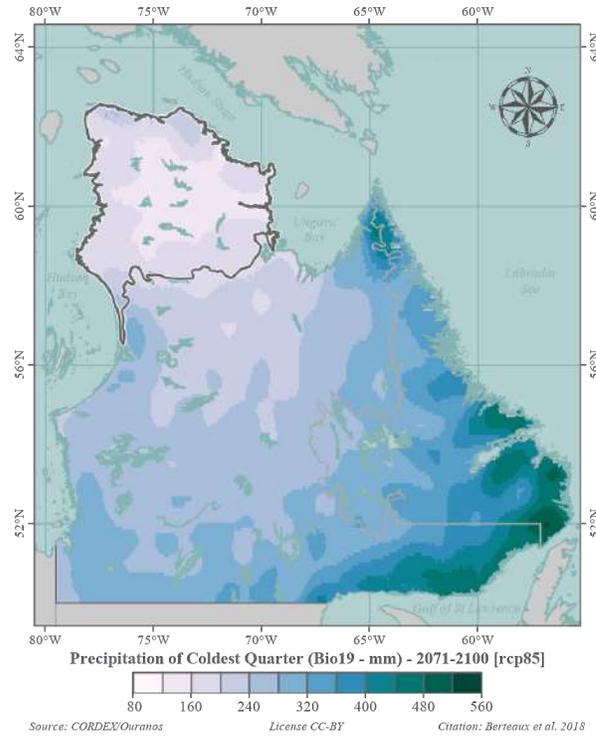


(b) RCP 8,5

FIGURE 36 – Écarts à la période de référence : Précipitations du trimestre le plus chaud (Bio18)

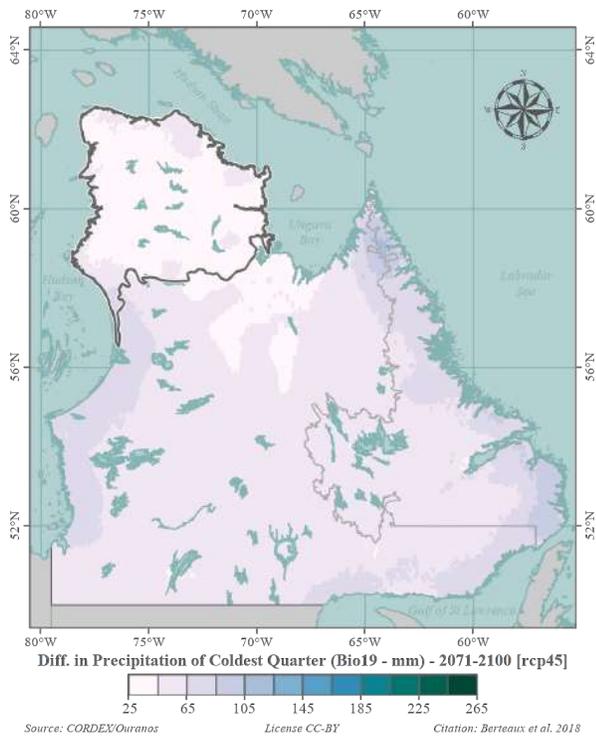


(a) RCP 4,5

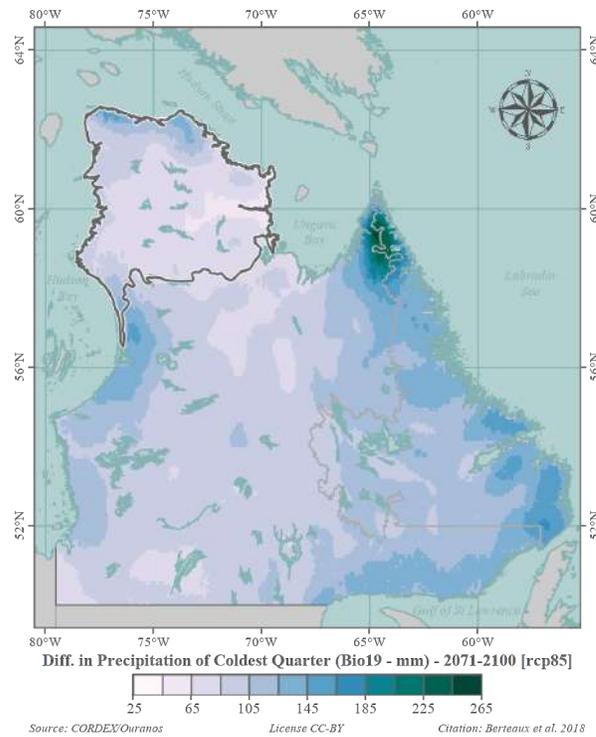


(b) RCP 8,5

FIGURE 37 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Précipitations du trimestre le plus froid (Bio19)

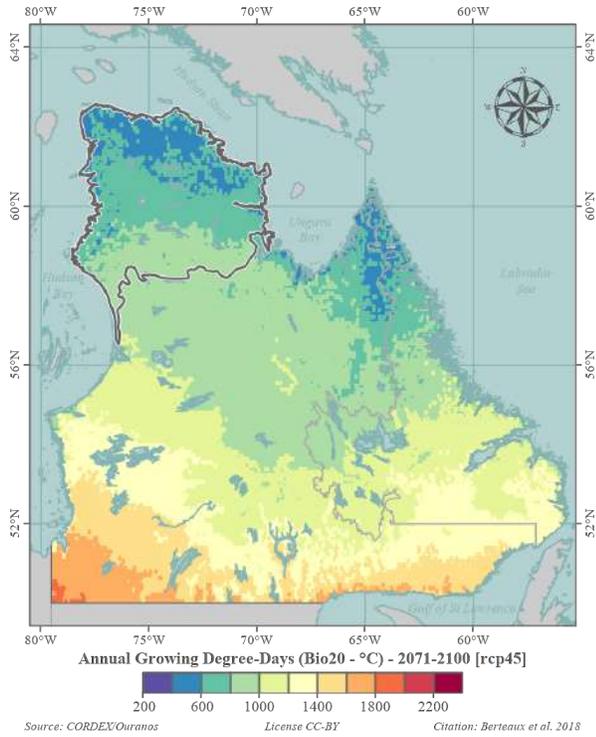


(a) RCP 4,5

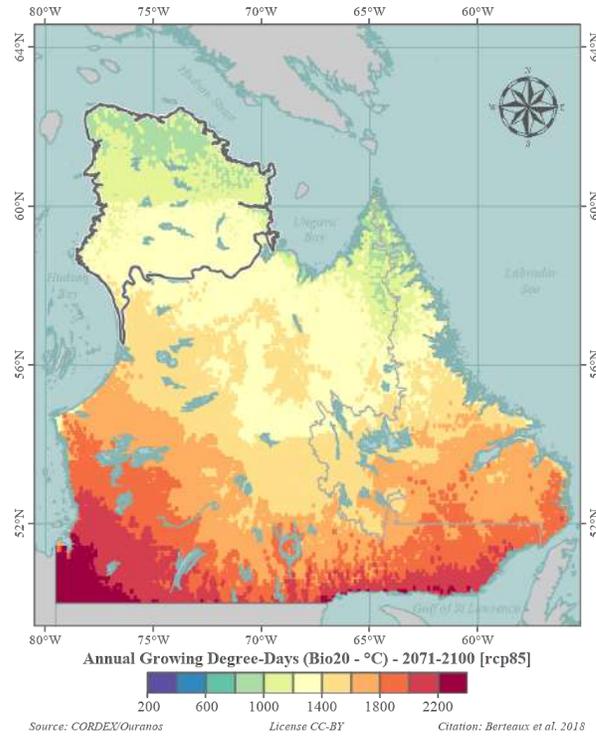


(b) RCP 8,5

FIGURE 38 – Écarts à la période de référence : Précipitations du trimestre le plus froid (Bio19)

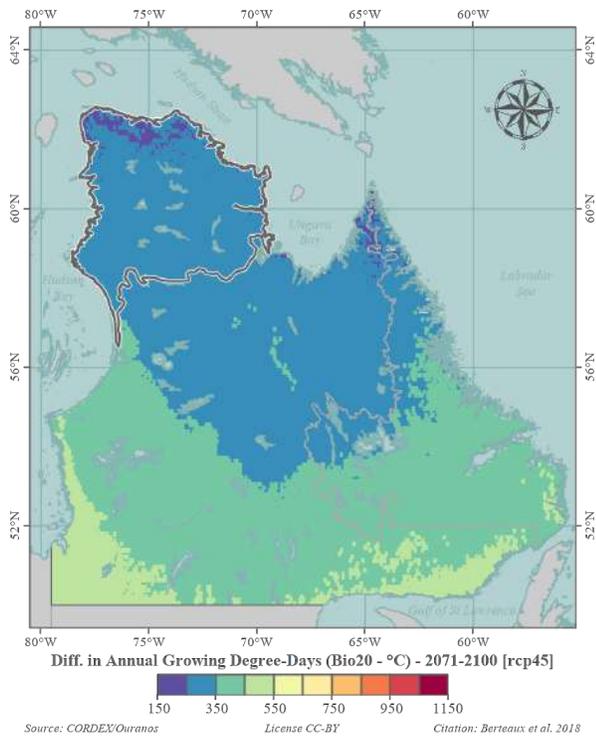


(a) RCP 4,5

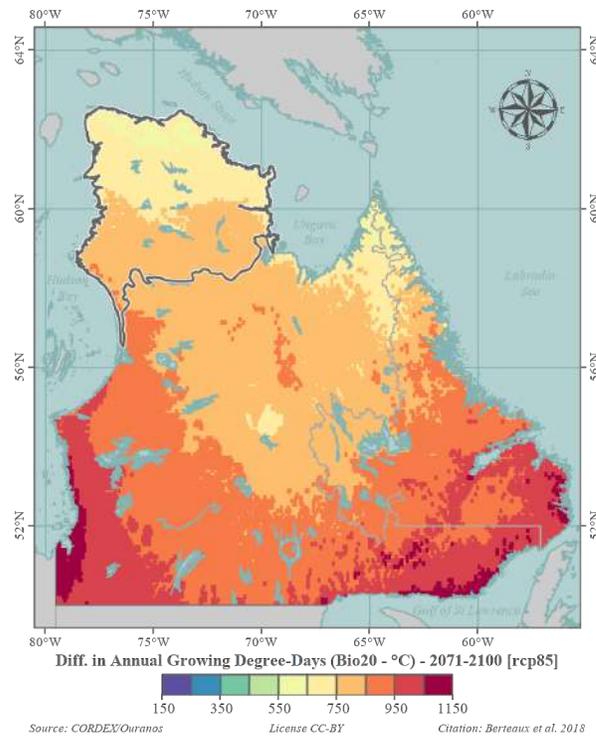


(b) RCP 8,5

FIGURE 39 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Degrés-jours de croissance annuel (Bio20)

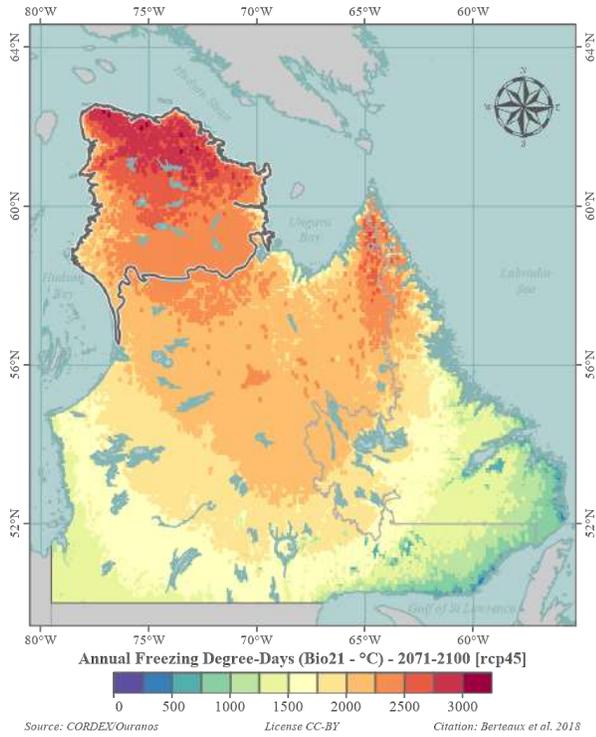


(a) RCP 4,5

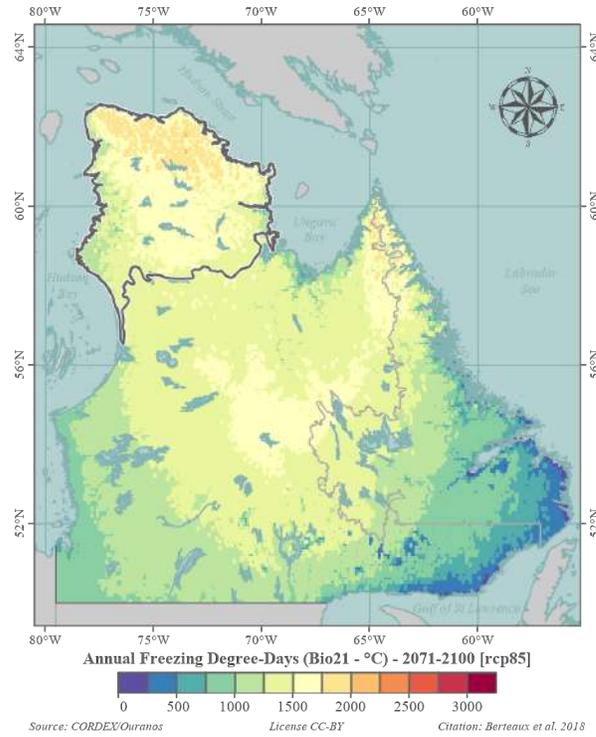


(b) RCP 8,5

FIGURE 40 – Écart à la période de référence : Degrés-jours de croissance annuel (Bio20)

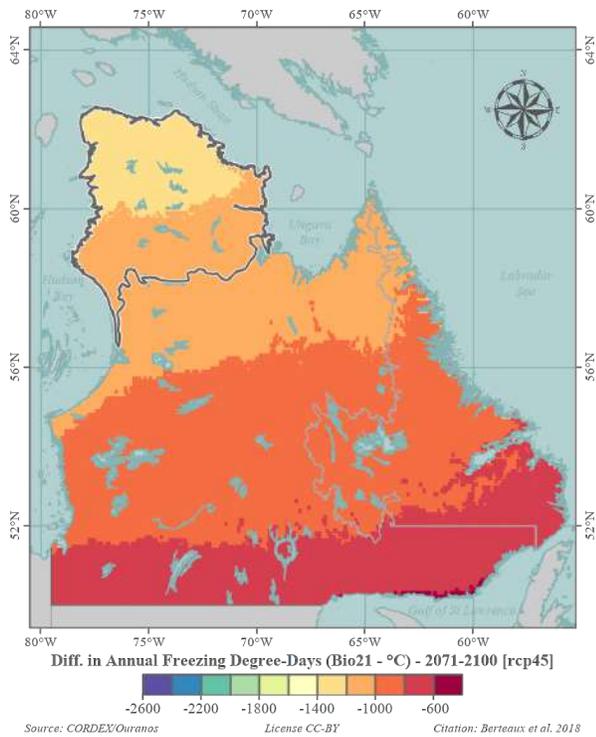


(a) RCP 4,5

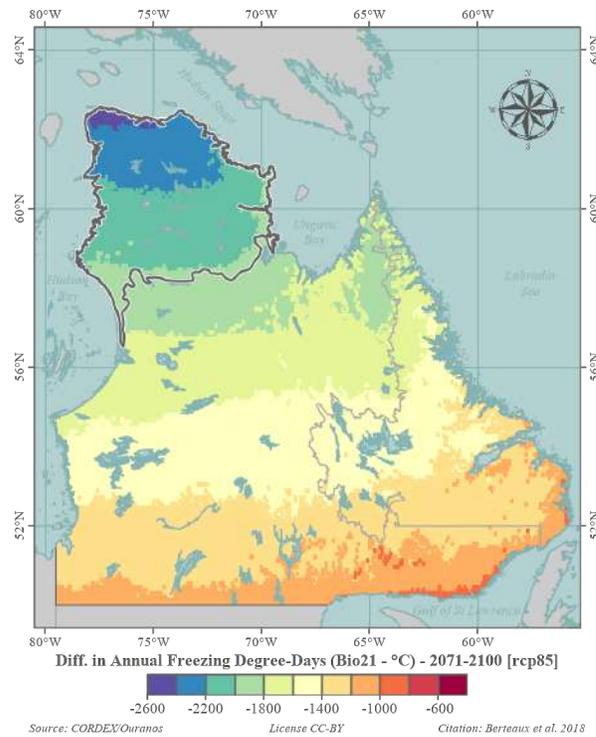


(b) RCP 8,5

FIGURE 41 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Degrés-jours de gel annuel (Bio21)

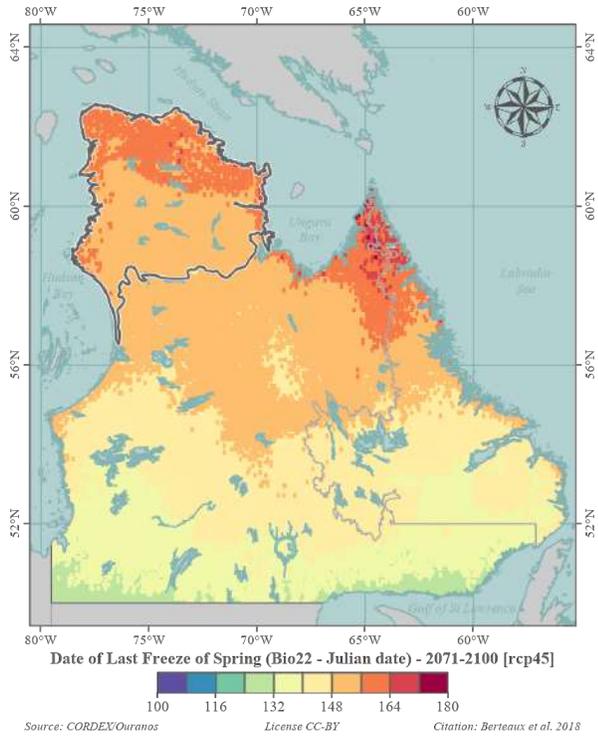


(a) RCP 4,5

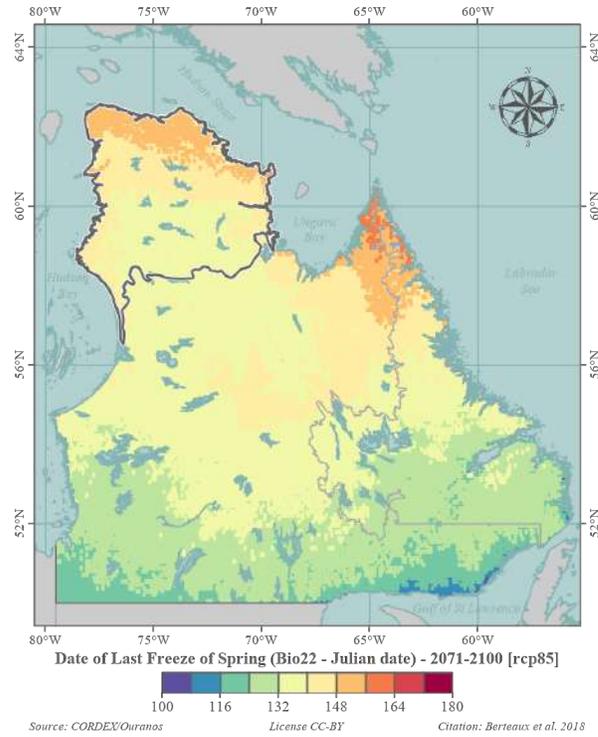


(b) RCP 8,5

FIGURE 42 – Écart à la période de référence : Degrés-jours de gel annuel (Bio21)

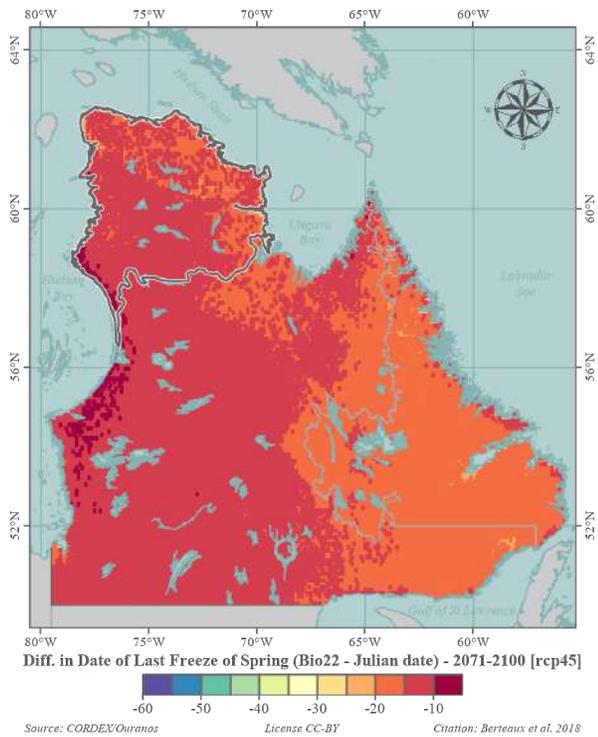


(a) RCP 4,5

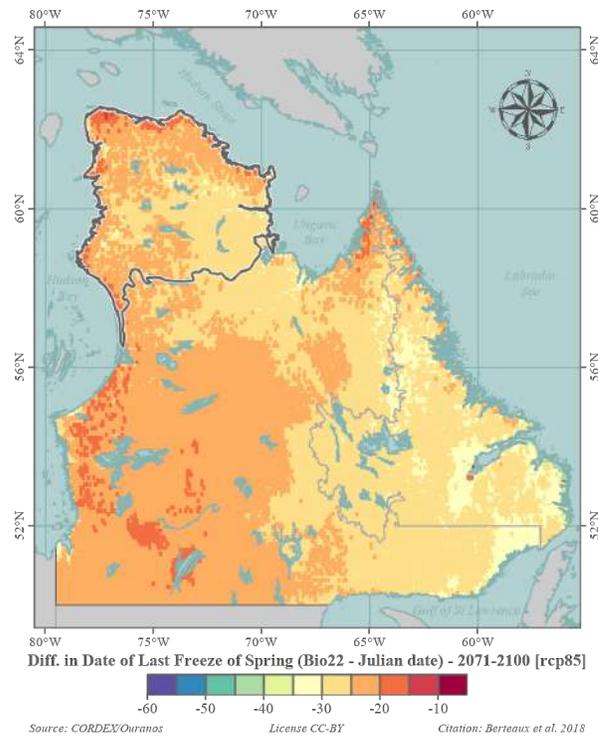


(b) RCP 8,5

FIGURE 43 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Date de dernier gel printanier (Bio22)

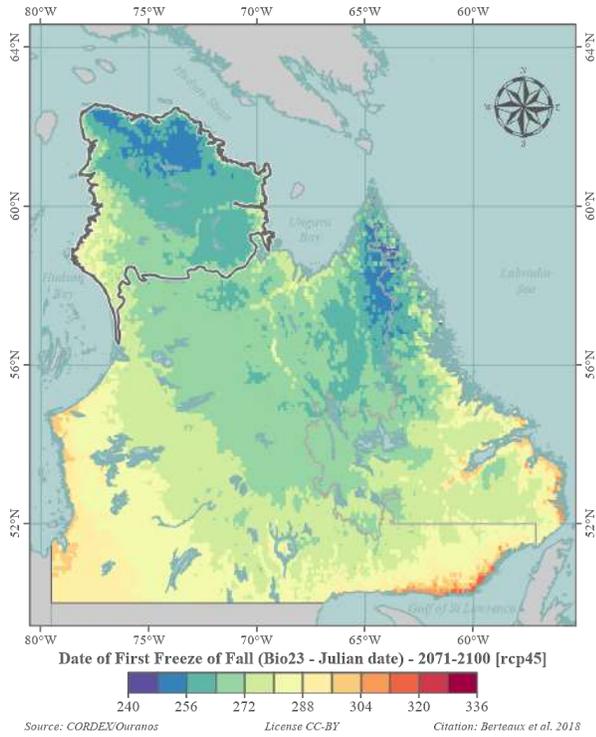


(a) RCP 4,5

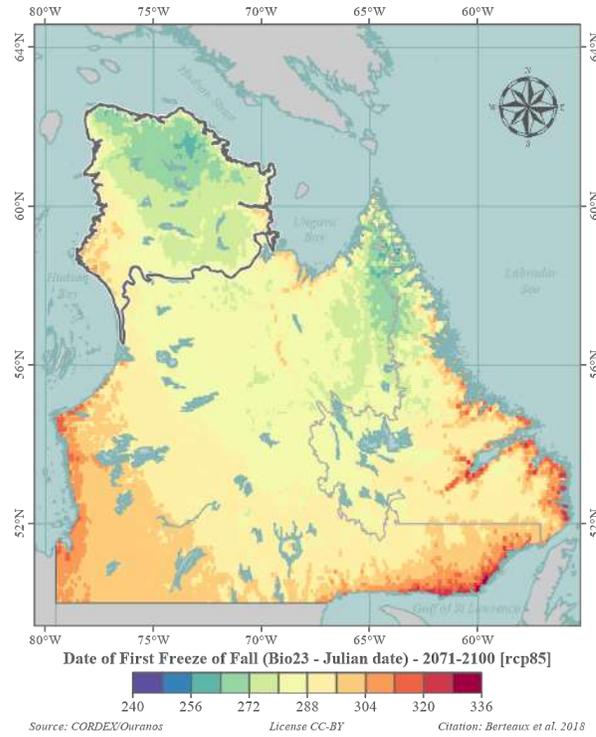


(b) RCP 8,5

FIGURE 44 – Écarts à la période de référence : Date de dernier gel printanier (Bio22)

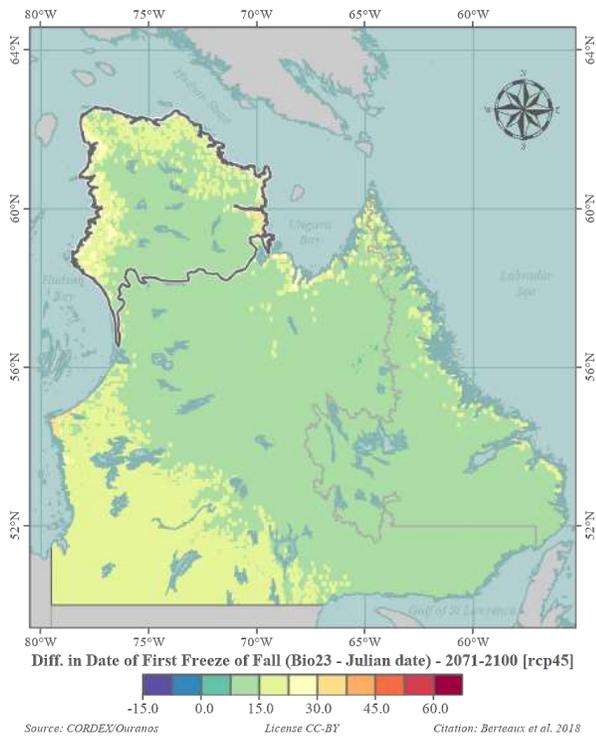


(a) RCP 4,5

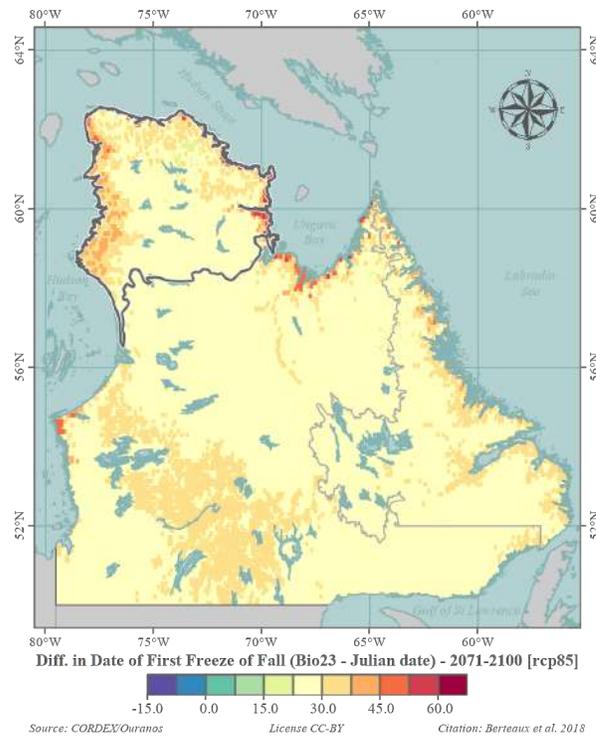


(b) RCP 8,5

FIGURE 45 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Date de premier gel automnal (Bio23)

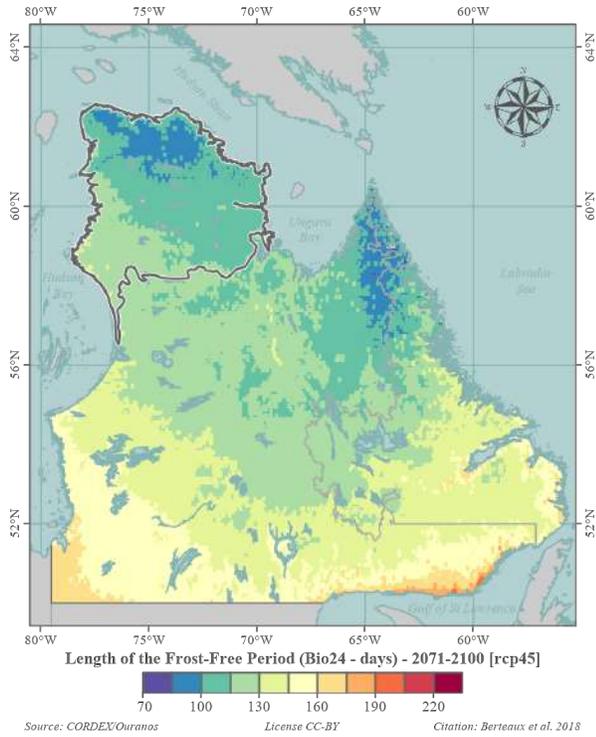


(a) RCP 4,5

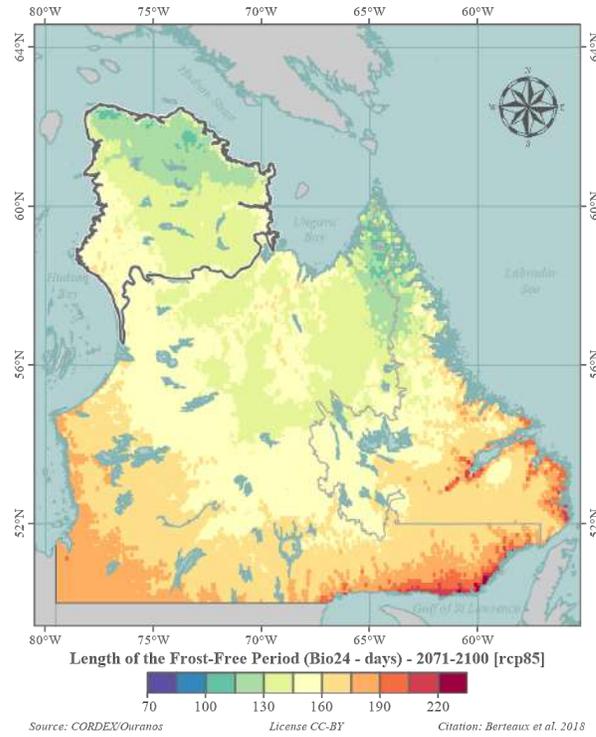


(b) RCP 8,5

FIGURE 46 – Écarts à la période de référence : Date de premier gel automnal (Bio23)

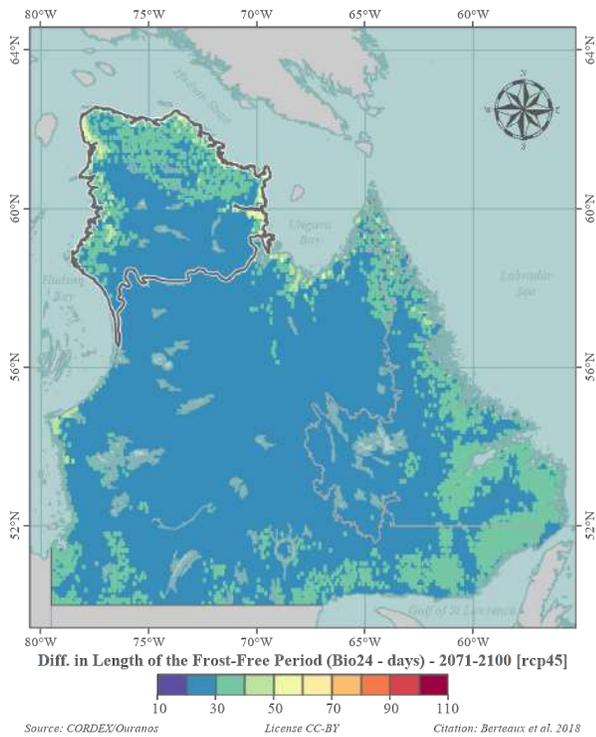


(a) RCP 4,5

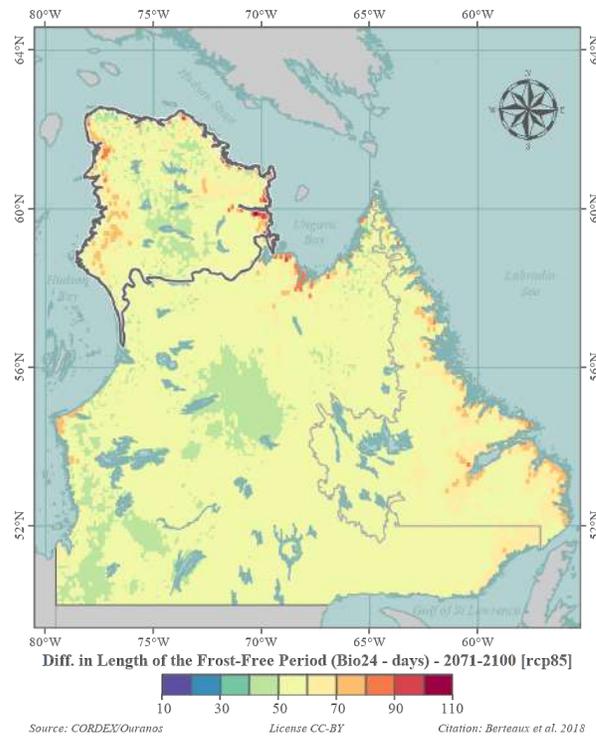


(b) RCP 8,5

FIGURE 47 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Longueur de la période sans gel (Bio24)

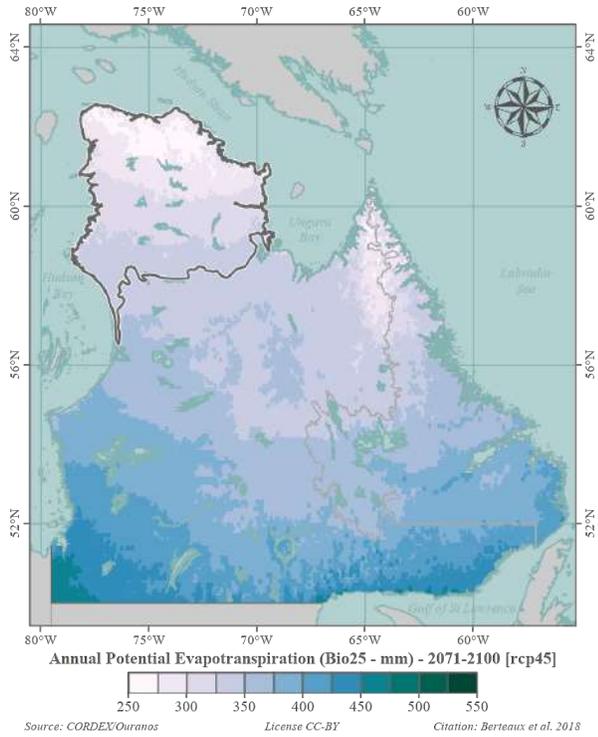


(a) RCP 4,5

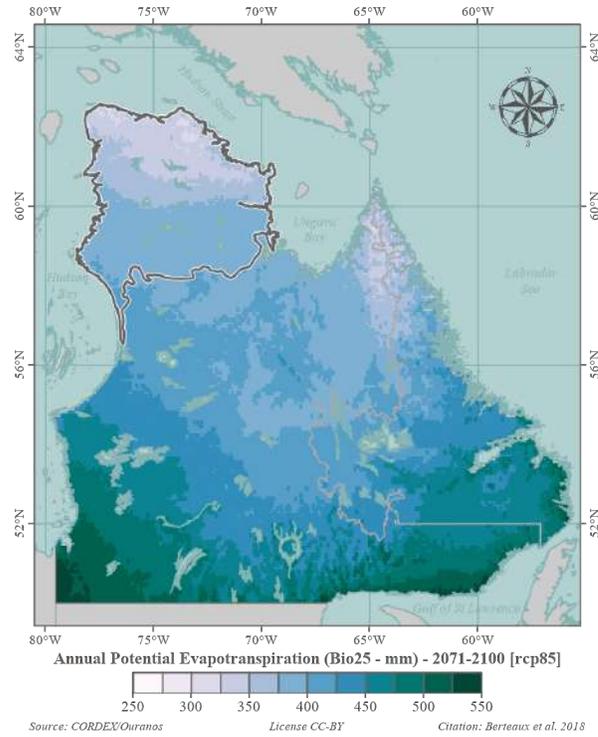


(b) RCP 8,5

FIGURE 48 – Écart à la période de référence : Longueur de la période sans gel (Bio24)

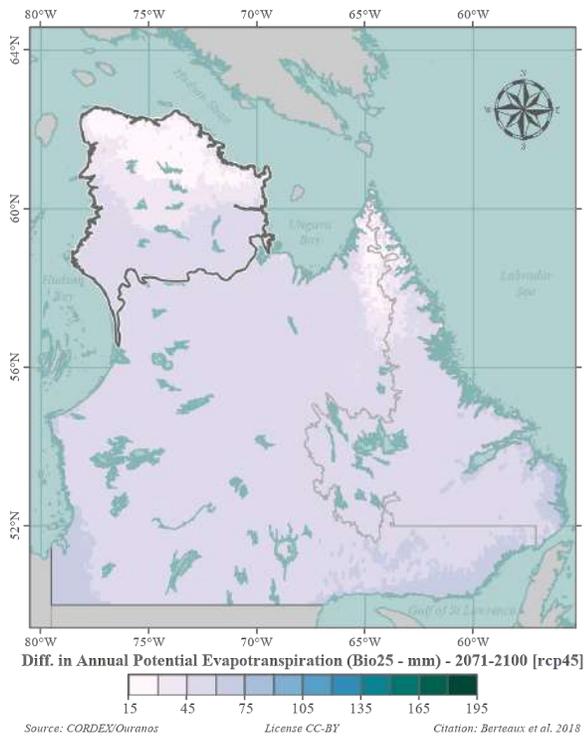


(a) RCP 4,5

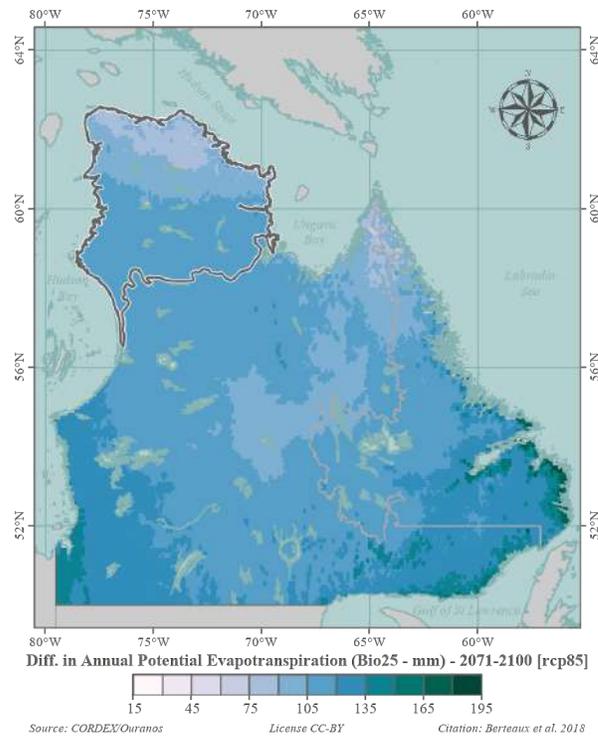


(b) RCP 8,5

FIGURE 49 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Évapotranspiration potentielle annuelle (Bio25)

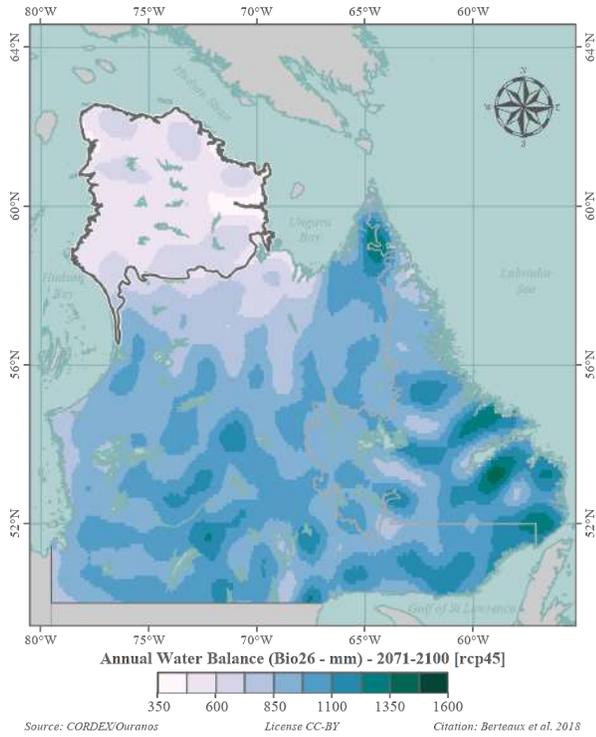


(a) RCP 4,5

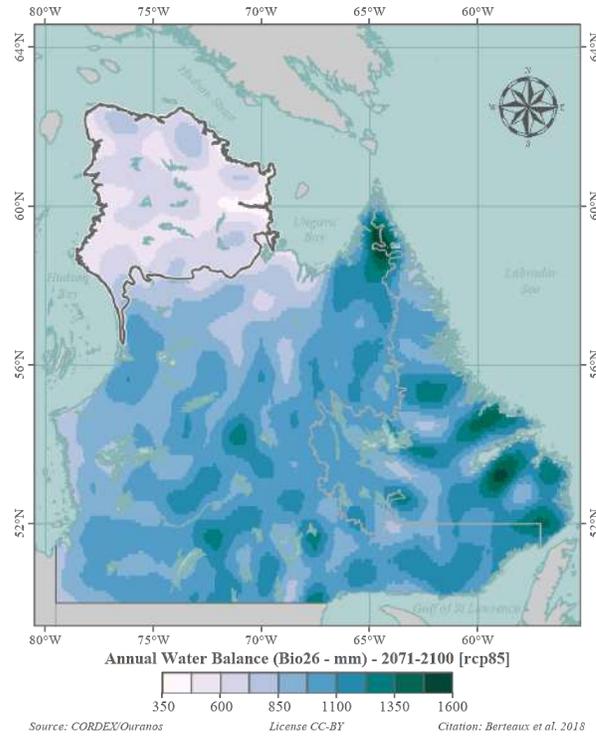


(b) RCP 8,5

FIGURE 50 – Écarts à la période de référence : Évapotranspiration potentielle annuelle (Bio25)

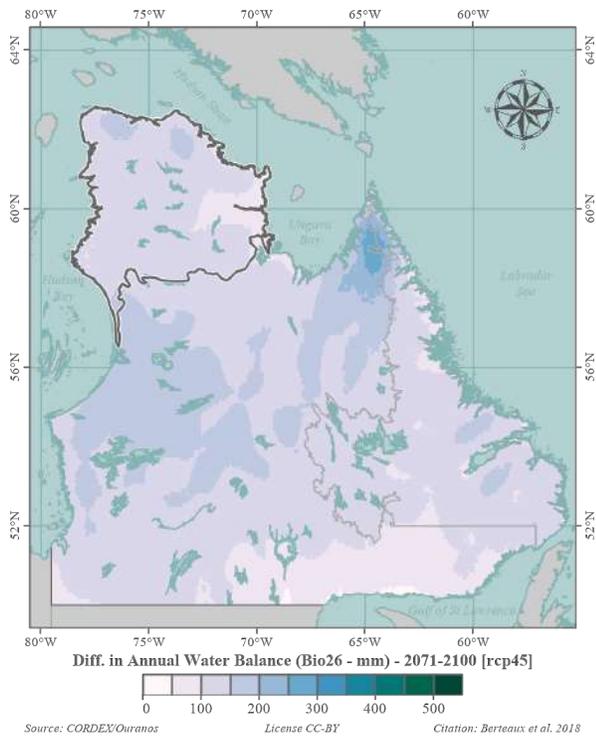


(a) RCP 4,5

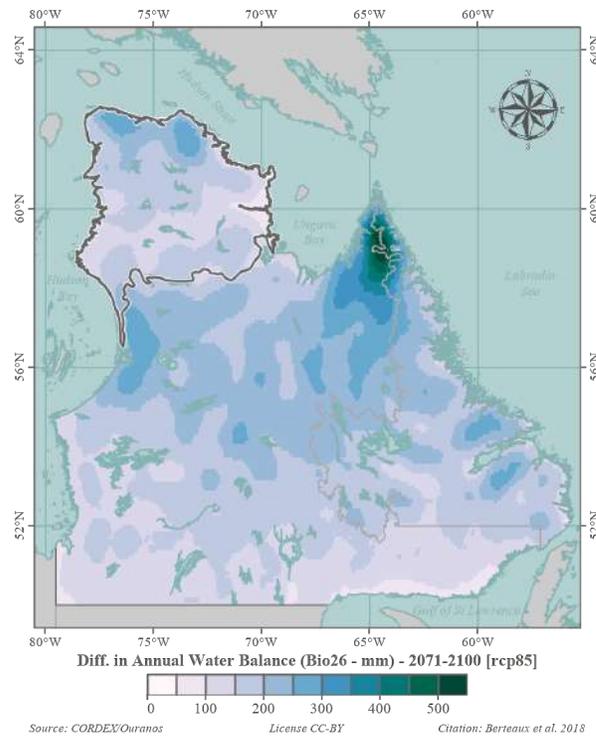


(b) RCP 8,5

FIGURE 51 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Bilan hydrique annuel (Bio26)

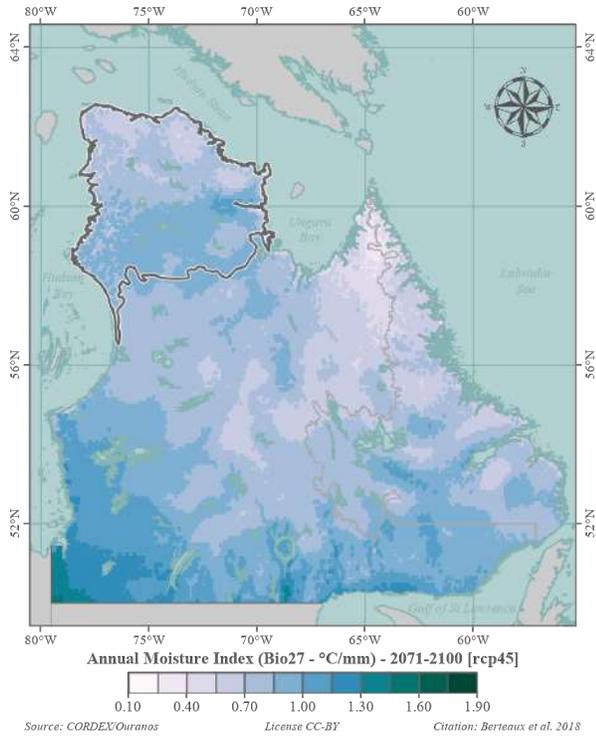


(a) RCP 4,5

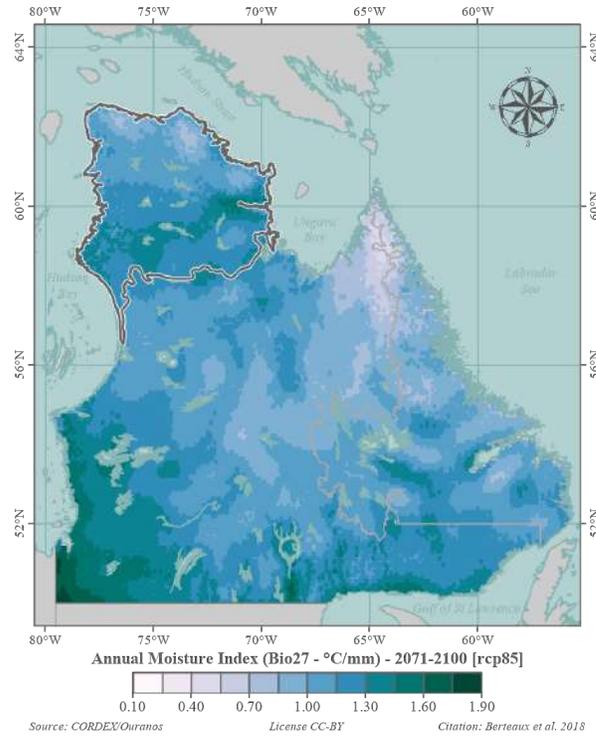


(b) RCP 8,5

FIGURE 52 – Écarts à la période de référence : Bilan hydrique annuel (Bio26)

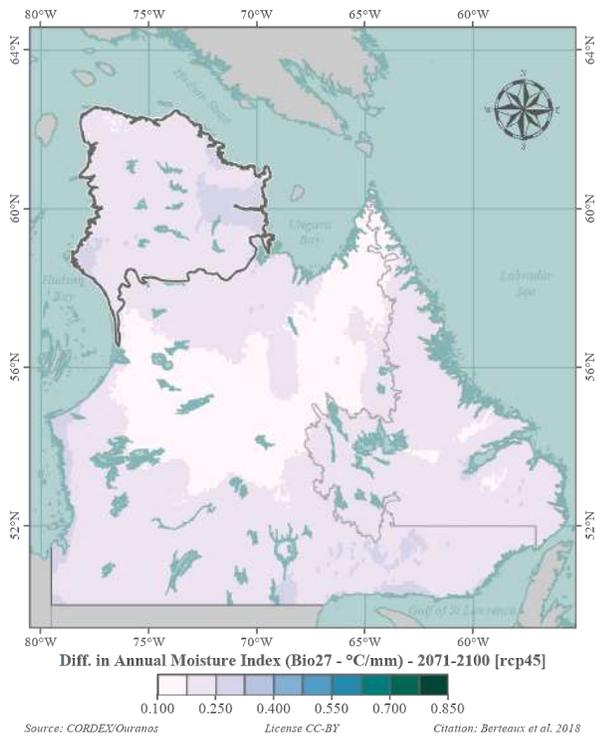


(a) RCP 4,5

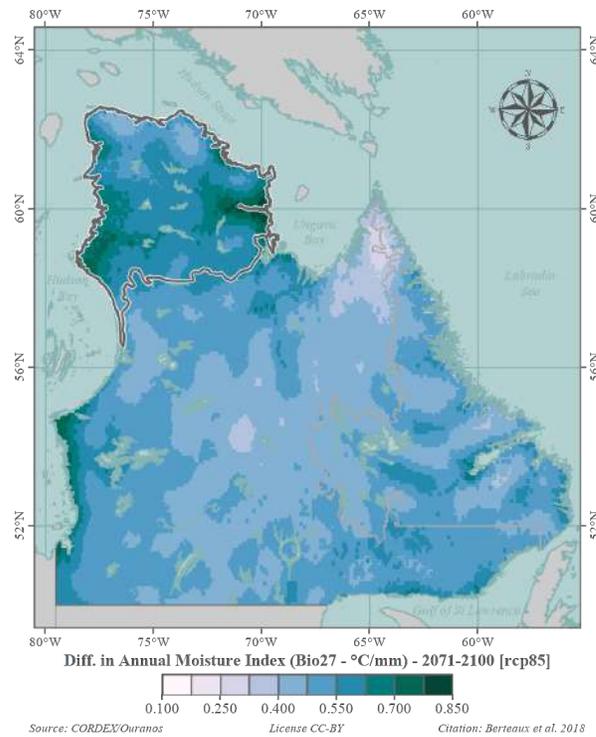


(b) RCP 8,5

FIGURE 53 – Conditions climatiques pour 2071-2100 : Indice d'humidité annuel (Bio27)



(a) RCP 4,5



(b) RCP 8,5

FIGURE 54 – Écarts à la période de référence : Indice d'humidité annuel (Bio27)

## Références aux données et métadonnées

### Métadonnées inscrites au Polar Data Catalogue (<https://www.polardata.ca>)

Berteaux D., N. Casajus and P. Ropars (2018) Tundra Nunavik : Set of 27 gridded climate variables projected during the 21<sup>st</sup> century under 10 climate change scenarios. Waterloo, Canada : Canadian Cryospheric Information Network (CCIN) #12893.

### Données archivées dans la collection Nordicana D (<http://www.cen.uqar.ca/nordicanad>)

Berteaux, D., Casajus, N. and Ropars, P. (2018) Tundra Nunavik : Set of 27 gridded bioclimate variables projected during the 21<sup>st</sup> century under 10 climate change scenarios for Labrador and the province of Quebec north of 50°N, v.1.0. Nordicana DXX, sous presse.

## Références bibliographiques

Casajus, N., Périé, C., Logan, T., Lambert, M.-C., deBlois, S. & Berteaux, D. (2016) An objective approach to select climate scenarios when projecting species distribution under climate change. *PLoS ONE*, **11**, e0152495.

Giorgi, F., Jones, C. & Asrar, G.R. (2009) Addressing climate information needs at the region level : The CORDEX framework. *WMO Bulletin*, **58**, 175–183.

Martynov, A., Laprise, R., Sushama, L., Winger, K., Separovic, L. & Dugas, B. (2013) Reanalysis-driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model version 5 : Model performance evaluation. *Climate Dynamics*, **41**, 2973–3005.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.-T., Chuang, H.-Y., Juang, H.-M., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Van Delst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., Van Den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.-K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.-Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R.W., Rutledge, G. & Goldberg, M. (2010) The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **91**, 1015–1057.

Separovic, L., Alexandru, A., Laprise, R., Martynov, A., Sushama, L., Winger, K., Tete, K. & Valin, M. (2013) Present climate and climate change over North America as simulated by the fifth-generation Canadian Regional Climate Model. *Climate Dynamics*, **41**, 3167–3201.

# Portrait potentiel de la biodiversité de la toundra du Nunavik pour la période 2071–2100

*Dominique Berteaux, Nicolas Casajus et Pascale Ropars*

*Université du Québec à Rimouski*

## Résumé

Ce document présente l'approche de modélisation de la répartition des espèces de la toundra du Nunavik développée dans le cadre du projet *Changements climatiques et toundra du Nunavik : exposition, sensibilité et vulnérabilité*. Il se divise en trois parties : 1) description des données ; 2) présentation de la modélisation de niche ; 3) présentation de l'indice de vulnérabilité écosystémique ; 4) atlas de biodiversité.

## Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>1 Données disponibles</b>	<b>2</b>
1.1 Données de répartition d'espèces . . . . .	2
1.2 Traits fonctionnels et données biologiques et écologiques . . . . .	3
1.3 Relations trophiques . . . . .	4
1.4 Variables bioclimatiques . . . . .	4
<b>2 Modélisation de niche</b>	<b>5</b>
2.1 Description de l'approche . . . . .	5
2.2 Impacts potentiels des changements climatiques sur la répartition des espèces . . . . .	5
<b>3 Indice de vulnérabilité écosystémique</b>	<b>6</b>
<b>4 Atlas de biodiversité</b>	<b>7</b>
<b>Références aux données et métadonnées</b>	<b>37</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>38</b>

**Citation suggérée :** Berteaux D., N. Casajus et P. Ropars (2018) Portrait potentiel de la biodiversité de la toundra du Nunavik pour la période 2071–2100. *Rapport présenté au Consortium Ouranos sur la climatologie régionale et les changements climatiques*. Université du Québec à Rimouski, Québec, Canada, 38 pages.

# Introduction

Le projet *Changements climatiques et toundra du Nunavik : exposition, sensibilité et vulnérabilité* a dressé un portrait des effets potentiels des changements climatiques sur les écosystèmes de la toundra arctique du Nunavik. Pour ce faire, des modèles de niche ont été construits afin de modéliser la répartition des espèces présentes dans la toundra arctique du Nunavik. Les espèces actuellement absentes de cette région, mais qui pourraient potentiellement retrouver leurs conditions climatiques favorables dans cette région à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle ont également été considérées. À partir des modèles de niche construits, ces répartitions ont par la suite été projetées dans le futur sous différents scénarios de changements climatiques. Dans une seconde étape, des réseaux trophiques entre espèces ont été bâtis à partir des aires de répartition modélisées (1981-2010, période de référence) et projetées (périodes futures, 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100) et les effets potentiels des changements climatiques sur les écosystèmes ont alors été quantifiés. Ce présent document présente la démarche de modélisation de niche, la construction des réseaux trophiques et le calcul de l'indice de vulnérabilité des écosystèmes terrestres aux changements climatiques pour l'horizon 2071-2100.

## 1 Données disponibles

### 1.1 Données de répartition d'espèces

#### 1.1.1 Mammifères et oiseaux

Les espèces dont les aires de répartition ont été modélisées se répartissent en deux grands groupes : les mammifères et les oiseaux. Étant donné la rareté de l'information relative à la répartition des espèces au Nunavik, nous avons utilisé les zones d'occurrence (ou polygones de répartition) des différentes espèces étudiées. Bien que moins précises que des données ponctuelles récoltées sur le terrain, les zones d'occurrence ont néanmoins l'avantage de permettre de modéliser l'ensemble des espèces présentes dans l'aire d'étude. Pour les mammifères, les données proviennent de la base de données *Digital Distribution Maps* de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (IUCN, 2014), tandis que pour les oiseaux, nous avons utilisé la base de données *Bird Species Distribution Maps of the World*, administrée conjointement par *BirdLife International* et *NatureServe* (BirdLife International & NatureServe, 2015). Ces deux bases de données sont très similaires et contiennent pour chaque espèce des polygones spatiaux (*shapefiles*) pour chaque période phénologique importante (migration, nidification, hivernage, etc.).

La procédure de sélection des espèces de mammifères et d'oiseaux comportait 4 étapes :

- i. Sélection des aires de résidence et de nidification (exclusion des couloirs migratoires) ;
- ii. Intersection des polygones avec la grille climatique ;
- iii. Rasterisation des polygones (toutes les cellules de la grille superposant le(s) polygone(s) sont considérées comme présentes et toutes les autres comme absentes) ;
- iv. Sélection des espèces dont la prévalence (nombre d'occurrences) était suffisante (examen visuel) et inférieure à 100% (si la prévalence était de 100%, l'espèce n'était pas modélisée mais elle était prise en compte lors de la construction des réseaux trophiques).

La distribution spatiale de 183 espèces (37 mammifères et 146 oiseaux) a été modélisée et projetée dans le futur sous les scénarios de changements climatiques (Tableau 1). Pour les analyses de réseaux trophiques, 194 espèces ont été utilisées (ajout de 6 espèces de mammifères et 5 espèces d'oiseaux dont la prévalence dans l'aire d'étude était 100%).

TABLE 1 – Nombre d’espèces retenues pour les modèles de niche

	Mammifères	Oiseaux
Espèces rejetées <sup>1</sup>	0	42
Espèces non modélisées <sup>2</sup>	6	5
Espèces modélisées et projetées	37	146
Espèces modélisées mais non projetées <sup>3</sup>	4	26

### 1.1.2 Arthropodes et plantes

Nous avons inclus les grands groupes taxonomiques ou fonctionnels de plantes et d’arthropodes dans les analyses de réseaux trophiques (mais pas dans l’exercice de modélisation de niche). Pour ce faire, nous avons assumé que chacun des groupes était présent sur l’ensemble de l’aire d’étude, que soit durant la période 1981-2010 (période de référence) ou dans le futur. Les groupes taxonomiques ou fonctionnels pour lesquels nous avons pu recenser l’information existante sont les suivants :

#### a. Arthropodes

- Arachnides (Arachnida)
- Coléoptères (Coleoptera)
- Diptères (Diptera)
- Lépidoptères (Lepidoptera)
- Hyménoptères (Hymenoptera)

#### b. Plantes

- Arbustes rampants/bas (incluant les arbustes à fruits comestibles)
- Arbustes érigés
- Cypéracées (Cyperacea)
- Lichens
- Herbacées
- Mousses (Bryophyta)
- Poacées (Poacea)

## 1.2 Traits fonctionnels et données biologiques et écologiques

Plusieurs informations biologiques et écologiques ont été colligées pour chacune des espèces de mammifères et d’oiseaux d’intérêt. À notre connaissance, l’ensemble de ces données représente à ce jour le plus grand effort de recensement et de caractérisation de la biodiversité du Québec nordique. Les données colligées pour chacune des espèces sont les suivantes :

- Noms (latin, français, anglais, inuktitut)
- Alimentation principale (omnivore, insectivore, carnivore, piscivore, herbivore, etc.)
- Masse corporelle moyenne
- Période d’activité (diurne/crépusculaire/nocturne)

1. Ces espèces n’ont pas été modélisées (ni incluent dans l’approche par réseaux trophiques) car elles étaient éteintes (3 espèces d’oiseaux), elles ne nichaient pas dans l’aire d’étude (18 espèces d’oiseaux) ou elles étaient trop peu présentes dans l’aire d’étude (21 espèces d’oiseaux).

2. La répartition de ces espèces ne présentaient pas de variabilité (occurrence de 100% dans toute l’aire d’étude), elles ont donc été exclues des modèles de niche, mais incluses dans l’approche par réseaux trophiques, selon l’hypothèse que leur aire de répartition ne changera pas dans le futur.

3. Pour ces espèces, les modèles n’arrivant pas à bien reproduire la répartition observée, leur niche climatique n’a pas été projetée dans le futur.

- Longévité
- Type d’habitats
- Lieu de nidification (structure utilisée, hauteur minimale et maximale des nids)

Les informations colligées ici sont le fruit d’une revue de littérature exhaustive, rassemblant la quasi-totalité des données disponibles dans la littérature scientifique et dans les grandes bases de données *Birds of North America* et *Mammals of North America*.

### 1.3 Relations trophiques

Nous avons réalisé une revue de littérature exhaustive afin d’établir les relations trophiques qui existent entre chacune des espèces (43 mammifères et 151 oiseaux) et chacun des groupes étudiés (5 groupes d’arthropodes et 7 groupes de plantes). Comme les informations disponibles sont limitées pour le nord du Québec et comme la couverture spatiale de notre étude est étendue, il était difficile de caractériser tous les liens trophiques existants. Nous nous sommes donc limités aux liens trophiques les plus importants dans le fonctionnement des écosystèmes, à savoir les relations prédateurs-proies. Les autres liens, comme le parasitisme ou la facilitation, n’ont pas été pris en compte.

Les liens prédateurs-proies ont été colligés sur une matrice binaire de relations trophiques (0 : pas de lien, 1 : lien de prédation). La matrice complète est archivée dans Nordicana D. En plus de ces liens binaires, les relations entretenues par les espèces présentes dans l’aire d’étude en 1981-2010 ont été précisés selon trois catégories (proie importante, proies courante et proie accidentelle).

La description des liens trophiques nous a permis de reconstruire le réseau trophique propre à chacune des cellules de l’aire d’étude pour 1981-2010 (période de référence). Elle nous a aussi permis de projeter les réseaux trophiques potentiels dans chacune des cellules de l’aire d’étude pour les trois horizons futurs (2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100). Nous avons ensuite dérivé l’ensemble suivant d’indicateurs de réseaux trophiques (tous sont écologiquement significatifs) :

- **Nombre de noeuds** : équivalent au nombre d’espèces, cet indicateur a aussi été décliné en nombre de carnivores, granivores, herbivores, insectivores, omnivores et piscivores ;
- **Connectance** : cet indicateur est une mesure du degré de connectivité entre les espèces d’un réseau trophique ;
- **Précarité des proies** : plus largement connu sous le nom de *Vulnérabilité des proies*, cet indicateur représente le nombre moyen de prédateurs par proie ;
- **Généralité des prédateurs** : cet indicateur représente le nombre moyen de proies par prédateur.

### 1.4 Variables bioclimatiques

Vingt-sept variables climatiques ont été dérivées à partir des trois variables climatiques de bases (Berteaux *et al.*, 2018). Cependant, afin d’éviter un sur-ajustement des modèles de niche et l’apparition de biais dans l’estimation des paramètres dus à une trop forte autocorrélation entre prédicteurs, seules six variables ont été retenues (Tableau 2). Ces variables n’étaient pas trop corrélées entre elles, représentaient les principaux gradients climatiques, et permettaient de maximiser le nombre de prédicteurs dans les modèles de niche.

TABLE 2 – Variables bioclimatiques utilisées pour modéliser la répartition des espèces

Code	Variable bioclimatique	Unité
Bio02	Écart diurne moyen des températures	°C
Bio04	Saisonnalité des températures	°C
Bio08	Température moyenne du trimestre le plus humide	°C
Bio13	Précipitations du mois le plus humide	mm
Bio15	Saisonnalité des précipitations	-
Bio20	Degrés-jours de croissance annuel	°C

## 2 Modélisation de niche

### 2.1 Description de l'approche

La modélisation de la niche climatique d'une espèce consiste à formuler mathématiquement les relations existant entre la répartition d'une espèce et les conditions climatiques durant une période de référence. Une fois ces relations identifiées et quantifiées, la niche climatique potentielle de l'espèce peut être projetée dans le futur sous différents scénarios de changements climatiques.

Plusieurs algorithmes permettent de corréler la répartition d'une espèce à des variables climatiques et aucun n'est systématiquement plus performant qu'un autre. Il est donc recommandé d'en utiliser plusieurs. Ainsi, la répartition spatiale des 213 espèces a été reliée aux six variables bioclimatiques en utilisant sept algorithmes implémentés dans le package `biomod2` (Thuiller *et al.*, 2009) développé pour le logiciel R (R Core Team, 2016). Ces sept méthodes incluaient deux méthodes de régression (modèle linéaire généralisé et modèle additif généralisé), deux approches de classification (analyse factorielle discriminante et arbre de classification) et trois techniques de *machine learning* (forêts aléatoires, réseaux de neurones artificiels et *generalized boosted models*).

Pour une espèce donnée, le jeu de données initial (composé des six variables bioclimatiques pour la période de référence et de la répartition observée de l'espèce) a été séparé aléatoirement en deux jeux de données afin d'évaluer les performances prédictives des modèles sur des données pseudo-indépendantes (Araújo *et al.*, 2005). Le premier jeu de données (renfermant 70% des données initiales) a servi à calibrer les modèles et les 30% de données restantes ont servi à évaluer les modèles. Cette procédure a été répétée dix fois. Ainsi, pour chaque espèce, 70 modèles ont été calibrés (7 algorithmes x 10 jeux de données).

Les performances prédictives des modèles ont été évaluées en comparant les répartitions modélisées pour la période de référence et la répartition observée (sur les 30% des données n'ayant pas contribué à la calibration des modèles) à l'aide de trois métriques : l'*Area Under the ROC Curve*, AUC (Fielding & Bell, 1997), le *True Skill Statistic*, TSS (Allouche *et al.*, 2006) et le KAPPA (Cohen, 1960). Une importance plus grande a été accordée au TSS.

À ce stade, 30 espèces ont été écartées car les performances prédictives de leurs modèles étaient trop faibles.

À partir de ces 70 modèles, nous avons projeté la répartition potentielle des 183 espèces sélectionnées pour la période de référence conduisant à 70 répartitions potentielles différentes pour 1981-2010. Ces mêmes modèles ont ensuite été projetés sous chacun des trois horizons temporels futurs (2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100) sous chacun des 10 scénarios de changements climatiques conduisant à 700 répartitions futures potentielles pour un horizon temporel et une espèce donnée.

Par la suite, nous avons agrégé, pour chaque espèce, l'information portée par les 70 projections potentielles pour la période de référence en utilisant la moyenne pondérée. Nous avons pondéré les probabilités d'occurrence (sortie brute des modèles) par les valeurs de TSS de leurs modèles respectifs, puis nous avons additionné le produit afin de produire une seule valeur de probabilité d'occurrence pour chaque cellule de la grille. Ces probabilités d'occurrence ont par la suite été converties en données de présence/absence en utilisant un seuil de transformation optimal : *the sensitivity-specificity sum maximization approach* (Liu *et al.*, 2005).

Les deux mêmes procédures (moyenne pondérée et conversion en données binaires) ont été réalisées pour chaque horizon temporel, mais l'information a été agrégée au niveau de chaque RCP. Ainsi, pour un horizon futur donné, deux projections potentielles moyennes ont été générées, une pour le RCP 4,5 et une pour le RCP 8,5.

### 2.2 Impacts potentiels des changements climatiques sur la répartition des espèces

L'impact potentiel des changements climatiques sur la répartition des espèces a été estimé en comparant les répartitions potentielles futures à la répartition potentielle projetée pour la période de référence (1981-2010).

Les résultats pour chacune des 183 espèces, en trop grande quantité pour être présentées ici, sont accessibles à l'adresse suivante : <https://ahasverus.shinyapps.io/bioclimaticatlas/>.

Dans ce document, les résultats issus des modèles de niche ont été synthétisés au niveau des grands groupes (mammifères, oiseaux et total) et les impacts potentiels des changements climatiques sur la répartition de la biodiversité ont été quantifiés au travers des quatre métriques suivantes :

- **Richesse spécifique** : pour un horizon temporel donné (période de référence inclus), nombre d'espèces dont les conditions climatiques pourraient devenir favorables dans une cellule donnée ;
- **Pourcentage de gains** : pour un horizon futur donné, nombre d'espèces dont les conditions climatiques deviendraient favorables dans une cellule donnée divisé par le nombre d'espèces dont les conditions climatiques étaient favorables durant la période de référence pour cette même cellule ;
- **Pourcentage de pertes** : pour un horizon futur donné, nombre d'espèces dont les conditions climatiques deviendraient défavorables dans une cellule donnée divisé par le nombre d'espèces dont les conditions climatiques étaient favorables durant la période de référence pour cette même cellule ;
- **Renouvellement d'espèces** : pour un horizon futur donné, pourcentage de remaniement des communautés indiquant l'intensité du changement potentiel de la composition en espèces pour une cellule donnée. Plus la valeur est importante, plus les espèces seront différentes dans le futur. L'équation 1 donne sa formule.

$$\text{Renouvellement d'espèces} = 100 \times \frac{\text{Gains} + \text{Pertés}}{\text{RS} + \text{Gains}} \quad (1)$$

avec RS, le nombre d'espèces dont les conditions climatiques pourraient être favorables durant la période de référence (1981-2010) dans une cellule donnée.

### 3 Indice de vulnérabilité écosystémique

Le développement d'un bon indice de vulnérabilité écosystémique est complexe et plusieurs approches sont possibles, sans qu'aucune ne puisse être pleinement validée. Nous avons exploré de multiples possibilités, avant d'en adopter une qui est à la fois conforme à la littérature scientifique, applicable aux données à notre disposition, calculable à l'échelle de chaque cellule de la grille d'étude, et assez intuitive à comprendre. Dans l'approche retenue :

- l'**exposition** reflète simplement l'ampleur des changements climatiques projetés ;
- la **sensibilité** reflète la distribution spatiale des espèces durant la période de référence, et les liens trophiques qu'elles entretiennent entre elles. En effet, la position d'une cellule par rapport aux aires de répartition des espèces qui y sont présentes peut grandement influencer les effets des changements climatiques sur le taux de renouvellement potentiel des espèces dans cette cellule. De plus, l'ampleur des réorganisations attendues au sein des réseaux trophiques dépendra aussi des liens existant entre les espèces ;
- la **vulnérabilité**, enfin, exprime à la fois le déplacement potentiel des aires de répartition des espèces (estimé par modélisation de niche) et le réarrangement potentiel des liens trophiques que ces déplacements devraient provoquer.

En termes simples, nous supposons que plus les changements climatiques provoqueront la modification d'une proportion importante des liens trophiques dans un écosystème, plus cet écosystème sera vulnérable aux changements climatiques.

Plus formellement, nous avons défini la vulnérabilité des écosystèmes terrestres de la toundra du Nunavik comme étant, pour chaque cellule, le degré de dissemblance entre la structure du réseau trophique de la période de référence et celle d'un horizon futur. Ce degré de dissemblance a été estimé dans chaque cellule grâce à la projection des répartitions potentielles futures des espèces et de la matrice des relations trophiques

entre espèces. L'approche est basée sur le cadre conceptuel de Poisot *et al.* (2012) qui divise les interactions trophiques en trois groupes :

- les interactions présentes dans le réseau à la fois lors la période de référence et lors la période future, noté **a** ;
- les interactions présentes dans le réseau seulement lors de la période de référence, noté **b** ;
- les interactions présentes dans le réseau seulement lors de la période future, noté **c**.

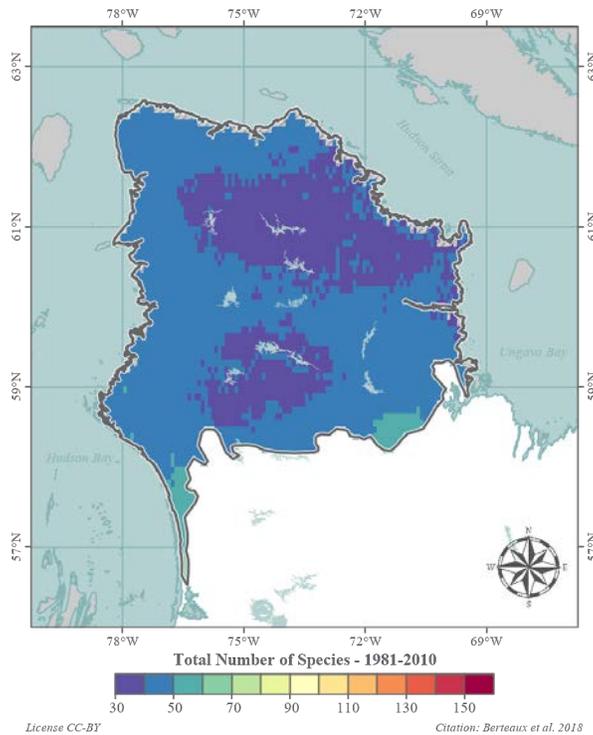
Le degré de dissemblance (ou dissimilarité) entre le réseau de référence et le réseau potentiel futur (noté ici **V** pour Vulnérabilité) est calculé selon une formule basée sur l'indice de diversité  $\beta$  de Whittaker (1960) :

$$V = \frac{a + b + c}{\frac{2a+b+c}{2}} - 1 \quad (2)$$

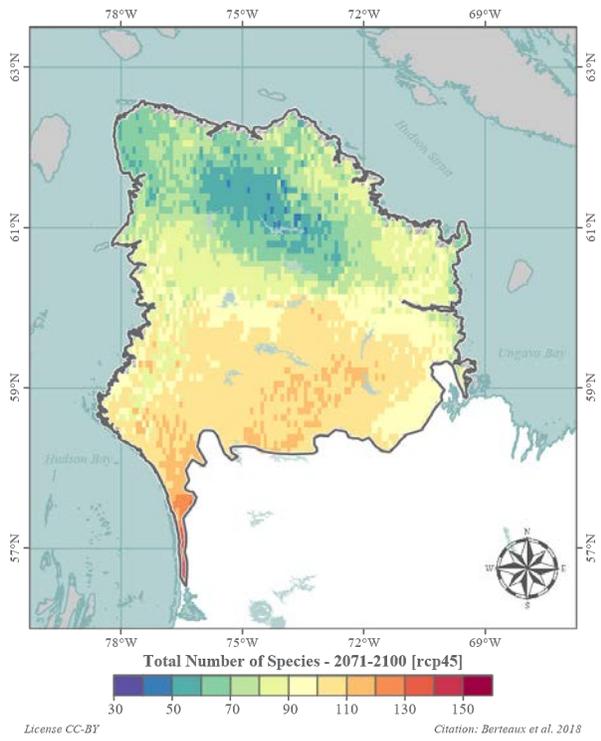
L'indice de vulnérabilité écosystémique **V** varie de 0 à 1. Si  $V = 0$ , alors on retrouve exactement les mêmes interactions trophiques entre la période de référence et la période future. Si  $V = 1$ , alors, durant la période future, aucune des interactions trophiques n'existait durant la période de référence.

## 4 Atlas de biodiversité

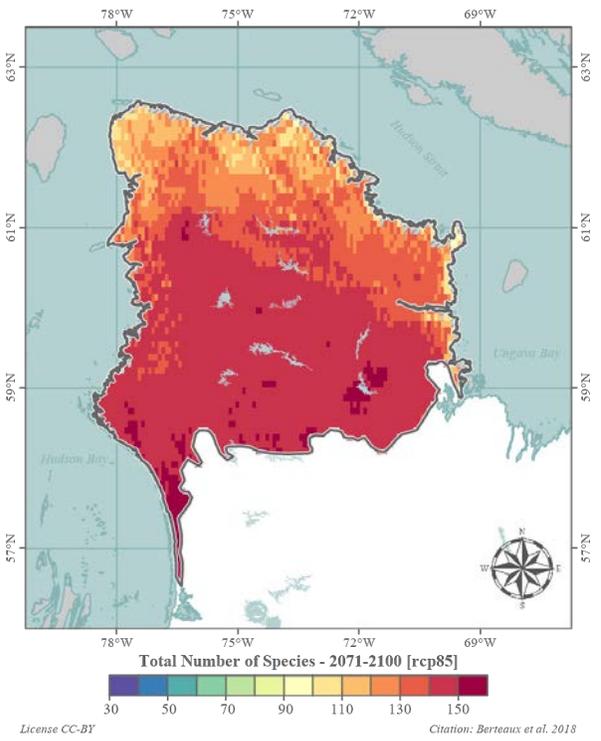
Pour des raisons de clarté, seuls les résultats pour l'horizon 2071-2100 sont présentés. Les résultats pour les deux autres horizons futurs ainsi qu'une version en haute définition des cartes est disponible à cette adresse : <https://ahasverus.shinyapps.io/bioclimateatlas/>. À noter que pour des raisons techniques, les cartes comportent parfois des éléments de légende en anglais.



(a) Horizon 1981–2010

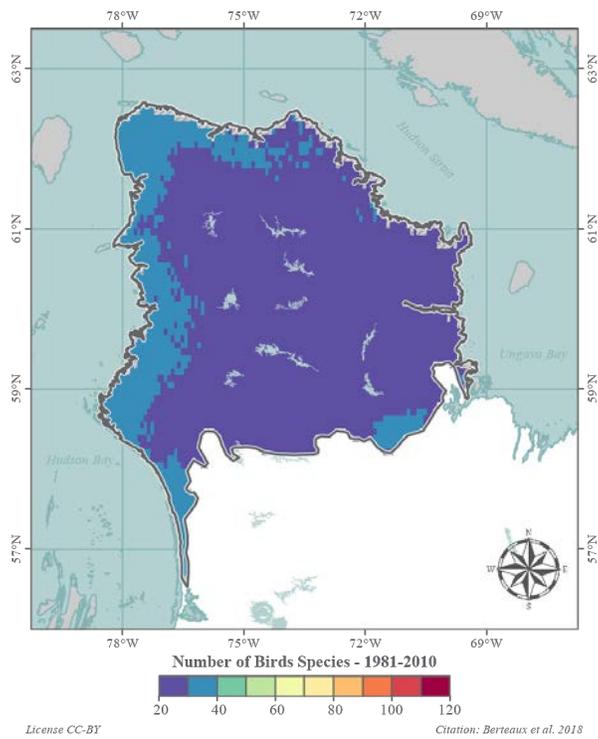


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

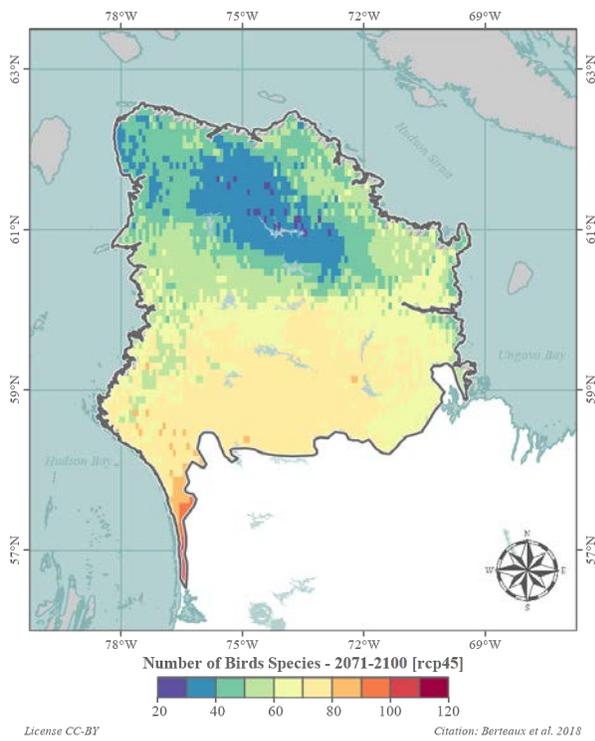


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

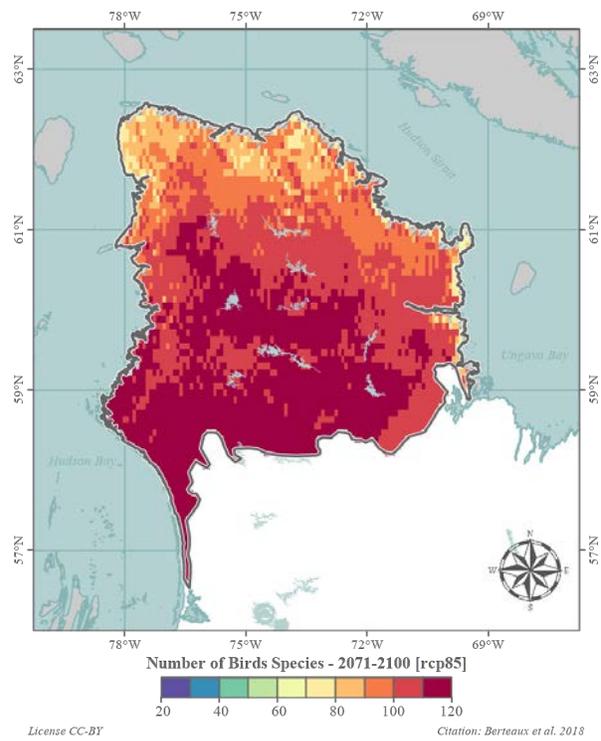
FIGURE 1 – Nombre total d'espèces



(a) Horizon 1981–2010

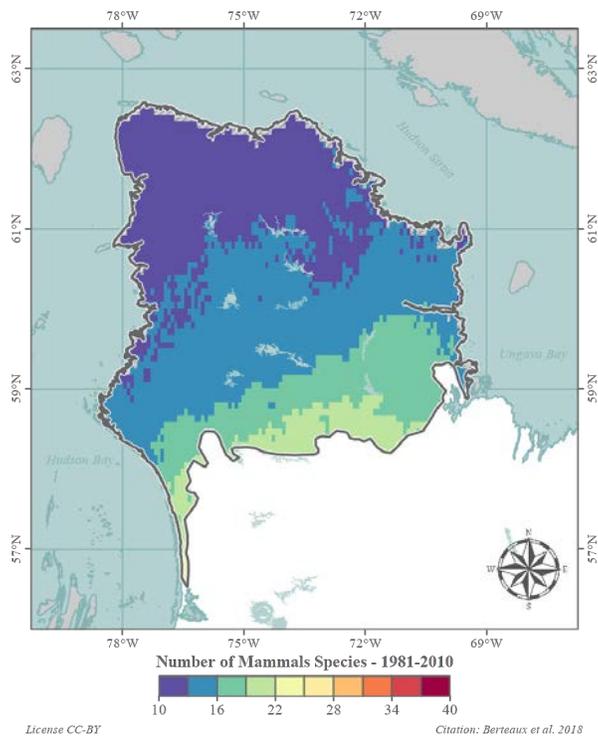


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

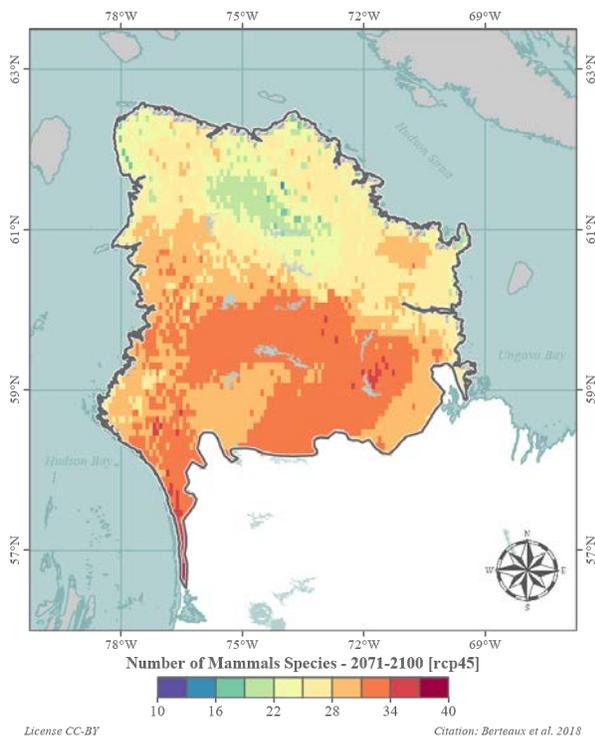


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

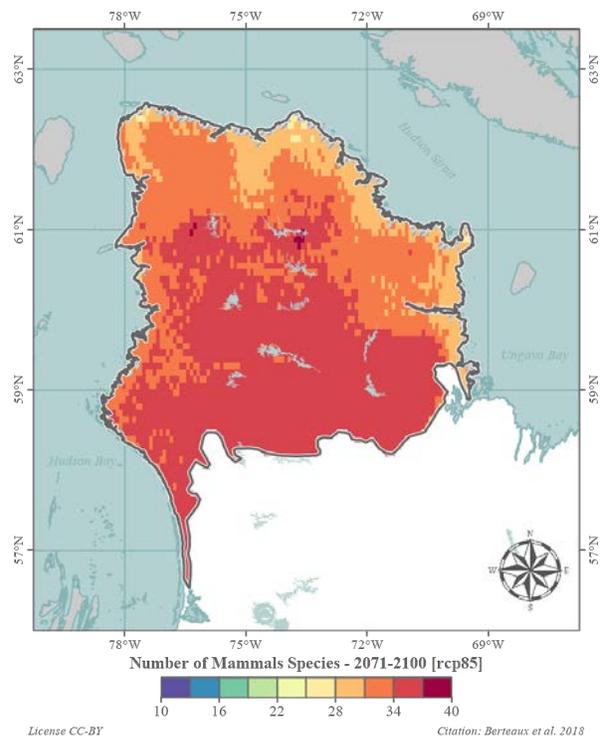
FIGURE 2 – Nombre d'espèces d'oiseaux



(a) Horizon 1981–2010

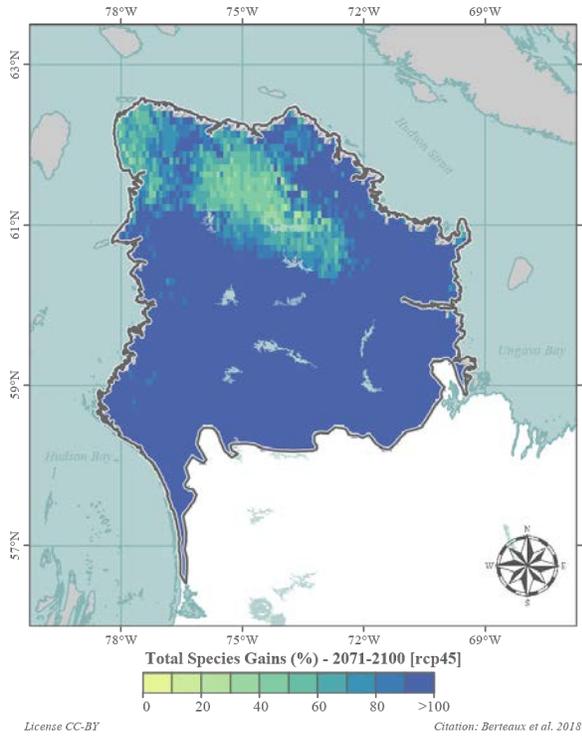


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

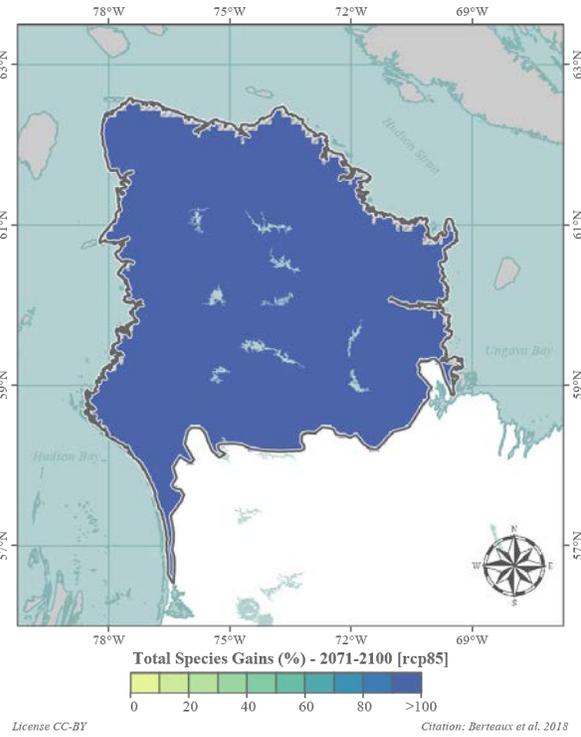


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 3 – Nombre d'espèces de mammifères

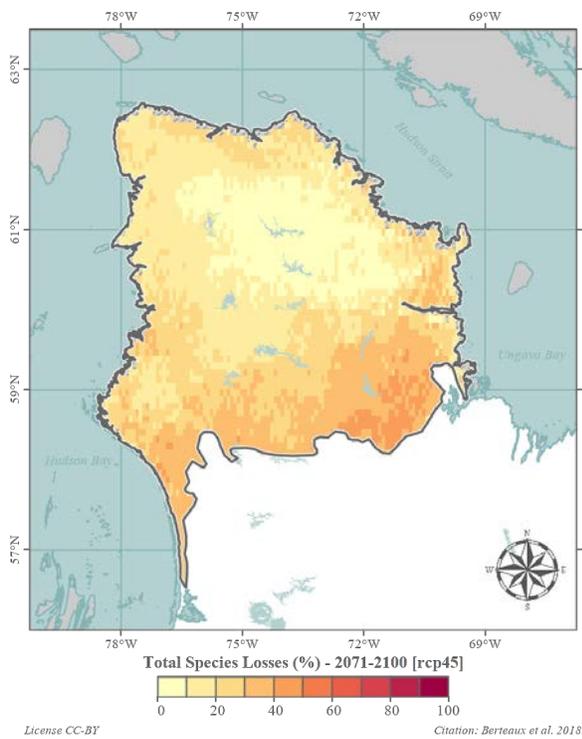


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

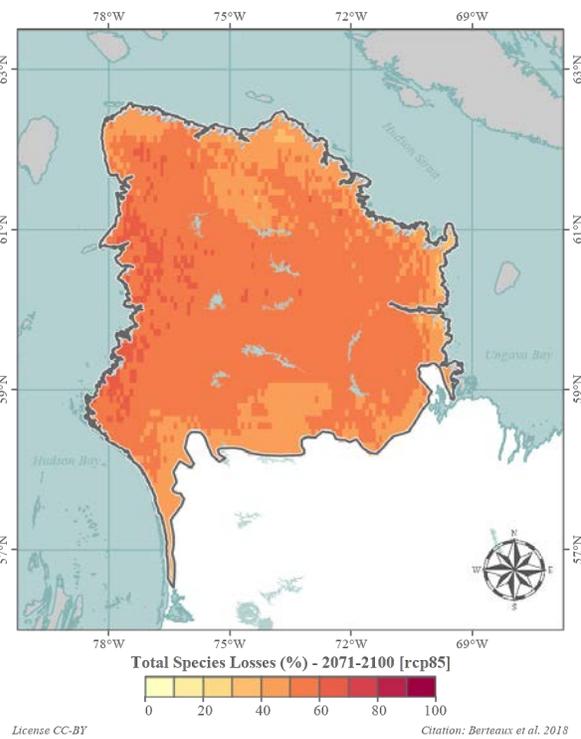


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 4 – Gains potentiels d'espèces (oiseaux + mammifères)

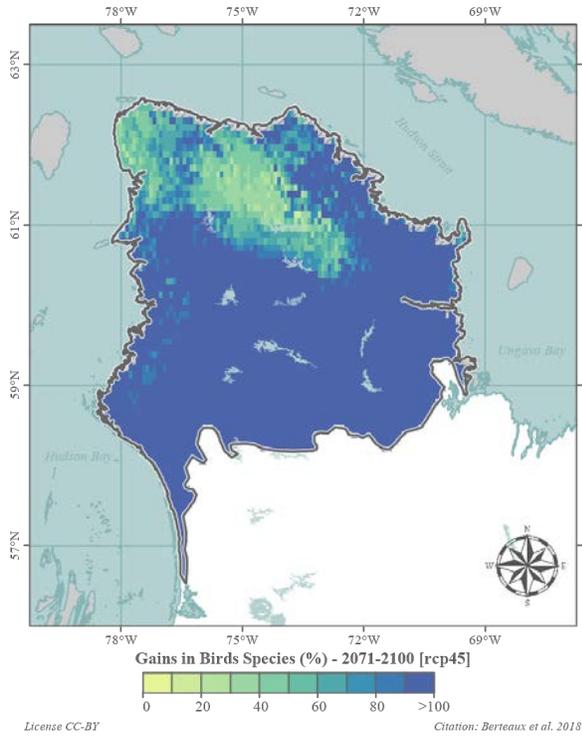


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

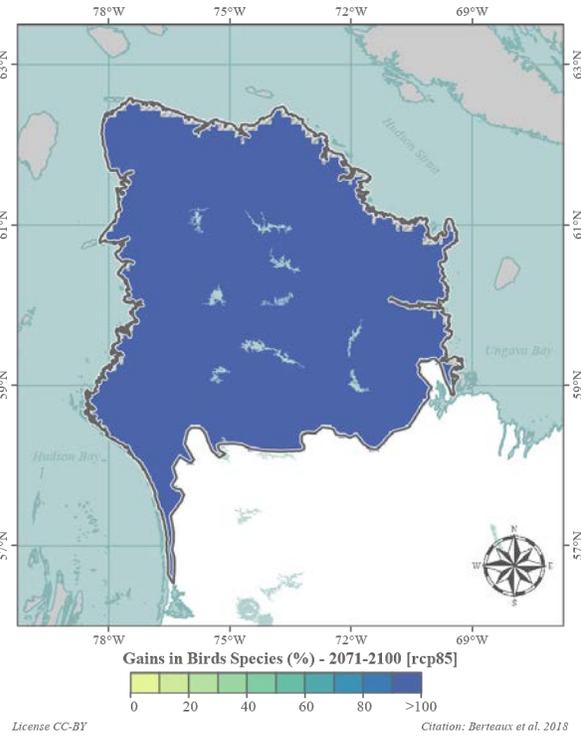


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 5 – Pertes potentielles d'espèces (oiseaux + mammifères)

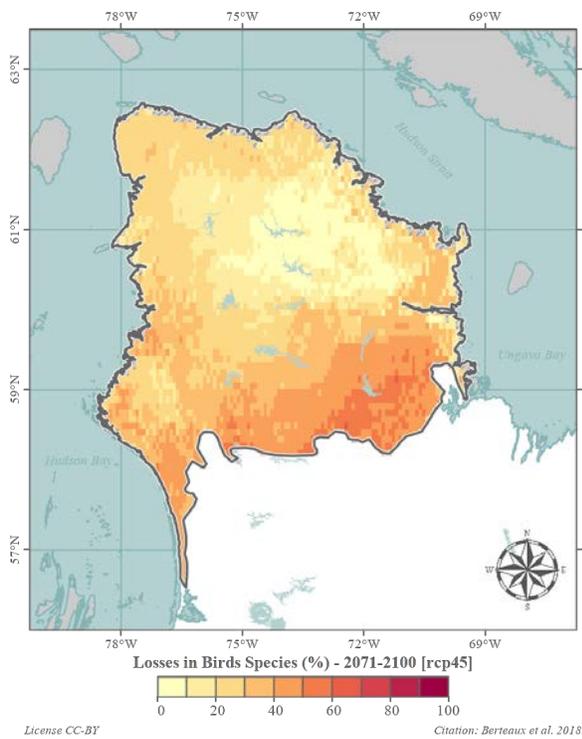


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

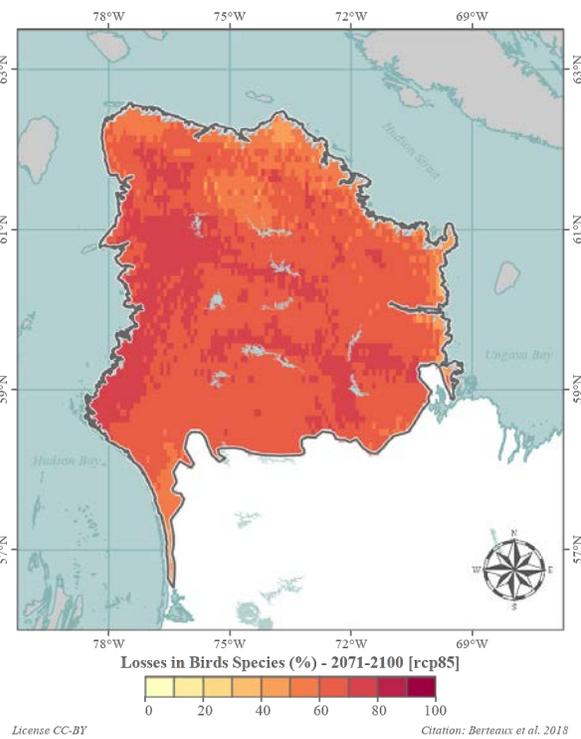


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 6 – Gains potentiels d'espèces (oiseaux)

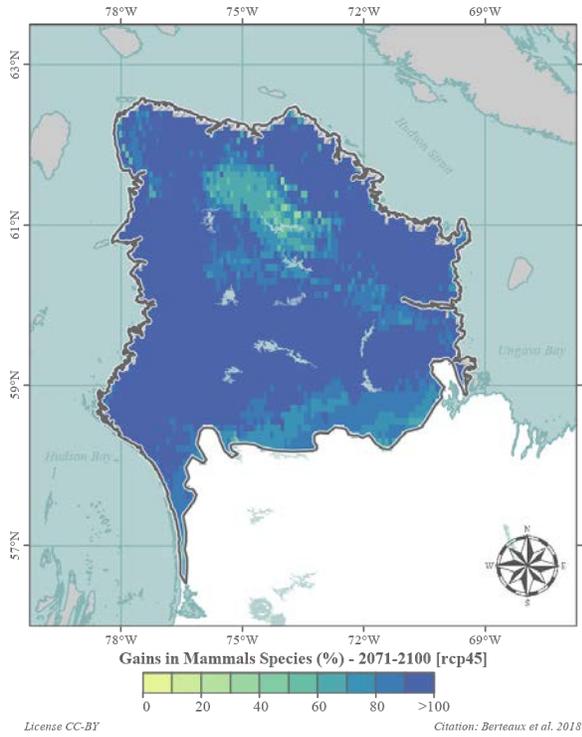


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

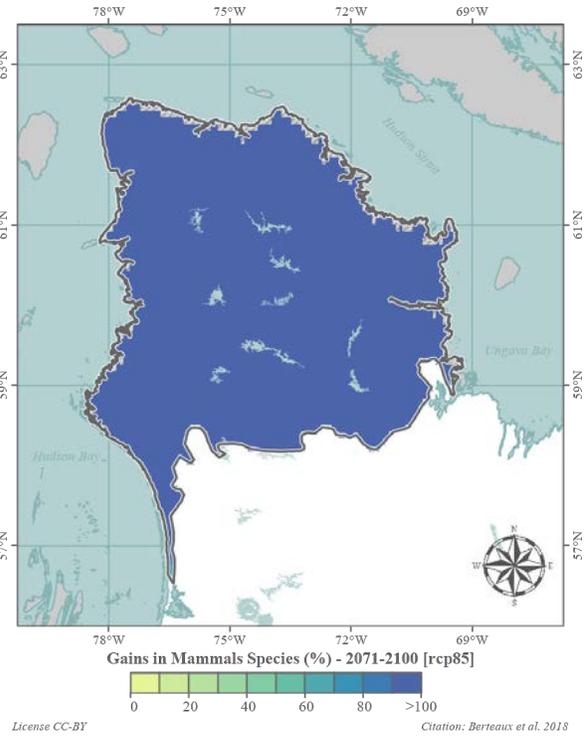


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 7 – Pertes potentielles d'espèces (oiseaux)

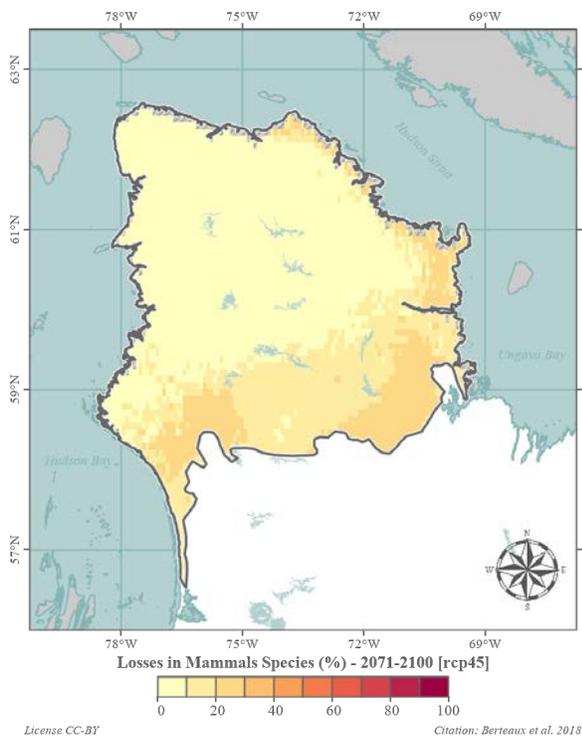


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

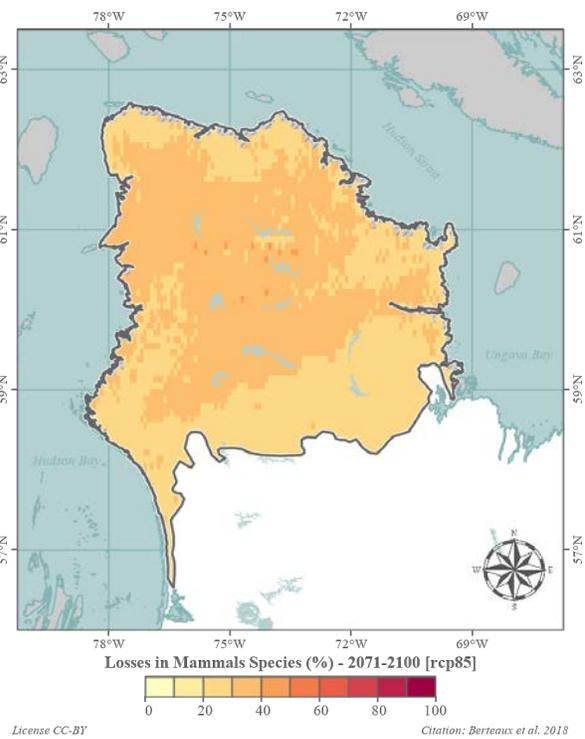


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 8 – Gains potentiels d'espèces (mammifères)

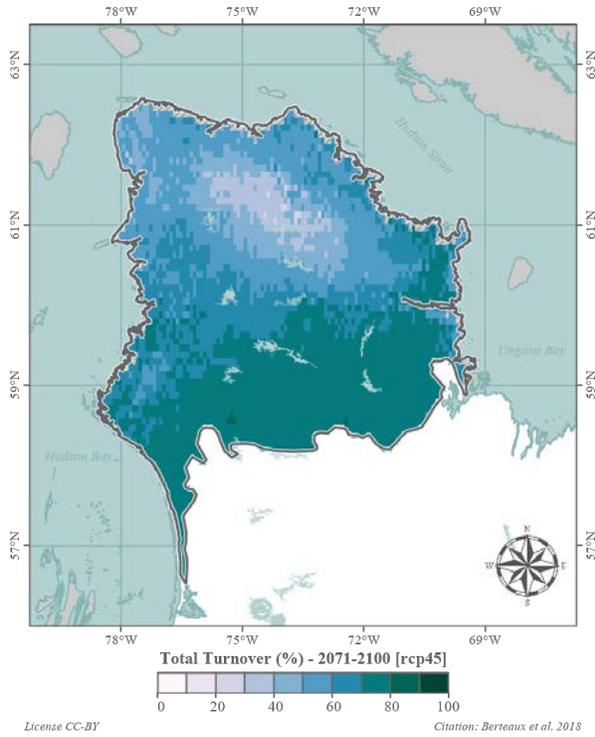


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

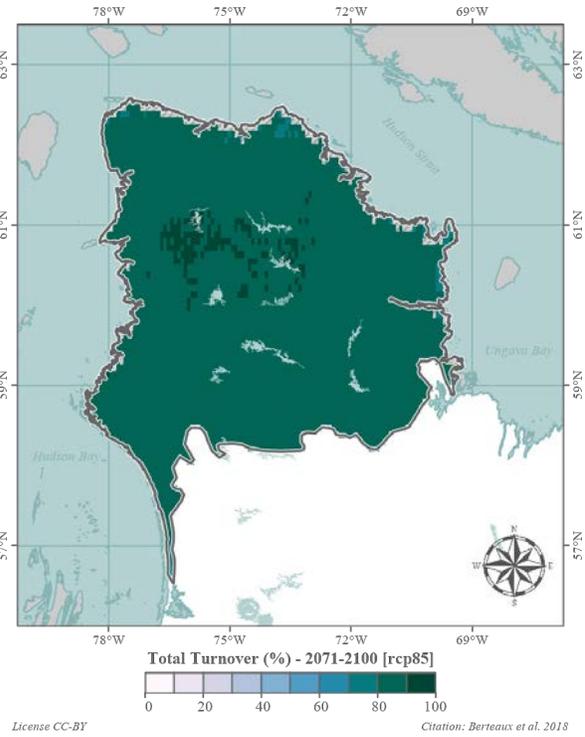


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 9 – Pertes potentielles d'espèces (mammifères)

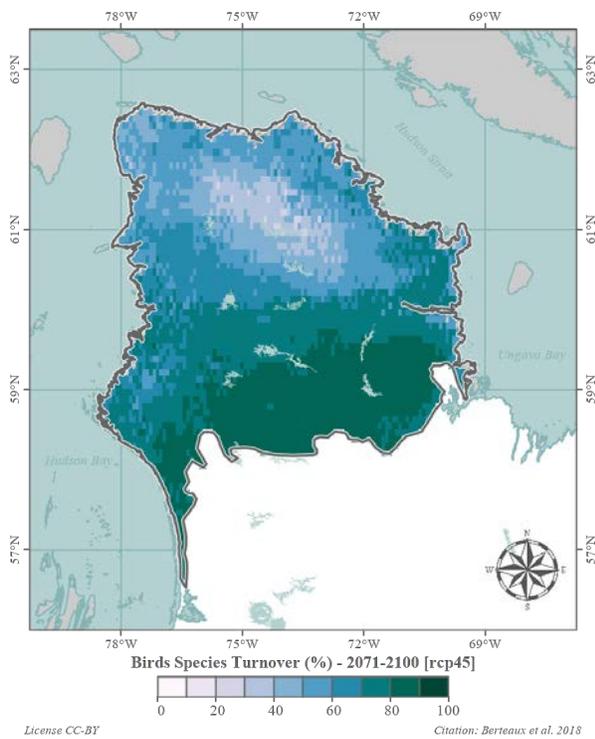


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

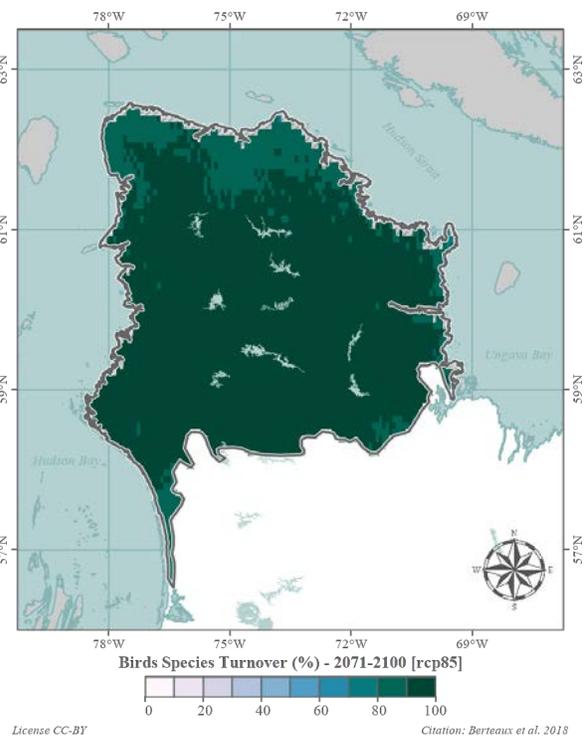


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 10 – Renouvellement d'espèces (oiseaux + mammifères)

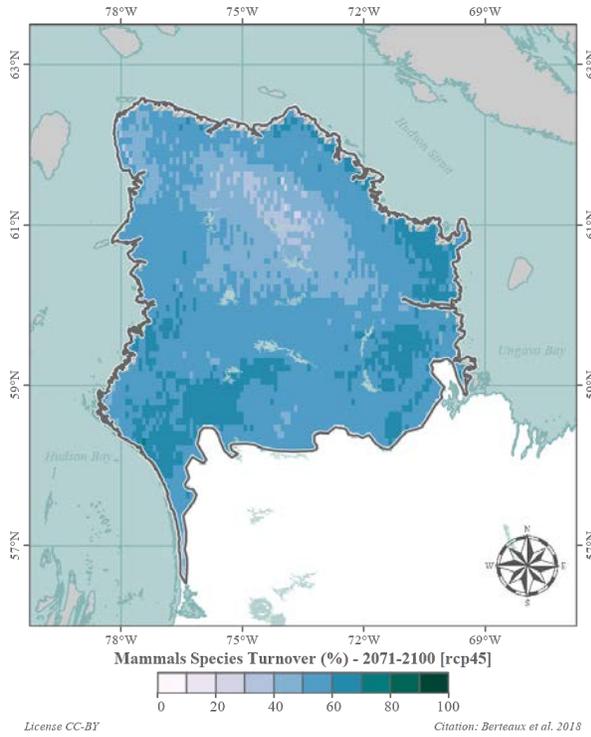


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

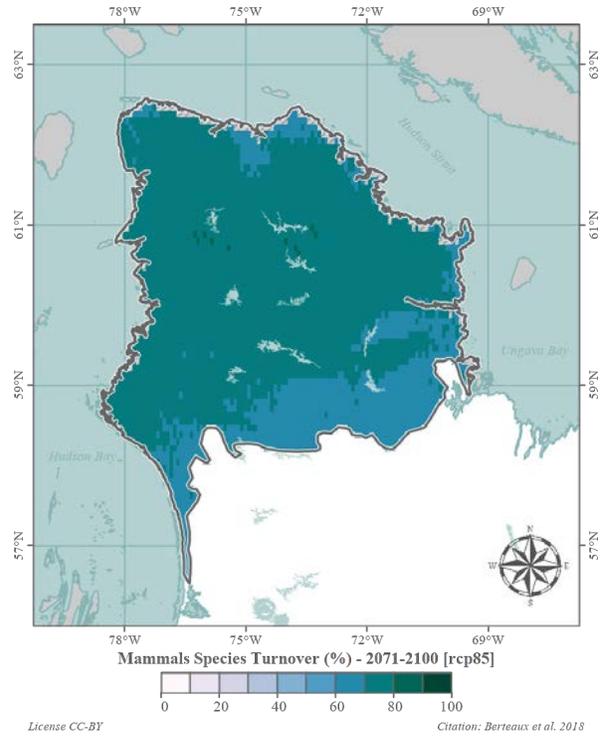


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 11 – Renouvellement d'espèces (oiseaux)



(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)



(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 12 – Renouvellement d'espèces (mammifères)



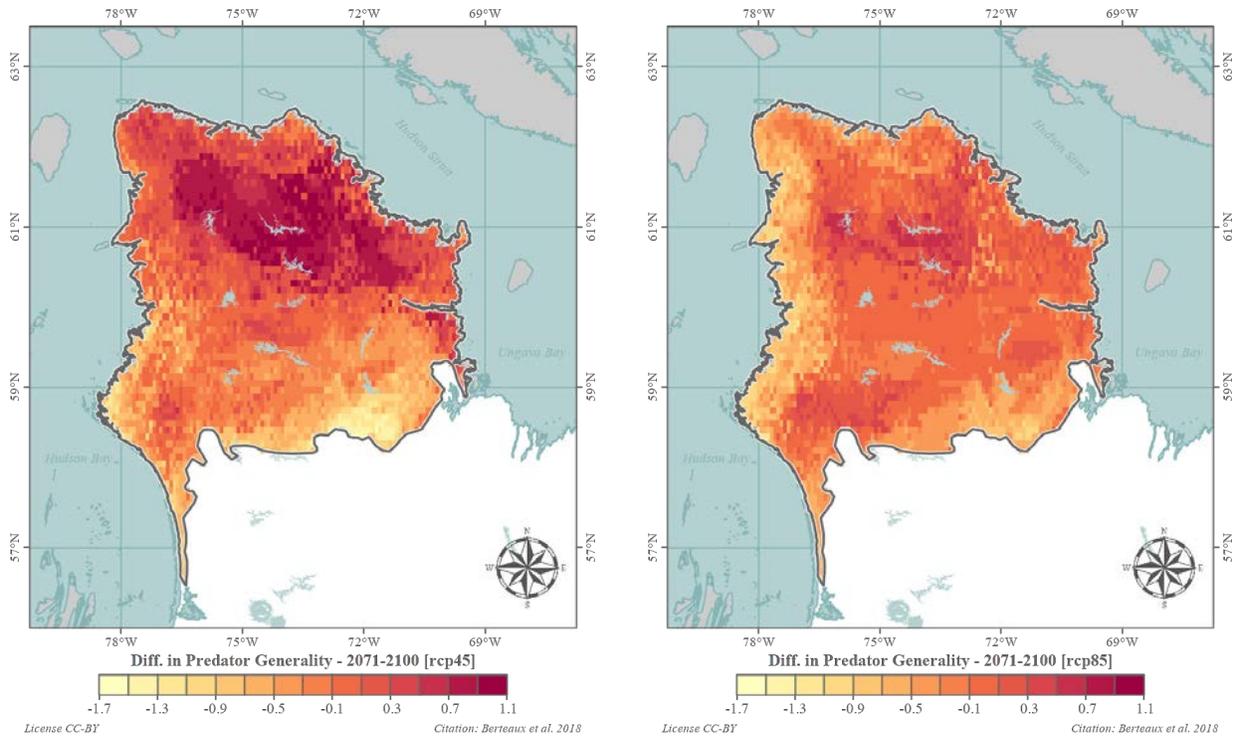
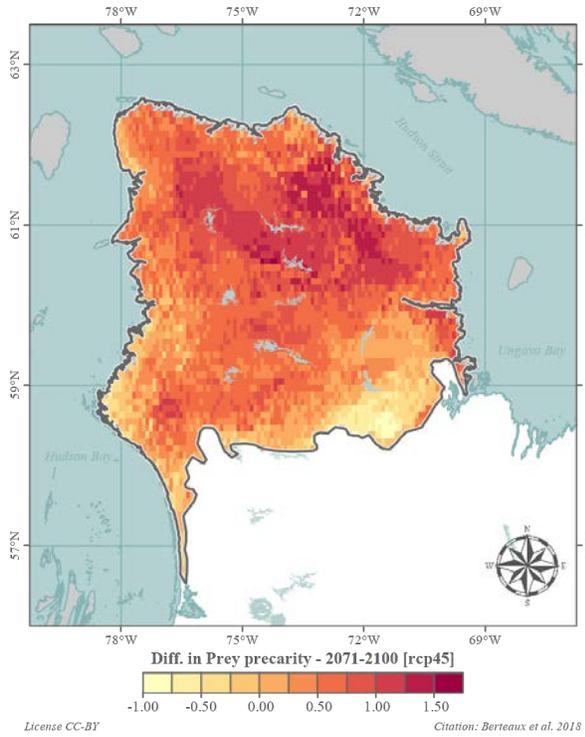
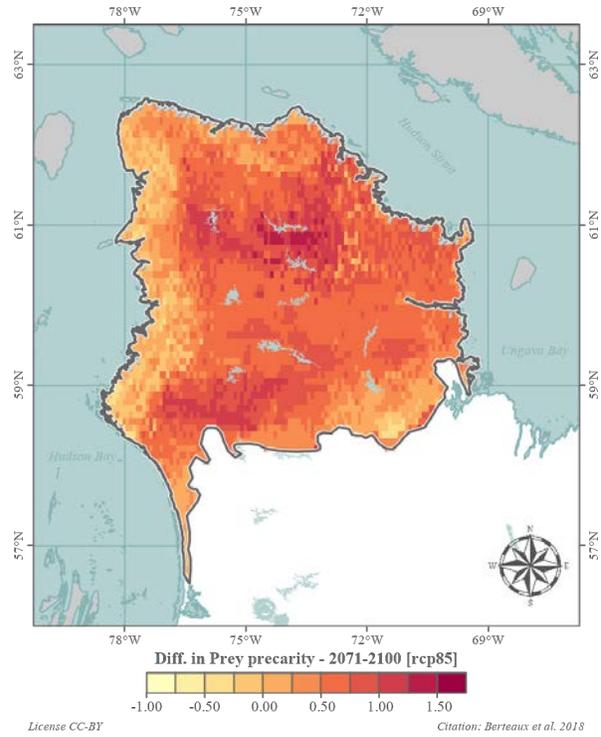


FIGURE 14 – Écarts à la période de référence : Généralité des prédateurs



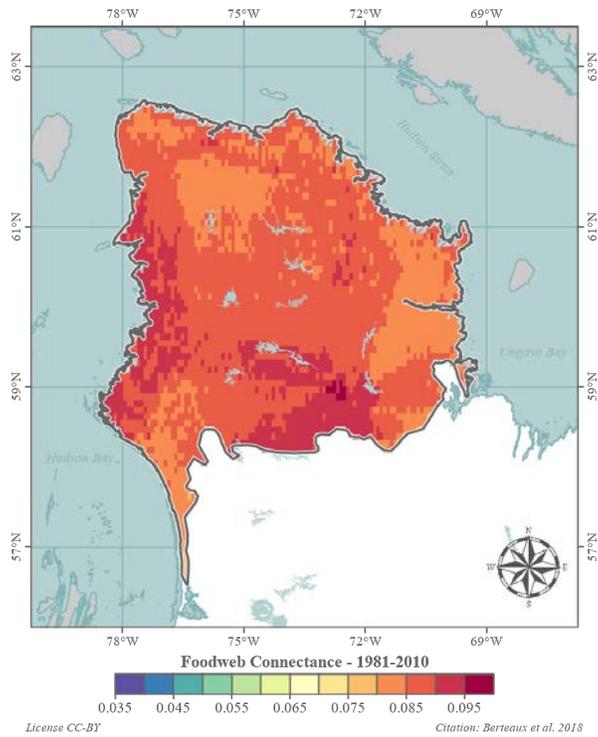


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

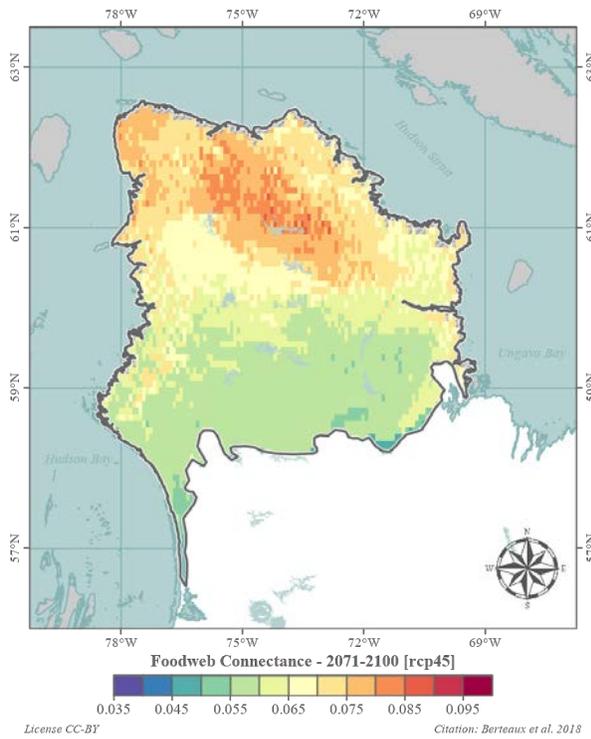


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

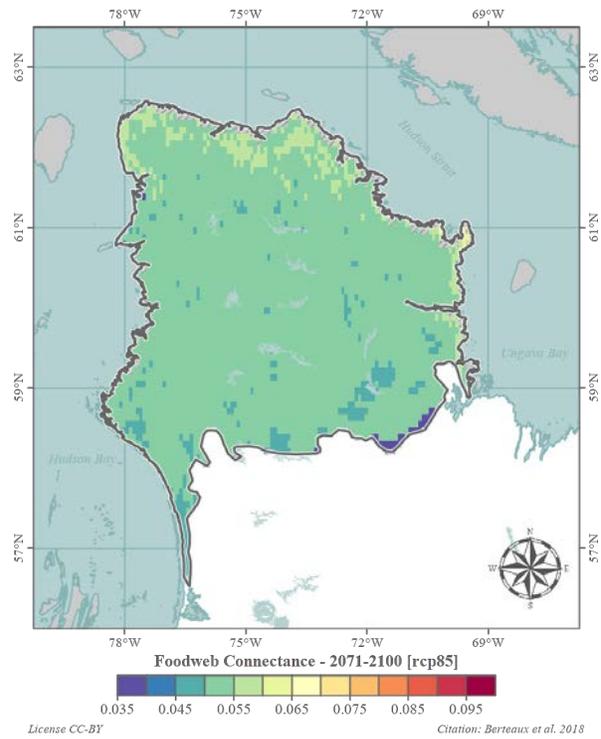
FIGURE 16 – Écarts à la période de référence : Précarité des proies



(a) Horizon 1981–2010

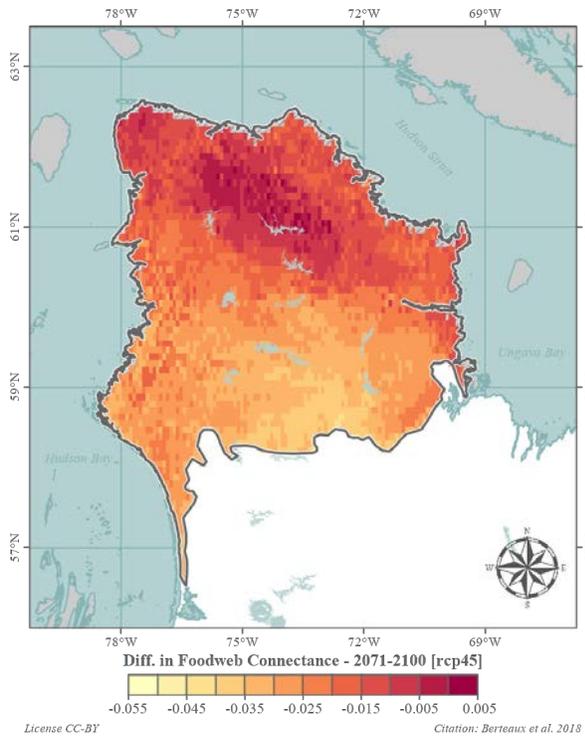


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

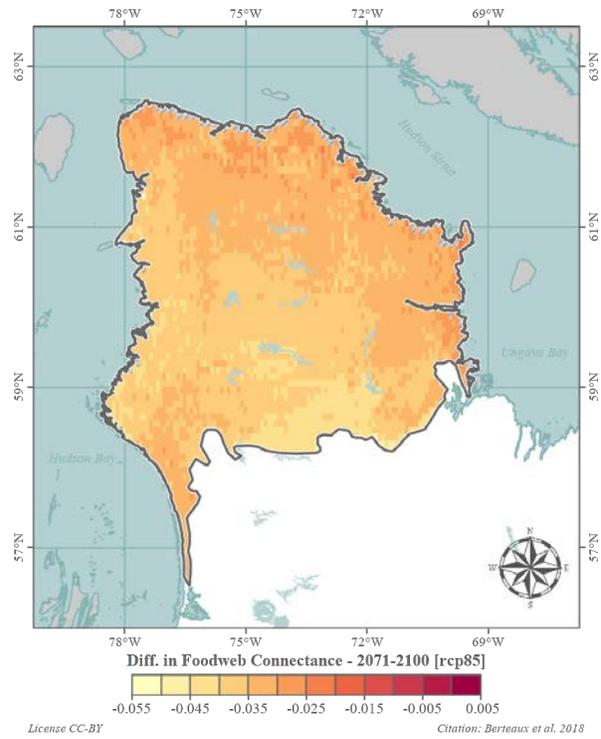


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 17 – Connectance des réseaux trophiques

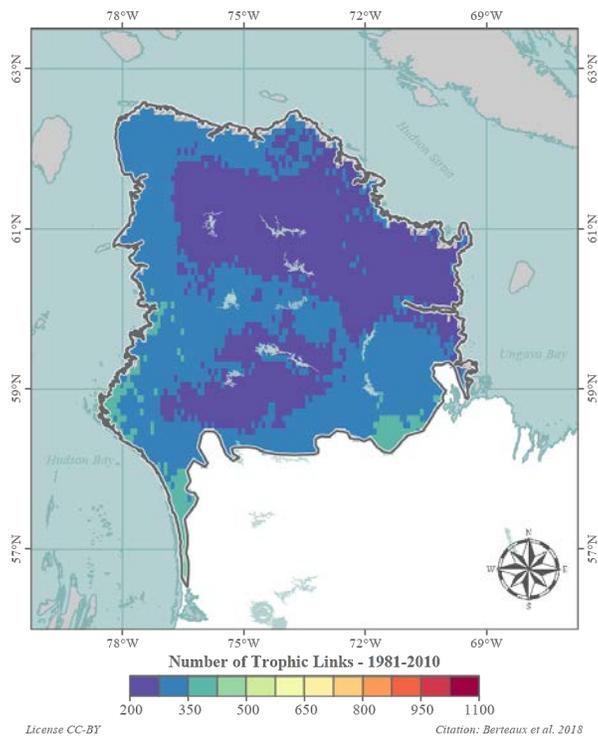


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

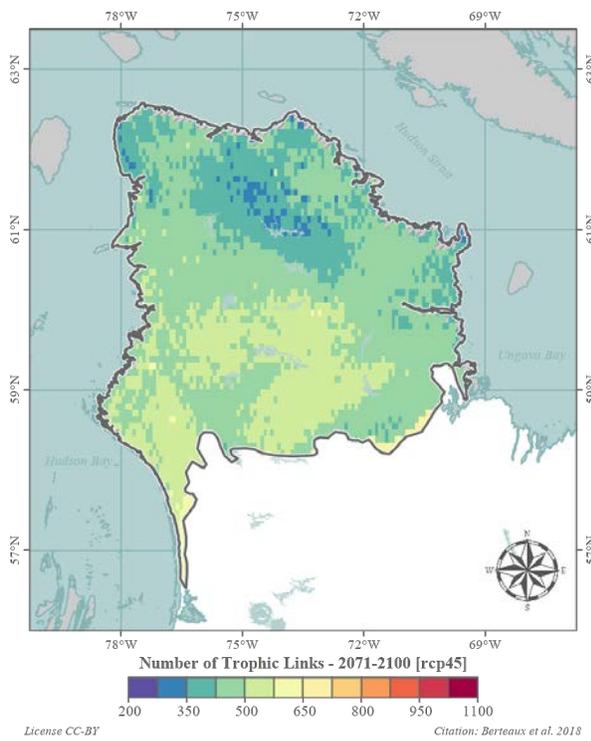


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

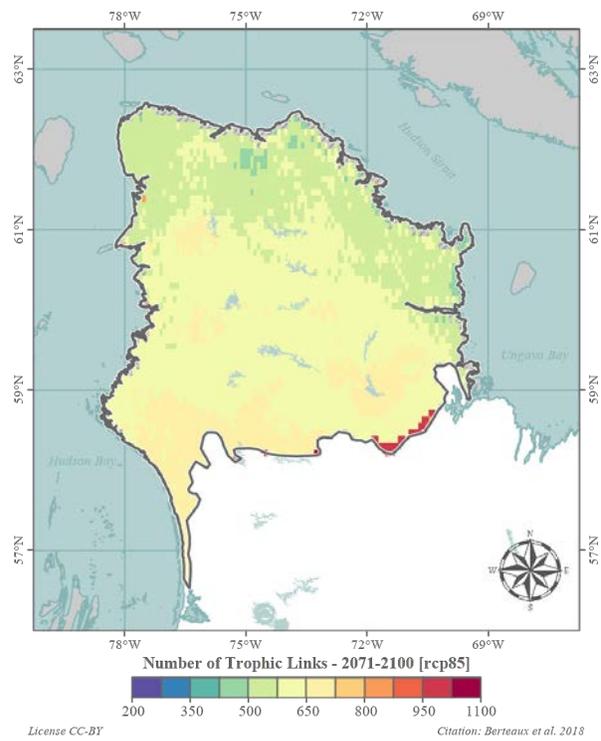
FIGURE 18 – Écarts à la période de référence : Connectance des réseaux trophiques



(a) Horizon 1981–2010

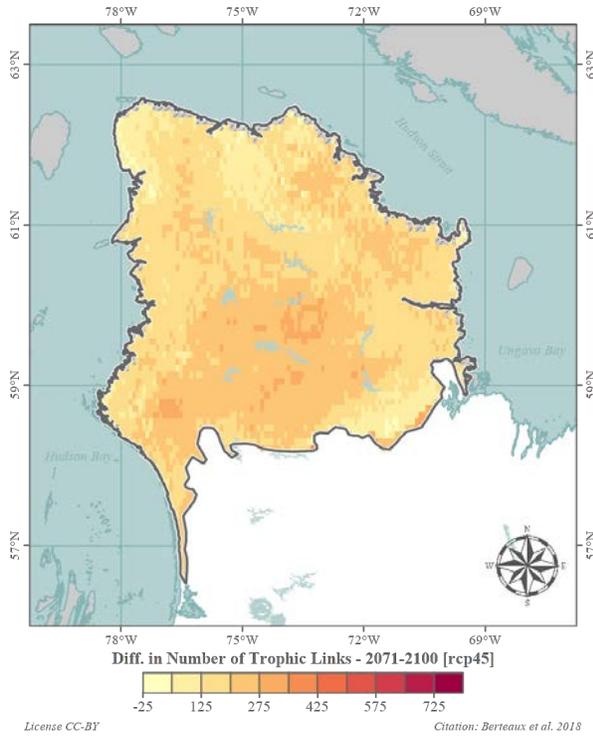


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

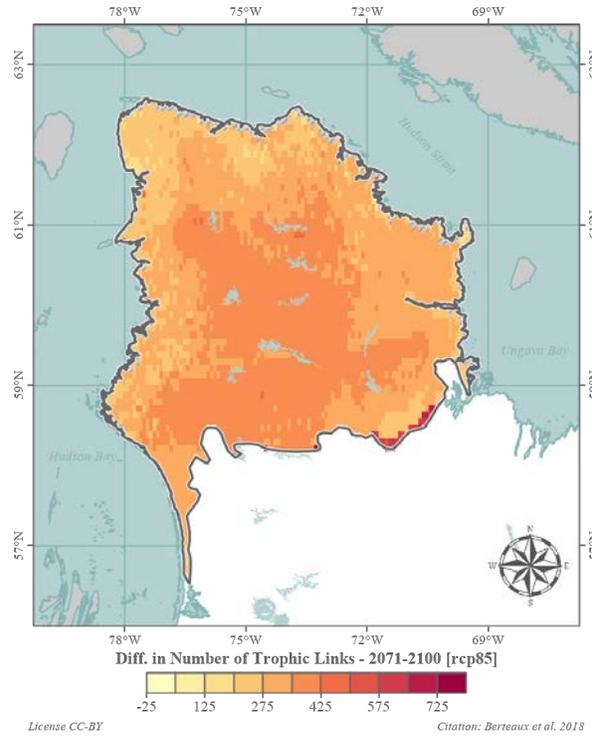


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 19 – Nombre de liens trophiques



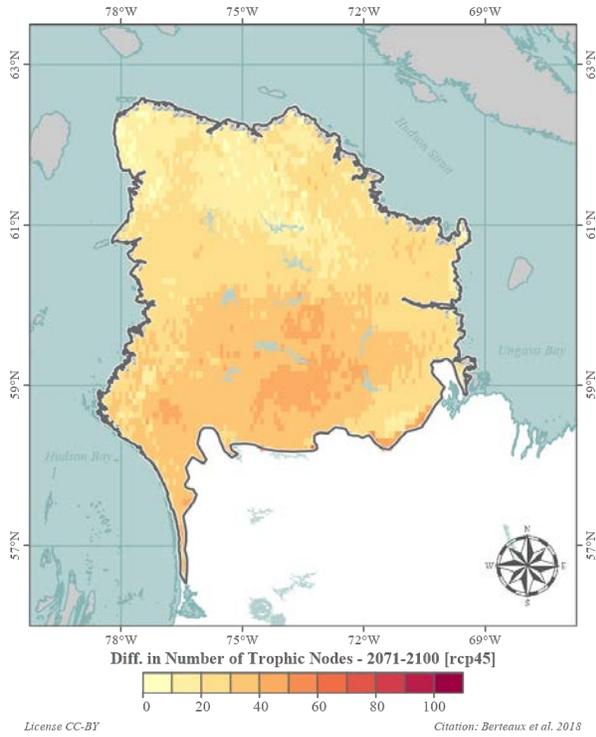
(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)



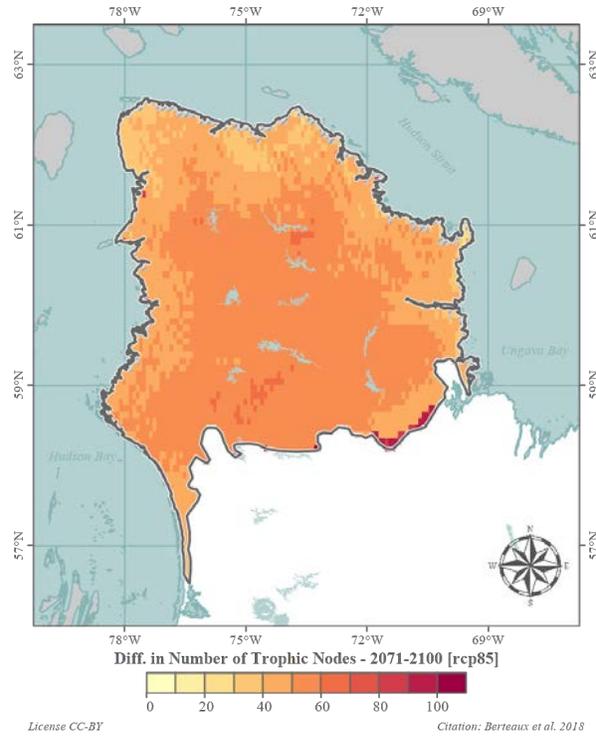
(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 20 – Écarts à la période de référence : Nombre de liens trophiques



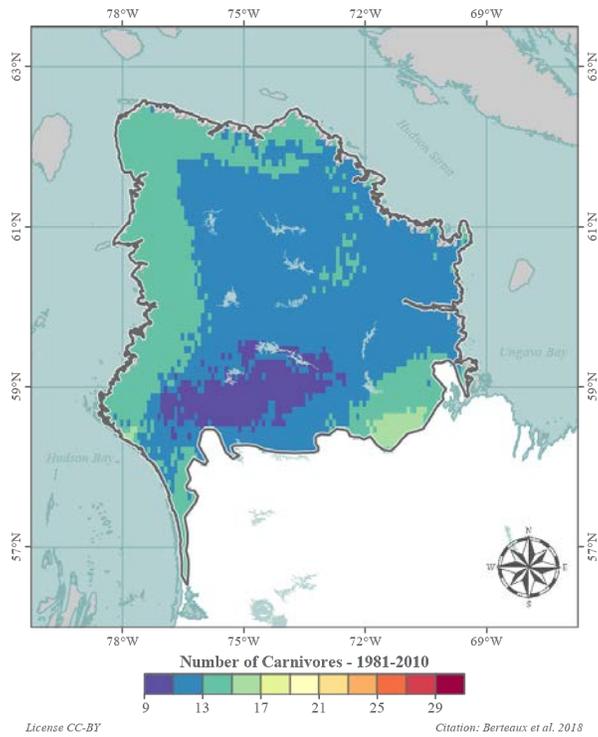


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

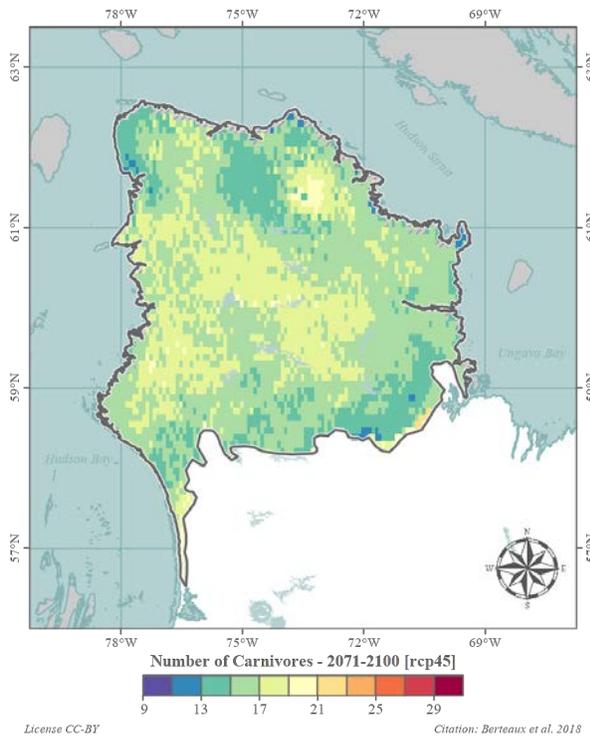


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

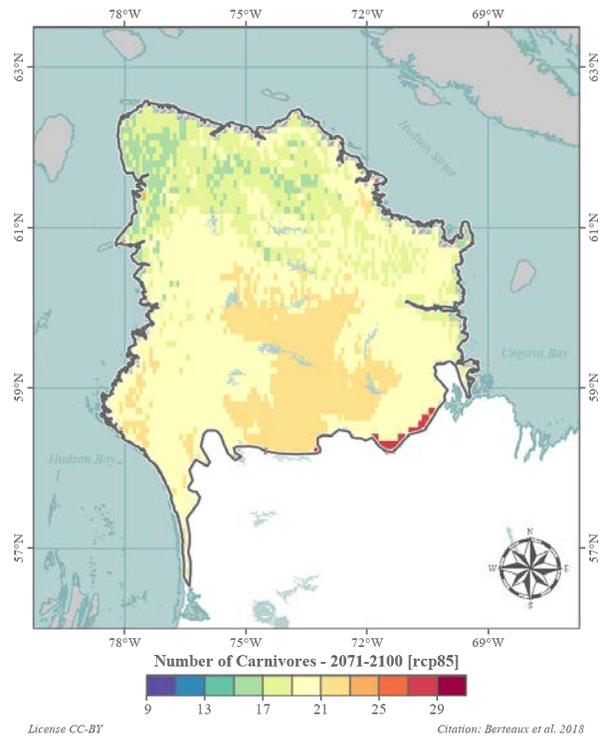
FIGURE 22 – Écarts à la période de référence : Nombre de noeuds trophiques



(a) Horizon 1981–2010

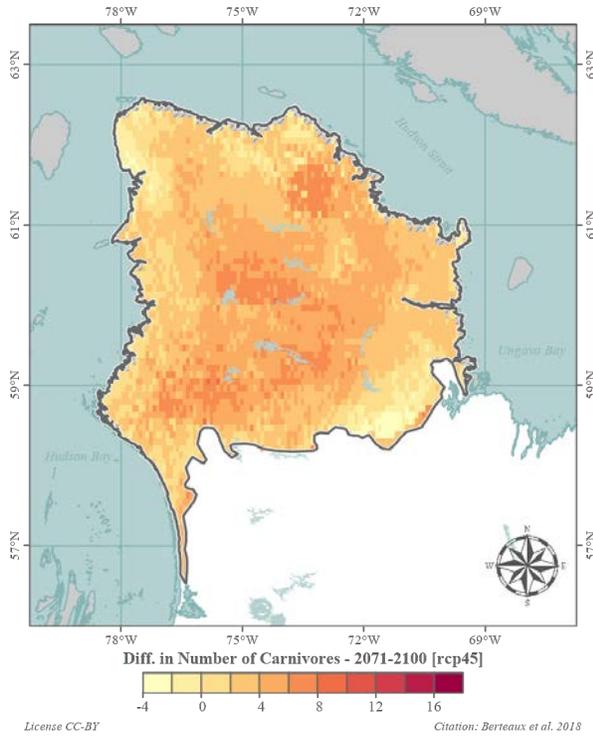


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

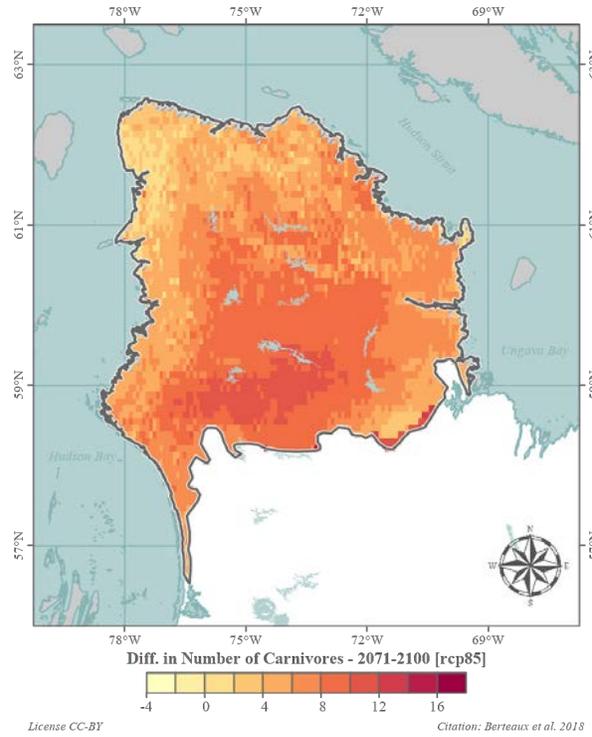


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 23 – Nombre de carnivores



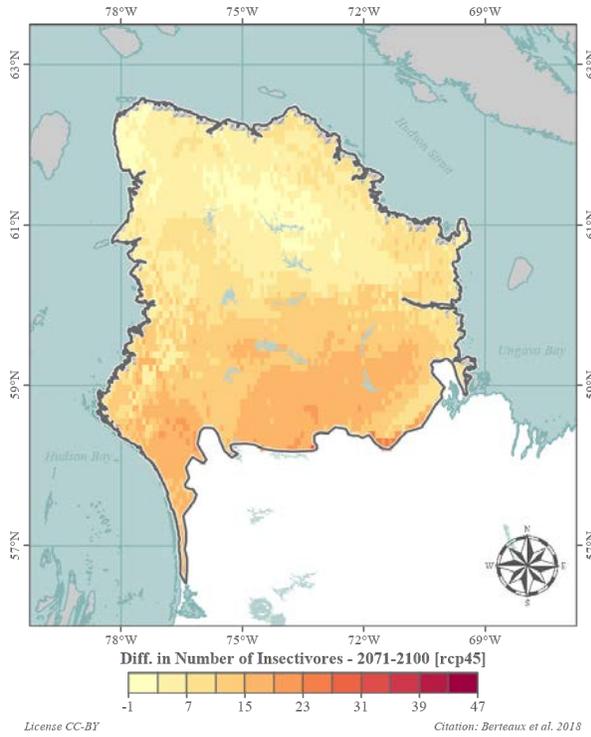
(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)



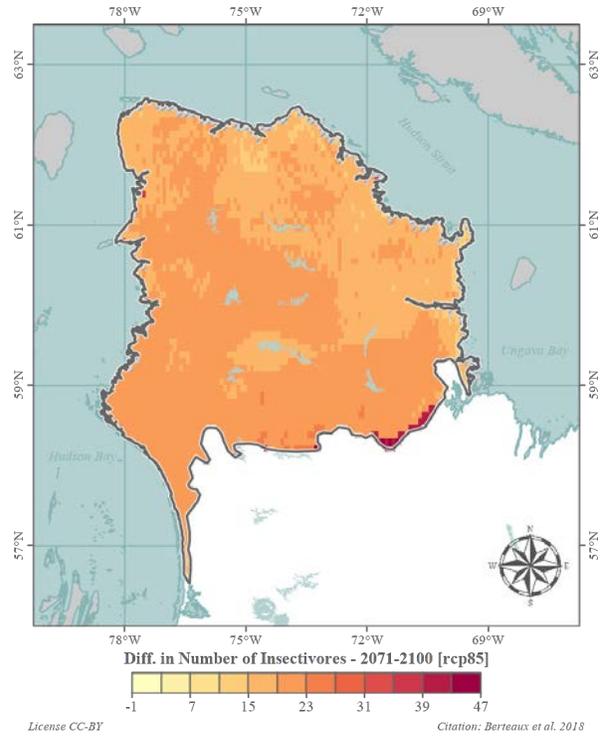
(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 24 – Écarts à la période de référence : Nombre de carnivores



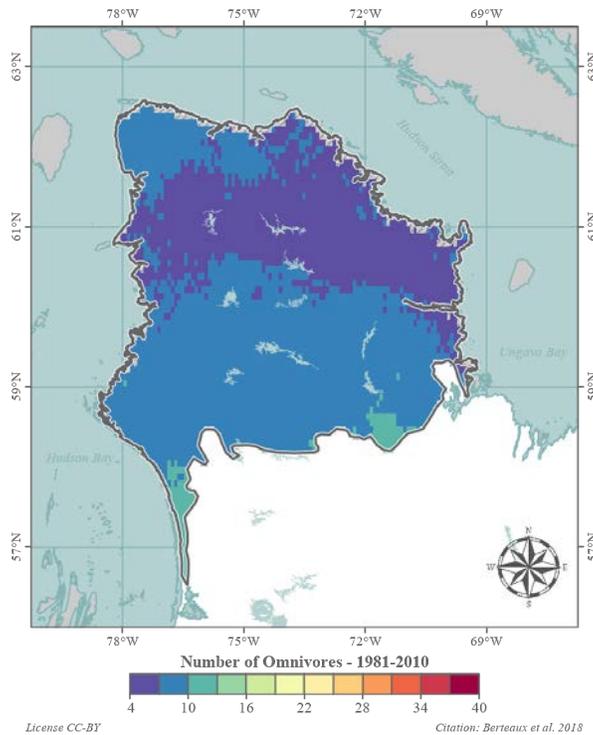


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

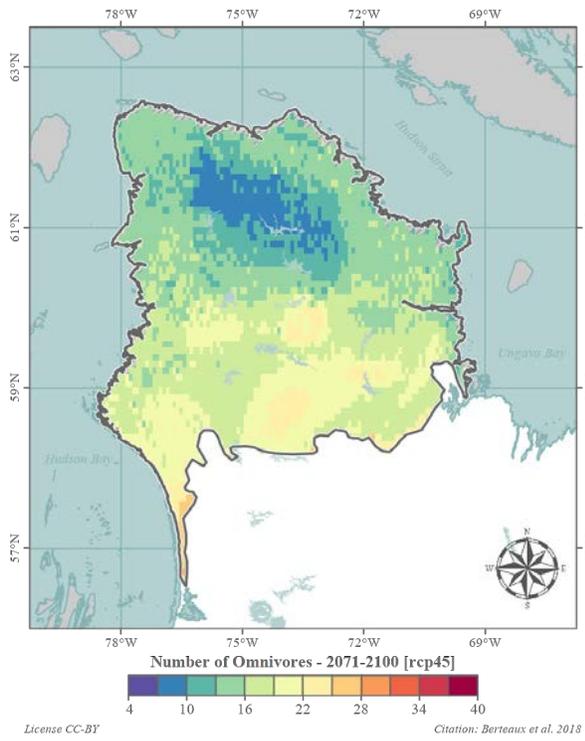


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

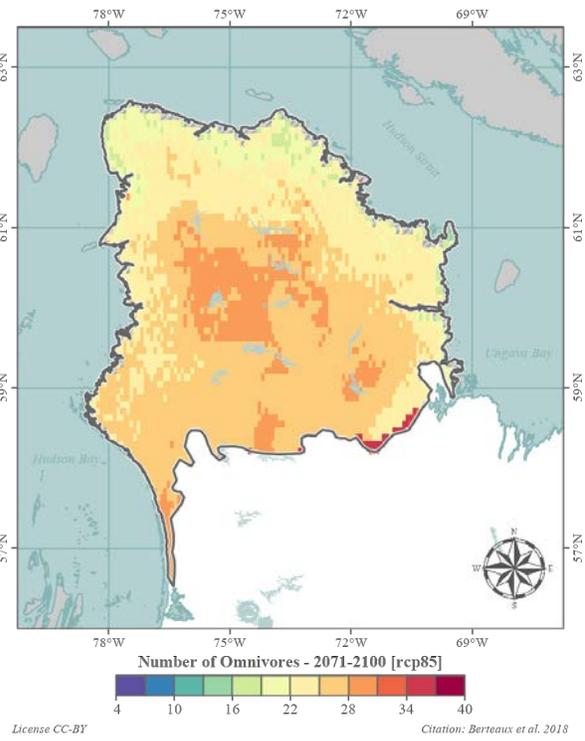
FIGURE 26 – Écart à la période de référence : Nombre d'insectivores



(a) Horizon 1981–2010

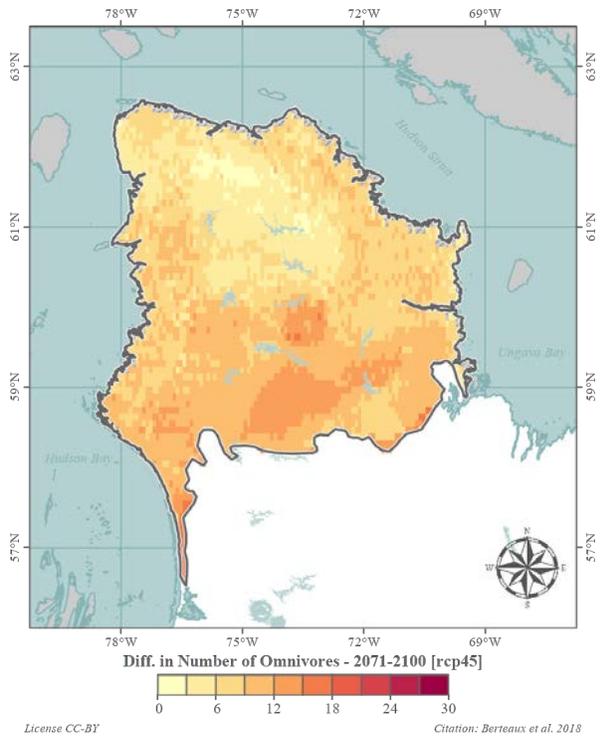


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

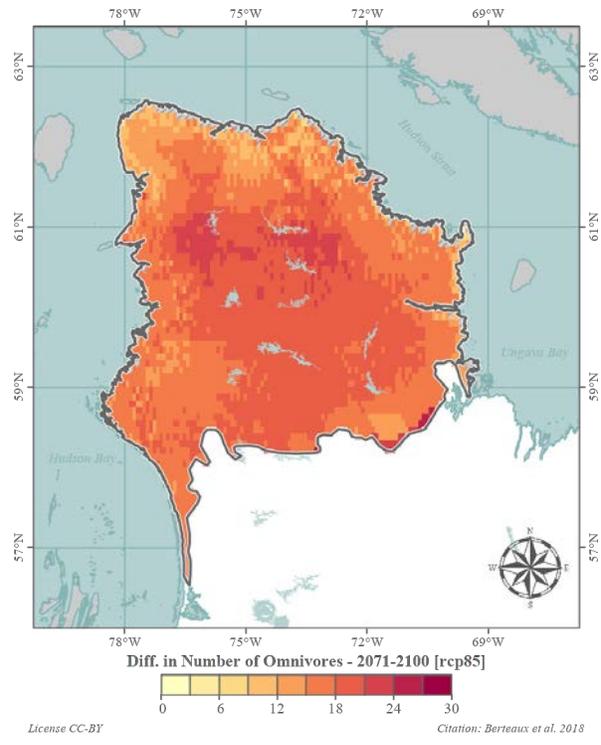


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 27 – Nombre d'omnivores

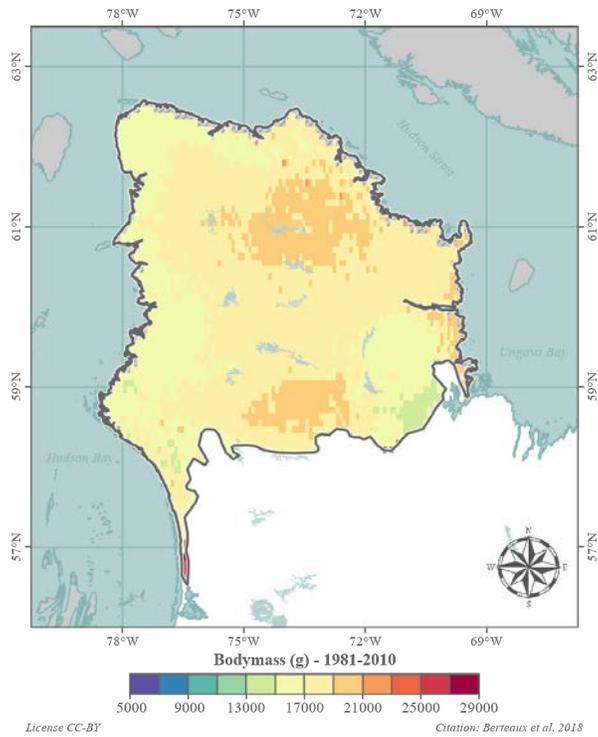


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

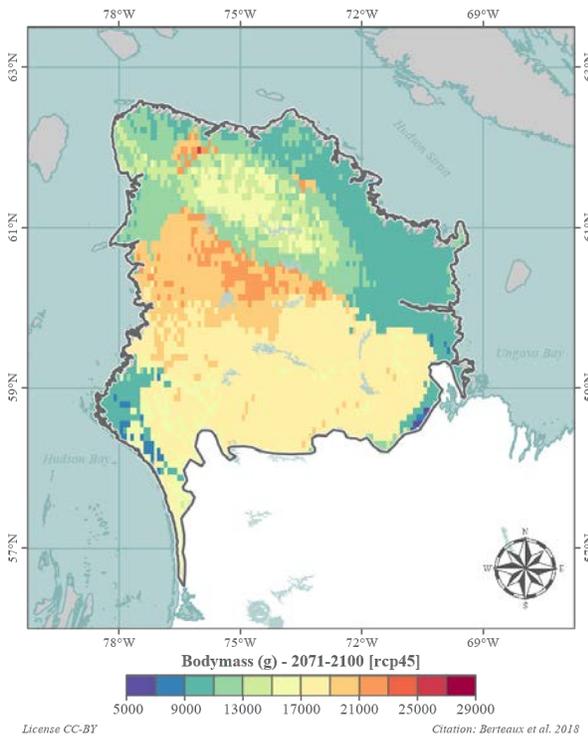


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

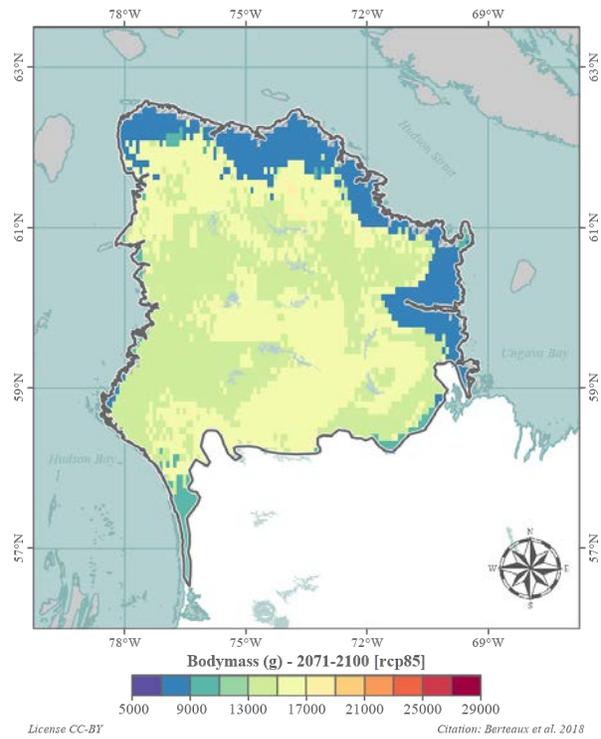
FIGURE 28 – Écarts à la période de référence : Nombre d’omnivores



(a) Horizon 1981–2010

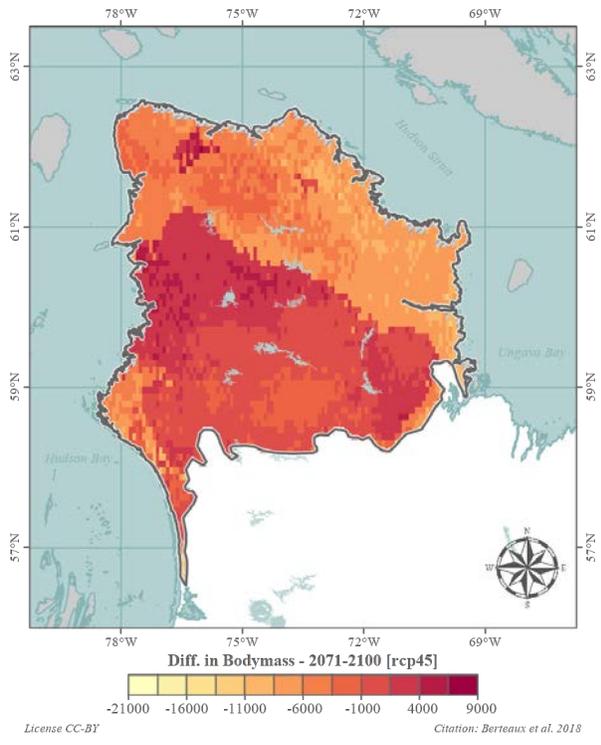


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

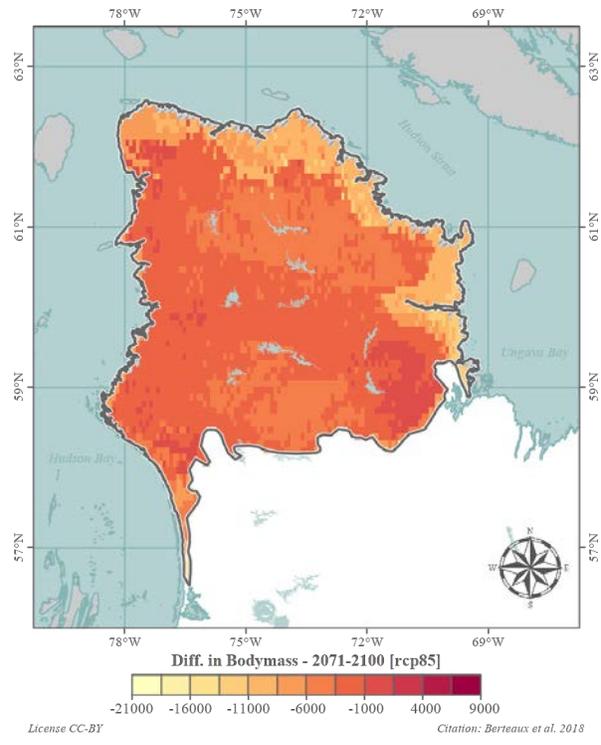


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 29 – Masse corporelle moyenne

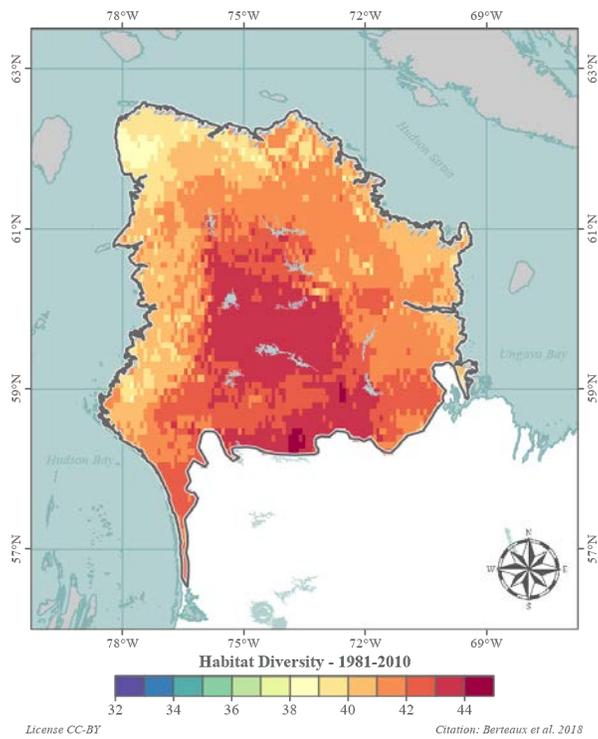


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

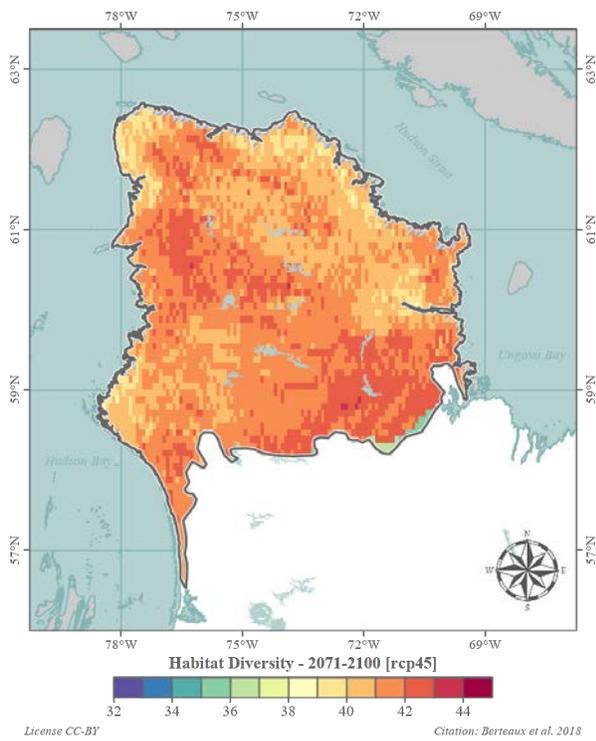


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

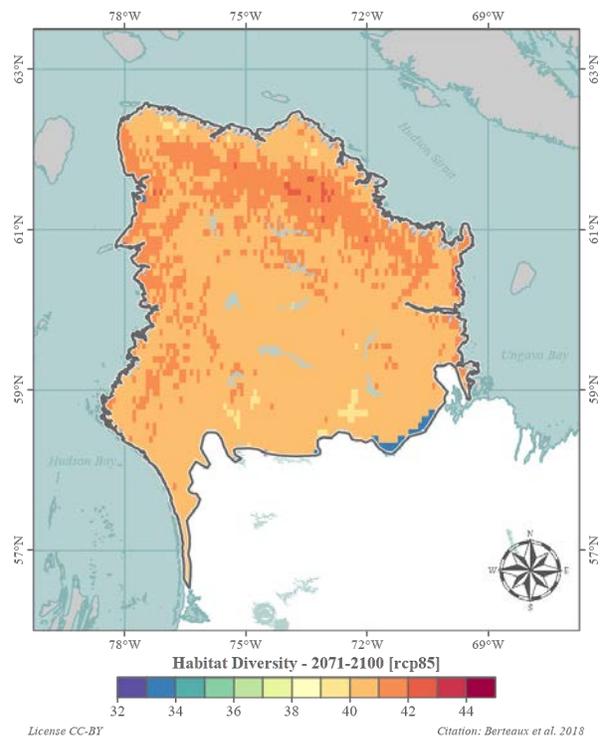
FIGURE 30 – Écarts à la période de référence : Masse corporelle moyenne



(a) Horizon 1981–2010

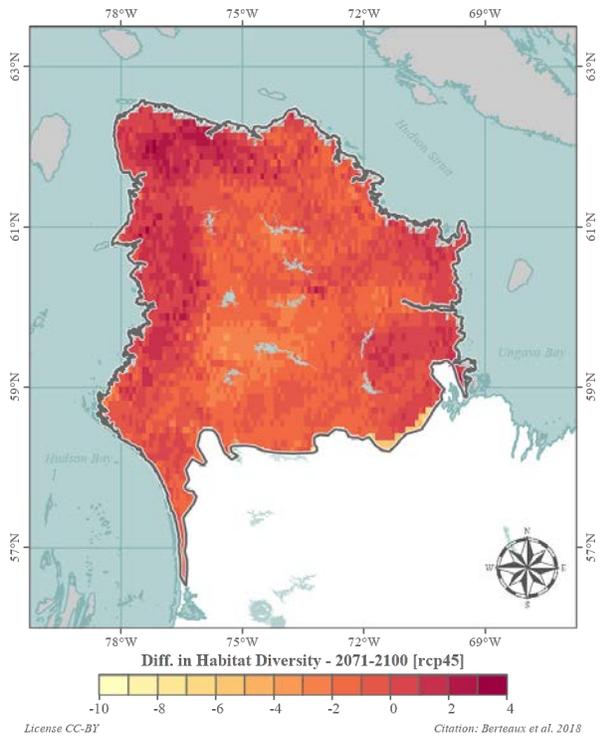


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

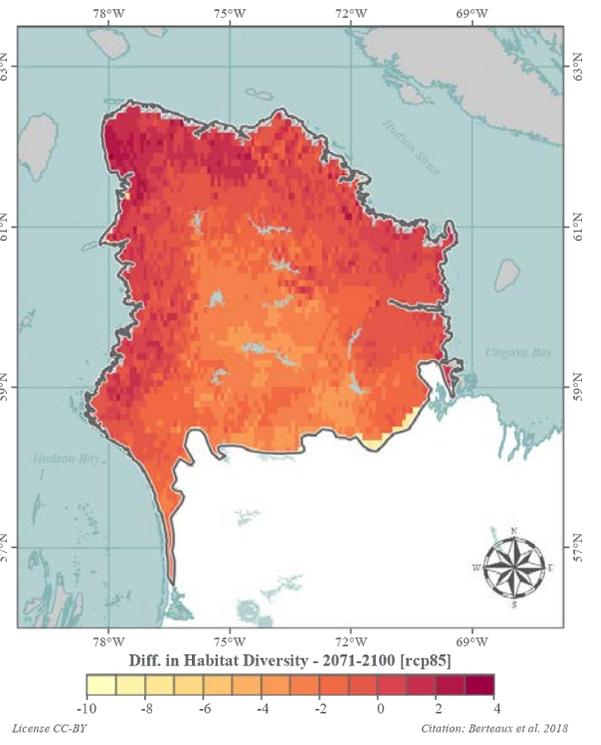


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 31 – Diversité d'habitats

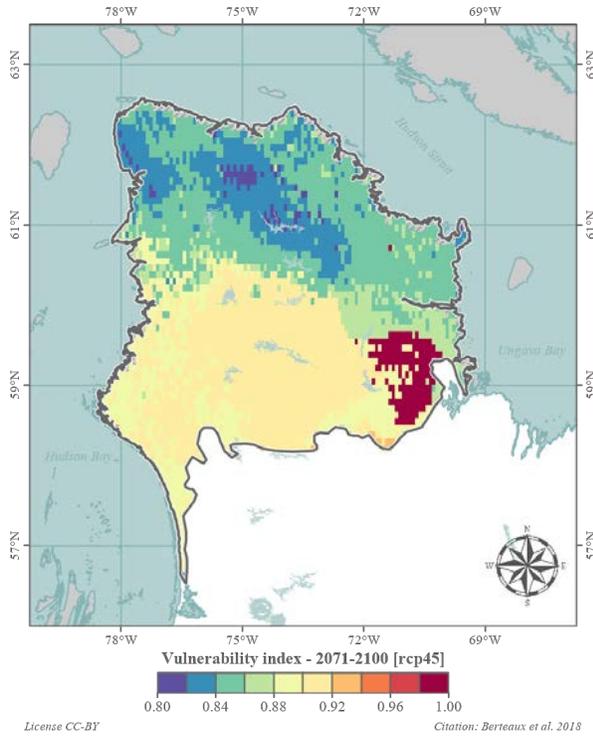


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

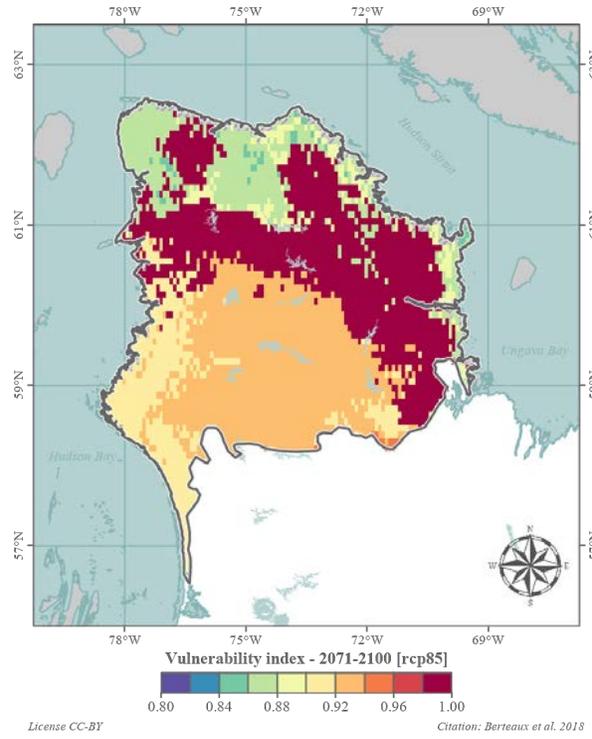


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 32 – Écarts à la période de référence : Diversité d’habitats



(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)



(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 33 – Indice de vulnérabilité écosystémique

## Références aux données et métadonnées

### Métadonnées inscrites au Polar Data Catalogue (<https://www.polardata.ca>)

Berteaux D., Casajus N. and Ropars P. (2018) Tundra Nunavik : Distribution of birds and mammals in Nunavik during 1981-2010. Waterloo, Canada : Canadian Cryospheric Information Network (CCIN) #12891.

Berteaux D., Casajus N. and Ropars P. (2018) Tundra Nunavik : Potential future distribution of birds and mammals in Nunavik projected during the 21<sup>st</sup> century under climate change. Waterloo, Canada : Canadian Cryospheric Information Network (CCIN) #12894.

Berteaux D., Ropars P. and Casajus N. (2018) Tundra Nunavik : Functional traits of mammal and bird species. Waterloo, Canada : Canadian Cryospheric Information Network (CCIN) #12892.

Berteaux D., Ropars P. and Casajus N. (2018) Tundra Nunavik : Matrix of trophic relations. Waterloo, Canada : Canadian Cryospheric Information Network (CCIN) #12895.

### Données archivées dans la collection Nordicana D (<http://www.cen.uqar.ca/nordicanad>)

Berteaux D., Casajus N. and Ropars P. (2018) Tundra Nunavik : Observed and modelled distribution of 183 species of birds and mammals in Labrador and the province of Quebec north of 50°N during the period 1981-2010. Nordicana DXX, sous presse.

Berteaux D., Casajus N. and Ropars P. (2018) Tundra Nunavik : Potential future distribution of 183 species of birds and mammals in Labrador and the province of Quebec north of 50°N projected during the 21<sup>st</sup> century under climate change scenarios. Nordicana DXX, sous presse.

Berteaux D., Ropars P. and Casajus N. (2018) Tundra Nunavik : Functional traits of common mammal and bird species in Labrador and the province of Quebec north of 50°N. Nordicana DXX, sous presse.

Berteaux D., Ropars P. and Casajus N. (2018) Tundra Nunavik : Matrix of trophic relations of the terrestrial ecosystem of Labrador and the province of Quebec north of 50°N. Nordicana DXX, sous presse.

## Références bibliographiques

- Allouche, O., Tsoar, A. & Kadmon, R. (2006) Assessing the accuracy of species distribution models : Prevalence, kappa and the true skill statistic (tss). *Journal of Applied Ecology*, **43**, 1223–1232.
- Araújo, M.B., Pearson, R.G., Thuiller, W. & Erhard, M. (2005) Validation of species–climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, **11**, 1504–1513.
- Berteaux, D., Casajus, N. & Ropars, P. (2018) *Portrait du climat du nord du Québec et du Labrador pour la période 1981–2010. Rapport présenté au Consortium Ouranos sur la climatologie régionale et les changements climatiques*, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Canada, 33 pages.
- BirdLife International & NatureServe (2015) *Bird Species Distribution Maps of the World, version 5.0*, BirdLife International, Cambridge, UK ; NatureServe, Arlington, USA.
- Cohen, J. (1960) A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, **20**, 27–46.
- Fielding, A.H. & Bell, J.F. (1997) A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, **24**, 38–49.
- IUCN (2014) *The IUCN Red List of Threatened Species, version 2014.1*, [www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org), downloaded on 2016/01/25.
- Liu, C., Berry, P.M., Dawson, T.P. & Pearson, R.G. (2005) Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, **28**, 385–393.
- Poisot, T., Canard, E., Mouillot, D., Mouquet, N. & Gravel, D. (2012) The dissimilarity of species interaction networks. *Ecology Letters*, **15**, 1353–1361.
- R Core Team (2016) *R : A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R. & Araújo, M.B. (2009) BIOMOD – a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, **32**, 369–373.
- Whittaker, R.H. (1960) Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*, **30**, 279–338.