



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 2024/039

Région du Québec

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

S. Plourde¹, C. Lehoux¹, J.J. Roberts², C.L. Johnson³, N. Record⁴, P. Pepin⁵, C. Orphanides⁶, R.S. Schick^{2,7}, H. J. Walsh⁶, C.H. Ross^{4,8}

¹ Pêches et Océans Canada, Institut Maurice-Lamontagne, 850 Route de la Mer, Mont-Joli, Québec Canada G 5H 3Z4

² Marine Geospatial Ecology Lab, A328 Levine Science Research Center, Duke University, Durham, NC 27708, USA

³ Pêches et Océans Canada, Bedford Institute of Oceanography, PO Box 1006, Dartmouth, Nova Scotia Canada B2Y 4A2

⁴ Tandy Center for Ocean Forecasting, Bigelow Laboratory for Ocean Sciences, East Boothbay, ME 04544, USA

⁵ Pêches et Océans Canada, Northwest Atlantic Fisheries Centre, 80 White Hills Road, PO Box 5667, St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada A1C 5X1

⁶ NOAA Fisheries, Northeast Fisheries Science Center, 28 Tarzwell Drive, Narragansett, Rhode Island, 02882

⁷ Southall Environmental Associates, Inc., 9099 Soquel Drive, Suite 8, Aptos, CA United States 95003

⁸ Darling Marine Center, University of Maine, School of Marine Sciences, Walpole, ME United States 04573

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 978-0-660-72876-6 N° cat. Fs70-5/2024-039F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

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.

Also available in English :

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. Describing the Seasonal and Spatial Distribution of Calanus Prey and North Atlantic Right Whale Potential Foraging Habitats in Canadian Waters Using Species Distribution Models. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2024/039. v + 71 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	v
1. INTRODUCTION	1
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES	2
2.1. SOURCES DE DONNÉES.....	2
2.1.1. Données sur les espèces de <i>Calanus</i>	2
2.1.2. Covariables environnementales et hypothèses mécanistes sous-jacentes	3
2.2. MODÈLES DE RÉPARTITION DES ESPÈCES DE <i>CALANUS</i>	5
2.2.1. Modèles de répartition des espèces : modèles additifs généralisés à effets mixtes (GAMM).....	5
2.2.1.1. Validation et sélection des modèles.....	6
2.2.2. Incertitude des paramètres des MRE.....	7
2.3. MODÈLE BIOÉNERGÉTIQUE D'ALIMENTATION DE LA BALEINE NOIRE.....	7
2.3.1. Conversion de l'abondance de plusieurs espèces dans la colonne d'eau en une biomasse commune.....	7
2.3.2. Modèle de répartition verticale des espèces de <i>Calanus</i>	8
2.3.3. Construction du paysage de proies en 3D.....	8
2.3.4. Application du modèle bioénergétique d'alimentation de la baleine noire	9
3. RÉSULTATS.....	10
3.1. RÉPARTITION DES ESPÈCES DE <i>CALANUS</i> ET MODÈLES DE RÉPARTITION VERTICALE	10
3.1.1. Rendement et exactitude des modèles candidats	10
3.1.2. Effets des covariables dans le meilleur modèle	11
3.1.3. Modèles spatiaux et saisonniers dans l'incertitude des paramètres et des prédictions des meilleurs MRE des espèces de <i>Calanus</i>	12
3.1.4. Modèles de répartition verticale	12
3.2. VARIATIONS MENSUELLES ET SPATIALES DE L'ABONDANCE ET DE LA BIOMASSE DES ESPÈCES DE <i>CALANUS</i>	12
3.3. COUCHE DE PROIES D'ESPÈCES MULTIPLES EN 3D ET HABITAT D'ALIMENTATION POTENTIEL DES BALEINES NOIRES.....	13
3.3.1. Variations saisonnières et régionales de la répartition verticale des espèces de <i>Calanus</i>	13
3.3.2. Patron saisonnier de la profondeur de la densité des proies et d'alimentation optimale.....	13
3.3.3. Climatologie spatiale mensuelle et variabilité de l'habitat d'alimentation	14
4. DISCUSSION.....	14
4.1. MODÈLES DE RÉPARTITION DES ESPÈCES	14
4.2. COUCHE DE PROIES MULTI-ESPÈCES EN 3D.....	16
4.3. HABITAT D'ALIMENTATION POTENTIEL DE LA BALEINE NOIRE	17
4.4. SOURCES D'INCERTITUDES.....	18

5. CONCLUSION	20
6. RÉFÉRENCES CITÉES	21
7. REMERCIEMENTS	26
8. TABLEAUX	27
9. FIGURES	32
ANNEXE 1	51
ANNEXE 2	58
ANNEXE 3	62
ANNEXE 4	71

RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude était de décrire les variations saisonnières et spatiales de l'abondance des espèces de *Calanus* et de l'habitat d'alimentation potentiel de la baleine noire de l'Atlantique Nord (ci-après la baleine noire) dans les eaux canadiennes au cours de la période 1999-2020. Nous avons tiré parti des programmes de surveillance océanographique au Canada et aux États-Unis (É.-U.) pour élaborer une approche de modélisation intégrée comprenant les éléments suivants : (1) Modèles de répartition des espèces (MRE) de *C. finmarchicus*, de *C. glacialis* et de *C. hyperboreus* pour prédire leur abondance; (2) l'abondance prédite convertie en biomasse pour tenir compte des différences de taille entre les espèces de *Calanus*; (3) des modèles additifs généralisés (GAM) décrivant les variations saisonnières de la répartition verticale des espèces de *Calanus*; (4) une couche de proies multi-espèces en 3D combinant la biomasse de la colonne d'eau et la répartition verticale propre à chaque espèce et (5) un modèle bioénergétique des baleines noires pour évaluer la qualité des proies et décrire la répartition saisonnière et spatiale de l'habitat d'alimentation potentiel. Au moyen des GAM, nous avons construit une série de MRE basés sur différentes hypothèses mécanistiques concernant les facteurs touchant les populations d'espèces de *Calanus* dans les eaux canadiennes et américaines. Les modèles les plus performants comprenaient le terme de « connectivité » du paysage marin en plus d'autres covariables clés (température, bathymétrie), et ils supposaient que les réponses des espèces de *Calanus* aux covariables étaient généralement les mêmes dans l'ensemble du domaine (pas d'adaptation locale) avec une forte influence du transport dans certains endroits. Les termes de « température » et de « connectivité » représentent des patrons réalistes d'influence des différents régimes de température et des masses d'eau sur les espèces de *Calanus* dans les eaux canadiennes. Notre approche de modélisation intégrée a permis de cerner des habitats d'alimentation connus (p. ex. : bassin Roseway) et nouvellement identifiés (p. ex. : sud du golfe du Saint-Laurent [GSL]) de la baleine noire ainsi que d'autres habitats d'alimentation potentiels dans les eaux canadiennes. Nos résultats montrent que les zones d'alimentation potentielles de baleines noires dans les eaux canadiennes sont déterminées par un assemblage de plusieurs espèces de *Calanus* qui varie dans l'espace et dans le temps. Par conséquent, les conclusions concernant la résilience passée, actuelle et future des habitats d'alimentation des baleines noires aux variations des conditions environnementales et au changement climatique doivent être faites avec prudence en raison des réponses particulières des espèces à ces changements.

1. INTRODUCTION

Le *Calanus finmarchicus* subarctique et le *C. glacialis* et *C. hyperboreus* arctiques dominent la biomasse du zooplancton dans les eaux atlantiques canadiennes, avec des différences de contribution selon les régions (Sorochan *et al.* 2019, MPO 2023). Les espèces de *Calanus* ont un cycle de vie complexe et utilisent différents habitats au cours de leur cycle annuel (Conover 1988). La croissance active, le développement et l'accumulation de lipides se produisent principalement dans la couche supérieure de la colonne d'eau, tandis que les derniers stades de développement riches en lipides se passent généralement l'hiver dans un état de repos à des profondeurs plus importantes associées à une température locale plus basse (Wishner *et al.* 1995, Plourde *et al.* 2001, Plourde *et al.* 2003, Baumgartner *et al.* 2017, Krumhansl *et al.* 2018). Les taux vitaux individuels (respiration, alimentation, développement, croissance, production d'œufs) et les paramètres de la dynamique des populations (production, mortalité, survie, abondance) sont affectés par la température, mais avec des optima différents selon les espèces (Plourde *et al.* 2009, Moller *et al.* 2012, Chust *et al.* 2014, Pasternak *et al.* 2013, Alcaraz *et al.* 2014, Albouy-Boyer *et al.* 2016).

Le plateau continental de l'est du Canada et du nord-est des États-Unis est caractérisé par une circulation prédominante vers le sud et des courants dans le sens antihoraire dans le GSL (voir le tableau 1 pour la liste complète des sigles et acronymes) et dans le golfe du Maine (GM) (Loder *et al.* 1998, Figure 2). Habituellement, le plateau interne est influencé par des eaux plus douces provenant de l'Arctique ou de cours d'eau, comme le fleuve Saint-Laurent, tandis que le plateau externe est davantage influencé par des eaux plus salées provenant du talus continental et du bassin océanique (Loder *et al.* 1998). L'origine (masses d'eau) et le moment des événements de transport pourraient varier selon les espèces de *Calanus* en raison de l'interaction entre les variations des patrons de circulation et la phénologie des espèces (présence dans la couche de surface). Il a été démontré que l'advection joue un rôle clé dans le maintien des populations de *Calanus* à différentes échelles spatiales et temporelles dans le domaine spatial du Programme de monitoring de la zone Atlantique (PMZA) et du programme de monitoring écosystémique (EcoMon), y compris la baie de Cape Cod (BCC), le plateau néo-écossais (PNE), le sud du GSL (sGSL) et l'est du plateau de Terre-Neuve (eTN) (Miller *et al.* 1998, Head *et al.* 2003, Zakardjian *et al.* 2003; Jiang *et al.* 2007; Maps *et al.* 2011; Brennan *et al.* 2021; Pépin *et al.* 2013).

Les migrations saisonnières de recherche de nourriture de la baleine noire de l'Atlantique Nord (ci-après dénommée la baleine noire) se déroulent à grande échelle. Pendant leur principale saison d'alimentation (du printemps à l'automne), les baleines noires se regroupent dans des régions caractérisées par une forte abondance de sa proie préférée, le *C. finmarchicus*, riche en lipides, dont elles se nourrissent soit dans les couches superficielles, soit dans les couches profondes, en fonction des lieux et des saisons (voir Baumgartner *et al.* 2017 et références qui s'y trouvent). Au début des années 2010, l'occurrence de la baleine noire a nettement diminué dans les habitats d'alimentation traditionnellement utilisés dans le Grand chenal Sud (GSC) (printemps), Grand Manan et le bassin Roseway (été-automne) en réponse à une diminution de la disponibilité des proies (Record *et al.* 2019, Meyer-Gutbrod *et al.* 2023). Par la suite, environ un tiers de la population de baleines noires a utilisé le sGSL depuis la fin des années 2010, probablement en raison de la combinaison de la 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). Le changement observé dans la répartition de la baleine noire, les résultats de travaux antérieurs sur les proies dans le sGSL et les observations dans d'autres zones en été et en automne suggèrent que la baleine noire pourrait s'alimenter sur des regroupements de

proies dominées par des espèces autres que le *C. finmarchicus* et que d'autres habitats d'alimentation potentiels pourraient exister ailleurs dans les eaux canadiennes.

Malgré des études antérieures basées sur des données d'abondance des espèces de *Calanus* couvrant des échelles spatiales et temporelles pertinentes pour les migrations saisonnières des baleines noires (Plourde *et al.* 2019; Sorochan *et al.* 2019, Meyer-Gutbrod *et al.* 2023), il n'y a toujours pas de description complète de la répartition spatiale et saisonnière des espèces de *Calanus* dans les régions connues ou hypothétiques d'être visitées par la baleine noire pendant leur saison de recherche de nourriture. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude était de décrire les variations saisonnières et spatiales de l'abondance des espèces de *Calanus* et de l'habitat d'alimentation potentiel de la baleine noire dans les eaux canadiennes au cours de la période 1999-2020. Nous avons tiré parti de différents programmes et outils de surveillance pour élaborer une approche de modélisation intégrée comprenant les éléments suivants : (1) Modèles de répartition des espèces (MRE) de *C. finmarchicus*, de *C. glacialis* et de *C. hyperboreus* pour prédire leur abondance; (2) une estimation de la couche de proies multiespèces à partir de l'abondance prédite convertie en biomasse pour tenir compte d'au moins un ordre de grandeur des différences de taille entre les espèces de *Calanus*; (3) des modèles additifs généralisés (GAM) décrivant les variations saisonnières de la répartition verticale des espèces de *Calanus*; (4) une couche de proies d'espèces multiples en 3D combinant la biomasse de la colonne d'eau et la répartition verticale propres aux espèces et (5) un modèle bioénergétique des baleines noires pour évaluer la qualité spatiale et temporelle des proies. Les données recueillies par les programmes de surveillance dans les eaux de l'est du Canada et des États-Unis ont été utilisées pour élaborer une série de MRE des *Calanus*, et en évaluer le rendement et l'exactitude, dans le but de déterminer le meilleur modèle pour décrire l'habitat d'alimentation de la baleine noire. Nos résultats ont été présentés pour les eaux canadiennes. Les résultats de nos MRE sur les espèces de *Calanus* ont fait l'objet de discussions dans le contexte des facteurs connus de la répartition saisonnière et spatiale des espèces de *Calanus*, tandis que nos prédictions de l'habitat d'alimentation de la baleine noire ont été comparées aux habitats d'alimentation traditionnellement utilisés. Nos résultats ont mis en évidence de nouvelles zones d'alimentation potentielles pour la baleine noire dans les eaux canadiennes.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. SOURCES DE DONNÉES

2.1.1. Données sur les espèces de *Calanus*

Le PMZA, dirigé par le ministère des Pêches et des Océans du Canada (le MPO), échantillonne régulièrement le zooplancton dans les eaux de l'est du Canada depuis 1999 au moyen d'un filet à plancton d'une maille de 200 µm, deux fois par année, au printemps et à l'automne. Les stations à haute fréquence sont également visitées sur une base mensuelle à hebdomadaire, principalement du printemps à l'automne, et moins fréquemment en hiver. Des filets à plancton verticaux sont utilisés à partir de 5 mètres au-dessus du fond (profondeur maximale d'échantillonnage = 1 000 m) jusqu'à la surface. Dans le cadre du PMZA, les espèces de *Calanus* sont identifiées par espèce et par stade; pour plus de détails sur les protocoles d'échantillonnage du zooplancton, voir Mitchell *et al.* (2002). Le zooplancton du plateau continental du nord-est des É.-U. est régulièrement recueilli dans le cadre du programme EcoMon mené par la National Oceanic and Atmospheric Administration (la NOAA, Northeast Fisheries Science Center 2019) depuis 1977. Le zooplancton est échantillonné à l'aide de traits obliques avec des filets Bongo à maille de 333 µm entre 0 et 200 m ou à 5 mètres au-dessus du

fond. Dans le cadre du programme EcoMon, les espèces *C. glacialis* et *C. hyperboreus* sont regroupées dans un taxon d'espèces de *Calanus*. Comme *C. glacialis* représente une abondance inférieure à *C. hyperboreus* d'un ordre de grandeur dans la région la plus proche échantillonnée dans le cadre du PMZA (Casault *et al.* 2022), l'ouest du PNE, les espèces de *Calanus* dans le cadre du programme EcoMon ont été considérées comme étant *C. hyperboreus* dans nos analyses. Pour la position des stations et l'effort d'échantillonnage saisonnier dans les deux programmes, voir la figure 1 et la figure A.1.1, respectivement.

Les différents protocoles d'échantillonnage du zooplancton dans le PMZA et dans le programme EcoMon nécessitent une normalisation des données sur le zooplancton pour les combiner dans la construction du modèle. Nous avons d'abord limité nos analyses aux derniers stades de développement CIV-VI, car ils sont échantillonnés de manière similaire par les filets de 200 et 333 μm , et parce que l'efficacité de filtrage des fanons de la baleine noire est à peu près égale à celle d'un filet de 333 μm (efficacité de filtrage ~ 1 pour les espèces de *Calanus* $> 1,5$ mm de longueur corporelle), Mayo *et al.* 2001). La profondeur maximale d'échantillonnage dans le programme EcoMon étant de 200 m contre 1 000 m dans le PMZA, nous avons utilisé les prédictions mensuelles de la répartition verticale par nos modèles dans le GM (*C. finmarchicus*) et l'ouest du SS (*C. hyperboreus*) (voir ci-dessous) pour normaliser les données d'abondance dans le programme EcoMon et les rendre comparables aux données du PMZA. Enfin, le PMZA échantillonne régulièrement des stations dont la profondeur du fond est $> 1\ 000$ m, ce qui n'est pas le cas du programme EcoMon. Ces stations ont été exclues afin de maintenir des limites bathymétriques homogènes dans notre domaine spatial. Par conséquent, 16 333 stations ont été retenues dans le domaine PMZA-EcoMon (figure A.1. 1).

2.1.2. Covariables environnementales et hypothèses mécanistes sous-jacentes

La sélection des covariables pour les MRE était basée sur la théorie écologique ainsi que sur des hypothèses, en raison d'un lien de causalité mécaniste direct entre les covariables liées à la température et leurs effets attendus sur la physiologie des espèces de *Calanus* et l'abondance de la population. Nous avons utilisé la température à 0-50 m (T_{0-50}) et la température minimale dans la colonne d'eau (T_{min}) comme indicateurs de l'enveloppe thermique pendant les périodes de croissance active et de diapause, avec l'hypothèse explicite que *C. finmarchicus* montrerait une température optimale et une préférence de température différentes par rapport aux *C. glacialis* et au *C. hyperboreus* de l'Arctique. La bathymétrie a été incluse en tant qu'indicateur de la disponibilité de l'habitat de diapause et en raison de son effet important sur l'abondance des espèces de *Calanus* dans la région (Albouy-Boyer *et al.* 2016; Grieve *et al.* 2017; Ross *et al.* 2023).

Nous avons développé des MRE candidats sur la base de deux critères : la présence ou l'absence d'adaptations locales, et les processus à l'échelle régionale et la façon dont le paysage marin est formulé (voir section 2.2.1 ci-dessous). Compte tenu de l'importance du transport dans la répartition saisonnière des espèces de *Calanus* sur le plateau continental de l'est du Canada, une formulation de modèle candidat visait à capturer les patrons spatiaux et saisonniers grossiers de la connectivité en développant une formulation de modèle basée sur le cadre « *approvisionnement – agrégation – disponibilité* » (Sorochan *et al.* 2021; Johnson *et al.*

en préparation¹) en mettant l'accent sur les éléments associés à l'« *approvisionnement* ». Dans cette formulation, la latitude a été utilisée comme une approximation de premier niveau de la distance par rapport à une région source (*niveaux de population régionaux*), étant donné qu'il existe des patrons d'abondance nord-sud propres aux espèces dans l'ensemble du domaine spatial (Sorochan *et al.* 2019). Ensuite, nous avons utilisé une climatologie spatiale de la salinité dans la couche 0-50 m (climS_0-50rc, voir ci-dessous) pour structurer le paysage marin de la salinité et les voies supposées de connectivité (*approvisionnement par advection*) et les régions sources le long des masses d'eau plus fraîches (plateau interne) et plus salées (plateau externe) (figure 2). Enfin, notre cadre de connectivité comprenait un mois pour tenir compte de la saisonnalité propre à chaque espèce dans le cycle de vie des espèces de *Calanus*. Ces trois covariables ont été combinées dans un terme d'interaction appelé « connectivité » (voir section 2.2.1). Les processus biologiques-physiques couplés locaux (*regroupement*) n'ont donc pas été examinés, car ils se produisent généralement à des échelles temporelles et spatiales plus petites que l'échelle de temps mensuelle considérée dans nos MRE, tandis que la « *disponibilité* » a été étudiée avec l'utilisation de la couche de proies en 3D et du modèle bioénergétique de la baleine noire (voir ci-dessous) (Sorochan *et al.* 2021).

Les valeurs T_0-50 et Tmin par mois et par année pendant la période 1999-2020 ont été utilisées pour correspondre au mode principal d'échantillonnage du zooplancton dans le PMZA et le programme EcoMon, répondant ainsi à notre objectif de modéliser les variations saisonnières (c.-à-d. mensuelles) et spatiales de l'abondance des espèces de *Calanus*.

[Les produits de données GLORYS12v1](#) ont été considérés comme la meilleure source de données disponibles à l'échelle traitée dans notre étude, bien que la salinité de surface ait été généralement sous-estimée dans la partie ouest du GSL (voir la figure A.1. 3) (Lellouche *et al.* 2021, Castillo-Trujillo *et al.* 2023). Les indices mensuels de T_0-50, Tmin et de salinité ont donc été dérivés des produits mensuels du produit GLORYS12v1 résolu en profondeur à l'aide de l'ensemble *CopernicusMarine R*(de Vries 2023). La bathymétrie du produit GLORYS12v1 est dérivée de l'ETOPO1 (Amante et Eakins 2009) pour l'océan profond et du GEBCO8 pour la côte et le plateau continental.

La moyenne de la valeur S_0-50 pour chaque mois pour les années 1999-2020 a été calculée et transformée :

$$climS_0 - 50rc = \sqrt{34.05306 - S_0_50_{x,y}}$$

où 34,05306 est le 99^e quantile de toute la salinité dans la climatologie. Voir la figure A.1. 4 pour l'effet de la transformation sur la répartition des valeurs de salinité. Cette transformation est efficace pour les covariables surdispersées à gauche, mais son échelle est inversée. Par conséquent, les valeurs faibles (élevées) de climS_0-50rc correspondent à des salinités élevées (faibles).

¹ Johnson, C.L., Plourde, S., Brennan, C.E., Helenius, L.K., Le Corre, N. et Sorochan, K.A. En préparation. The southern Gulf of St. Lawrence as a foraging habitat for the North Atlantic right whale. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc.

2.2. MODÈLES DE RÉPARTITION DES ESPÈCES DE *CALANUS*

2.2.1. Modèles de répartition des espèces : modèles additifs généralisés à effets mixtes (GAMM)

Les MRE ont été construits pour chaque espèce séparément en utilisant les données d'abondance et le produit mensuel GLORYS12v1 à la position de la station de zooplancton. L'approche transfrontalière (vaste domaine spatial englobant le plateau continental du nord-est des É.-U. et du Canada) implique qu'un plus grand nombre de covariables environnementales et des habitats de qualités variables ont été considérés par rapport aux modèles précédents de répartition des espèces réalisés dans certaines régions (Albouy-Boyer *et al.* 2016; Grieve *et al.* 2017; Ross *et al.* 2023).

Nous avons élaboré un ensemble de MRE candidats en utilisant des modèles mixtes additifs généralisés (GAMM) pour identifier l'ensemble de covariables qui fournit la meilleure représentation des données dans toute l'aire de répartition des trois espèces de *Calanus* (Wood 2017). L'abondance de chaque espèce ($n\ m^{-2}$) a suivi une répartition Gamma tronquée à zéro (ZAG) avec un lien logarithmique :

$$\begin{aligned} Abondance_i &= ZAG(\pi_i \mu_i) \\ E(Abondance_i) &= \pi_i \times \mu_i \\ var(Abondance_i) &= \frac{\pi_i \times r + \pi_i - \pi_i^2 \times r}{r} \times \mu_i^2 \end{aligned}$$

où π_{sy} est la probabilité de présence pour l'observation i et a une répartition d'erreur de Bernoulli, μ_{sy} est l'abondance compte tenu de la présence et a une répartition d'erreur Gamma. La structure d'erreur du modèle est donc générée en exécutant le modèle deux fois (présence/absences, abondance > 0) et en combinant les prédictions, r étant un facteur d'échelle.

Le modèle 1 était équivalent aux modèles précédemment réalisés séparément avec le PMZA (Albouy-Boyer *et al.* 2016) et EcoMon (Grieve *et al.* 2017) en supposant que les espèces de *Calanus* ne s'adaptent pas aux conditions environnementales locales ou que les mêmes relations environnementales s'appliquent à l'ensemble du domaine spatial (pas de factorisation régionale) :

$$\log it(\pi_i) \text{ or } \log(\mu_i) = s(Mois) + s(SSS) + s(T_{0_50}) + s(Tmin) + s(\log_{10} Bathymétrie) + fAnnée_i$$

Le modèle 2 était similaire au modèle 1, mais supposait que les espèces de *Calanus* pouvaient s'adapter aux conditions environnementales locales ou qu'il existait des processus environnementaux spécifiques touchant l'abondance des espèces dans toutes les différentes régions (avec factorisation régionale, $n=9$, voir la figure A.3. 3) :

$$\log it(\pi_i) \text{ or } \log(\mu_i) = Région + s(Mois \times Région) + s(SSS \times Région) + s(T_{0_50}) + s(Tmin) + s(\log_{10} Bathymétrie) + fAnnée_i$$

Le modèle 3.1 inclut le terme d'interaction de « connectivité » décrit ci-dessus sans factorisation régionale (pas d'adaptation ou de processus locaux) :

$$\log it(\pi_i) \text{ or } \log(\mu_i) = ti(Mois \times latitude \times climS_{0_50rc}) + s(T_{0_50}) + s(Tmin) + s(\log_{10} Bathymétrie) + fAnnée_i$$

Le modèle 3.2 était similaire au modèle 3.1, mais incluait une factorisation régionale limitée (n = 4, voir la figure 1 gauche) pour tenir compte de la prédominance du transport dans quelques régions précises non prises en compte par d'autres covariables :

$$\log it(\pi_i) \text{ or } \log(I) = \text{Région} + ti(\text{Mois} \times \text{latitude} \times \text{climS}_0\text{50rc}) + s(T_0_50) + s(Tmin) \\ + s(\log_{10}\text{Bathymetrie}) + f\text{Année}_i$$

Modèle 3.3 optimisé par 3.2 par winsorisation de Tmin (pmin, Dixon *et al.* 1960) lorsque cela est justifié (*C. finmarchicus* et *C. hyperboreus*, voir ci-dessous) :

$$\log it(\pi_i) \text{ or } \log(\mu_i) = \text{Région} + ti(\text{Mois} \times \text{latitude} \times \text{climS}_0\text{50rc}) + s(T_0_50) \\ + s(pmin(Tmin)) + s(\log_{10}\text{Bathymetrie}) + f\text{Année}_i$$

Dans les modèles 3.2 et 3.3, les quatre régions étaient le sGSL, le banc de Georges (BG), la BCC et une grande région englobant le reste de la zone d'étude (le Golfe milieu Atlantique [GMA], le sud de la Nouvelle-Angleterre [SNA], le GM, Fundy-GM, le PNE, le nord du GSL [nGSL], l'eTN et le plateau continental du Labrador [LAB]) (voir la figure 1 et la Figure A.3. 3).

Dans tous les modèles, l'année était une ordonnée à l'origine aléatoire. La région était une ordonnée à l'origine pour capturer l'effet que les processus de circulation locale non pris en compte par d'autres variables pourraient avoir sur l'abondance. La valeur *s* était une fonction de lissage de régression en plaques minces (*thin plate regression spline*, Wood *et al.* 2003) et la valeur *ti* est une interaction de produit tensoriel pour laquelle nous avons inclus les effets principaux et les interactions de niveaux inférieurs (Wood *et al.* 2006). La dimension de base utilisée pour représenter le terme de lissage (*k*) a été réduite pour éviter un surajustement (Tmin <= 8, T_0_50 <=5, bathymétrie <=5, mois, latitude et climS_0_50sqrt <= 6 pour les effets principaux et <=3 pour l'interaction).

Les valeurs Tmin > 20 °C (*C. finmarchicus*) et >10 °C (*C. hyperboreus*) ont été winsorisés dans le modèle 3.3 (indiqué par pmin) afin de réduire au minimum l'incidence potentielle des occurrences dans des conditions plus chaudes que prévu (en raison de leur transport vers le sud) sur les prédictions dans d'autres régions/mois dans les eaux canadiennes. Cela signifie que les effets partiels et les intervalles de confiance associées de Tmin ont été maintenus constants à des températures supérieures à ces seuils propres aux espèces. Les covariables de température n'ont pas été winsorisées pour *C. glacialis*, car l'occurrence et l'abondance de cette espèce d'eau froide ont généralement montré la relation décroissante attendue avec T_min et T_0-50 (voir la section Résultats). Par conséquent, le modèle 3.3 n'a pas été appliqué à cette espèce.

Les GAM ont été ajustés à l'aide du progiciel *mgcv* (Wood 2017) dans R.

2.2.1.1. Validation et sélection des modèles

L'homogénéité des résidus des prédictions d'abondance de Pearson ($\pi \times \mu$) et la précision des prédictions par rapport aux observations ont été vérifiées graphiquement. Nous avons effectué 10 000 simulations de modèles de π et μ (modèle ZAG) pour évaluer si les modèles étaient adéquats pour l'inflation en zéros des données d'abondance, en particulier pour *C. hyperboreus* et *C. glacialis*. À partir de ces simulations, nous avons calculé les 50^e, 75^e, 85^e et 95^e percentiles des prédictions combinées pour les comparer aux données ajustées. Les simulations ont été réalisées en échantillonnant l'occurrence à partir d'une répartition de Bernouilli et l'abondance à partir d'une répartition Gamma avec des paramètres de répartition dérivés de notre MRE (Zuur et Leno 2016).

Les modèles ont été recalculés 100 fois en utilisant 70 % des données originales. À partir des prédictions d'occurrence obtenues, nous avons calculé la statistique sur la qualité vraie moyenne (True Skill Statistics, TSS = sensibilité + spécificité - 1) (Allouche *et al.* 2006) en

utilisant le progiciel R « PresenceAbsence » (Freeman et Moisen 2008). Pour le modèle d'abondance, nous avons calculé l'écart hors échantillon pour les 30 % de données retenues en utilisant le code de Pederson *et al.* (2019). Le TSS et l'écart expliqué ont également été calculés sur le modèle ajusté avec 100 % des données.

La validation propre à la région a été effectuée à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson entre les moyennes mensuelles/annuelles des prédictions et des observations. La sélection des modèles a été effectuée à l'aide du critère d'information d'Akaike (AIC) et des corrélations dans chaque région. Le meilleur modèle devrait donner de bons résultats dans la plupart des régions.

Les prédictions d'abondance ont été faites à une échelle temporelle mensuelle-annuelle en utilisant la grille spatiale GLORYS12v1 (0,083 x 0,083 degré). L'ordonnée d'origine aléatoire de l'année a été incluse dans les prédictions.

2.2.2. Incertitude des paramètres des MRE

Nous avons estimé l'incertitude de l'abondance totale prédite des espèces de *Calanus* à l'aide d'une approche basée sur la simulation (Miller *et al.* 2022). 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). À partir des modèles originaux, nous avons extrait la matrice de prédiction linéaire (lpmatrix) pour chaque tranche de temps (n = 264; 12 mois*22 ans) des grilles de prédiction GLORYS12v1. Pour chaque simulation et tranche de temps, nous avons obtenu la réponse attendue ($\pi \times \mu$) pour chaque cellule de la grille de prédiction par la multiplication de la valeur lpmatrix et des paramètres simulés. La multiplication de π et μ suppose qu'ils sont indépendants (pas de covariance). Pour chaque cellule, les 1 000 simulations pour toutes les années ont été regroupées par mois, puis la variance a été calculée pour chaque mois et pour chaque espèce. Pour fournir l'incertitude sur l'abondance totale des espèces de *Calanus*, nous avons additionné la variance des trois espèces en supposant que les GAMM propres aux espèces étaient indépendants. L'incertitude qui en résulte est exprimée par le coefficient de variation (CV) et tient compte à la fois de l'incertitude relative aux paramètres et de la variation interannuelle de la climatologie.

2.3. MODÈLE BIOÉNERGÉTIQUE D'ALIMENTATION DE LA BALEINE NOIRE

2.3.1. Conversion de l'abondance de plusieurs espèces dans la colonne d'eau en une biomasse commune.

Les *C. finmarchicus*, *C. glacialis* et *C. hyperboreus* diffèrent par leur taille, le poids corporel individuel de *C. hyperboreus* étant 6 à 10 fois supérieur à celui de *C. finmarchicus*. Pour construire une couche de proies à multi-espèces à partir des prédictions d'abondance propres aux espèces, les prédictions d'abondance des GAMM doivent donc être converties en une unité commune, la biomasse. Nous avons utilisé le T_0-50 de GLORYS12v1 et les équations entre la température et le poids en carbone des stades CIV, CV, et CVI de *C. finmarchicus* de Campbell et ses collaborateurs (2001) (tableau A.2. 1). Nous avons considéré T_0-50 pendant la période de développement de la nouvelle génération au cours de laquelle la taille du corps aux derniers stades est déterminée : De mai à août pour *C. finmarchicus*, et de mai à juin pour *C. hyperboreus* et *C. glacialis*. Nous avons ensuite déterminé le poids en carbone individuel des deux plus grandes espèces de *Calanus* en utilisant des facteurs d'échelle calculés à partir des différences de poids corporel individuel moyen propre à l'espèce et au stade, qui se situaient entre 1,6-2,5 et 5-8 pour *C. glacialis* et *C. hyperboreus* respectivement (Plourde *et al.* 2019, Helenius *et al.* 2023). Pour convertir le poids du carbone en poids sec individuel total, nous avons supposé que le carbone représente 52 % du poids sec individuel 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 des poids secs individuels irréalistes à des températures extrêmement élevées ou basses, les poids corporels estimés ont été contraints de ne pas dépasser les quantiles inférieurs de 10 % et supérieurs de 90 % des observations sur le terrain (Helenius *et al.* 2023, 2024). Pour tenir compte des variations de la composition par stade sur le poids sec du stade CIV-CVI, nous avons utilisé l'abondance relative mensuelle par stade (%) des stades CIV, CV et CVI des trois espèces de *Calanus* dans les 7 régions canadiennes (r dans l'éq. ci-dessous) (figure A.2. 2).

La biomasse propre à l'espèce, s, pour chaque cellule, c, au mois, m, et à l'année, y, a été obtenue :

$$DW_{s,c,m,y} = IDWCIV_{s,c,m,y} \times \%CIV_{s,r,m} + IDWCV_{s,c,m,y} \times \%CV_{s,r,m} + IDWCVI_{s,c,m,y} \times \%CVI_{s,r,m}$$

2.3.2. Modèle de répartition verticale des espèces de *Calanus*

La répartition verticale des espèces de *Calanus* a été précédemment décrite à l'aide des GAM dans le GSL et dans l'est et l'ouest du PNE (Plourde *et al.* 2019; Lehoux *et al.* 2020). Comme *C. finmarchicus* et *C. glacialis* n'ont pas toujours été différenciés dans l'analyse des premiers échantillons, ils ont été combinés dans les GAM de répartition verticale afin de maximiser l'utilisation de l'ensemble de données existant. Les GAM ont été ajustés pour chaque région séparément en suivant cette équation avec une répartition bêta :

$$pDW_{cum} = ti(\%Z \times Mois) + ti(Z) + ti(\%Z \times Z)$$

où pDW_{cum} est la proportion cumulative de poids sec provenant de la partie supérieure de la colonne d'eau, Z est la profondeur de la station et %Z est le pourcentage de la colonne d'eau échantillonnée.

Dans cette étude, les données du GM ont été ajoutées et un GAM a également été ajusté pour le GM (tableau A.4.1, Krumhansl *et al.* 2018). Dans ce GAM, Z a été transformé en logarithme pour tenir compte de la plus grande gamme de bathymétrie couverte par l'échantillonnage à stratification verticale dans le GM. Nous n'avons pas construit de GAM pour l'eTN-LAB, car les stations étaient principalement situées dans la zone de la pente avec une résolution d'échantillonnage verticale grossière (>100 m d'épaisseur). Pour la couverture d'échantillonnage saisonnière et stratifiée en profondeur, voir la figure A.1. 2. La période de la journée (jour/nuit) n'a pas été prise en compte, car le nombre de stations par mois était parfois trop faible pour ajouter ce facteur au modèle.

2.3.3. Construction du paysage de proies en 3D

Le paysage en 3D des proies a été utilisé pour tenir compte de la « disponibilité » des proies (voir Sorochan *et al.* 2021), car la profondeur des proies est censée limiter le succès d'alimentation des baleines noires à des profondeurs supérieures à 150 m dans le modèle bioénergétique d'alimentation (Gavrilchuk *et al.* 2021). La répartition en 3D a été construite en utilisant les prédictions de biomasse pour chaque espèce séparément. Un modèle de répartition verticale (GAM) propre à l'espèce et à la région a été utilisé pour prédire la répartition verticale mensuelle par tranches de 10 m d'épaisseur, conformément à Plourde *et al.* (2019) et Lehoux *et al.* (2020). La répartition verticale de *C. hyperboreus* dans la zone du programme EcoMon a été réalisée en utilisant le GAM de répartition verticale du dans la région la plus proche, c'est-à-dire l'ouest du PNE (Plourde *et al.* 2019). Nous avons utilisé les répartitions verticales du GSL pour les prédictions dans le LAB et eTN. Les paysages marins en 3D (mois, position géographique, densité des espèces sur une épaisseur de 10 m) de la densité propre à la

profondeur de chaque espèce (g m^{-3}) ont ensuite été convertis en densité énergétique propre à la profondeur (kJ m^{-3}) à l'aide d'une densité énergétique constante des espèces de *Calanus* ($27,9 \text{ kJ g}^{-1}$, Davies *et al.* 2012) en supposant que la variation latitudinale de l'énergie totale dépendrait principalement des différences d'abondance et de poids corporel (Helenius *et al.* 2023). Voir la figure A.4. 1 pour la couverture spatiale des GAM propres aux régions utilisées pour construire le paysage préalable.

2.3.4. Application du modèle bioénergétique d'alimentation de la baleine noire

Nous avons utilisé le modèle bioénergétique d'alimentation de la baleine noire élaboré par Gavrilchuk et ses collaborateurs (2020, 2021). Ce modèle résume les connaissances disponibles sur le comportement d'alimentation et la bioénergétique de la baleine noire. Il tient compte de l'énergie acquise (E_{in}), qui peut varier en fonction de la densité des proies et du temps consacré à l'alimentation en profondeur. L'énergie acquise devrait diminuer à une profondeur $> 150 \text{ m}$ parce que le temps de recherche de nourriture (heures jour^{-1}) diminue (voir la figure 6 dans Gavrilchuk *et al.* 2020). Le coût énergétique (E_{out}) est déterminé par l'état de la femelle et augmente progressivement au repos, en gestation et en lactation. Dans notre étude, nous avons utilisé les paramètres moyens des femelles enceintes dans l'équation E_{out} (voir Lehoux *et al.* 2020 pour plus de détails) et donc E_{out_preg} était spatialement et temporellement invariant dans notre approche. L'utilisation de paramètres pour les femelles au repos ou en lactation n'aurait fait que diminuer (au repos) ou augmenter (en lactation) E_{out} .

Nous avons calculé E_{in} pour chaque espèce de *Calanus* et additionné les valeurs E_{in} obtenues à partir de la biomasse totale de *Calanus* dans chaque couche de 10 m de chaque pas de temps pour les années y et les mois m et les cellules c (E_{in_cal}). Le bilan énergétique de la baleine noire (E_{net}) a été calculé comme suit :

$$E_{net} = \frac{E_{in_cal} - E_{out_preg}}{E_{out_preg}} + 1$$

Nous avons rapporté l' E_{net} à la couche de profondeur où l' E_{net} a été maximisé pour chaque cellule et chaque pas de temps (E_{net} optimal) (Lehoux *et al.* 2020) et nous avons calculé la moyenne et le coefficient de variation de l' E_{net} pour chaque cellule et chaque mois au cours de la période 1999-2020. Nous avons ajouté une constante de 1 à l' E_{net} pour faciliter l'interprétation.

Puisque nos MRE ont prédit la réponse moyenne des espèces de *Calanus* aux covariables et n'ont pas tenu compte des processus de regroupement local (see above, Sorochan *et al.* 2021), les valeurs d' E_{net} présentées dans ce document doivent être considérées comme relatives et être utilisées pour identifier les zones et les mois durant lesquels les quantités de proies disponibles pour être agrégées et donc les conditions d'alimentation seraient meilleures qu'ailleurs. Pour mettre en évidence ces zones et leur persistance saisonnière, nous avons également sélectionné des sites où les valeurs d' E_{net} étaient plus importantes que les quantités de 90 % des valeurs d' E_{net} par région (sept régions canadiennes) et par mois sur la climatologie 1999-2020.

3. RÉSULTATS

3.1. RÉPARTITION DES ESPÈCES DE *CALANUS* ET MODÈLES DE RÉPARTITION VERTICALE

3.1.1. Rendement et exactitude des modèles candidats

Le modèle 1 [pas de factorisation régionale et pas de terme de « connectivité »] a montré les plus mauvaises mesures de rendement à la fois dans les modèles Bernoulli et Gamma pour les trois espèces de *Calanus* (Tableau 2). Le modèle 2 [9 régions et aucun terme de « connectivité »] a montré un rendement légèrement meilleur pour certaines mesures par rapport aux modèles 3.1-3.3, qui incluaient le terme de « connectivité », pour *C. finmarchicus*. Les modèles 3.2 et 3.3 (quatre régions, terme « connectivité ») ont démontré des rendements supérieurs pour *C. hyperboreus* (tableau 2). Le modèle 3.3 (winsorisation de T_min) a amélioré la mesure « hors échantillon » par rapport au modèle 2 pour *C. finmarchicus* et *C. hyperboreus* (tableau 2). Par conséquent, le modèle 3.3 (quatre régions, terme « connectivité », winsorisation T_min) a montré les meilleurs rendements dans l'ensemble. Les modèles 3.1 et 3.2 étaient similaires pour *C. glacialis*.

Les modèles 1 et 3.1 (pas de factorisation régionale) montraient en général le moins bon rendement pour prédire le niveau moyen d'abondance observé des trois espèces de *Calanus* avec les plus grandes différences dans le BG, le BCC, le sGSL et le nGSL (figure A.3. 4). Le modèle 2 (9 régions) était le meilleur pour prédire l'abondance moyenne dans la plupart des régions, mais il a donné lieu à des ordonnées à l'origine propres à chaque région, ce qui aurait généré des limites interrégionales nettes et irréalistes dans les prédictions d'abondance (non montré). Les prédictions des modèles 3.2 et 3.3 (quatre régions avec le terme « connectivité ») sont généralement comparables à celles du modèle 2 dans les eaux canadiennes, avec l'avantage supplémentaire de limiter le problème des frontières régionales nettes et irréalistes dans les prédictions (non illustré).

Les coefficients de corrélation ont été calculés en utilisant les moyennes annuelles et mensuelles de l'abondance observée et prédite pour chaque modèle et chaque région (tableau 3). Pour les sept régions des eaux canadiennes, les modèles 3.2 et 3.3 ont montré des corrélations similaires ou plus élevées que le modèle 2 dans cinq, quatre et deux régions pour *C. finmarchicus*, *C. hyperboreus* et *C. glacialis* respectivement, cette dernière espèce se trouvant dans des régions de plus grande abondance (eNL, LAB) (tableau 3). Tous les modèles candidats de *C. hyperboreus* ont montré des corrélations plus faibles dans le nGSL, principalement en raison de grandes divergences entre l'abondance observée et prédite de janvier à mars, une période où l'effort d'échantillonnage est très faible dans la région (figure A.1. 1). Le même exercice a révélé que la corrélation plus faible pour *C. finmarchicus* dans le sGSL par les modèles 1, 3.2 et 3.3 était liée à une sous-estimation de l'abondance de mai à juillet (figure A.3. 6). L'examen des patrons interannuels a montré que le modèle 3 identifiait les patrons interannuels de basse fréquence, mais il ne parvenait pas à prédire les grands changements d'une année sur l'autre parfois observés (figure A.3. 7). Il convient de souligner que ces différences importantes peuvent résulter aussi bien de variations dans l'effort d'échantillonnage et de l'incertitude des observations que de processus qui n'ont pas été examinés dans la formulation du modèle.

Dans l'ensemble, le modèle 3.3 a montré des mesures de rendement similaires ou meilleures que le modèle 1, le modèle 2, les modèles 3.1 et 3.2, et il a amélioré l'exactitude des prédictions dans la plupart des régions pour *C. finmarchicus* et *C. hyperboreus* tout en limitant l'apparition de discontinuités marquées aux limites des régions associées au modèle 2. Pour *C. glacialis*, le

modèle 3.1 était équivalent aux modèles 2 et 3.2 tout en évitant de générer des frontières nettes dans les prédictions entre les régions. Les modèles 3.3 (*C. finmarchicus*, *C. hyperboreus*) et 3.1 (*C. glacialis*) ont donc été sélectionnés comme les meilleurs modèles et utilisés pour prédire la climatologie saisonnière de l'abondance des espèces de *Calanus* et l'habitat d'alimentation potentiel des baleines noires dans les eaux canadiennes.

3.1.2. Effets des covariables dans le meilleur modèle

Les termes et covariables du modèle 3.3 étaient généralement d'une grande importance, le terme « connectivité » étant la seule covariable non importante dans le modèle Bernoulli de *C. finmarchicus*. Les résidus des modèles Gamma présentaient certains patrons, entraînant une surestimation des valeurs d'abondance très faibles et une sous-estimation de l'abondance (figure A.3. 1), plus particulièrement dans les percentiles < 50^e et > 95^e (ce qui devrait être dû à l'effet de lissage). Les simulations de la répartition ZAG ont montré que ces surestimations ou sous-estimations étaient de < 5 000, < 500, < 3 000 N m⁻² pour *C. finmarchicus*, *C. glacialis* et *C. hyperboreus* respectivement (figure A.3. 2-A.3.4). Tous les modèles ont respecté la prémisses d'homogénéité des résidus (figure A.3. 2-A.3.4).

La forme des fonctions de lissage de T₀₋₅₀ et T_{min} diffère selon les espèces de *Calanus* (figure 3, tableau 4). Une valeur T₀₋₅₀ inférieure à 11,8° a eu un effet positif sur la probabilité d'occurrence de *C. finmarchicus* (Bernoulli), tandis que l'effet sur l'abondance était en forme de dôme et positif entre 3,3 et 14,8 °C. La valeur T_{min} a montré un effet positif sur l'occurrence et l'abondance au-dessus de 3,4 °C et entre 3,7 et 8,7 °C, respectivement. Dans les modèles de *C. glacialis* et de *C. hyperboreus*, l'effet positif des valeurs T₀₋₅₀ et de T_{min} a été observé à des valeurs considérablement plus basses que pour *C. finmarchicus*, mais les fonctions de lissage ont montré une plus grande incertitude à haute température pour les modèles de Bernoulli pour *C. glacialis*. Cette plus grande incertitude et le fait que les fonction de lissage de T_{min} dans de nombreux modèles ont montré des effets positifs à des températures élevées devraient être interprétés comme une indication du transport vers le sud des espèces de *Calanus* dans des conditions environnementales sous-optimales.

L'effet (fonctions de lissage) de la latitude, du mois et de la valeur ClimS₀₋₅₀sq² varie généralement d'une espèce à l'autre (figure 4, tableau 4). Le principal effet positif de la latitude sur l'abondance s'est produit à des valeurs plus faibles pour *C. finmarchicus* (43-44° N) que pour *C. hyperboreus* (> 47° N) et *C. glacialis* (centré sur 50° N). L'effet positif de la valeur ClimS₀₋₅₀rc a également montré des différences marquées entre les espèces, *C. finmarchicus* et *C. hyperboreus* étant positivement associés à des masses d'eau plus salées (32,5-34,0, climS_{0_50}rc = 1,25-0,25) et plus douces (< 31,9 PSU, climS_{0_50}rc = 1,47) respectivement, et *C. glacialis* partageant les deux affinités (29,4-31,8 PSU, climS_{0_50}rc = 2,15-1,5). Par conséquent, le terme « connectivité » (latitude*mois* ClimS₀₋₅₀rc) a montré des patrons spatio-temporels propres aux espèces, englobant souvent plusieurs régions et indiquant différentes voies de « connectivité » (modèles Gamma, figure 5). Par exemple, le terme « connectivité » a montré un effet positif sur l'abondance de *C. finmarchicus* depuis le Grand Banc (eTN), sur le PNE et dans les eaux des États-Unis de mai à août. Pour *C. glacialis*, l'effet positif a été principalement observé dans les régions du LAB, de l'eTN et du nGSL de mai à octobre et limité au plateau extérieur du LAB et dans la partie septentrionale de l'eTN en hiver et à la fin de l'automne. Enfin, le terme « connectivité » était positif pour *C. hyperboreus* de la fin du printemps à octobre dans la région nGSL, sGSL et PNE, mais aussi sur le plateau intérieur du LAB, et l'eTN de mai à septembre.

3.1.3. Modèles spatiaux et saisonniers dans l'incertitude des paramètres et des prédictions des meilleurs MRE des espèces de *Calanus*

Les variations spatiales mensuelles de l'incertitude des paramètres des MRE et des prédictions d'abondance mensuelle dans le domaine de modélisation transfrontalier sont présentées dans la figure 6. Dans les eaux canadiennes, l'incertitude était nettement plus grande dans la partie nord du domaine spatial de la région du LAB (Figure 6). Une incertitude très élevée a également persisté au fil des mois à la limite sud du domaine spatial transfrontalier (c.-à-d. en dehors des eaux canadiennes) et dans une zone côtière du sGSL (figure 6). Ailleurs dans les eaux canadiennes, l'incertitude était faible et assez uniformément répartie dans le temps et l'espace, avec des valeurs légèrement plus élevées pour le PNE, le sGSL, le nGSL et l'est du LAB en septembre-octobre par rapport aux autres mois (figure 6).

L'examen de l'incertitude pour chaque covariable permet d'expliquer les causes de l'incertitude élevée associée au terme « connectivité » dans certaines régions. En particulier, une grande incertitude était commune aux extrémités du domaine spatial (latitude) et aux valeurs extrêmes de ClimS_0-50rc (salinité faible/élevée) (figure 4).

3.1.4. Modèles de répartition verticale

Le GAM de répartition verticale du stade CIV-CVI de *C. finmarchicus* dans le GOM a donné des résultats similaires aux modèles construits dans d'autres régions (Plourde *et al.* 2019). L'écart expliqué est élevé (92,5 %) et les diagnostics du modèle sont similaires à ceux des modèles précédents (tableau A.4. 1). Le GAM a donné de bons résultats lors de la validation croisée. La corrélation et un modèle linéaire entre les prédictions et les observations ont montré des rendements similaires lorsque le GAM a été ajusté sur 70 % ou 100 % des données, ce qui suggère que le GAM n'a pas été surajusté. La valeur %Z était importante pour chaque mois, et la valeur Z, et l'interaction entre %Z et Z était surtout importante pendant l'automne, lorsque *C. finmarchicus* est dans diapause et est donc plus limité par la profondeur du fond (tableau A.4. 1). Les fonctions de lissage du GAM sont présentées dans la figure A.4. 3 et figure A.4. 4. Le GAM était conforme à l'hypothèse d'homogénéité des résidus, et la réponse était généralement prédite avec exactitude, sans biais évident.

3.2. VARIATIONS MENSUELLES ET SPATIALES DE L'ABONDANCE ET DE LA BIOMASSE DES ESPÈCES DE *CALANUS*

Des variations saisonnières et régionales marquées ont été observées dans l'abondance prédite des trois espèces de *Calanus* dans la colonne d'eau au cours de la période 1999-2020 (figure 7). L'abondance de *C. finmarchicus* a généralement diminué du sud (Fundy-GM, BG) au nord (eTN), avec une exception notable dans le LAB au printemps (figure 7, volet supérieur). Les pics d'abondance ont généralement eu lieu plus tôt (fin du printemps-début de l'été) dans le sud que dans le nord (fin de l'été-automne), avec une fois de plus un écart par rapport à ce patron observé dans le LAB au printemps. Il est à noter que le LAB a montré la plus grande incertitude dans les paramètres (prédictions) des modèles (voir ci-dessus, figure 6). *C. glacialis* et *C. hyperboreus*, les deux espèces arctiques, ont montré la réponse opposée avec une abondance plus faible dans le sud (Fundy, BG, PNE) par rapport au nord (sGSL, nGSL, eTN, LAB) (figure 7, volets du milieu et du bas). Ces espèces ont également montré un décalage dans le temps du pic saisonnier d'abondance dans le nord (figure 7, volet du bas). Au-delà des patrons généraux décrits ci-dessus, une caractéristique clé de la répartition des espèces de *Calanus* était la plus grande abondance de *C. hyperboreus* dans le GSL que dans d'autres régions, y compris l'eTN et le LAB dans le nord (figure 7, volet inférieur).

Les différences régionales et saisonnières dans la biomasse de la colonne d'eau de *Calanus* (g m^{-2}) ont montré des patrons similaires à ceux décrits précédemment en utilisant l'abondance propres aux espèces (figure 8). La biomasse de la colonne d'eau des espèces de *Calanus* était plus élevée dans le nGSL, le LAB et Fundy-GM, un peu plus faible dans le sGSL, le PNE et l'TN, et la plus faible dans le BG (figure 8). Là encore, on observe un gradient général du sud vers le nord dans la fenêtre du maximum saisonnier de la biomasse de *Calanus* entre le BG (mai) et le nGSL (juillet), alors qu'un patron saisonnier différent a été observé dans l'eTN et le LAB (figure 8).

3.3. COUCHE DE PROIES D'ESPÈCES MULTIPLES EN 3D ET HABITAT D'ALIMENTATION POTENTIEL DES BALEINES NOIRES

3.3.1. Variations saisonnières et régionales de la répartition verticale des espèces de *Calanus*

La répartition verticale prédite de la biomasse des espèces de *Calanus* variait selon les saisons (mois), les régions et la gamme bathymétrique (figure 9). L'occurrence d'une répartition verticale bimodale était une caractéristique commune chez *C. finmarchicus* et *C. glacialis* d'une région à l'autre et d'une saison à l'autre, avec la proportion de la population associée au mode peu profond diminuant généralement au fur et à mesure que la saison progressait (figure 10). La répartition verticale bimodale chez *C. hyperboreus* était peu fréquente et limitée au début de l'été (figure 10). Dans toutes les régions et pour toutes les espèces, la profondeur du mode profond dans la répartition verticale augmentait avec la profondeur du fond du site, mais le mode profond de *C. finmarchicus* et de *C. glacialis* était généralement observé moins profondément dans le GSL par rapport à l'est du PNE, à l'ouest du SS et au GOM, une tendance qui n'a pas été observée pour *C. hyperboreus* (figure 9). La profondeur du fond a eu un effet important sur la densité relative maximale du mode profond, le maximum étant 4 à 5 fois plus élevé dans les zones peu profondes (60-100 m) que dans les zones profondes (300-450 m) (figure 9).

3.3.2. Patron saisonnier de la profondeur de la densité des proies et d'alimentation optimale

Nous avons comparé les rendements de notre approche de modélisation bioénergétique en 3D des proies et de la baleine noire pour estimer la profondeur optimale avec les résultats rapportés sur différents sites d'alimentation au début des années 2000 (Baumgartner *et al.* 2017) (tableau 5). Notre approche de modélisation a prédit une profondeur d'alimentation réaliste dans la BCC en mars, dans la baie de Fundy (Grand Manan) en août, dans le bassin Roseway en septembre-octobre et sur Jeffrey's Ledge à la fin de l'automne (tableau 5). Cependant, notre modèle n'a pas bien prédit la profondeur d'alimentation dans le GSC en mai-juin (tableau 5).

L'habitat d'alimentation potentiellement optimal (E_{net}) de la baleine noire était généralement plus favorable dans le sGSL et nGSL tout au long de l'année, avec des valeurs élevées équivalentes dans le LAB à la fin de l'hiver et au début du printemps, et des valeurs légèrement inférieures dans la région de Fundy-GM et le PNE (figure 10). L' E_{net} a généralement atteint son maximum en juin-juillet dans les eaux canadiennes, mais avec un maximum saisonnier plus précoce en avril et mai dans le LAB et le nGSL respectivement (figure 10). Il convient de souligner que les prédictions d'abondance à l'extrémité nord de la région du LAB présentent le niveau d'incertitude le plus élevé. L' E_{net} dans l'eTN était généralement faible, mais plus élevé par rapport au BG, à la région Fundy-GM, au PNE et au LAB en octobre-novembre (figure 10).

La contribution de *C. finmarchicus* à l'habitat d'alimentation potentiel (E_{net}) de la baleine noire variait selon les régions et les saisons (figure 11). La contribution de *C. finmarchicus* à l' E_{net} était proche de 100 % dans le BG et dans la région Fundy-GM, la plus faible (21-42 %) dans le nGSL et le sGSL, et intermédiaire (65-70 %) dans le PNE, l'eTN et le LAB (figure 11). Sur le plan saisonnier, la contribution de *C. finmarchicus* était généralement la plus faible de mai à septembre, mais avec des variations régionales dans le calendrier et la durée. Elle a ensuite augmenté dans les eaux canadiennes, atteignant son maximum saisonnier entre septembre (PNE, sGSL) et novembre (LAB) (figure 11).

3.3.3. Climatologie spatiale mensuelle et variabilité de l'habitat d'alimentation

Dans le BG et la région Fundy-GM (figure 12), l' E_{net} était plus élevé dans les zones profondes de la partie nord-est du GM (y compris juste au nord-est du GB) de juin à août, avec un E_{net} légèrement plus élevé à Grand Manan par rapport au reste de l'extérieur de la baie de Fundy. Cette période de forte E_{net} correspondait à une variabilité interannuelle faible et élevée en juin et juillet-août respectivement (figure 15). Dans le PNE, l' E_{net} était plus élevé dans la partie intérieure orientale du PNE le long du Cap-Breton et dans le chenal du Nord-Est au nord-est du BG en mai et en juin (figure 12). Plus tard dans la saison, l' E_{net} était généralement plus important dans la partie occidentale du PNE et dans le bassin Roseway en juillet-août-septembre, et dans une moindre mesure au large du sud-ouest de TN (figure 12). Dans le PNE, la variabilité interannuelle de l' E_{net} était plus importante de juillet à décembre à la limite extérieure du plateau et au large de la côte sud de TN (figure 15).

Dans le GSL (figure 13), les valeurs les plus élevées d' E_{net} étaient limitées au nord-ouest en avril et en mai, avec des valeurs un peu plus élevées au sud de l'île d'Anticosti en mai. L' E_{net} a ensuite été plus important dans le sGSL (Gaspé et vallée de Shediac) de juin à août, et au nord de l'île d'Anticosti de juillet à septembre. En septembre, l' E_{net} était le plus important autour de la moitié ouest de l'île d'Anticosti et le long de la côte nord-ouest du GSL; l' E_{net} élevé était alors principalement limité à l'estuaire et au nord du oGSL dans des zones plus profondes le long de la pente des chenaux profonds. Habituellement, l' E_{net} variait davantage dans les zones côtières peu profondes du sGSL et le long du nord-ouest de l'eTN, ce qui correspond aux régions où les valeurs de l' E_{net} sont très faibles. Inversement, les zones d' E_{net} supérieur correspondent généralement à une faible variabilité interannuelle (figure 15).

Dans l'eTNL (figure 14), l' E_{net} était généralement plus important au large en avril et juin, y compris au bonnet Flamand en mai. L' E_{net} a ensuite été plus important au large de la côte nord-est de TN de juin à août (figure 14). L' E_{net} le plus élevé de l'automne s'est produit sur le versant nord-est des Grands Bancs. Dans le LAB (figure 14), l' E_{net} était élevé de mars à mai sur le plateau externe à l'extrémité nord de la région, une région caractérisée par une grande incertitude dans les paramètres et les prédictions des modèles (voir la figure 6). L' E_{net} était alors élevé sur le plateau intérieur de mai à août, en continuité avec l'eTN dans le sud, et est resté faible par la suite. La variabilité était la plus grande sur les Grands Bancs, une zone de faible E_{net} pendant la majeure partie de l'année, et dans certaines zones sur le versant du bonnet Flamand d'avril à septembre (figure 15).

4. DISCUSSION

4.1. MODÈLES DE RÉPARTITION DES ESPÈCES

Les meilleurs MRE (modèle 3.3) incluaient le terme « connectivité » et supposaient que les réponses des espèces de *Calanus* aux covariables étaient généralement les mêmes dans l'ensemble du domaine (pas d'adaptation selon les régions) avec une certaine factorisation

dans les régions où le transport est connu pour être un facteur dominant de l'abondance. Le modèle 3.3 a permis d'obtenir une bonne exactitude des prédictions dans la plupart des régions, tout en affichant des rendements similaires ou supérieurs à ceux du modèle 2, sans créer de frontières artificielles entre les régions. En particulier, le modèle 3.3 a donné de bons résultats en considérant une vaste zone comprenant la GMA, le SNA, le GM, le PNE, le nGSL, l'eTN et le LAB comme une seule région « transfrontalière ». Par conséquent, le rendement supérieur du modèle 3.3 a démontré l'importance de considérer des covariables, comme la « connectivité » à des échelles correspondantes aux processus et les covariables environnementales touchant les populations d'espèces de *Calanus*. La construction des modèles dans les domaines canadien et américain (transfrontalier) a également permis de tenir compte d'une gamme élargie de conditions environnementales, comme T₀₋₅₀ et T_{min}, par rapport aux MRE précédents (Albouy-Boyer *et al.* 2016; Grieve *et al.* 2017), ce qui devrait réduire au minimum le niveau d'incertitude des prédictions des modèles (Austin 2007, Waldock *et al.* 2022).

Le terme « connectivité » semble bien illustrer les patrons réalistes d'influence des différentes masses d'eau dans les eaux canadiennes. L'effet de la latitude diffère fortement d'une espèce à l'autre, ce qui suggère des régions sources distinctes avec des patrons de « connectivité » correspondant à notre compréhension des voies de transport des espèces de *Calanus* sur le plateau continental de l'est du Canada. Nos résultats suggèrent que *C. finmarchicus* et *C. glacialis* à l'eTN et dans le nGSL sont principalement liés aux sources et au transport provenant du LAB (Pepin *et al.* 2013). En revanche, il a été démontré que le *C. finmarchicus* dans les eaux centrales et occidentales du PNE était davantage associé à des sources hauturières provenant des eaux du plateau externe ou du talus (Head *et al.* 1999). Finalement, les patrons de connectivité démontrés pour *C. hyperboreus* ont mis en évidence le nGSL comme source principale pour le sGSL et le PNE dans un système hautement connecté sous l'influence de l'écoulement d'eau douce du fleuve St-Laurent (Sameoto et Herman 1992, Brennan *et al.* 2021; Le Corre *et al.* 2023), et l'intérieur du LAB comme principales sources en amont pour cette espèce dans l'eTN (Head *et al.* 2003). Le terme « connectivité » a donc tenu compte de certains aspects des processus advectifs à grande échelle qui auraient été explicitement examinés lors de l'utilisation de modèles bio-physiques couplés plus complexes (voir Zakardjian *et al.* 2003; Maps *et al.* 2011; Pépin *et al.* 2013).

Les meilleurs MRE (modèle 3.3) ont cependant inclus un niveau intermédiaire de factorisation régionale nécessaire pour prédire des niveaux d'abondance réalistes dans des régions précises où le transport est un facteur dominant de l'abondance de *Calanus* (sGSL, BCC). Cependant, la formulation du modèle n'a pas toujours été suffisante pour prédire l'abondance et ses variations interannuelles importantes, comme l'illustrent les corrélations plus faibles obtenues entre l'abondance prédite et observée dans le sGSL (*C. finmarchicus*) et le nGSL (*C. hyperboreus*) (figure A.3. 7, figure A.3. 8). Les courants de surface et le transport de *Calanus* dans les systèmes fortement advectifs, comme le nGSL-sGSL et dans l'ouest du GM-BCC sont déterminés par le forçage atmosphérique-océanique de surface s'appliquant à des résolutions temporelles et spatiales plus élevées que celles qui peuvent être examinées de manière réaliste par nos MRE (Jiang *et al.* 2007; Maps *et al.* 2011; Brennan *et al.* 2021; Le Corre *et al.* 2023). Cette « déconnexion » entre les prédictions et les observations était particulièrement importante au début de la saison, lorsque le transport est le plus fort, nos MRE donnant de bien meilleurs résultats plus tard dans la saison.

Les MRE sont des outils utiles pour inférer des patrons dans les périodes et dans des zones où les données sont rares. Toutefois, il est recommandé d'effectuer des prédictions et des inférences à des échelles comprises dans celles considérées comme bien résolues par les modèles, qui sont déterminées par les caractéristiques temporelles et spatiales des données

utilisées pour les construire (Austin *et al.* 2007; Waldock *et al.* 2022). L'effort d'échantillonnage dans le PMZA est très inégal, la plupart des efforts étant déployés lors d'études spatiales réalisées deux ou trois fois par année sur des sections hydrographiques peu étendues, tandis que quelques stations d'échantillonnage à haute fréquence sont visitées une ou deux fois par mois (figure 1, figure A.1. 1). Dans le programme EcoMon, l'effort d'échantillonnage est mieux réparti dans l'espace, mais reste très inégal entre les mois, les années et les régions (figure A.1. 1). Sur la base de ces caractéristiques, nous avons déterminé que la prédiction de l'abondance des espèces de *Calanus* à l'échelle mensuelle était raisonnable et dans les limites de la capacité de notre MRE. La même approche de précaution limitant les prédictions à une échelle mensuelle a été appliquée aux GAM décrivant la répartition verticale des espèces de *Calanus*.

Malgré l'utilisation conservatrice de nos MRE à l'échelle mensuelle, l'incertitude des paramètres du modèle (et des prédictions d'abondance) était parfois élevée aux extrémités nord (plus froides) et sud (plus chaudes) de notre domaine spatial (LAB, GMA) (figure 6). Les incertitudes plus importantes dans les fonctions de lissage et les prédictions associées aux valeurs situées à l'extrémité de l'espace des covariables sont une caractéristique commune des MRE (voir Albouy-Boyer *et al.* 2016; Grieve *et al.* 2017), ce qui indique que les prédictions dans ces zones doivent être interprétées avec prudence.

4.2. COUCHE DE PROIES MULTI-ESPÈCES EN 3D

Nos GAM décrivant les variations mensuelles et régionales de la répartition verticale des espèces de *Calanus* correspondent bien à leur cycle de vie et à leur phénologie à l'échelle mensuelle. En ce qui concerne *C. finmarchicus*, la répartition verticale bimodale tient compte de la production de générations multiples (présence d'individus actifs et au repos pendant la plupart des mois) ou un mélange de deux espèces (*C. finmarchicus* et *C. glacialis*) avec une phénologie saisonnière différente dans la même catégorie taxonomique considérée dans cet ensemble de données historiques. En ce qui concerne *C. hyperboreus*, qui ne produit qu'une seule nouvelle génération par année, la répartition verticale bimodale observée seulement à la fin du printemps est probablement indicative de la transition d'un état de population caractérisé par des individus actifs et en développement dans la couche de surface à un état dominé par des individus au repos dans les eaux plus profondes (Plourde *et al.* 2003). Le modèle de répartition verticale dans le GM a donné des résultats similaires à ceux d'études antérieures dans les eaux canadiennes, c.-à-d. une répartition verticale bimodale pour *C. finmarchicus* et un fort effet de concentration sur le mode le plus profond lorsque la profondeur du fond est inférieure à la profondeur optimale observée dans les régions plus profondes (bassins profonds, chenaux et pentes) (Krumhansl *et al.* 2018, Plourde *et al.* 2019).

Notre approche de modélisation 3D semble raisonnablement bien fonctionner pour prédire la profondeur potentielle d'alimentation optimale des baleines noires, mais avec une grande différence dans le GSC en mai-juin (tableau 5). On a observé des baleines noires se nourrissant d'agrégations de surface de *C. finmarchicus* dans ce chenal, bien que la répartition verticale de *C. finmarchicus* au printemps puisse varier d'une année à l'autre (Beardsley *et al.* 1996; Durbin *et al.* 1995, Baumgartner *et al.* 2017). Le modèle de répartition verticale du GM prédisait une répartition verticale bimodale en juin, ce qui représentait la moyenne mensuelle de toutes les données recueillies en juin sur plusieurs années dans la région (figure 9). Par conséquent, l'écart entre les prédictions et les observations pourrait résulter de la comparaison d'une valeur moyenne mensuelle avec une répartition verticale discrète de *Calanus* et des événements d'alimentation de la baleine noire. En outre, Baumgartner *et al.* (2017) ont observé des baleines noires se nourrissant dans la couche superficielle même si des densités de proies similaires ou supérieures étaient disponibles plus profondément dans la colonne d'eau, ce qui

suggère que les baleines noires peuvent préférer se nourrir à la surface dans une telle configuration de proies. Une telle préférence comportementale hypothétique n'a pas été paramétrée dans le modèle bioénergétique d'alimentation de la baleine noire et pourrait également expliquer la divergence observée entre les observations et nos prédictions dans le GSC.

4.3. HABITAT D'ALIMENTATION POTENTIEL DE LA BALEINE NOIRE

Notre approche de modélisation intégrée combinant les MRE, les modèles de répartition verticale des proies et un modèle bioénergétique mécaniste de la baleine noire a permis de déterminer avec succès les habitats d'alimentation traditionnellement utilisés (Bassin Roseway et dans une moindre mesure Grand Manan) et plus récemment utilisés dans le sGSL (vallée de Shediac et ses environs) de façon similaire à une analyse précédente sans MRE qui utilisait une climatologie spatiale de la biomasse de *Calanus*, construite à partir d'un ensemble de données historiques indépendantes, mais hétérogènes et des considérations bioénergétiques simplistes d'alimentation la baleine noire (Plourde *et al.* 2019). Nos résultats ont donc démontré la valeur de l'utilisation des MRE des espèces de *Calanus* construits avec les données du PMZA et du programme EcoMon recueillies dans les eaux canadiennes et américaines et sur une large gamme de valeurs de covariables pour faire des prédictions spatiales sur l'abondance et la répartition des *Calanus* dans les zones pauvres en données. Lorsque combinées aux tendances saisonnières et spatiales de l'incertitude des paramètres du modèle, ces prédictions peuvent être faites avec un niveau de confiance adéquat et fournissent donc des données utiles sur les zones d'alimentation potentielles dans le contexte de la gestion de la baleine noire.

Étant donné que nos MRE et nos modèles verticaux prédisent la réponse moyenne des espèces de *Calanus* aux covariables, et qu'ils ne tiennent pas compte des processus d'agrégation locale, (voir plus haut, Sorochan *et al.* 2021), les valeurs de l' E_{net} constamment plus élevées estimées dans la partie ouest de nGSL et du sGSL résultent principalement de la biomasse élevée des espèces de *Calanus* entraînée par un niveau d'abondance régional nettement plus élevé du grand copépode *C. hyperboreus* (figure 7,8), ce qui suggère que les processus d'agrégation se produisant à haute résolution spatiale et temporelle pourraient jouer un rôle plus important dans la formation d'une densité élevée de proies dans d'autres régions. À l'échelle des eaux canadiennes, l' E_{net} doit donc être considéré comme relatif et être utilisé pour déterminer les zones et les mois durant lesquels les conditions d'alimentation sont susceptibles d'être les plus appropriées (plus ou moins élevées qu'ailleurs). Pour mettre en évidence ces zones et leur persistance saisonnière (nombre de mois au cours de chaque trimestre), nous avons sélectionné les E_{net} qui étaient plus grands que les quantiles de 90 % de toutes les valeurs mensuelles dans chaque région dans la climatologie mensuelle 1999-2020 et qui représentaient les résultats par trimestre de l'année (figure 16). Plusieurs zones précédemment inconnues et « persistantes » présentant un potentiel élevé d'alimentation pour la baleine noire ont été prédites dans les eaux canadiennes, en plus des habitats d'alimentation connus (figure 16). En janvier-mars, les nouvelles zones les plus persistantes de valeurs d' E_{net} >90^e quantile ont été prédites dans l'ouest du GSL et dans le LAB, avec quelques zones moins persistantes au large du sTN, le long des pentes nord-est et sud des Grands Bancs, et sur le bonnet Flamand (figure 16). En avril-juin, les nouvelles zones les plus persistantes ont été prédites dans le chenal Nord-Est au large de la pointe du BG, le long de la côte du Cap-Breton et de l'est du PNE, au large de la pointe sud des Grands Bancs (eTN), et au large à l'eTN (figure 16). En juillet-septembre, lorsque l' E_{net} était généralement élevé (figure 11), les nouvelles zones les plus persistantes se trouvaient dans le chenal Nord-Est (BG), à l'ouest du PNE et sur le plateau intérieur près de la côte à l'eTN et du LAB (figure 16). Enfin, les nouvelles zones les plus persistantes en octobre-décembre (période de diminution/ E_{net} faible, figure 11) ont été prédites dans l'ouest du GSL, au large du sud de l'eTN, le long de la pente nord-est des

Grands Bancs, et sur le bonnet Flamand (figure 16). En raison des tendances saisonnières et spatiales marquées dans les prédictions de l' E_{net} dans les eaux canadiennes (figure 10, 17), les nouvelles zones identifiées entre avril et septembre dans le GSL devraient être considérées comme potentiellement plus importantes pour l'alimentation des baleines noires, tandis que celles du LAB sont plus incertaines qu'ailleurs (figure 6, figure 17).

Les zones d'alimentation potentielles de la baleine noire dans les eaux canadiennes sont déterminées sur la base des assemblages d'espèces de *Calanus* qui varient dans l'espace et dans le temps. Notre couche de proies multi-espèces en 3D et nos estimations de l' E_{net} ont intégré cette complexité. Dans les régions plus chaudes de Fundy-GM et du PNE, *C. finmarchicus* est l'espèce dominante tout au long de l'année, produisant une forte génération au printemps suivie d'une seconde génération encore plus petite à la fin de l'été (Casault *et al.*, 2022). Dans les régions plus froides du nGSL et de l'eTN, le développement de *C. finmarchicus* est retardé, la principale génération printanière se développant en été (Plourde *et al.* 2001; Blais *et al.* 2021; Maillet *et al.* 2019). *C. hyperboreus* domine la biomasse du mésozooplancton dans le GSL avec des niveaux d'abondance plus élevés qu'ailleurs dans les eaux canadiennes, principalement associés aux chenaux profonds typiques de la région (Plourde *et al.* 2003, Plourde *et al.* 2019). Cette espèce produit une nouvelle génération par année qui se développe dans les eaux de surface au printemps lorsqu'elle est transportée dans des zones peu profondes, comme le sGSL et à travers le plateau canadien (Maillet *et al.* 2019; Blais *et al.* 2021; Casault *et al.* 2022). Dans ces zones, l'abondance de *C. hyperboreus* diminue fortement en été lorsque *C. finmarchicus* devient prédominant. Par conséquent, les conclusions concernant la résilience des habitats d'alimentation potentiels actuels et nouveaux des baleines noires aux variations des conditions environnementales et aux changements climatiques doivent être faites avec prudence en raison des réponses spécifiques des espèces à ces changements.

4.4. SOURCES D'INCERTITUDES

L'identification des espèces est incertaine, car la répartition de la fréquence de la longueur du prosome de *C. finmarchicus* par rapport au *C. glacialis* se chevauche (Parent *et al.* 2011; Gabrielsen *et al.* 2012).

La présence de *C. helgolandicus*, dont l'optimum de température est plus élevé que celui de *C. finmarchicus* (Moller *et al.* 2012), a été détectée dans le GMA par des approches morphométriques et génétiques (Fleminger et Hulsemann 1977, Bucklin *et al.* 2022). Les derniers stades de ces deux espèces ne peuvent être distingués qu'à l'aide de caractéristiques morphométriques fines du basipode de la cinquième patte (Fleminger et Hulsemann 1977), une approche qui prend du temps et qui ne fait pas partie du protocole d'analyse des échantillons de programme EcoMon (et du PMZA). S'il est présent, l'importance relative de *C. helgolandicus* dans la GMA est inconnue, mais pourrait potentiellement affecter nos MRE de *C. finmarchicus* à l'extrémité supérieure des valeurs de température (conditions plus chaudes).

Des travaux de terrain supplémentaires sont nécessaires pour décrire la répartition verticale de *C. finmarchicus* dans le SNA-GMA (programme EcoMon) et sur le plateau dans l'eTN-LAB. En raison d'un manque de résolution taxonomique dans les données de répartition verticale recueillies dans le passé, on sait peu de choses sur la différence (ou l'absence de différence) de répartition verticale entre *C. finmarchicus* et *C. glacialis*. Un échantillonnage à une résolution verticale plus élevée est probablement nécessaire pour les distinguer.

La nécessité d'utiliser une catégorie de stade grossier CIV-CVI pour limiter le nombre de MRE et de simulations peut avoir eu une incidence sur nos MRE. Les femelles au stade CIV et CVI de *C. finmarchicus* sont principalement actives dans la couche superficielle, tandis que celles

au stade CV passent la majeure partie de leur vie dans les eaux profondes en tant que stade de diapause. Cela signifie que l'abondance propre au stade n'était pas toujours « directement » liée à T_{0-50} et T_{min} . Ce n'est pas le cas pour *C. hyperboreus* et *C. glacialis* pour lesquels les stades CIV-CV-CVI sont tous des stades de diapause dans les eaux canadiennes. L'écart de certaines des fonctions de lissage décrivant l'effet de T_{0-50} sur *C. glacialis* et *C. hyperboreus* par rapport aux relations température-*Calanus* attendues pourrait avoir été associé à cette déconnexion entre l'abondance et les covariables sur la dimension verticale.

Les mécanismes d'agrégation locale ou à haute résolution, tels que décrits par Sorochan *et al.* (2021), n'ont pas été examinés.

Les produits GLORYS12v1 sont une approximation de la réalité. Les températures de GLORYS s'écartent des observations directes de l'instrument de mesure de la conductivité, de la température et de la profondeur (CTD). Les prédictions peuvent s'écarter de la réponse physiologique si les températures de GLORYS divergent localement. Les différences entre GLORYS et le CTD sont similaires dans les grandes régions, mais pas nécessairement dans l'ensemble de la zone à des échelles plus petites.

5. CONCLUSION

Notre série de MRE basée sur différentes hypothèses mécanistes et un terme de « connectivité » du paysage marin a permis de capturer des patrons réalistes d'influence des différents régimes de température et des masses d'eau sur les espèces de *Calanus* dans l'ensemble des eaux canadiennes. Le bon rendement de la covariable « connectivité » dans la représentation des voies de transport à grande échelle des espèces de *Calanus* montre qu'il est possible d'utiliser des indicateurs de connectivité dans un cadre de MRE qui pourrait représenter certains aspects des processus advectifs explicitement étudiés dans les modèles bio-physiques couplés (voir Zakardjian *et al.* 2003; Maps *et al.* 2011; Pépin *et al.* 2013). Notre approche intégrée de la modélisation a permis de cerner des éléments connus historiques (p. ex. : Bassin Roseway) et de nouveaux (sGSL) habitats d'alimentation ainsi que de nouveaux habitats d'alimentation potentiels dans les eaux canadiennes. Les habitats d'alimentation potentiels nouvellement identifiés pourraient être considérés comme des sites candidats pour un effort d'étude supplémentaire lorsque les ressources sont disponibles. Nos résultats ont montré que les zones d'alimentation potentielles des baleines noires dans les eaux canadiennes sont déterminées par un assemblage de plusieurs espèces de *Calanus* qui varie dans l'espace et le temps avec un gradient latitudinal négatif (positif) dans la contribution de *C. finmarchicus* (*C. hyperboreus*/*C. glacialis*). En raison de la saisonnalité marquée des prédictions de l' E_{net} dans les eaux canadiennes, les nouvelles zones déterminées entre avril et septembre devraient être considérées comme potentiellement plus importantes pour l'alimentation des baleines noires, les zones situées à l'extrémité nord du domaine étant plus incertaines. Par conséquent, les conclusions concernant la résilience passée, actuelle et future des habitats d'alimentation potentiels connus et nouveaux de la baleine noire aux variations des conditions environnementales et au changement climatique doivent être faites avec précaution en raison des réponses particulières probables des espèces à ces changements. Étant donné que les baleines noires pourraient continuer à étendre leur aire d'alimentation, il sera essentiel, pour une gestion réussie, que les MRE des proies tiennent compte de la plus grande étendue géographique possible et des données disponibles.

6. RÉFÉRENCES CITÉES

- Albouy-Boyer, S., Plourde, S., Pepin, P., Johnson, C.L., Lehoux, C., Galbraith, P.S., Hebert, D., Lazin, G., et Lafleur, C. 2016. [Habitat modelling of key copepod species in the Northwest Atlantic Ocean based on the Atlantic Zone Monitoring Program](#). J. Plank. 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. Plank. Res. 36: 3-10.
- Allouche, O., Tsoar, A., et Kadmon, R. 2006. [Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic \(TSS\)](#). J. Appl. Ecol. 43: 1223–1232. doi:10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x.
- Amante, C., et Eakins, B. W. 2009. [ETOPO1 Global Relief Model converted to PanMap layer format](#). NOAA-National Geophysical Data Center, PANGAEA.
- 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.
- Beardsley, R. C., Epstein, A. W., Chen, C., Wishner, K. F., Macaulay, M. C., et Kenney, R. D. 1996. Spatial variability in zooplankton abundance near feeding right whales in the Great South Channel. Deep Sea Res. II, 43: 1601-1625.
- Blais, M., Galbraith, P.S., Plourde, S., Devred, E., Clay, S., Lehoux, C. and Devine, L. 2021. [Les conditions océanographiques chimiques et biologiques dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en 2020](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2021/060. iv + 70 p.
- 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.
- 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.
- Bucklin A., Batta-Lona P.G., Questel J.M., Wiebe P.H., Richardson D.E., Copley N.J. et O'Brien T.D. 2022. [COI Metabarcoding of Zooplankton Species Diversity for Time-Series Monitoring of the NW Atlantic Continental Shelf](#). Front. Mar. Sci. 9: 867893. doi 10.3389/fmars.2022.867893
- 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.
- Casault, B., Johnson, C., Devred, E., Head, E., Beazley, L., et Spry, J. 2022. [Conditions océanographiques optiques, chimiques et biologiques sur le plateau néo-écossais et dans l'est du golfe du Maine en 2020](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2022/018. v + 86 p.

-
- Castillo-Trujillo, A.C., Kwon, Y.-O., Fratantoni, P., Chen, K., Seo, H., Alexander, M.A., et Saba, V.S. 2023. [An evaluation of eight global ocean reanalyses for the Northeast U.S. Continental shelf](#). Prog. Oceanogr. 219: 103126. doi:10.1016/j.pocean.2023.103126.
- 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.
- Davies, K.T.A., Ryan, A., et Taggart, C.T. 2012. [Measured and inferred gross energy content in diapausing *Calanus* spp. in a Scotian shelf basin](#). J. Plankton Res. 34: 614–625. doi:10.1093/plankt/fbs031.
- de Vries, P. 2023. [CopernicusMarine: Search Download and Handle Data from Copernicus Marine Service Information](#).
- Dixon W.J. 1960. Simplified Estimation from Censored Normal Samples. Ann. Math. Stat. 31:385–391.
- Durbin, E. G., Gilman, S. L., Campbell, R. G., et Durbin, A. G. 1995. Abundance, biomass, vertical migration and estimated development rate of the copepod *Calanus finmarchicus* in the southern Gulf of Maine during late spring. Cont. Shelf Res., 15: 571-591.
- Fleminger, A., et Hulsemann, K. 1977. Geographical range and taxonomic divergence in North Atlantic *Calanus* (*C. helgolandicus*, *C. finmarchicus* and *C. glacialis*). Mar. Biol. 40 : 233-248.
- Freeman, E. A. et Moisen, G. 2008. PresenceAbsence: An R Package for Presence-Absence Model Analysis. J. Stat. Soft. 23:1-31.
- 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.
- Gavrillchuk, K., Lesage, V., Fortune, S., Trites, A.W., et Plourde, S. 2020. [Une approche mécanistique à la prédiction de l'habitat favorable à l'alimentation des femelles sexuellement matures de baleine noire de l'Atlantique Nord dans le golfe du Saint-Laurent](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2020/034. iv + 50 p.
- Gavrillchuk, K., Lesage, V., Fortune, S.M.E., Trites, A.W., et 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](#). End. Species Res. 44: 113–136. doi:10.3354/ESR01097.
- Grieve, B. D., Hare, J. A., et Saba, V. S. 2017. [Projecting the effects of climate change on *Calanus finmarchicus* distribution within the US Northeast Continental Shelf](#). Scient. 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.
- Head, E. J. H., Harris, L. R., et Yashayaev, I. 2003. Distributions of *Calanus* spp. and other mesozooplankton in the Labrador Sea in relation to hydrography in spring and summer (1995–2000). Prog. Oceanogr. 59: 1-30.
-

-
- 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.
- Helenius, L. K., Head, E. J., Jekielek, P., Orphanides, C. D., Pepin, P., Perrin, G., Plourde, S., Ringuette, M., Runge, J.A. et Johnson, C. L. 2024. Spatial variability in size and lipid content of the marine copepod *Calanus finmarchicus* across the Northwest Atlantic continental shelves: implications for North Atlantic right whale prey quality. J. Plank. Res. 46: 25-40.
- Jiang, M., Brown, M. W., Turner, J. T., Kenney, R. D., Mayo, C. A., Zhang, Z., et Zhou, M. 2007. Springtime transport and retention of *Calanus finmarchicus* in Massachusetts and Cape Cod Bays, USA, and implications for right whale foraging. Mar. Ecol. Prog. Ser. 349: 183-197.
- Krumhansl, K.A., Head, E.J.H., Pepin, P., Plourde, S., Record, N.R., Runge, J.A., et Johnson, C.L. 2018. [Environmental drivers of vertical distribution in diapausing *Calanus* copepods in the Northwest Atlantic](#). Prog. Oceanogr. 162: 202–222. doi:10.1016/j.pocean.2018.02.018.
- 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.
- Lellouche, J.-M., Greiner, E., Bourdallé-Badie, R., Garric, G., Melet, A., Drévilion, M., Bricaud, C., Hamon, M., Le Galloudec, O., Regnier, C., Candela, T., Testut, C.– E., Gasparin, F., Ruggiero, G., Benkiran, M., Drillet, Y., et Le Traon, P.– Y. 2021. [The Copernicus Global 1/12° Oceanic and Sea Ice GLORYS12 Reanalysis](#). Front. Earth Sci. 9: 698876. doi:10.3389/feart.2021.698876.
- Loder, J. W., Petrie, B., et Gawarkiewicz, G. 1998. The coastal ocean off northeastern North America: a large scale view. In The Sea, 11, pp. 105–133. Ed. by A. R. Robinson, and K. H. Brink. John Wiley, New York.
- Maillet, G., Bélanger, D., Doyle, G., Robar, A., Fraser, S., Higdon, J., Ramsay, D. et P. Pepin. 2019. [Conditions optiques, chimiques et biologiques de l'océan sur le plateau de Terre-Neuve-et-Labrador au cours de 2016-2017](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Doc. de rech. 2019/055. ix + 40 p.
- Maps, F., Zakardjian, B. A., Plourde, S., et Saucier, F. J. 2011. Modeling the interactions between the seasonal and diel migration behaviors of *Calanus finmarchicus* and the circulation in the Gulf of St. Lawrence (Canada). J. Mar. Syst. 88: 183-202.
- Mayo, C.A., Letcher, B.H., et Scott, S. 2001. Zooplankton filtering efficiency of the baleen of a North Atlantic right whale, *Eubalaena glacialis*. J. Cetacean Res. Manag. Spec. Special Issue 2: 225–229.
- 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, C. B., Lynch, D. R., Carlotti, F., Gentleman, W., et Lewis, C. V. 1998. Coupling of an individual-based population dynamic model of *Calanus finmarchicus* to a circulation model for the Georges Bank region. *Fish. Oceanogr.* 7: 219-234.
- 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.
- Mitchell, M.R., G. Harrison, K. Pauley, A. Gagné, G. Maillet et P. Strain. 2002. Atlantic Zonal Monitoring Program Sampling Protocol. *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci.* 223: iv + 23 p.
- Møller, E. F., Maar, M., Jónasdóttir, S. H., Nielsen, T. G., et Tönnesson, K. 2012. The effect of changes in temperature and food on the development of *Calanus finmarchicus* and *Calanus helgolandicus* populations. *Limnol. Oceanogr.* 57: 211-220.
- MPO. 2023. [Conditions océanographiques dans la zone atlantique en 2022](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Avis sci. 2023. 2023/019.
- Northeast Fisheries Science Center 2019. [Zooplankton and ichthyoplankton abundance and distribution in the North Atlantic collected by the Ecosystem Monitoring \(EcoMon\) Project from 1977-02-13 to 2021-11-15 \(NCEI Accession 0187513\)](#). NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset.
- Parent, G. J., Plourde, S., et Turgeon, J. 2011. Overlapping size ranges of *Calanus* spp. off the Canadian Arctic and Atlantic Coasts: impact on species' abundances. *J. Plank. Res.* 33: 1654-1665.
- Pasternak, A. F., Arashkevich, E. G., Grothe, U., Nikishina, A. B., et Solovyev, K. A. 2013. Different effects of increased water temperature on egg production of *Calanus finmarchicus* and *C. glacialis*. *Oceanology* 53: 547-553.
- Pedersen, E.J., Miller, D.L., Simpson, G.L., et Ross, N. 2019. [Hierarchical generalized additive models in ecology: An introduction with mgcv](#). *PeerJ* 7(e6876). doi:10.7717/peerj.6876.
- Pepin, P., Han, G., et Head, E. J. 2013. Modelling the dispersal of *Calanus finmarchicus* on the Newfoundland Shelf: implications for the analysis of population dynamics from a high frequency monitoring site. *Fish. Oceanogr.* 22: 371-387.
- Plourde, S., Joly, P., Runge, J. A., Zakardjian, B., et Dodson, J. J. 2001. Life cycle of *Calanus finmarchicus* in the lower St. Lawrence Estuary: the imprint of circulation and late timing of the spring phytoplankton bloom. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 58: 647-658.
- 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., Pepin, P., et Head, E. J. 2009. Long-term seasonal and spatial patterns in mortality and survival of *Calanus finmarchicus* across the Atlantic Zone Monitoring Programme region, Northwest Atlantic. *ICES J. Mar. Sci.* 66: 1942-1958.
- Plourde, S., Lehoux, C., Johnson, C.L., Perrin, G., et 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: 667-685. doi:10.1093/plankt/fbz024.
-

-
- 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. et Thompson, C. R. 2019. [Rapid climate-driven circulation changes threaten conservation of endangered North Atlantic right whales](#). *Oceanography* 32: 162–169.
- Ross, C. H., Runge, J. A., Roberts, J. J., Brady, D. C., Tupper, B., et 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., et 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.
- 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.
- Simard, Y., Roy, N., Giard, S., et Aulancier, 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., et 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. Plank. Res.* 41: 687–708. doi:10.1093/plankt/fbz044.
- Sorochan, K.A., Plourde, S., Baumgartner, M.F., et 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.
- Waldock, C., Stuart-Smith, R.D., Albouy, C., Cheung, W.W., Edgar, G.J., Mouillot, D., Tjiputra, J. et Pellissier, L. 2022. [A quantitative review of abundance-based species distribution models](#). *Ecography* 2022: e05694.
- Wishner, K. F., Schoenherr, J. R., Beardsley, R., et Chen, C. 1995. Abundance, distribution and population structure of the copepod *Calanus finmarchicus* in a springtime right whale feeding area in the southwestern Gulf of Maine. *Cont. Shelf Res.* 15: 475-507.
- 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).
- Zuur, A. F., and Ieno, E. N. 2016. A protocol for conducting and presenting results of regression-type analyses. *Methods Ecol. Evol.* 7: 636-645.

7. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tous les scientifiques du MPO et de la NOAA ainsi que l'équipage des navires de recherche qui ont contribué à la collecte des échantillons de zooplancton du PMZA et du programme EcoMon. Des remerciements particuliers sont adressés aux taxonomistes du MPO et aux scientifiques du Plankton Sorting and Identification Center du National Marine Fisheries Research Institute, en Pologne, pour le traitement des échantillons de plancton du PMZA et du programme EcoMon, respectivement. Nous remercions F. Cyr, D. Bélanger et B. Casault d'avoir fourni les données environnementales du PMZA et sur les *Calanus*. V. Lesage, H. Moors-Murphy et K. Sorochnan ont gentiment fourni des commentaires qui ont permis d'améliorer le présent document. Le Secteur des sciences du MPO a appuyé S. Plourde, C. Lehoux, C.L. Johnson et P. Pepin. C. Orphanides et H.J. Walsh ont bénéficié du soutien de la NOAA. La participation de J.J. Roberts et R.S. Schick a été financée par la NOAA Fisheries (Cooperative Agreement NA20NMF0080246). N. R. Record a bénéficié des subventions 2307754 et 1849227 de la National Science Foundation.

8. TABLEAUX

Tableau 1. Liste des acronymes.

Acronyme	Nom complet
É-U.	États-Unis d'Amérique
GSL	golfe du Saint-Laurent
GM	golfe du Maine
EcoMon	Ecosystem Monitoring Program
PMZA	Programme de monitoring de la zone Atlantique
BCC	baie de Cape Cod
PNE	plateau néo-écossais
sGSL	sud du GSL
eTN	plateau est de Terre-Neuve
MRE	Modèle de répartition des espèces
GAM	Modèles additifs généralisés
MPO	Ministère des Pêches et des Océans
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
T_0-50	température à 0-50 m
Tmin	température minimale dans la colonne d'eau
climS_0-50rc	climatologie spatiale de salinité dans la couche 0-50 m
GAMM	modèles additifs généralisés à effets mixtes
GMA	Golfe milieu Atlantique
SNA	plateau du sud de la Nouvelle-Angleterre
BG	BancGeorges
GSC	Grand chenal sud
nGSL	nord du GSL
LAB	plateau continental du Labrador
CIV	stade de développement des copépodites CIV
CV	stade de développement des copépodites V
CVI	stade de développement des copépodites VI
PSU	unité de salinité pratique

Tableau 2. Résultats des GAMM pour les modèles Bernoulli et Gamma. Voir la section 2.2.1 pour les équations du modèle. Le modèle de Bernoulli est validé dans les 100 itérations de modèles réajustés avec 70 % des stations et 30 % sont utilisés pour calculer le TSS (moyenne \pm écart-type). Le TSS a également été calculée sur la resubstitution des 100 % de données utilisées pour ajuster le modèle. L'AIC utilisé pour la comparaison des modèles et la vraisemblance maximale restreinte (REML de l'anglais restricted maximum likelihood) sont présentés pour les deux répartitions de modèles. Le modèle Gamma a été validé en utilisant l'écart hors échantillon sur 30 % des données (70 % pour l'ajustement du modèle) et l'écart expliqué 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. Voir l'annexe 3 pour une validation plus en détail. Le modèle 3.3 pour *C. glacialis* n'a pas été réalisé parce qu'il n'était pas justifié de winsoriser les outils de lissage de T_{0-50} ou T_{min} .

Espèce	Modèle	Bernoulli				Gamma				Coefficient de corrélation de Spearman
		TSS (30 %)	TSS (100 %)	AIC	REML	Écart hors échantillon (30 %)	Écart expliqué (100 %)	AIC	REML	
<i>C. finmarchicus</i>	Modèle 1	0,53 \pm 0,02	0,55	3016	1526	9086	33,11	318363	159246	0,61
	Modèle 2	0,55 \pm 0,02	0,65	2787	1373	7752	44,71	314823	157529	0,72
	Modèle 3.1	0,55 \pm 0,02	0,63	2787	1425	8054	41,83	315724	157973	0,70
	Modèle 3.2	0,55 \pm 0,02	0,63	2778	1418	7806	43,72	315100	157670	0,71
	Modèle 3.3	0,55 \pm 0,03	0,63	2789	1417	7739	43,91	315035	157641	0,71
<i>C. glacialis</i>	Modèle 1	0,82 \pm 0,00	0,82	6747	3413	1361	27,51	66942	33515	0,69
	Modèle 2	0,82 \pm 0,00	0,82	6411	3244	1327	31,04	66743	33417	0,70
	Modèle 3.1	0,82 \pm 0,00	0,83	6331	3221	1318	33,08	66630	33386	0,70
	Modèle 3.2	0,82 \pm 0,00	0,83	6334	3222	1286	33,38	66611	33370	0,7
	Modèle 3.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>C. hyperboreus</i>	Modèle 1	0,65 \pm 0,01	0,65	11775	5927	2906	45,81	106906	53503	0,73
	Modèle 2	0,68 \pm 0,00	0,69	10952	5527	2603	53,59	105875	53004	0,74
	Modèle 3.1	0,68 \pm 0,00	0,69	10779	5468	2651	54,38	105744	52969	0,74
	Modèle 3.2	0,68 \pm 0,00	0,69	10781	5469	2608	55,03	105650	52922	0,74
	Modèle 3.3	0,68 \pm 0,00	0,69	10814	5486	2591	54,96	105659	52929	0,74

Tableau 3. Corrélations de Pearson avec les moyennes ANNÉE*MOIS par région. Codes pour la présence de frontières régionales dans les prédictions (défavorable) : aucun, +++ (très présent), + (présent). Codes de précision du niveau d'abondance régional (favorable) : + (faible), +++ (très élevé), ++ (élevé). N = nombre de moyennes ANNÉE*MOIS disponibles dans chaque région pour le calcul de la corrélation. (-) : régions où l'occurrence et l'abondance sont très faibles et où les corrélations sont dénuées de sens. Le modèle 3.3 pour *C. glacialis* n'a pas été réalisé parce qu'il n'était pas justifié de winsoriser les outils de lissage de T_0-50 ou Tmin.

Espèces	Nom du modèle	Région											Frontières régionales?	Niveau d'abondance régional APPROPRIÉ?
		GMA	SNA	BG	BCC	GM	Fundy-GM	PNE	sGSL	nGSL	eTN	LAB		
<i>C. finmarchicus</i>	Modèle 1	0,45	0,66	0,65	0,59	0,54	0,68	0,43	0,43	0,21	0,28	0,49	aucune	+
	Modèle 2	0,70	0,76	0,78	0,64	0,54	0,65	0,38	0,58	0,58	0,54	0,39	+++	+++
	Modèle 3.1	0,64	0,79	0,73	0,60	0,50	0,65	0,49	0,45	0,60	0,53	0,43	aucune	+
	Modèle 3.2	0,68	0,77	0,75	0,62	0,48	0,65	0,46	0,40	0,61	0,55	0,41	+	++
	Modèle 3.3	0,68	0,77	0,75	0,60	0,48	0,65	0,46	0,40	0,60	0,54	0,43	+	++
<i>C. hyperboreus</i>	Modèle 1	-	-	-	-	0,47	0,36	0,78	0,51	0,20	0,66	0,76	aucune	+
	Modèle 2	-	-	-	-	0,60	0,41	0,79	0,58	0,32	0,80	0,71	+++	+++
	Modèle 3.1	-	-	-	-	0,60	0,45	0,79	0,58	0,30	0,76	0,77	aucune	+
	Modèle 3.2	-	-	-	-	0,59	0,45	0,80	0,58	0,29	0,77	0,77	+	+++
	Modèle 3.3	-	-	-	-	0,58	0,45	0,80	0,59	0,29	0,77	0,77	+	+++
<i>C. glacialis</i>	Modèle 1	-	-	-	-	-	-	0,60	0,55	0,74	0,54	0,23	aucune	+
	Modèle 2	-	-	-	-	-	-	0,67	0,61	0,75	0,71	0,20	+++	+++
	Modèle 3.1	-	-	-	-	-	-	0,63	0,58	0,71	0,78	0,50	+	+++
	Modèle 3.2	-	-	-	-	-	-	0,63	0,56	0,71	0,78	0,49	+	+++
	Modèle 3.3	WinzORIZATION pas nécessaire												
	n	113	149	136	87	131	106	245	157	152	215	32		

Tableau 4. Résumé du modèle 3.3 : valeurs des covariables ayant un effet positif sur l'abondance des espèces de Calanus. Le modèle 3.1 a été utilisé pour *C. glacialis*.

Espèce	Covariable	Bernoulli	Gamma
<i>C. finmarchicus</i>	T_0-50	<11,8	3,3-14,8
	Tmin	>3,4	3,7-8,7
	Bathymétrie*	>108	>95
	Latitude	35-41,7; >48	35-37; 40,4-44,7;>53
	Mois	1-2, 9-12	4-9
	climS_0_50*	<32,3	32,5-34-
<i>C. glacialis</i>	T_0_50	<7,40	3,63-8,75; >12
	Tmin	<5,54	<0,57
	Bathymétrie*	>128	>166
	Latitude	>41,4	>47,3
	Mois	8-11	5-7
	climS_0_50*	<32; >33,17	29,4-31,8
<i>C. hyperboreus</i>	T_0_50	<8,15	2-8,3
	Tmin	>1,77	0,27-4,64; >7,5
	Bathymétrie*	>100	>178
	Latitude	<38; > 44	<38,3; 46,7-54
	Mois	5-9	4-9
	climS_0_50*	<32,1	<31,9

* Valeurs après rétrotransformation de logBathymetry et climS_0_50 sqrt

Tableau 5. Comparaison de la profondeur moyenne mensuelle (m) d'alimentation optimale de la baleine noire prédite par le modèle 3D des proies/bioénergétique (à gauche, cette étude) et de la profondeur moyenne observée (m) d'alimentation de la baleine noire (à droite, Baumgartner et al. 2017) dans des habitats en particulier. BCC = Baie de Cape Cod, GSC = Grand chenal sud, BF = Baie de Fundy (Grand Manan). Les profondeurs moyennes prédites et observées pour un mois et un lieu donnés sont identifiées par des chiffres en noir.

Région	Prédictions du modèle transfrontalier de la profondeur d'alimentation optimale										Profondeur de plongée observée (Baumgartner et al. 2017)									
	Profondeur d'alimentation(m)										Profondeur d'alimentation (m)									
	MOIS										MOIS									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BCC	18	19	24	17	11	18	13	16	30	17	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GSC	37	29	121	116	59	91	116	118	125	102	-	-	20	20	-	-	-	-	-	-
Jeffreys																				
Ledge	35	26	107	94	43	77	104	106	109	89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125
BF	85	94	98	94	94	131	131	129	89	88	-	-	-	-	-	117	-	-	-	-
Roseway	91	114	114	95	92	117	117	117	82	81	-	-	-	-	-	-	103	103	-	-

9. FIGURES

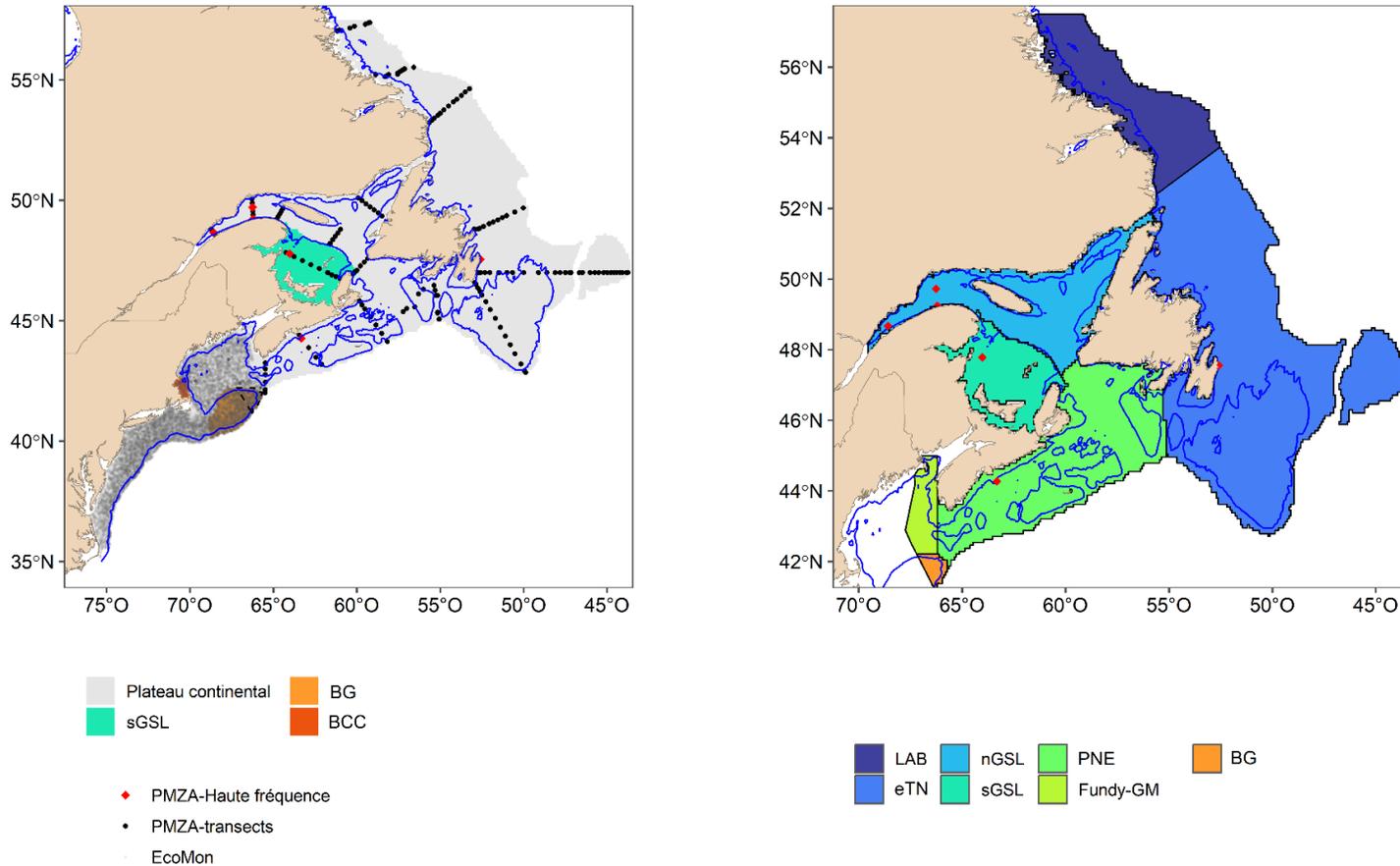


Figure 1. Volet gauche : Domaine spatial des MRE transfrontaliers, stations de zooplancton de 1999 à 2020 ($n = 16\ 333$) et sous-régions ($n = 4$) utilisées comme facteur régional dans le modèle 3.3 : Plateau continental en gris, sGSL en vert, BG en orange clair et BCC en orange foncé). La ligne noire en pointillés sépare la partie canadienne du BG. Volet droit : régions des eaux canadiennes utilisées pour présenter les résultats de la présente étude. LAB = plateau continental du Labrador; eTN = est du plateau de Terre-Neuve; nGSL et sGSL = nord et sud du golfe du Saint-Laurent; PNE = plateau néo-écossais et sud du plateau de Terre-Neuve; Fundy-GM = nord-est du golfe du Maine et extérieur de la baie de Fundy, BG = pointe nord-est du banc Georges. Les lignes bleues représentent l'isobathe de 100 m.

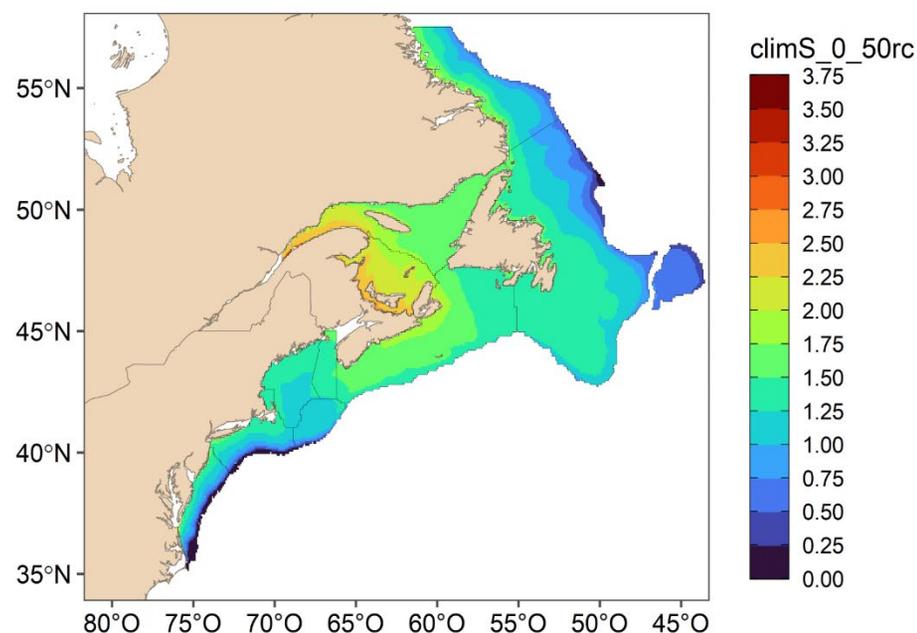
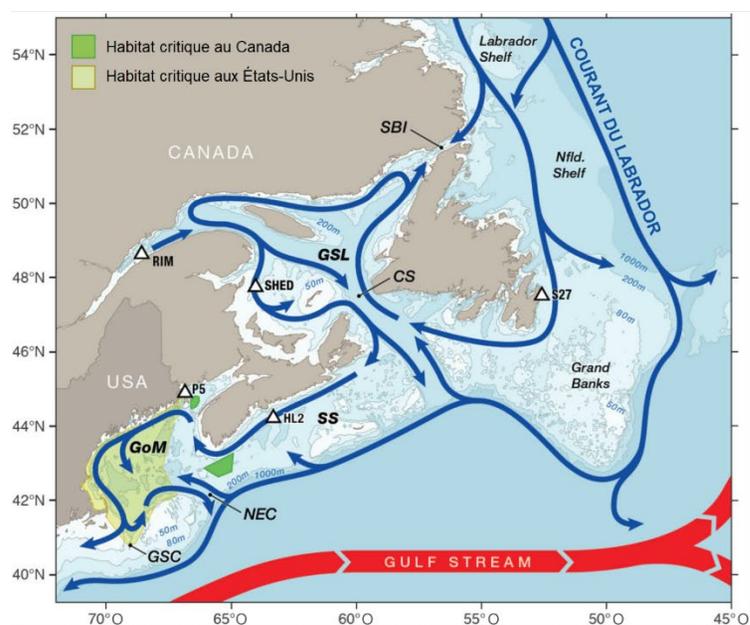


Figure 2. Volet gauche : Représentation schématique des principaux courants de surface, du LAB (au nord) au sud du plateau de la Nouvelle-Angleterre (au sud), avec la circulation dans le sens anti-horaire dans le GSL et GM (adapté de Sorochan et al. 2021). Volet droit : Climatologie spatiale de la salinité 0-50 m (S_{0-50}) extraite de GLORYS12v1 1999-2020. La valeur S_{0-50} a été transformée pour normaliser les données (voir le texte et l'annexe) Figure A.1. 4t), les valeurs les plus élevées (les plus basses) de l'échelle de couleurs correspondant à des masses d'eau plus fraîches (plus salées). Les courants sur le plateau interne (externe) correspondent généralement à des masses d'eau plus fraîche (plus salées).

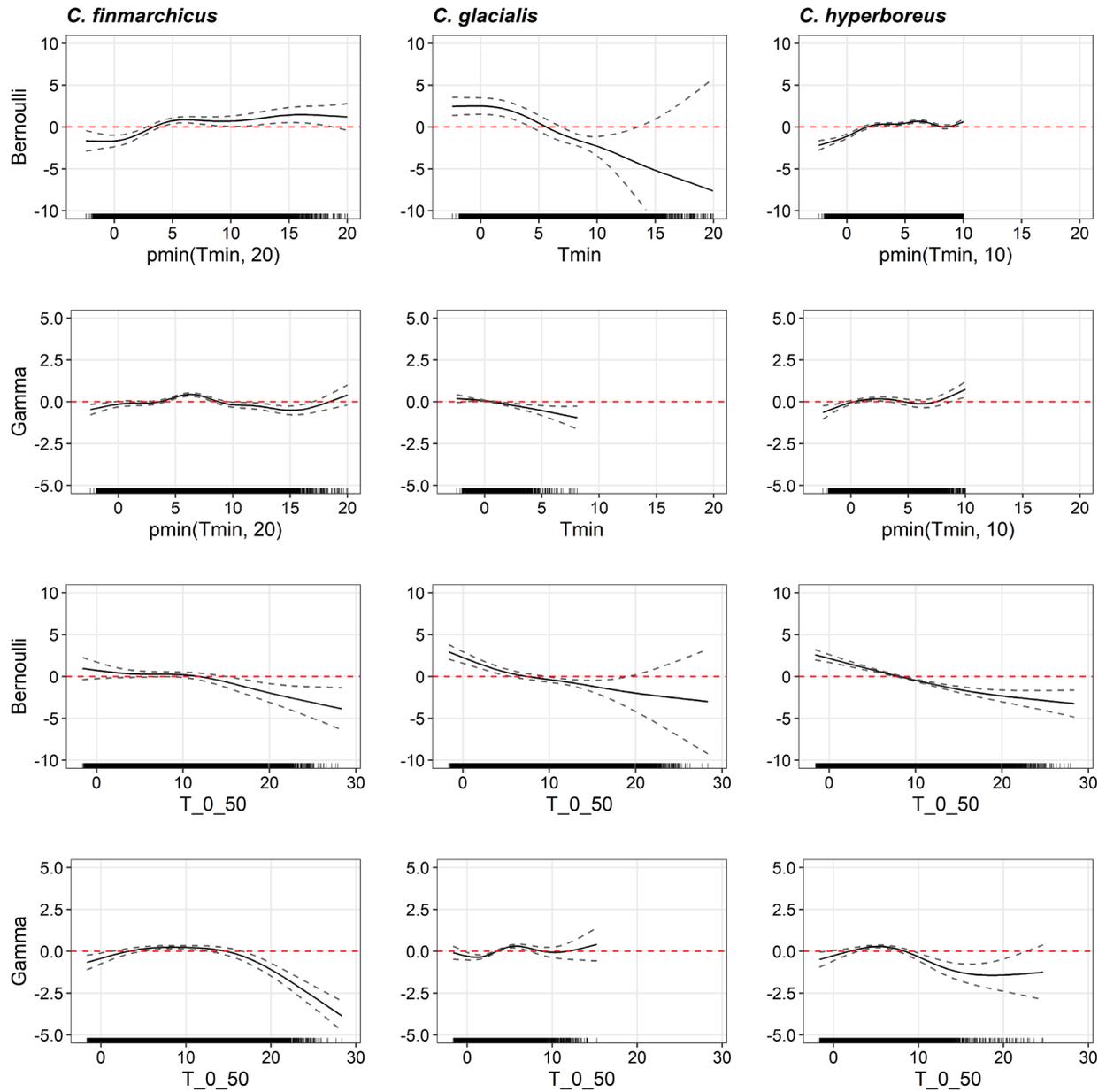


Figure 3. Modèle 3.3. Outils de lissage pour T_{0_50} et $Tmin$ des modèles Bernoulli et Gamma pour *C. finmarchicus*, *C. glacialis* (modèle 3.1) et *C. hyperboreus*.

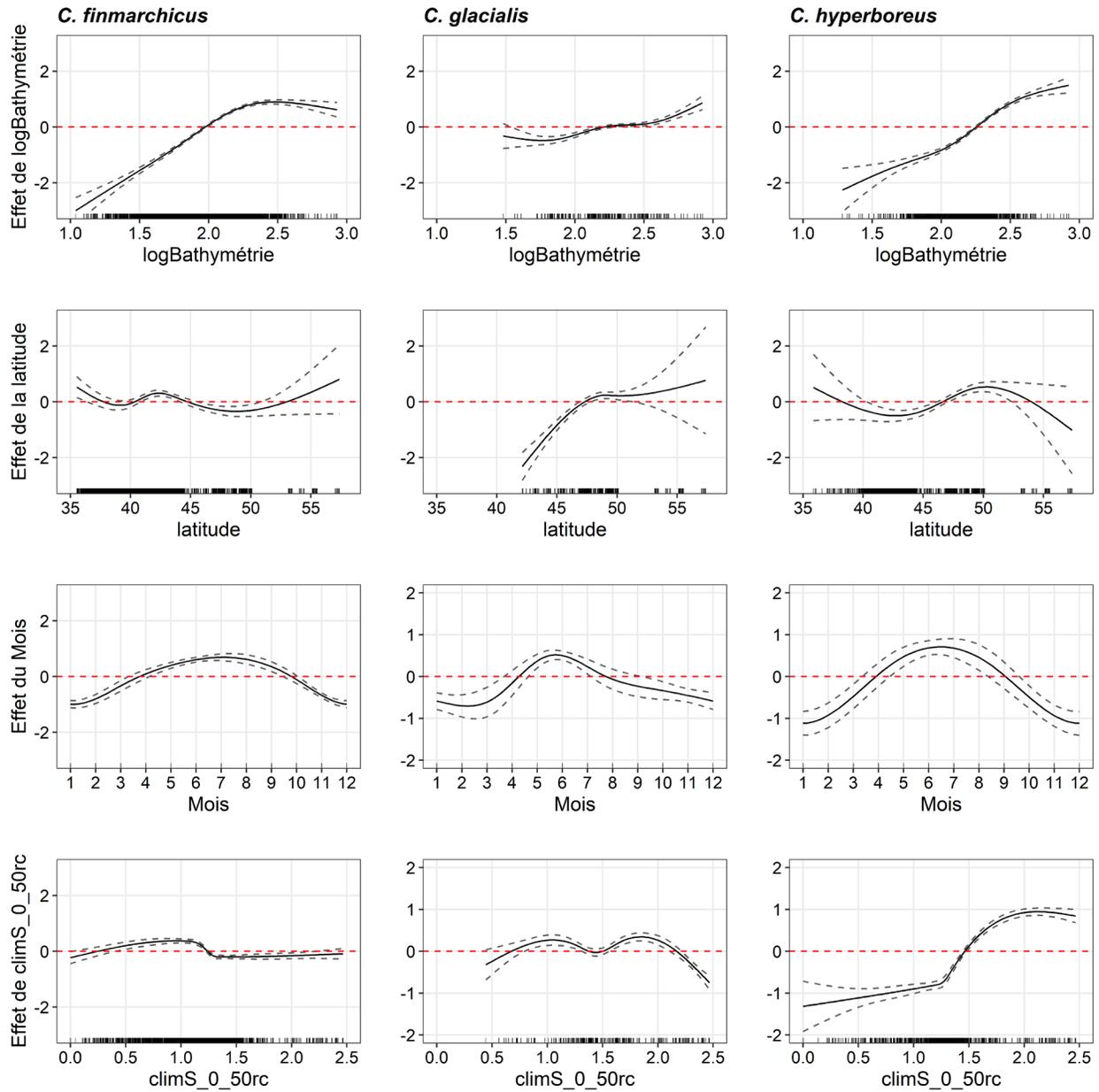


Figure 4. Modèle 3.3. Fonctions de lissage pour la bathymétrie, la latitude et ClimS_0-50rc du modèle Gamma pour *C. finmarchicus*, *C. glacialis* (modèle 3.1) et *C. hyperboreus*.

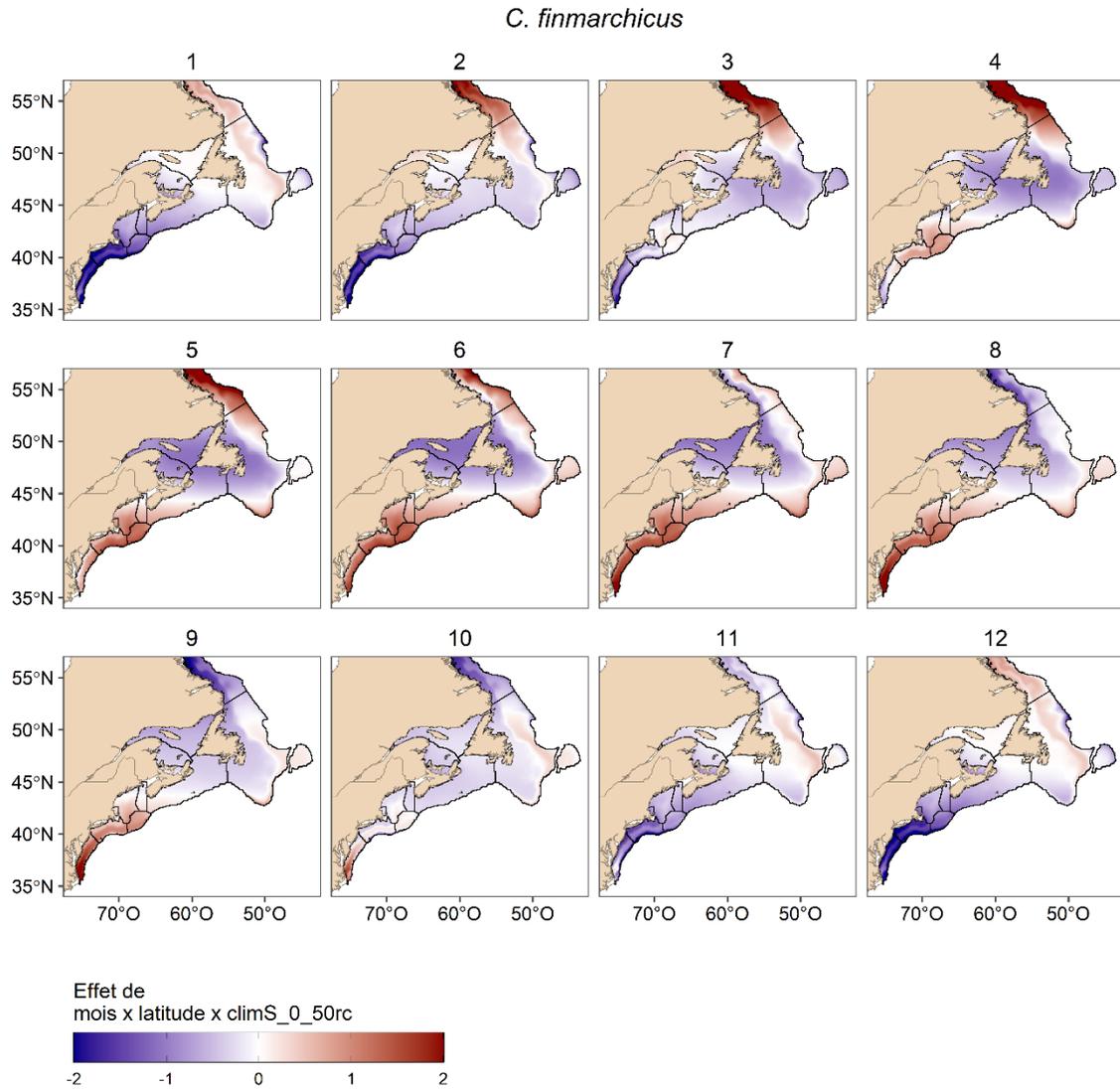


Figure 5. Modèle 3.3. Effet mensuel cumulé de toutes les covariables incluses dans le terme d'interaction « connectivité » dans les modèles Gamma pour C. finmarchicus au cours de la période 1999-2020. Voir les deux pages suivantes pour C. glacialis et C. hyperboreus. Les lignes noires délimitent les régions utilisées pour présenter les résultats (voir les volets droits dans la figure 1 pour le Canada et la figure A.3. 5 pour la zone transfrontalière).

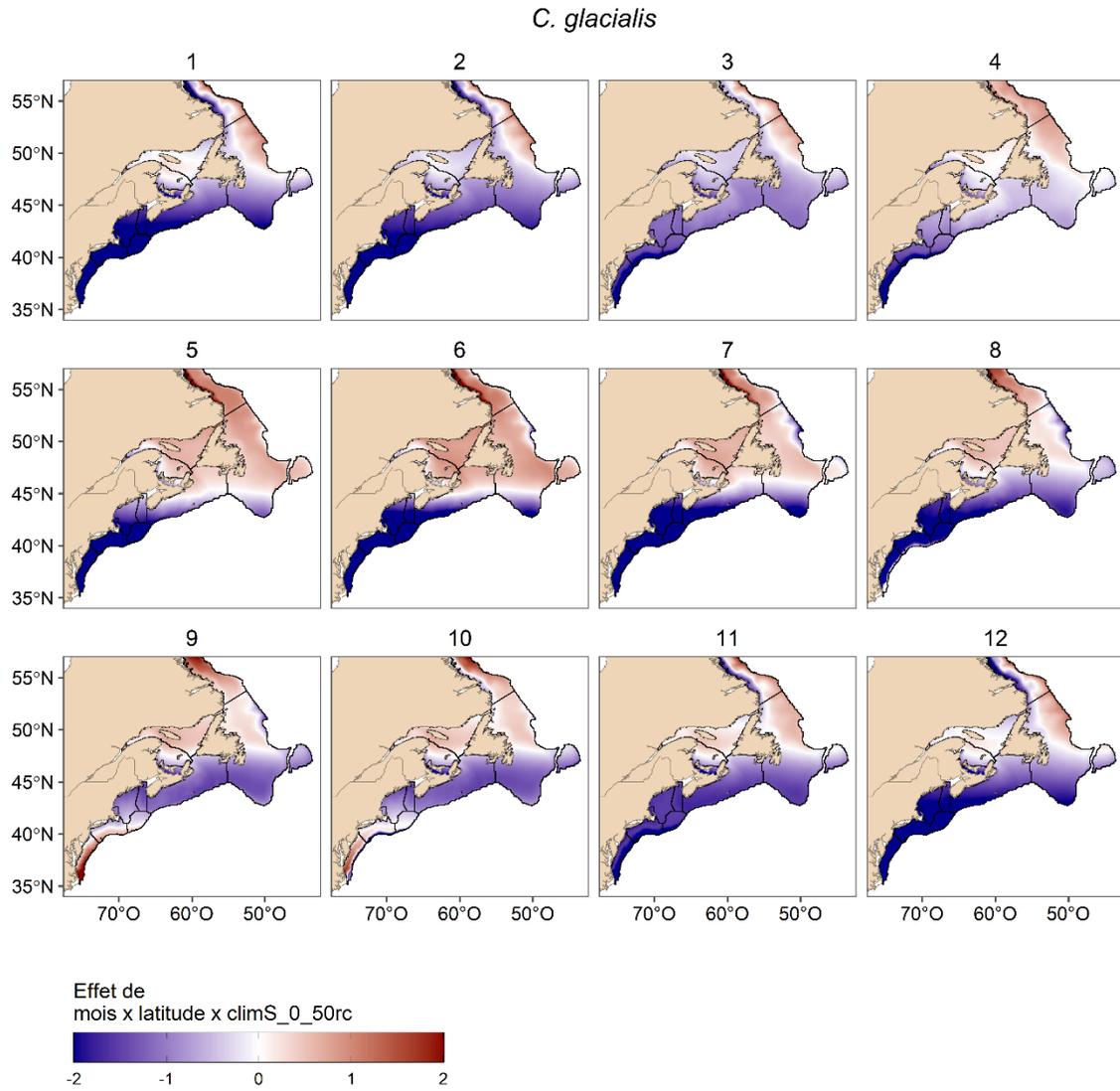


Figure 5 (suite). *C. glacialis* (modèle 3.1).

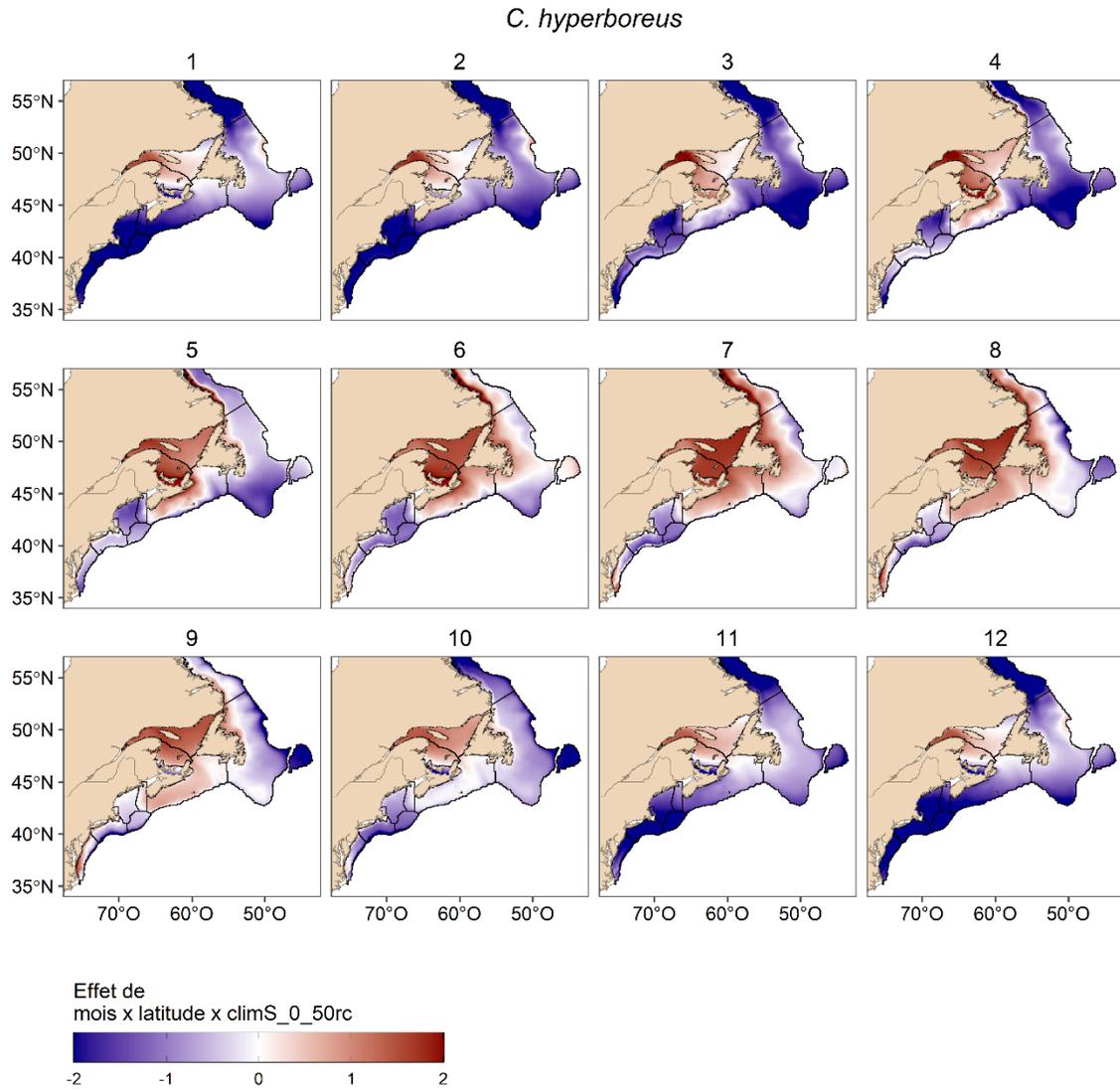


Figure 5 (suite). *C. hyperboreus*.

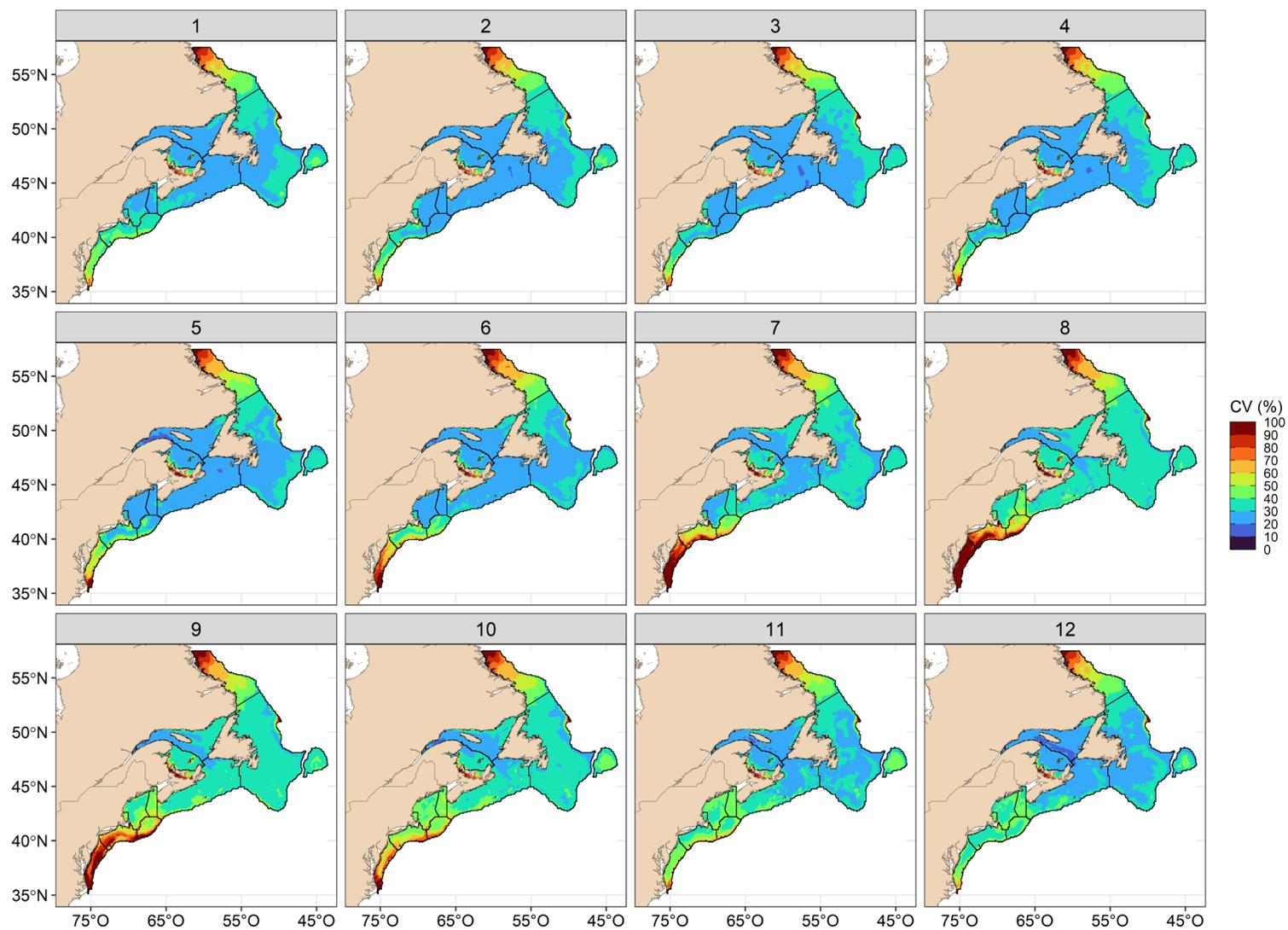


Figure 6. Incertitude (% CV) des paramètres des GAMM et variabilité interannuelle pour les prédictions d'abondance totale de *C. finmarchicus*, *C. hyperboreus* (modèles 3.3.) et *C. glacialis* (modèle 3.1). Les lignes noires délimitent les régions utilisées pour présenter les résultats (voir les volets droits dans la figure 1 pour le Canada et la figure A.3. 5 pour la zone transfrontalière).

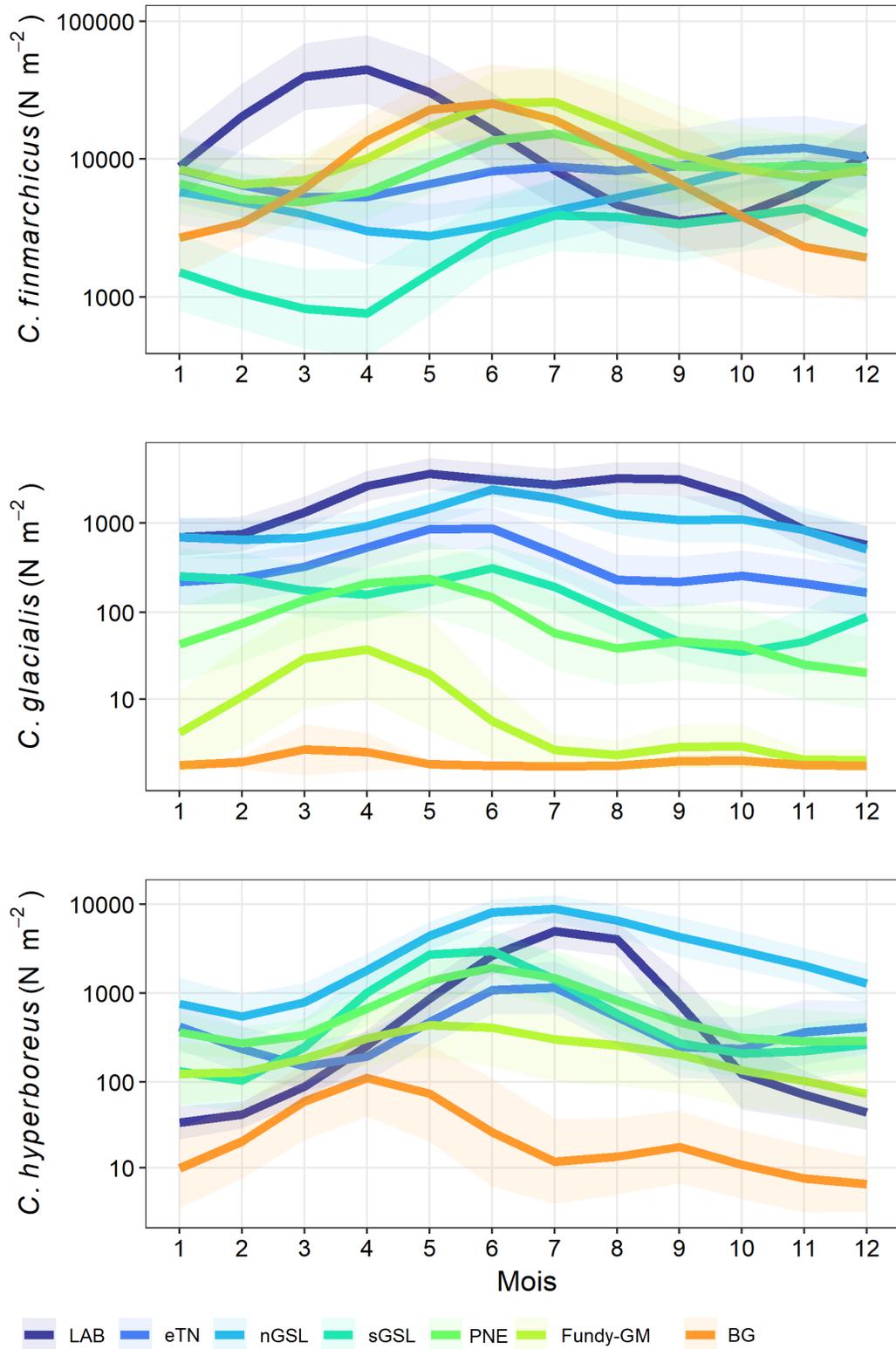


Figure 7. Abondance mensuelle prédite de *C. finmarchicus* (en haut), *C. glacialis* (au milieu) et *C. hyperboreus* (en bas) dans les différentes régions. Les zones ombrées représentent les intervalles de confiance (IC) à 95 % (moyenne $\pm 1,96 \cdot \text{écart-type}$) de la variabilité interannuelle au cours de la période 1999-2020.

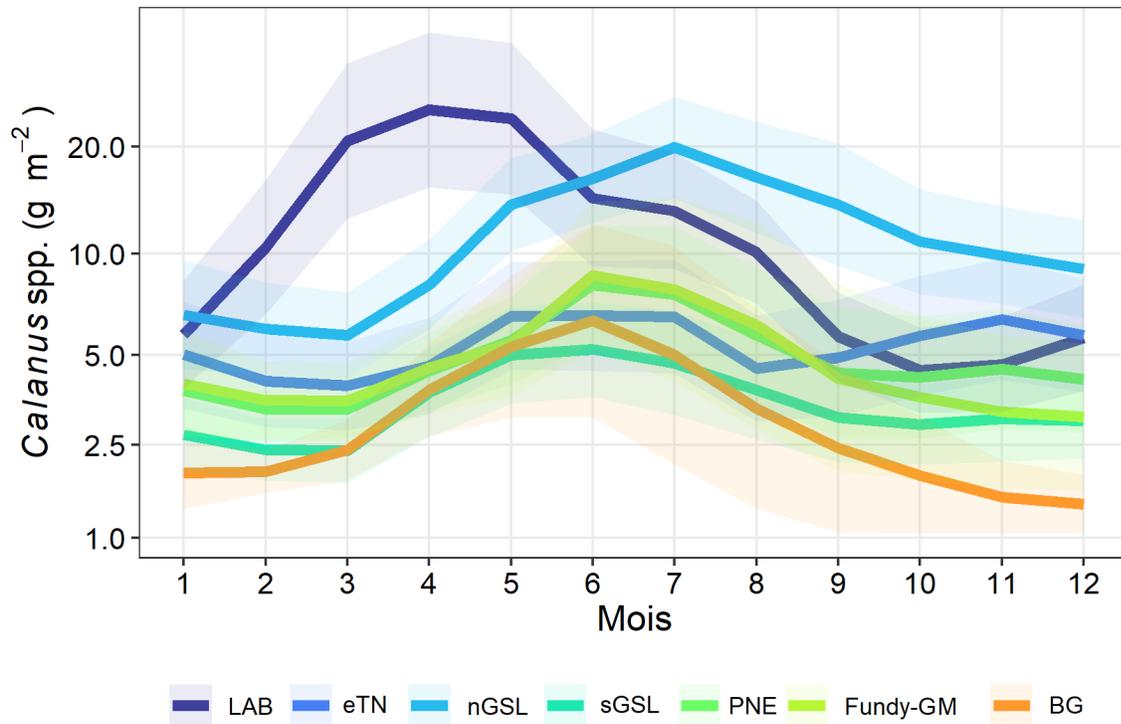


Figure 8. Moyenne mensuelle de la biomasse de la colonne d'eau de Calanus prédite (g m⁻²) dans les différentes régions. Les zones ombrées représentent les intervalles de confiance (IC) à 95 % (moyenne $\pm 1,96 * \text{écart-type}$) de la variabilité interannuelle au cours de la période 1999-2020.

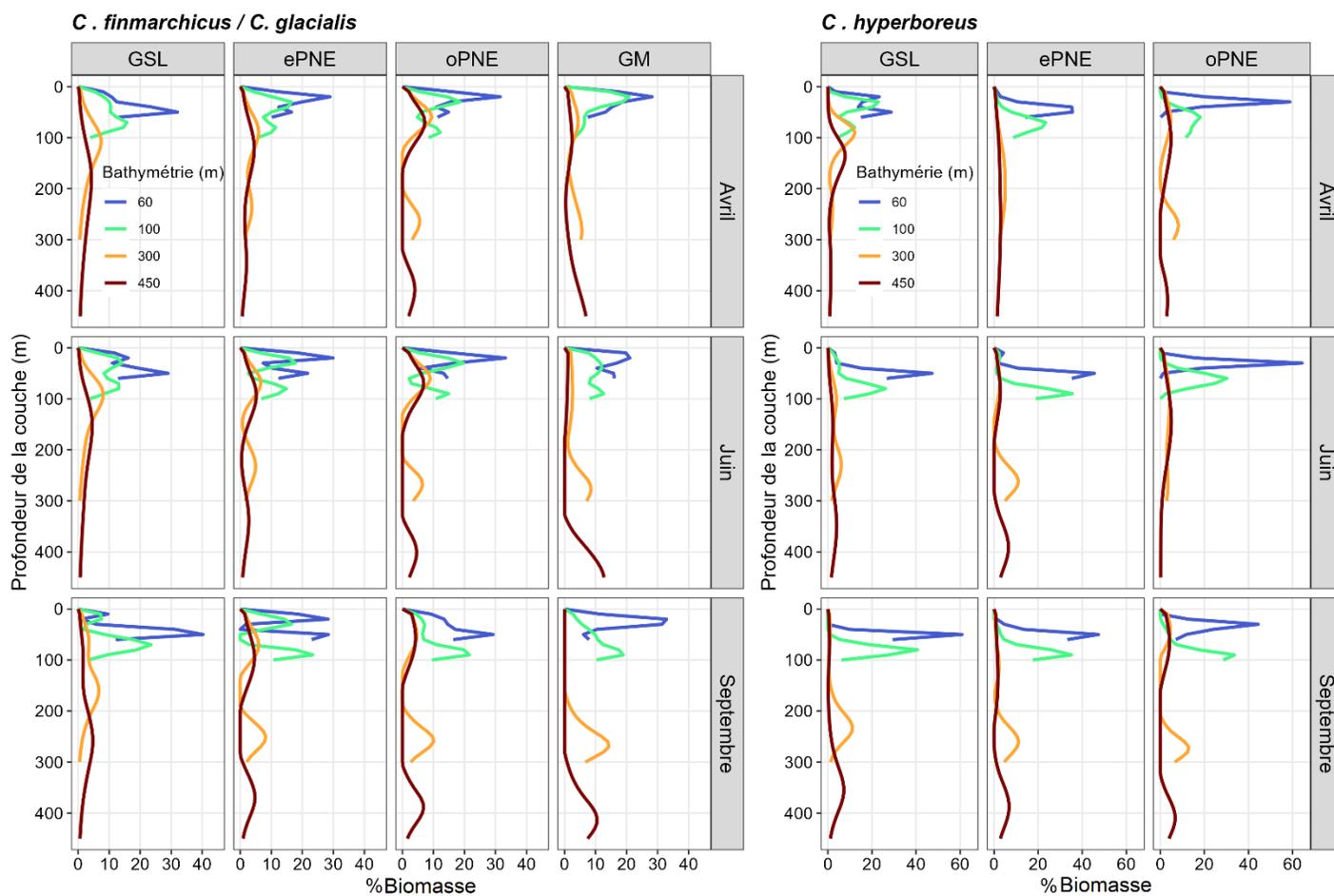


Figure 9. Répartition verticale relative prédite de *C. finmarchicus*/*C. glacialis* (volet gauches) et de *C. hyperboreus* (volets droits) en avril, juin et septembre pour différentes bathymétries.

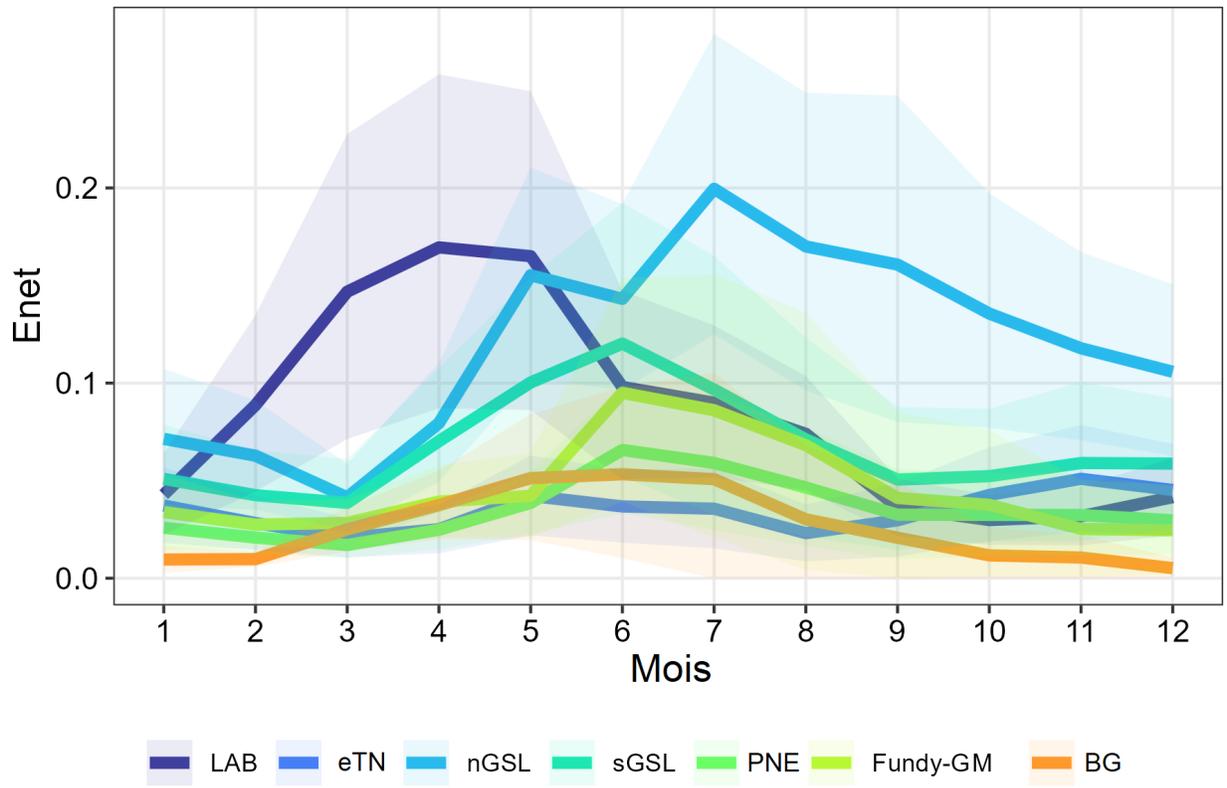


Figure 10. Moyenne mensuelle de l' E_{net} dans les différentes régions. Les zones ombrées représentent les IC à 95 % (moyenne $\pm 1,96 * \text{écart-type}$) de la variabilité interannuelle au cours de la période 1999-2020.

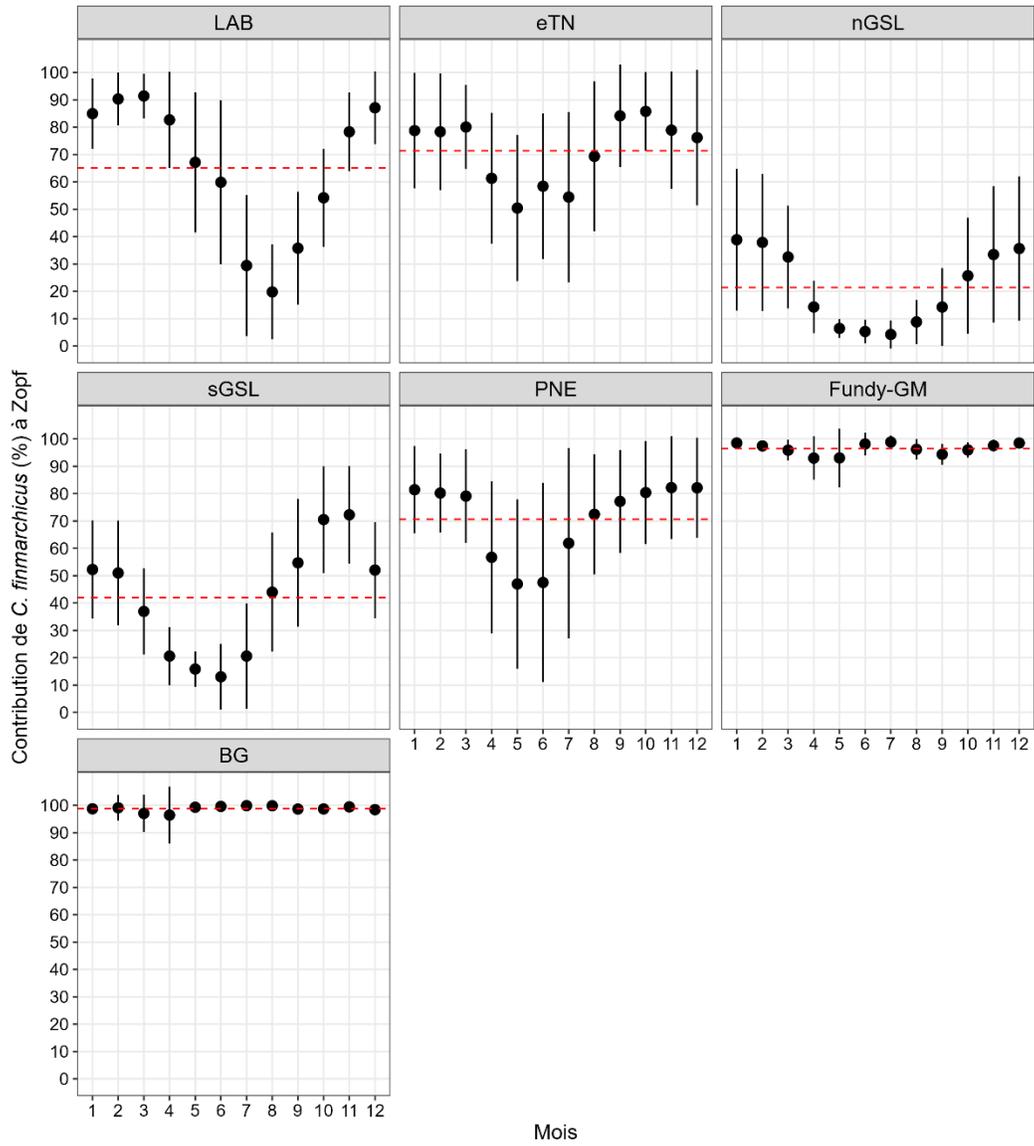


Figure 11. Contribution mensuelle (%) de *C. finmarchicus* à l' E_{net} dans les différentes régions des eaux canadiennes. Moyenne \pm écart-type. Ligne rouge = moyenne de la région.

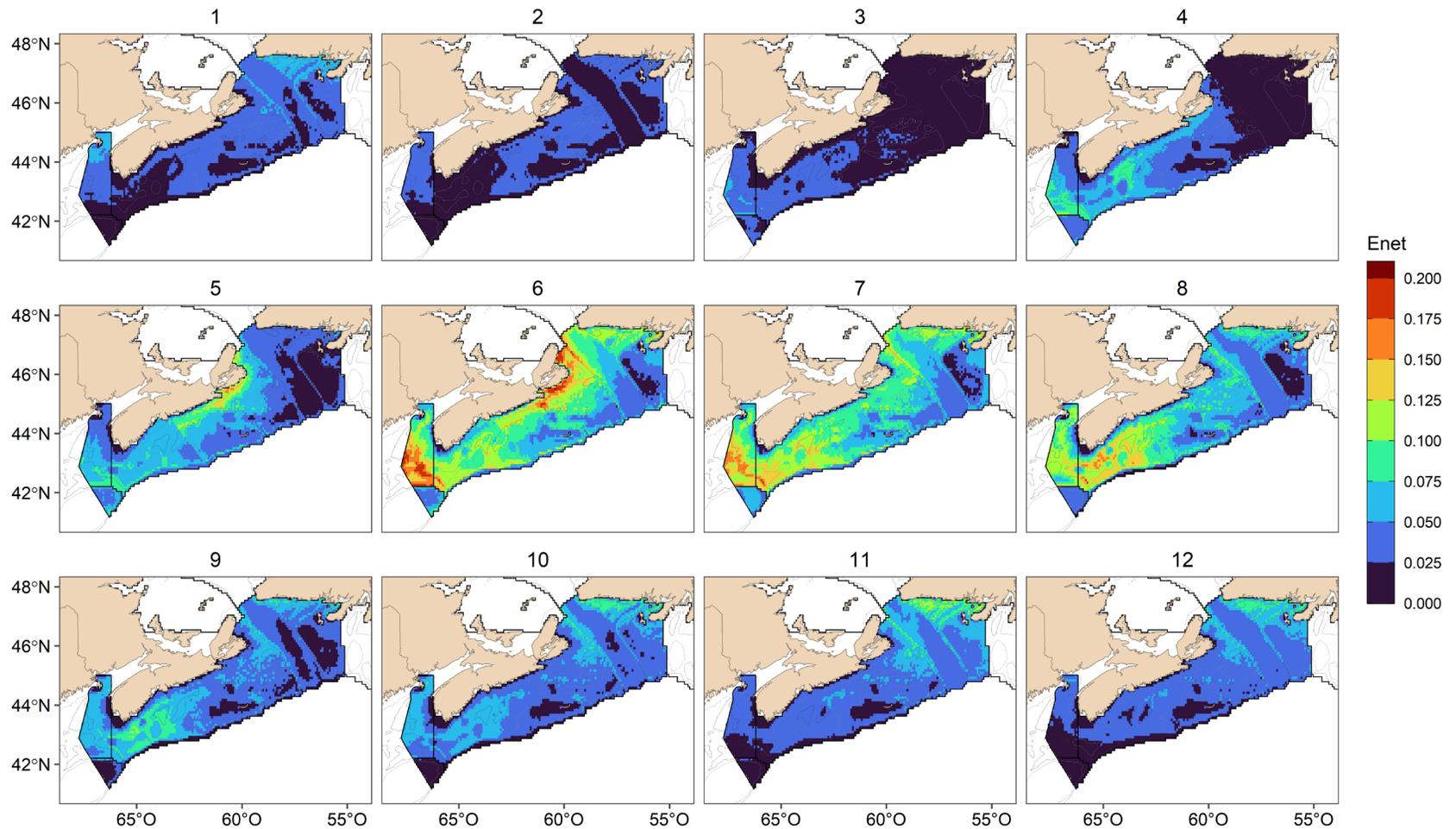


Figure 12. Répartition spatiale des prédictions mensuelles de l' E_{net} dans le secteur Fundy-GM et PNE pendant la période 1999-2020. Les lignes gris clair et gris foncé représentent respectivement les isobathes de 100 et 200 m. Les lignes noires délimitent les régions utilisées pour présenter les résultats dans les eaux canadiennes (figure 1, volet droit).

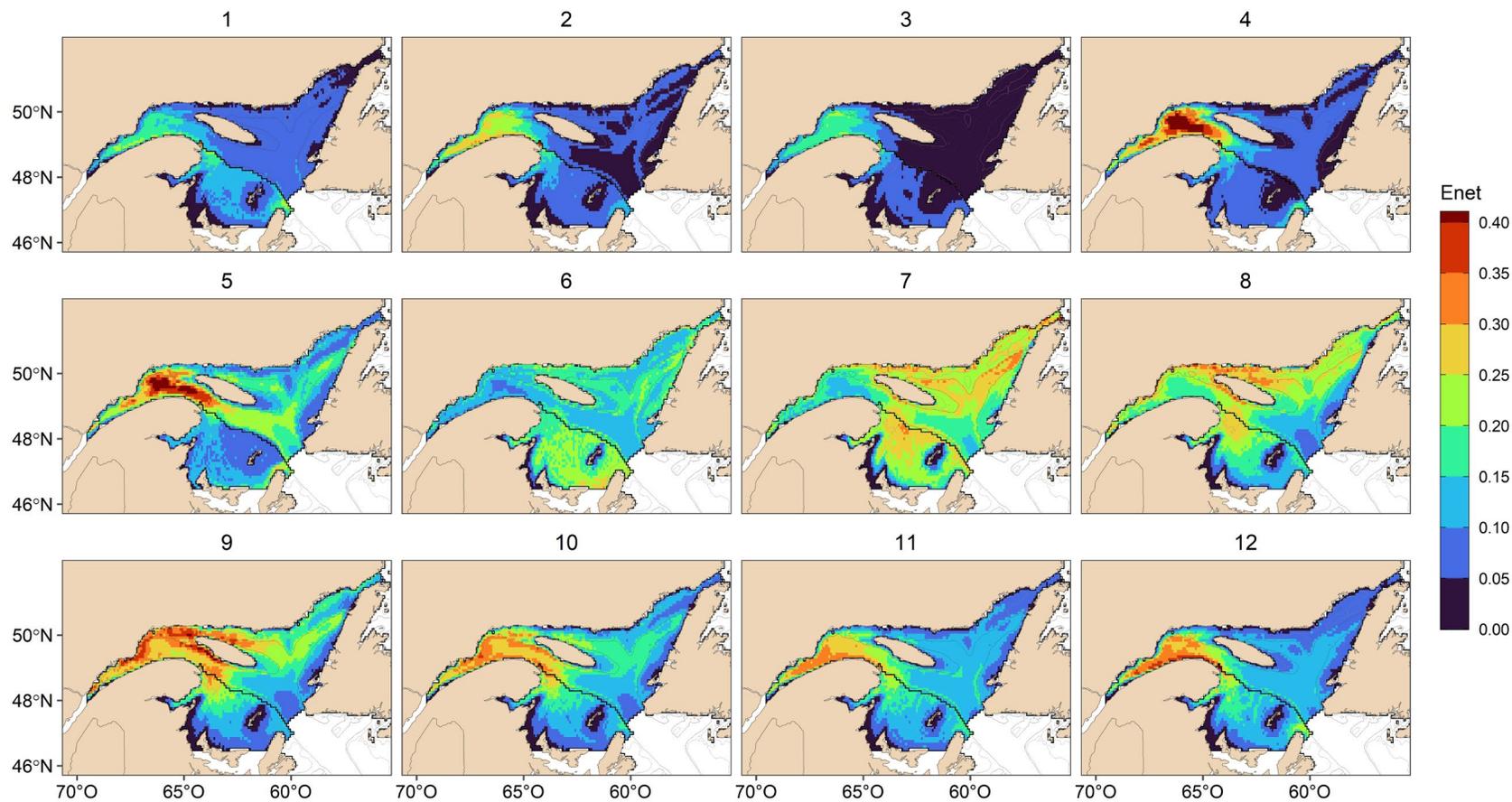


Figure 13. Prédictions mensuelles de l' E_{net} dans sGSL et le nGSL pour la période 1999-2020. Les lignes gris clair et gris foncé représentent respectivement les isobathes de 100 et 200 m. Les lignes noires délimitent les régions utilisées pour présenter les résultats dans les eaux canadiennes (figure 1, volet droit).

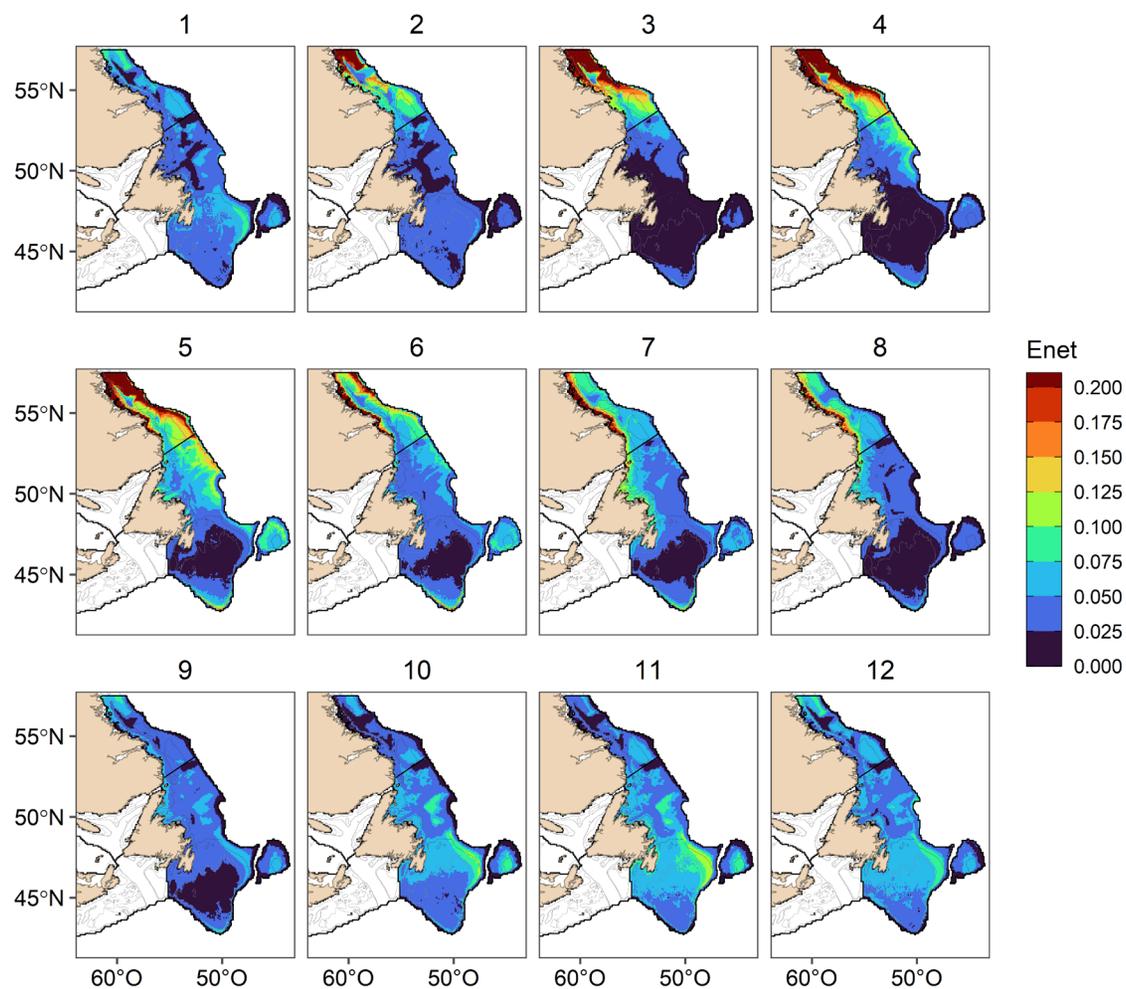


Figure 14. Répartition spatiale des prédictions mensuelles de l' E_{net} dans le secteur du LAB et l'eTN pendant la période 1999-2020. Les lignes gris clair et gris foncé représentent respectivement les isobathes de 100 et 200 m. Les lignes noires délimitent les régions utilisées pour présenter les résultats dans les eaux canadiennes (figure 1, volet droit).

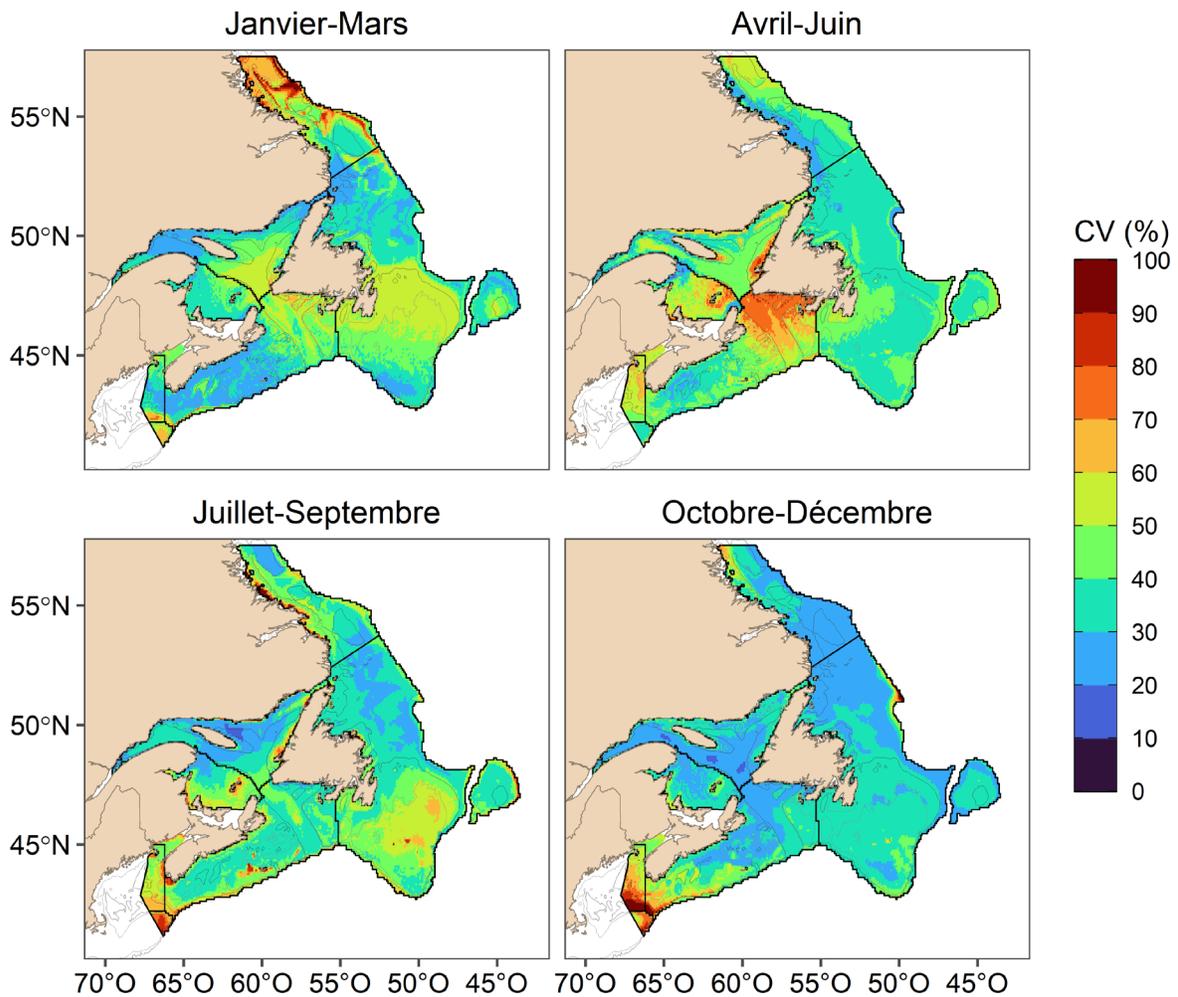


Figure 15. Coefficient de variation (%) de la variabilité annuelle et mensuelle de l' E_{net} par trimestre au cours de la période 1999-2020. Les lignes gris clair et gris foncé représentent respectivement les isobathes de 100 et 200 m. Les lignes noires délimitent les régions utilisées pour présenter les résultats dans les eaux canadiennes (figure 1, volet droit).

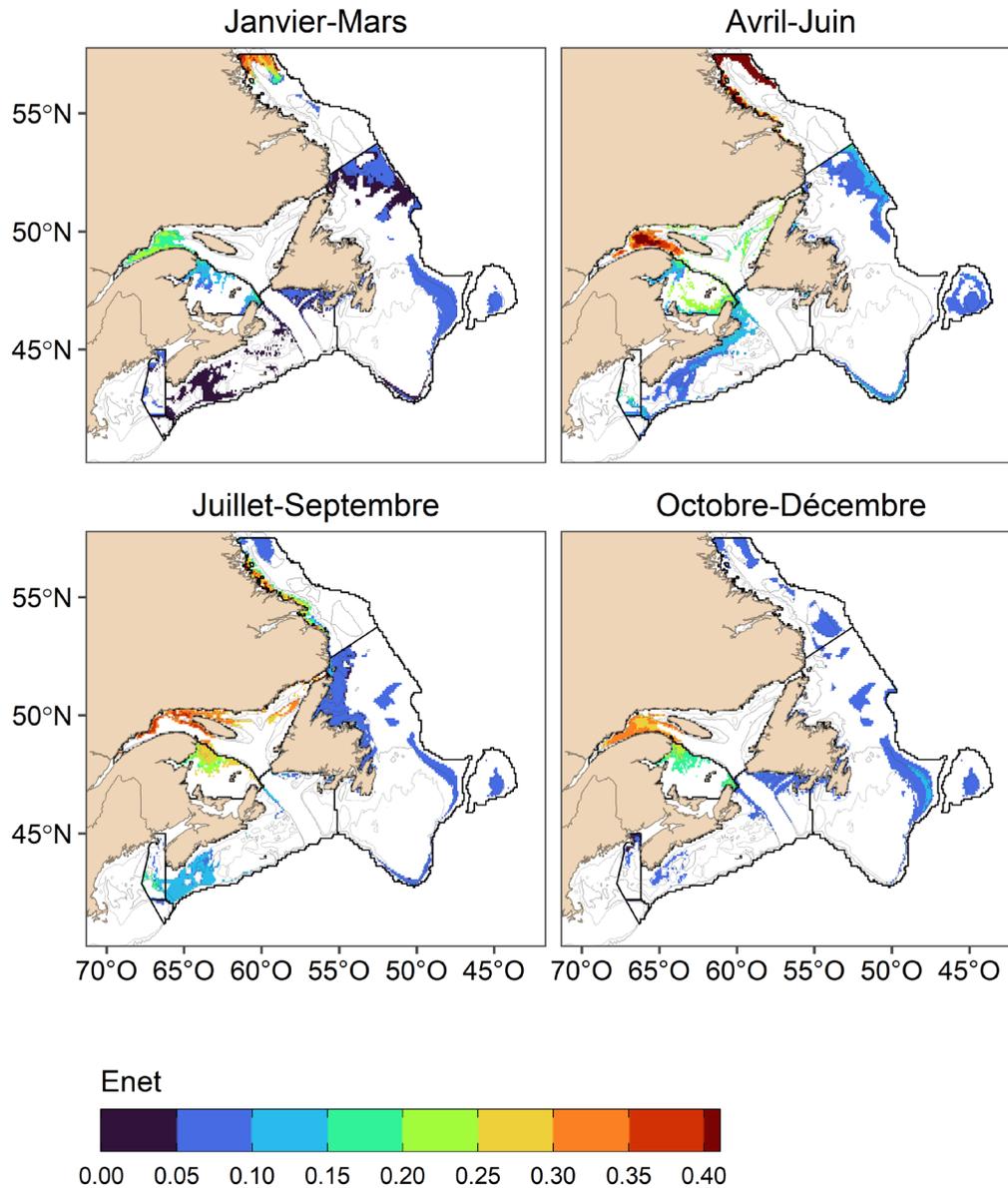


Figure 17. Valeurs moyennes de l' E_{net} considérées comme potentiellement les plus optimales ($E_{net} > 90^{\text{e}}$ quantile) pour l'alimentation des baleines noires dans différentes régions et différents trimestres de l'année. Les lignes noires délimitent les régions utilisées pour calculer les quantiles dans les eaux canadiennes (figure 1, volet droit).

ANNEXE 1

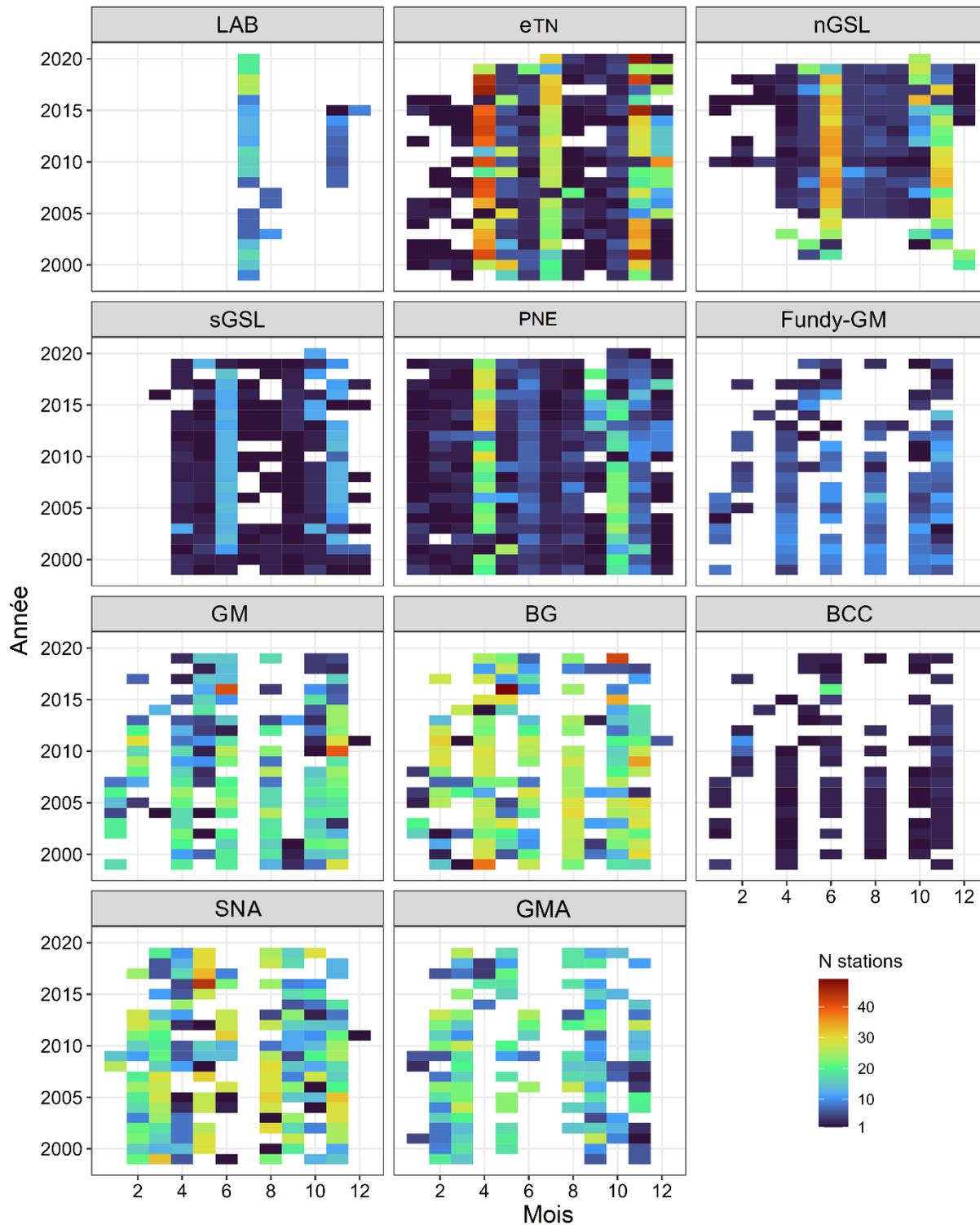


Figure A.1.1. Résumé de la couverture spatiale (par région) et temporelle (mois x année) des stations de zooplancton incluses dans les MRE.

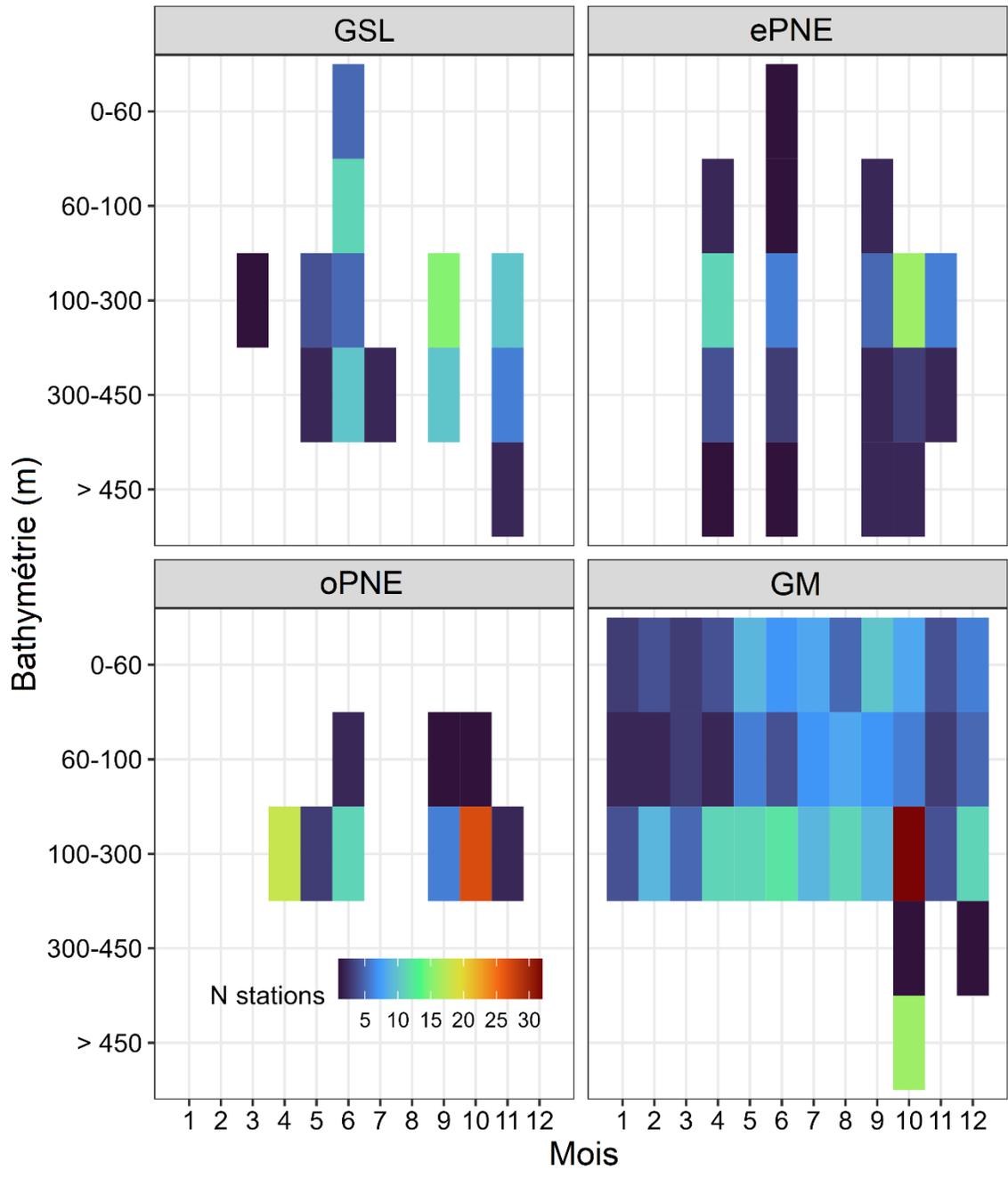


Figure A.1.2. Résumé de la couverture spatiale (par région et bathymétrie) et temporelle (mois) des stations résolues en profondeur incluses dans les modèles de répartition verticale.

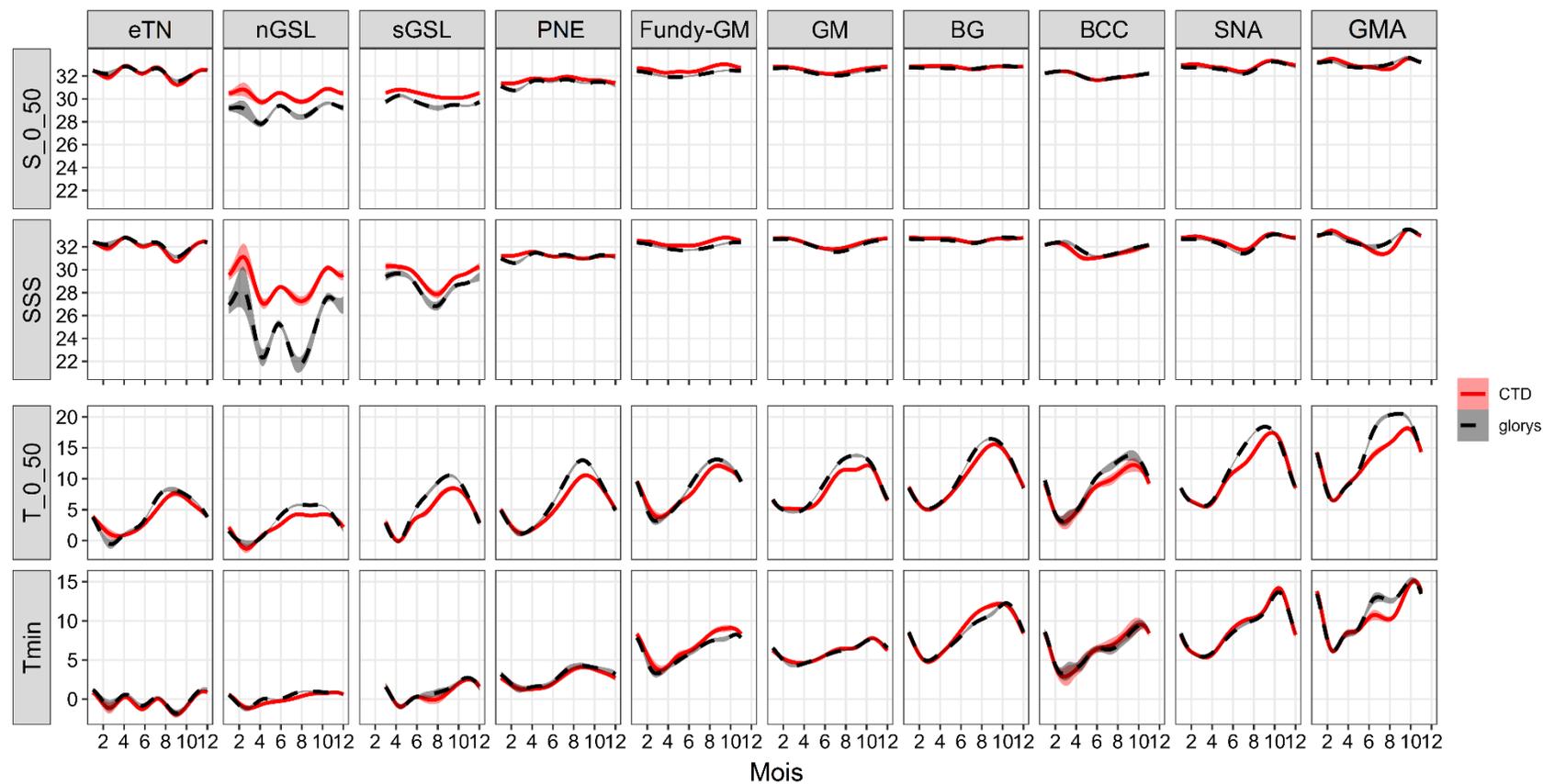


Figure A.1.3. Comparaison des tendances saisonnières de la salinité (S_{0_50} et SSS) et de la température (T_{0_50} et Tmin) entre l'instrument CTD (fonctions de lissage rouges) et les produits GLORYS12v1 (fonctions de lissage noirs) aux stations de zooplancton.

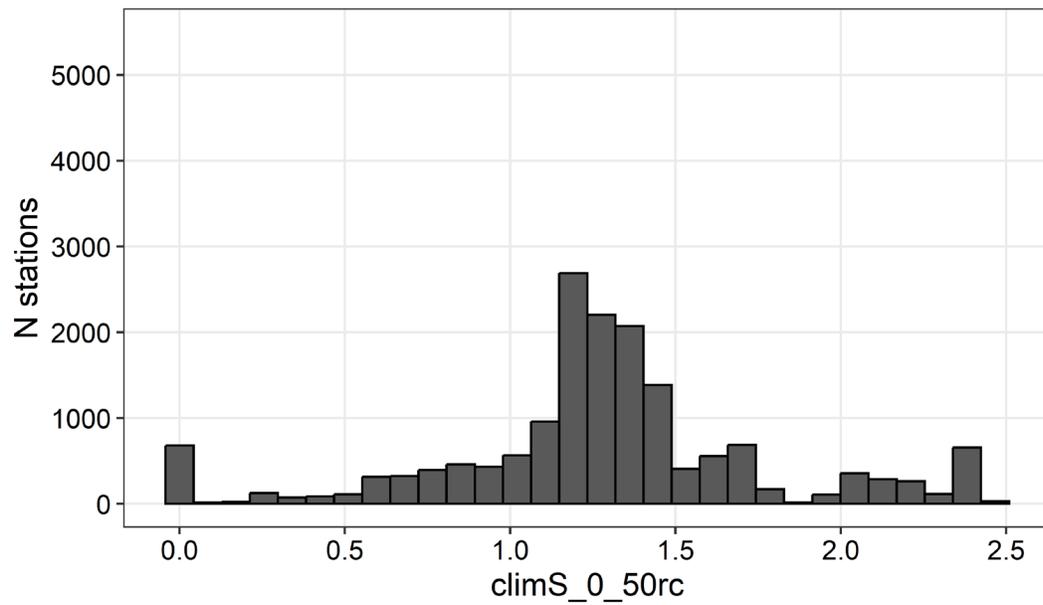
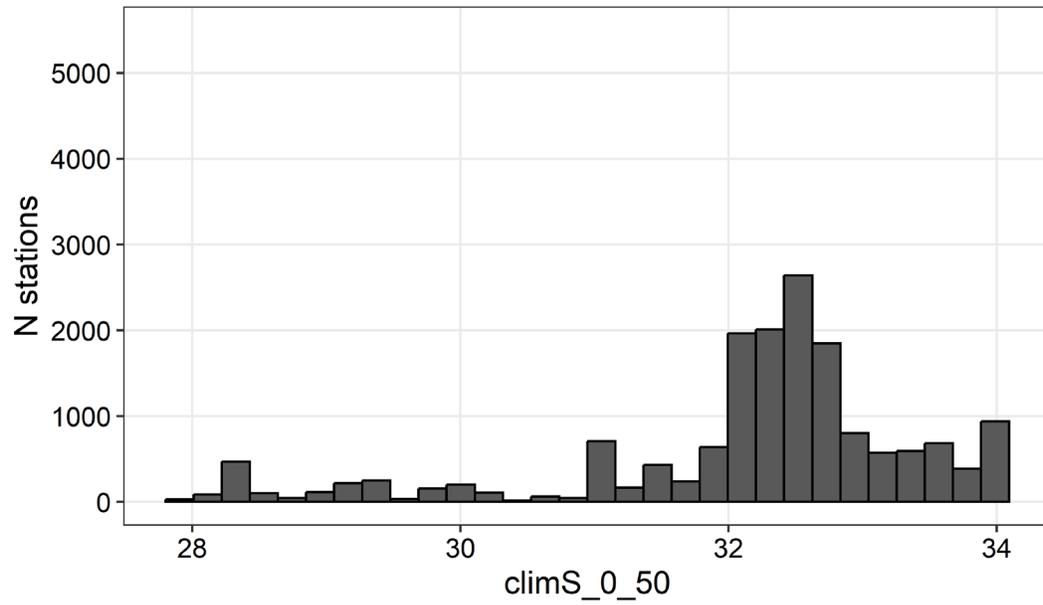


Figure A.1.4. Histogrammes montrant la répartition de climS_0_50 aux positions des stations de zooplancton avant (volet supérieur) et après (volet inférieur) la transformation.

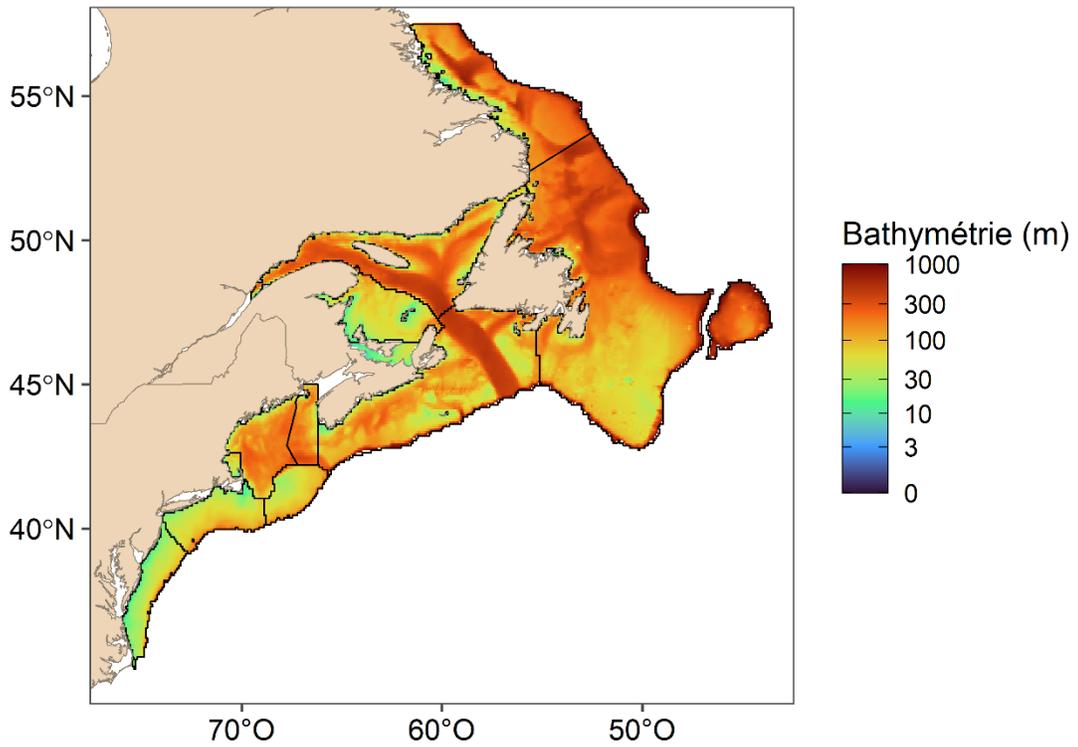


Figure A.1.5. Bathymétrie (m) extraite de GLORYS12v1 et utilisée comme covariable dans les MRE. Les lignes noires délimitent les régions utilisées pour présenter les résultats (voir les volets droits dans la figure 1 pour le Canada et la figure A.3. 5 pour la zone transfrontalière).

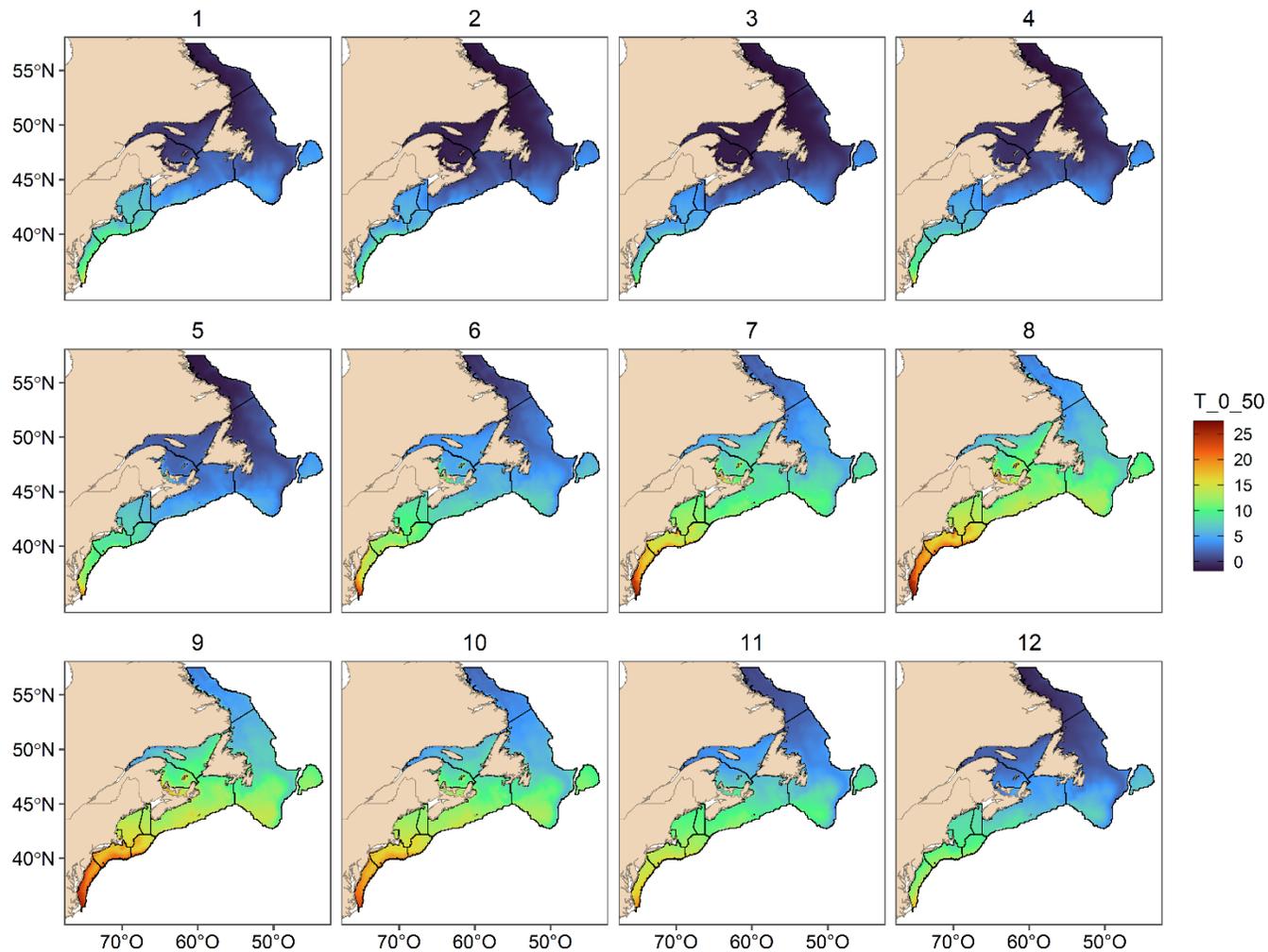


Figure A.1.6. Moyenne de T_{0-50} (°C) du produit mensuel GLORYS12v1 pour chaque mois de 1999-2020. Les lignes noires délimitent les régions utilisées pour présenter les résultats (voir les volets droits dans la figure 1 pour le Canada et la figure A.3. 5 pour la zone transfrontalière).

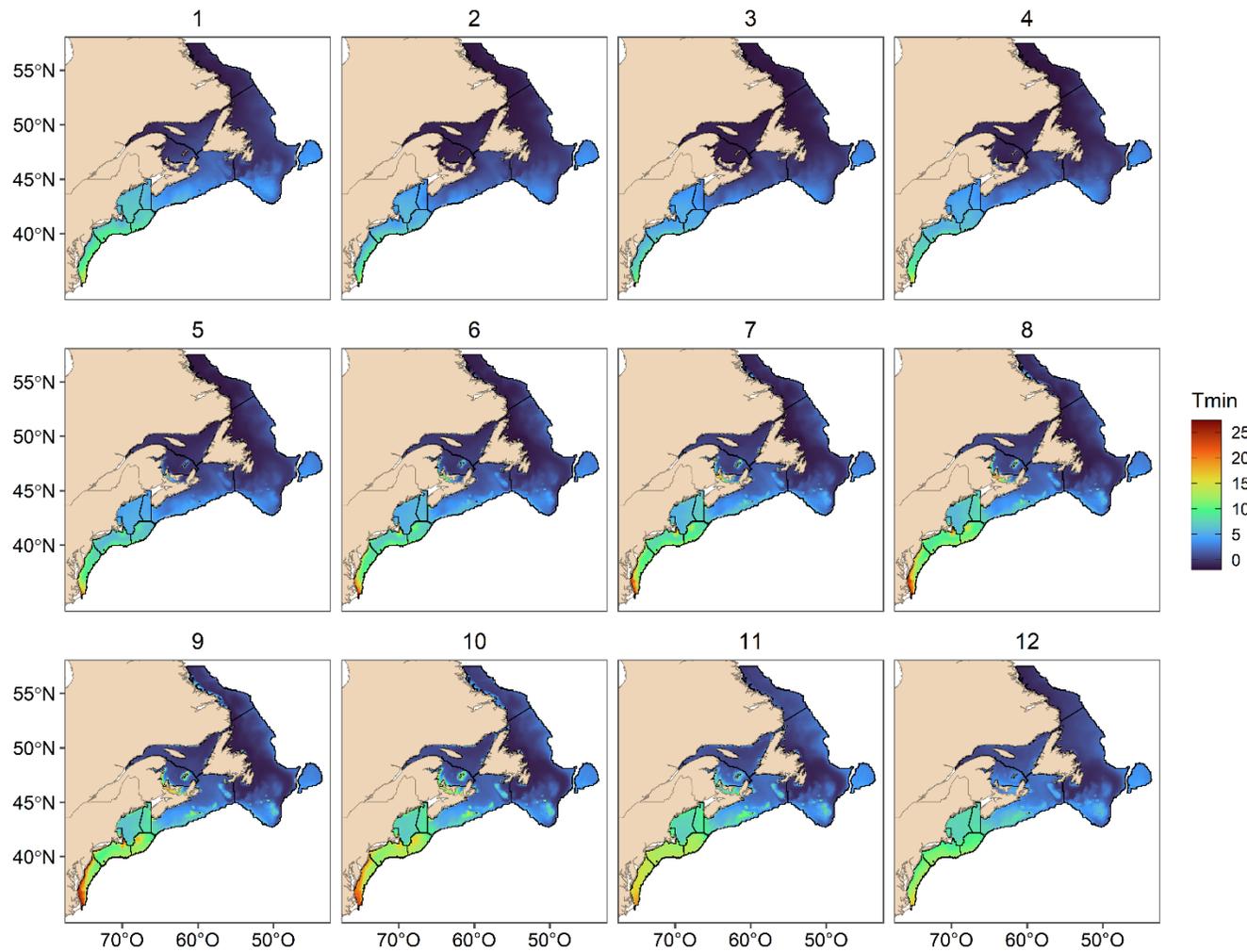


Figure A.1.7. Moyenne de Tmin en °C du produit mensuel GLORYS12v1 pour chaque mois de 1999 à 2020. Les lignes noires délimitent les régions utilisées pour présenter les résultats (voir les volets droits dans la figure 1 pour le Canada et la figure A.3. 5 pour la zone transfrontalière).

ANNEXE 2

Tableau A.2.1. Équations pour la détermination du gradient de taille en fonction de la température pour chaque stade de chaque espèce. Les mois pour calculer T_{0_50} pendant les stades actifs sont indiqués. Les résultats de l'étude de Campbell et al. (2001) sont multipliés par un facteur d'échelle pour tenir compte de la différence de taille propre au stade avec *C. finmarchicus*. Le résultat est divisé par un rapport carbone/poids sec.

Taxons	Stade	Mois T_{0_50}	Équations Campbell et al. (2001)		Mise à l'échelle		Carbone au poids sec
<i>C. finmarchicus</i>	CIV		$-4.71 * T_{0-50} + 94$	-		/	
	CV	Mai-Août	$-18.8 * T_{0-50} + 332$	-	-	/	0.52
	CVI		$-6.26 * T_{0-50} + 262$	-		/	
<i>C. glacialis</i>	CIV		$-4.71 * T_{0-50} + 94$	*	2.5	/	
	CV	Mai-Juin	$-18.8 * T_{0-50} + 332$	*	1.6	/	0.52
	CVI		$-6.26 * T_{0-50} + 262$	*	1.8	/	
<i>C. hyperboreus</i>	CIV		$-4.71 * T_{0-50} + 94$	*	5	/	
	CV	Mai-Juin	$-18.8 * T_{0-50} + 332$	*	5	/	0.6
	CVI		$-6.26 * T_{0-50} + 262$	*	8	/	

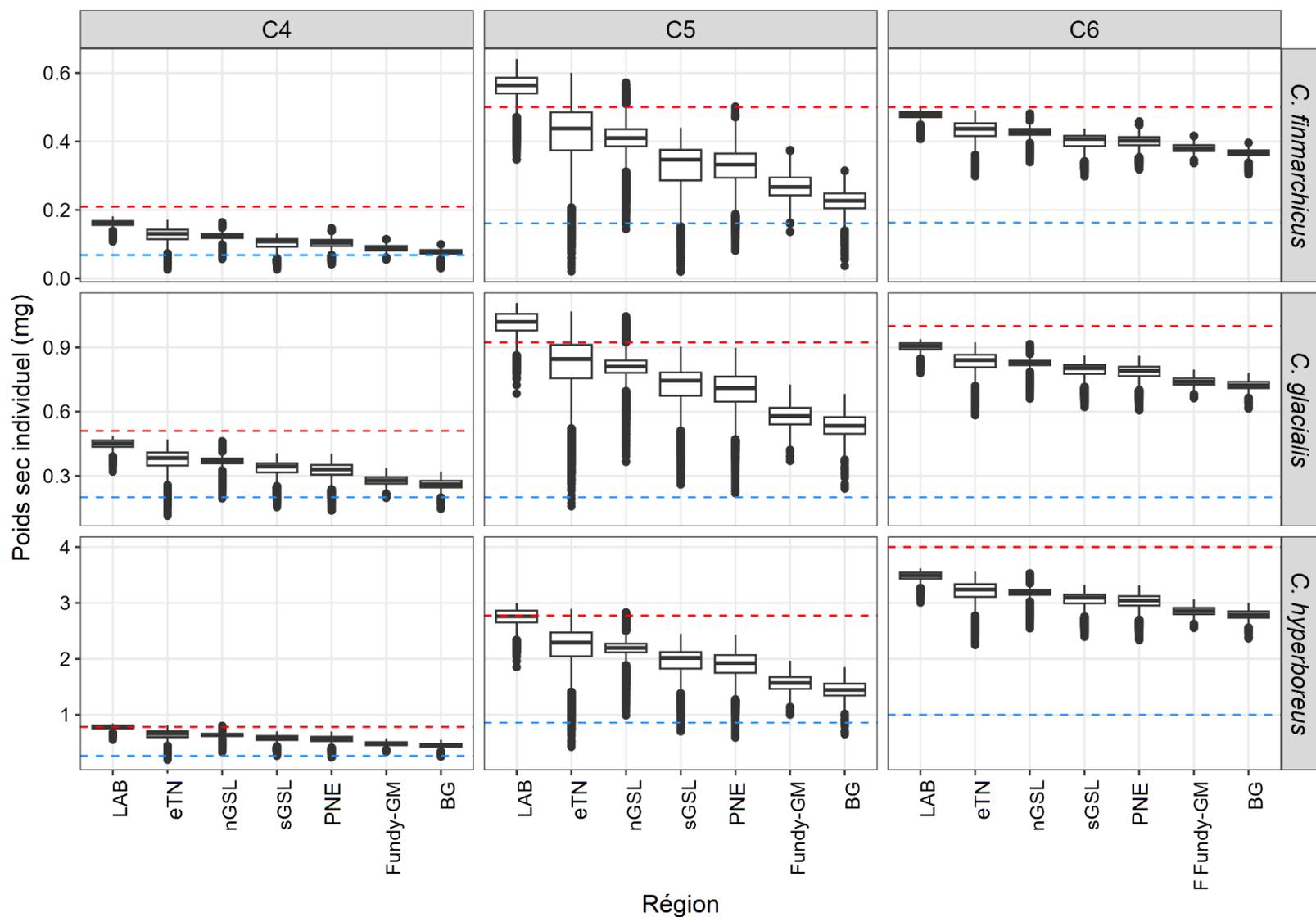


Figure A.2.1. Diagramme de quartiles du poids sec individuel estimé (mg) par espèce, stade et région avec T_{0-50} . Les lignes tiretées rouges et bleues représentent les quantiles 10 et 90 % du poids sec individuel dans Helenius et al. (2022). Les poids secs individuels estimés en dehors de ces lignes tiretées sont limités à ces valeurs maximales.

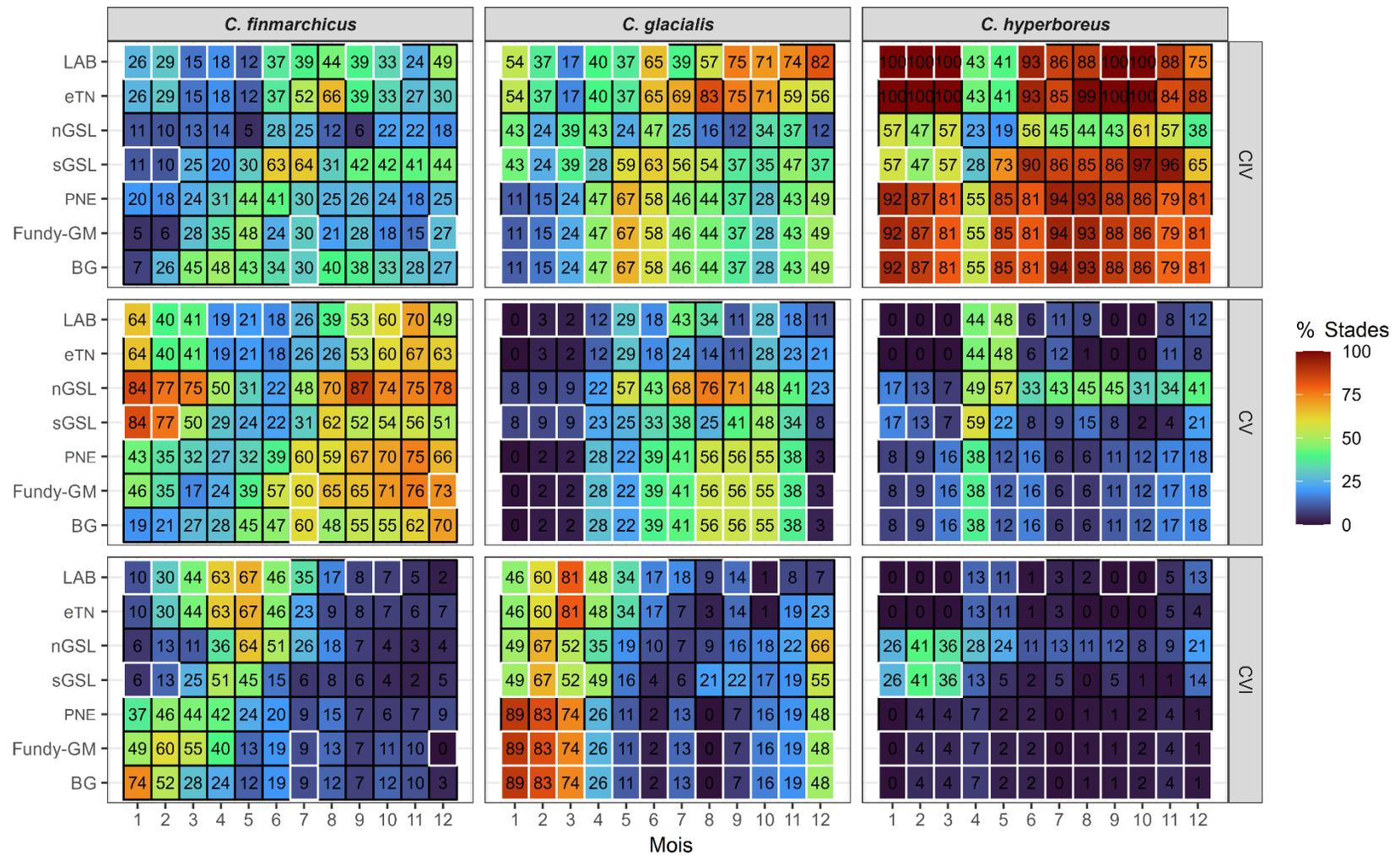


Figure A.2.2. Climatologie mensuelle du pourcentage de copépodites aux stades CIV, CV, CVI sur la moyenne de l'abondance totale au stade CIV-CVI pour chaque région et pour chaque espèce. Les cases blanches indiquent qu'aucun échantillon de zooplancton n'était disponible et que les proportions ont été dérivées à partir des régions adjacentes.

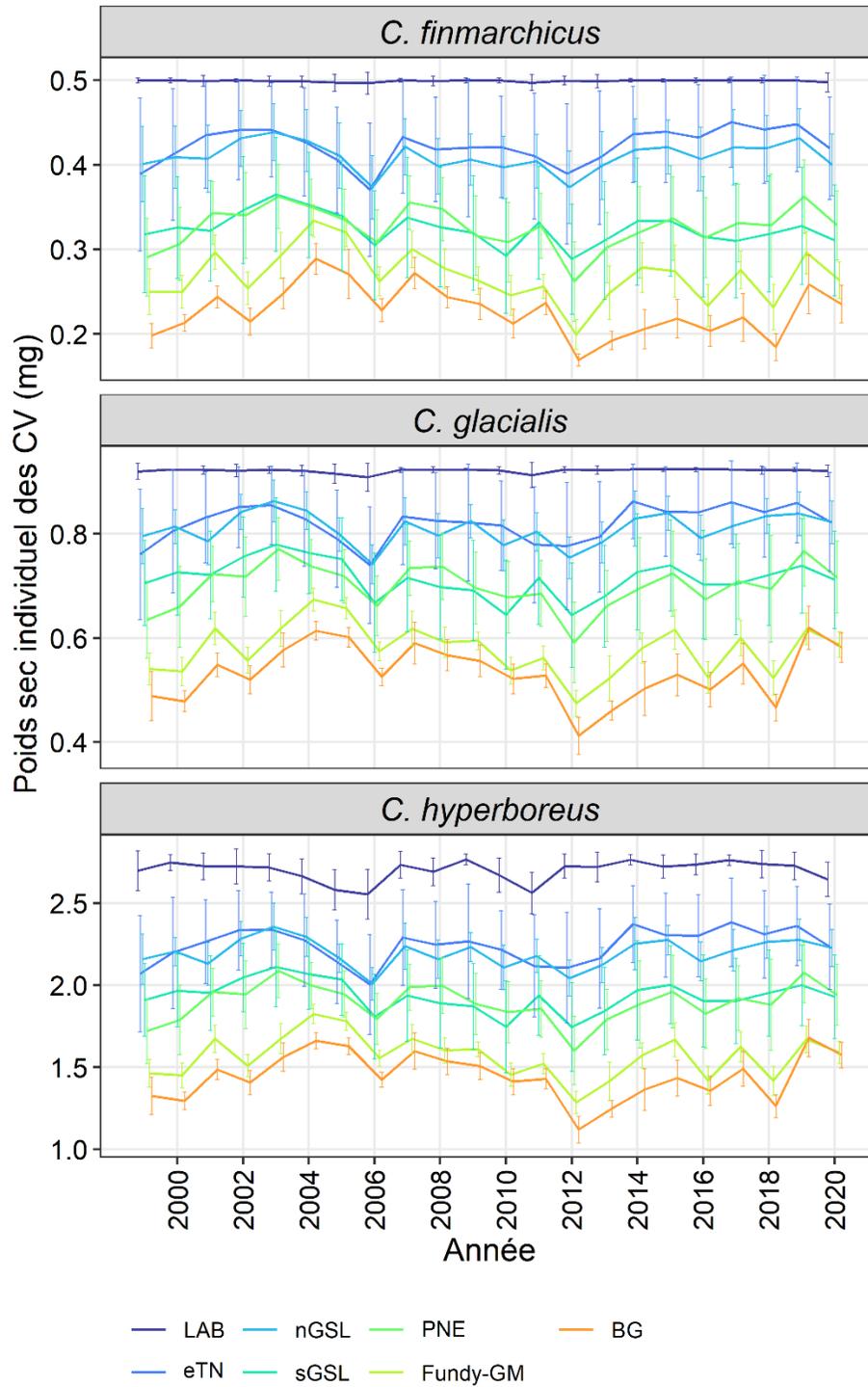


Figure A.2.3. Variation interannuelle du poids sec individuel du CV prédit par la température après que les valeurs aberrantes ont été contraintes. La ligne continue représente la moyenne annuelle et la barre d'erreur, l'écart-type pour chaque région.

ANNEXE 3

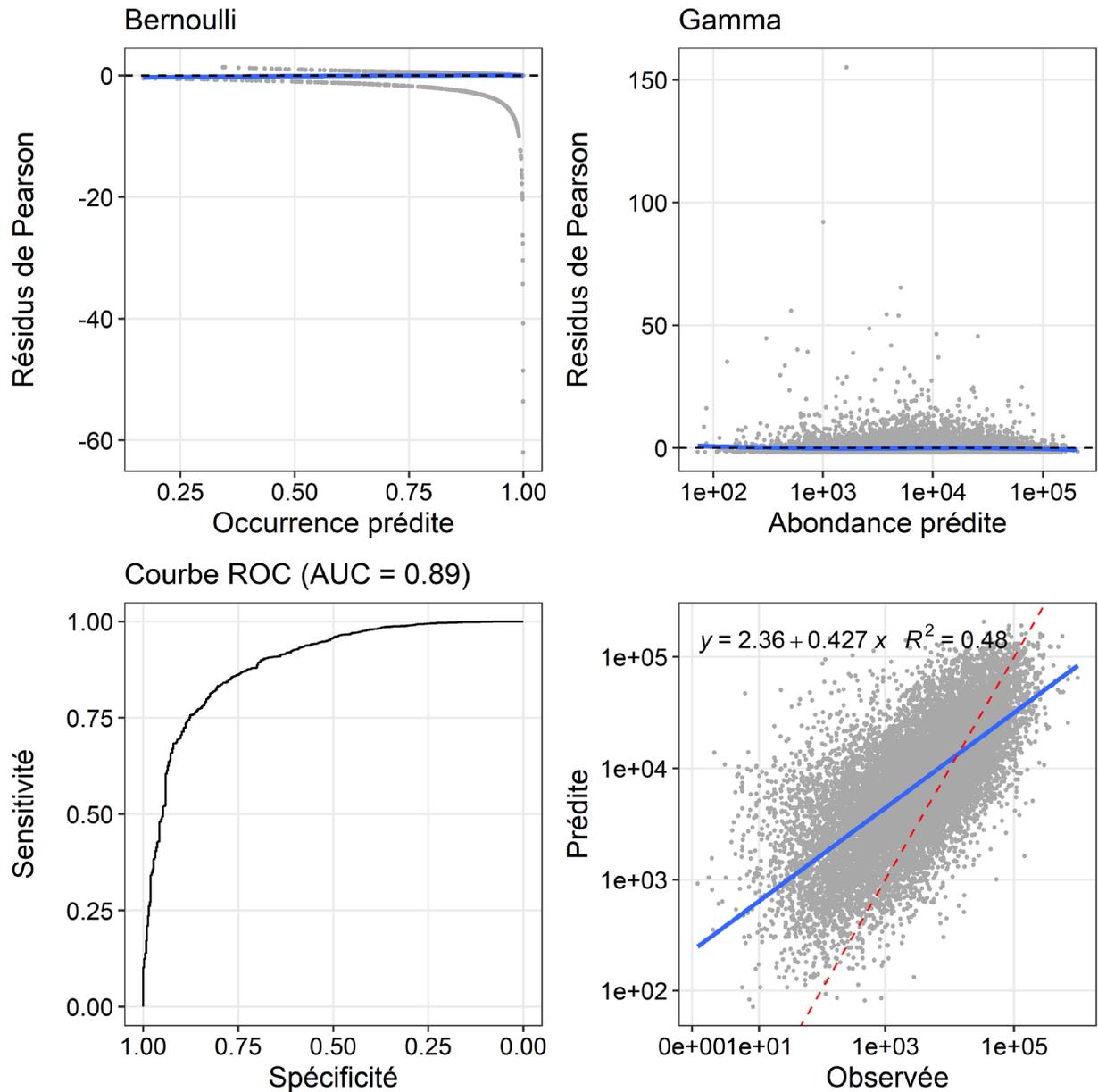


Figure A.3.1. Validation du modèle de Bernoulli (à gauche) et du modèle Gamma (à droite) pour *C. finmarchicus*. L'homogénéité est vérifiée dans les volets supérieurs. Le lissage des résidus de Pearson par rapport aux prédictions (bleu) devrait être proche de 0 (ligne noire tiretée). L'exactitude des prédictions est vérifiée par la courbe ROC pour le modèle de Bernoulli (à gauche, voir également le tableau 2 pour la SQV) et le modèle Gamma a été validé par une relation linéaire entre les prédictions d'abondance et les observations.

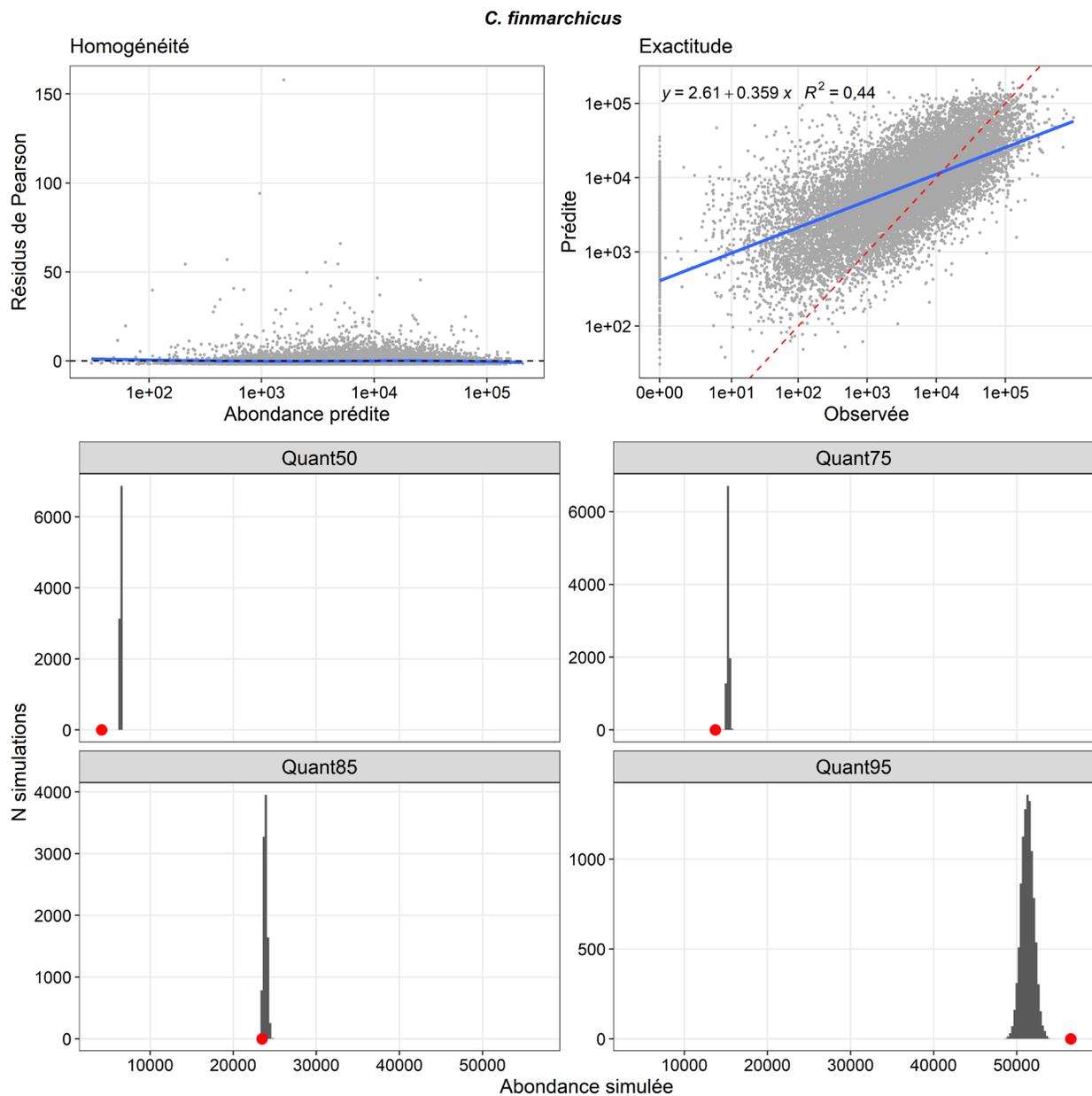


Figure A.3.2. Validation du modèle $ZAG(\pi \times \mu)$ pour *C. finmarchicus*. L'homogénéité et l'exactitude sont vérifiées dans le volet supérieur, voir la figure A.3. 1 pour plus de détails. Sur les volets du bas, la répartition de la simulation ZAG (histogrammes gris) a été vérifiée par rapport aux observations (cercle rouge) pour chacun des quantiles 50, 75, 85 et 95.

C. glacialis

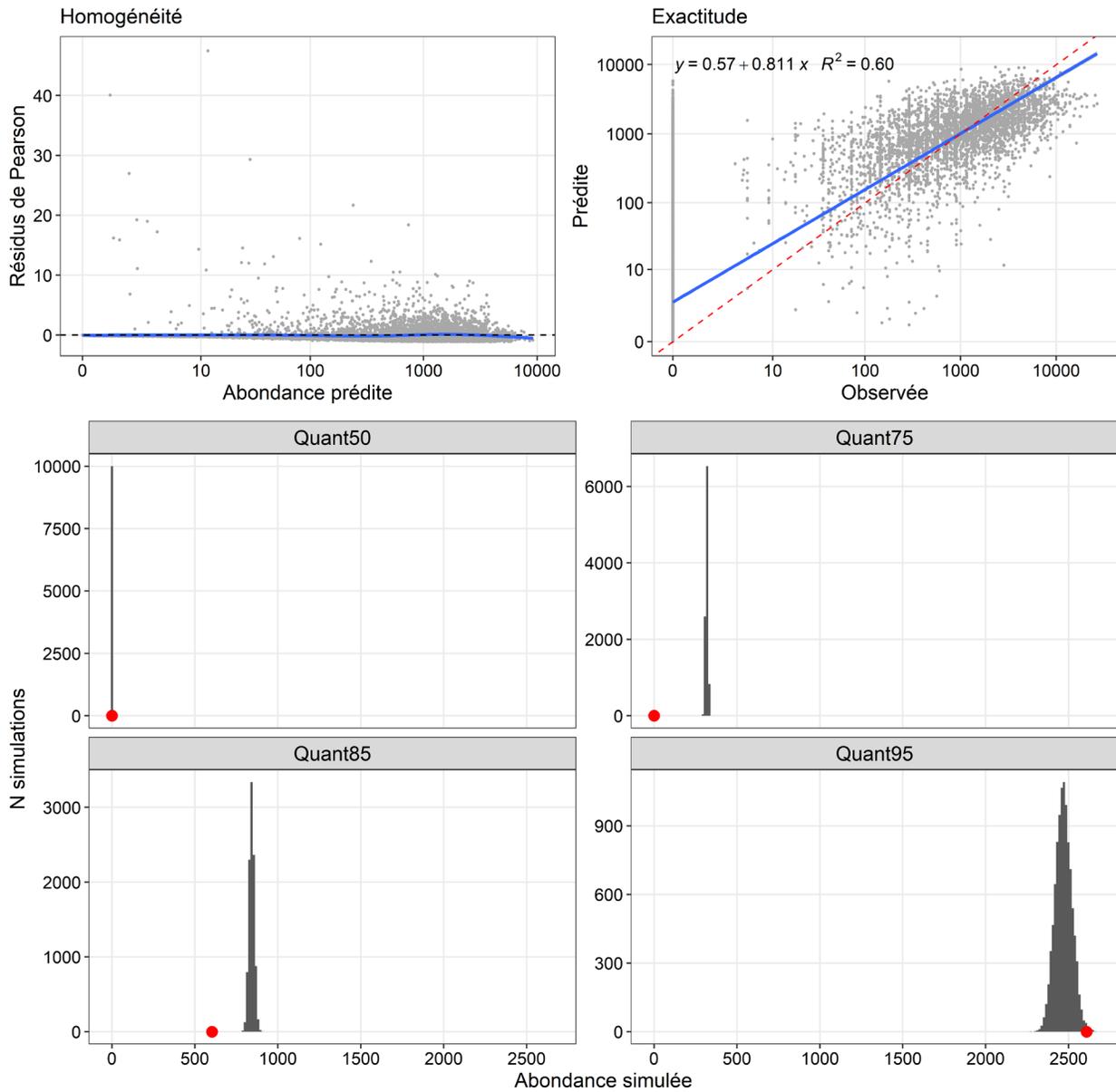


Figure A.3.3. Validation du modèle ZAG($\pi \times \mu$) pour *C. glacialis*. L'homogénéité et la précision sont vérifiées dans le volet supérieur, voir la figure A.3. 1 pour plus de détails. Sur les volets du bas, la répartition de la simulation ZAG (histogrammes gris) a été vérifiée par rapport aux observations (cercle rouge) pour chacun des quantiles 50, 75, 85 et 95.

C. hyperboreus

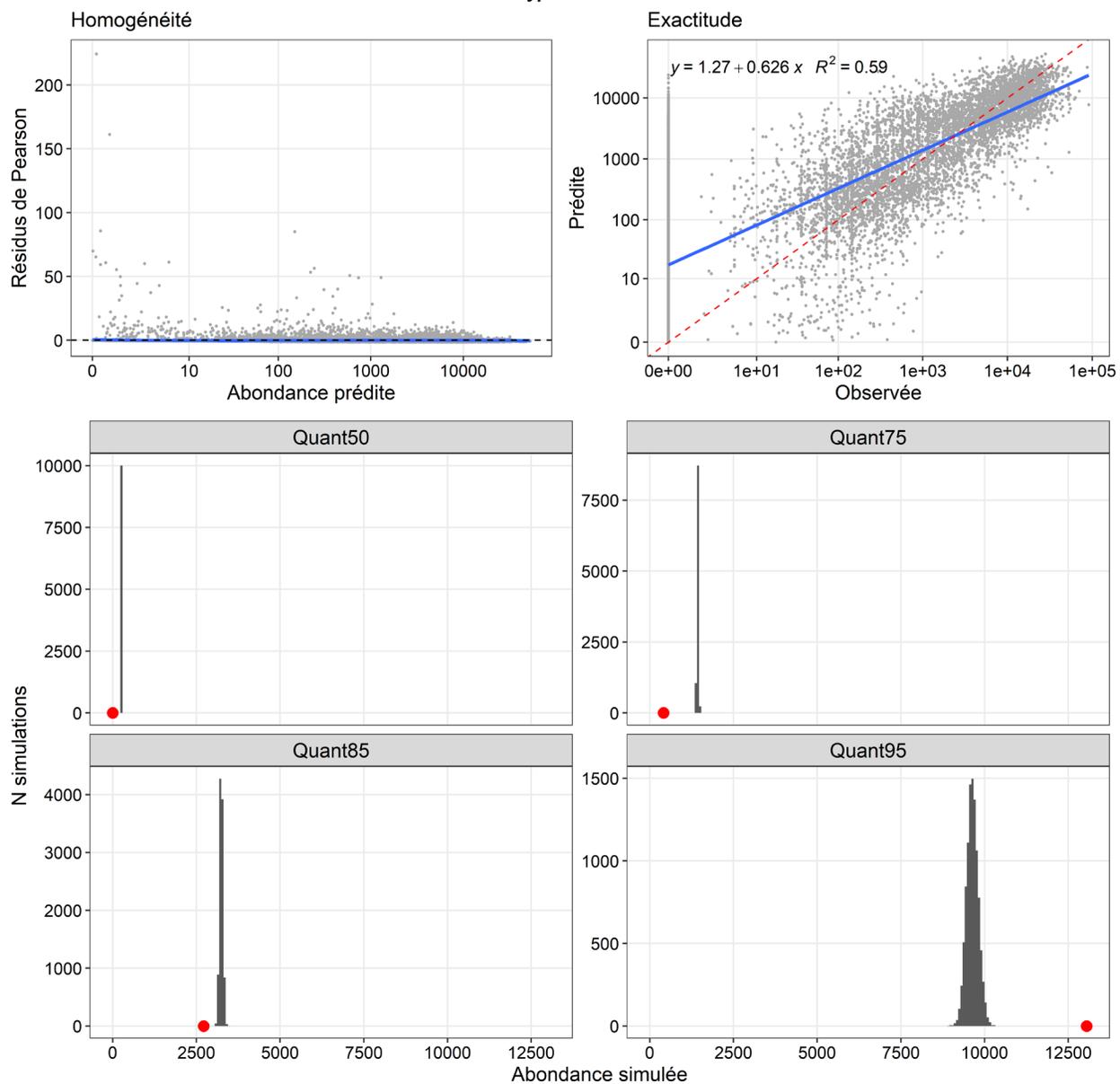


Figure A.3.4. Validation du modèle ZAG($\pi \times \mu$) pour *C. hyperboreus*. L'homogénéité et la précision sont vérifiées dans le volet supérieur, voir la figure A.3. 1 pour plus de détails. Sur les volets du bas, la répartition de la simulation ZAG (histogrammes gris) a été vérifiée par rapport aux observations (cercle rouge) pour chacun des quantiles 50, 75, 85 et 95.

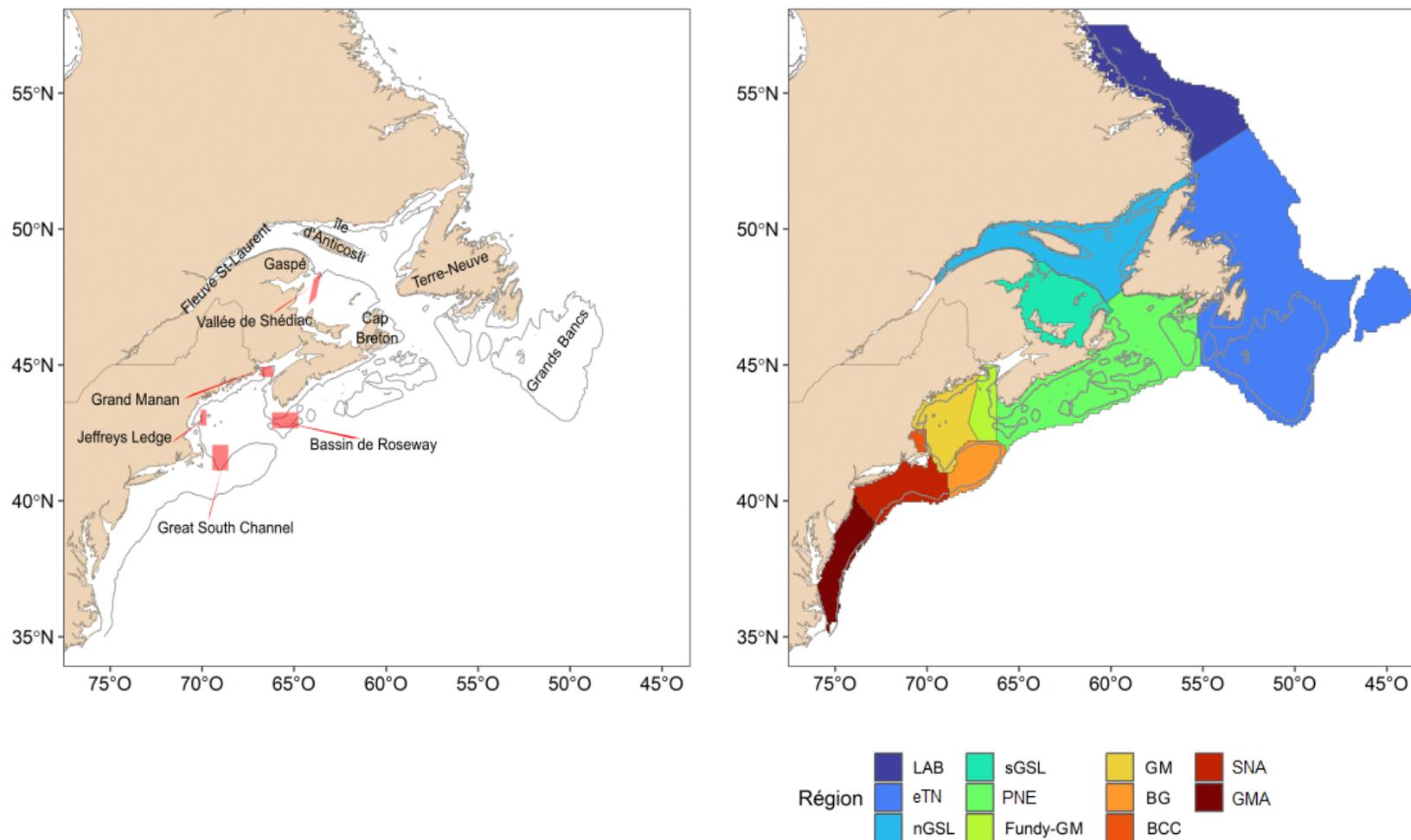


Figure A.3.5. Volet gauche : Zone d'étude avec repères géographiques. Volet droit : Cartes des régions utilisées pour la présentation des résultats. Le modèle 2 utilise également ces régions, mais avec Fundy et PNE, et LAB et eNL regroupés dans deux régions plus grandes pour tenir compte de la position des stations fixes du PMZA. Les lignes grises représentent les isobathes de 100 m.

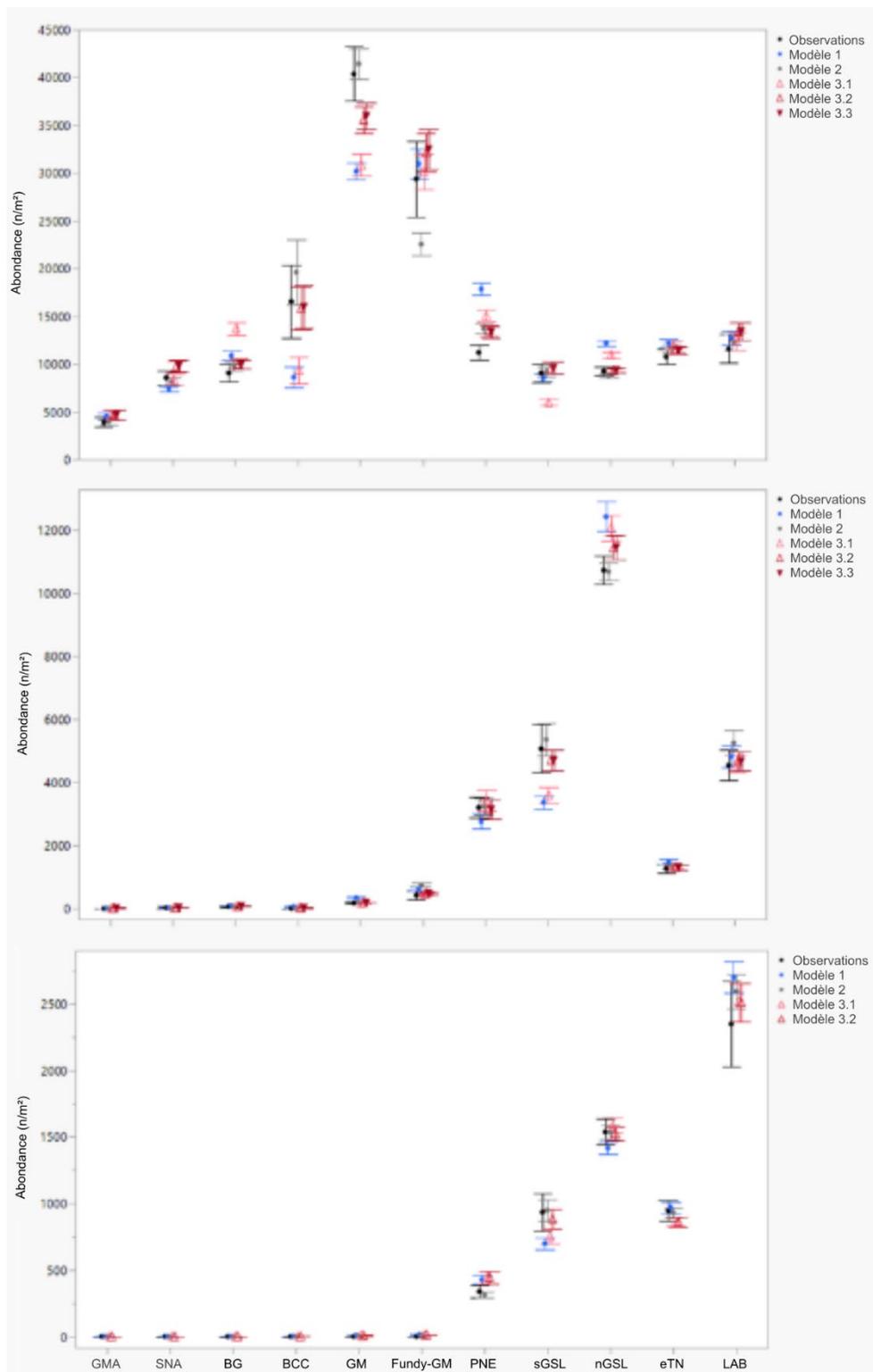


Figure A.3.6. Abondance moyenne observée et prédite et IC à 95 % de *C. finmarchicus* (en haut), de *C. hyperboreus* (au milieu) et de *C. glacialis* (en bas) dans différentes régions au cours de la période 1999-2020. Voir le texte pour la description des différents modèles. Le modèle 3.3 n'a pas été réalisé pour *C. glacialis*.

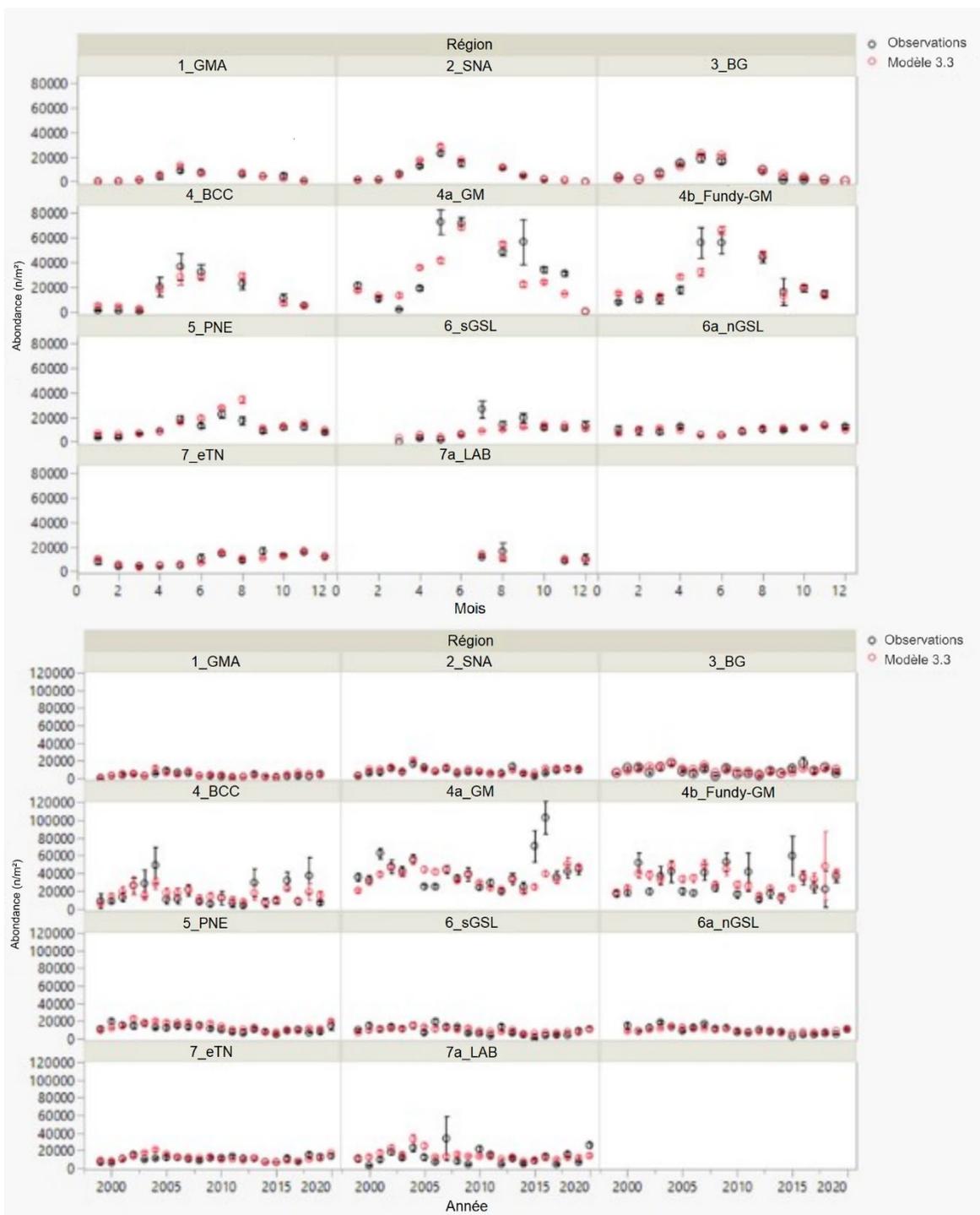


Figure A.3.7. *C. finmarchicus*. Moyenne mensuelle (en haut) et annuelle (en bas) de l'abondance observée et prédite (modèle 3.3) dans différentes régions au cours de la période 1999-2020. Barres d'erreur = erreur standard

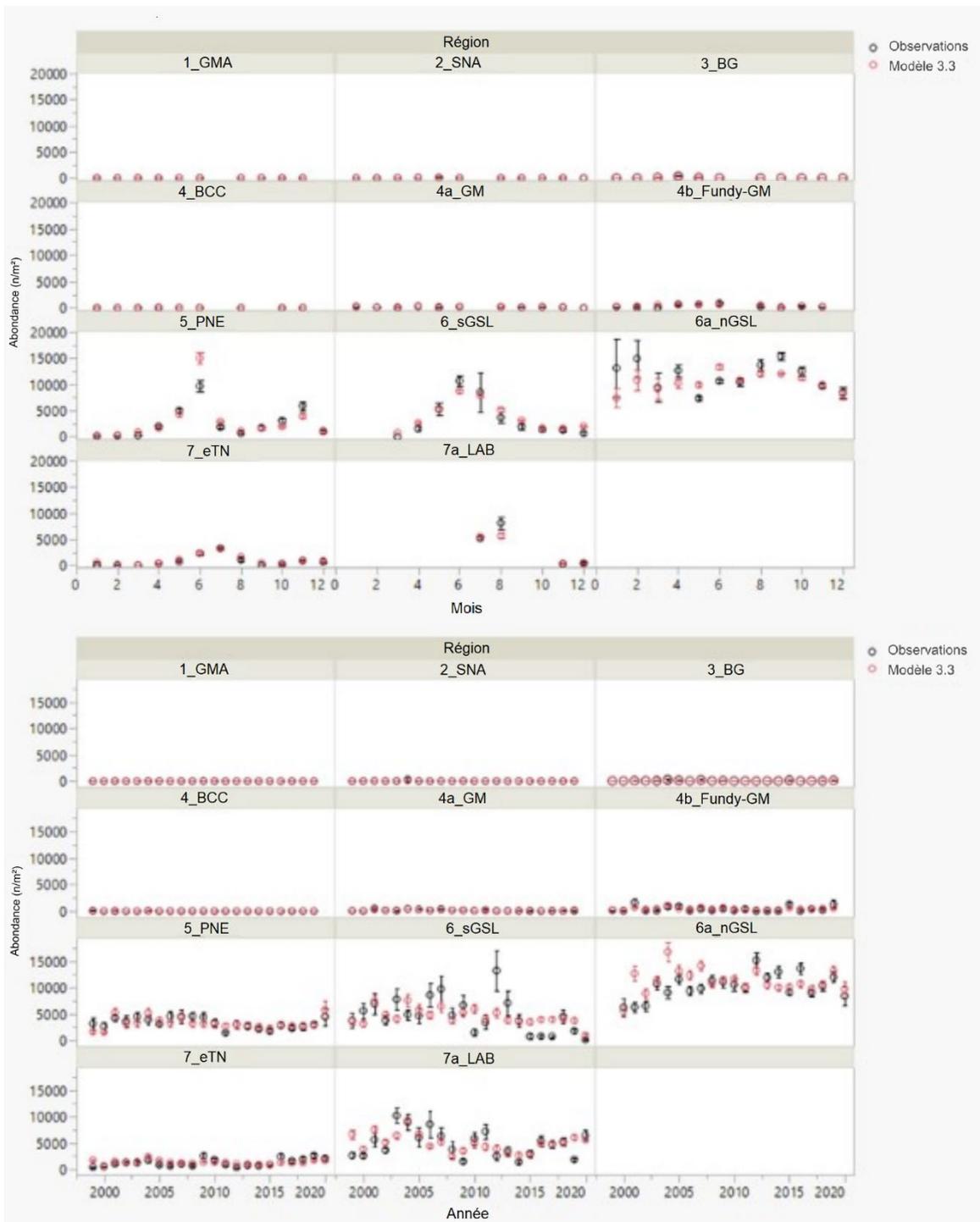


Figure A.3.8. C. hyperboreus. Moyenne mensuelle (en haut) et annuelle (en bas) de l'abondance observée et prédite (modèle 3.3) dans différentes régions au cours de la période 1999-2020. Barres d'erreur = erreur standard

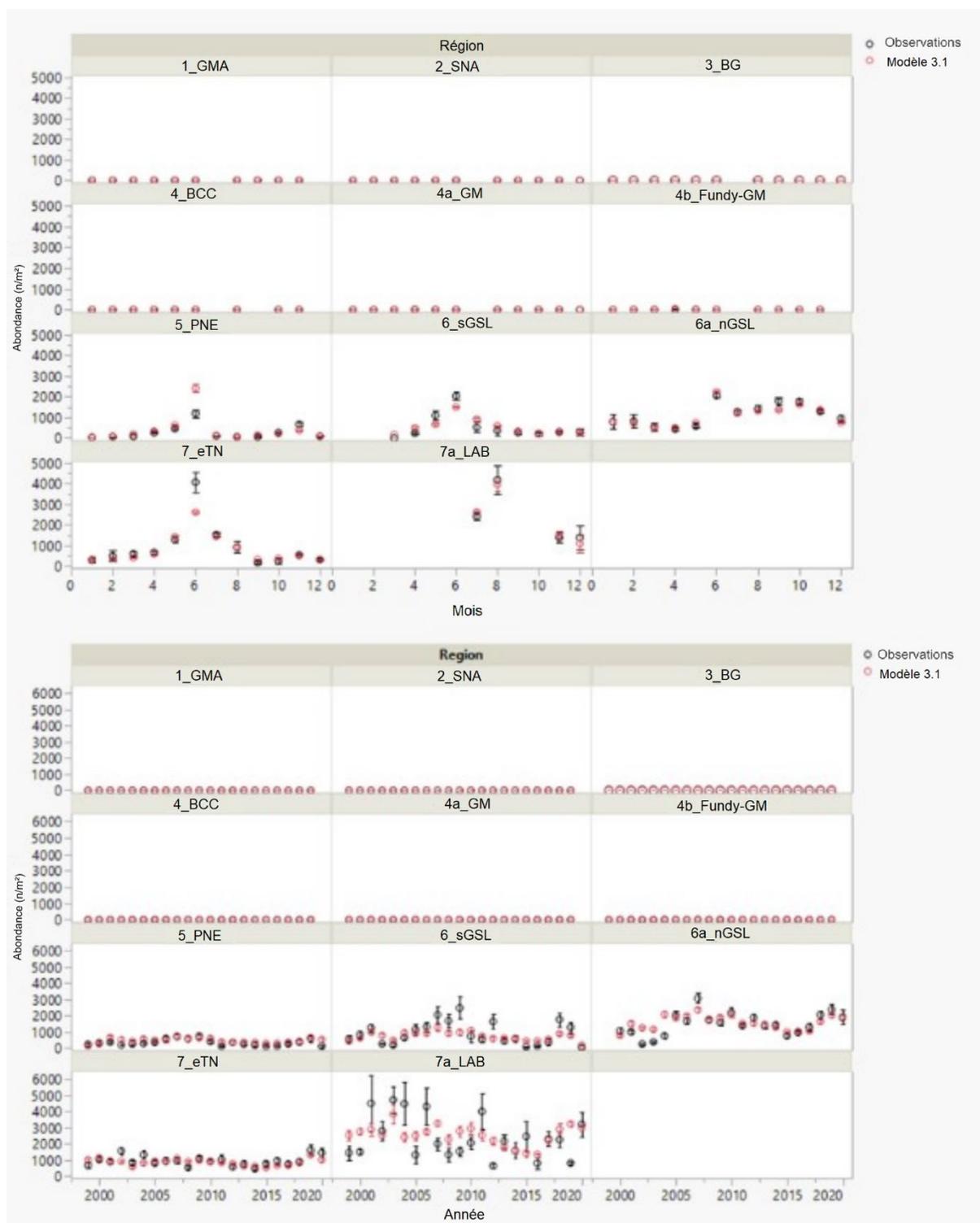


Figure A.3.9. *C. glacialis*. Moyenne mensuelle (en haut) et annuelle (en bas) de l'abondance observée et prédite (modèle 3.1) dans différentes régions au cours de la période 1999-2020.

ANNEXE 4

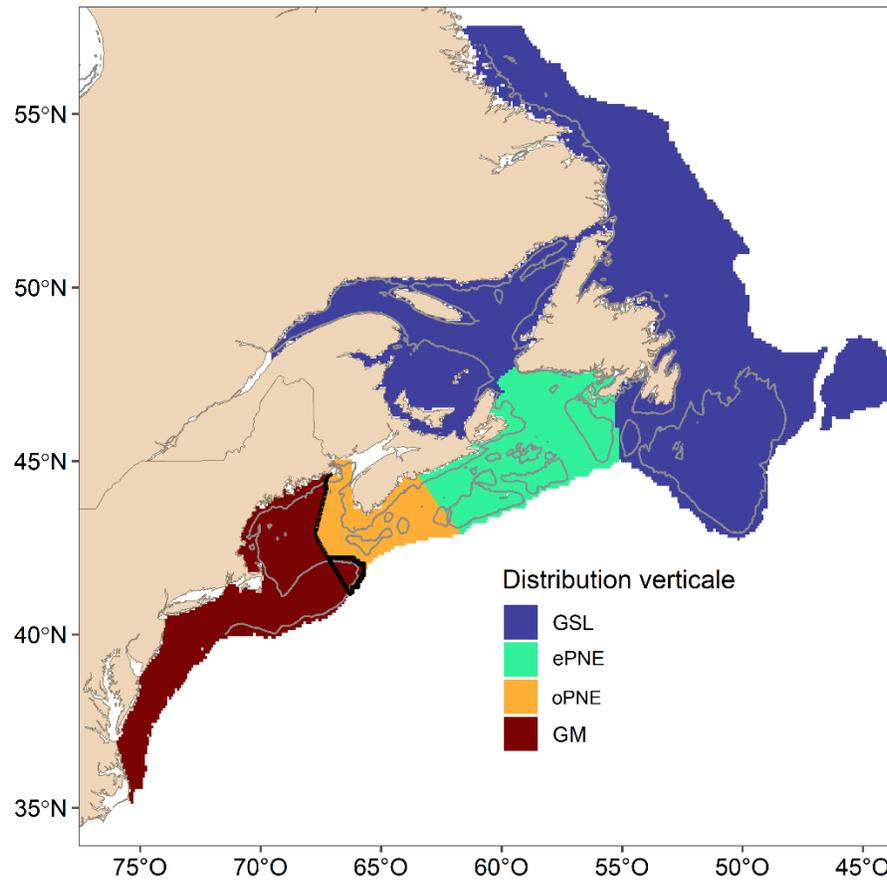


Figure A.4.1. Carte des régions de répartition verticale utilisées dans les prédictions. Le modèle de répartition verticale du GSL a été appliqué dans la région LAB et eTN et le modèle de répartition verticale du GM a été appliqué dans le GM et le plateau du nord-est des États-Unis. La ligne noire en gras sépare la partie canadienne du BG.

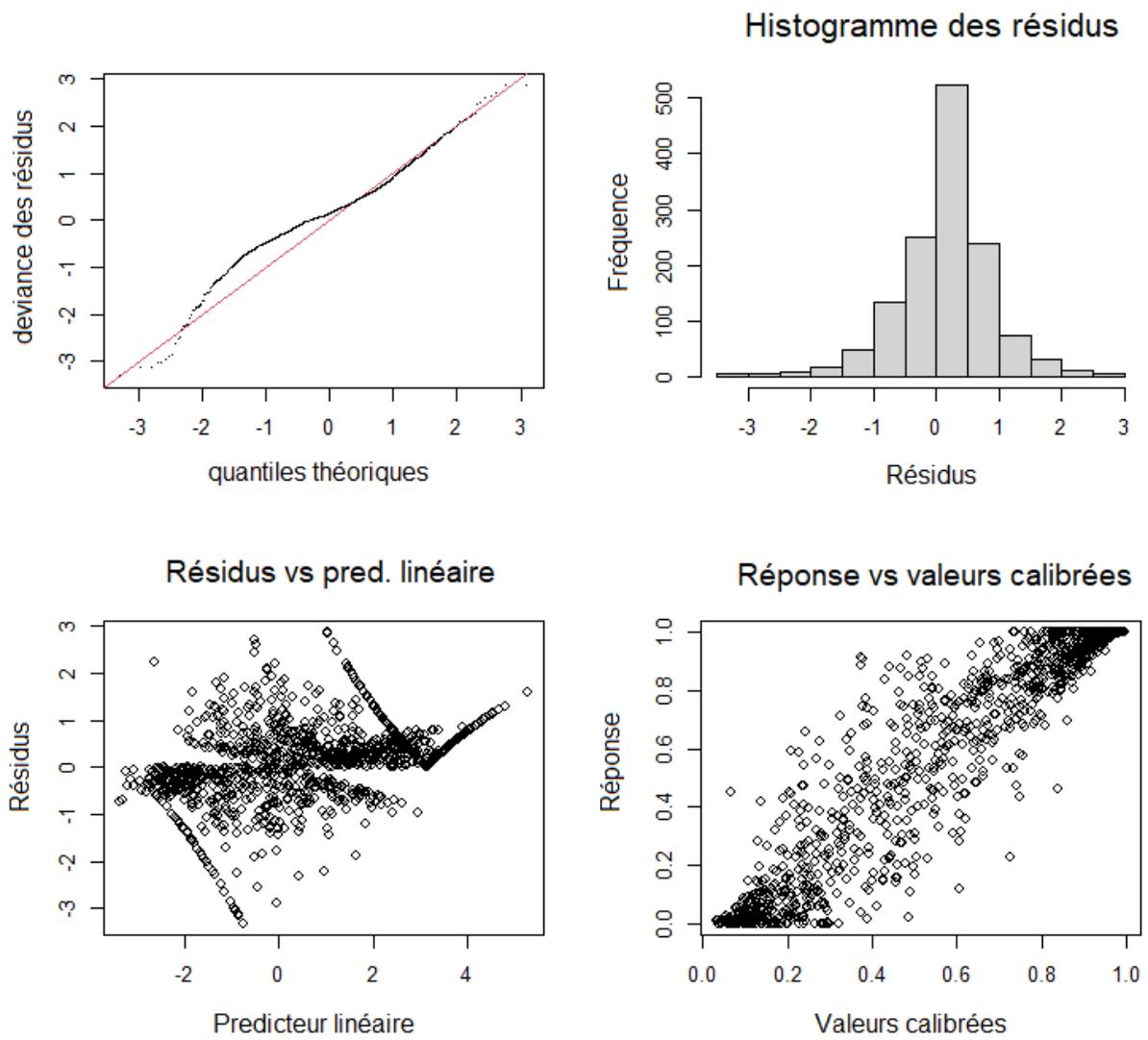


Figure A.4.2. Validation du GAM de répartition verticale pour le stade CIV-CVI de *C. finmarchicus*.

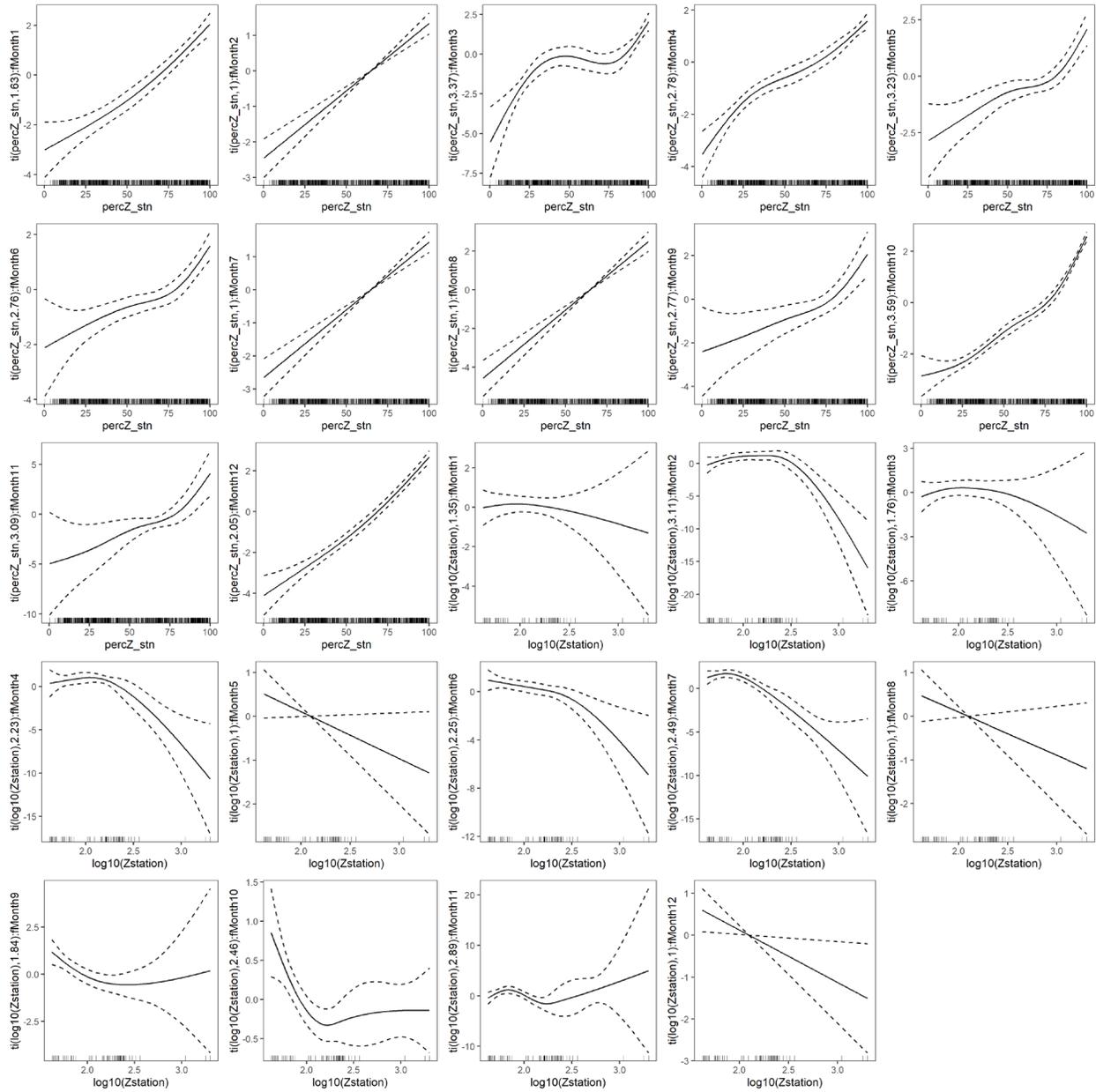


Figure A.4.3. Effet principal du GAM de la répartition verticale pour le stade CIV-CVI de *C. finmarchicus*. $\text{percZ_stn} = \%Z$, $Z\text{station} = Z$.

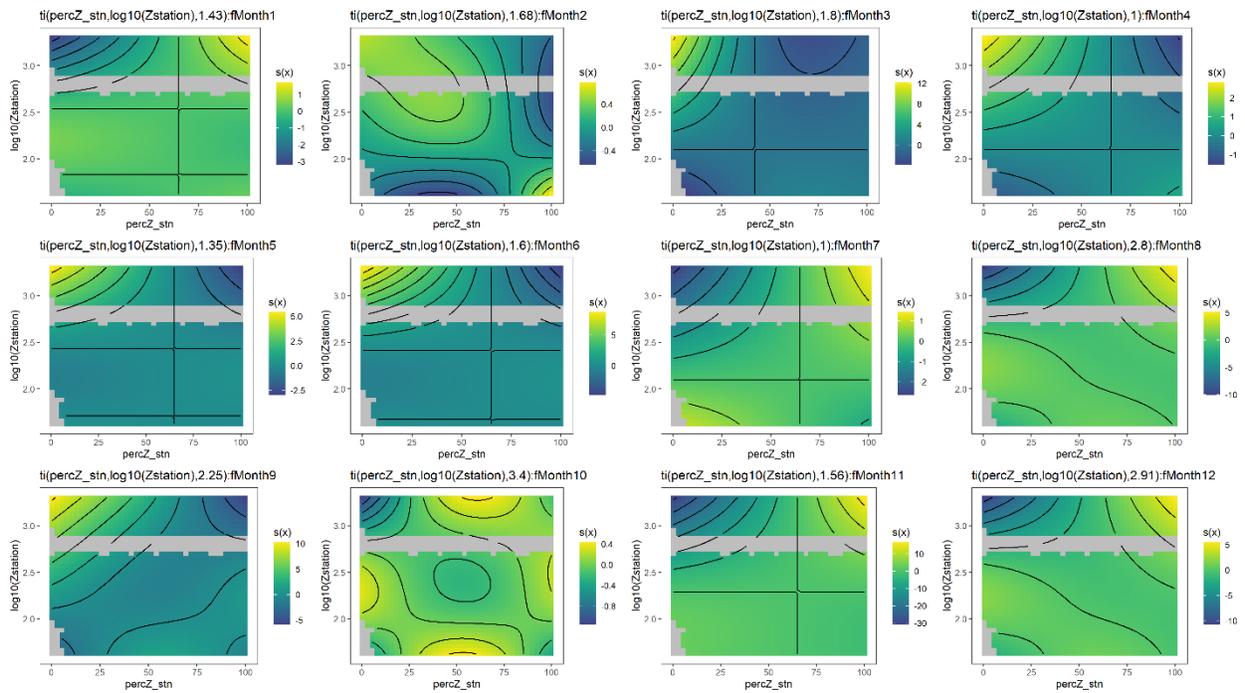


Figure A.4.4. Interaction entre $Z_{station}$ (Z) et $percZ_stn$ (% Z) pour chaque mois dans le GAM de la répartition verticale pour le stade CIV-CVI de *C. finmarchicus*.

Tableau A.4.1. Résultats du GAM de la répartition verticale dans le GM pour le stade CIV-CVI de *C. finmarchicus*. La valeur P des termes lissés est indiquée par P >0,05; * P =0,05-0,01; ** P =0,01-0,001; *** P <0,001. a = non significatif. %Z est le pourcentage de la colonne d'eau échantillonnée et Z est la profondeur de la station. Les mois sont représentés par les chiffres de chaque terme.

Ajustement du GAM	Nombre de stations	272	
	Total N = Nstations x NZlayers	1349	
	% de déviance expliquée	92.5	
Validation du GAM	Validation croisée	70/30 %	100 %
	Corrélation	0,87	0,89
	Ordonnée d'origine	0,09	0,16
	Pente	0,81	0,73
	R ²	0,75	0,76
Termes du GAM	Termes du GAM	Degrés de liberté estimés et significativité	
	%Z : 1	1,63	***
	%Z : 2	1,00	***
	%Z : 3	3,37	***
	%Z : 4	2,78	***
	%Z : 5	3,23	***
	%Z : 6	2,76	***
	%Z : 7	1,00	***
	%Z : 8	1,00	***
	%Z : 9	2,77	***
	%Z : 10	3,59	***
	%Z : 11	3,09	***
	%Z : 12	2,05	***
	Z : 1	1,35	a
	Z : 2	3,11	***
	Z : 3	1,76	a
	Z : 4	2,23	***
	Z : 5	1,00	a
	Z : 6	2,25	**
	Z : 7	2,49	***
	Z : 8	1,00	a
	Z : 9	1,84	***
	Z : 10	2,46	*
	Z : 11	2,89	**
	Z : 12	1,00	*
	%Z *Z : 1	1,43	a
	%Z *Z : 2	1,68	a
	%Z *Z : 3	1,80	**
	%Z *Z : 4	1,00	a
	%Z *Z : 5	1,35	a
	%Z *Z : 6	1,60	a
	%Z *Z : 7	1,00	a
	%Z *Z : 8	2,80	*
%Z *Z : 9	2,25	**	
%Z *Z : 10	3,40	**	
%Z *Z : 11	1,56	a	
%Z *Z : 12	2,91	***	
s(station)	161,57	***	