

# 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 (Cyperaceae)
- 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 corrérer 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 même 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 données. Plus la valeur est importante, plus les espèces seront différentes dans le futur. L'équation 1 donne sa formule.

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

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**.

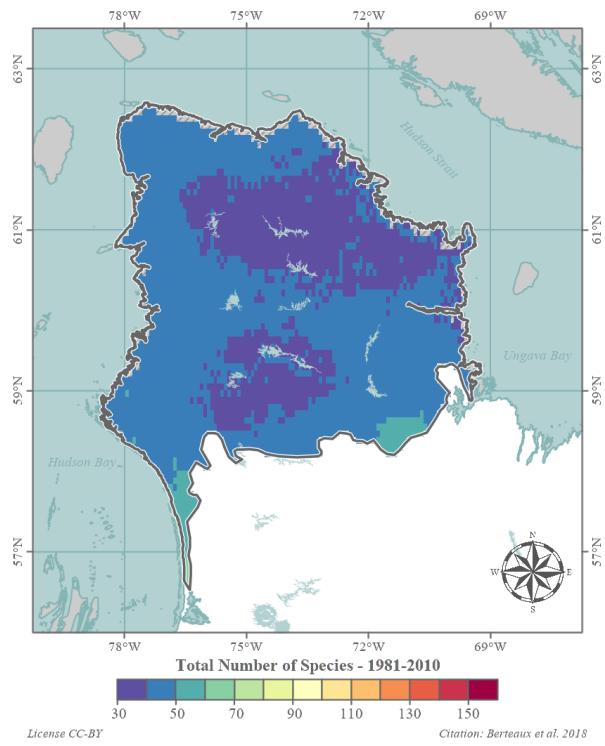
Le degré de dissemblance (ou dissimilarité) entre le réseau de référence et le réseau potentiel futur (noté ici **V** pour Vulnérabilité) est calculé selon une formule basée sur l'indice de diversité  $\beta$  de Whittaker (1960) :

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

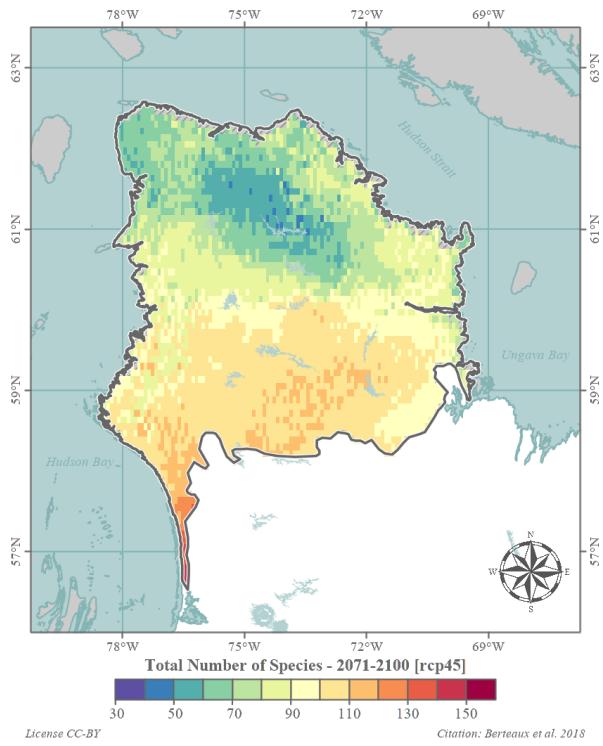
L'indice de vulnérabilité écosystémique **V** varie de 0 à 1. Si  $V = 0$ , alors on retrouve exactement les mêmes interactions trophiques entre la période de référence et la période future. Si  $V = 1$ , alors, durant la période future, aucune des interactions trophiques n'existe durant la période de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

## 4 Atlas de biodiversité

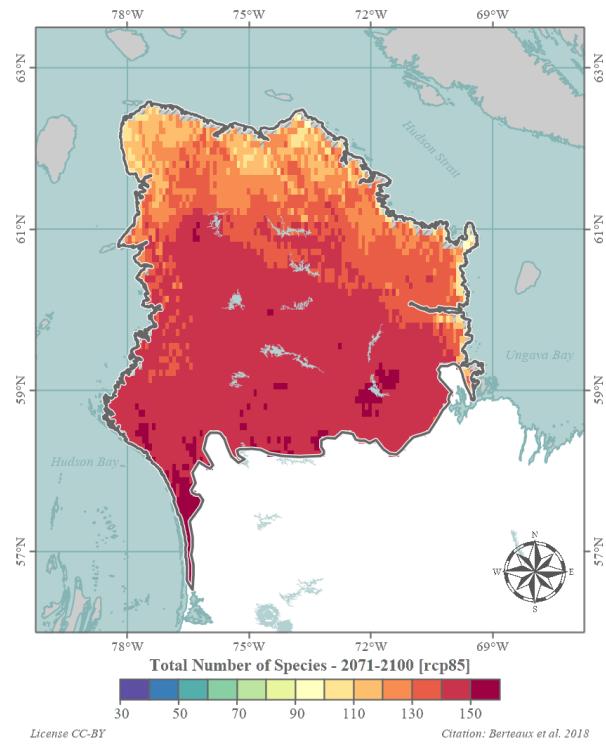
Pour des raisons de clarté, seuls les résultats pour l'horizon 2071-2100 sont présentés. Les résultats pour les deux autres horizons futurs ainsi qu'une version en haute définition des cartes est disponible à cette adresse : <https://ahasverus.shinyapps.io/bioclimaticatlas/>. À noter que pour des raisons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



(a) Horizon 1981–2010

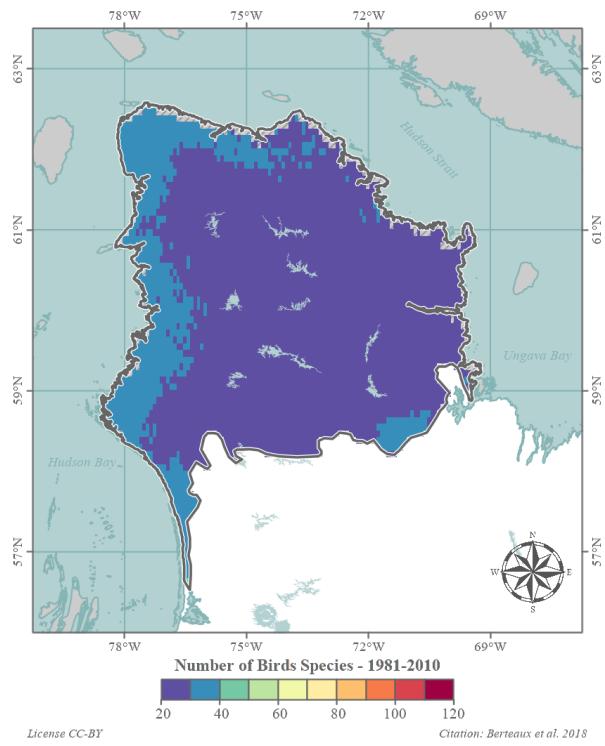


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

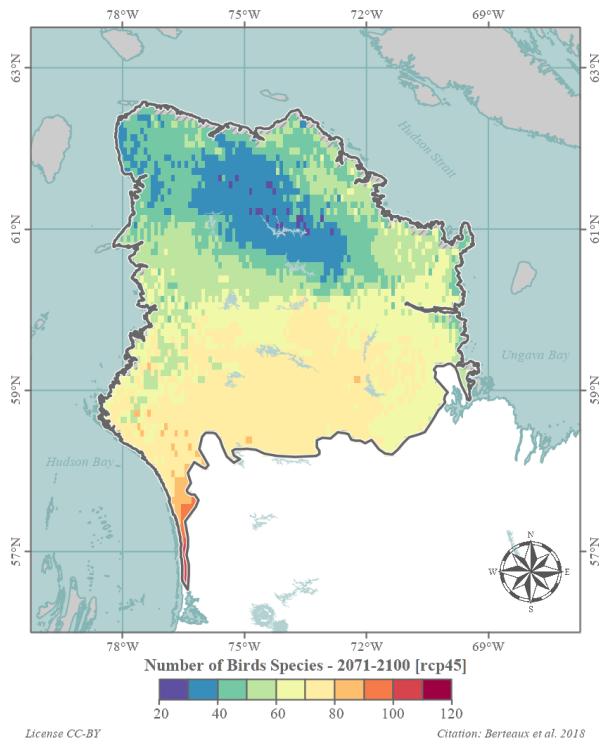


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

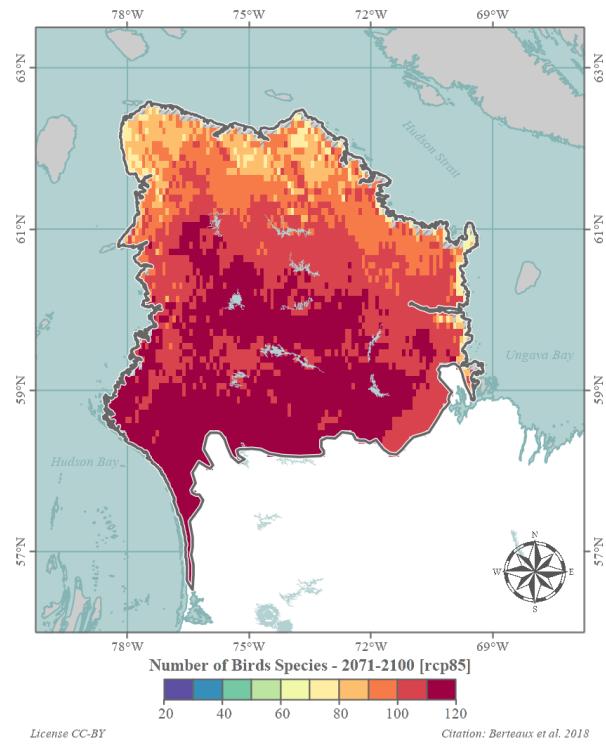
FIGURE 1 – Nombre total d'espèces



(a) Horizon 1981–2010

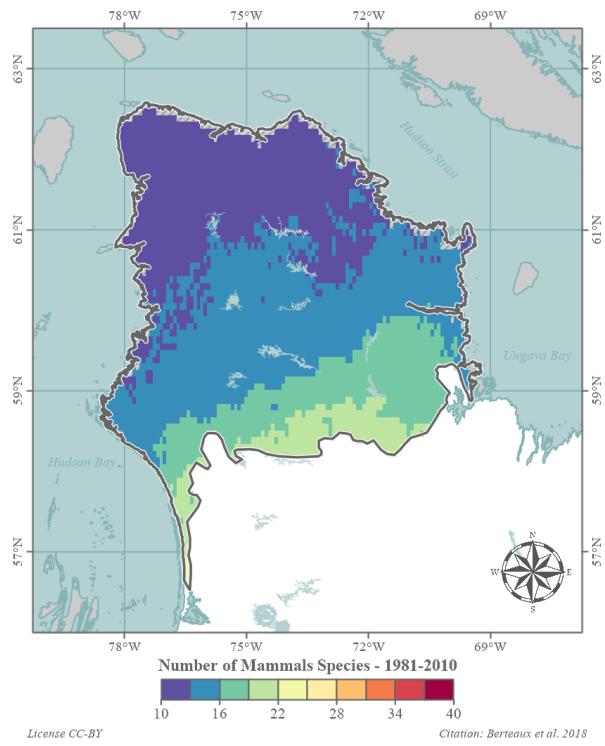


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

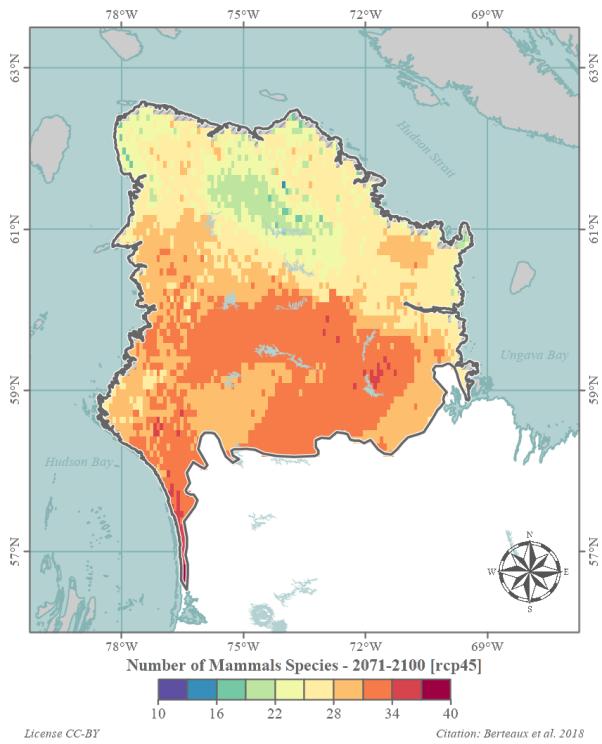


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

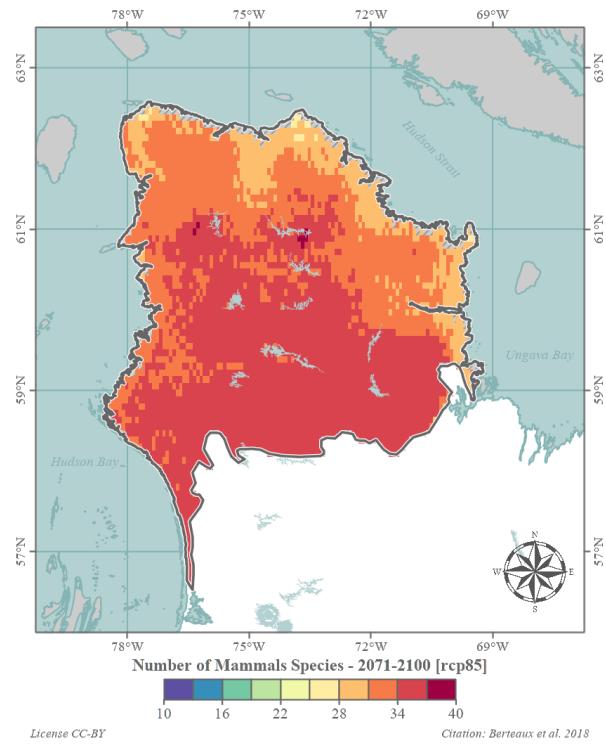
FIGURE 2 – Nombre d'espèces d'oiseaux



(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

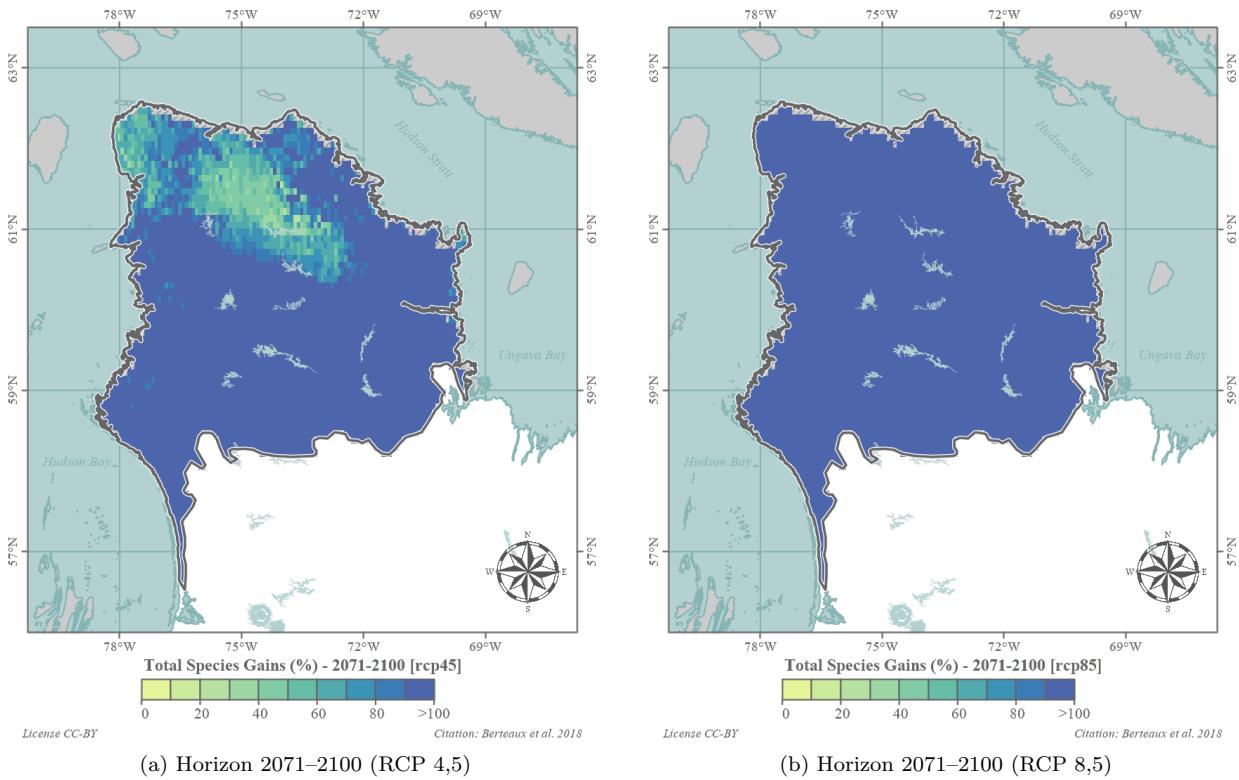


FIGURE 4 – Gains potentiels d'espèces (oiseaux + mammifères)

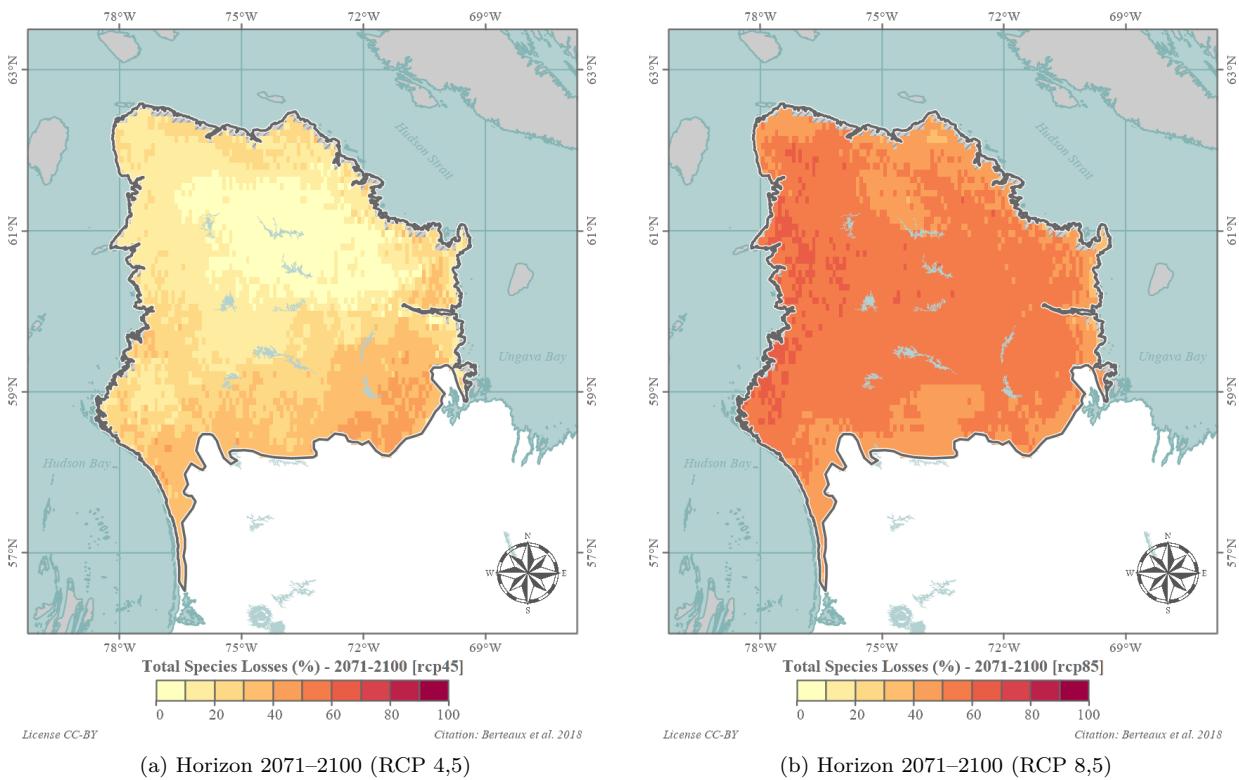
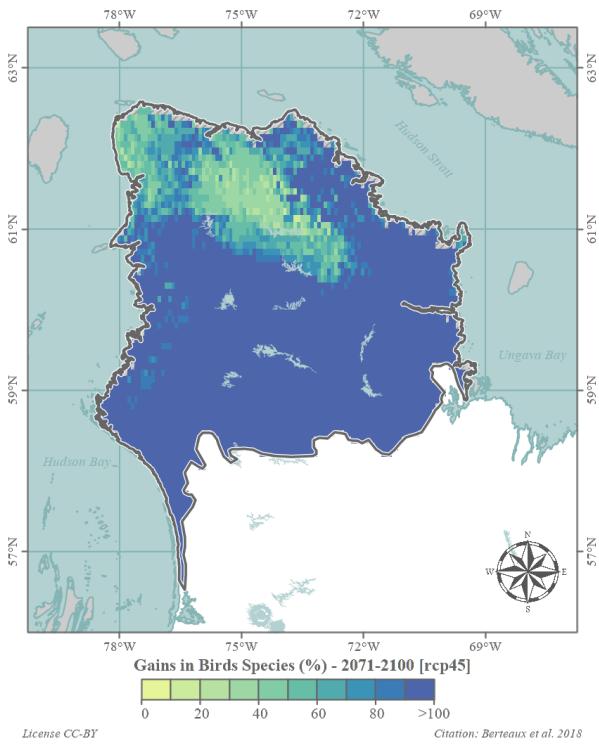
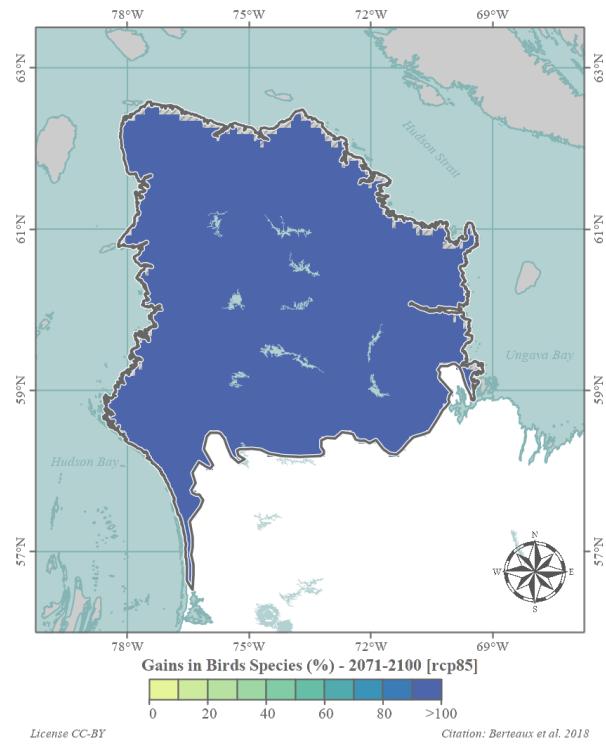


FIGURE 5 – Pertes potentielles d'espèces (oiseaux + mammifères)

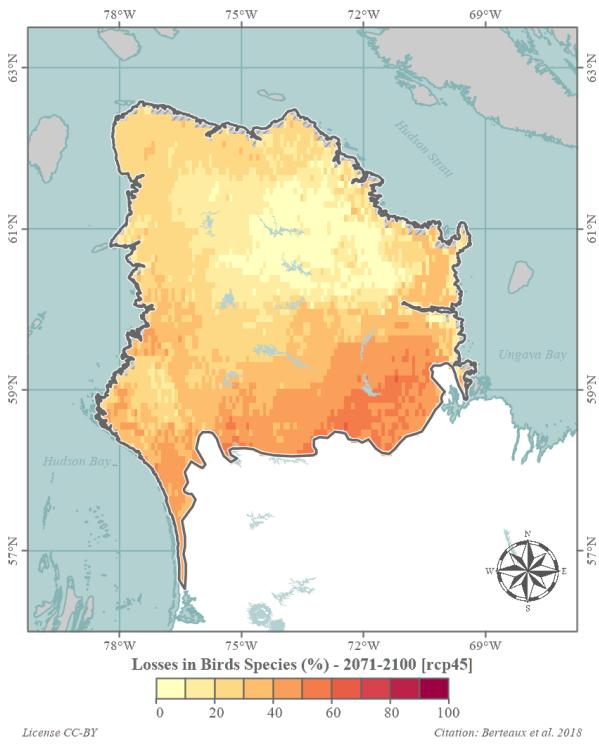


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

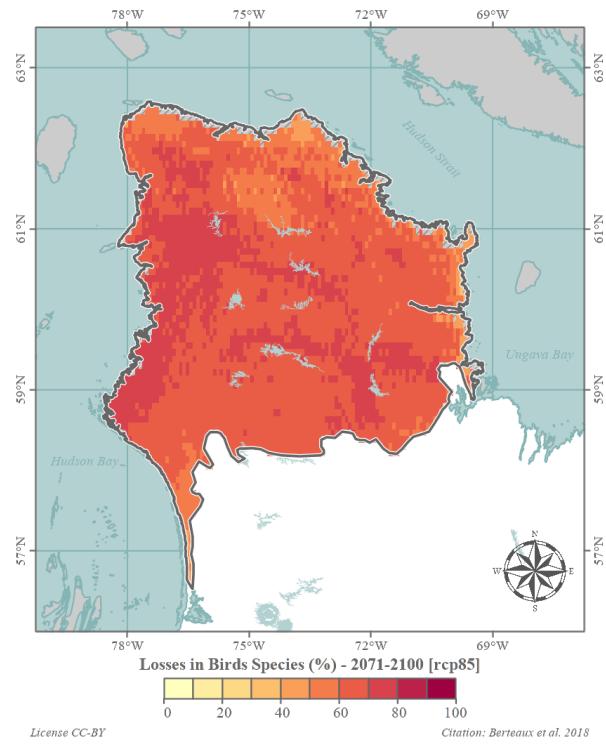


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

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)

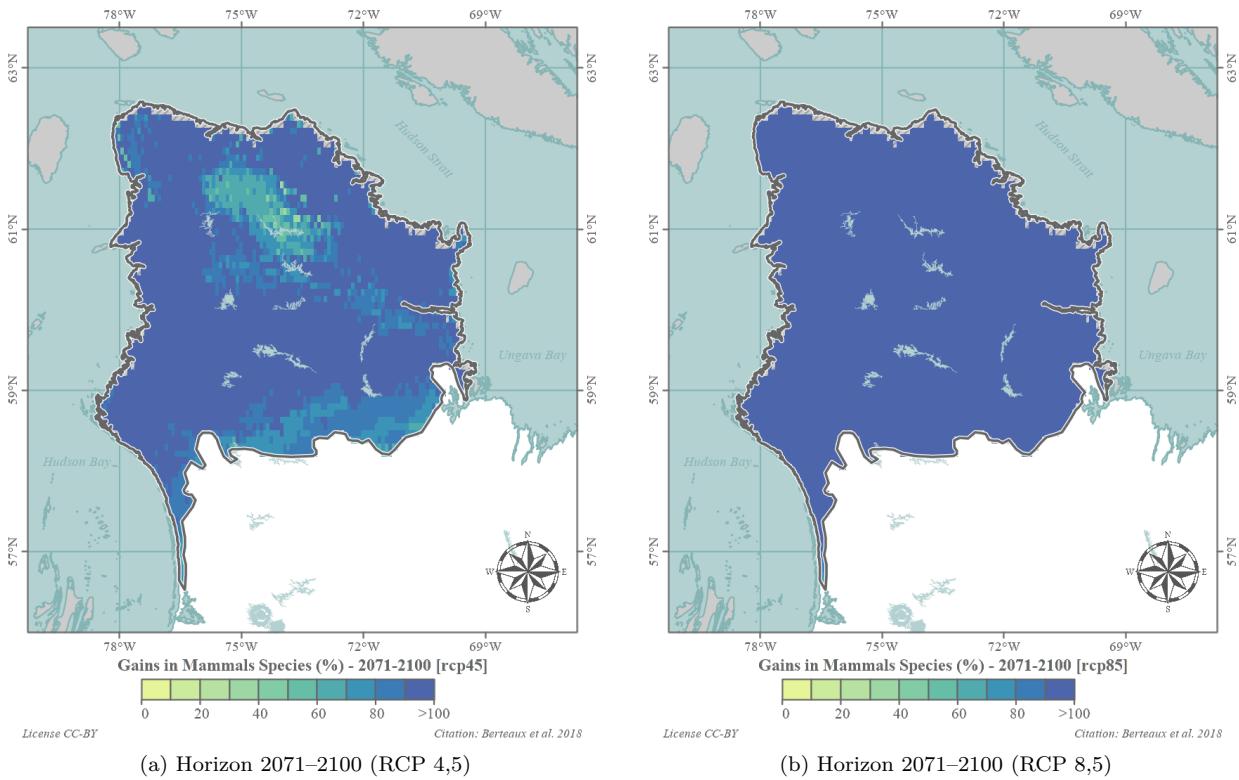


FIGURE 8 – Gains potentiels d'espèces (mammifères)

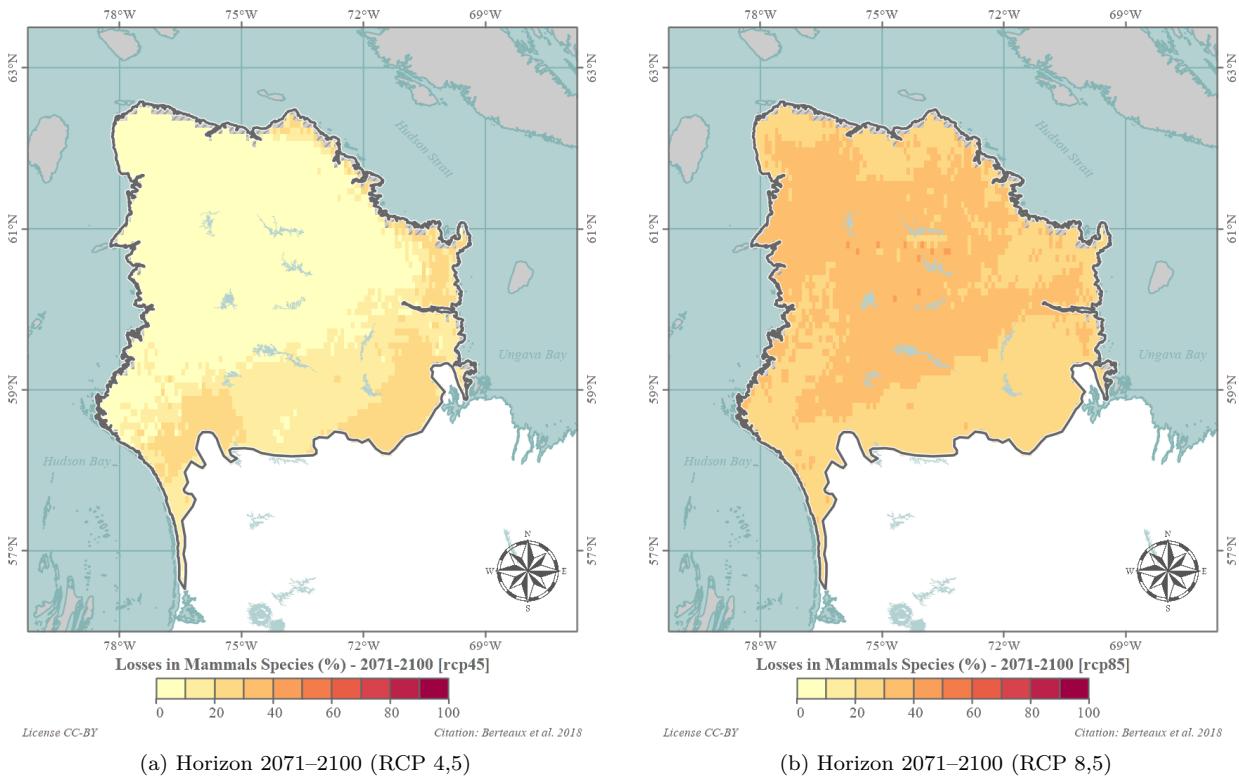


FIGURE 9 – Pertes potentielles d'espèces (mammifères)

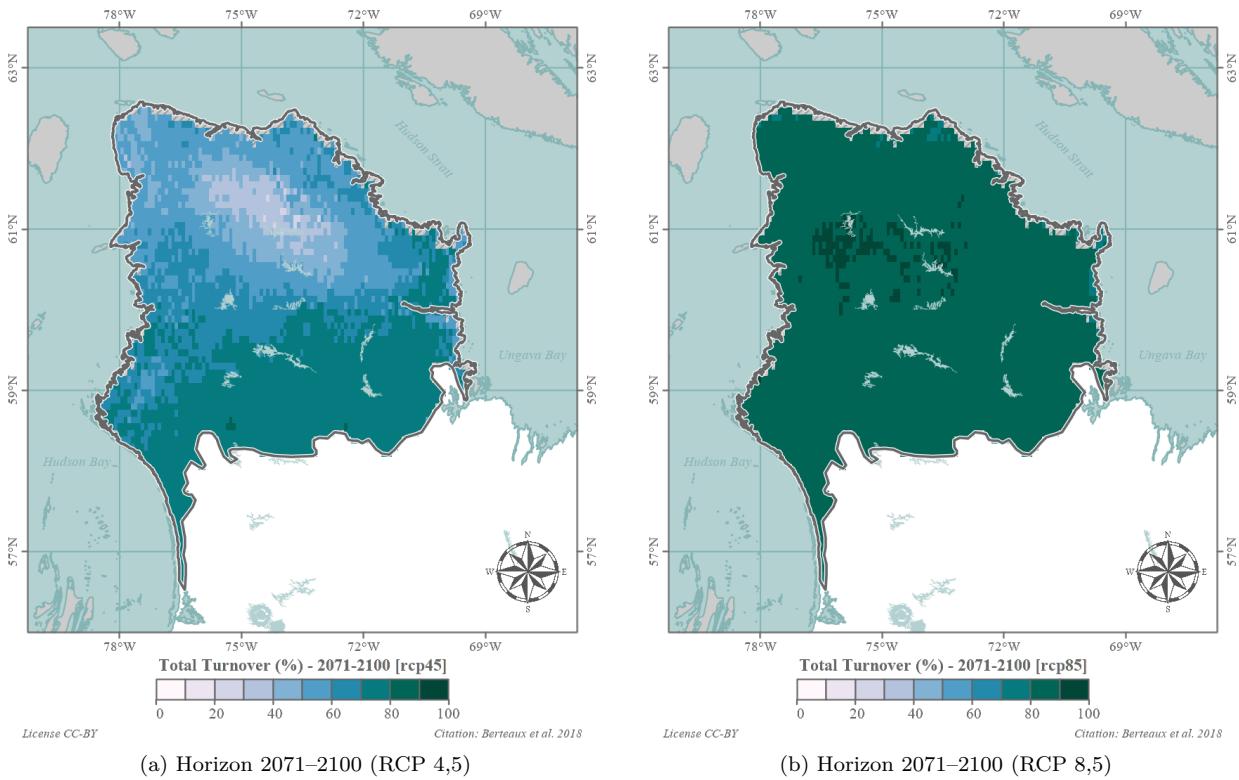


FIGURE 10 – Renouvellement d'espèces (oiseaux + mammifères)

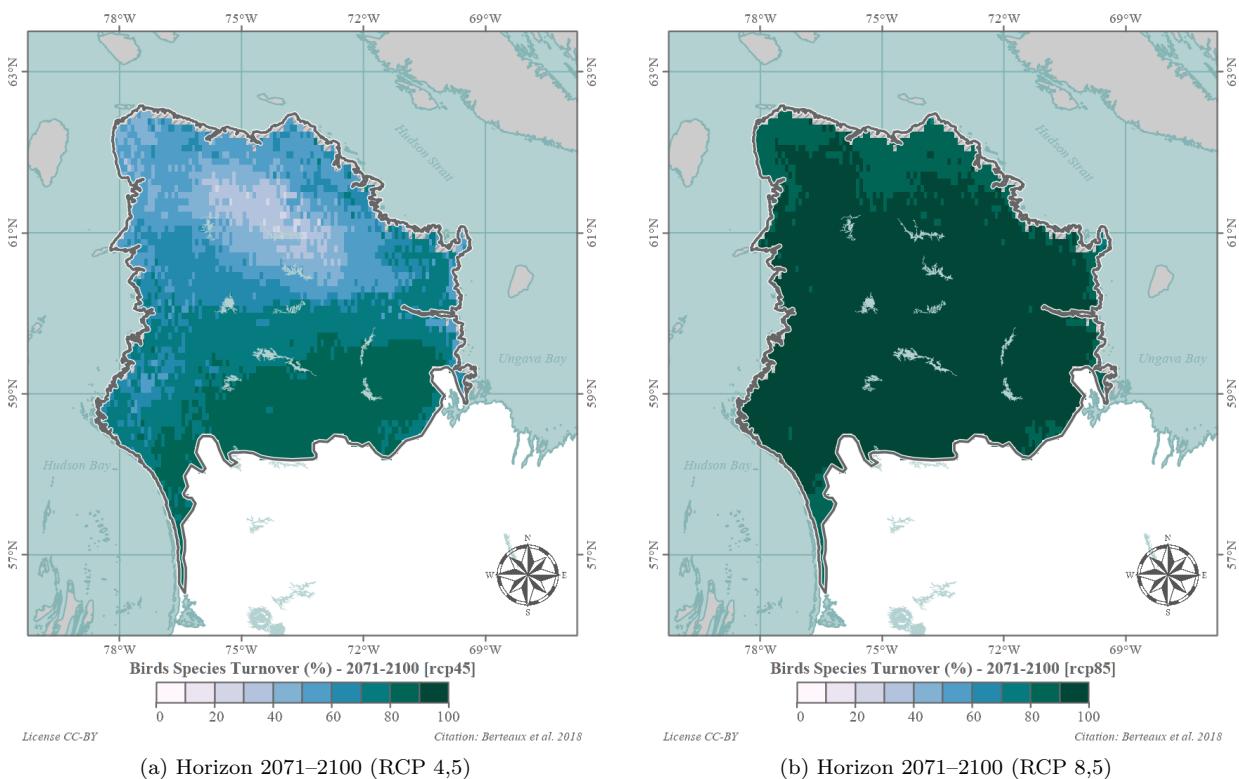
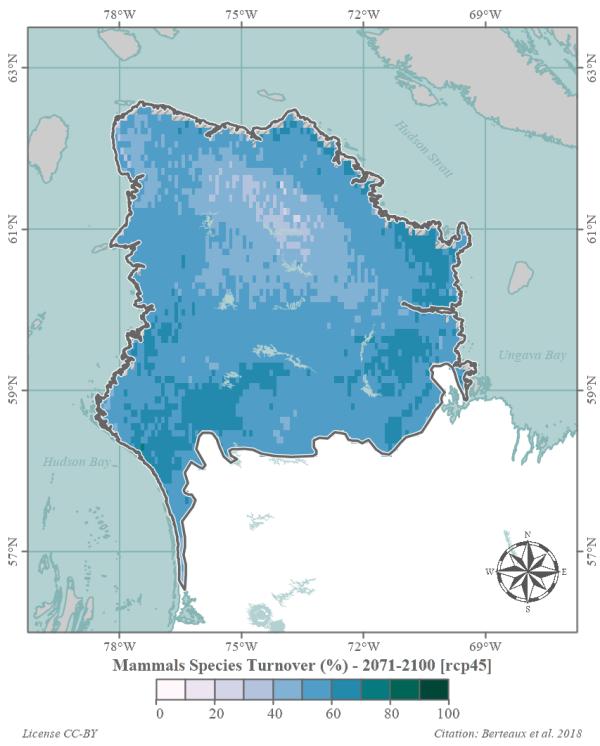
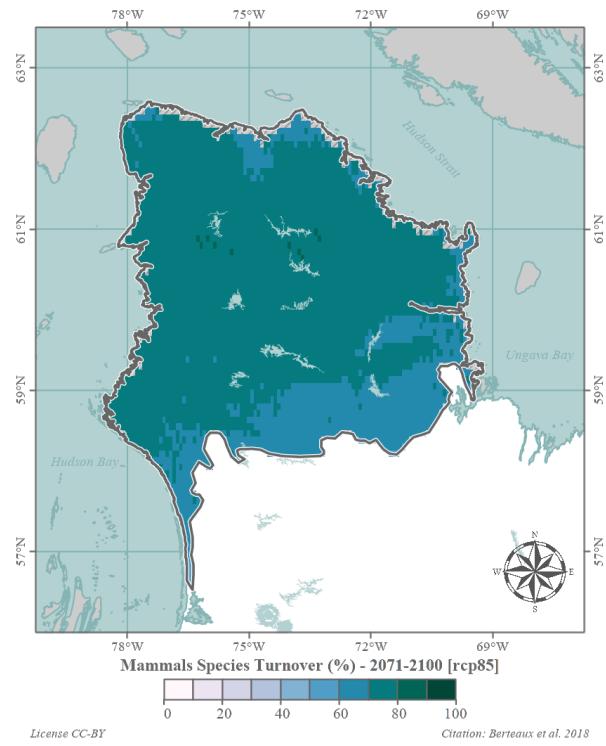


FIGURE 11 – Renouvellement d'espèces (oiseaux)

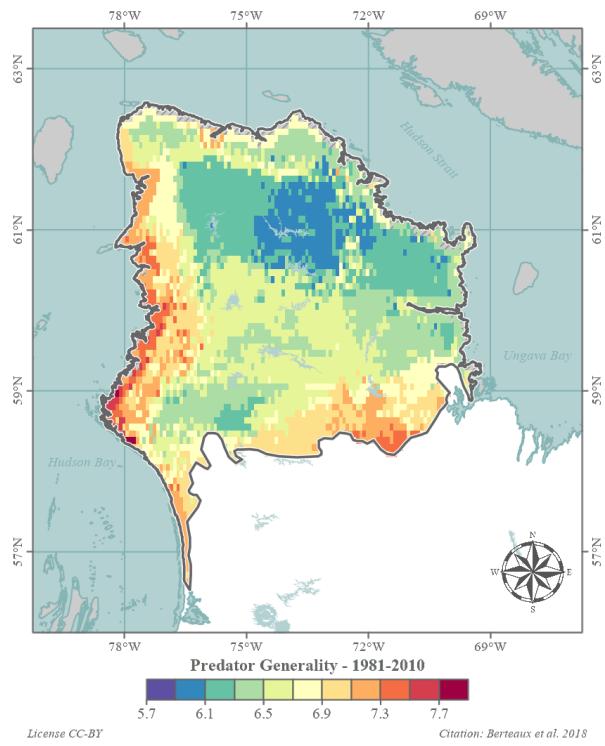


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

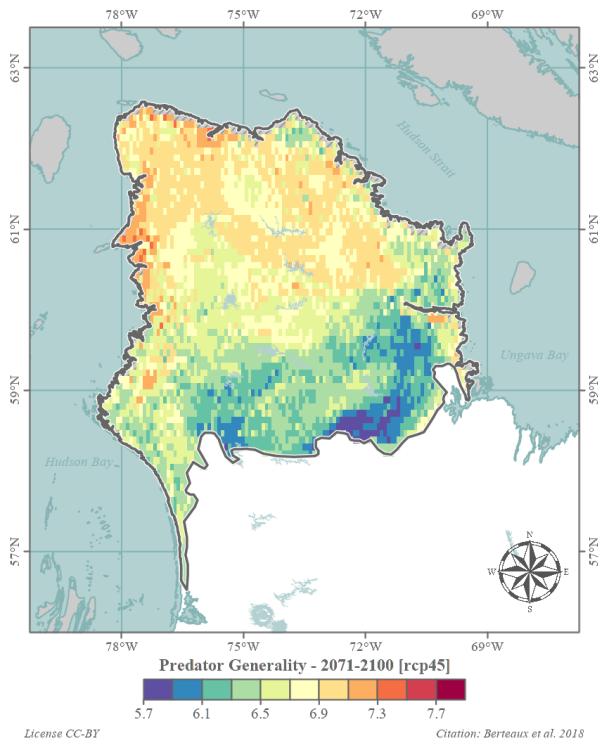


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

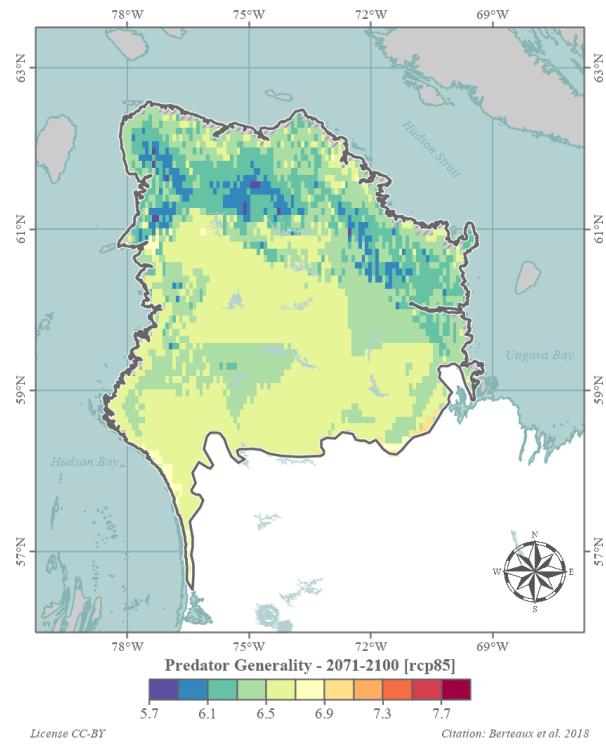
FIGURE 12 – Renouvellement d'espèces (mammifères)



(a) Horizon 1981–2010

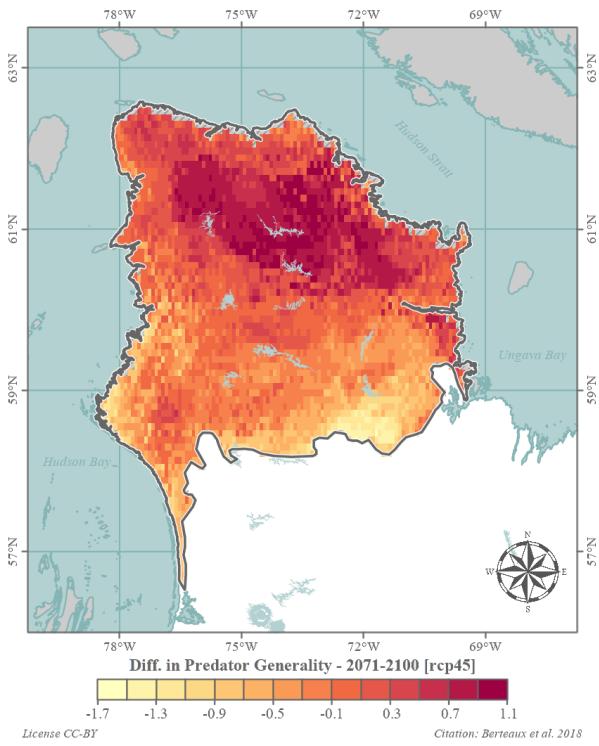


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

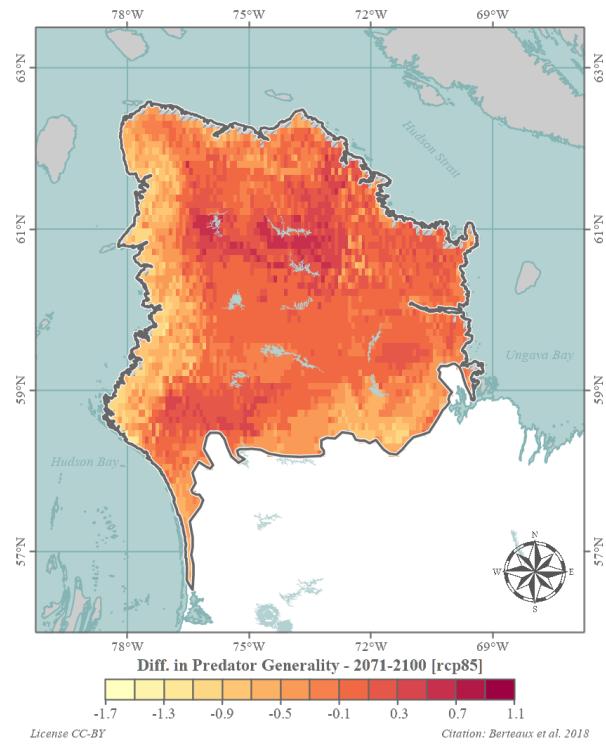


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 13 – Généralité des prédateurs

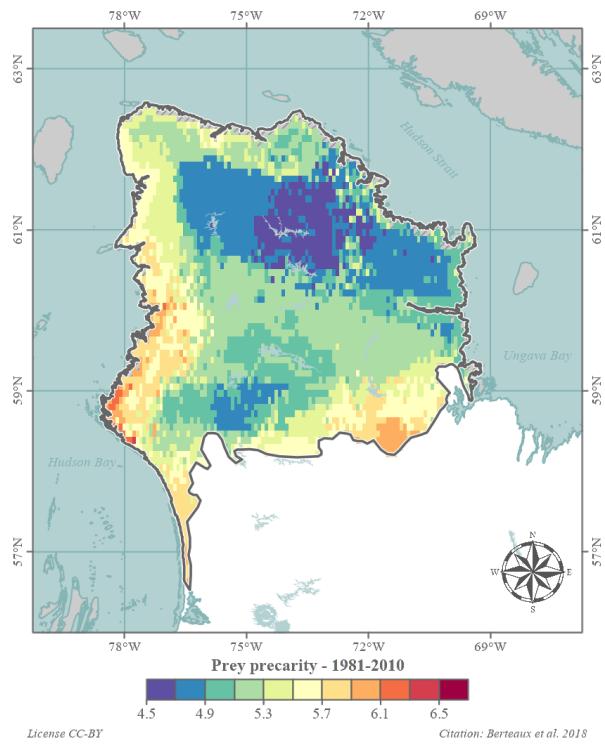


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

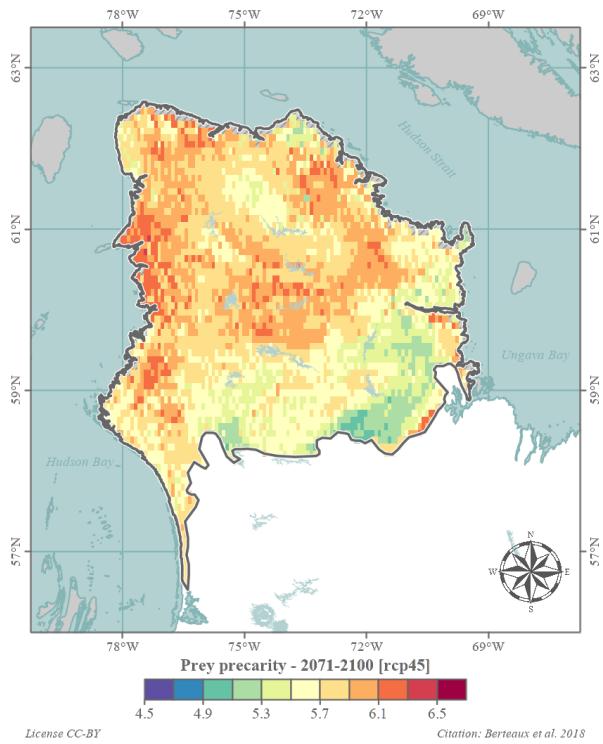


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

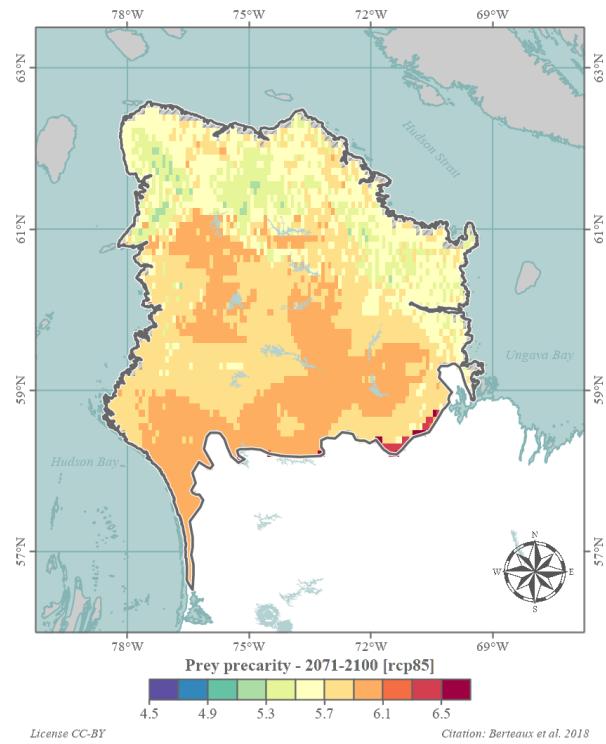
FIGURE 14 – Écarts à la période de référence : Généralité des prédateurs



(a) Horizon 1981–2010

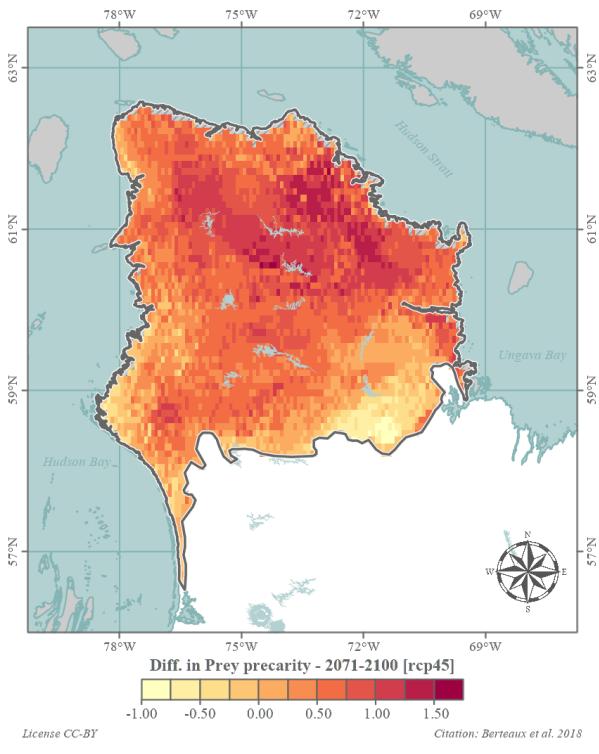


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

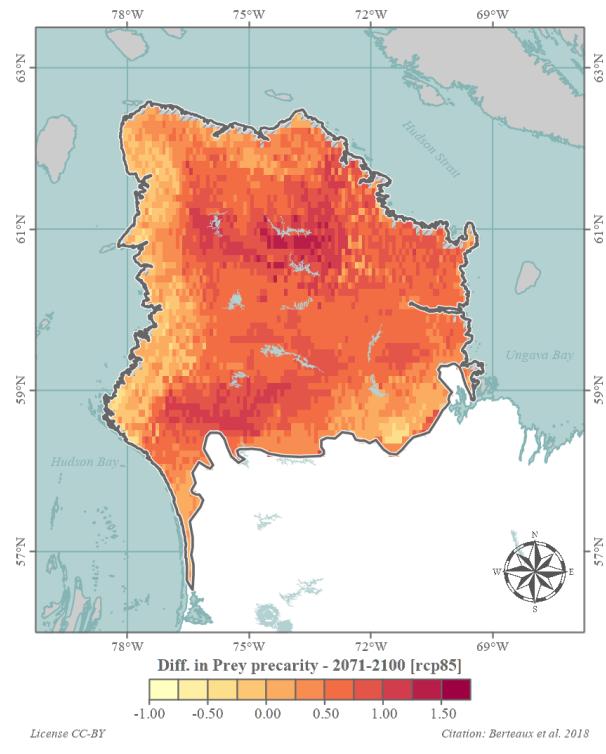


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 15 – Précarité des proies

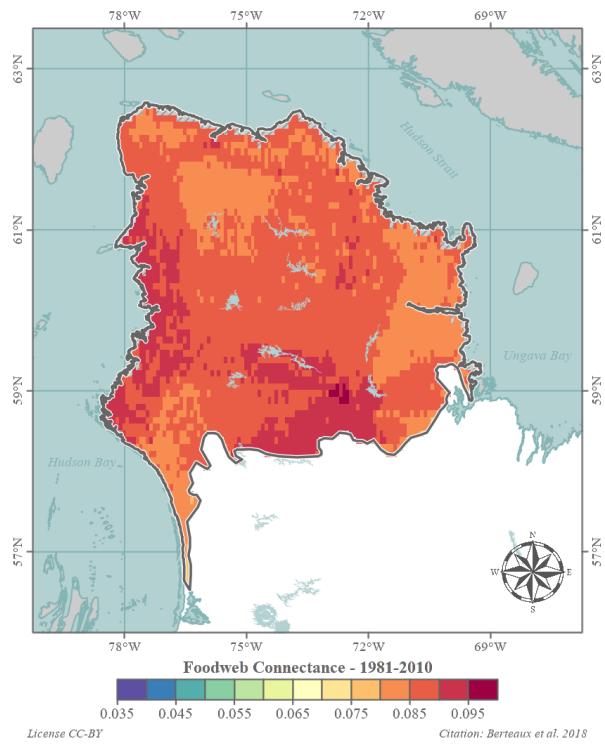


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

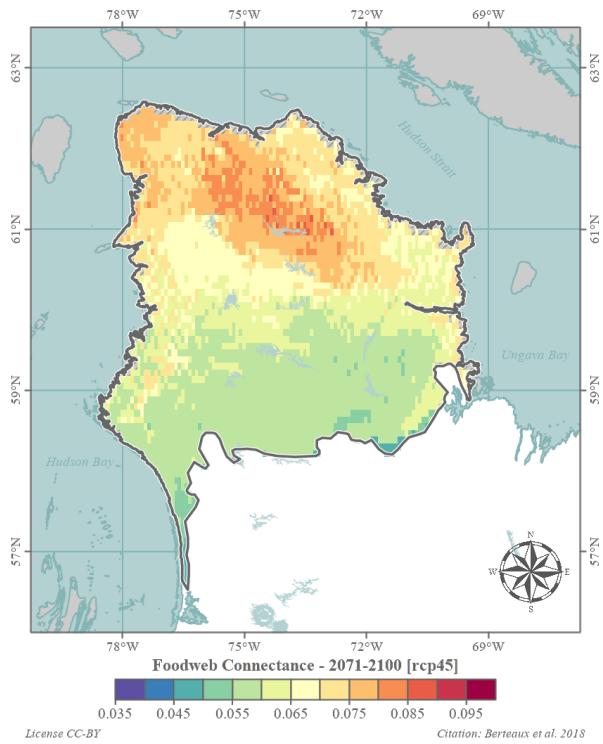


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

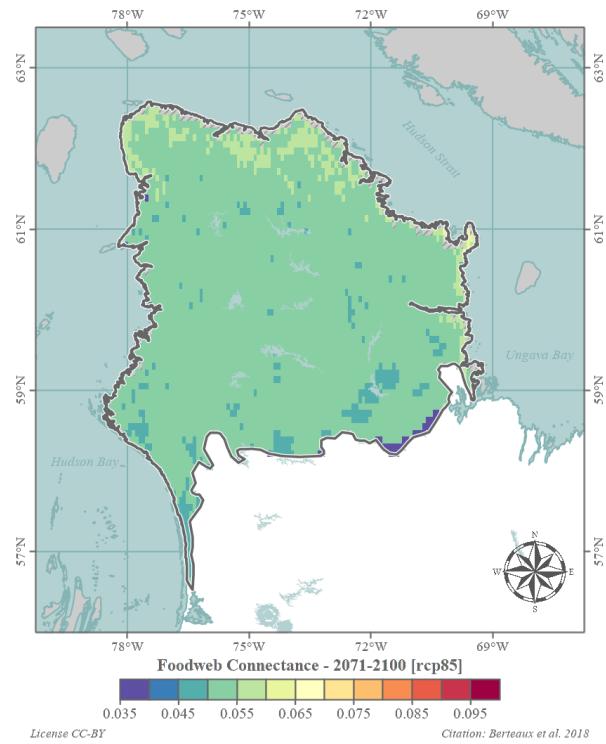
FIGURE 16 – Écarts à la période de référence : Précarité des proies



(a) Horizon 1981–2010

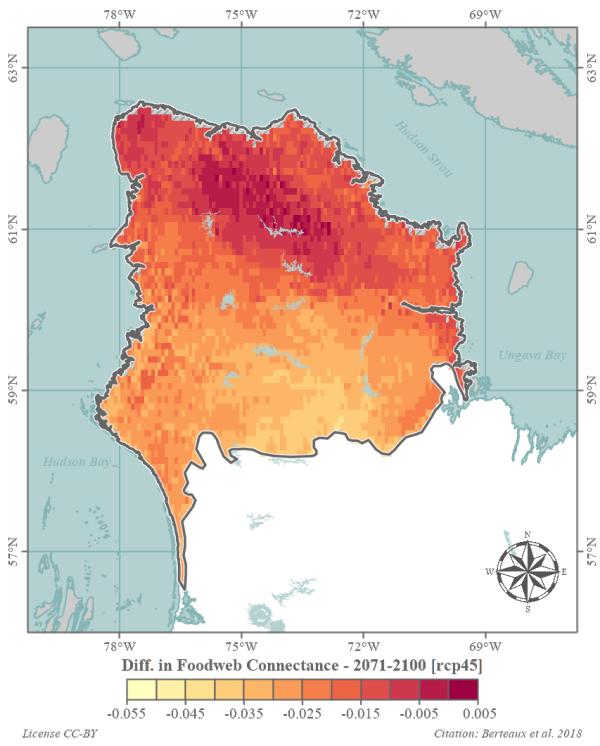


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

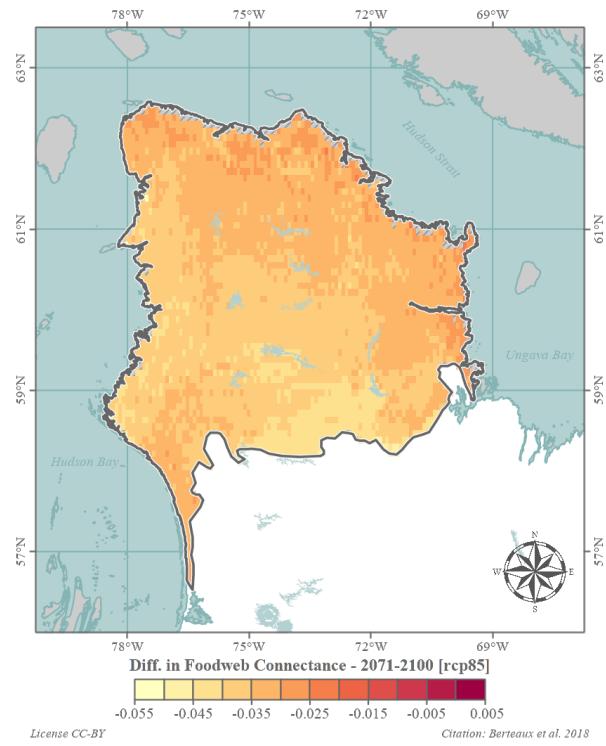


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 17 – Connectance des réseaux trophiques

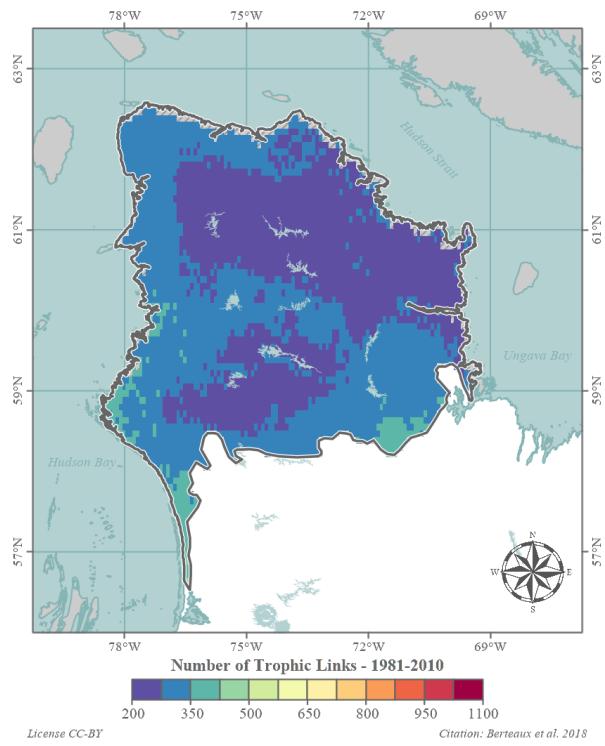


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

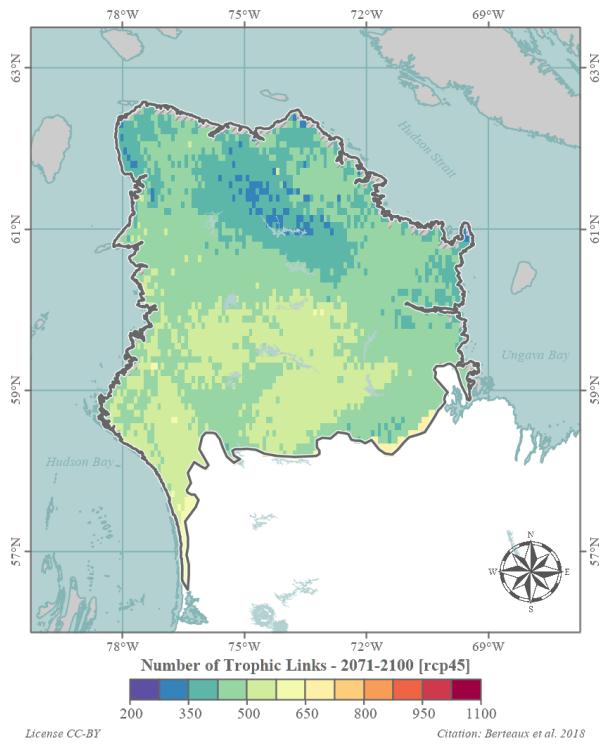


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

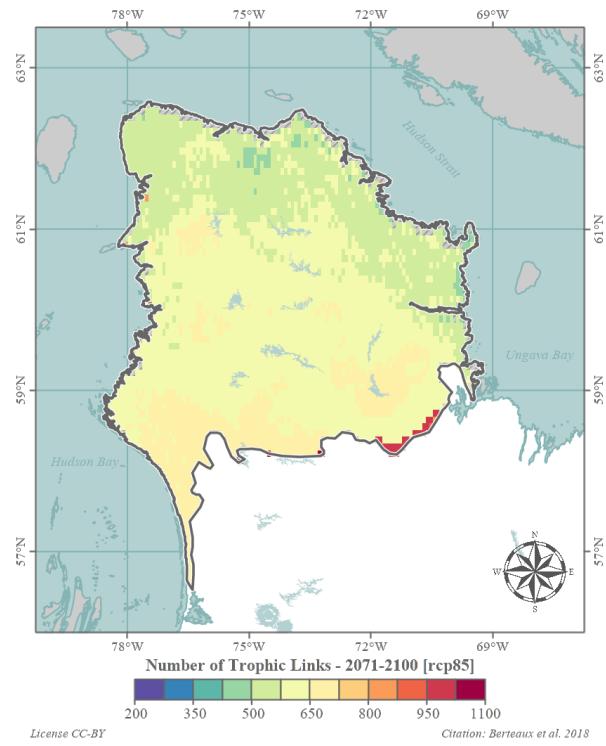
FIGURE 18 – Écarts à la période de référence : Connectance des réseaux trophiques



(a) Horizon 1981–2010

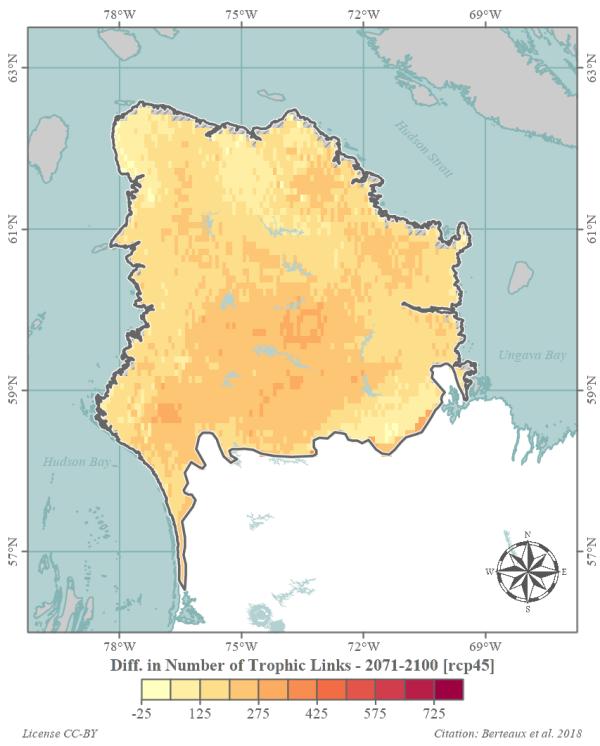


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)



(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

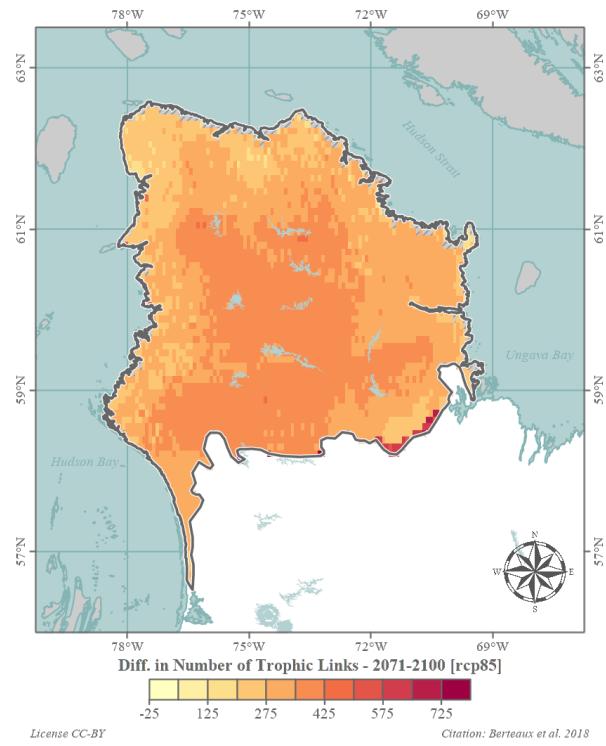
FIGURE 19 – Nombre de liens trophiques



License CC-BY

Citation: Bertheaux et al. 2018

(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

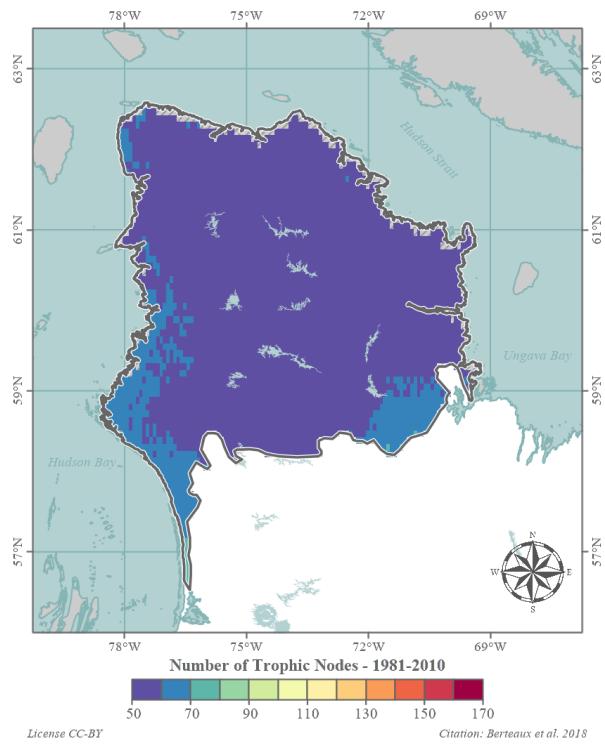


License CC-BY

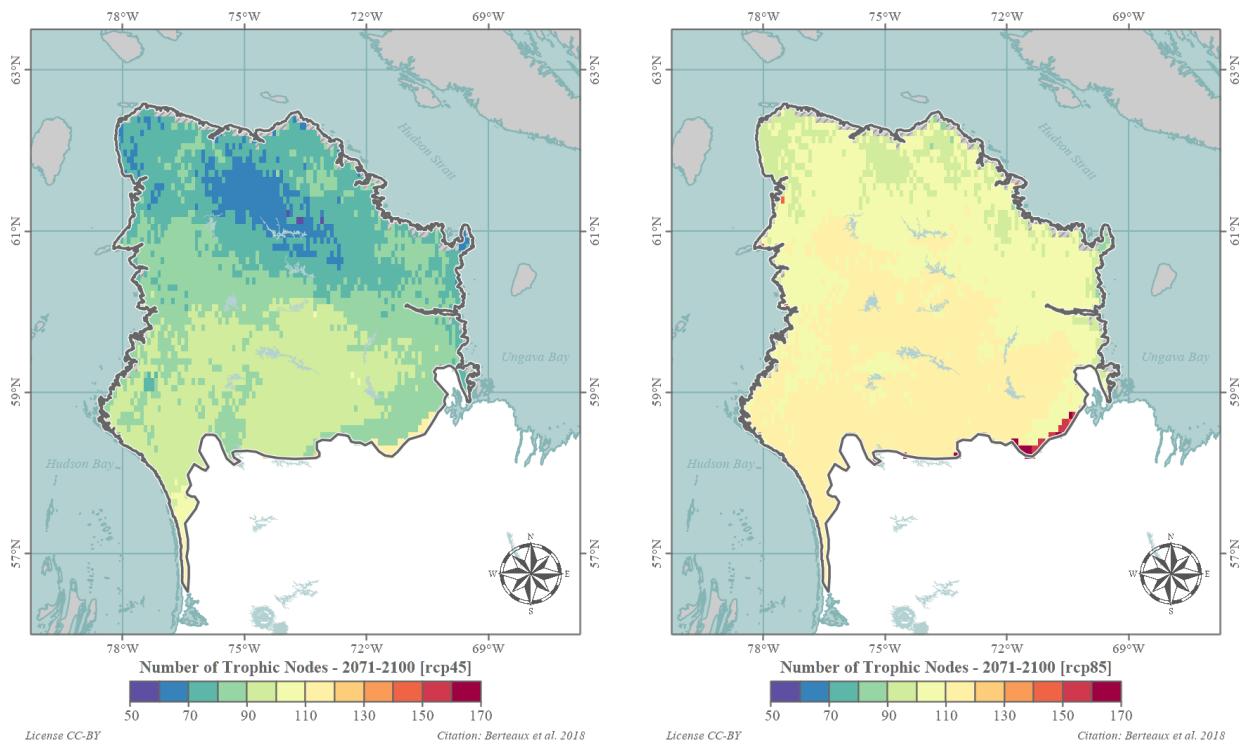
Citation: Bertheaux et al. 2018

(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

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



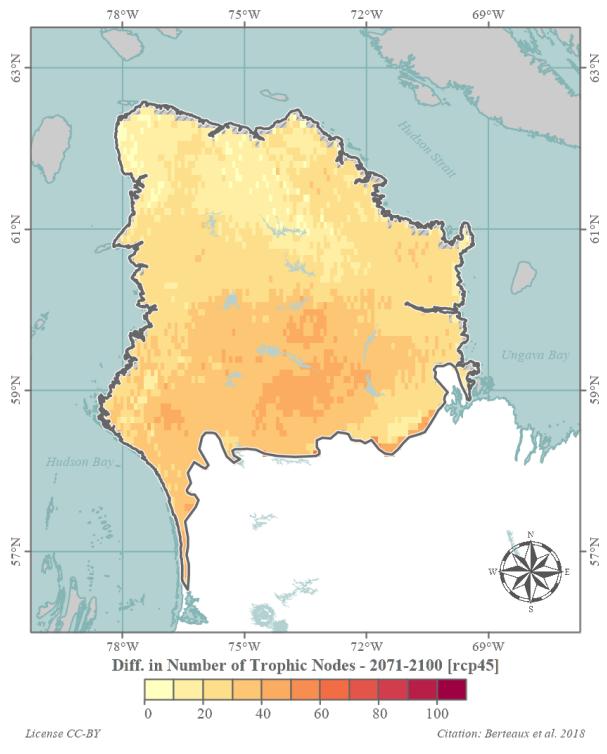
(a) Horizon 1981–2010



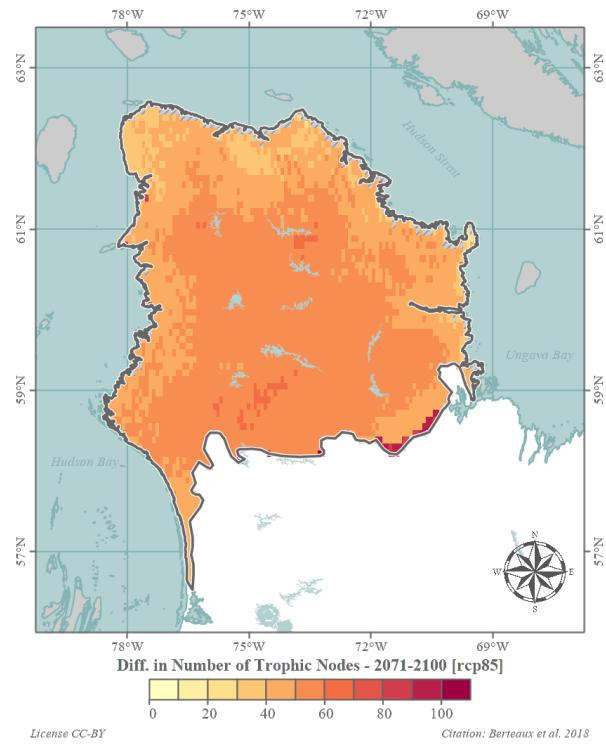
(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 21 – Nombre de noeuds trophiques

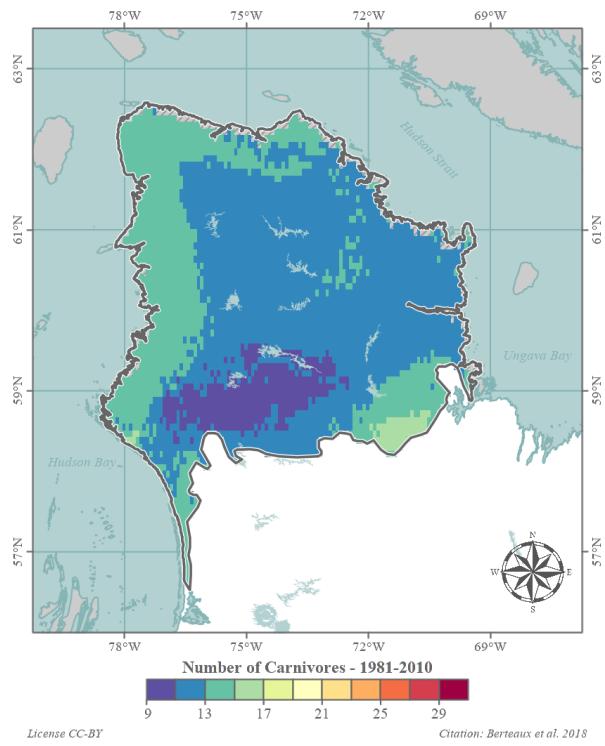


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

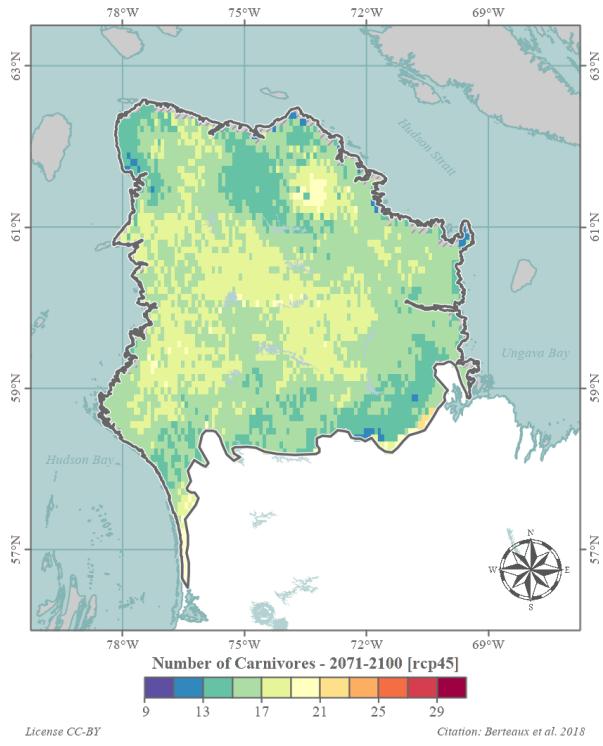


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

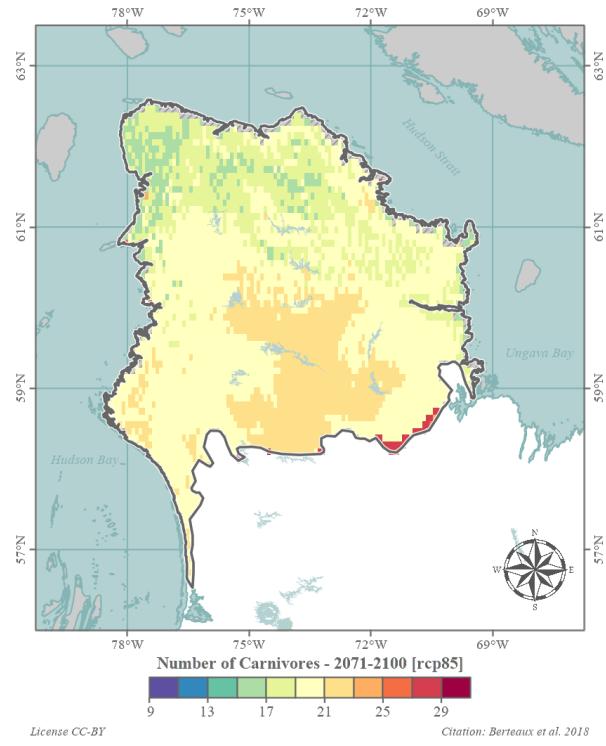
FIGURE 22 – Écarts à la période de référence : Nombre de noeuds trophiques



(a) Horizon 1981–2010

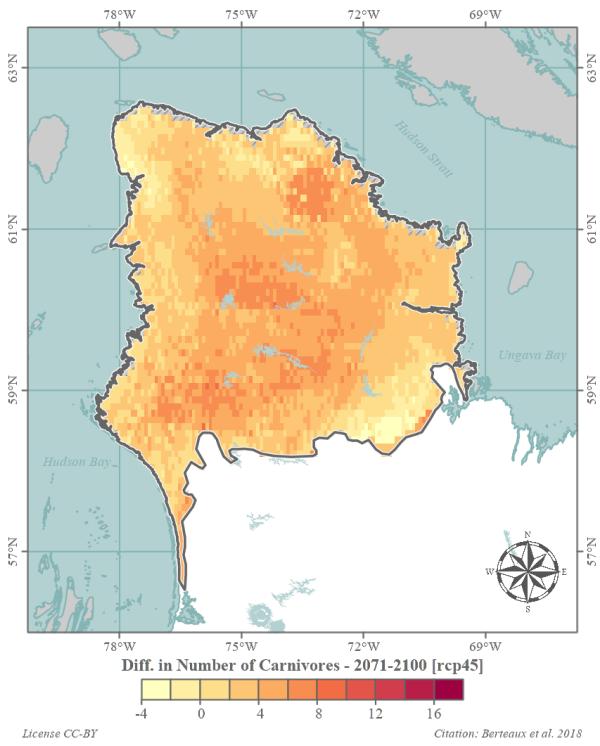


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)



(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

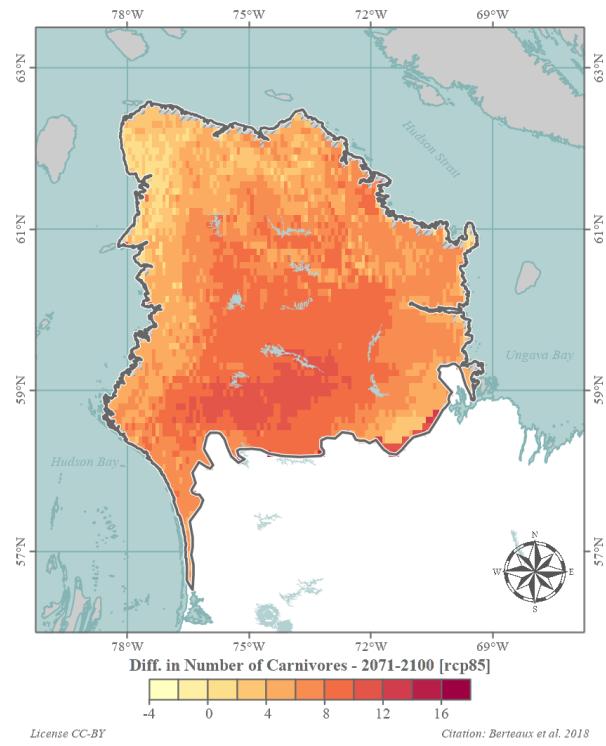
FIGURE 23 – Nombre de carnivores



License CC-BY

Citation: Berteaux et al. 2018

(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

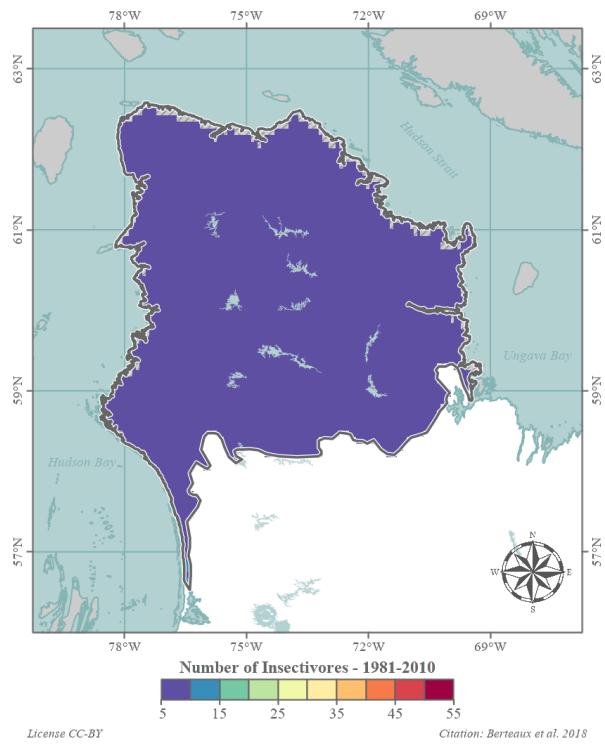


License CC-BY

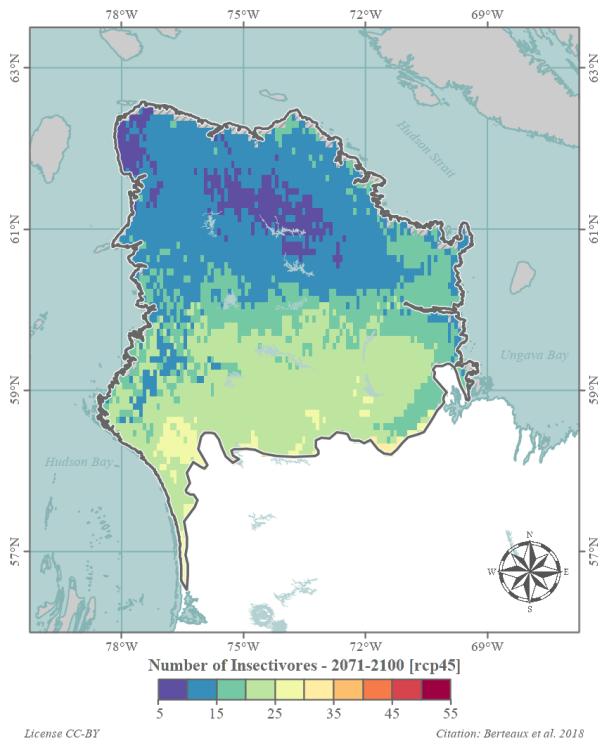
Citation: Berteaux et al. 2018

(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

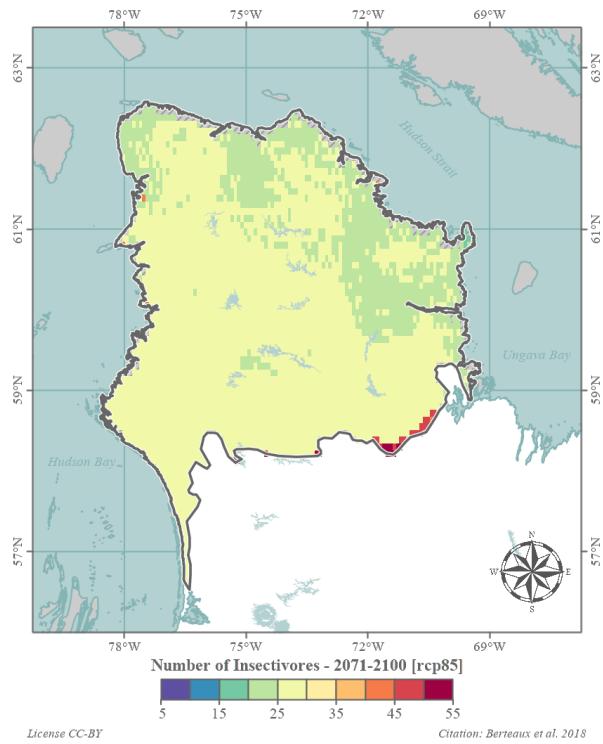
FIGURE 24 – Écarts à la période de référence : Nombre de carnivores



(a) Horizon 1981–2010

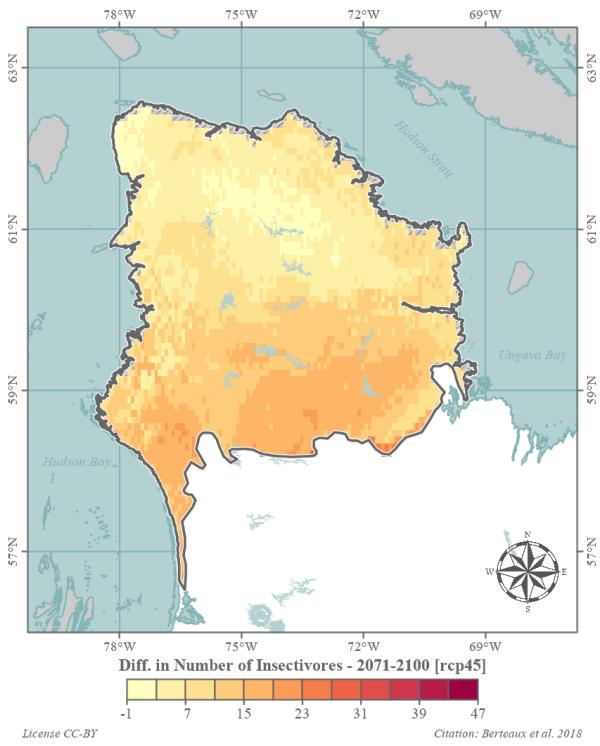


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

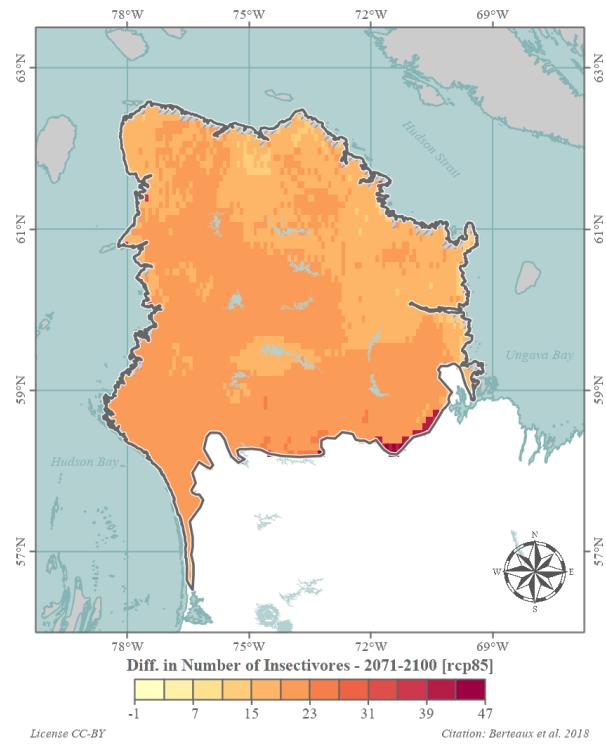


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 25 – Nombre d'insectivores

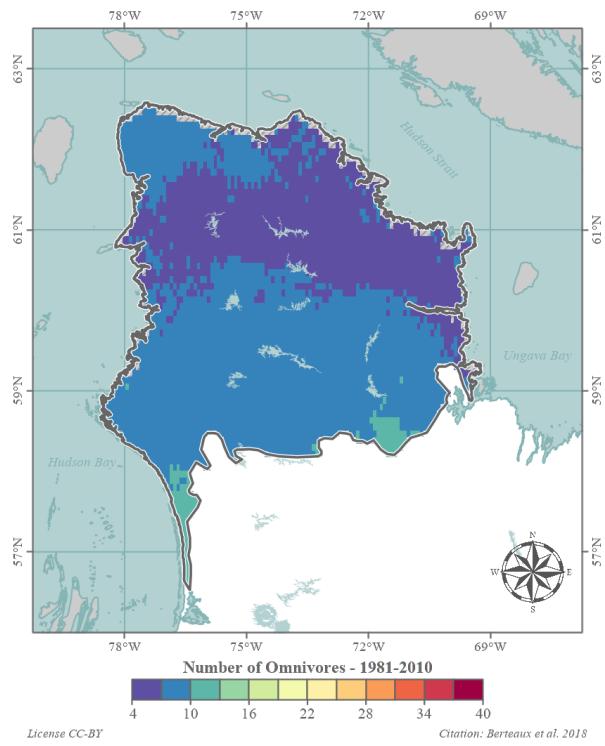


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

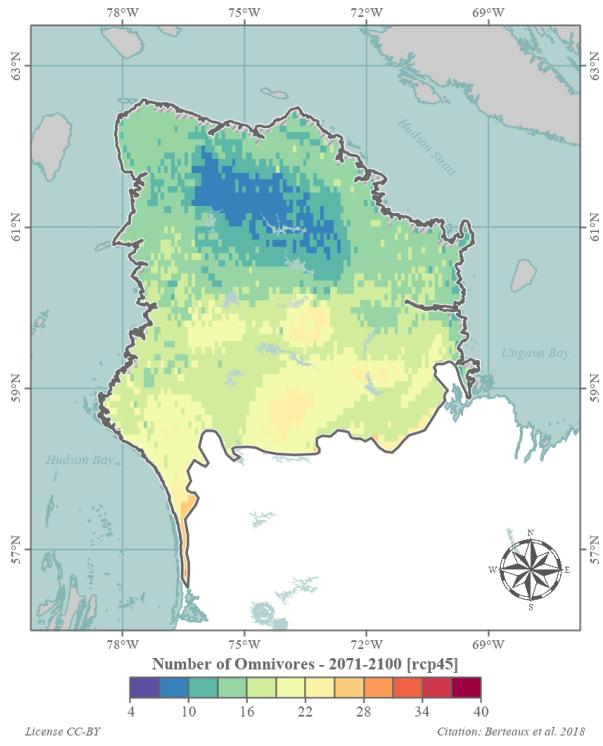


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

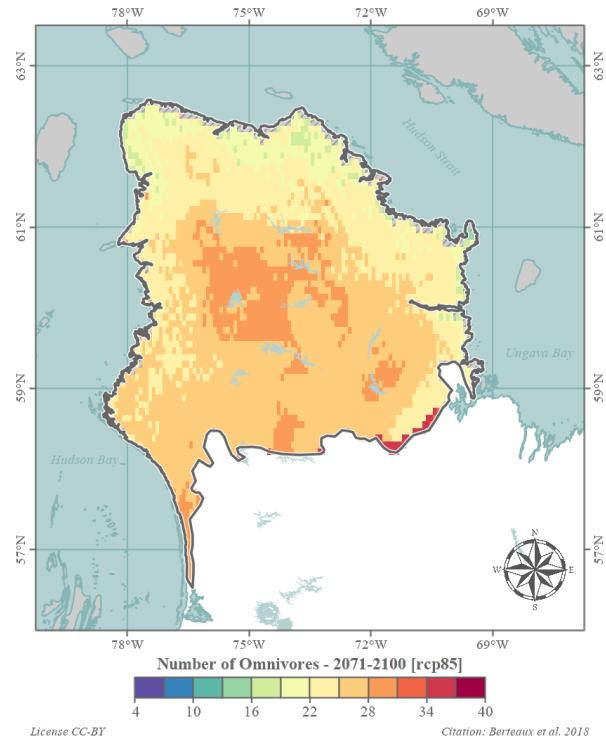
FIGURE 26 – Écarts à la période de référence : Nombre d'insectivores



(a) Horizon 1981–2010

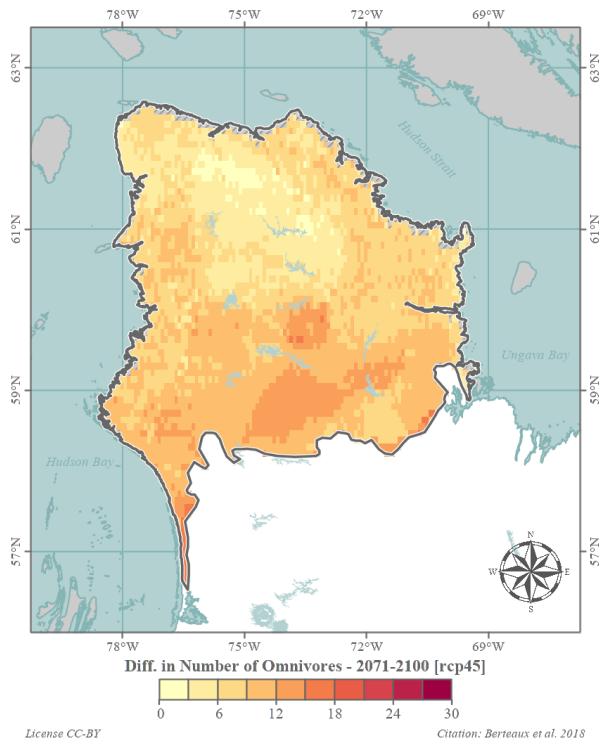


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

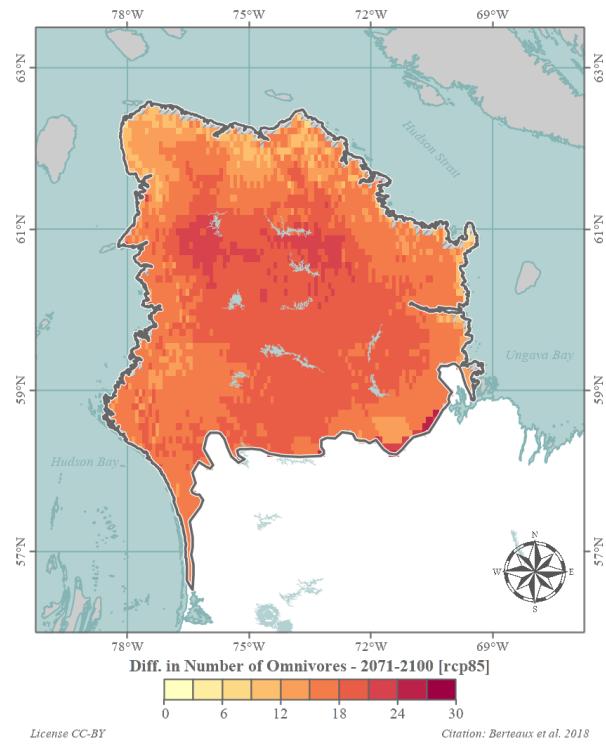


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 27 – Nombre d'omnivores

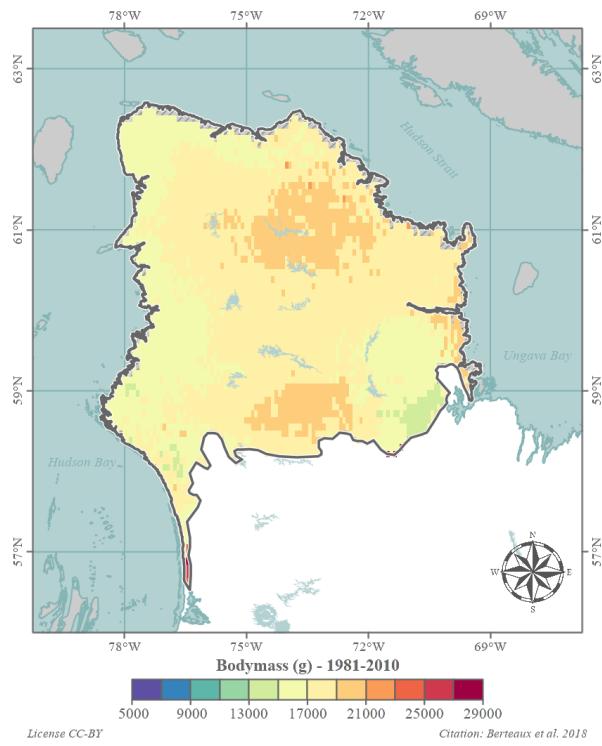


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

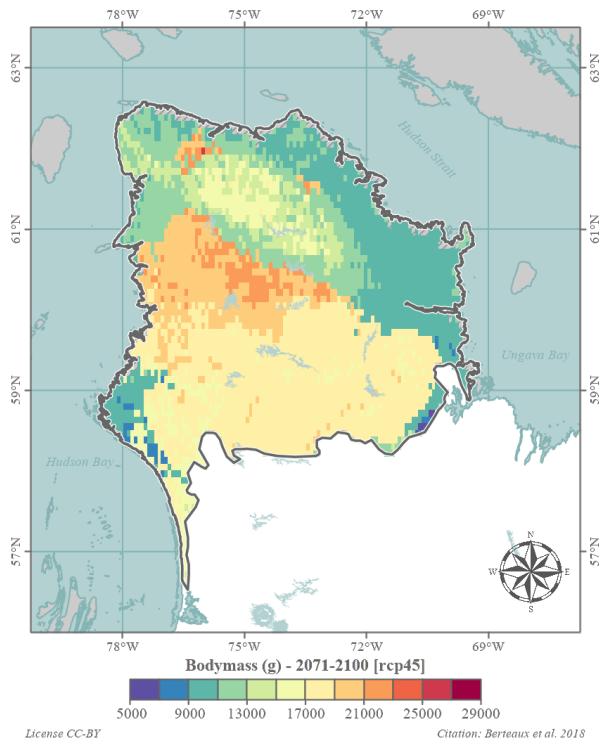


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

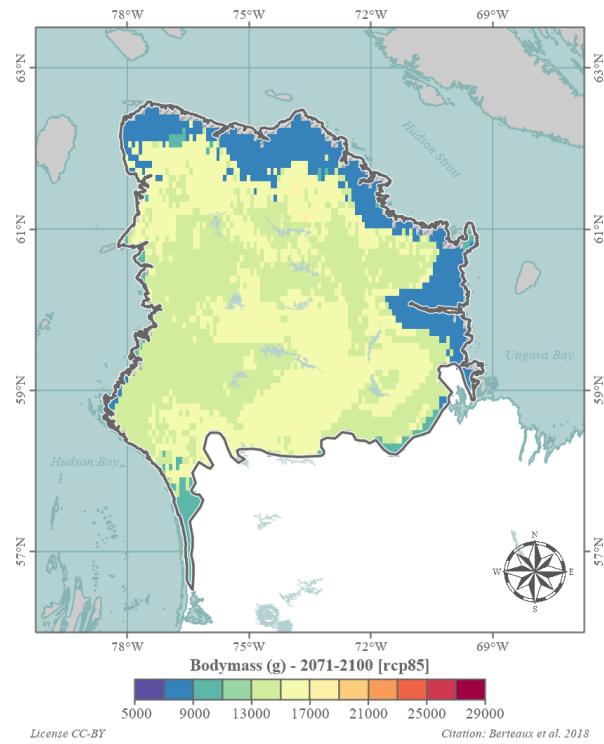
FIGURE 28 – Écarts à la période de référence : Nombre d'omnivores



(a) Horizon 1981–2010

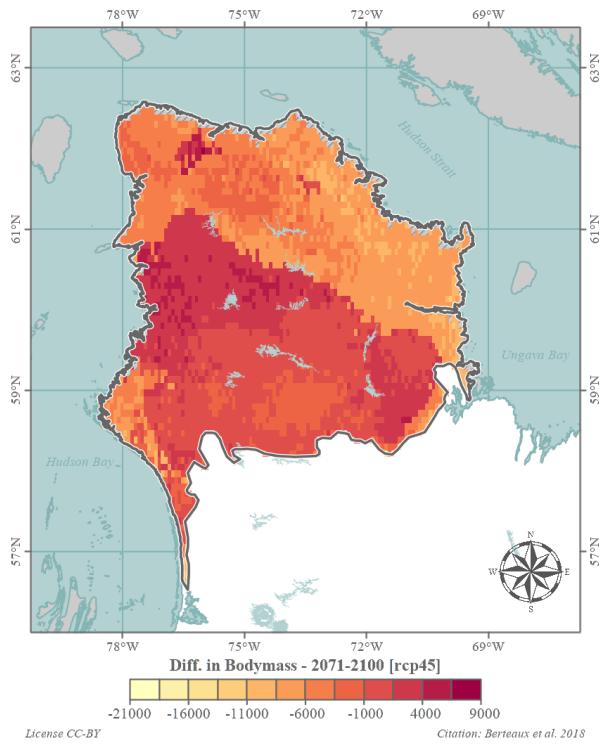


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

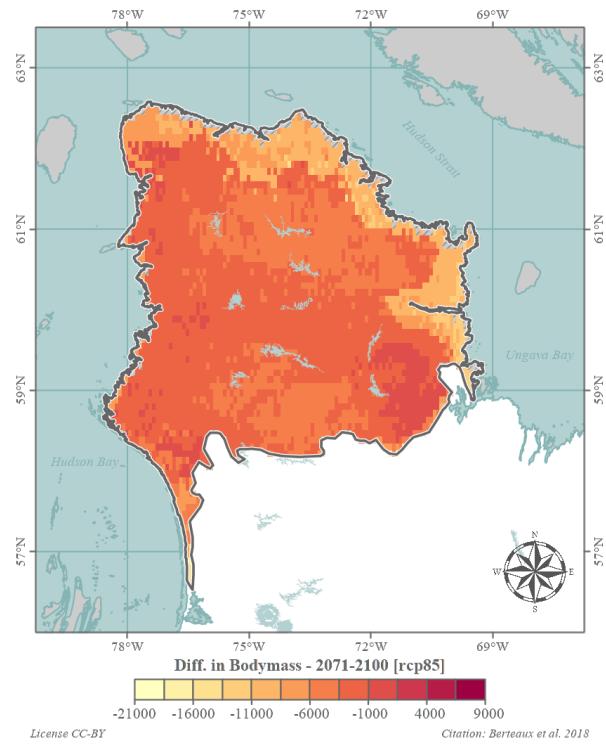


(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 29 – Masse corporelle moyenne

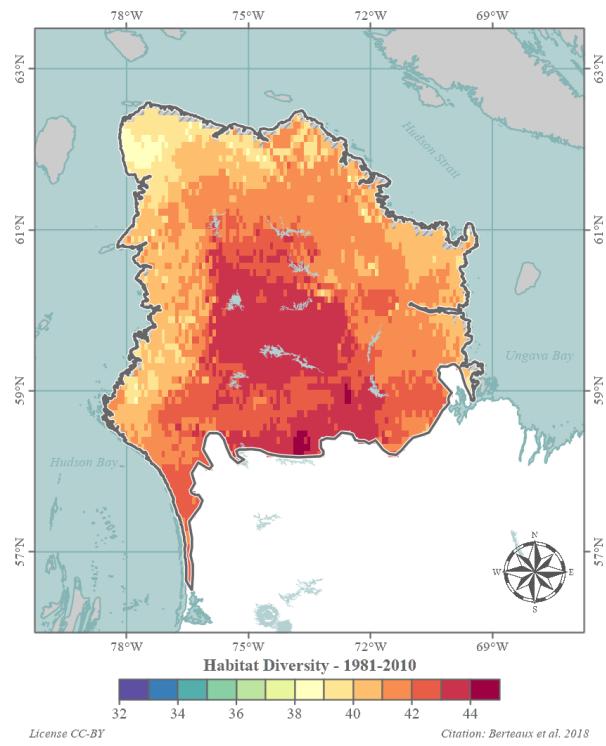


(a) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)

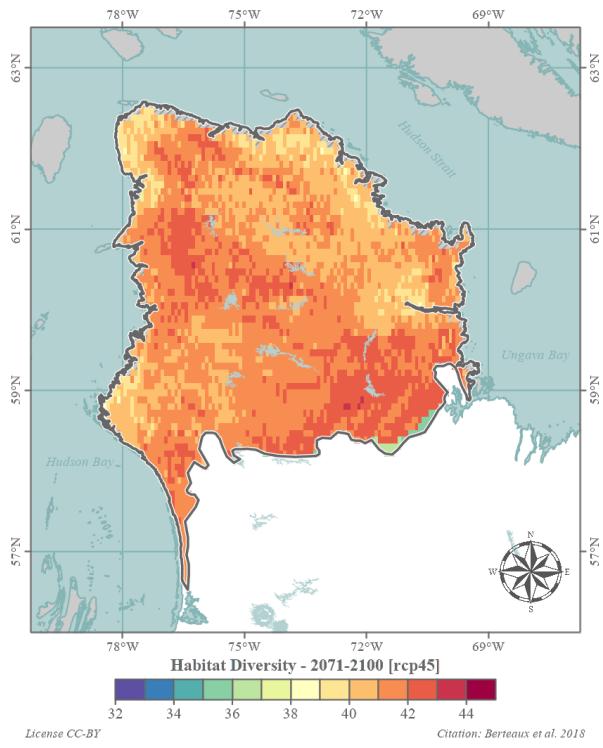


(b) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

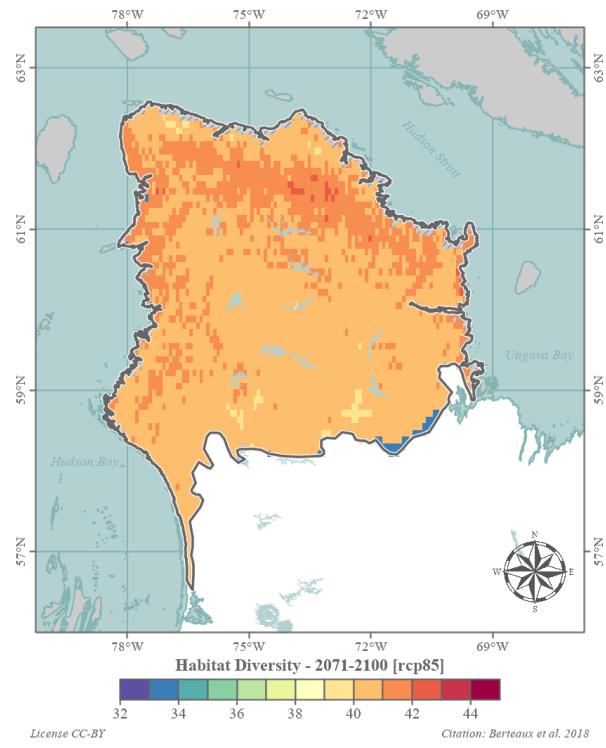
FIGURE 30 – Écarts à la période de référence : Masse corporelle moyenne



(a) Horizon 1981–2010



(b) Horizon 2071–2100 (RCP 4,5)



(c) Horizon 2071–2100 (RCP 8,5)

FIGURE 31 – Diversité d’habitats

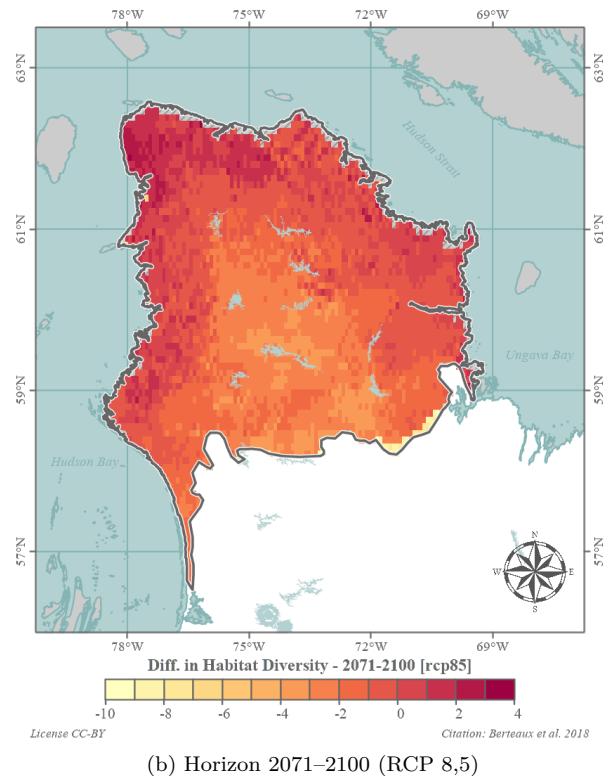
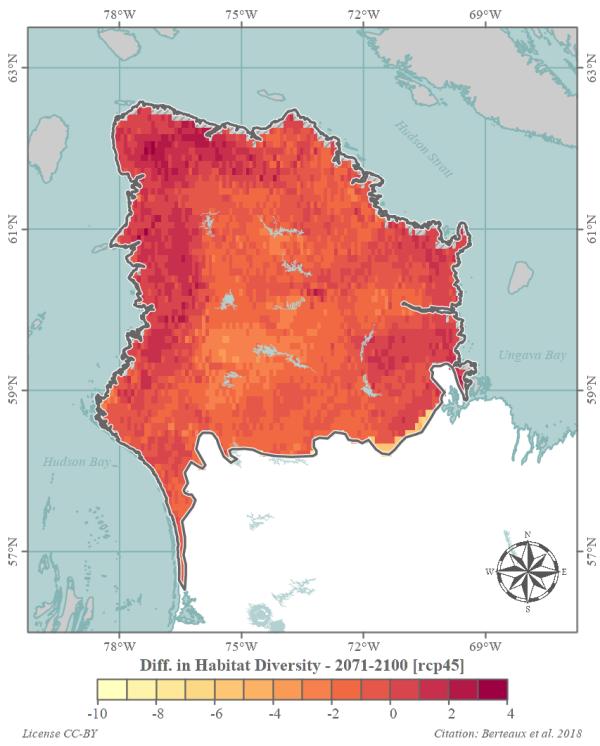
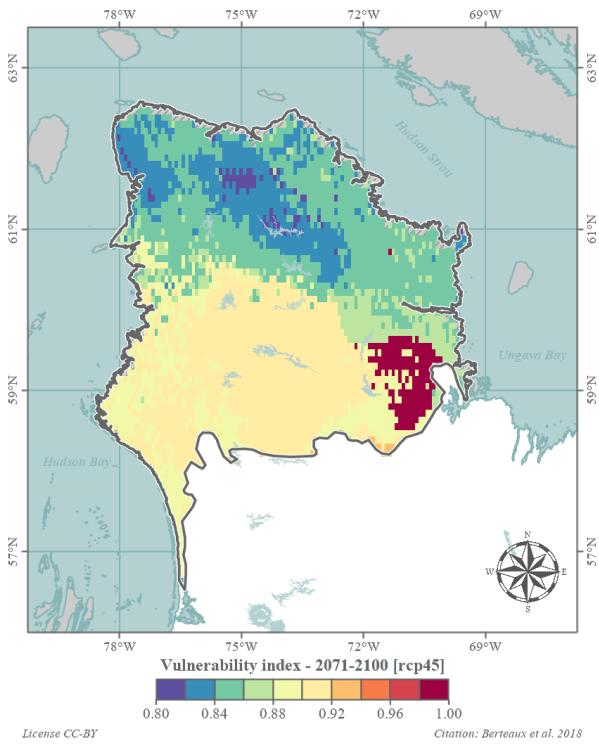
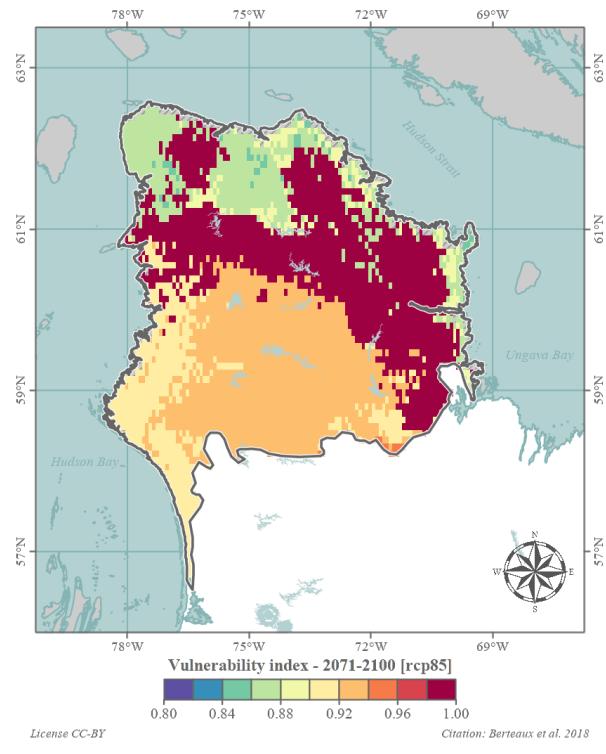


FIGURE 32 – Écarts à la période de référence : Diversité d’habitats



(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

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.

URL : [https://www.polardata.ca/pdcsearch/PDCSearch.jsp?doi\\_id=12891](https://www.polardata.ca/pdcsearch/PDCSearch.jsp?doi_id=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.

URL : [https://www.polardata.ca/pdcsearch/PDCSearch.jsp?doi\\_id=12894](https://www.polardata.ca/pdcsearch/PDCSearch.jsp?doi_id=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.

URL : [https://www.polardata.ca/pdcsearch/PDCSearch.jsp?doi\\_id=12892](https://www.polardata.ca/pdcsearch/PDCSearch.jsp?doi_id=12892)

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

URL : [https://www.polardata.ca/pdcsearch/PDCSearch.jsp?doi\\_id=12895](https://www.polardata.ca/pdcsearch/PDCSearch.jsp?doi_id=12895)

### Données archivées dans la collection Nordicana D

Berteaux D., Casajus N. and Ropars P. (2018) Tundra Nunavik : Distribution (extent of occurrence) of birds and mammals of Labrador and northern Quebec for the period 1981-2010, v.1.0. Nordicana D34, doi : 10.5885/45540CE-16C4FE1F37FB43B0.

URL : <http://doi.org/10.5885/45540CE-16C4FE1F37FB43B0>

Berteaux D., Casajus N. and Ropars P. (2018) Tundra Nunavik : Potential distribution of birds and mammals of Labrador and northern Quebec projected for the 21<sup>st</sup> century (2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100) under climate change scenarios, v.1.0. Nordicana D35, doi : 10.5885/45545CE-82C488A53C7A4BC0.

URL : <http://doi.org/10.5885/45545CE-82C488A53C7A4BC0>

Berteaux D., Ropars P. and Casajus N. (2018) Tundra Nunavik : Functional traits of bird and mammal species of Labrador and northern Quebec, v.1.0. Nordicana D37, doi : 10.5885/45550CE-E683169B5540412E.

URL : <http://doi.org/10.5885/45550CE-E683169B5540412E>

Berteaux D., Ropars P. and Casajus N. (2018) Tundra Nunavik : Matrix of trophic relations between species of Labrador and northern Quebec, v.1.0. Nordicana D36, doi : 10.5885/45555CE-DA1FF11FA4254703.

URL : <http://doi.org/10.5885/45555CE-DA1FF11FA4254703>

## 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.