



Pêches et Océans
Canada

Fisheries and Oceans
Canada

Sciences des écosystèmes
et des océans

Ecosystems and
Oceans Science

Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS)

Document de recherche 2024/040

Région du Québec

Prédiction de la biomasse des espèces de *Calanus* jusqu'à la fin du siècle dans le golfe du Saint-Laurent, au sud de Terre-Neuve, sur le plateau néo-écossais et dans le nord-est du golfe du Maine

Caroline Lehoux¹, Diane Lavoie¹, Catherine L. Johnson², Stephane Plourde¹

¹ Institut Maurice-Lamontagne
Pêches et Océans Canada,
850 Route de la Mer,
Mont-Joli, Quebec Canada G5H 3Z4

² Bedford Institute of Oceanography
Pêches et Océans Canada
PO Box 1006
Dartmouth, Nova Scotia Canada B2Y 4A2

Avant-propos

La présente série documente les fondements scientifiques des évaluations des ressources et des écosystèmes aquatiques du Canada. Elle traite des problèmes courants selon les échéanciers dictés. Les documents qu'elle contient ne doivent pas être considérés comme des énoncés définitifs sur les sujets traités, mais plutôt comme des rapports d'étape sur les études en cours.

Publié par :

Pêches et Océans Canada
Secrétariat canadien des avis scientifiques
200, rue Kent
Ottawa (Ontario) K1A 0E6

[http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/
csas-sccs@dfo-mpo.gc.ca](http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/csas-sccs@dfo-mpo.gc.ca)



© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre du
ministère des Pêches et des Océans, 2024

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-72878-0 N° cat. Fs70-5/2024-040F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Lehoux, C., Lavoie, D., Johnson, C. L., Plourde, S. 2024. Prédiction de la biomasse des espèces de *Calanus* jusqu'à la fin du siècle dans le golfe du Saint-Laurent, au sud de Terre-Neuve, sur le plateau néo-écossais et dans le nord-est du golfe du Maine. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2024/040. iv + 55 p.

Also available in English :

Lehoux, C., Lavoie, D., Johnson, C. L., Plourde, S. 2024. *End-of-Century Projections of Calanus Species Biomass in the Gulf of St. Lawrence, Southern Newfoundland, Scotian Shelf and Northeast Gulf of Maine. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2024/040. iv + 53 p.*

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iv
1. INTRODUCTION	1
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES	2
2.1. DONNÉES SUR L'ABONDANCE DES <i>CALANUS</i>	2
2.2. DONNÉES ENVIRONNEMENTALES ET COVARIABLES	2
2.3. MODÈLES MIXTES ADDITIFS GÉNÉRALISÉS.....	3
2.4. PROJECTIONS POUR LES <i>CALANUS</i>	5
2.4.1. Abondance	5
2.4.2. Poids corporel individuel	5
2.4.3. Biomasse des <i>Calanus</i> dans la colonne d'eau	6
3. RÉSULTATS.....	6
3.1. MODÈLES DE RÉPARTITION DES ESPÈCES (GAMM).....	6
3.2. PROJECTIONS.....	7
3.2.1. Tendances des covariables de la température	7
3.2.2. Tendances de l'abondance des <i>Calanus</i>	7
3.2.3. Tendances du poids sec individuel des <i>Calanus</i>	8
3.2.4. Tendances de la biomasse des <i>Calanus</i>	8
3.2.5. Diminution de la biomasse des <i>Calanus</i> : 2000-2009 par rapport à 2080-2089	9
4. DISCUSSION.....	9
4.1. MODÈLES DE RÉPARTITION DES ESPÈCES (GAMM).....	9
4.2. PROJECTIONS.....	10
4.3. DIMINUTION DE LA BIOMASSE DES <i>CALANUS</i> : 2000-2009 PAR RAPPORT À 2080-2089	12
4.4. CONSÉQUENCES POSSIBLES POUR LA RÉPARTITION ET LES HABITATS D'ALIMENTATION DE LA BNAN	12
4.5. SOURCES D'INCERTITUDE	14
5. RÉFÉRENCES CITÉES	16
6. REMERCIEMENTS	21
7. TABLEAUX	22
8. FIGURES	25
ANNEXE 1	44
ANNEXE 2	46

RÉSUMÉ

Cette étude visait à décrire la trajectoire potentielle de la biomasse totale des espèces de *Calanus* en réponse aux conditions environnementales futures dans les eaux de l'est du Canada jusqu'à la fin du XXI^e siècle. Pour ce faire, on a utilisé une approche combinant des modèles de répartition des espèces (MRE) et des simulations du climat et de l'océan à l'échelle régionale fondées sur le scénario du profil représentatif d'évolution de concentration de 8.5 pour prédire l'abondance et le poids corporel individuel d'une décennie à l'autre. Nous avons d'abord construit des MRE pour *C. finmarchicus*, *C. glacialis* et *C. hyperboreus* avec des données allant du golfe du Maine au golfe du Saint-Laurent à l'aide de covariables extraites de trois simulations d'un modèle climat-océan régional alimenté par un forçage à échelle réduite de différents modèles de système terrestre. Nous avons ensuite utilisé ces MRE pour effectuer des projections décennales passées et futures de l'abondance et de l'incertitude connexe entre les trois simulations du climat et de l'océan à l'échelle régionale. Nous avons alors combiné ces projections de l'abondance à celles du poids corporel individuel pour décrire les changements de la biomasse totale des *Calanus* entre les décennies. Nos MRE ont donné un rendement similaire entre les trois scénarios climatiques régionaux. Bien qu'une plus grande incertitude ait été associée à la fin de la période de projection, la biomasse totale des *Calanus* diminuerait vers la fin du siècle dans les eaux canadiennes selon les prédictions. Cependant, nous avons relevé des différences régionales marquées dans l'amplitude en raison de des interactions variées entre les conditions environnementales locales, la composition des espèces de *Calanus* et le poids corporel individuel. Dans la région de la baie de Fundy et du nord-est du golfe du Maine et la région de l'ouest du plateau néo-écossais au sud, les prédictions indiquaient une diminution de 60 % de la biomasse totale des *Calanus* pendant la période 2080-2089 par rapport à la période 2000-2009, qui était uniquement attribuable à une baisse de l'abondance de *C. finmarchicus* et du poids corporel individuel. Ce fort déclin révélait donc que les conditions environnementales dans ces régions deviendraient défavorables à cette espèce dans le futur. Dans le golfe du Saint-Laurent, une diminution de 40 % de la biomasse de *C. hyperboreus* était partiellement compensée par une légère augmentation de la biomasse de *C. finmarchicus*, entraînant une réduction de 25 % de la biomasse totale des *Calanus* au cours de la même période, indiquant que les conditions environnementales dans cette région plus froide deviendraient progressivement moins, et plus, favorables à *C. hyperboreus* et à *C. finmarchicus*, respectivement. La baisse de la biomasse totale des *Calanus* au sud de Terre-Neuve était semblable (25 %) à celle du golfe du Saint-Laurent, alors que celle prédite sur l'est du plateau néo-écossais était intermédiaire (35 %) entre les régions du sud et du nord. En supposant qu'aucun changement radical ne survienne dans la circulation océanique pendant le XXI^e siècle, nos projections à long terme suggèrent que les conditions d'alimentation de la baleine noire de l'Atlantique Nord (BNAN) dans la baie de Fundy et le nord-est du golfe du Maine et sur l'ouest du plateau néo-écossais continueront de se détériorer à un rythme plus rapide que dans les régions plus au nord. Ces patrons de changements prédits dans les futures conditions d'alimentation pourraient donc renforcer la tendance observée dans la répartition de la BNAN et son utilisation de l'habitat depuis 2010.

1. INTRODUCTION

Les espèces de *Calanus* sont des copépodes riches en lipides qui dominent la biomasse zooplanctonique dans les eaux canadiennes et dont la contribution varie selon la région (Sorochan *et al.* 2019). En raison de leur prédominance et de leur biomasse élevée, ce sont probablement les proies de prédilection de la baleine noire de l'Atlantique Nord (BNAN; voir la liste complète des acronymes dans le tableau 1) dans les eaux américaines et canadiennes, leur disponibilité influençant le succès de la reproduction de la population (Meyer-Gutbrod *et al.* 2015, Baumgartner *et al.* 2017, Lehoux *et al.* 2020). Au début des années 2010, la BNAN a considérablement délaissé ses traditionnels habitats d'alimentation dans le Grand chenal Sud (au printemps), Grand Manan et le bassin Roseway (à l'été et à l'automne) en réaction à la disponibilité réduite de *C. finmarchicus* associée aux changements des conditions environnementales (Record *et al.* 2019, Sorochan *et al.* 2019, Meyer-Gutbrod *et al.* 2023). Environ le tiers de la population de BNAN utilise le sud du golfe du Saint-Laurent depuis la fin des années 2010, probablement en raison de la combinaison d'une forte abondance de *C. hyperboreus* et de la bathymétrie relativement peu profonde dans la région (Simard *et al.* 2019, Plourde *et al.* 2019, Lehoux *et al.* 2020, Crowe *et al.* 2021). Ce changement récent de la répartition de la BNAN et de son occupation de l'habitat d'alimentation en réaction au réchauffement de l'océan a fait ressortir la nécessité de savoir comment ses proies de prédilection réagiraient aux futurs changements climatiques afin d'adapter la gestion de la BNAN dans les eaux canadiennes.

Peu d'études ont porté sur l'impact des changements climatiques passés et futurs sur l'abondance des espèces de *Calanus* dans l'Atlantique Nord-Ouest ou dans les eaux canadiennes. Certaines ont utilisé des données sur les espèces de *Calanus* en surface seulement ou des données historiques très hétérogènes sur l'abondance de *C. finmarchicus* recueillies depuis les années 1950 dans l'Atlantique Nord, limitant leurs analyses aux projections passées et futures de la probabilité d'occurrence à des résolutions spatiales grossières inadéquates pour guider la gestion de la BNAN dans les eaux canadiennes (Reygondeau et Beaugrand 2011, Chust *et al.* 2014, Villarino *et al.* 2015). Plus récemment, Grieve et ses collaborateurs (2017) ont construit un modèle de répartition des espèces (MRE) pour *C. finmarchicus* à l'aide de données zooplanctoniques et de plusieurs modèles physiques régionaux et ont prédit une diminution pouvant atteindre 50 % de l'abondance de *C. finmarchicus* dans le centre et le nord-est du golfe du Maine d'ici la fin du siècle. Cependant, aucune projection n'a été faite dans le reste des eaux canadiennes. L'information donnée dans la littérature scientifique sur les changements possibles de la disponibilité des proies de *Calanus* et de l'habitat d'alimentation de la BNAN dans les eaux canadiennes est donc limitée.

La présente étude visait à décrire la trajectoire potentielle de la biomasse totale des espèces de *Calanus* en réponse aux changements climatiques et aux conditions environnementales prévues dans les eaux de l'est du Canada d'ici la fin du XXI^e siècle. Nous avons utilisé différents outils de modélisation pour élaborer une approche comprenant les éléments suivants : (1) modèles de répartition des espèces (MRE) pour l'abondance de *C. finmarchicus*, de *C. glacialis* et de *C. hyperboreus*; (2) trois simulations du climat et de l'océan à l'échelle régionale fondées sur le scénario du profil représentatif d'évolution de concentration de 8.5 (RCP 8.5; Moss *et al.* 2010) pour effectuer des projections décennales de l'abondance des espèces de *Calanus* et du poids corporel individuel; (3) une combinaison de ces trois projections pour décrire la trajectoire de la biomasse des espèces de *Calanus* durant le siècle actuel. Nous avons d'abord adapté les MRE de *Calanus* décrits précédemment (voir Plourde *et al.* 2024) au domaine spatial et aux covariables extraits des trois simulations climatiques régionales. Nous avons ensuite utilisé ces MRE et les trois différentes simulations régionales du

climat et de l'océan pour prédire l'abondance des *Calanus* et le poids corporel individuel dans le futur, tout en tenant compte de l'incertitude des simulations des futurs changements climatiques. Ces projections à long terme ont fourni des renseignements stratégiques sur les tendances probables de la biomasse, de l'assemblage des espèces de *Calanus* et de la qualité potentielle de l'habitat d'alimentation de la BNAN dans les eaux de l'est du Canada jusqu'à la fin du siècle.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. DONNÉES SUR L'ABONDANCE DES *CALANUS*

Nous avons utilisé un sous-ensemble des données utilisées dans Plourde *et al.* (2024) afin d'adapter leurs MRE au domaine spatial du modèle climat-océan régional et des simulations utilisés dans notre étude (Lavoie *et al.* 2020, Lavoie *et al.* 2021). Nous avons utilisé les données sur le zooplancton recueillies par le Programme de monitoring de la zone Atlantique (PMZA) de Pêches et Océans Canada (MPO) sur le plateau néo-écossais (PNE), dans le golfe du Saint-Laurent (GSL) et au large du sud de Terre-Neuve (sTN), ainsi que par le programme de surveillance des écosystèmes (EcoMon) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dans le golfe du Maine (GM) et sur le plateau du sud de la Nouvelle-Angleterre (SNE; figure 1, panneau de gauche). Nous avons sélectionné les copépodites des stades CIV, CV et CVI pour chaque espèce, car ils ont été échantillonnés comparativement à l'aide de filets à maillage de 333 µm dans le cadre de l'EcoMon et de filets à maillage de 200 µm dans le cadre du PMZA.

Le programme EcoMon échantillonne le zooplancton jusqu'à une profondeur de 200 m. Nous avons appliqué la méthode précédemment décrite pour estimer l'abondance non échantillonnée de *C. finmarchicus* et de *C. hyperboreus* dans la couche de fond à 200 m (Plourde *et al.* 2019, Sorochan *et al.* 2019, Plourde *et al.* 2024). Nous avons exclu de nos analyses les stations du PMZA dont la profondeur au fond est supérieure à 1 000 m parce que les zones au-delà d'une bathymétrie de 800 m ne sont pas échantillonnées lors des relevés du programme EcoMon. Nous avons ainsi conservé 10 431 stations dans la zone transfrontalière. Les détails sur les efforts d'échantillonnage sont donnés sur la figure A.1.1 de Plourde *et al.* (2024).

2.2. DONNÉES ENVIRONNEMENTALES ET COVARIABLES

Nous avons extrait des covariables environnementales d'un modèle climatique régional simulant les conditions environnementales océaniques entre 1971 et 2099 (Lavoie *et al.* 2021). Ce modèle de circulation océanique, auquel un modèle thermodynamique-dynamique de la glace de mer Louvain-la-Neuve (LIM2; Madec *et al.* 1998) est couplé, est basé sur le système NEMO (pour Nucleus for European Modelling of the Ocean; voir les détails dans Brickman et Drozdowski 2012). Le système de modélisation est fondé sur le code d'Océan PARallélisé, version 9.0 (OPA; Madec 2012) qui a été appliqué dans les eaux canadiennes (CANOPA). Le modèle couvre le golfe du Saint-Laurent, le plateau néo-écossais et le golfe du Maine avec une résolution de grille horizontale de 1/12 en latitude et en longitude et 46 couches d'épaisseur variable (de 6 m près de la surface à 250 m près du fond marin). Il s'agit d'un modèle pronostique, c'est-à-dire que les champs de température et de salinité sont libres d'évoluer et ne sont limités que par les conditions aux limites ouvertes, le débit d'eau douce et le forçage de surface. Les climatologies mensuelles de la température et de la salinité de Brickman et Drozdowski (2012) sont utilisées pour initialiser le modèle et établir les conditions aux limites ouvertes. Les composantes des marées (M2, S2, N2, O1 et K1) sont incluses dans le modèle par l'élévation de la surface et le transport barotrope aux limites ouvertes. L'eau douce entre dans le domaine par les précipitations et l'écoulement des 78 cours d'eau principaux.

L'écoulement mensuel du fleuve Saint-Laurent est estimé à partir des mesures du niveau de la mer à Québec; celui de tous les autres cours d'eau est obtenu à partir d'un modèle hydrologique, ce qui fournit des patrons saisonniers réalistes de l'écoulement (c'est-à-dire après les précipitations et l'évaporation). Lavoie et ses collaborateurs (2021) ont utilisé les données de forçage de surface sur trois heures (température de l'air, humidité relative, vents, couverture nuageuse et précipitations) tirées du modèle atmosphérique Global Environmental Multi-échelle du Centre météorologique canadien (CMC-GEM; Pellerin *et al.* 2003) pour forcer le modèle glace-océan.

Le modèle climatique régional a été forcé avec l'atmosphère à échelle réduite de trois modèles du système terrestre (CanESM2, MPI-ESM-LR et HadGEM-ES qui seront appelés les trois simulations plus loin) à l'aide du RCP 8.5. Ce scénario est considéré comme le plus réaliste compte tenu des niveaux actuels d'émissions de CO₂ et des sorties du modèle du système terrestre rendues disponibles en 2013 dans les archives de la phase 5 du Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP5; Schwalm *et al.* 2020).

La sélection des covariables reposait sur des hypothèses, c'est-à-dire qu'elle sous-entendait un lien de causalité mécaniste directe entre les covariables liées à la température et l'abondance des *Calanus* (voir plus de détails dans Plourde *et al.* 2024). Pour résumer, nous avons utilisé la température moyenne dans la couche de 0 à 50 m (T_0-50) et la température minimale dans la colonne d'eau (Tmin) comme indicateurs de l'habitat thermique pendant les phases de croissance active et d'hivernage du cycle de vie des *Calanus*, respectivement. La bathymétrie a été incluse comme indicatrice de la disponibilité des différents habitats nécessaires à divers stades de leur cycle vital (Albouy-Boyer *et al.* 2016, Grieve *et al.* 2017, Ross *et al.* 2023) et a été extraite de la base de données de la NOAA à l'aide du progiciel marmap en R (NOAA 2022, Pante *et al.* 2023). Les patrons spatiaux et saisonniers grossiers de la connectivité ont été considérés en appliquant une formulation fondée sur le principe de « disponibilité, apport et agrégation » (Sorochan *et al.* 2021, Johnson *et al.* en préparation¹), l'accent étant mis sur les éléments associés à l'« apport ». La latitude a été utilisée comme indicatrice de la distance par rapport à une région source (*niveaux de population régionaux*), une climatologie spatiale de la salinité dans la couche de 0 à 50 m (climS_0-50rc) représentant les voies de connectivité le long des masses d'eau plus douces (plateau intérieur) et plus salines (plateau extérieur) provenant de différentes régions sources (*apport advectif*) et le mois permettant de tenir compte de la saisonnalité propre à l'espèce. Nos MRE ne tenaient pas compte des processus d'agrégations très dynamiques qui se produisent à de petites échelles spatiales ni de la dynamique des courants à haute résolution. Les climatologies spatiales des covariables sont présentées à la figure 2.

2.3. MODÈLES MIXTES ADDITIFS GÉNÉRALISÉS

Le domaine spatial de la présente étude était plus vaste que les MRE antérieurs fondés sur les données du PMZA (voir Albouy-Boyer *et al.* 2016), mais plus petit que les MRE plus récents englobant les plateaux du nord-est des États-Unis et du Canada, du cap Hatteras au plateau du Labrador (Plourde *et al.* 2024). Nous avons utilisé des modèles mixtes additifs généralisés (GAMM) avec la moyenne mensuelle des covariables des modèles régionaux associées à chaque valeur du zooplancton (année, mois, latitude, longitude). Les GAMM ont été construits

¹ Johnson, C.L., Plourde, S., Brennan, C.E., Helenius, L.K., Le Corre, N. and Sorochan, K.A. En préparation. The Southern Gulf of St. Lawrence as Foraging Habitat for the North Atlantic Right Whale. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech.

pour chaque espèce et chaque simulation du modèle climatique régional. Nos GAMM ont suivi la formule générale suivante :

$$\text{Logit}(\pi_i) \text{ ou } \log(\mu_i) = \text{Région} + ti(\text{Mois} \times \text{latitude} \times \text{climS_0_50rc}) + s(T_0_50) + s(T_{\text{min}}) + s(\log_{10}\text{bathymétrie}) + f\text{Année}$$

π_i est la probabilité de présence pour l'observation i et a une distribution d'erreur de Bernoulli, μ_i est l'abondance conditionnelle à la présence et a une distribution d'erreur Gamma. La structure d'erreur ZAG (pour *zero altered gamma*, Gamma modifié pour les 0) est donc générée en exécutant le modèle GAMM deux fois (présence/absence; abondance > 0) et en combinant les prédictions. L'année a été utilisée comme ordonnée à l'origine aléatoire, s était une fonction de lissage de régression à plaques minces (*thin plate regression splines*; Wood *et al.* 2003) et ti était une interaction du produit tensoriel pour laquelle nous avons inclus les effets principaux et les interactions de niveau inférieur (Wood *et al.* 2006). Nos GAMM intégraient trois régions utilisées comme ordonnée à l'origine pour tenir compte de l'effet local fort de l'advection sur l'abondance des *Calanus* qui n'est pas pris en compte dans leur formule : baie de Cape Cod (BCC), banc Georges (BG) et sud du golfe du Saint-Laurent (sGSL), en plus d'une vaste région transfrontalière englobant le reste de la zone d'étude où les processus environnementaux clés se produisent à des échelles relativement grandes (plateau continental, figure 1, voir Plourde *et al.* 2024). La dimension de la base utilisée pour représenter le terme de lissage (k) a été réduite pour éviter l'ajustement excessif ($T_{\text{min}} \leq 8$, $T_0-50 \leq 5$, bathymétrie ≤ 5 , mois, latitude et $\text{climS_0-50rc} \leq 6$ pour l'effet principal et $\text{climS_0-50rc} \leq 3$ pour l'interaction).

Plourde et ses collaborateurs (2024) ont rapportés des effets positifs inattendus de températures élevées sur l'abondance qui devraient plutôt avoir un effet négatif d'après les optimums de température physiologique propres aux espèces, un patron qui était probablement attribuable au transport des *Calanus* vers le sud. Pour éviter de fausses extrapolations dans les projections à des températures plus élevées dans le futur, nous avons Winsorisé T_0-50 et T_{min} aux valeurs les plus élevées incluses dans les GAMM, c'est-à-dire que les effets et les intervalles de confiance ne pouvaient pas dépasser celui de la température la plus élevée incluse dans les GAMM (Dixon 1960). Les valeurs de T_0-50 et de T_{min} maximum ont été définies séparément pour les GAMM de Bernoulli et Gamma avec chaque simulation de modèle régional. Le pourcentage de prédictions Winsorisées était faible, mais il était deux fois plus élevé vers la fin du siècle que durant la période de référence (voir le tableau A.2.1).

Les GAMM ont été ajustés à l'aide du progiciel *mgcv* (Wood 2017) dans R. Nous avons utilisé la fonction de lissage de régression en plaques minces modifiée qui permet de réduire le terme à zéro (« ts », Wood 2003). Cela n'a pas été mis en œuvre dans Plourde *et al.* (2024) parce que toutes les variables étaient très significatives. Le plus petit domaine spatial a donné lieu à des GAMM présentant des relations non significatives avec la température dans le GAMM de Bernoulli. Ce type de lissage effectue une sélection des covariables et évite d'utiliser des relations positives non significatives avec la température dans les projections.

Nous avons utilisé un sous-ensemble de mesures pour évaluer les MRE (voir plus de détails dans Plourde *et al.* 2024). Les GAMM de Bernoulli ont été validés avec la statistique de compétence vraie (TSS for True Skill Statistics) avec 30 % des données rééchantillonnées 100 fois et avec une re-substitution. Les GAMM Gamma ont été validés à l'aide de la déviance hors-échantillon sur 30 % des données et la déviance expliquée sur 100 % des données. Les prédictions combinées $\mu \times \pi$ ont été validées par rapport aux observations à l'aide du coefficient de corrélation de Spearman. L'homogénéité des résidus et l'exactitude des prédictions ont été vérifiées graphiquement. L'exactitude des prédictions a été, par ailleurs, évaluée avec les quantiles 50, 75, 85, 95 % des 10 000 simulations des distributions de Bernoulli et Gamma. Enfin, la robustesse du modèle a été évaluée par des validations croisées temporelles. Les

GAMM de Bernoulli et Gamma pour les trois espèces de *Calanus* et les trois simulations ont d'abord été ajustés à différents blocs d'années couvrant la période de 1999 à 2020. Ensuite, nous avons évalué le rendement des modèles à l'aide de la TSS et du coefficient de corrélation de Spearman entre les prédictions et les observations pendant les blocs d'années non inclus pour l'ajustement des modèles.

2.4. PROJECTIONS POUR LES *CALANUS*

2.4.1. Abondance

Les projections ont été effectuées à l'aide de climatologies mensuelles par décennie pour chaque simulation climatique régionale séparément. Les résultats ont été présentés sous forme de projections moyennes des trois simulations d'avril à octobre de chaque décennie. Les variations entre les trois simulations climatiques régionales ont été calculées pour représenter l'incertitude des trajectoires décennales projetées de divers paramètres liés aux *Calanus* (abondance, taille individuelle, biomasse dans la colonne d'eau). Les résultats des projections ont été indiqués pour chaque région décrite à la figure 1 (panneau de droite).

L'abondance a été projetée en utilisant les GAMM sans f(Année) (c'est-à-dire pour une année moyenne pendant la période de 1999 à 2020).

Nous avons estimé l'incertitude dans les prédictions de l'abondance à l'aide d'une approche fondée sur la simulation (Miller *et al.* 2022, Plourde *et al.* 2024). Pour chaque espèce, les paramètres des GAMM ont été simulés 1 000 fois à l'aide de l'échantillonneur de Metropolis Hastings disponible dans le progiciel mgcv (Wood 2017). Nous avons extrait des GAMM de départ la matrice du prédicteur linéaire (lpmatrice) et les grilles spatiales de la climatologie de référence mensuelle utilisée dans les projections (de 2000 à 2009) pour chaque simulation climatique régionale. Nous avons obtenu la réponse attendue ($\pi \times \mu$) pour chaque cellule de la grille de prédiction en multipliant la lpmatrice et les paramètres simulés. La multiplication de π et μ supposait qu'ils étaient indépendants (aucune covariance). Pour chaque cellule, les 1 000 simulations ont été agrégées par mois et par décennie. De ce fait, les coefficients de variation de l'abondance prédite rapportés pour chaque mois, chaque décennie, chaque espèce et chaque position comprennent à la fois l'incertitude des paramètres des GAMM et celle des simulations climatiques régionales.

2.4.2. Poids corporel individuel

Le poids corporel individuel (poids sec, mg) a été estimé d'après Plourde *et al.* (2024). En bref, nous avons tenu compte de T_0-50 pendant la période de forte abondance des CIV durant laquelle la taille aux derniers stades est déterminée : de mai à août pour *C. finmarchicus* et en mai et juin pour *C. hyperboreus* et *C. glacialis*. Nous avons d'abord estimé le poids en carbone des CIV, CV et CVI de *C. finmarchicus* durant les deux périodes à l'aide des équations de Campbell *et al.* (2001). En l'absence d'études semblables pour les deux autres espèces, nous avons appliqué des facteurs d'échelle de 1,6 à 2,5 et de 5 à 8 pour déterminer le poids carbone corporel de chaque stade de *C. glacialis* et de *C. hyperboreus* respectivement (Plourde *et al.* 2019, Helenius *et al.* 2023). Nous avons ensuite converti le poids carbone en poids sec individuel (PSI) total en supposant que le carbone représentait en moyenne 52 % du poids corporel pour *C. finmarchicus* et *C. glacialis* et 60 % pour *C. hyperboreus* (Runge *et al.* 2006, Brey *et al.* 2010, Helenius *et al.* 2023). Afin d'éviter d'estimer un poids corporel irréaliste à des températures extrêmement élevées ou basses, nous avons limité le poids corporel estimé de manière à ce qu'il ne dépasse pas les quantiles inférieurs à 10 % et supérieurs à 90 % des observations sur le terrain (Helenius *et al.* 2023).

2.4.3. Biomasse des *Calanus* dans la colonne d'eau

Dans chaque région (figure 1, panneau de droite), nous avons estimé la biomasse totale des *Calanus* dans la colonne d'eau pour différents mois et décennies, comme suit :

$$\text{Biomasse (g m}^{-2}\text{)} = \text{abondance (ind. m}^{-2}\text{)} * \text{PSI (mg)} / 1\ 000$$

où le PSI a été pondéré pour les variations mensuelles et régionales de la composition par stade (%) à l'aide de la proportion régionale mensuelle des CIV à CVI observée pour chaque espèce de 1999 à 2020 (voir la figure A.2.1. dans Plourde *et al.* 2024).

En prenant la période de 2000 à 2009 comme référence, nous avons calculé les changements relatifs interdécennaux passés et futurs (en %) de la biomasse totale prédite des *Calanus* pour décrire les patrons de changements significatifs dans chaque région. Les changements étaient jugés significatifs lorsque les différences de biomasse totale des *Calanus* dans la colonne d'eau dépassaient 1,96 fois les écarts types (approximation des intervalles de confiance à 95 %) entre les trois ensembles de prédictions obtenus avec les trois simulations de modèles régionaux. Les différences et les écarts types ont été calculés par région et par décennie.

3. RÉSULTATS

3.1. MODÈLES DE RÉPARTITION DES ESPÈCES (GAMM)

Tous les paramètres de performance (TSS, déviance et corrélation) étaient très semblables entre les trois GAMM construits à l'aide des trois simulations de modèles régionaux pour chaque espèce (tableau 2). Ils étaient semblables à ceux de Plourde *et al.* (2024), malgré le plus petit domaine spatial pris en compte dans notre étude. L'homogénéité et l'exactitude des prédictions ont été fournies pour la simulation CanESM2_rcp8.5 (voir par exemple les figures A.2.1 à A.2.4). Les résidus des GAMM étaient homogènes dans tous les cas. Comme dans Plourde *et al.* (2024), il y avait une légère surestimation des petites valeurs et une sous-estimation des grandes valeurs communes dans les MRE. Le plus grand écart par rapport aux observations concernait *C. hyperboreus*, avec le quantile 95 % des observations sous-estimé d'environ 5 000 ind./m² avec le GAMM (figure A.2.4) comparativement à environ 2 500 ind./m² dans Plourde *et al.* (2024). Les autres quantiles affichaient un écart négligeable par rapport aux observations. Enfin, la validation croisée temporelle à l'aide des GAMM ajustés à une partie seulement de l'ensemble de données de 1999 à 2020 a généralement bien performé pour prédire l'abondance des autres années, ce qui indique que nos GAMM étaient relativement robustes (tableau A.2.2). Il convient de noter que les capacités de prédiction pour *C. glacialis* étaient quelque peu inférieures à celles pour *C. finmarchicus* et *C. hyperboreus* (tableau A.2.2).

Les fonctions de lissage des covariables de température ont montré les réponses (effets) attendues propres à l'espèce dans les GAMM de Bernoulli ou Gamma (figure 3). La réponse à la température était plus congruente pour *C. finmarchicus*, avec des effets positifs associés à des valeurs supérieures de T₀₋₅₀ et de T_{min}, que pour les deux autres espèces (figure 3). Pour *C. glacialis* et *C. hyperboreus*, au moins un des lissages de Bernoulli et Gamma pour T_{min} et T₀₋₅₀ a donné un effet négatif important de la température sur l'occurrence ou l'abondance (figure 3). Dans l'ensemble, l'effet combiné des covariables de température dans les GAMM Gamma a montré un effet positif sur l'abondance de *C. finmarchicus* et de *C. hyperboreus* centré dans la moitié sud et la moitié nord du domaine, respectivement, mais avec un signal saisonnier relativement fort (figure A.2.7).

La terme d'interaction représentant la connectivité a révélé un patron saisonnier et géographique propre à chaque espèce, associé aux différences dans la relation de ces espèces avec la latitude (figure 4), le mois et les masses d'eau (ClimS_{0-50rc}, figure 5, figure 6). Pour

C. finmarchicus, l'effet positif était surtout limité à l'ePNE, à l'oPNE et au GM d'avril à juillet, puis seulement à l'extrême sud du domaine spatial à l'automne (figure 6). Au contraire, un effet positif élevé a été observé pour *C. glacialis* de mai à juillet dans l'est, l'ouest et le sud du golfe du Saint-Laurent (eGSL, oGSL et sGSL), et pour *C. hyperboreus* dans les régions du GSL et du PNE de mai à septembre (figure 6). Cependant, le GAMM Gamma a montré un effet positif du terme d'interaction représentant la connectivité à la limite sud du domaine spatial pour *C. glacialis* au début de la saison. Cet effet ne s'est pas traduit par une prédiction élevée d'abondance, parce que le GAMM de Bernoulli affichait un fort effet négatif sur l'abondance dans cette zone (figure A.2.5).

L'incertitude entourant les prédictions de l'abondance (CV des prédictions) pour les trois espèces de *Calanus* a été estimée d'avril à octobre au cours de la décennie de 2000 à 2009 (période de référence pour les projections passées et futures, voir la section 3.2.2). L'incertitude était globalement plus élevée pour *C. glacialis* que pour *C. finmarchicus* et *C. hyperboreus* dans le sud du domaine du modèle, le long du talus continental et dans le détroit de Belle Isle (c'est-à-dire la partie la plus au nord du domaine du modèle; figure 7). Les patrons d'incertitude étaient semblables pour *C. hyperboreus* et *C. glacialis*, tandis que les prédictions pour *C. finmarchicus* présentaient le niveau d'incertitude le plus bas (figure 7).

3.2. PROJECTIONS

Les résultats ont été présentés pour chaque région décrite sur la figure 1 (panneau de droite). Les patrons spatiaux des changements relatifs de diverses covariables et de variables associées aux *Calanus* ont été calculés pour la décennie de 2080 à 2089 par rapport à la période de 2000 à 2009 afin d'éviter une incertitude potentiellement plus grande à la fin de la période de projection (de 1971 à 2099).

3.2.1. Tendances des covariables de la température

Les moyennes d'avril à octobre de T_{0-50} et de T_{min} affichaient des tendances interdécennales similaires dans toutes les régions, mais avec des valeurs absolues initiales et finales augmentant du sud (banc de Georges, Fundy-GM) vers le nord (oGSL, eGSL) (figure 8). L'écart entre T_{0-50} et T_{min} était plus important dans les régions les plus au nord (GSL, sud de Terre-Neuve, ePNE), où T_{min} demeurerait faible toute l'année alors que T_{0-50} augmentait en raison du réchauffement saisonnier, alors que T_{min} augmentait à la fin de l'été et à l'automne dans les régions du sud (figure A.1.1).

Les hausses prédites de T_{0-50} et de T_{min} entre 2000-2009 et 2080-2089 n'étaient pas uniformes dans l'espace. Les prédictions de T_{0-50} et T_{min} dans le GSL en 2080-2089 étaient semblables à celles des régions de Fundy-GM et de l'oPNE en 2000-2009, tandis que celles de 2080-2090 dans les régions de Fundy-GM, l'oPNE et une partie de l'ePNE dépassaient quelque peu les températures observées dans les eaux canadiennes entre 2000 et 2009 (figure 9). Les augmentations de T_{0-50} étaient plus importantes dans les régions de Fundy-GM, de l'ePNE et du sud de Terre-Neuve (sTN), ainsi que dans les zones du sGSL et de l'eGSL (figure 9). Les augmentations de T_{min} étaient inférieures à 2 °C dans la moitié occidentale de l'oPNE; elles étaient de 4 ou 5 °C dans la moitié nord-est de l'ePNE et la moitié occidentale du sTN, et quelque peu entre les deux dans les autres eaux canadiennes (3 ou 4 °C). Les estimations des hausses de la température étaient en moyenne supérieures à 3 °C dans le domaine du modèle.

3.2.2. Tendances de l'abondance des *Calanus*

Les tendances interdécennales de l'abondance prédite variaient d'une espèce et d'une région à l'autre (figures 10 à 12). Une augmentation de l'abondance de *C. finmarchicus* est prédite au

cours du siècle dans les régions du nord (oGSL, eGSL, sGSL, sTN, ePNE). Dans l'oPNE, l'abondance devrait rester stable jusqu'en 2060-2069, puis diminuer, alors qu'elle devrait afficher une baisse plus régulière et continue au fil du temps dans les régions de Fundy-GM et du banc de Georges (BG; figure 10). L'incertitude entourant les prédictions était plus grande à la fin du siècle dans toutes les régions et, dans l'ensemble, plus grande dans la région de Fundy-GM (figure 10).

Contrairement à celle de *C. finmarchicus*, l'abondance prédite pour *C. glacialis* et *C. hyperboreus* présentait une tendance interdécennale négative cohérente au cours du siècle présent dans les régions où les espèces étaient abondantes (figures 11 et 12). Dans l'oGSL et l'eGSL, la tendance décroissante interdécennale semble avoir commencé au cours des décennies 2000-2009 et 2010-2019, respectivement (figures 11 et 12). Pour ces deux espèces, l'incertitude entourant les prédictions était plus homogène entre les décennies que pour *C. finmarchicus*. Dans l'ensemble, l'incertitude au sujet des tendances de l'abondance était plus grande dans l'eGSL pour *C. glacialis* et dans l'oGSL pour *C. hyperboreus* (figures 11 et 12).

3.2.3. Tendances du poids sec individuel des *Calanus*

Le modèle a prédit pour toutes les espèces de *Calanus* une diminution cohérente du PSI décennal dans toutes les régions durant la période d'étude (figure 13). Cependant, la tendance négative semble s'accroître dans la seconde moitié du siècle et est particulièrement marquée pour *C. hyperboreus* dans les régions du GSL (figure 13). L'incertitude entourant ces prédictions était un peu plus grande à partir de 2050 (figure 13).

3.2.4. Tendances de la biomasse des *Calanus*

Les tendances prédites de la biomasse entre les régions étaient les plus variables pour *C. finmarchicus*, avec une biomasse prédite stable ou croissante dans les régions du GSL et stable puis décroissante pendant les première et deuxième moitiés du siècle dans le sTN et l'ePNE (figure 14). En revanche, le modèle a prédit une tendance régulière à la baisse pour les biomasses de *C. hyperboreus* et de *C. glacialis* dans toutes les régions, avec une amplitude de changement plus importante pour *C. hyperboreus* dans l'oGSL et l'eGSL (figure 14).

Les tendances interdécennales de la biomasse totale des *Calanus* dans les différentes régions suivaient généralement celles des espèces dominantes localement (figure 15). La biomasse totale prédite des *Calanus* affichait un déclin régulier dans les régions du nord (oGSL, eGSL) et du sud (oPNE, Fundy-GM, BG), associé à une diminution correspondante de la biomasse de *C. hyperboreus* et de *C. finmarchicus*, respectivement (figure 14). Les patrons de changements de la biomasse totale des *Calanus* n'étaient pas aussi prononcés dans le sGSL, le sTN et l'ePNE, mais révélaient généralement une diminution à partir de 2060 (figure 15).

La biomasse totale des *Calanus* prédite était en moyenne légèrement plus élevée entre 1971 et 1999 qu'entre 2000 et 2009 dans les eaux canadiennes. La première diminution significative de la biomasse totale des *Calanus* prédite se produisait plus tôt dans l'oGSL, l'eGSL et le sTN (de 2010 à 2019) que dans les régions de Fundy-GM (de 2020 à 2029) et dans l'oPNE et sur le BG (de 2030 à 2039). Les réductions de la biomasse totale des *Calanus* étaient importantes entre toutes les décennies dans l'oGSL, l'eGSL, la région de Fundy-GM et sur le BG (figure 16). Cependant, les grandes différences relatives interdécennales (en %) n'étaient pas toujours significatives, en particulier de 2060 à 2100 dans le sTN, l'ePNE et l'oPNE (figure 16), car les prédictions étaient associées à une grande incertitude (figure 15).

3.2.5. Diminution de la biomasse des *Calanus* : 2000-2009 par rapport à 2080-2089

Les changements relatifs (en %) de l'abondance prédite de chaque espèce, du PSI et de la biomasse dans la colonne d'eau entre 2000-2009 et 2080-2089 reflétaient les tendances décrites précédemment dans différentes régions (tableau 3). Bien que toutes ces variables aient affiché une diminution marquée en 2080-2089 par rapport à 2000-2009 pour *C. glacialis* et *C. hyperboreus* dans les eaux canadiennes, une interaction plus complexe entre les variables et les régions est apparue pour *C. finmarchicus* (tableau 3). L'abondance prédite de *C. finmarchicus* était de 28 à 38 % plus élevée en 2080-2089 qu'en 2000-2009 dans les régions du nord (de l'ePNE jusqu'à l'oGSL), stable entre les deux périodes dans l'oPNE et de 24 à 31 % plus faible en 2080-2089 dans les régions de Fundy-GM et du BG qu'en 2000-2009 (tableau 3). Combiné à une baisse estimée de 21 à 33 % du PSI à l'échelle de la région, le patron de la biomasse dans la colonne d'eau ainsi obtenu durant la période d'étude a révélé une augmentation de 9 à 11 % dans l'oGSL et l'eGSL, mais aucun changement dans le sGSL, une réduction de 12 à 31 % dans le sTN et l'oPNE, ainsi qu'une diminution beaucoup plus importante (de 50 à 64 %) dans les régions de l'oPNE, de Fundy-GM et du BG (tableau 3). Dans l'ensemble, la biomasse totale des espèces de *Calanus* prédite diminuait de 50 à 65 % dans les régions du BG, de Fundy-GM et de l'oPNE, de 25 à 35 % dans l'ePNE, le sTN, l'eGSL et l'oGSL, et de 11 % dans le sGSL entre 2000-2009 et 2080-2089 (tableau 3).

Le changement relatif (en %) de la biomasse totale des *Calanus* entre 2000-2009 et 2080-2089 n'était pas uniforme d'une saison à l'autre et dans chaque région. Le patron saisonnier le plus important était observé dans les régions du BG, de Fundy-GM et de l'oPNE, où une forte diminution de la biomasse des *Calanus* était prédite en été et en automne (figure 17). Ailleurs, le changement relatif était plus marqué en juin dans le sGSL et plutôt constant dans les autres régions (figure 17). Sur le plan spatial, le changement relatif de la biomasse totale des *Calanus* était la plus grande dans les chenaux profonds de l'oGSL et de l'eGSL, au large des côtes à l'extrémité est du sTN, sur le plateau extérieur de l'ePNE et de l'oPNE, de même que vers l'extrémité nord-ouest des régions de Fundy-GM et du GM (figure 18). Il est intéressant de noter que le changement relatif de la biomasse totale des *Calanus* était la plus faible dans le bassin Roseway et le long d'un corridor sur la partie intérieure de l'oPNE, dans une grande zone hauturière de l'ePNE et sur la partie intérieure du sTN (figure 18).

La contribution de *C. finmarchicus* (en %) à la biomasse totale prédite des *Calanus* devrait augmenter dans l'ensemble du domaine en 2080-2089 par rapport à 2000-2009 (figure 19). L'augmentation la plus importante est prédite dans l'oGSL et l'eGSL, puis dans le sGSL et les zones situées à la limite des régions de l'ePNE et du sTN (figure 18). Dans l'ensemble, les augmentations de la contribution de *C. finmarchicus* (en %) à la biomasse totale des *Calanus* sont davantage le résultat d'une diminution de la biomasse de *C. hyperboreus* et de *C. glacialis* que d'une augmentation de la biomasse de *C. finmarchicus* (figure 14).

4. DISCUSSION

4.1. MODÈLES DE RÉPARTITION DES ESPÈCES (GAMM)

Nos GAMM fondés sur les données du GM au GSL ont produit des résultats semblables à ceux d'une étude précédente réalisée sur une plus grande zone (Plourde *et al.* 2024). On s'attendait à de petites différences dans la performance des GAMM entre les scénarios des modèles climatiques régionaux, étant donné qu'ils ont été construits à l'aide de covariables extraites du même modèle couplé atmosphère-océan, malgré certaines variations dans le forçage entre les trois scénarios (par exemple, atmosphère, écoulement d'eau douce, conditions aux limites

ouvertes; Lavoie *et al.* 2021). La qualité très similaire de nos GAMM nous donne confiance dans la robustesse de nos prédictions.

Nos MRE ont donné des réactions variables à T₀₋₅₀ et à T_{min} chez les espèces de *Calanus*, comme il a été décrit précédemment à l'aide d'approches de modélisation semblables (Chust *et al.* 2014, Albouy-Boyer *et al.* 2016, Plourde *et al.* 2024). Cependant, nous avons observé quelques écarts par rapport aux relations attendues chez les espèces d'eaux froides, *C. glacialis* et *C. hyperboreus*, probablement associés à leur transport dans les régions du sud et à leur persistance dans des conditions chaudes défavorables en raison de leurs grandes réserves de lipides (Zakardjian *et al.* 2003, Helenius *et al.* 2023, Plourde *et al.* 2024). D'autres causes possibles de ces écarts par rapport aux effets prédits de la température sont abordées ci-après (voir la section Sources d'incertitude).

Le terme de « connectivité » a permis de refléter des patrons grossiers réalistes de l'influence des différentes masses d'eau dans les eaux canadiennes (voir Plourde *et al.* 2024). Nos résultats suggèrent que dans l'oPNE, *C. finmarchicus* était davantage associé à des masses d'eau plus salines provenant du talus ou de la partie extérieure du plateau (Head *et al.* 1999; Davies *et al.* 2014). Les patrons de connectivité observés pour *C. hyperboreus* mettaient en évidence l'oGSL comme principale source pour le sGSL et le PNE le long d'un système de circulation très connecté, surtout influencé par le débit d'eau douce du Saint-Laurent (Sameoto et Herman 1992, Brennan *et al.* 2021, Le Corre *et al.* 2023). Enfin, les patrons de connectivité indiquaient que *C. glacialis* serait davantage associé à l'eau du plateau du Labrador (LAB) et serait transporté dans le GSL par le détroit de Belle Isle (Plourde *et al.* 2024).

Les MRE sont des outils utiles pour déduire des patrons pendant les périodes et dans les zones où les données sont peu recueillies. Il est fortement recommandé d'effectuer des prédictions et des inférences à des échelles comprises dans celles qui sont considérées comme bien résolues par les modèles, celles-ci étant déterminées par les caractéristiques temporelles et spatiales des données d'entrée (Austin *et al.* 2007, Waldock *et al.* 2022). L'effort d'échantillonnage dans le contexte du PMZA est très inégal, la plupart des relevés spatiaux étant effectués deux fois par année sur des transects hydrographiques éparses et à quelques stations d'échantillonnage à haute fréquence visitées une ou deux fois par mois (figure 1). Dans le GM, l'effort d'échantillonnage dans le contexte du programme EcoMon est mieux réparti, mais il est encore très inégal entre les mois et les régions (figure 1; Plourde *et al.* 2024). D'après ces caractéristiques, nous avons déterminé que nos modèles étaient en mesure de prédire l'abondance des espèces de *Calanus* à une échelle mensuelle.

Malgré l'utilisation prudente de nos MRE aux échelles mensuelles, l'incertitude représentée par le coefficient de variation (en %) dans les paramètres du modèle était généralement plus élevée aux limites de notre domaine spatial, le niveau d'incertitude étant nettement différent entre *C. finmarchicus* (le plus bas) et *C. glacialis* (le plus élevé; figure 7). Il convient de noter que ces coefficients de variation relatifs plus grands étaient associés à une très faible abondance prédite de *C. glacialis*, c'est-à-dire que les valeurs absolues des coefficients de variation étaient plus faibles que dans les autres zones où l'abondance prédite était élevée. Néanmoins, de plus grandes incertitudes dans les prédictions associées aux valeurs aux extrémités de l'espace des covariables sont une caractéristique courante dans les MRE, ce qui indique que les prédictions dans de telles zones doivent être interprétées avec prudence.

4.2. PROJECTIONS

Notre étude combinait des prédictions de l'abondance et du PSI pour estimer les variations de la biomasse des trois espèces importantes de *Calanus* dans les eaux canadiennes. Très peu d'études ont prédit les changements futurs de ces espèces et toutes les études prédictives

présentaient des différences méthodologiques importantes (données sur les *Calanus*, domaine spatial et résolution, espèces modélisées, variable réponse— abondance ou occurrence, covariables). Reygondeau et Beaugrand (2011) ont prédit une disparition totale irréaliste de *C. finmarchicus* du golfe médio-atlantique jusqu'aux Grands Bancs, au large de Terre-Neuve, en 2090-2099 à l'aide d'un modèle de niche écologique fondé sur trois covariables et construit à partir d'une combinaison de diverses données provenant de filets à plancton recueillies dans l'ensemble de l'Atlantique Nord et des projections à faible résolution spatiale. Villarino et ses collaborateurs (2015) ont utilisé uniquement les données de surface (enregistreur continu de plancton, CPR) sur les *Calanus* et des GAM avec un grand ensemble de covariables pour prédire la probabilité d'occurrence de quatre espèces de *Calanus* dans l'Atlantique Nord à une faible résolution spatiale. Ils ont obtenu des résultats qui contredisent ceux obtenus pour *C. finmarchicus* dans les eaux canadiennes par Reygondeau et Beaugrand (2011). Dans ces deux études, le MRE pour les *Calanus* a été construit avec des modèles climatiques océaniques à grande échelle, à des échelles spatiales grossières probablement inadéquates pour résoudre les processus physiques sur les plateaux continentaux, alors que les prédictions étaient également effectuées avec des modèles océaniques à l'échelle de l'Atlantique Nord avec une faible résolution spatiale. En utilisant une approche semblable à la nôtre, mais avec des données d'entrée limitées aux eaux du nord-est des États-Unis, Grieve et ses collaborateurs (2017) ont prédit une diminution pouvant aller jusqu'à 50 % de l'abondance moyenne de *C. finmarchicus* d'ici 2081-2100 par rapport à la période de référence de 1977-2013 dans le centre et le nord-est du GM. En comparaison, notre étude a estimé que l'abondance et le PSI de *C. finmarchicus* dans la région de Fundy-GM diminueraient de 24 % et de 32 %, respectivement, entre 2000-2009 et 2080-2089, ce qui se traduirait par une réduction de 64 % de la biomasse dans la colonne d'eau (tableau 3). Ces différences entre les études illustrent l'incidence du type de données et des caractéristiques des modèles climatiques océaniques utilisés pour créer les MRE et effectuer des prédictions. Nos résultats montrent qu'il est primordial d'utiliser les covariables des *Calanus* et de l'environnement à l'échelle des processus qui déterminent la dynamique de la région d'intérêt lorsqu'on construit des MRE et qu'on fait des projections dans le futur.

Les causes des tendances négatives régulières prédites dans la biomasse des *Calanus* différaient dans le nord (oGSL, eGSL) et dans le sud (oPNE, Fundy-GM, BG). Dans le nord, la tendance négative dans la biomasse a été associée à la diminution de la biomasse de l'espèce dominante d'eaux froides, *C. hyperboreus*, un patron également observé pour *C. glacialis*, moins dominant. L'abondance prédite de *C. finmarchicus* devrait augmenter, mais le PSI diminuer, ce qui se traduirait par une biomasse stable. Dans le sud, la tendance négative régulière dans la biomasse des *Calanus* était alimentée par une réduction de l'abondance et du PSI de *C. finmarchicus*. Par conséquent, selon nos projections, le GSL deviendrait graduellement trop chaud pour les espèces arctiques de *Calanus* et offrirait un environnement légèrement meilleur pour *C. finmarchicus*, mais les régions de l'oPNE, de Fundy-GM et du BG deviendraient trop chaudes pour l'espèce sous-arctique *C. finmarchicus*.

Nos projections de l'abondance et de la biomasse des espèces de *Calanus* ont été effectuées à l'échelle décennale et ont donc fourni une approximation des tendances potentielles à faible fréquence jusqu'à la fin du XXI^e siècle. Nous avons adopté cette approche parce que les conditions environnementales mensuelles ou annuelles (par exemple, T₀₋₅₀, T_{min}) prédites dans ces scénarios climatiques futurs sont considérées comme très incertaines (Lavoie *et al.* 2021). Cependant, les conditions océanographiques physiques et biologiques antérieures dans l'Atlantique Nord-Ouest ont montré des variations à des échelles infradécennales (annuelles, de trois à cinq ans), indiquant que les hauts et les bas de l'abondance et de la biomasse des *Calanus* se produiraient probablement plus fréquemment et se superposeraient aux tendances à long terme prévues dans notre étude (MPO 2023).

4.3. DIMINUTION DE LA BIOMASSE DES *CALANUS* : 2000-2009 PAR RAPPORT À 2080-2089

Le plus grand changement relatif (%) de la biomasse totale des *Calanus* entre les périodes 2000-2009 et 2080-2089 prédit en été-automne dans les régions du sud (oPNE, Fundy-GM, BG) pourrait résulter de mécanismes dépendants de la température perturbant la phénologie de *C. finmarchicus* dans des conditions plus chaudes. Par exemple, la proportion d'individus du stade CV riches en lipides pendant l'été et l'automne dans la zone extérieure de la baie de Fundy-GM près de Grand Manan et dans le bassin Wilkinson a considérablement diminué entre 2004-2008 et 2012-2016, malgré des niveaux d'abondance semblables des premiers stades plus tôt dans la saison. On peut en déduire un changement dans l'efficacité des voies de développement et de croissance ou dans la survie menant à la production d'individus de stade CV en diapause et riches en lipides, ciblés par la BNAN (Record *et al.* 2019). En général, on observe la production d'un stock hivernant plus petit après le développement de la première génération et une deuxième génération plus importante dans des conditions plus chaudes et dans des régions à l'extérieur de l'habitat océanique principal de *C. finmarchicus*. Aucun changement relatif saisonnier de la biomasse totale des *Calanus* n'a été relevé dans d'autres régions. Cependant, la forte diminution relative de la biomasse des espèces d'eaux froides, *C. glacialis* et *C. hyperboreus*, prédite dans l'oGSL et l'eGSL en 2080-2090 par rapport à 2000-2009 pourrait refléter un impact négatif des conditions plus chaudes sur le bilan énergétique, la taille individuelle et la quantité de réserves d'énergie nécessaires pour alimenter la reproduction et soutenir l'hivernation de ces espèces (Plourde *et al.* 2003, Alcaraz *et al.* 2014).

Le changement relatif modeste de la biomasse des *Calanus* prédite dans le bassin Roseway en 2080-2089 (figure 18) était quelque peu surprenante. Elle semble s'expliquer par une augmentation plus modeste prévue de T_{min} dans ces régions en 2080-2089 par rapport aux régions avoisinantes, résultant probablement du transport vers le sud-ouest des eaux à la T_{min} basse provenant de l'ePNE (figure 9). Ce patron est ressorti de la moyenne des projections tirées des trois projections climatiques régionales, et pourrait donc être considéré comme relativement robuste, car il était probablement associé à un effet positif de la variable de connectivité sur *C. hyperboreus* reliant le GSL et l'ePNE (régions sources) à l'oPNE de mai à juillet (figure 6). Toutefois, ces résultats doivent être interprétés avec prudence dans le contexte de projections à long terme faites à l'aide de modèles de circulation océanique. Les conditions océanographiques dans la région de Fundy-GM, le bassin Roseway et l'oPNE sont très sensibles aux variations des intrusions des eaux chaudes du talus, une dynamique difficile à simuler dans le présent et le futur avec des modèles océaniques physiques en raison de la difficulté de modéliser les conditions limites du plateau continental (Hebert *et al.* 2023).

4.4. CONSÉQUENCES POSSIBLES POUR LA RÉPARTITION ET LES HABITATS D'ALIMENTATION DE LA BNAN

Notre étude visait à prévoir la trajectoire future de la biomasse des *Calanus* dans les eaux canadiennes aux échelles régionale et décennale. Nos projections donnent ainsi un aperçu des abondance et biomasse potentielles des populations des espèces de *Calanus* qui seraient disponibles dans les zones où les caractéristiques physiques locales (bathymétrie, courants, etc.) favorisent la formation de regroupements de proies importants pour la BNAN (Sorochan *et al.* 2021). Les variations régionales et décennales de l'abondance des *Calanus* ont été reliées aux fluctuations du succès de la mise bas de la population de BNAN dans le passé (Meyer-Gutbrod *et al.* 2015, Sorochan *et al.* 2019), et les récents déclin de l'abondance des *Calanus* sont associés à des changements de l'utilisation par la BNAN des habitats d'alimentation traditionnels et à la nouvelle répartition dans les eaux américaines et canadiennes

(Simard *et al.* 2019, Meyer-Gutbrod *et al.* 2023). Ces liens étroits entre l'abondance des *Calanus* en tant que proies et les principales caractéristiques de la dynamique de la population sont le produit de processus survenant aux niveaux individuel et local, ce qui indique que nos projections fournissent des renseignements stratégiques utiles pour la gestion future de cette espèce en voie de disparition.

Les patrons spatiaux et saisonniers de la diminution relative (%) de la biomasse totale des *Calanus* prédite en 2080-2089 par rapport à 2000-2009 dans les régions de Fundy-GM, du BG et de l'oPNE suggèrent que les baisses estivales et automnales de l'abondance de *C. finmarchicus* aux derniers stades observées entre les années 2000 et 2010 dans ces régions se poursuivront et deviendront encore plus prononcées dans le futur (Record *et al.* 2019, Meyer-Gutbrod *et al.* 2023). Ce déclin prévu de la disponibilité des *Calanus* pourrait avoir des répercussions négatives sur l'occupation de ces habitats par la BNAN dans le futur (Ross *et al.* 2021). Des déclins similaires de l'abondance de *C. finmarchicus* et des effets négatifs sur l'abondance de la BNAN ont été documentés dans la baie de Fundy et le bassin Roseway (oPNE) pendant l'été et au début de l'automne, et ont entraîné une nouvelle répartition de la BNAN dans les années 2010 (Record *et al.* 2019, Meyer-Gutbrod *et al.* 2023). D'après nos résultats, il est peu probable que l'abondance future des *Calanus* en tant que proies et la répartition de la BNAN reviennent aux patrons observés dans le passé dans ces régions.

Dans le GSL, la biomasse de *C. finmarchicus* et de *C. hyperboreus* affichait des tendances opposées vers la fin du siècle (2080-2089), qui se traduisaient par une réduction nette de la biomasse des *Calanus* (-25 %) en raison de la baisse prédominante de *C. hyperboreus* (figure 13). Cette diminution de la biomasse se répercuterait probablement sur la disponibilité des *Calanus* dans les régions sources et leur apport dans le sGSL, avec sans doute une disponibilité généralement moindre des *Calanus* en tant que proies dans des régions comme Gaspé et la vallée de Shediac, où de grands regroupements de BNAN sont observés depuis 2015 (Simard *et al.* 2019, Brennan *et al.* 2021, Le Corre *et al.* 2023). Nos projections représenteraient donc une continuité du patron à la baisse de la biomasse des *Calanus* et du succès potentiel d'alimentation de la BNAN documenté entre 2006 et 2017 dans le sGSL (Gavrilchuk *et al.* 2021). L'apport de *Calanus* dans le sGSL est plus sensible au niveau de la population en amont pendant l'été et l'automne qu'au printemps (Brennan *et al.* 2021), indiquant un impact potentiellement plus important des déclins projetés des *Calanus* pendant ces saisons. Pendant l'été et l'automne, *C. finmarchicus* est la composante dominante du flux de *Calanus* dans le sGSL et sa tendance saisonnière prédite est négative en été et en automne (figure 5). Au printemps, la variabilité de l'apport de *Calanus* dans le sGSL est davantage dominée par les voies de transport de l'espèce dominante, *C. hyperboreus*. Toutefois, notre étude ne cherchait pas à décrire les changements futurs des voies de transport entre les régions sources (oGSL, eGSL) et le sGSL qui pourraient également influencer l'abondance des *Calanus* en tant que proies dans le sGSL (Brennan *et al.* 2021, Le Corre *et al.* 2023). Dans l'ensemble, nos résultats indiquent qu'il est peu probable que l'abondance des *Calanus* en tant que proies et la qualité de l'habitat d'alimentation de la BNAN s'améliorent vers la fin du XXI^e siècle dans notre zone d'étude.

Les régions du plateau est de Terre-Neuve (eTN) et du Labrador (LAB) ne faisaient pas partie du domaine spatial pris en compte dans les simulations des modèles climatiques régionaux utilisés pour nos projections. Cependant, on pourrait utiliser les observations sur le terrain et les projections contemporaines et futures de la température de la surface de la mer réalisées avec divers modèles climatiques océaniques globaux et à échelle réduite pour déduire les trajectoires futures potentielles de la biomasse des *Calanus* dans ces régions. La biomasse des espèces de *Calanus* sur l'eTN et sur le LAB entre 1999 et 2020 était relativement élevée, mais inférieure à celle présente dans l'oGSL et l'eGSL en été et en automne (Plourde *et al.* 2024). En général,

la température de la surface de la mer passée, actuelle et future sur l'eTN et le LAB est plus faible au printemps, à l'été et à l'automne que dans les zones adjacentes du GSL et dans les régions du sud (Lavoie *et al.* 2013, MPO 2023). De plus, les projections futures réalisées à l'aide du modèle océanique régional ou de la majorité des modèles et scénarios océaniques mondiaux laissent entendre que la température de la surface de la mer resterait stable ou augmenterait légèrement au cours du siècle dans ces régions (Brickman *et al.* 2016, CIPV 2023). Dans ces conditions de températures futures, la biomasse prédite des espèces de *Calanus* demeurerait probablement stable ou varierait légèrement entre 2000-2009 et 2080-2089. Dans le contexte de la diminution de 25 à 64 % de la biomasse des *Calanus* prévue en 2080-2089 par rapport à 2000-2009 dans les régions du GSL, du sTN, du PNE et de Fundy-GM (tableau 3), les niveaux présumés de biomasse des *Calanus* sur l'eTN et le LAB dans le futur pourraient être plus adaptés à l'alimentation de la BNAN que ceux des autres régions des eaux canadiennes.

Pour conclure, selon nos projections à long terme, la biomasse des *Calanus* (conditions d'alimentation de la BNAN) dans la région de Fundy-GM et l'oPNE continuerait de se détériorer vers la fin du siècle à un rythme plus rapide que celui projeté dans les régions de l'ePNE, du GSL et du sTN, ce qui pourrait renforcer le profil actuel de l'utilisation de l'habitat par la BNAN et de sa répartition observée depuis le début des années 2010.

4.5. SOURCES D'INCERTITUDE

Nos projections ne tenaient compte que des effets combinés des covariables dans nos MRE par rapport à une période de référence (2000-2009), les variations de température étant l'agent des changements futurs. Elles n'intégraient pas un certain niveau de dépendance d'une année à l'autre (autocorrélation) des populations de *Calanus*, c'est-à-dire que l'abondance des reproducteurs du stade CVI et la production d'une nouvelle génération une année donnée sont associées au stock en diapause produit l'année précédente. Cette dépendance d'une année à l'autre de l'abondance des populations pourrait servir de tampon pendant les périodes de faible occurrence les années où les conditions environnementales sont défavorables, mais aussi d'accélérateur de la diminution pendant les périodes de conditions environnementales défavorables continues. Nos projections de la biomasse des *Calanus* réalisées avec les MRE jusqu'à la décennie 2080-2089 devraient donc être considérées comme des estimations minimales et optimistes.

Une incertitude entoure l'identification de *C. finmarchicus* et de *C. glacialis* en raison d'un certain degré de chevauchement de la longueur du prosome dans les eaux canadiennes et des autres régions de l'Atlantique Nord (Parent *et al.* 2011, Gabrielsen *et al.* 2012). Dans les régions où l'abondance de ces espèces est très différente, comme dans notre étude, même une proportion relativement faible d'erreurs d'identification de l'espèce dominante (*C. finmarchicus*) pourrait entraîner des erreurs importantes dans les estimations de l'abondance de l'espèce moins abondante (*C. glacialis*; Parent *et al.* 2011). Les relations entre l'abondance de l'espèce des eaux froides/arctiques *C. glacialis* et les covariables auraient ainsi pu être « contaminées » par une mauvaise identification de *C. finmarchicus*, plus subarctique, donnant lieu à un lissage plus « flou » des prédictions pour *C. glacialis* par les MRE. Des erreurs d'identification de *C. finmarchicus* auraient donc pu contribuer à l'incertitude généralement plus grande observée dans les MRE et les projections pour *C. glacialis* par rapport à *C. finmarchicus* (figure 4, figure 7).

Bien qu'il faille considérer comme robuste la trajectoire future de la diminution prévue du poids corporel individuel des *Calanus*, l'utilisation d'une composition mensuelle constante des stades (en pourcentage) dans différentes régions afin d'appliquer ce poids corporel individuel pour estimer la biomasse des *Calanus* dans la colonne d'eau pourrait représenter une source

d'incertitude. Cela est particulièrement vrai pour les espèces d'eaux froides, *C. glacialis* et *C. hyperboreus*, qui ont un cycle vital pluriannuel, avec les CIV, CV et CVI comme stades de diapause dans leurs habitats principaux, mais un cycle vital plus proche du cycle annuel avec une population au repos dominée par les CV à la limite sud de leur répartition, comme pour *C. finmarchicus* (Conover 1988). Il est donc possible que le changement futur du poids corporel individuel s'accompagne d'un changement de la composition des stades qui n'a pas été pris en compte dans notre étude.

Il est possible que la nécessité d'utiliser une catégorie grossière comprenant les stades CIV à CVI pour limiter le nombre de MRE et de simulations ait eu une incidence sur nos MRE. Les *C. finmarchicus* de stades CIV et les femelles de stades CVI sont surtout actifs dans la couche de surface, tandis que ceux du stade CV passent la plus grande partie de leur temps dans les eaux profondes, en diapause. Cela signifie que l'abondance propre à chaque stade n'était pas toujours « directement » liée à T₀₋₅₀ et à T_{min}. Ce n'était pas le cas pour *C. hyperboreus* et *C. glacialis*, pour lesquels les stades CIV, CV et CVI sont tous des stades de diapause dans les eaux canadiennes. L'écart de certains lissages décrivant l'effet de T₀₋₅₀ sur *C. glacialis* et *C. hyperboreus* par rapport aux relations prédites entre la température et les *Calanus* aurait pu être associé à ce décalage entre l'abondance et les covariables sur la dimension verticale.

Les PSI projetés se situent dans les valeurs observées (Plourde *et al.* 2019, Sorochan *et al.* 2019). Cependant, nous n'avons pas tenu compte de l'effet de disponibilité de nourriture, qui pourrait aussi être un facteur important des variations de la taille (Campbell *et al.* 2001). Le modèle biogéochimique (Lavoie *et al.* 2021) comprenait des projections de la concentration de chlorophylle *a*. Cependant, les variations de la chlorophylle *a* n'étaient pas significatives entre leurs deux périodes de référence (1991-2010 et 2061-2080). De plus, Campbell et ses collaborateurs (2001) n'ont pas testé l'interaction température * disponibilité de nourriture, et il est donc difficile d'inclure ces deux effets dans notre approche.

Nos projections de la biomasse des *Calanus* à l'aide de MRE ont été établies en supposant qu'aucun changement radical du mode de circulation et des tendances prévues des conditions océanographiques ne se produiraient entre 1971 et 2100. Cependant, un changement dans la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique (AMOC) avant la fin du XXI^e siècle provoqué par les modifications des conditions océanographiques a été jugé possible, mais très incertain (Ditlevsen et Ditlevsen 2023). Les répercussions d'un changement radical dans le mode de circulation de caractéristiques importantes comme le courant du Labrador et le Gulf Stream sont très incertaines, mais pourraient modifier la force des courants, les patrons de connectivité entre les régions, les conditions océanographiques locales et la productivité du plancton (Lavoie *et al.* 2021, Rutherford *et al.* 2024).

5. RÉFÉRENCES CITÉES

- Albouy-Boyer, S., Plourde, S., Pepin, P., Johnson, C.L., Lehoux, C., Galbraith, P.S., Hebert, D., Lazin, G., and Lafleur, C. 2016. [Habitat modelling of key copepod species in the Northwest Atlantic Ocean based on the Atlantic Zone Monitoring Program](#). J. Plankton Res. 38: 589–603. Doi:10.1093/plankt/fbw020.
- Alcaraz, M., Felipe, J., Grote, U., Arashkevich, E., et Nikishina, A. 2014. Life in a warming ocean: thermal thresholds and metabolic balance of arctic zooplankton. J. Plankton Res. 36: 3-10.
- Austin, M. 2007. Species distribution models and ecological theory: a critical assessment and some possible new approaches. Ecol. Model. 200: 1-19.
- Baumgartner, M.F., Wenzel, F.W., Lysiak, N.S.J. et Patrician, M.R. 2017. North Atlantic right whale foraging ecology and its role in human-caused mortality. Mar. Ecol. Prog. Ser. 581 : 165–181.
- Brennan, C. E., Maps, F., Gentleman, W. C., Lavoie, D., Chassé, J., Plourde, S., et Johnson, C. L. 2021. Ocean circulation changes drive shifts in *Calanus* abundance in North Atlantic right whale foraging habitat: a model comparison of cool and warm year scenarios. Prog. Oceanogr. 197: 102629.
- Brickman, D., et Drozdowski, A. 2012. Development and validation of a regional shelf model for Maritime Canada based on the NEMO-OPA circulation model. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 278: vii + 57.
- Brey, T., Müller-Wiegmann, C., Zittier, Z.M.C., et Hagen, W. 2010. Body composition in aquatic organisms - A global data bank of relationships between mass, elemental composition and energy content. J. Sea Res. 64: 334–340.
- Brickman, D., Zeliang, W., et DeTracey, B. 2016. High Resolution Future Climate Model Simulations for the Northwest Atlantic. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean. Sci. 315: xiv + 143.
- Campbell, R.G., Wagner, M.M., Teegarden, G.J., Boudreau, C.A., and Durbin, E.G. 2001. [Growth and development rates of the copepod *Calanus finmarchicus* reared in the laboratory](#). Mar. Ecol. Prog. Ser. 221: 161–183. Doi:10.3354/meps221161.
- Chust, G., Castellani, C., Licandro, P., Ibaibarriaga, L., Sagarminaga, Y., et Irigoien, X. 2014. Are *Calanus* spp. Shifting poleward in the North Atlantic? A habitat modelling approach. ICES J. Mar. Sci. 71: 241-253.
- Conover, R. J. 1988. Comparative life histories in the genera *Calanus* and *Neocalanus* in high latitudes of the northern hemisphere. Hydrobiologia, 167: 127-142.
- Crowe, L. M., Brown, M. W., Corkeron, P. J., Hamilton, P. K., Ramp, C., Ratelle, S., Vanderlaan, A.S.M. et Cole, T. V. 2021. In plane sight: a mark-recapture analysis of North Atlantic right whales in the Gulf of St. Lawrence. Endanger. Species Res. 46: 227-251.
- Davies, K.T., Taggart, C.T., et Smedbol, R.K. 2014. Water mass structure defines the diapausing copepod distribution in a right whale habitat on the Scotian Shelf. Mar. Ecol. Prog. Ser. 497: 69-85.
- Ditlevsen, P., et Ditlevsen, S. 2023. Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. Nat. Commun. 14: 1-12.
- Dixon WJ. 1960. Simplified Estimation from Censored Normal Samples. Ann. Math. Stat. 31:385–391.

-
- Gabrielsen, T. M., Merkel, B., Søreide, J. E., Johansson-Karlsson, E., Bailey, A., Vogedes, D., Nygard, H., Varpe, O. et Berge, J. 2012. Potential misidentifications of two climate indicator species of the marine arctic ecosystem: *Calanus glacialis* and *C. finmarchicus*. Polar biol. 35: 1621-1628.
- Gavrilchuk, K., Lesage, V., Fortune, S.M.E., Trites, A.W., and Plourde, S. 2021. [Foraging habitat of North Atlantic right whales has declined in the Gulf of St. Lawrence, Canada, and may be insufficient for successful reproduction](#). Endanger. Species Res. 44: 113–136. Doi:10.3354/ESR01097.
- Grieve, B. D., Hare, J. A., and Saba, V. S. 2017. [Projecting the effects of climate change on *Calanus finmarchicus* distribution within the US Northeast Continental Shelf](#). Sci. Rep. 7 : 1-12. Doi:10.1038/s41598-017-06524-1.
- Head, E. J., Harris, L. R., et Petrie, B. 1999. Distribution of *Calanus* spp. on and around the Nova Scotia Shelf in April: evidence for an offshore source of *Calanus finmarchicus* to the central and western regions. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 56: 2463-2476.
- Hebert, D., Layton, C., Brickman, D., et Galbraith, P.S. 2023. Physical Oceanographic Conditions on the Scotian Shelf and in the Gulf of Maine during 2022. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 359: vi + 81 p.
- Helenius, L.K., Head, E.J.H., Jekielek, P., Orphanides, C.D., Pepin, P., Perrin, G., Plourde, S., Ringuette, M., Runge, J.A., Walsh, H.J., et Johnson, C.L. 2023. Spatial variability of *Calanus* spp. size and lipid content in the northwest Atlantic – Compilation and brief summary of historical observations, 1977-2020. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 3549: iv + 58 p
- IPCC. 2023. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Lavoie, D., Lambert, N., Ben Mustapha, S. et van der Baaren, A. 2013. Projections of future physical and biogeochemical conditions in the Northwest Atlantic from CMIP5 Global Climate Models. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 285: xiv + 156 pp.
- Lavoie, D., Lambert, N., Rousseau, S., Dumas, J., Chassé, J., Long, Z., Perrie, W., Starr, M., Brickman, D., et Azetsu-Scott, K. 2020. Projections of future physical and biochemical conditions in the Gulf of St. Lawrence, on the Scotian Shelf and in the Gulf of Maine using a regional climate model. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 334: xiii + 102
- Lavoie, D., Lambert, N., Starr, M., Chassé, J., Riche, O., Le Clainche, Y., Azetsu-Scott, K., Béjaoui, B., Christian, J.R., and Gilbert, D. 2021. [The Gulf of St. Lawrence Biogeochemical Model: A Modelling Tool for Fisheries and Ocean Management](#). Front. Mar. Sci. 8: 1–29. Doi:10.3389/fmars.2021.732269.
- Le Corre, N., Brennan, C. E., Chassé, J., Johnson, C. L., Lavoie, D., Paquin, J. P., Soontiens, N. et Plourde, S. 2023. A biophysical model of *Calanus hyperboreus* in the Gulf of St. Lawrence: Interannual variability in phenology and circulation drive the timing and location of right whale foraging habitat in spring and early summer. Progr. Oceanogr. 219: 103152.
- Lehoux, C., Plourde S., et Lesage, V. 2020. [Importance des espèces dominantes de zooplancton pour les habitats potentiels d'alimentation des baleines noires de l'Atlantique Nord dans le golfe du Saint Laurent : une approche bioénergétique](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2020/033. iv + 45 p.
-

-
- Madec, G. 2012. NEMO Ocean Engine. Note du Pôle de modélisation, Vol. 27. Guyancourt: de l'Institut Pierre-Simon Laplace.
- Madec, G., Delecluse, P., Imbard, M., et Lévy, C. 1998. OPA 8.1 Ocean General Circulation Model reference manual. Note du Pôle de modélisation, Vol. 11. Guyancourt: de l'Institut Pierre-Simon Laplace.
- Meyer-Gutbrod, E. L., Greene, C. H., Sullivan, P. J., et Pershing, A. J. 2015. Climate-associated changes in prey availability drive reproductive dynamics of the North Atlantic right whale population. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 535: 243-258.
- Meyer-Gutbrod, E. L., Davies, K. T., Johnson, C. L., Plourde, S., Sorochan, K. A., Kenney, R. D., Ramp, C., Gosselin, J-F, Lawson, J.W. et Greene, C. H. 2023. Redefining North Atlantic right whale habitat-use patterns under climate change. *Limnol. Oceanogr.* 68: S71-S86.
- Miller, D. L., Becker, E. A., Forney, K. A., Roberts, J. J., Cañadas, A., et Schick, R. S. 2022. Estimating uncertainty in density surface models. *PeerJ*, 10: e13950.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R, Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B, Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. et Wilbanks, T.J. 2010. The next generation of simulations for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747-756.
- MPO. 2023. Conditions océanographiques dans la zone atlantique en 2022. Secr. can. des avis sci. du MPO. Avis sci. 2023. 2023/019.
- NOAA National Centers for Environmental Information. 2022. [ETOPO 2022 15 Arc-Second Global Relief Model](https://doi.org/10.25921/fd45-gt74). NOAA National Centers for Environmental Information. doi:doi.org/10.25921/fd45-gt74.
- Pante, E., Simon-Bouhet, B., and Irisson, J. 2023. [marmap: Import, Plot and Analyze Bathymetric and Topographic Data](#). R package version 1.0.10.
- Parent, G. J., Plourde, S., and Turgeon, J. 2011. [Overlapping size ranges of *Calanus* spp. off the Canadian Arctic and Atlantic Coasts: impact on species' abundances](#). *J. Plankton Res.* 33: 1654-1665. Doi:10.1093/plankt/fbr072.
- Pellerin, G., Lefaiivre, L., Houtekamer, P., et Girard, C. 2003. Increasing the horizontal resolution of ensemble forecasts at CMC. *Nonlinear Proc. Geoph.* 10: 463–468. doi: 10.5194/npg-10-463-2003.
- Plourde, S., Joly, P., Runge, J. A., Dodson, J., et Zakardjian, B. 2003. Life cycle of *Calanus hyperboreus* in the lower St. Lawrence Estuary and its relationship to local environmental conditions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 255: 219-233.
- Plourde, S., Lehoux, C., Johnson, C.L., Perrin, G., and Lesage, V. 2019. [North Atlantic right whale \(*Eubalaena glacialis*\) and its food: \(I\) a spatial climatology of *Calanus* biomass and potential foraging habitats in Canadian waters](#). *J. Plankton Res.* 41(5): 667–685. Doi:10.1093/plankt/fbz024.
- Plourde, S., Lehoux, C., Roberts, J.J., Johnson, C.L., Record, N., Pepin, P., Orphanides, C., Schick, R.S., Walsh, H.J., Ross, C.H. 2024. [Description de la répartition saisonnière et spatiale des proies du genre *Calanus* et des habitats potentiels d'alimentation de la baleine noire du nord de l'Atlantique dans les eaux canadiennes à l'aide de modèles de répartition des espèces](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2024/039. v + 75 p.
-

-
- Record, N. R., Runge, J. A., Pendleton, D. E., Balch, W. M., Davies, K. T., Pershing, A. J., Catherine L. Johnson, Stamieszkin, K., Ji, R., Feng, Z., Kraus, S.D., Kenney, R.D., Hudak, C.A., Mayo, C.A., Chen, C., Salisbury, J.E. and Thompson, C. R. 2019. [Rapid climate-driven circulation changes threaten conservation of endangered North Atlantic right whales](#). *Oceanography* 32: 162–169.
- Reygondeau, G. and Beaugrand, G. 2011. Future climate-driven shifts in distribution of *Calanus finmarchicus*. *Glob. Change Biol.* 17: 756-766.
- Ross, C.H., Pendleton, D.E., Tupper, B., Brickman, D., Zani, M.A., Mayo, C.A. and Record, N.R. 2021. [Projecting regions of North Atlantic right whale, *Eubalaena glacialis*, habitat suitability in the Gulf of Maine for the year 2050](#). *Elem. Sci. Anth.*, 9: 1.
- Ross, C. H., Runge, J. A., Roberts, J. J., Brady, D. C., Tupper, B., and Record, N. R. 2023. Estimating North Atlantic right whale prey based on *Calanus finmarchicus* thresholds. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 703: 1-16.
- Runge, J.A., Plourde, S., Joly, P., Niehoff, B., and Durbin, E. 2006. [Characteristics of egg production of the planktonic copepod, *Calanus finmarchicus*, on Georges Bank: 1994-1999](#). *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 53: 2618–2631. doi:10.1016/j.dsr2.2006.08.010.
- Rutherford, K., Fennel, K., Garcia Suarez, L., and John, J. G. 2024. [Uncertainty in the evolution of northwest North Atlantic circulation leads to diverging biogeochemical projections](#). *Biogeosciences*, 21, 301–314.
- Sameoto, D. D. et Herman, A. W. 1992. Effect of the outflow from the Gulf of St. Lawrence on Nova Scotia shelf zooplankton. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49: 857-869.
- Schwalm, C.R., Glendon, S., and Duffy, P.B. 2020. [RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions](#). *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117: 19656–19657. doi:10.1073/PNAS.2007117117.
- Simard, Y., Roy, N., Giard, S., et Aulanier, F. 2019. North Atlantic right whale shift to the Gulf of St. Lawrence in 2015, revealed by long-term passive acoustics. *End. Species Res.* 40: 271-284.
- Sorochan, K.A., Plourde, S., Morse, R., Pepin, P., Runge, J., Thompson, C., and Johnson, C.L. 2019. [North Atlantic right whale \(*Eubalaena glacialis*\) and its food: \(II\) interannual variations in biomass of *Calanus* spp. on western North Atlantic shelves](#). *J. Plankton. Res.* 41: 687–708. doi:10.1093/plankt/fbz044.
- Sorochan, K.A., Plourde, S., Baumgartner, M.F., and Johnson, C.L. 2021. [Availability, supply, and aggregation of prey \(*Calanus* spp.\) in foraging areas of the North Atlantic right whale \(*Eubalaena glacialis*\)](#). *ICES J. Mar. Sci.* 78: 3498–3520. doi:10.1093/icesjms/fsab200.
- Villarino, E., Chust, G., Licandro, P., Butenschön, M., Ibaibarriaga, L., Larrañaga, A., and Irigoien, X. 2015. [Modelling the future biogeography of North Atlantic zooplankton communities in response to climate change](#). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 531: 121–142. Doi:10.3354/meps11299.
- Waldock, C., Stuart-Smith, R.D., Albouy, C., Cheung, W.W., Edgar, G.J., Mouillot, D., Tjiputra, J. and Pellissier, L. 2022. [A quantitative review of abundance-based species distribution models](#). *Ecography* 2022: e05694.
- Wood, S.N. 2003. Thin plate regression splines. *J. R. Statist. Soc. B.* 65:95-114.
- Wood, S.N. 2006. Low rank scale invariant tensor product smooths for generalized additive mixed models. *Biometrics* 62:1025-1036.
-

Wood, S.N. 2017. Generalized Additive Models: An Introduction with R (2nd edition). Chapman and Hall/CRC.

Zakardjian, B. A., Sheng, J., Runge, J. A., McLaren, I., Plourde, S., Thompson, K. R., et Gratton, Y. 2003. Effects of temperature and circulation on the population dynamics of *Calanus finmarchicus* in the Gulf of St. Lawrence and Scotian Shelf: Study with a coupled, three-dimensional hydrodynamic, stage-based life history model. J. Geophys. Res. (Oceans). 108 (C11).

6. REMERCIEMENTS

Nous remercions tous les scientifiques du MPO et de la NOAA, ainsi que l'équipage des navires de recherche qui ont contribué à la collecte d'échantillons de zooplancton dans le cadre du PMZA et du programme EcoMon. Nous remercions tout particulièrement les taxonomistes du MPO et les scientifiques du Centre de tri et d'identification du plancton de l'Institut national de recherche halieutique marine, en Pologne, qui ont traité les échantillons de plancton du PMZA et du programme EcoMon, respectivement. Nous remercions F. Cyr, D. Bélanger et B. Casault, qui ont fourni les données environnementales et les données sur les *Calanus* provenant du PMZA, ainsi que H.J. Walsh, qui a fourni les mêmes données recueillies dans le contexte du programme EcoMon. Les suggestions de K. Sorochan ont contribué à améliorer le texte. S. Plourde, C. Lehoux, C.L. Johnson et D. Lavoie ont reçu l'appui de la Direction des sciences du MPO.

7. TABLEAUX

Tableau 1. Liste des acronymes

Acronyme	Nom complet
MDE	modèle de répartition des espèces
BNAN	baleine noire de l'Atlantique Nord
RCP 8.5	profil représentatif d'évolution de concentration de 8.5
PMZA	Programme de monitoring de la zone Atlantique
MPO	Ministère des Pêches et des Océans
PNE	plateau néo-écossais
GSL	golfe du Saint-Laurent
sTN	sud de Terre-Neuve
EcoMon	programme de surveillance des écosystèmes
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
GM	golfe du Maine
SNE	plateau du sud de la Nouvelle-Angleterre
CIV	copépodite de stade IV
CV	copépodite de stade V
CVI	copépodite de stade VI
T_0-50	température dans la couche de 0 à 50 m
Tmin	température minimale dans la colonne d'eau
climS_0-50rc	climatologie spatiale de la salinité dans la couche de 0 à 50 m
É.-U.	États-Unis d'Amérique
GAMM	modèle mixte additif généralisé
BCC	baie de Cape-Cod
BG	banc Georges
sGSL	sud du golfe du Saint-Laurent
PSI	poids sec individuel
Fundy-GM	baie de Fundy et golfe du Maine
oGSL	ouest du golfe du Saint-Laurent
eGSL	est du golfe du Saint-Laurent
ePNE	est du plateau néo-écossais
oPNE	ouest du plateau néo-écossais
sTN	plateau sud de Terre-Neuve
LAB	plateau du Labrador

Tableau 2. Résultats pour les GAMM de Bernoulli et Gamma par simulation de modèle océanique. Les GAMM de Bernoulli ont été validés pour les 100 itérations réajustées avec 70 % des stations; 30 % ont servi à calculer la TSS (moyenne \pm écart type). Nous avons aussi recalculé la TSS en resubstituant la totalité des données utilisées pour l'ajustement du modèle. Le critère d'information d'Akaike (AIC) utilisé pour la comparaison des modèles et le maximum de vraisemblance restreint (REML) sont présentés pour les distributions des deux modèles. Les GAMM Gamma ont été validés en utilisant l'écart hors-échantillon sur 30 % des données (70 % pour l'ajustement du modèle) et la déviance expliquée en utilisant la resubstitution. Les prédictions combinées des deux modèles ($\pi \times \mu$) ont été validées à l'aide du coefficient de corrélation de Spearman. $n = 10\ 431$.

Espèce	Modèle	Bernoulli				Gamma				Combinés Coefficient de corrélation de Spearman
		TSS (30 %)	TSS (100 %)	AIC	REML	Écart hors- échantillon (30 %)	Déviance expliquée (100 %)	AIC	REML	
<i>C. finmarchicus</i>	CanESM2_rcp8.5	0,52 \pm 0,06	0,63	1 188	598	4 402	48,0	207 409	103 844	0,73
	HadGEM2-ES_rcp8.5	0,52 \pm 0,05	0,64	1 179	597	4 438	47,5	207 516	103 886	0,73
	MPI-ESM-LR_rcp8.5	0,53 \pm 0,04	0,64	1 180	597	4 425	47,6	207 502	103 905	0,73
<i>C. glacialis</i>	CanESM2_rcp8/5	0,84 \pm 0,00	0,85	3 369	1 753	603	47,2	36 404	18 299	0,67
	HadGEM2-ES_rcp8.5	0,85 \pm 0	0,85	3 394	1 766	610	46,1	36 449	18 313	0,68
	MPI-ESM-LR_rcp8.5	0,85 \pm 0	0,85	3 385	1 763	615	46,9	36 420	18 317	0,67
<i>C. hyperboreus</i>	CanESM2_rcp8/5	0,68 \pm 0,01	0,7	7 059	3 595	1 784	59,9	76 300	38 249	0,77
	HadGEM2-ES_rcp8.5	0,68 \pm 0,01	0,69	7 074	3 603	1 831	60,2	76 255	38 234	0,77
	MPI-ESM-LR_rcp8.5	0,68 \pm 0,01	0,69	7 081	3 606	1 871	59,5	76 335	38 258	0,77

Tableau 3. Pourcentage de variation de l'abondance des espèces de *Calanus* ($N m^{-2}$), du poids sec individuel (PSI) et de la biomasse ($g m^{-2}$) entre 2080-2089 et 2000-2009. Valeurs indiquées en gras = augmentation, valeurs négatives = diminution.

Région	<i>C. finmarchicus</i>			<i>C. glacialis</i>			<i>C. hyperboreus</i>			<i>Calanus</i> spp.
	Abondance	PSI	Biomasse	Abondance	PSI	Biomasse	Abondance	PSI	Biomasse	Biomasse
oGSL	29	-22	11	-17	-19	-33	-18	-24	-38	-25
eGSL	35	-25	9	-22	-23	-45	-21	-25	-42	-26
sGSL	28	-25	1	-32	-21	-49	-22	-27	-40	-11
sTN	38	-33	-12	-36	-28	-55	-28	-19	-44	-25
ePNE	32	-33	-31	-38	-27	-62	-27	-23	-47	-35
oPNE	-2	-29	-61	-42	-25	-64	-26	-25	-48	-60
Fundy-GM	-24	-32	-64	-61	-29	-75	-30	-34	-54	-64
BG	-31	-21	-50	-55	-24	-54	-25	-27	-15	-49

8. FIGURES

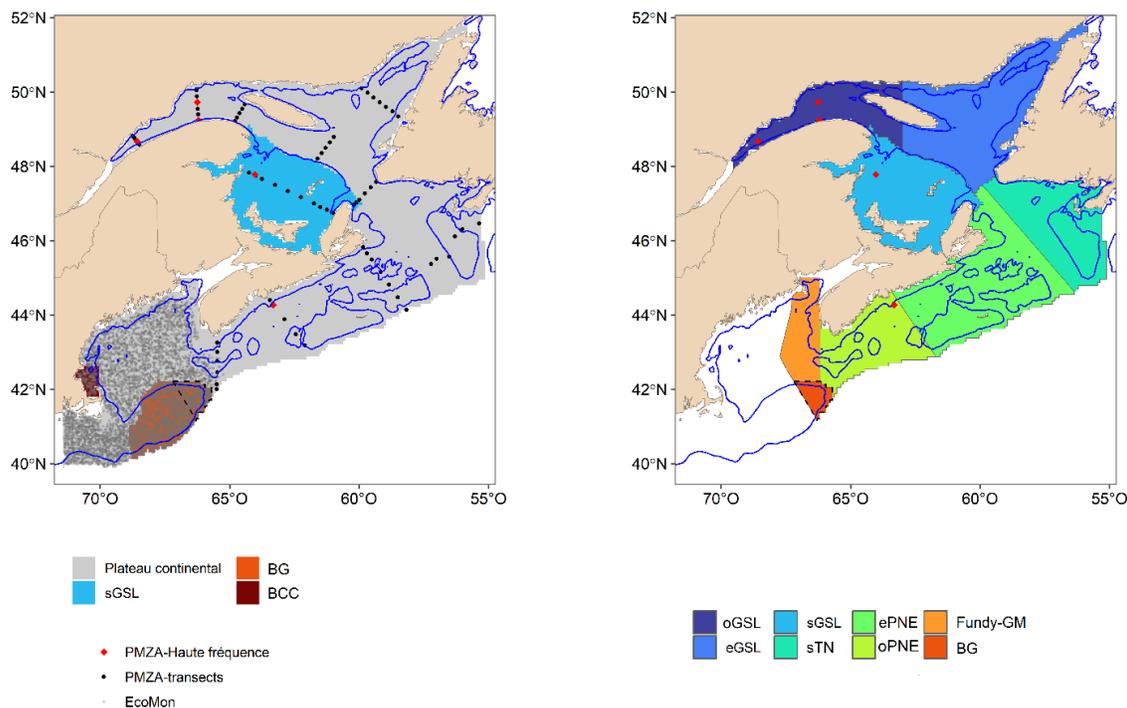


Figure 1. Zone d'échantillonnage du Programme de monitoring de la zone Atlantique (PMZA) utilisée dans cette étude. Les transects sont indiqués par les points noirs et les stations fixes à haute fréquence, par les carrés rouges. Les lignes bleues représentent l'isobathe de 100 m. Dans le panneau de gauche, les couleurs indiquent les régions utilisées dans les GAMM. Dans le panneau de droite, les couleurs indiquent les régions utilisées pour présenter les résultats. oGSL: ouest du golfe du Saint-Laurent, eGSL: est du golfe du Saint-Laurent, sGSL: sud du golfe du Saint-Laurent, sTN: sud de Terre-Neuve et Labrador, ePNE: est du plateau néo-écossais, oPNE: ouest du plateau néo-écossais, Fundy-GM: Baie de Fundy-Golfe du Maine, BCC: Baie de Cape Cod, BG: Banc Georges. Les autres emplacements géographiques mentionnés dans le document sont indiqués sur la figure A.1.2.

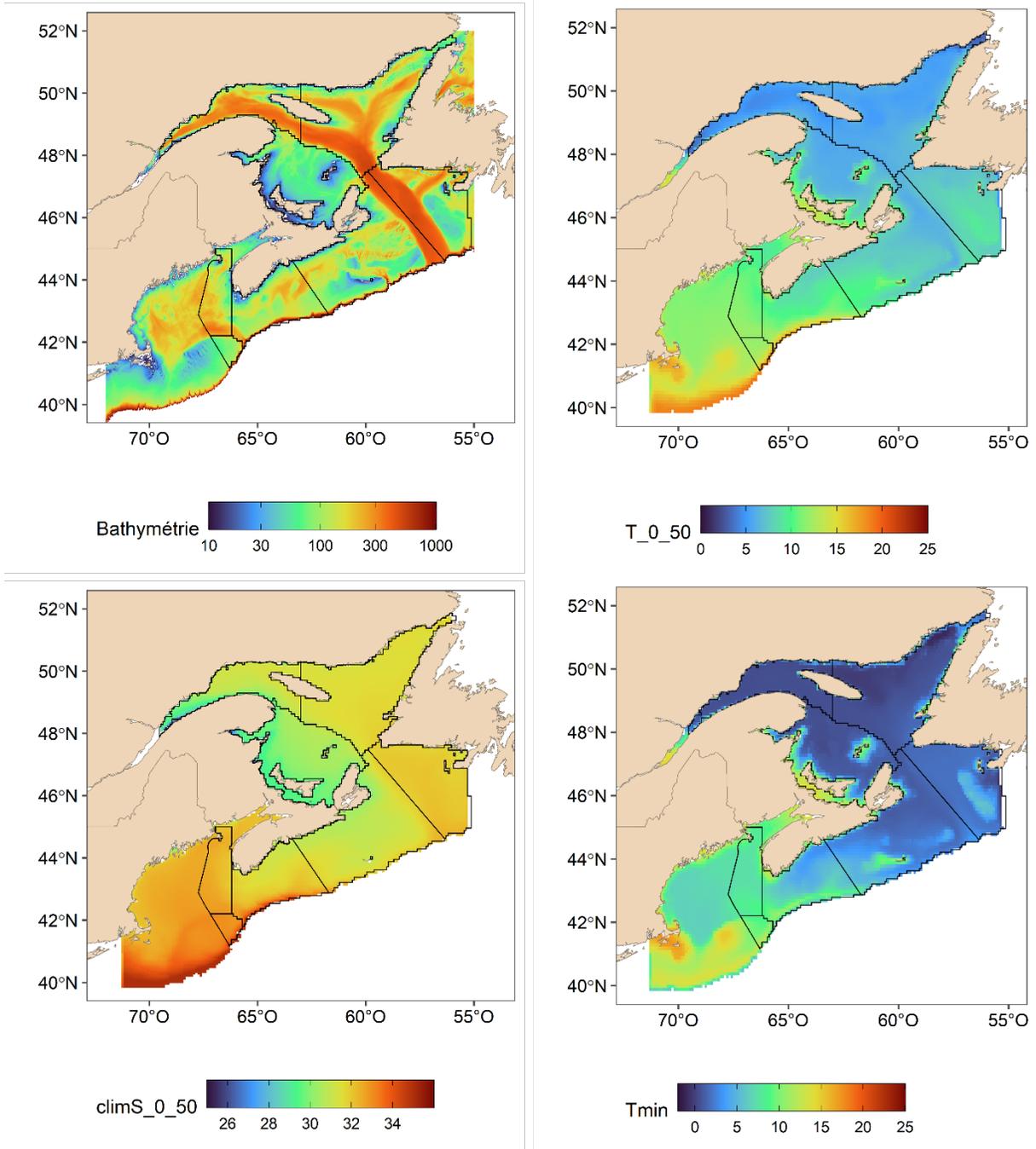


Figure 2. Cartes des covariables avec une dimension spatiale utilisée dans les GAMM. La moyenne des covariables a été moyennée pour trois simulations climatiques régionales entre 1999 et 2020 pour la période d'avril à octobre (T_0-50 et Tmin) et de janvier à décembre pour ClimS_0-50. Les lignes noires représentent les limites des régions utilisées pour présenter les résultats.

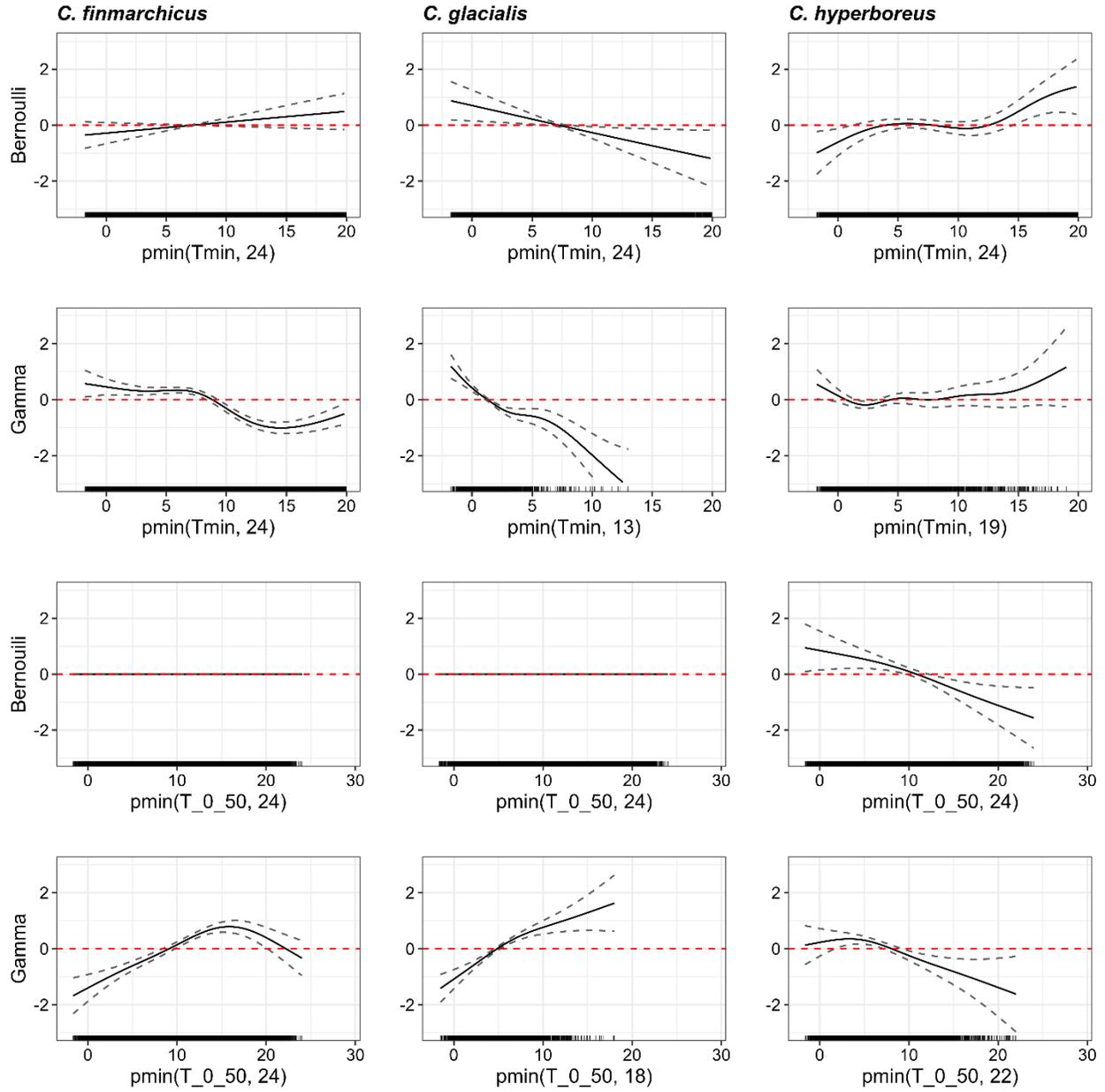


Figure 3. Effets partiels des GAMM de Bernoulli et Gamma pour T_{0_50} et T_{min} pour *Calanus finmarchicus*, *C. glacialis* et *C. hyperboreus* réalisés à l'aide de la simulation *CanESM2_rcp8.5*. p_{min} (covariable, x) indique la winsorisation des prédictions à la valeur x de la covariable.

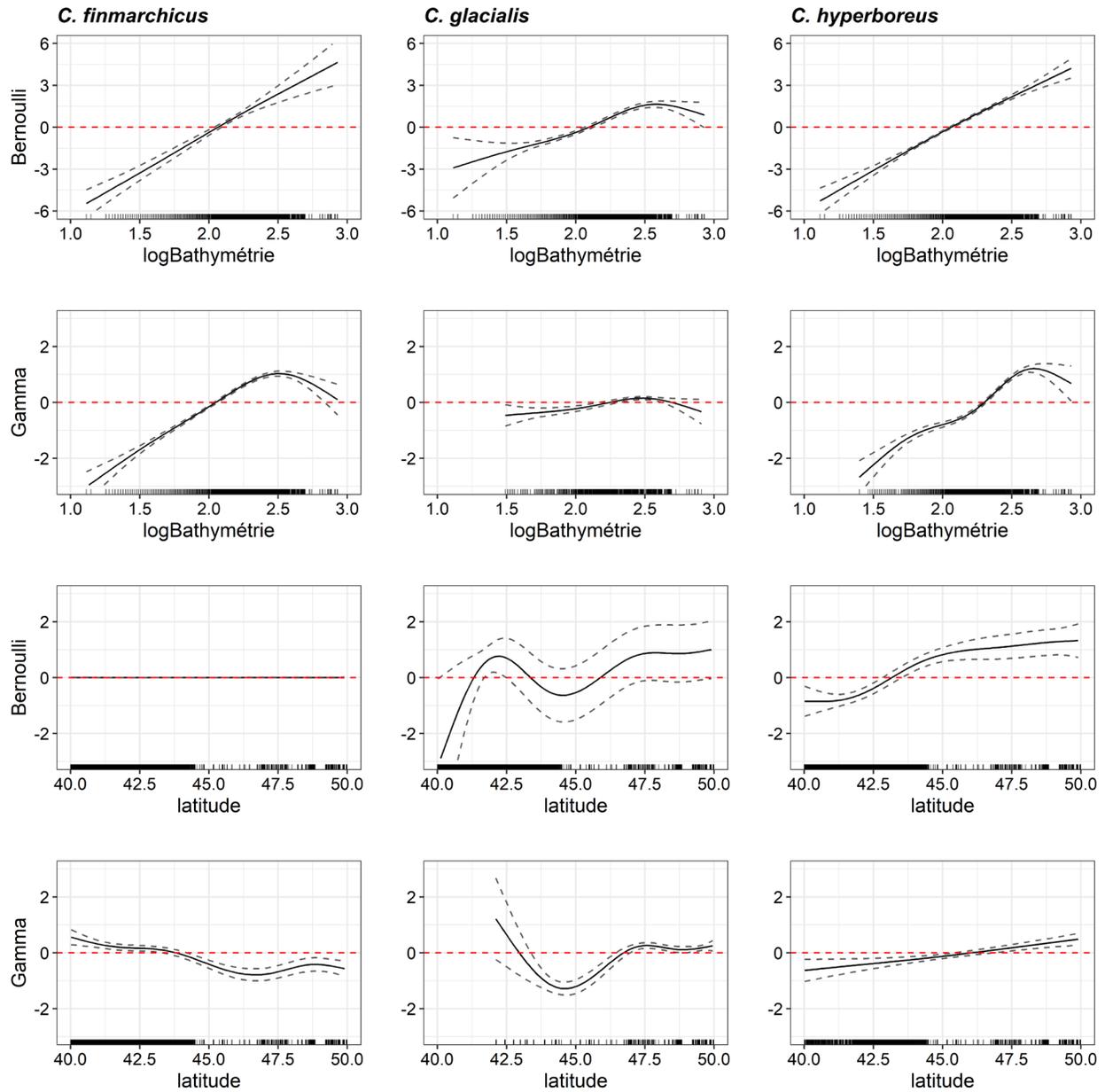


Figure 4. Effets partiels des GAMM de Bernoulli et Gamma pour la bathymétrie et la latitude pour *C. finmarchicus*, *C. glacialis* et *C. hyperboreus* réalisés à l'aide de la simulation CanESM2_rcp8.5.

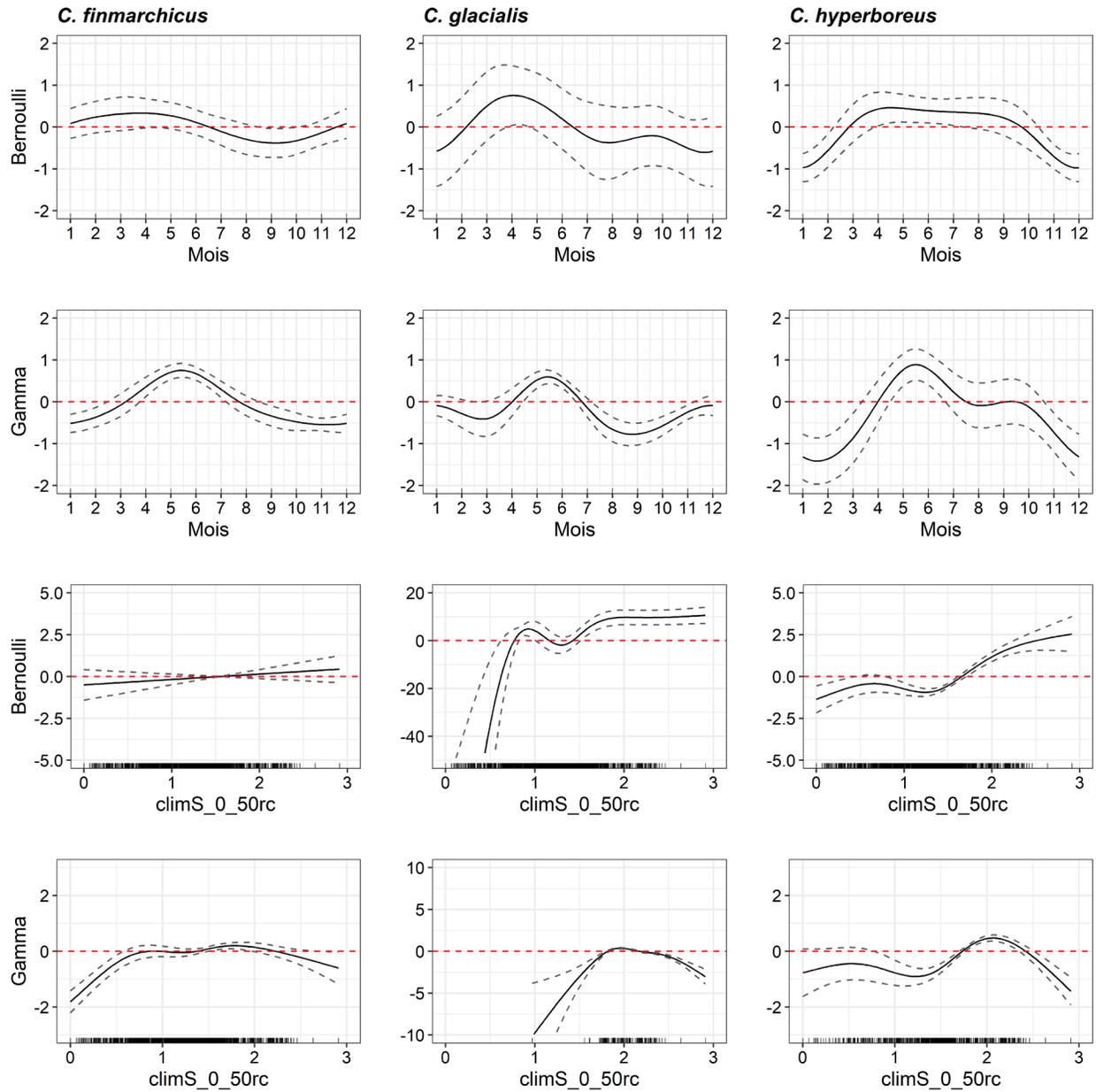


Figure 5. Effets partiels des GAMM de Bernoulli et Gamma pour le mois et *climS_0_50rc* pour *C. finmarchicus*, *C. glacialis* et *C. hyperboreus* réalisés à l'aide de la simulation *CanESM2_rcp8.5*.

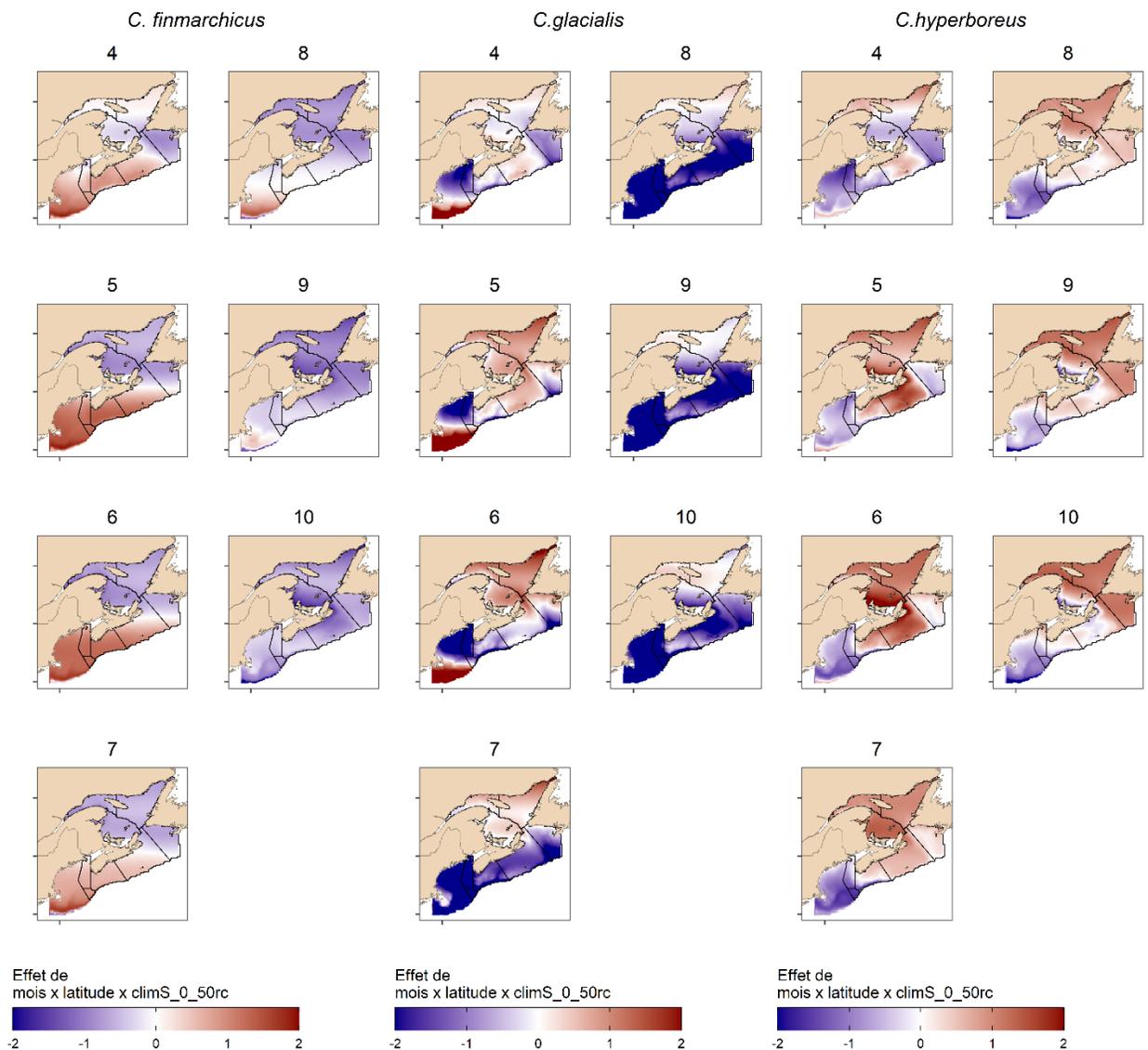


Figure 6. GAMM : Effet du terme de « connectivité » d'avril (4) à octobre (10) avec la simulation du modèle régional CanESM2_rcp8.5 pour *Calanus finmarchicus*, *C. glacialis* et *C. hyperboreus*. Les couleurs représentent la somme de l'effet mensuel du terme de connectivité ($Latitude * MOIS * ClimS_{0-50rc}$), y compris les interactions de niveau inférieur et les effets principaux. Les lignes noires représentent les limites des régions utilisées pour présenter les résultats.

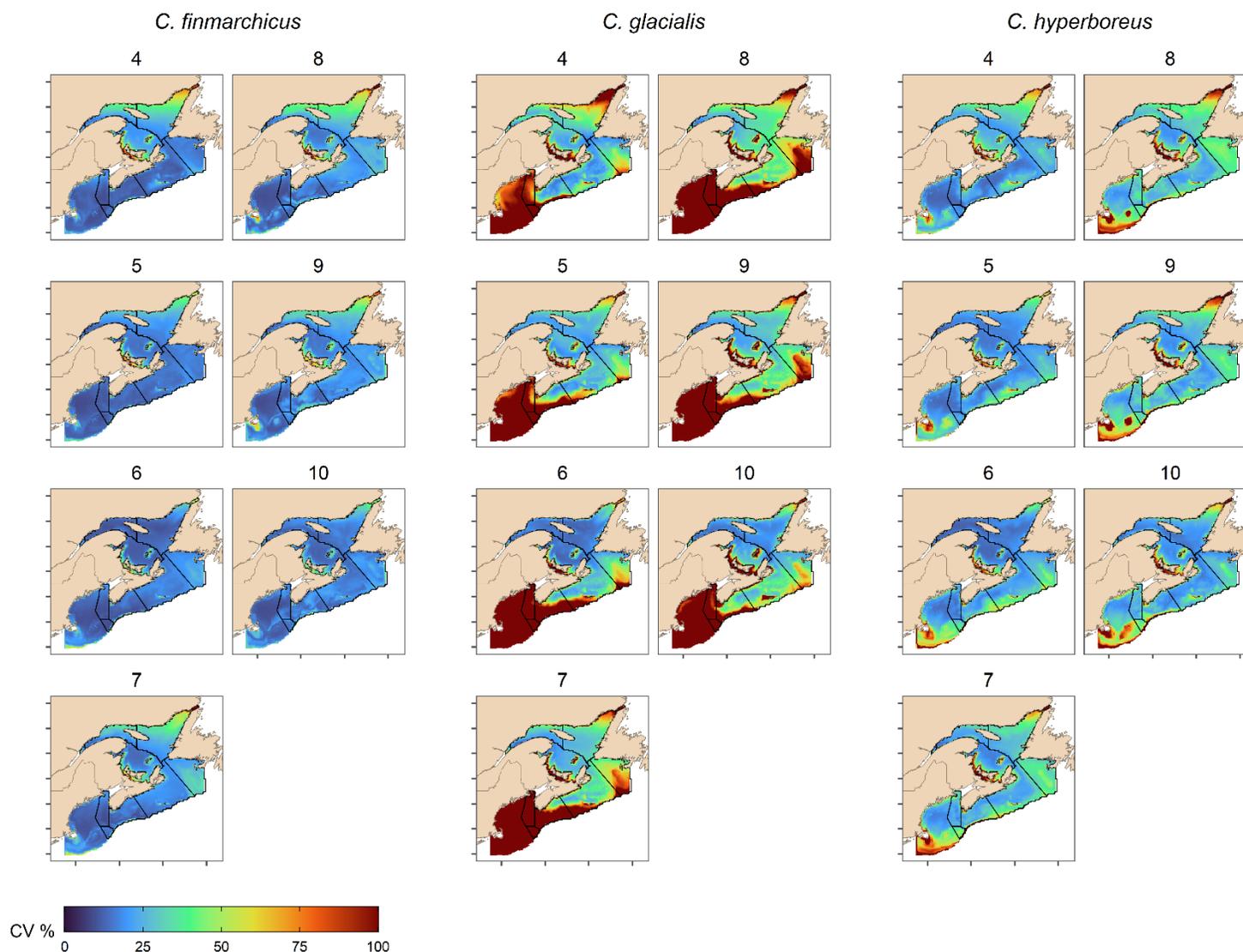


Figure 7. Coefficient de variation (CV, en %) des prédictions de l'abondance pour *Calanus finmarchicus*, *C. glacialis* et *C. hyperboreus* entre avril et octobre de 2000 à 2009. Les CV représentent l'incertitude associée aux trois simulations climatiques régionales et aux paramètres du GAMM. Les lignes noires représentent les limites des régions utilisées pour présenter les résultats.

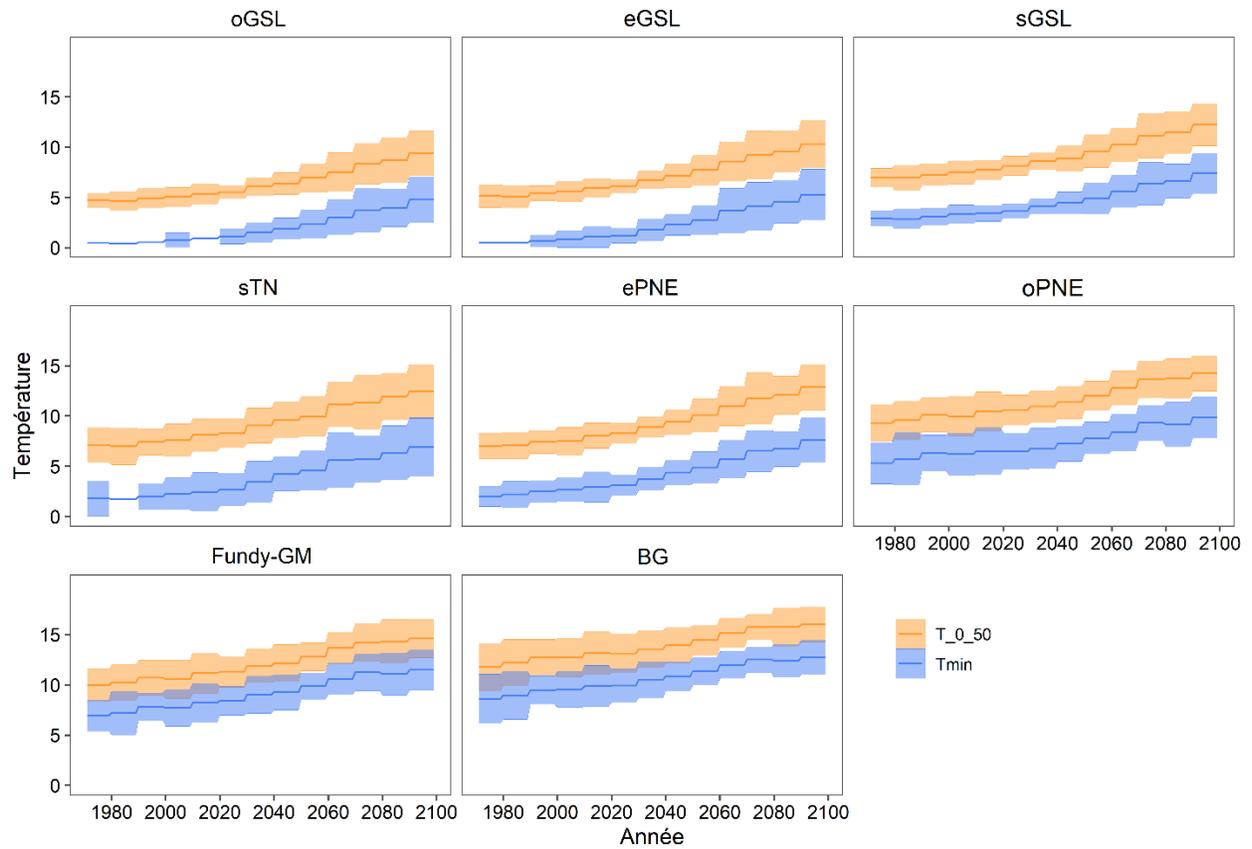


Figure 8. Tendances interdécennales de T_{0-50} et de T_{min} (d'avril à octobre). La ligne pleine est la moyenne pour la période d'avril à octobre et pour les trois modèles climatiques régionaux. La zone ombrée représente l'incertitude ($\pm 1,96 * ET$) associée aux trois simulations climatiques régionales.

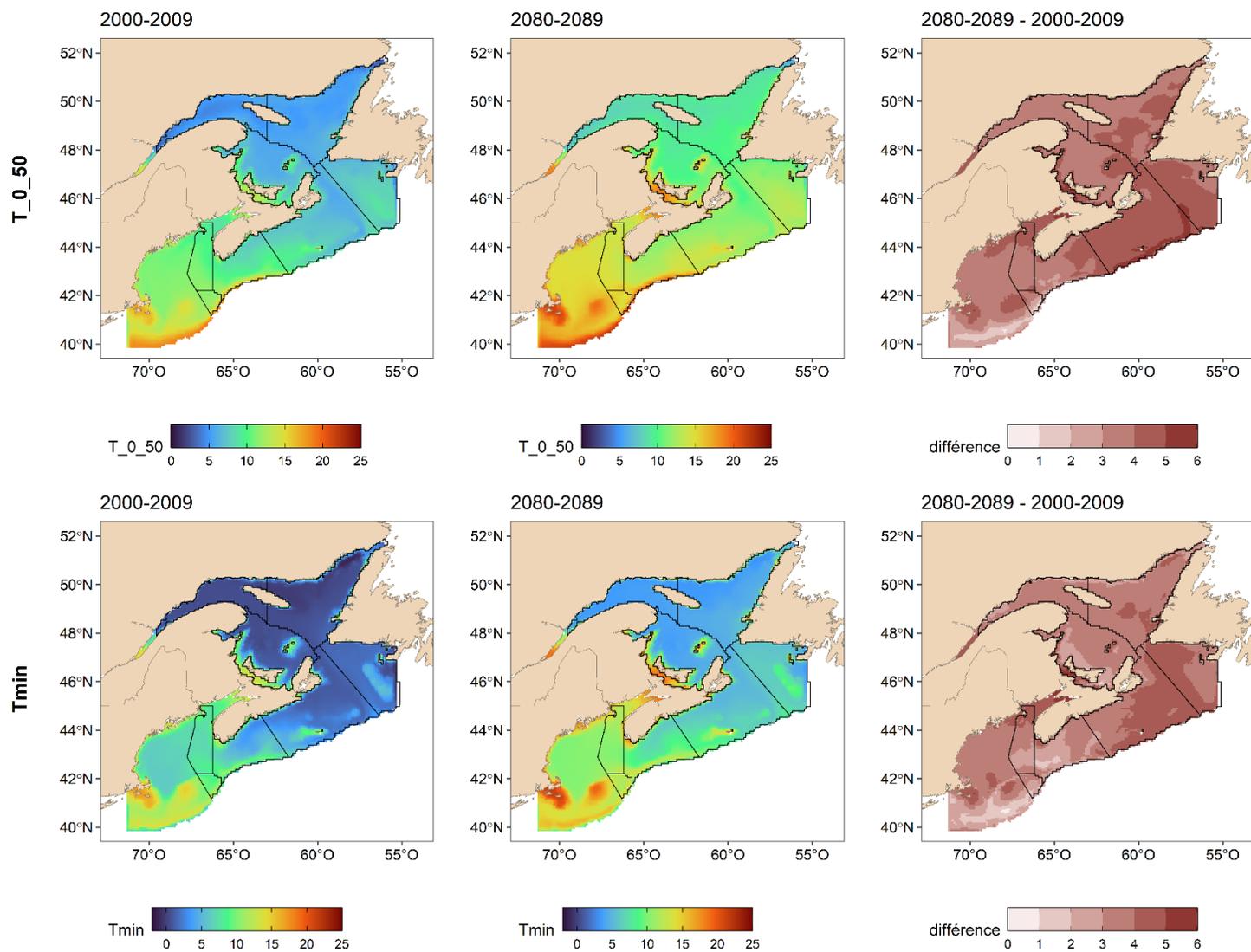


Figure 9. Climatologies de T_{0-50} et de T_{min} . Les climatologies (moyenne des trois simulations climatiques régionales) ont été calculées pour la période d'avril à octobre de 2000 à 2009 et de 2080 à 2089. Les lignes noires représentent les limites des régions utilisées pour présenter les résultats.

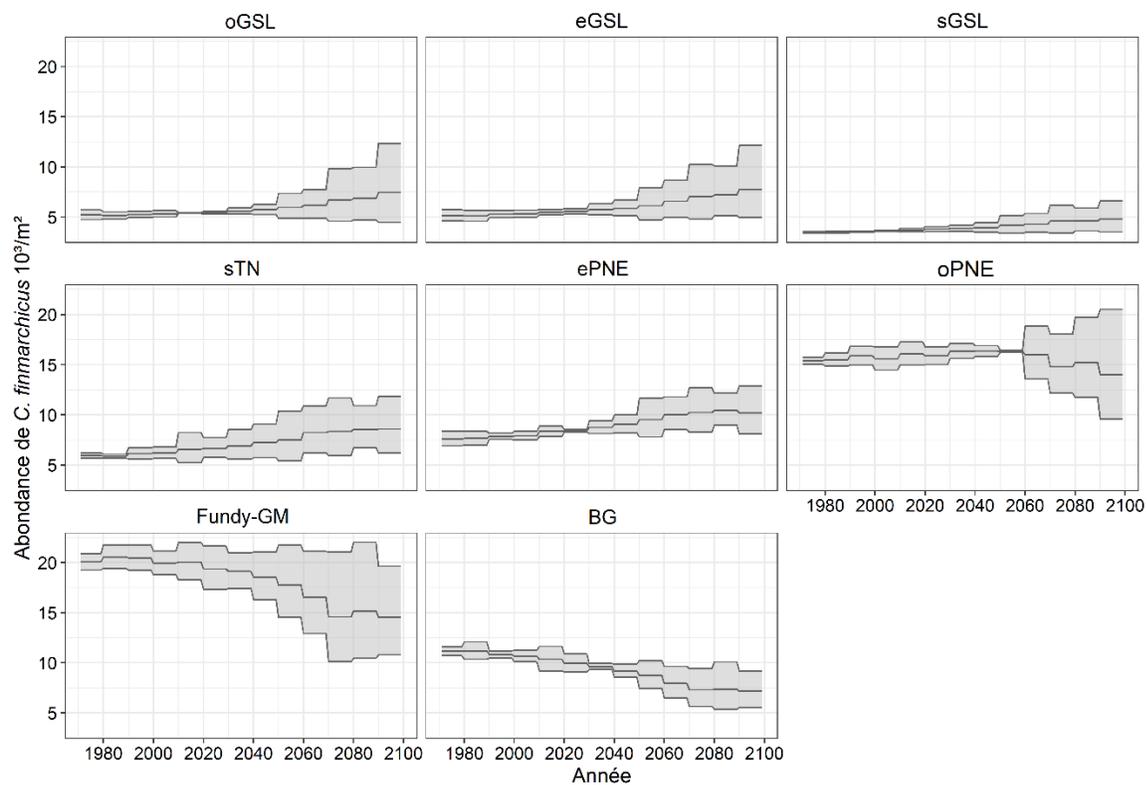


Figure 10. Tendances de l'abondance prédite de *C. finmarchicus* aux stades avancés (10^3 ind. m^{-2}) par décennie. La ligne noire représente la moyenne des trois scénarios de simulation climatique régionale pour les périodes d'avril à octobre pour chaque région. Les zones grises représentent l'incertitude entourant les tendances estimées ($\pm 1,96 * ET$).

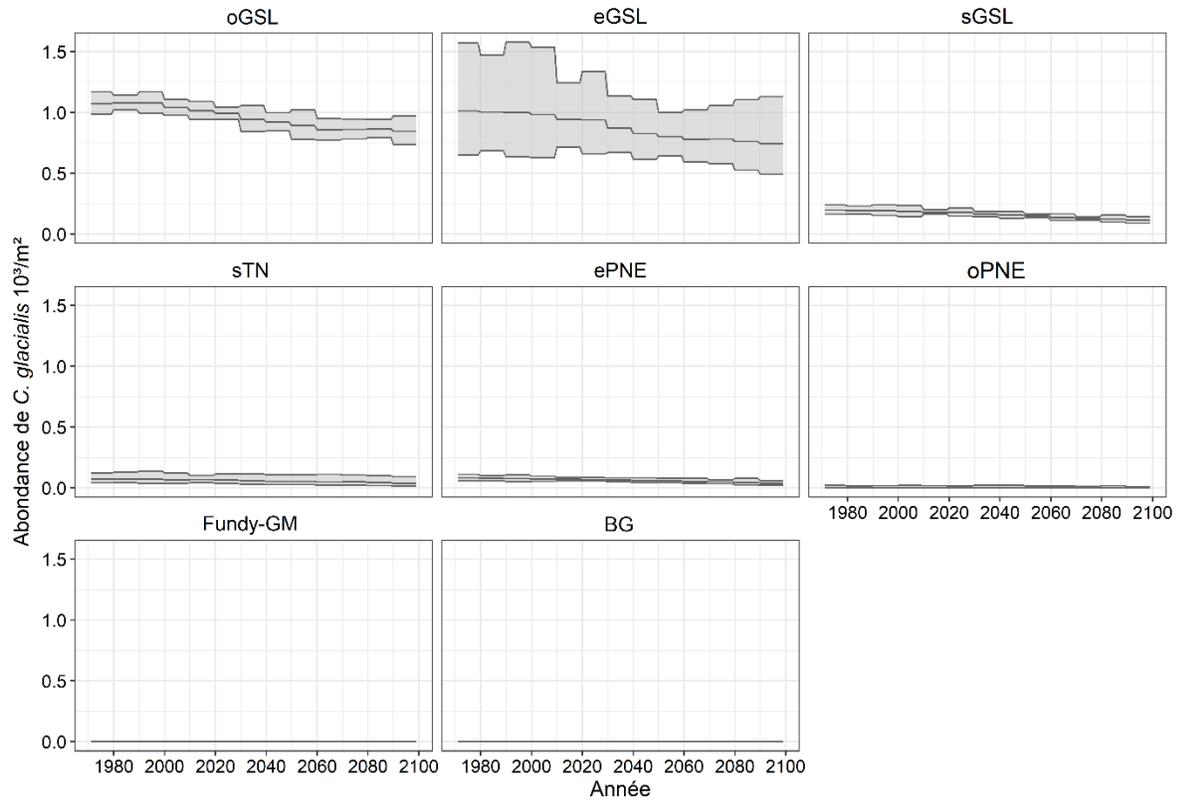


Figure 11. Tendances de l'abondance prédite de *C. glacialis* aux stades avancés (10^3 ind. m^{-2} par décennie) pour chaque région. La ligne noire représente la moyenne des trois simulations climatiques régionales pour la période d'avril à octobre. Les zones grises représentent l'incertitude entourant les tendances estimées ($\pm 1,96 * ET$).

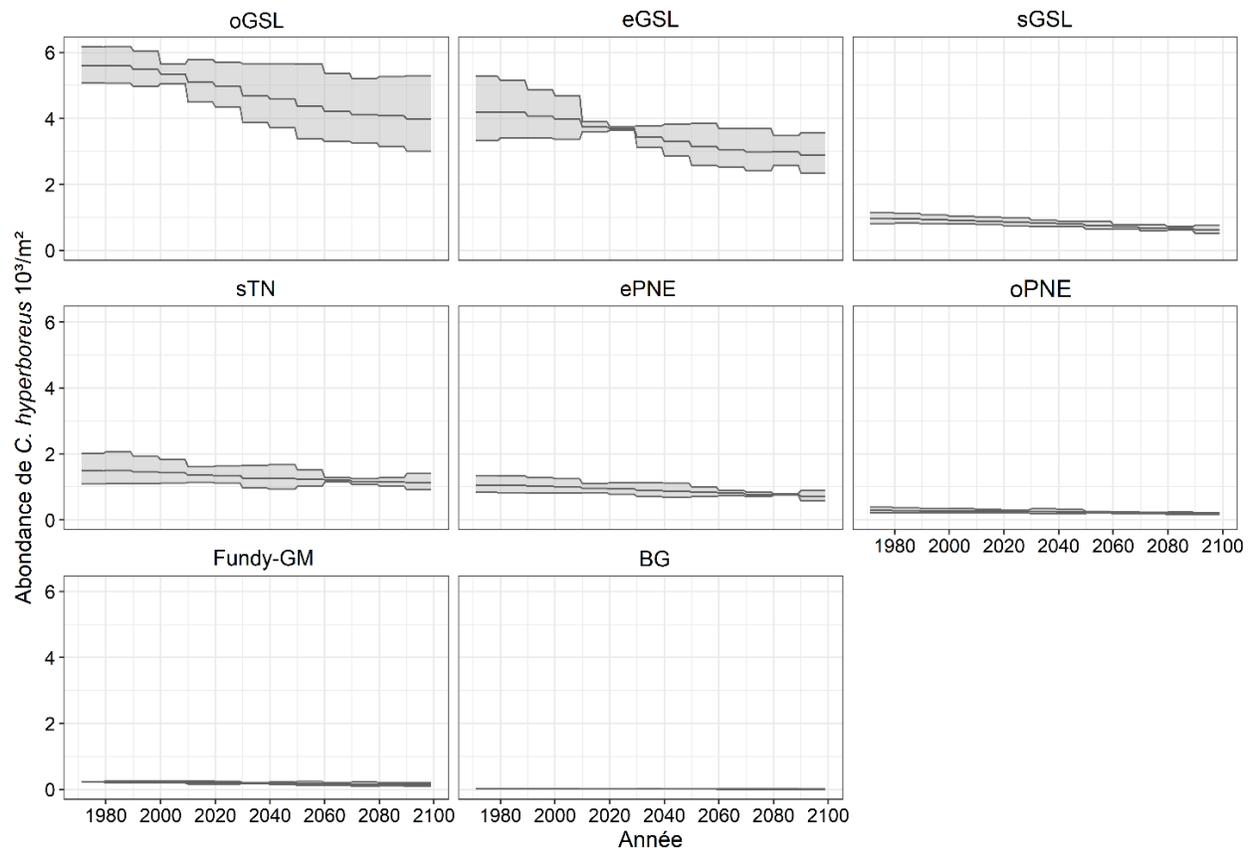


Figure 12. Tendances de l'abondance prédite de *C. hyperboreus* aux stades avancés (10^3 ind. m^{-2}) par décennie pour chaque région. La ligne noire est la moyenne des trois simulations climatiques régionales pour les périodes d'avril à octobre. Les zones grises représentent l'incertitude entourant les tendances estimées ($\pm 1,96 * ET$).

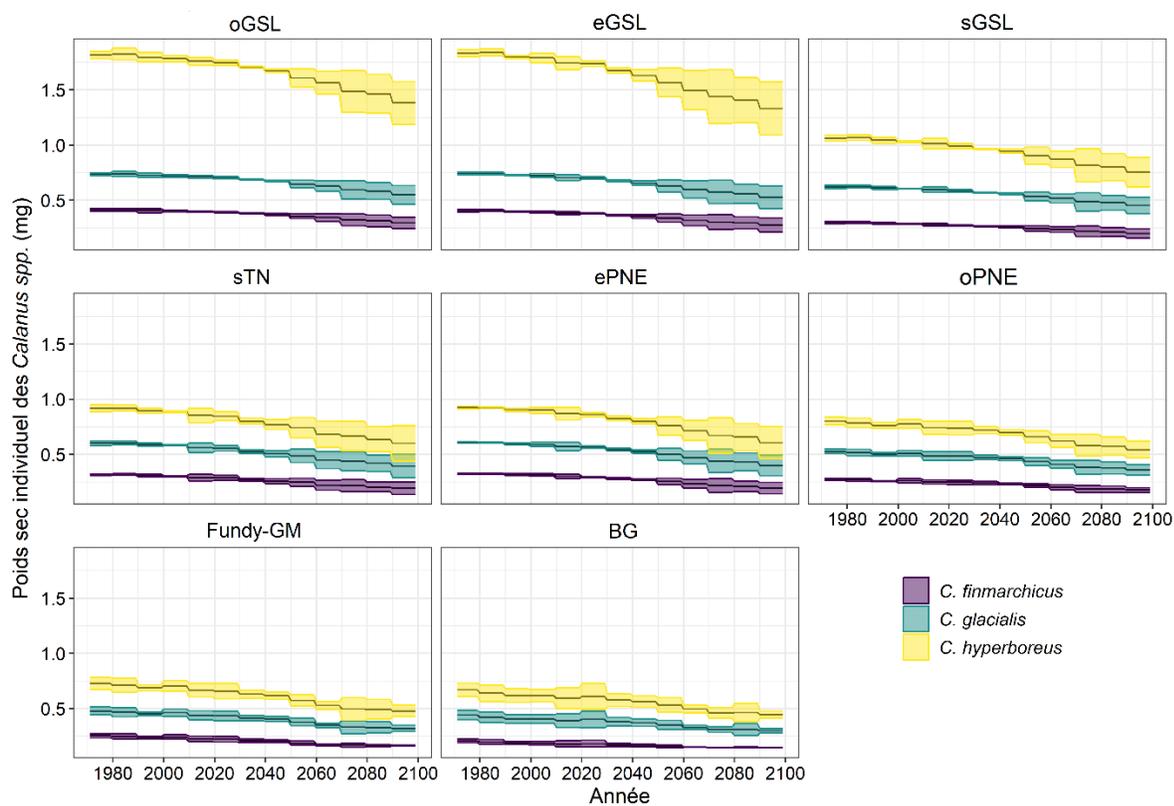


Figure 13. Poids sec individuel (PSI) des Calanus (CIV à CVI) prédit à partir de la température ($T_{0-50\text{ m}}$) par décennie et de la composition mensuelle des stades, moyenné d'avril à octobre par région. La ligne noire représente la tendance moyenne pour trois simulations climatiques régionales; les zones ombrées correspondent à l'incertitude associée à ces tendances ($\pm 1,96 * ET$).

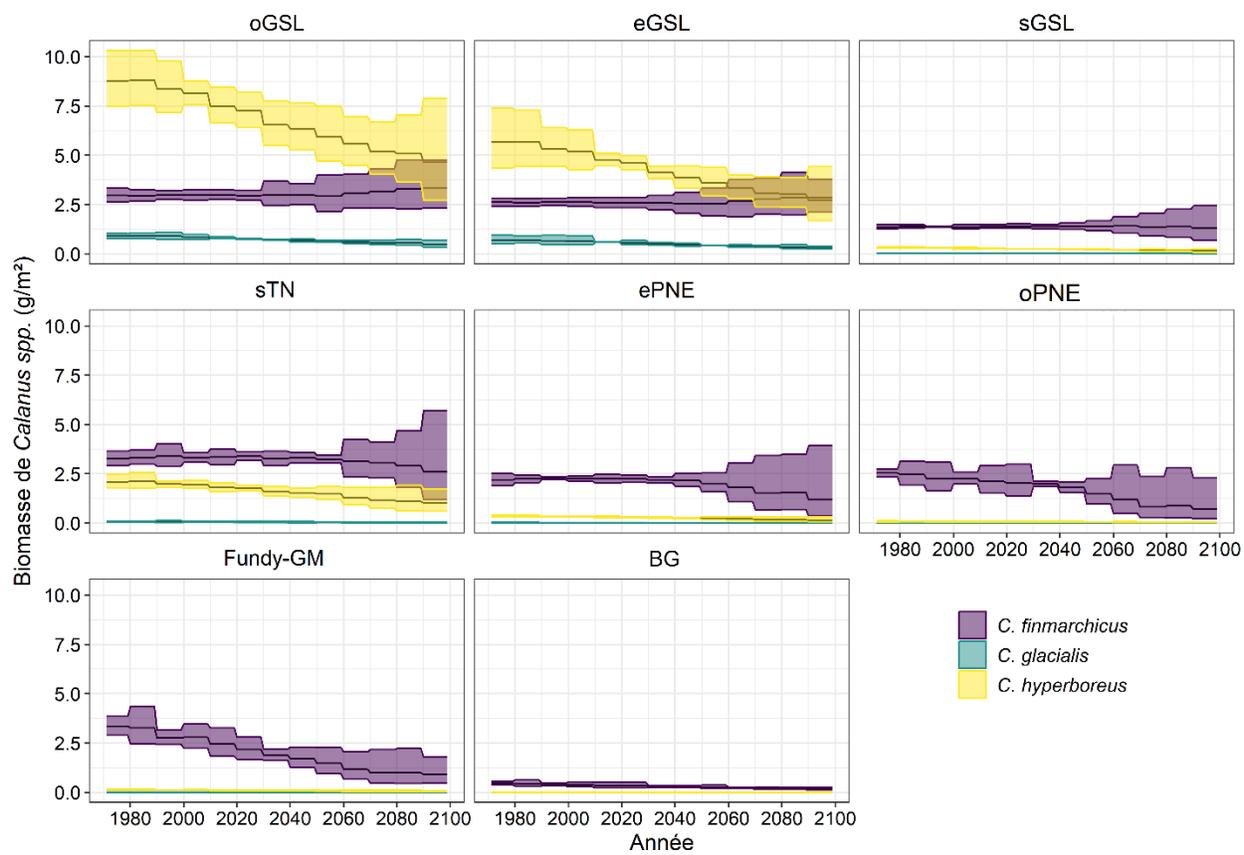


Figure 14. Tendence de la biomasse prédite des espèces de Calanus aux stades avancés (g m^{-2}). La ligne pleine est la moyenne des trois simulations climatiques régionales pour la période d'avril à octobre et pour chaque région. Les zones ombrées représentent l'incertitude entourant les tendances estimées ($\pm 1,96 * ET$).

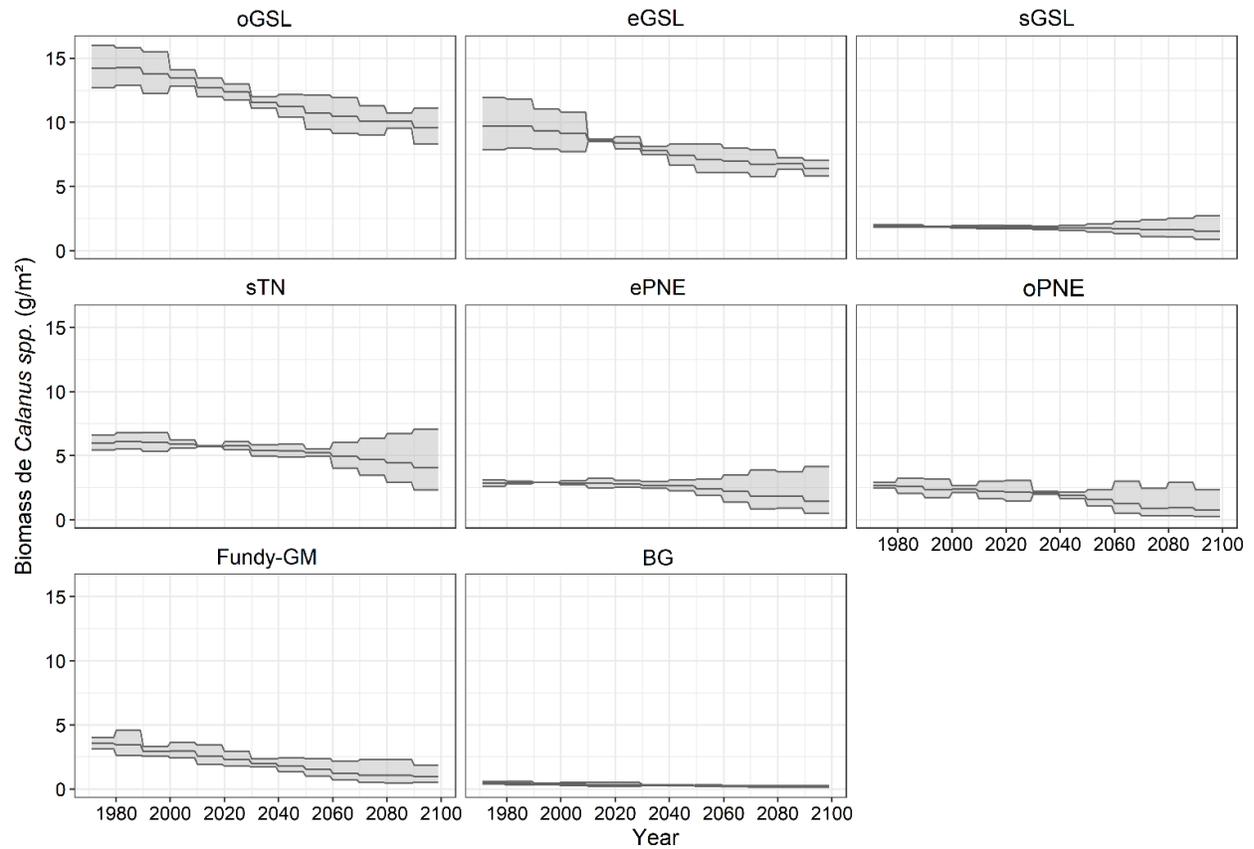


Figure 15. Tendence de la biomasse prédite des espèces de *Calanus* aux stades avancés (g m⁻²). La ligne pleine est la moyenne des trois simulations climatiques régionales pour la période d'avril à octobre et pour chaque région. Les zones ombrées représentent l'incertitude entourant les tendances estimées ($\pm 1,96 * ET$).

oGSL	+6	+6	+2		-6	-8	-14	-16	-20	-22	-25	-25	-29
eGSL	+6	+7	+2		-6	-8	-14	-18	-22	-24	-26	-26	-30
sGSL	+3	+5	+2		0	-1	-4	-4	-6	-6	-11	-11	-18
sTN	+2	+4	+2		-3	-2	-8	-9	-11	-16	-20	-25	-31
ePNE	-1	+1	+1		-1	-3	-6	-8	-15	-23	-36	-35	-50
oPNE	+13	+9	-1		-7	-10	-12	-21	-34	-47	-63	-60	-68
Fundy-GM	+20	+17	-1		-13	-23	-32	-39	-47	-58	-64	-64	-66
BG	+20	+14	-1		-10	-13	-22	-27	-32	-43	-47	-49	-50
	1971_1979	1980_1989	1990_1999	2000_2009	2010_2019	2020_2029	2030_2039	2040_2049	2050_2059	2060_2069	2070_2079	2080_2089	2090_2099
	Décennies												

Figure 16. Changements interdécennaux (%) de la biomasse prédite de l'ensemble des espèces de Calanus d'avril à octobre, avant et après la période de référence de 2000 à 2009. Rouge = différence positive, bleu = différence négative. Carrés et nombres en gras = différence significative (c.-à-d. supérieure à $1,96 * ET$ dans toutes les simulations). % de changement = $(\text{décennie} - 2000-2009)/2000-2009$.

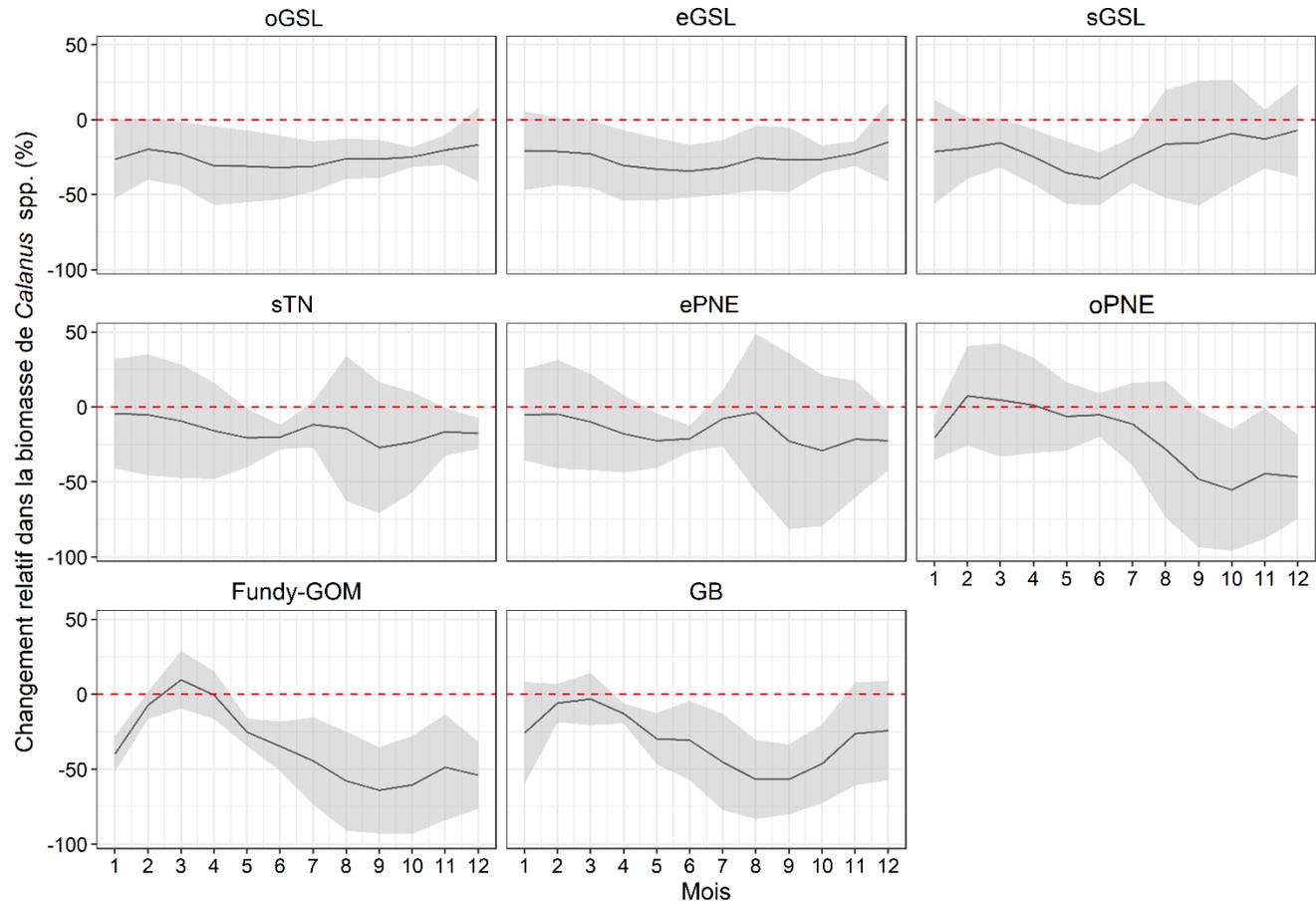


Figure 17. Différence relative moyenne (ligne noire) mensuelle dans la biomasse totale prédite des Calanus entre 2080-2089 et 2000-2009 dans les différentes régions. Les zones ombrées représentent l'incertitude entre les trois simulations climatiques régionales ($\pm 1,96 * ET$).

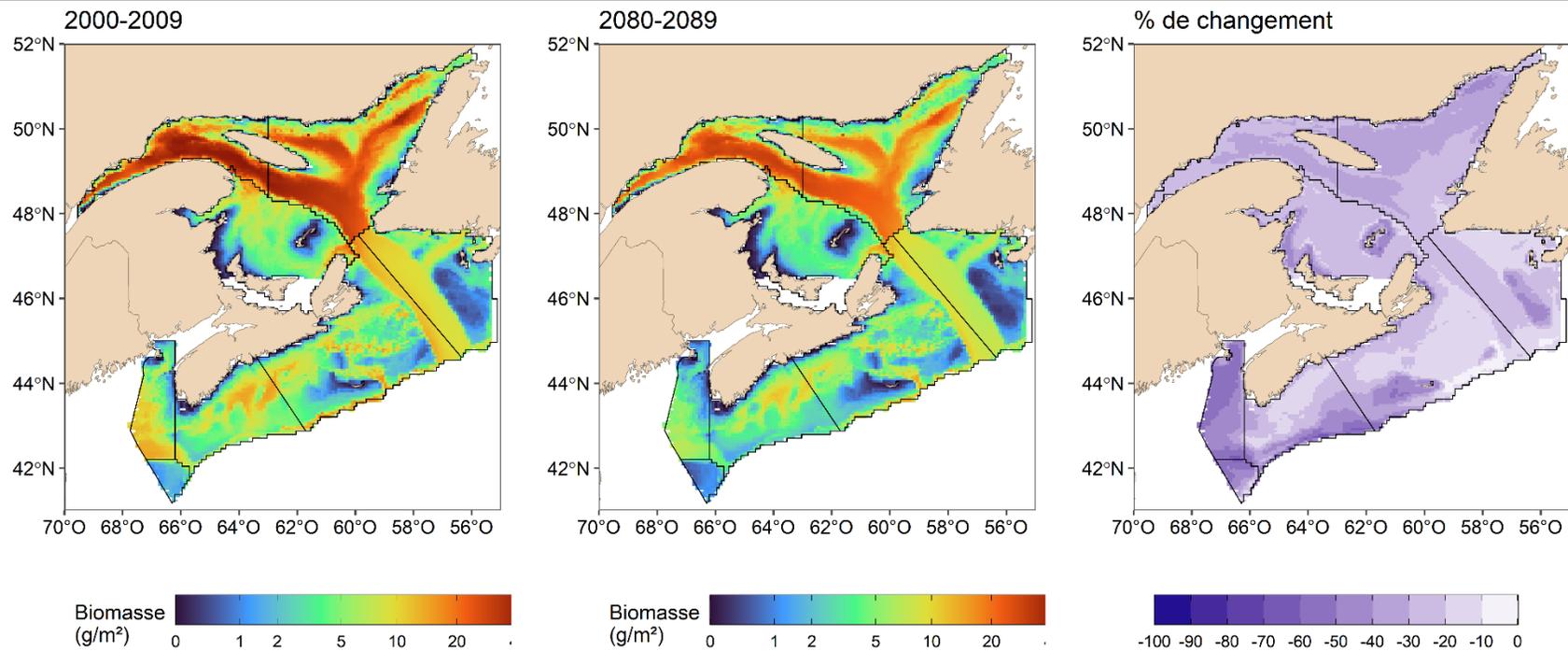


Figure 18. Changement de la biomasse totale prédite des *Calanus* entre 2080-2089 et 2000-2009 (d'avril à octobre). Lignes noires : limites des régions utilisées pour présenter les résultats.

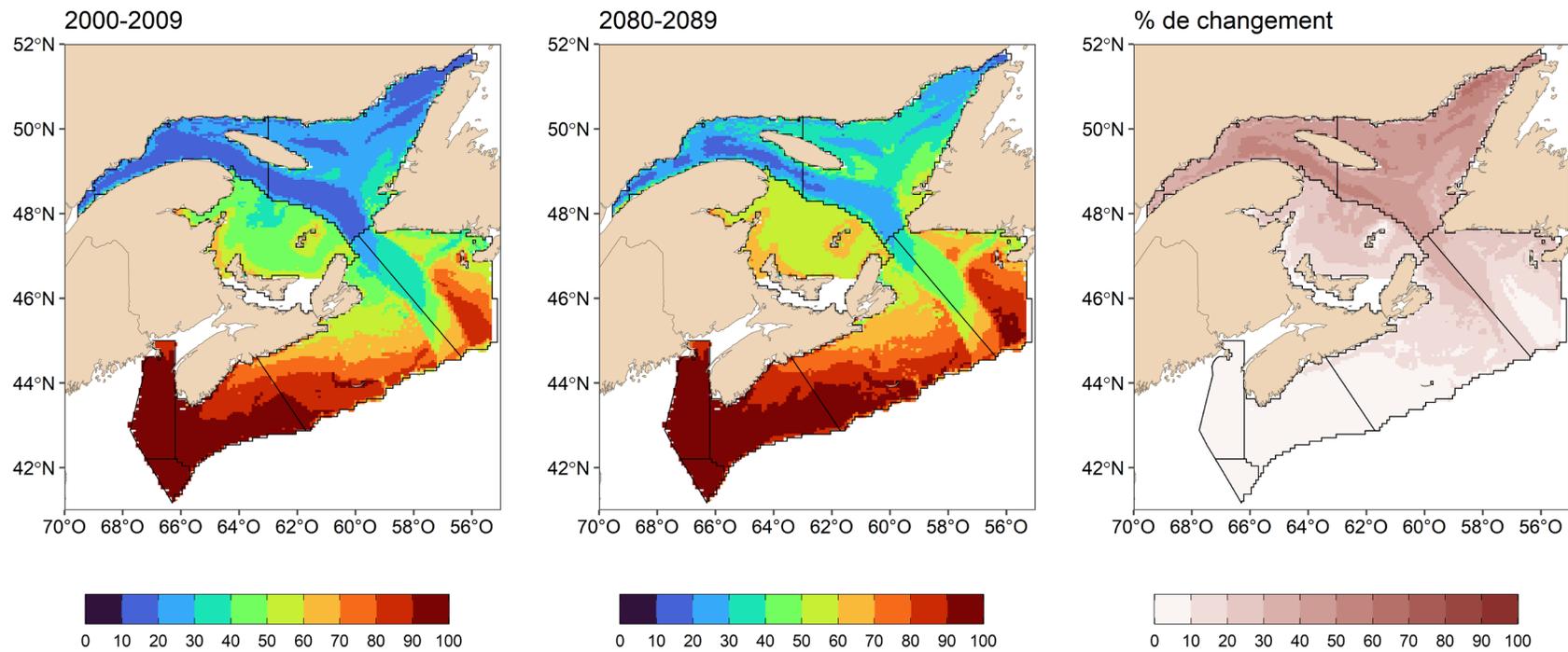


Figure 19. Contribution (%) de *C. finmarchicus* à la biomasse totale prédite des *Calanus* et changement en pourcentage en 2080-2089 par rapport à 2000-2009 (d'avril à octobre). Les lignes noires représentent les limites des régions utilisées pour présenter les résultats.

ANNEXE 1

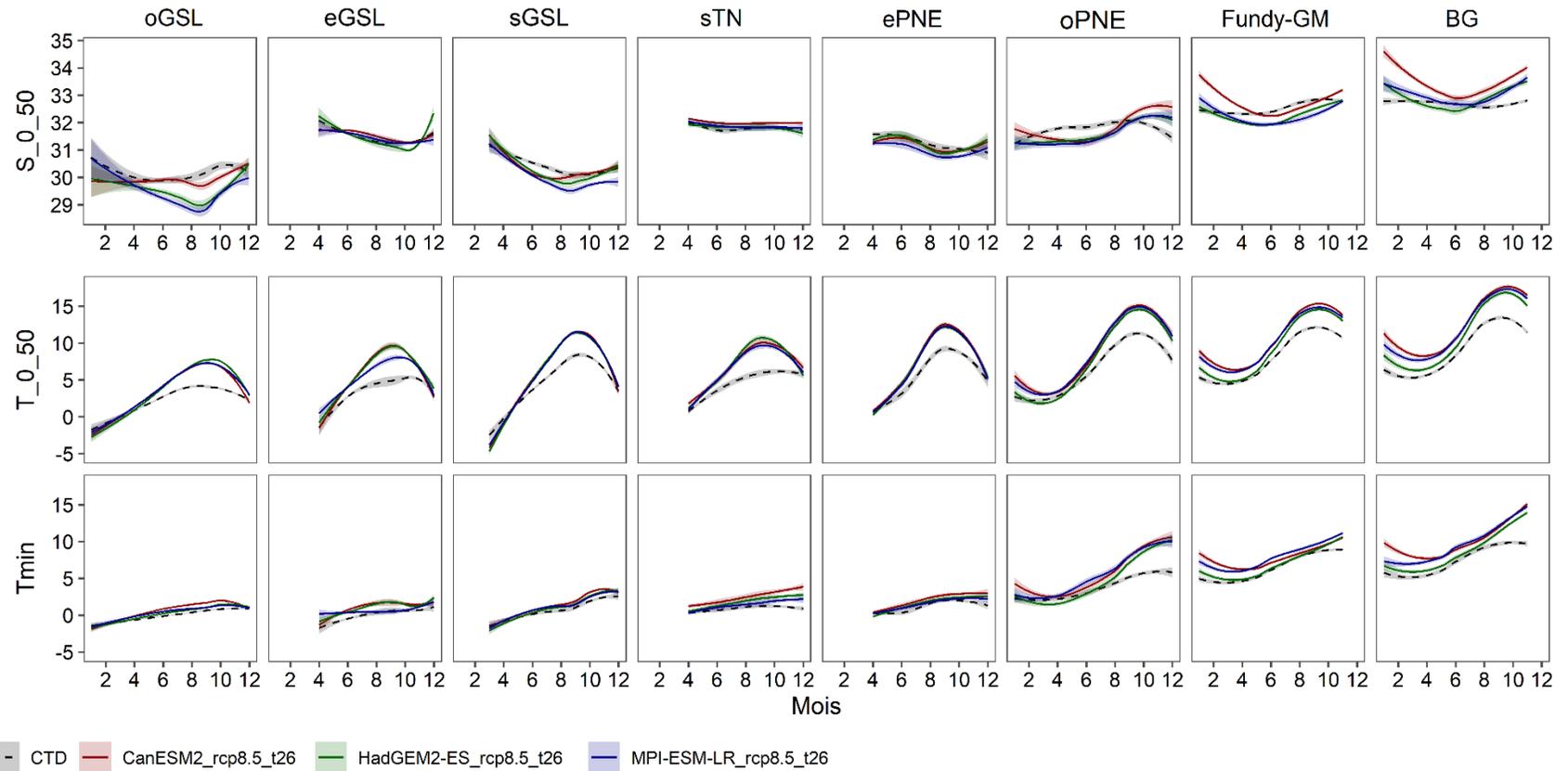


Figure A.1.1. Comparaison de la moyenne mensuelle des covariables de 1999 à 2020 tirées des mesures CTD et des trois simulations climatiques régionales.

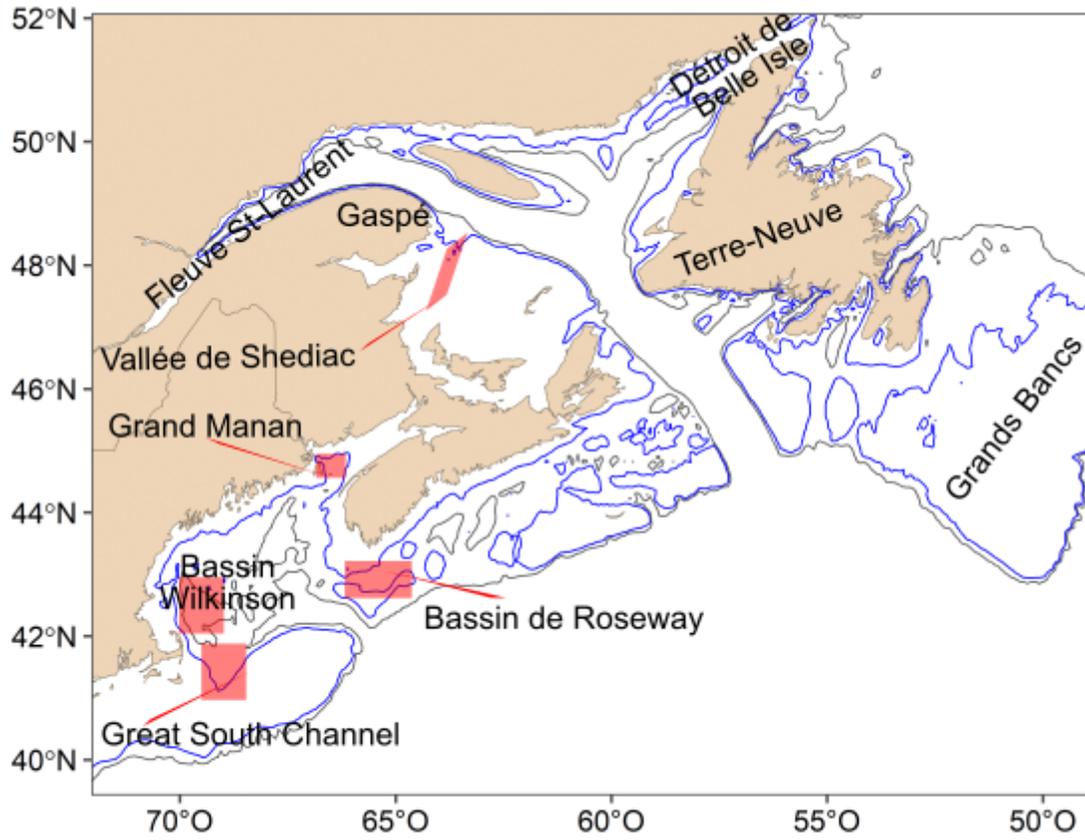


Figure A.1.2. Zone d'étude avec les points de repère géographiques. Les lignes bleues et grises représentent les isobathes de 100 et 200 m. respectivement.

ANNEXE 2

Tableau A.2.1. Pourcentage de cellules pour lesquelles T_{min} et T_{0-50} ont été winsorisées. Les pourcentages ont été calculés pour environ 15 000 cellules spatiales pendant sept mois et trois simulations, ce qui a donné plus de 300 000 valeurs.

Espèce	Décennie	% winsorisé	
		T_{min}	T_{0-50}
<i>C. finmarchicus</i>	2000-2009	0	0
	2080-2089	0.51	1.16
<i>C. glacialis</i>	2000-2009	3.9	3.42
	2080-2089	7.7	14.11
<i>C. hyperboreus</i>	2000-2009	0.65	0.09
	2080-2089	2.9	2.36

Tableau A.2.2. Résultats pour la validation croisée temporelle par simulation de modèle océanique. Ajust. = bloc d'années utilisé pour ajuster les GAMM. Valid. = bloc d'années utilisé pour évaluer le rendement des GAMM. Caractères gras = mesure de performance des GAMM ajustés avec 100 % des données (de 1999 à 2020). Il convient de noter que les valeurs en gras de la TSS diffèrent de celles du tableau 2 parce que l'effet de l'année n'a pas été inclus dans le tableau actuel pour améliorer la comparaison avec les paramètres de performance calculés pendant la validation croisée.

Espèce	Modèle	Bernoulli (TSS)			Gamma (corrélacion de Spearman)				
		1999-2020 (100 %)	Ajust. = 2006-2020 Valid. = 1999-2005	Ajust. = 1999-2005, 2013-2020 Valid. = 2006-2012	Ajust. = 1999-2012 Valid. = 2013-2020	1999-2020 (100 %)	Ajust. = 2006-2020 Valid. = 1999-2005	Ajust. = 1999-2005, 2013-2020 Valid. = 2006-2012	Ajust. = 1999-2012 Valid. = 2013-2020
<i>C. finmarchicus</i>	CanESM2_rcp8.5	0.58	0.48	0.60	0.55	0.70	0.71	0.67	0.68
	HadGEM2-ES_rcp8.5	0.59	0.51	0.57	0.55	0.70	0.71	0.66	0.67
	MPI-ESM-LR_rcp8.5	0.58	0.50	0.61	0.57	0.70	0.71	0.66	0.67
<i>C. glacialis</i>	CanESM2_rcp8.5	0.85	0.85	0.88	0.79	0.51	0.38	0.51	0.63
	HadGEM2-ES_rcp8.5	0.85	0.85	0.89	0.79	0.59	0.44	0.42	0.61
	MPI-ESM-LR_rcp8.5	0.85	0.85	0.89	0.80	0.53	0.39	0.58	0.59
<i>C. hyperboreus</i>	CanESM2_rcp8.5	0.65	0.59	0.65	0.73	0.73	0.67	0.74	0.78
	HadGEM2-ES_rcp8.5	0.64	0.60	0.65	0.71	0.72	0.66	0.73	0.77
	MPI-ESM-LR_rcp8.5	0.63	0.60	0.65	0.73	0.73	0.66	0.74	0.78

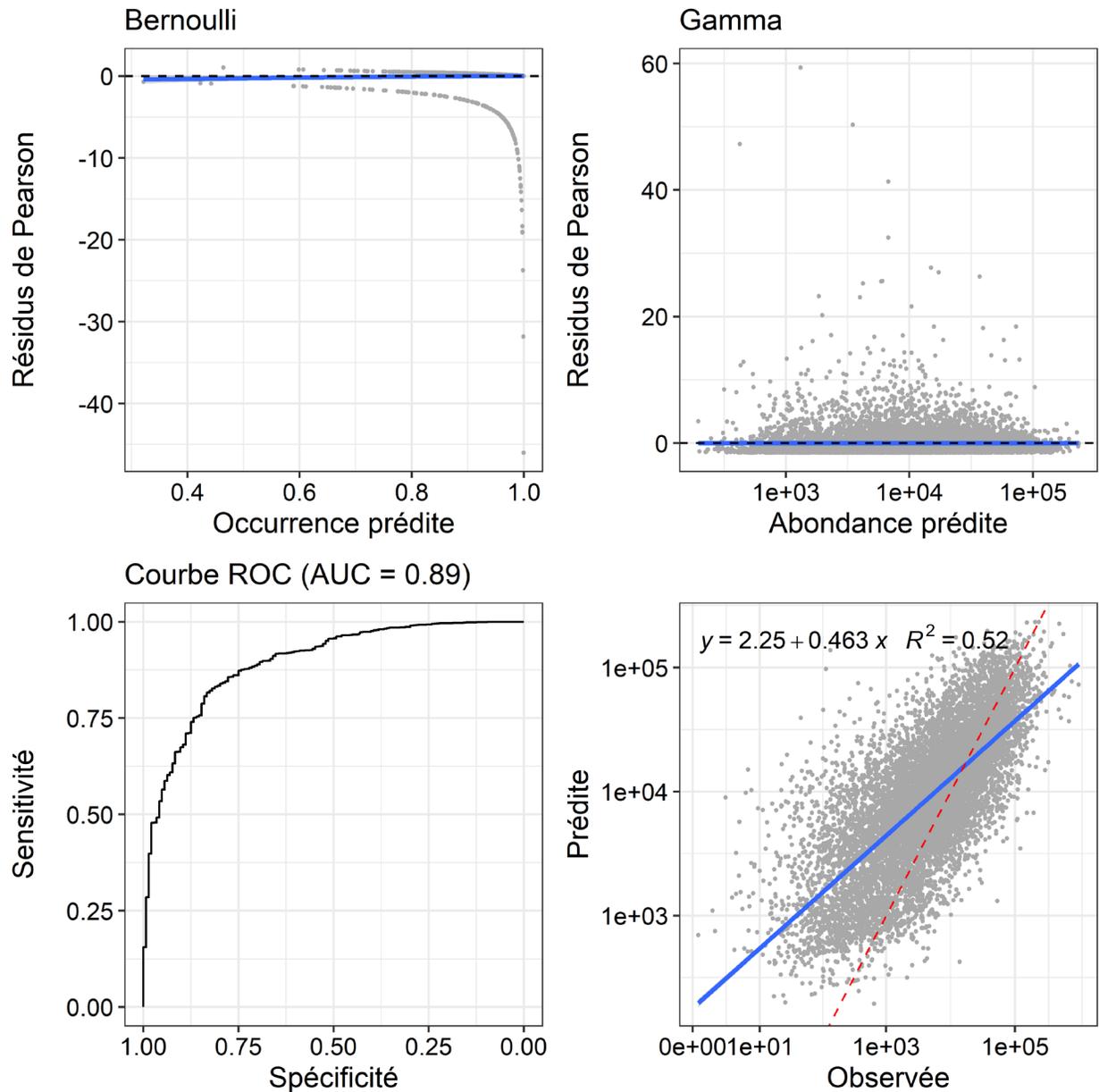


Figure A.2.1. Validation des GAMM de Bernoulli (à gauche) et Gamma (à droite) pour *C. finmarchicus* à l'aide de la simulation CanESM2_rcp8.5. L'homogénéité a été vérifiée (panneaux supérieurs), le résultat attendu étant que le lissage des résidus de Pearson par rapport aux prédictions (en bleu) soit proche de 0 (ligne tiretée noire). L'exactitude des prédictions a été vérifiée à l'aide de la courbe ROC pour les modèles de Bernoulli (à gauche, voir aussi le tableau 2 pour la TSS) et d'une relation linéaire entre les prédictions et les observations de l'abondance dans le cas des GAMM Gamma (ligne bleue). La ligne rouge tiretée indique des prédictions parfaites (pente = 1, ordonnée à l'origine = 0).

C. finmarchicus

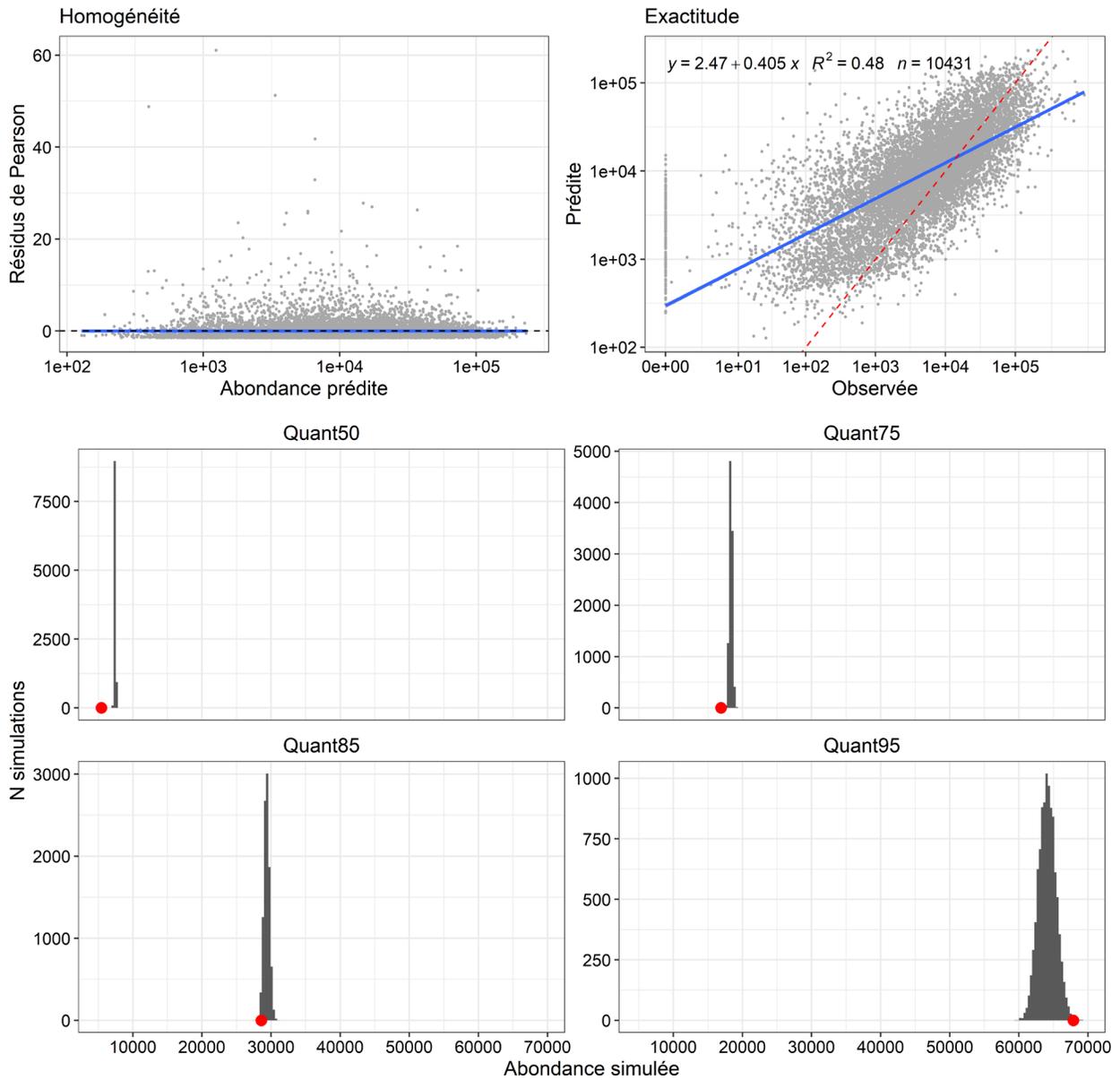


Figure A.2.2. Validation du GAMM ZAG ($\pi \times \mu$) pour *C. finmarchicus* à l'aide du scénario CanESM2_rcp8.5. L'homogénéité et l'exactitude ont été vérifiées (panneau supérieur); voir plus de détails sur la méthode à la figure A.2.1. La distribution ZAG des simulations des paramètres (histogrammes gris) a été vérifiée par rapport aux observations pour chacun des quantiles 50, 75, 85 et 95 % (cercles rouges; quatre panneaux du bas).

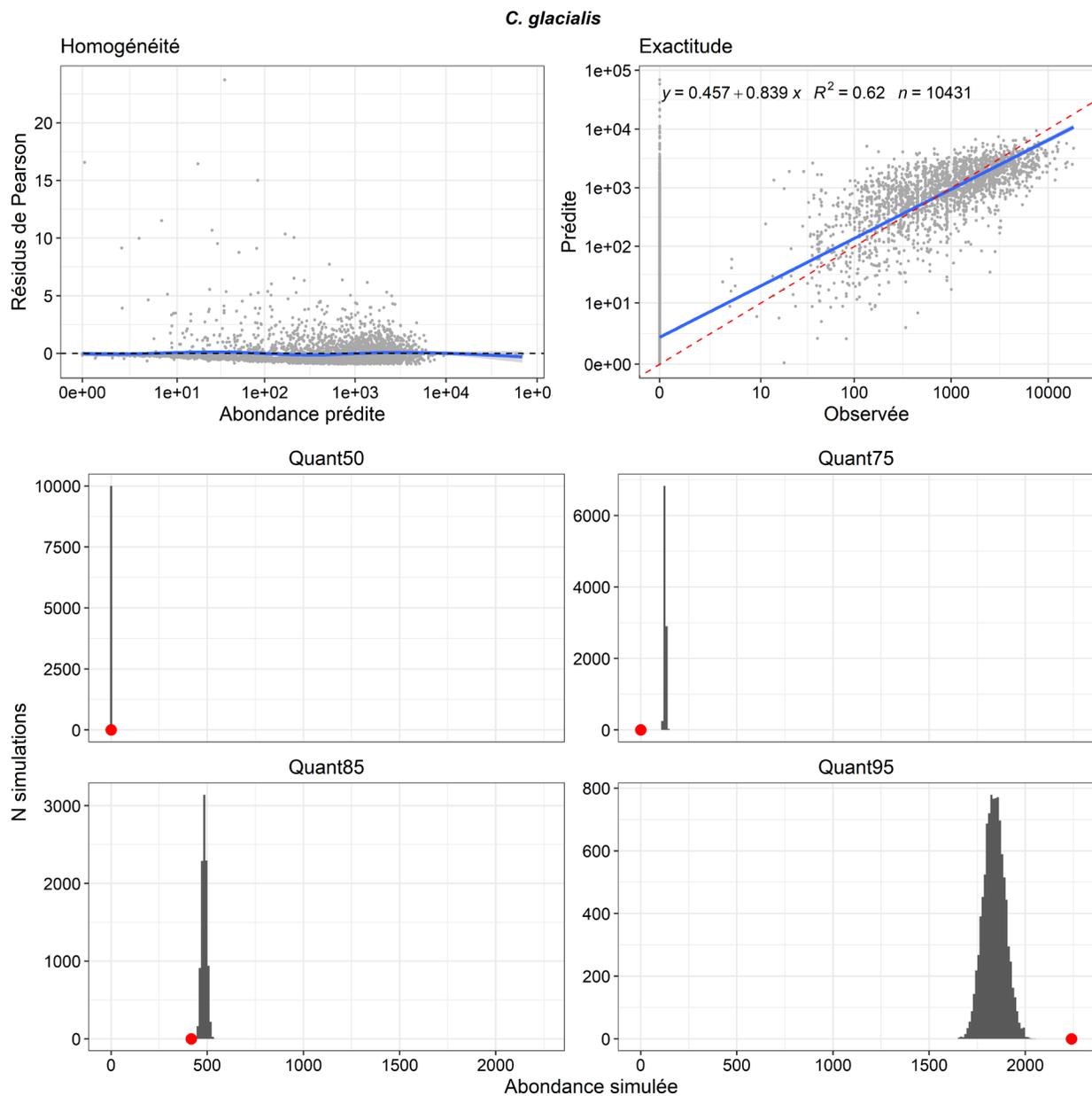


Figure A.2.3. Validation des GAMM ZAG ($\pi \times \mu$) pour *C. glacialis* à l'aide du scénario CanESM2_rcp8.5. L'homogénéité et l'exactitude ont été vérifiées (panneau supérieur); voir plus de détails à la figure A.2.1. La distribution ZAG des simulations des paramètres (histogrammes gris) a été vérifiée par rapport aux observations pour chacun des quantiles 50, 75, 85 et 95 % (cercles rouges; quatre panneaux du bas).

C. hyperboreus

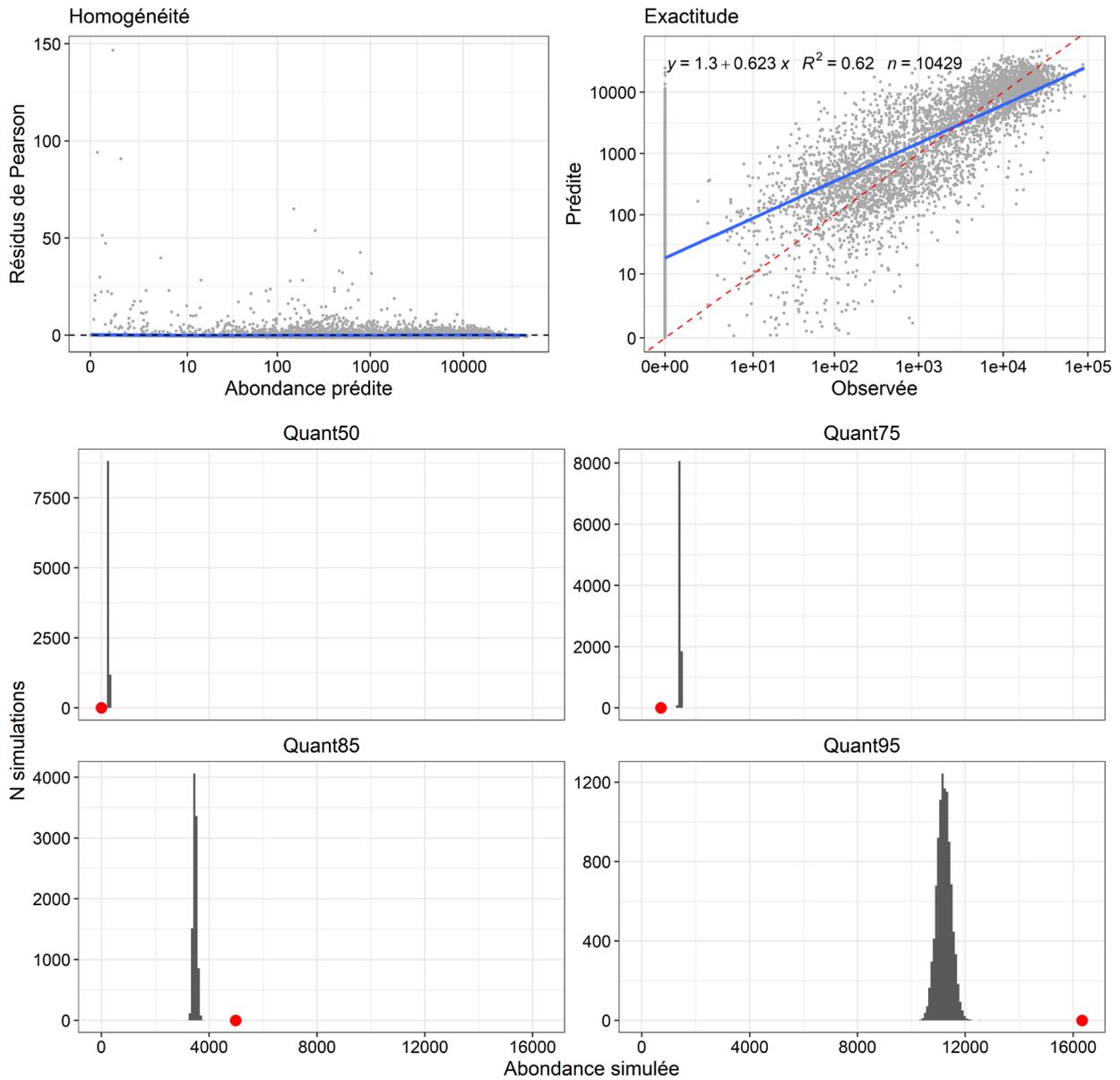


Figure A.2.4. Validation des GAMM ZAG ($\pi \times \mu$) pour *C. hyperboreus* à l'aide du scénario CanESM2_rcp8.5. L'homogénéité et l'exactitude ont été vérifiées (panneaux supérieurs); voir plus de détails à la figure A.2.1. La distribution ZAG des simulations des paramètres (histogrammes gris) a été vérifiée par rapport aux observations pour chacun des quantiles 50, 75, 85 et 95% (cercles rouges; quatre panneaux du bas).

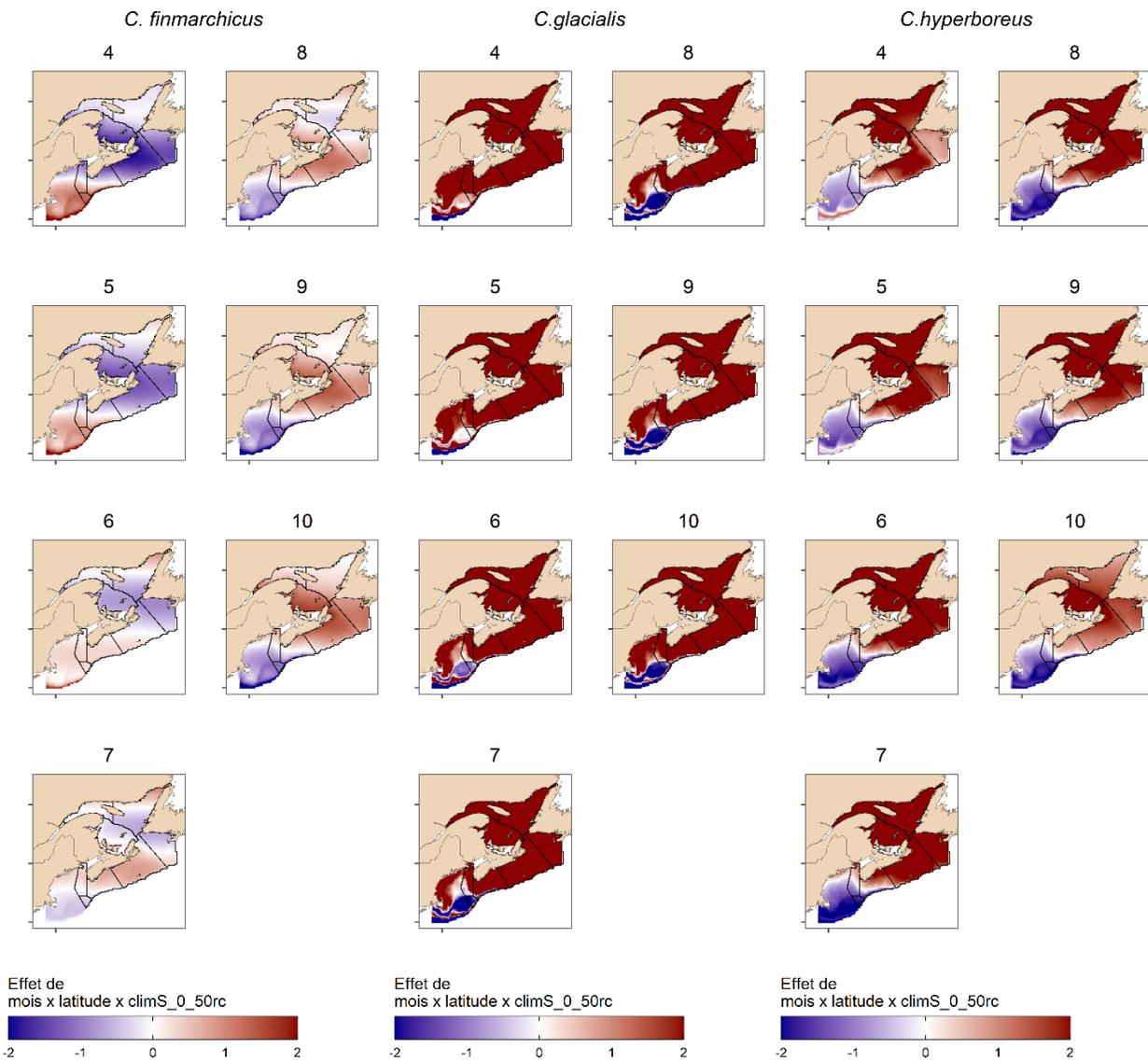


Figure A.2.5. GAMM : Effet de la variable « connectivité » avec la simulation du modèle régional CanESM2_rcp8.5 pour Calanus finmarchicus, C. glacialis et C. hyperboreus. L'effet comprend la Latitude * MOIS * ClimS_0-50rc. Les lignes noires représentent les limites des régions utilisées pour présenter les résultats.

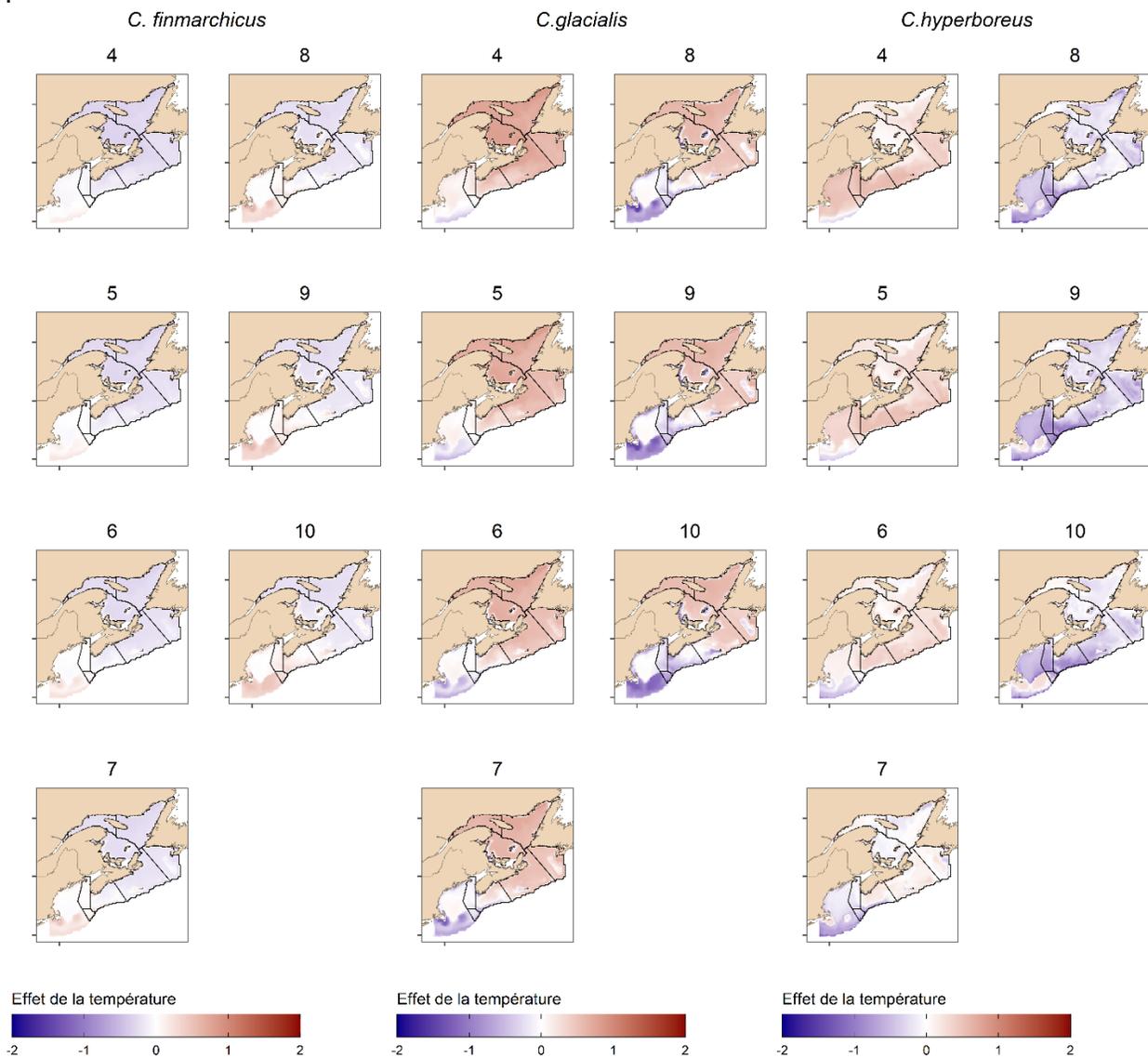


Figure A.2.6. GAMM de Bernoulli : Effet combiné de T_{0-50} et de T_{min} sur la présence ou l'absence de *Calanus finmarchicus*, *C. glacialis* et *C. hyperboreus*. Les lignes noires représentent les limites des régions utilisées pour présenter les résultats.

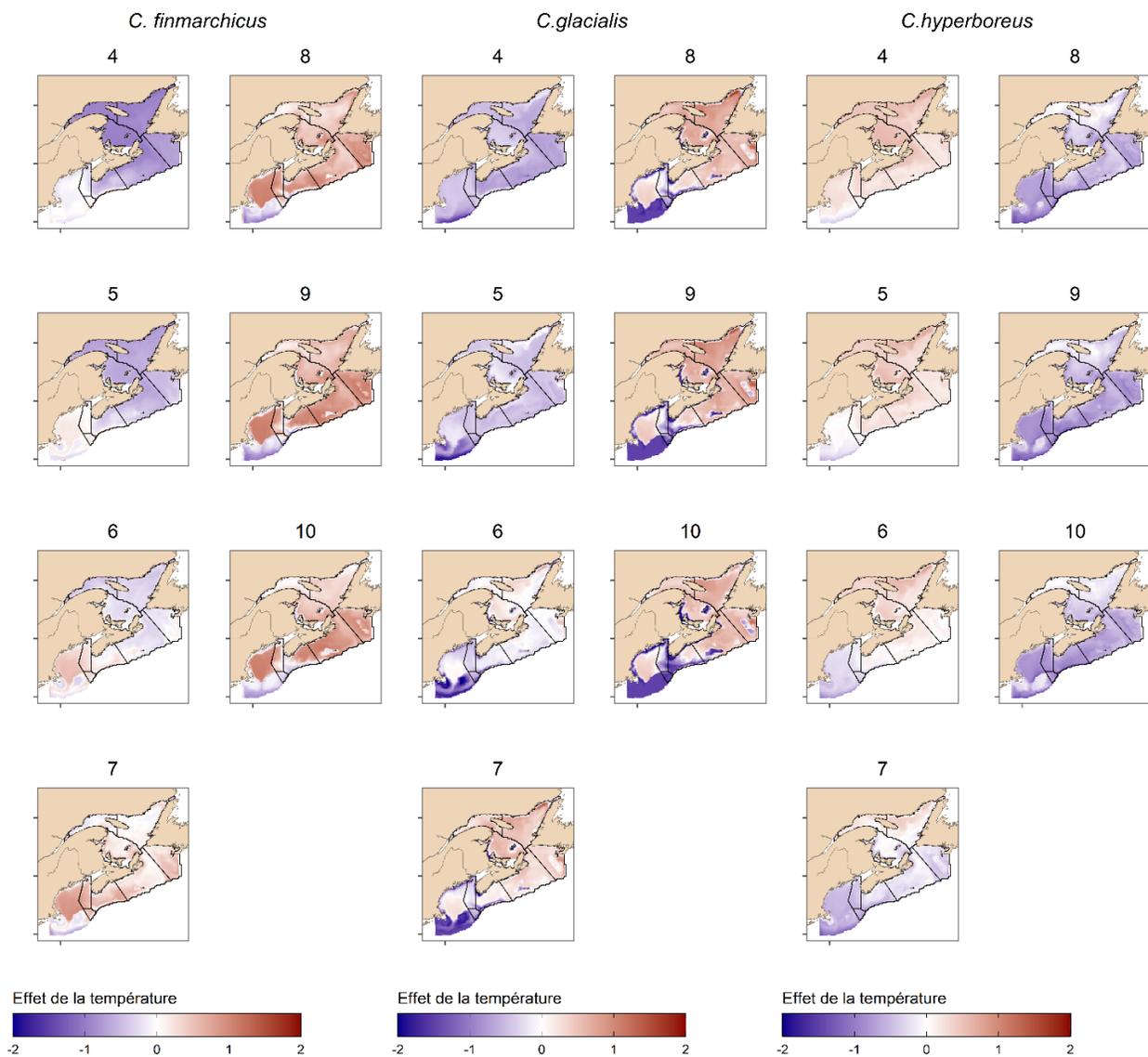


Figure A.2.7. Gamma GAMM : Effet combiné de T_{0-50} et de T_{min} sur l'abondance de *Calanus finmarchicus*, *C. glacialis* et *C. hyperboreus* de 1999 à 2020. Les lignes noires représentent les limites des régions utilisées pour présenter les résultats.

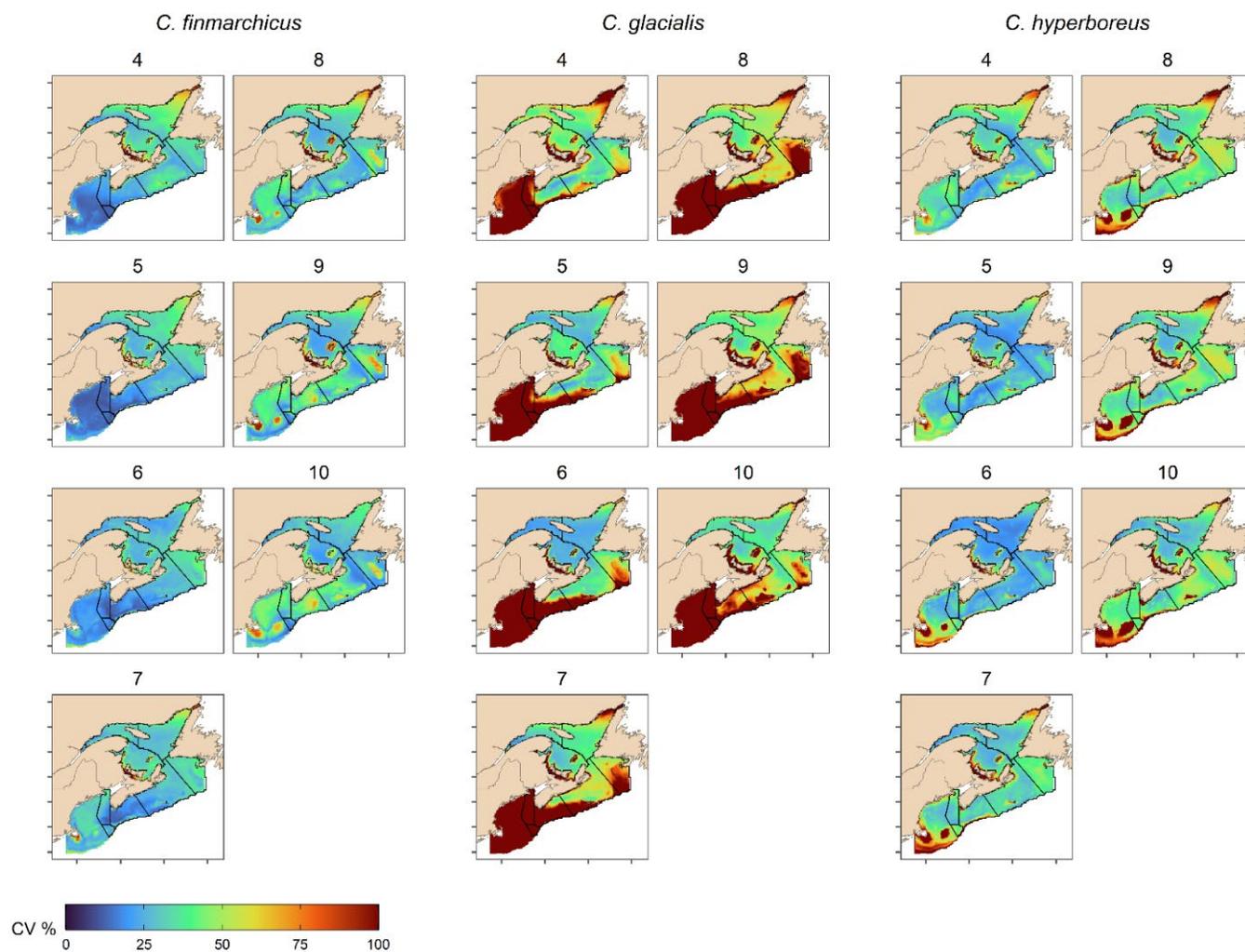


Figure A.2.8. Coefficient de variation (CV %) des prédictions de l'abondance moyenne de *Calanus finmarchicus*, *C. glacialis* et *C. hyperboreus* d'avril à octobre entre 2080 et 2089. Le CV représente l'incertitude associée aux trois simulations climatiques régionales et aux paramètres du GAMM. Les lignes noires représentent les limites des régions utilisées pour présenter les résultats.