



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 2022/062

Région de Terre-Neuve-et-Labrador

Un nouveau modèle spatial écosystémique de production excédentaire pour la crevette nordique dans les zones de pêche à la crevette 4 à 6

E.J. Pedersen, K. Skanes, N. Le Corre, M. Koen Alonso, K.D. Baker

Centre des pêches de l'Atlantique nord-ouest
Pêches et Océans Canada
80, chemin East White Hills
St. John's (Terre-Neuve) A1C 5X1

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/index-fra.htm>
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, 2022

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-45402-3 N° cat. Fs70-5/2022-062F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Pedersen, E.J., Skanes, K., le Corre, N., Koen Alonso, M., et Baker, K.D. 2022. Un nouveau modèle écosystémique spatial de production excédentaire pour la crevette nordique dans les zones de pêche à la crevette 4 à 6. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2022/062. v + 69 p.

Also available in English:

Pedersen, E.J., Skanes, K., le Corre, N., Koen Alonso, M., and Baker, K.D. 2022. A New Spatial Ecosystem-Based Surplus Production Model for Northern Shrimp in Shrimp Fishing Areas 4 to 6. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2022/062. v + 64 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	v
INTRODUCTION	1
BIOLOGIE DE LA CREVETTE NORDIQUE DANS LES ZONES EXTRACÔTIÈRES DE T.-N.-L.....	2
PÊCHE DE LA CREVETTE NORDIQUE SUR LE PLATEAU DE T.-N.-L.	3
MÉTHODES ET RÉSULTATS.....	4
EXAMEN DES SOURCES DE DONNÉES	4
Relevés antérieurs de la crevette nordique.....	4
Relevés plurispécifiques de Pêches et Océans Canada et relevés de la <i>Northern Shrimp Research Foundation</i>	4
Données sur la crevette nordique commerciale.....	5
TENDANCES HISTORIQUES DE LA PRODUCTIVITÉ DE LA CREVETTE NORDIQUE	6
MESURES DE LA POPULATION ET DE L'ÉCOSYSTÈME POUR LES DONNÉES DE RELEVÉ ACTUELLES.....	8
Divisions spatiales pour l'analyse	8
Stratégie générale de modélisation spatiale	9
Dynamique actuelle de la biomasse de la crevette nordique.....	11
Densité des prédateurs.....	13
Température au fond.....	13
Indice de l'oscillation nord-atlantique	13
Plancton	13
Pression de la pêche.....	14
Profils spatiaux du recrutement.....	14
MODÈLES SPATIAUX DE PRODUCTION EXCÉDENTAIRE	15
Contexte du modèle de production excédentaire.....	15
Caractéristiques des modèles.....	16
Comparaisons des modèles.....	18
Vérifications de la robustesse du modèle	19
Paramètres du modèle de prévision	20
Tests de sensibilité du modèle.....	21
DISCUSSION.....	23
INCERTITUDES SCIENTIFIQUES	23
Dynamique de la structure des stocks	23
Capturabilité.....	23
Taux de prédation de la crevette nordique.....	24
Déplacements des crevettes larvaires et adultes entre les régions	25
Facteurs écosystémiques dans les ZPC 4 et 5.....	25
ORIENTATIONS FUTURES DE L'ÉLABORATION DU MODÈLE	26

RÉFÉRENCES CITÉES	26
TABLEAUX	30
FIGURES	31
FIGURES SUPPLÉMENTAIRES	56
ANNEXE I : MODIFICATION	68

RÉSUMÉ

Bien que la crevette nordique (*Pandalus borealis*) représente l'un des stocks les plus importants des eaux canadiennes sur le plan économique, il n'existe pas de modèle de la population visant à prédire comment la pression de la pêche et les conditions environnementales changeantes pourraient influencer sur son abondance future dans les zones de pêche à la crevette (ZPC) 4 à 6. Nous avons testé divers modèles de production excédentaire qui comprenaient des prédicteurs potentiels, comme la densité des prédateurs, la température au fond, les conditions climatiques à grande échelle, le plancton, les tendances du recrutement et la pression de la pêche, afin d'évaluer leur capacité à prédire les changements annuels de la densité de la biomasse de la crevette nordique. Un modèle autorégressif de production excédentaire avec décalage- 1 spatialement explicite, qui comprenait la densité de la morue franche (*Gadus morhua*), la densité des autres prédateurs (flétan du Groenland *Reinhardtius hippoglossoides* et sébaste *Sebastes* spp), l'indice de l'oscillation nord-atlantique (ONA) et la biomasse de la crevette nordique comme prédicteurs, s'est révélé être le meilleur modèle. Ce modèle représente un pas en avant pour l'évaluation de la crevette nordique dans les ZPC 4 à 6, mais comme pour toute modélisation, il faut faire preuve de prudence lorsqu'on l'applique hors de l'éventail des conditions écosystémiques déjà observées, et des évaluations continues de son efficacité seront nécessaires.

INTRODUCTION

Les stocks de crevette nordique (ou rose; *Pandalus borealis*) sur les plateaux de Terre-Neuve-et-Labrador (T.-N.-L.) (zones de pêche de la crevette [ZPC] 4 à 7; figure 1) comptent parmi les stocks les plus importants sur le plan économique à T.-N.-L. (Carruthers *et al.* 2019). Ils constituent les principales composantes de l'écosystème benthique du plateau et une partie importante de la biomasse benthique, et fournissent de la nourriture à un large éventail de prédateurs benthiques (Lilly *et al.* 2000). À l'heure actuelle, il n'existe pas de modèle de la population pour ces stocks permettant de prédire comment la pression exercée par la pêche et les conditions environnementales changeantes peuvent influencer sur la densité de la crevette à court ou à long terme. Ils sont gérés conformément à un cadre décisionnel intégrant l'approche de précaution établi à la suite des recommandations d'un groupe de travail précédent (DFO 2009), en fonction d'un indice de la biomasse moyenne du stock reproducteur (BSR) femelle pendant ce qui a été considéré comme une période productive.

À la suite du déclin rapide de la biomasse de la crevette nordique dans les ZPC 6 et 7 (ce qui a mené à la fermeture de la ZPC 7), ainsi que de l'augmentation de la biomasse des poissons de fond prédateurs de la crevette nordique (la morue franche montrant les augmentations les plus importantes, mais de nombreuses espèces de prédateurs ont augmenté à partir de 2010 (Rose et Rowe, 2015; Pedersen *et al.* 2017; MPO 2018a), des préoccupations ont été soulevées au sujet de la pertinence de l'approche de la biomasse moyenne utilisée pour gérer ces stocks, et à savoir s'il faut la mettre à jour compte tenu de l'évolution des conditions de l'écosystème. Les points de référence fondés sur la biomasse ont été réévalués en 2017 dans le cadre d'un processus régional d'examen par des pairs de la réponse des Sciences (DFO 2017), où il a été conclu qu'il existait certaines preuves que les facteurs environnementaux influant sur la productivité de la crevette pouvaient avoir changé depuis 2009. Ces constatations concordaient avec les évaluations de ces stocks, qui ont mis en évidence des conditions environnementales de plus en plus défavorables, y compris des niveaux croissants de prédation par les poissons de fond. La réponse des Sciences de 2017 a permis de conclure qu'un modèle de prévision de la population était nécessaire pour comprendre les facteurs qui influent sur la productivité. Le besoin d'un modèle de la population pour ces stocks a également été déterminé dans le plan de rétablissement des stocks pour la ZPC 6 après son entrée dans la zone critique du cadre décisionnel intégrant l'approche de précaution (MPO 2018 b).

Dans le présent document, nous proposons un nouveau modèle quantitatif de la population pour ces stocks de crevettes nordiques. Ce modèle a été conçu pour répondre à cinq critères :

1. Être prévisible : Le modèle devrait être en mesure de prévoir les variations de la biomasse au moins un an à l'avance en fonction de l'information mesurable pour l'année en cours, afin qu'il puisse aider à fournir des avis de gestion.
2. Être mécaniste : Le modèle devrait être fondé sur des liens mécanistes connus ou hypothétiques entre les variables et la productivité.
3. Être écosystémique : Le modèle devrait utiliser de l'information sur l'état actuel de l'écosystème pour faire des prévisions, plutôt que de simplement utiliser la biomasse actuelle des stocks de crevettes et la pression de la pêche.
4. Inclure explicitement l'incertitude : Les prévisions du modèle devraient inclure l'incertitude associée à une prévision donnée et permettre une gamme de prévisions.
5. Être structuré spatialement : Les plateaux de Terre-Neuve-et-Labrador sont fortement structurés spatialement, de sorte que le stock de crevettes nordiques et les facteurs qui l'influencent le sont également. Par conséquent, la productivité de la crevette varie

probablement aussi dans l'espace. En élaborant un modèle explicitement spatial de ces stocks, il est possible d'estimer où la productivité change le plus rapidement. Les estimations spatialement explicites de la productivité peuvent facilement être mises à l'échelle de la ZPC, alors qu'il n'est généralement pas possible d'utiliser des modèles agrégés pour prédire les changements à plus petite échelle.

En général, la modélisation des pêches s'est concentrée sur l'élaboration de modèles de population à l'échelle des stocks entiers, plutôt que sur des modèles de population spatialement explicites. Nous considérons une approche spatiale plus fructueuse pour l'élaboration de modèles écosystémiques, car elle nous permet d'intégrer explicitement les effets locaux ou à échelles multiples de l'évolution des conditions écosystémiques sur l'évolution de la productivité. En outre, il est souvent possible d'utiliser des réponses fonctionnelles plus simples pour modéliser les relations entre la productivité et les variables écosystémiques dans des modèles spatialement explicites que dans des modèles à l'échelle du stock, car les effets de moyenne non linéaire peuvent faire apparaître des relations fonctionnelles plus non linéaires à grande échelle qu'à petite échelle (Barraquand et Murrell 2013).

BIOLOGIE DE LA CREVETTE NORDIQUE DANS LES ZONES EXTRACÔTIÈRES DE T.-N.-L.

La crevette nordique est présente dans l'Atlantique Nord-Ouest, de la baie de Baffin en allant jusqu'au golfe du Maine au sud. Elle préfère un fond océanique plutôt mou et boueux, où les températures varient entre 1 et 6 °C environ; cependant, la majorité des crevettes nordiques sont capturées dans des eaux de 2 à 4 °C. Ces conditions se produisent habituellement à des profondeurs de 150 à 600 m et existent dans toute la zone extracôtière de Terre-Neuve-et-Labrador (Parsons, 1982; Shumway *et al.*, 1985). La crevette nordique représente la principale ressource de crevettes dans l'Atlantique Nord, mais son aire de répartition chevauche celle de la crevette ésope (*Pandalus montagui*) qui est également exploitée commercialement, généralement comme une pêche accessoire (MPO 2019).

Les ZPC 4 à 7 ne sont pas séparées par des obstacles importants à la dispersion des crevettes adultes ou larvaires. Le courant du Labrador relie les quatre ZPC en se dirigeant vers le sud, de la ZPS 4 aux ZPS 5, 6 et 7. Les recherches sur la modélisation de la dispersion des larves dans les ZPC 4 à 7 indiquent qu'il existe une forte connectivité de l'habitat des larves en aval; la plupart des recrues d'une ZPC particulière peuvent provenir d'une ZPC située plus au nord. Les larves de crevettes nordiques peuvent parcourir plusieurs centaines de kilomètres avant de s'établir (Le Corre *et al.* 2019). Des recherches en cours ont démontré que les larves originaires de l'Arctique s'établissent aussi fortement dans les ZPC 4 à 6 (Le Corre *et al.* 2020). La présente recherche indique également une faible rétention larvaire des crevettes dans les ZPC 4 et 5 et une rétention larvaire plus élevée dans la ZPC 6. Le lieu d'émergence, la circulation océanique et le comportement des larves ont été désignés comme des variables importantes influant sur la dispersion de larves dans la zone d'étude. Les simulations de dispersion des larves indiquent que celles provenant de populations côtières montrent un potentiel de fixation plus élevé que les larves provenant de sites hauturiers [bord de la plateforme] (Le Corre *et al.* 2019).

Des études sur la génétique des populations de crevettes nordiques dans les ZPC 4 à 7 ont démontré que la crevette nordique dans ces régions est en grande partie homogène sur le plan génétique (Jorde *et al.* 2015). Ceci est probablement le résultat du transport larvaire et pélagique par le courant du Labrador. Malgré les relations entre les ZPC 4 à 7, les ressources de crevette nordique de ces zones sont gérées (donc évaluées) sur la base des ZPC distinctes plutôt que dans leur ensemble.

Les crevettes nordiques naissent et atteignent la maturité d'abord en tant que mâles, puis s'accouplent en tant que mâles pendant une ou plusieurs années; elles changent ensuite de sexe pour passer le reste de leur vie comme femelles. On pense qu'elles vivent plus de huit ans. Certaines populations nordiques présentent un taux de croissance et de maturation plus lent, mais vivent plus longtemps et atteignent une taille maximale plus grande. Les femelles produisent des œufs à la fin de l'été et à l'automne, et transportent ces œufs sur leurs pléopodes jusqu'à ce qu'ils éclosent au printemps. On pense que les crevettes commencent à faire partie de la pêche vers l'âge de trois ans (Parsons 1982; Shumway *et al.* 1985). La majorité de la biomasse exploitable est constituée de femelles; la proportion de femelles varie toutefois en fonction de la ZPC et de l'année (MPO 2019).

Le jour, la crevette se repose et se nourrit sur le plancher océanique ou près de ce dernier. La nuit, une grande quantité de crevettes migrent verticalement dans la colonne d'eau, en se nourrissant de zooplancton (Shumway *et al.* 1985). À l'heure actuelle, il y a peu d'information sur la composition de leur régime alimentaire, leurs préférences alimentaires ou la fraction du régime alimentaire des crevettes obtenue à partir de sources d'aliments benthiques/détritiques par rapport aux sources d'aliments pélagiques.

Elles constituent des proies importantes pour de nombreuses espèces telles que la morue franche, le flétan du Groenland, le sébaste, la plie canadienne (*Hippoglossoides platessoides*), les raies (*Raja radiata*, *Raja spinicauda*), l'anarrhique loup (*Anarhichas* spp) et le phoque du Groenland (*Pagophilus groenlandica*), surtout pendant la période de faible abondance du poisson de fond sur le plateau de Terre-Neuve (MPO 2019). Il a été démontré que des taux de prédation variables jouent un rôle important dans la régulation des abondances de crevettes nordiques dans un large éventail de systèmes, y compris le Groenland (Hvingel et Kingsley 2006), l'Islande (Björnsson *et al.* 2017), le golfe du Maine (Cao *et al.* 2016 b; Hunter *et al.* 2018) et le golfe du Saint-Laurent (Tamdrari *et al.* 2018), bien que des études récentes dans le golfe du Saint-Laurent soulignent également le rôle important de la dynamique du plancton sur la croissance de la crevette nordique (Brosset *et al.* 2018).

PÊCHE DE LA CREVETTE NORDIQUE SUR LE PLATEAU DE T.-N.-L.

La pêche à la crevette nordique au large des côtes du Labrador a débuté dans la ZPC 5 au milieu des années 1970, principalement dans les chenaux Hopedale et Cartwright. Peu après, des concentrations de crevettes nordiques ont été repérées dans les ZPC 4 et 6, menant à une expansion de la pêche dans ces zones. À mesure que la pêche s'est élargie au chenal Hawke, au bassin St. Anthony, à la fosse de l'île Funk et au talus de la plateforme continentale dans les ZPC 4 à 6 au début des années 1990, les totaux autorisés des captures (TAC) ont augmenté de façon périodique et ont été atteints la plupart des années. La partie nord des Grands Bancs (ZPC 7) a été ouverte à la pêche en 2000 (MPO 2018c). Il y a eu des changements dans la saisonnalité de l'effort de pêche au fil du temps et selon divers facteurs, dont la couverture de glace dans les diverses ZPC. Sous réserve des conditions de permis, les flottes de navires de gros tonnage pêchent tout au long de l'année dans différentes ZPC.

Malgré l'existence de liens entre les populations de crevettes des ZPC 4 à 7, ces dernières sont gérées séparément (p. ex. les TAC sont fixés en tenant compte uniquement de la ZPC concernée). Les TAC combinés ont diminué depuis l'année de gestion 2008-2009 dans les ZPC 4 à 6 (figure 2), principalement à cause des réductions du TAC imposées dans la ZPC 6 en raison du déclin des indices de la biomasse observés dans les relevés. La ZPC 7 a été fermée à la pêche en 2015 à la suite de la baisse des niveaux de biomasse sous le point de référence établi B_{lim} (MPO 2018c), et n'a pas augmenté au-dessus de ce niveau. Le TAC global des ZPC 4 à 6 était de 50 085 t en 2018-2019. Les tendances des prises commerciales suivent généralement les tendances du TAC (figure 2); toutefois, il y a eu des années au cours

desquelles les conditions du marché et les coûts d'exploitation ont entraîné un contingent non récolté de crevettes nordiques.

Toutes les pêches de crevettes nordiques dans l'est du Canada sont assujetties au *Règlement de pêche de l'Atlantique*, établi en vertu de la *Loi sur les pêches*, pour ce qui touche les eaux territoriales, les prises accessoires, les rejets, les journaux de bord des navires, etc. Cette législation prévoit un maillage minimal de 40 mm et l'utilisation obligatoire de grilles de tri pour réduire les prises accessoires des espèces non ciblées. La taille des grilles de tri dépend de la zone dans laquelle a lieu la pêche. L'espacement minimal entre les barres est de 22 mm dans la ZPC 6, et de 28 mm dans les ZPC 4 et 5.

MÉTHODES ET RÉSULTATS

EXAMEN DES SOURCES DE DONNÉES

Relevés antérieurs de la crevette nordique

De la fin des années 1970 au début des années 1990, des relevés ciblés de la crevette ont été effectués dans diverses petites zones (correspondant aux zones de pêche commerciale) des ZPC 5 et 6. Ces relevés ont été effectués à partir des navires *A.T. Cameron*, *Zagreb* et *Gadus Atlantica* et leurs ensembles ont été choisis au hasard. Certains de ces relevés étaient de nature expérimentale (c.-à-d. diurne). Les engins de pêche, la saisonnalité et la couverture spatiale étaient très différents des protocoles de relevé en place aujourd'hui. Un chalut Sputnik 1600 a été utilisé pour des traits de 30 minutes à une vitesse de 3 nœuds. Ce chalut avait un écartement entre les ailes d'environ 72,2 pieds et une ouverture d'environ 21 pieds. Les mêmes renseignements (c.-à-d. maturité, poids et nombre des crevettes) étaient saisis alors, bien qu'il y ait eu certaines améliorations depuis quant à l'identification de la maturité et à la caractérisation des maladies/état physique.

Relevés plurispécifiques de Pêches et Océans Canada et relevés de la *Northern Shrimp Research Foundation*

En 1995, Pêches et Océans Canada (MPO) a commencé à effectuer des relevés plurispécifiques à l'aide d'un chalut à crevettes à partir de navires de la Garde côtière canadienne, dont les NGCC *Wilfred Templeman* (1995 à 2008), *Teleost* (1995 à aujourd'hui) et *Alfred Needler* (1996, 2001, 2005-2006, 2008 à aujourd'hui). Les évaluations de la crevette nordique sont effectuées à l'aide des données des relevés d'automne (de la fin de septembre à la mi-décembre), qui couvrent les divisions 2HJ3KLNO de l'Organisation des pêches de l'Atlantique Nord-Ouest (OPANO); toutefois, une couverture de relevé complète de la division 2H de l'OPANO (c.-à-d. la ZPC 5 au nord) n'a été réalisée de façon constante que depuis 2010. Les tendances des indices de la biomasse du relevé de la ZPC 5 au cours des années manquantes sont inconnues. L'objectif de ces relevés est de maintenir les allocations établies, la couverture du relevé et la saisonnalité au fil des ans, mais il est arrivé que le relevé se prolonge jusqu'en janvier et que les ensembles prévus soient abandonnés en raison de facteurs comme les conditions météorologiques et les problèmes liés aux navires.

Les statistiques de base sur le rendement et la couverture des relevés d'automne du MPO sont présentées chaque année aux réunions de l'OPANO et sont publiées sur le site Web de l'organisation (Power *et al.* 2016; Rideout et Ings 2018).

Les relevés de la *Northern Shrimp Research Foundation* (NSRF) ont commencé en 2005 et couvrent la ZPC 4 pendant les mois d'été (juillet-août). Ces relevés sont effectués à partir de navires de pêche commerciale, dont le *Cape Ballard* (2005 à 2011), le *Kinguk* (2014), le

Katsheshuk II (2015) et le *Aqviq* (2012 et 2013, 2016 à 2018). Le *Cape Ballard*, l'*Aqviq* et le *Kinguk* possèdent des caractéristiques similaires, mais le *Katsheshuk II* est plus grand et plus puissant. Il n'y a pas eu de changement dans le matériel ou la conception du relevé, et il a été présumé que ce changement de navire hydrographique ne serait pas important. Aucun étalonnage comparatif entre les navires n'a toutefois été effectué.

Un chalut Campelen 1800 est utilisé pour les relevés par navire de recherche (NR) et est remorqué pendant 15 minutes de contact avec le fond ciblé à une vitesse de 3 nœuds. Ce chalut a un écartement entre les ailes d'environ 55,25 pieds et une ouverture d'environ 13 pieds; les détails de la conception du relevé et des protocoles de pêche sont décrits dans les travaux de Brodie (1996) et McCallum et Walsh (1996).

Un instrument d'échantillonnage de l'eau (CTP) fixé au chalut fournit également des renseignements sur les températures au fond et les profondeurs aux emplacements de relevé. Lorsque l'instrument ne fonctionne pas correctement, un bathythermographe largable (XBT) est déployé pour fournir des mesures de la température au fond et les mesures de la profondeur sont prises à partir du sondeur du navire ou des capteurs Scanmar.

Les données de ces relevés sont soumises à deux processus d'examen des données, une fois à bord du navire par la personne responsable de chaque voyage particulier, et une fois de plus lorsque les données sont retournées au Secteur des sciences du MPO à la fin du relevé saisonnier complet. Des techniciens formés pour ces relevés comptent et pèsent toutes les espèces capturées. Cela comprend les prédateurs connus de la crevette (p. ex., le flétan du Groenland, le sébaste et la morue franche), en plus de l'identification des espèces de crevettes, de la maturité, de la présence de parasites et de la longueur de la carapace. Les catégories de maturité de la crevette comprennent les mâles, les mâles en transition, les femelles primipares, les femelles ovifères et les femelles multipares. Un poids d'échantillonnage selon la maturité et l'état pathologique (p. ex., branchies noires) est saisi avant de saisir les nombres selon la taille (c.-à-d. la longueur de la carapace) pour l'échantillon de crevettes du relevé. Les longueurs de carapace sont mesurées au dixième de millimètre près, mais les résultats des relevés sont normalement regroupés en catégories de 0,5 mm de longueur pour les analyses.

Au cours de certaines des premières années, des expériences ont été menées au cours desquelles des crevettes individuelles ont été mesurées et pesées de façon à ce que des formules puissent être dérivées pour la conversion des nombres en poids. Ces formules sont appliquées aux nombres selon la taille afin de convertir l'abondance en poids des crevettes de taille exploitable (c.-à-d. longueur de carapace >17 mm) à partir de chaque trait de relevé. Ces formules sont les suivantes :

$$\text{Poids individuel (g)} = \begin{cases} \text{mâles :} & 0,00088 \times (\text{longueur de la carapace (mm)})^{2,857} \\ \text{femelles :} & 0,00193 \times (\text{longueur de la carapace (mm)})^{2,663} \end{cases} \quad (1)$$

Données sur la crevette nordique commerciale

Données des observateurs canadiens

La pêche actuelle de la crevette nordique dans les ZPC 4 à 6 est exécutée par environ 13 navires de gros tonnage et 250 petits bateaux. Tous les navires de gros tonnage ont accès à la couverture de ces zones, mais la pêche des petits bateaux est principalement concentrée dans la ZPC 6. La présence d'observateurs est obligatoire sur tous les navires de gros tonnage. L'objectif de couverture des observateurs pour la flotte de petits bateaux est de 10 %; toutefois, la couverture est habituellement beaucoup plus faible, avec une couverture d'environ 5 à 8 % au cours des dernières années.

Les observateurs à bord des navires sont responsables de consigner les positions, la taille des prises, les rejets en mer, etc. Ils mesurent un échantillon détaillé aléatoire de crevettes nordiques par jour, qui comporte de 250 à 300 crevettes nordiques individuelles et comprend des renseignements sur la maturité, la longueur et les pathogènes. Cela donne un aperçu raisonnable de la fréquence des tailles tout au long de la saison de pêche dans diverses régions.

Étant donné la couverture complète par les observateurs de la pêche à la crevette nordique par navires de gros tonnage, les données des observateurs sont utilisées pour calculer les captures par unité d'effort (CPUE) commerciales à des fins d'évaluation et pour déterminer la répartition spatiale des prises commerciales dans ce modèle. L'évaluation a lieu pendant que la pêche est en cours et il y a un retard dans la réception des données, de sorte que les données commerciales les plus récentes ne sont pas disponibles pour analyse dans l'évaluation (c.-à-d. que les données de 2018-2019 ne sont pas disponibles pour l'évaluation de 2019) et le dernier point présenté est préliminaire. Il y a quelques différences dans la façon dont les données sont recueillies et cela dépend de la province dans laquelle le navire de pêche est immatriculé ainsi que de l'entreprise responsable des observateurs. Certains voyages permettent de recueillir des échantillons détaillés qui comprennent des mâles, des femelles primipares, des femelles multipares et des femelles ovifères, tandis que d'autres se contentent d'enregistrer si une crevette est ovigère ou non.

Données des journaux de bord canadiens

Chaque navire canadien ciblant la crevette nordique doit remplir un journal de bord. Ces journaux sont retournés dans la province où le navire est enregistré et leurs données sont enregistrées dans des bases de données qui diffèrent selon la province. Ces données comprennent des renseignements comme la taille des prises, les lieux de capture et les rejets en mer.

Étant donné les faibles taux de couverture des observateurs des petits bateaux de pêche à la crevette nordique, les journaux de bord sont utilisés pour générer les indices de CPUE des petits bateaux pour les évaluations et pour déterminer la répartition spatiale de l'effort de pêche des petits bateaux.

TENDANCES HISTORIQUES DE LA PRODUCTIVITÉ DE LA CREVETTE NORDIQUE

Bien que la pêche de la crevette nordique sur les plateaux de Terre-Neuve-et-Labrador ait commencé au début des années 1970, la série chronologique actuelle sur la biomasse des relevés par NR commence en 1995 (pour les ZPC 5 à 7) ou en 2005 (pour la ZPC 4). L'abondance de la crevette nordique a peut-être augmenté un peu au cours des années 1980 et a augmenté rapidement depuis 1990 dans la ZPC 6 (Lilly *et al.* 2000). Cette tendance a suivi une tendance inverse de la majeure partie des stocks de poisson de fond sur le plateau de Terre-Neuve, les biomasses moyennes du poisson de fond ayant diminué à partir du milieu des années 1980, les déclin les plus rapides ayant eu lieu de 1990 à 1995 (Pedersen *et al.* 2017). Toutefois, l'ampleur de cette croissance était jusqu'ici inconnue, car il n'y avait pas de mesures validées des abondances de crevettes nordiques d'avant 1995 pour les comparer aux mesures d'abondance actuelles fondées sur les relevés plurispécifiques par NR. Les mesures des variations de la biomasse historique de la crevette nordique par rapport à la biomasse actuelle peuvent fournir une base de référence utile pour déterminer l'ampleur approximative des variations de la productivité de la crevette entre la période d'abondance élevée et la période de faible abondance du poisson de fond; elle fournit un cas type utile pour comparer les prévisions du modèle à partir de l'échantillon du relevé actuel au chalut. Dans cette section, nous examinons les données historiques existantes sur l'abondance de la crevette nordique avant

1995, afin de déterminer l'ampleur de la variation de la biomasse entre les années 1980 et 1995.

Comme il a été mentionné, avant 1995, des relevés antérieurs limités de la crevette avaient été effectués dans trois chenaux : le chenal Hopedale, le chenal Cartwright (tous deux dans la ZPC 5) et le chenal Hawke (à l'extrémité nord de la ZPC 6). La répartition spatiale de ces chalutages est illustrée en rouge à la figure 3A, comparativement à l'étendue spatiale des chalutages actuels (à partir de 1995) en noir. Un indice comparatif de la biomasse des crevettes dans ces chenaux a été établi en appariant les chalutages du relevé par NR avec les relevés antérieurs au chalut en trouvant les dix chalutages des NR les plus près pour toutes les années de relevé par NR par rapport à chaque chalutage précédent. Les chalutages des NR à des fins de comparaison ont ensuite été filtrés davantage en excluant tous ceux qui ne se trouvaient pas dans un polygone de délimitation non convexe (Blangiardo et Cameletti, 2015) autour de chaque chenal. La répartition spatiale des chalutages des NR appariés et des chalutages antérieurs est illustrée à la figure 3B.

La biomasse totale des crevettes nordiques de chaque chalut a été transformée en densité en la divisant par la zone balayée par le chalut. Les moyennes et les intervalles de confiance de la biomasse dans chaque chenal avant et après 1995 ont été calculés en ajustant un modèle additif généralisé (MAG) spatiotemporel lissé aux densités observées dans les deux ensembles de chalutages.

Le deuxième indice de la productivité antérieure de la crevette était fondé sur l'abondance inférée de la crevette nordique basée sur la présence de crevettes dans le régime alimentaire de la morue franche dans la ZPC 6¹. Le relevé automnal par NR a permis de recueillir de façon constante des données sur la présence ou l'absence de proies en tant que composantes principales des estomacs des prédateurs dans l'ensemble de la ZPC 6 depuis les années 1980 (à partir des relevés des poissons de fond effectués par le passé au chalut Engels et des relevés actuels par NR du MPO), appelées données sur « l'estomac ». La fraction de l'estomac de la morue franche dans la ZPC 6 qui contenait des crevettes comme l'une des principales composantes était étroitement corrélée avec les estimations de l'Ogmap de la biomasse de crevettes dans les données des NR pour les années où la crevette nordique a été mesurée de façon constante (figure 4). Ces données ont été utilisées pour inférer les biomasses passées de la crevette nordique en effectuant une régression de la biomasse des relevés par NR sur la fraction du régime alimentaire à l'aide d'un modèle linéaire généralisé (MLG) supposant une distribution de Tweedie de la biomasse des relevés par NR. Les niveaux de biomasse antérieurs dans la ZPC 6 ont ensuite été inférés en utilisant le MLG ajusté pour donner la biomasse estimée pour les années où seules des données sur les fractions du régime alimentaire étaient disponibles.

Les deux indicateurs de la biomasse de la crevette présentent des problèmes de données qui font en sorte qu'ils ne sont pas optimaux pour l'évaluation des tendances de la biomasse; les relevés par NR et les relevés antérieurs des crevettes différaient quant aux engins et au moment du relevé, la différence de capturabilité entre les relevés antérieurs et les relevés par NR est inconnue et la présence de crevettes dans le régime alimentaire de la morue peut avoir été influencée par des facteurs autres que des variations de la biomasse de la crevette, comme

¹ Les données sur les régimes alimentaires du flétan du Groenland étaient également disponibles pour cette période, mais elles montraient des relations très semblables entre la fraction du régime alimentaire et la biomasse de la crevette nordique, et l'utilisation des deux espèces n'a pas amélioré les prévisions du modèle par rapport à l'utilisation des régimes alimentaires de la morue franche seulement.

la disponibilité de proies de rechange ou les changements de la répartition spatiale de la morue ou de la crevette. Toutefois, les séries chronologiques comparatives sur la biomasse des chaluts (figure 5A) et les séries chronologiques sur la biomasse déduite par l'alimentation (figure 6A) concordent avec une augmentation générale de la biomasse des crevettes entre 1990 et 1995, à un niveau de quatre à dix fois supérieur à celui d'avant 1990 (figure 5B et figure 6B). Les paramètres indiquent également qu'au cours des dernières années, la biomasse de la crevette a diminué à un niveau correspondant à ceux de 1979 à 1990 dans la ZPC 6. Comme les deux séries chronologiques utilisent des renseignements très différents pour estimer les changements d'abondance, cela indique que cette augmentation rapide s'est très probablement produite dans la ZPC 6 (et, dans une moindre mesure, dans l'ensemble de la ZPC 5; voir la figure 5B, chenaux Cartwright et Hopedale), et l'augmentation de la biomasse dans les années 1990 était semblable à la diminution de la biomasse après 2008.

MESURES DE LA POPULATION ET DE L'ÉCOSYSTÈME POUR LES DONNÉES DE RELEVÉ ACTUELLES

Divisions spatiales pour l'analyse

L'un des objectifs du modèle de production excédentaire était de tenir compte explicitement de la structure spatiale du stock, y compris la possibilité de facteurs démographiques spatialement variables (p. ex., croissance et mortalité) et d'intégrer des profils modélisés de recrutement larvaire. Par conséquent, les modèles devaient tenir compte explicitement de la structure spatiale du stock. Cela exige la discrétisation de l'espace d'une certaine façon, puisque toute approche de modélisation en exige une certaine forme.

Bien que la région soit déjà divisée en ZPC, celles-ci ont été considérées comme trop grossières aux fins de ce modèle. Le plan d'échantillonnage utilisé pour les relevés d'été et d'automne était déjà fondé sur des strates de profondeur, qui auraient pu être utilisées comme un schéma de discrétisation. Toutefois, cette approche n'était pas non plus optimale, car il y avait un grand nombre de strates (augmentation du temps de calcul pour n'importe quel modèle), et de nombreuses strates étaient longues et minces, de sorte que la détermination de la probabilité de dispersion d'une strate à l'autre devenait compliquée dans toute modélisation future de la dispersion de la crevette. Par conséquent, on a déterminé qu'il était nécessaire d'élaborer un nouveau schéma de discrétisation pour la région.

Lors de l'élaboration de la discrétisation, quatre facteurs ont été considérés comme étant prioritaires :

1. Les cellules spatiales devraient être compactes (idéalement convexes), en évitant les cellules qui sont complexes sur le plan spatial ou divisées en sous-cellules.
2. La gamme des profondeurs dans chaque cellule devrait être relativement homogène, car la profondeur a été reconnue comme l'un des principaux facteurs qui influeraient sur la démographie et la dispersion des crevettes.
3. Les cellules devraient être structurées de façon à ce que chaque cellule couvre une zone qui comprend habituellement plusieurs traits de relevé au chalut par année, afin de stabiliser les estimations de la population (bien que, compte tenu de la variabilité de la couverture d'échantillonnage, aucun schéma de discrétisation ne puisse atteindre cet objectif pour toutes les cellules toutes les années).
4. Les cellules doivent respecter les limites existantes des ZPC, de sorte qu'il soit possible d'attribuer la croissance et la biomasse se produisant dans chaque cellule à une ZPC en particulier à des fins de gestion.

Il a donc fallu élaborer une nouvelle méthode pour respecter ces critères. Toutes les analyses spatiales pour cette procédure ont été effectuées à l'aide du progiciel **sf** pour **R 3.5.1** (Pebesma 2018; R Core Team 2018). Pour chaque ZPC du modèle (ZPC 4 à 7), un échantillon aléatoire d'emplacements de chalutages précédents a été tiré du relevé d'automne. Ces tirages au sort comprenaient 10 chalutages de la ZPC 4, 30 de la ZPC 5, 30 de la ZPC 6 et 5 de la ZPC 7. Le nombre total de tirages a été choisi arbitrairement et dans chaque ZPC, les chiffres ont été choisis parce que la ZPC 4 est plus petite que les ZPC 5 et 6 et moins structurée en profondeur. De plus, la crevette est moins fréquente dans la ZPC 7, et il a été décidé que moins d'efforts de calcul devraient être consacrés aux estimations pour cette région.

Un diagramme de Voronoï a été calculé autour des points sélectionnés. Cette procédure crée un ensemble de polygones, où l'intérieur de chaque polygone autour d'un point précis contient tous les emplacements qui sont plus près de ce point que de tout autre point de l'ensemble (Fortin et Dale 2005). Tous les polygones qui chevauchaient les limites d'une ZPC ont été coupés en deux, et tous les polygones qui en résultaient qui se trouvaient à l'extérieur d'une ZPC ont été supprimés. Comme il y avait un certain nombre de très petits polygones après le découpage des limites des ZPC, tout polygone d'une superficie inférieure à 1 500 km² a été fusionné avec son plus proche voisin dans la ZPC. Un polygone de la ZPC 4 a également été découpé en quatre polygones distincts, car il couvrirait auparavant une trop grande surface et n'était pas homogène en profondeur, couvrant à la fois le plateau et le bord du plateau. Étant donné que les limites de la ZPC comprenaient plusieurs zones côtières près du Labrador qui ne sont pas échantillonnées dans le cadre des relevés plurispécifiques de la NSRF, ces zones ont été exclues en découpant des polygones à la zone délimitée par les strates de chalutage actuelles. Cette procédure a donné lieu à 71 cellules au total (figure 7). La distribution des profondeurs au sein de chaque polygone est illustrée à la figure 8.

Stratégie générale de modélisation spatiale

Une approche de régression avec pénalisation fondée sur un modèle a été utilisée pour estimer les tendances spatiotemporelles de la densité de la biomasse de crevettes et des variables des prédicteurs environnementaux. Les modèles statistiques spatiaux ont été adaptés à l'aide de modèles additifs généralisés (MAG) (Wood 2017; Pedersen *et al.* 2019) pour tous les prédicteurs qui ont été dérivés des données de chalutage des NR, des journaux de bord commerciaux ou des données des observateurs commerciaux. Cela comprend la biomasse de la crevette nordique, la température au fond et la biomasse des prédateurs potentiels de la crevette (ici, en utilisant trois des espèces les plus abondantes comme approximations du champ de prédation du poisson de fond : la morue franche, le flétan du Groenland et le sébaste atlantique). Ces modèles supposent que tout résultat donné y est une observation aléatoire d'une distribution statistique, de sorte que la probabilité d'observer une valeur donnée $y_{t i}$ à une année donnée (t) et dans une cellule donnée (i) est exprimée par $y_{t i} \sim f(\mu_{t i} \phi)$ où f est une certaine distribution statistique avec une moyenne $\mu_{t i}$ et un facteur d'échelle qui ne dépend pas du temps ou de l'emplacement, et détermine la variabilité relative à la valeur moyenne. On suppose que les champs de valeurs moyennes $\mu_{t i}$ proviennent de la somme d'un ou de plusieurs *termes lisses*, en transformant les variables prédictives en un groupe de fonctions simples (*fonctions de base*, $b_{1, \dots, n}(t i)$) qui peuvent être multipliées par des coefficients et additionnées linéairement entre toutes les fonctions, puis prendre la somme résultante et la transformer par une *fonction de liaison* spécifique à la distribution ($g(x)$) pour donner la moyenne prédite.

Pour estimer les coefficients appropriés afin de mieux prédire les tendances observées dans les données, le modèle additif généralisé maximise la somme du logarithme du rapport de vraisemblance de l'observation de toutes les données observées $\sum \log(p_f(y_{i t} | \mu_{i t} \phi))$, moins un

terme de pénalisation qui pénalise la distance entre chaque coefficient estimé dans un terme lisse donné et les autres coefficients, à l'aide d'un terme de pénalisation propre au lissage λ et d'une matrice de pénalisation P qui détermine quels coefficients doivent être « proches » l'un pour l'autre, en pénalisant les produits quadratiques de toutes les paires de coefficients. Les pénalisations sont choisies en fonction de la probabilité maximale restreinte (REML) (Wood 2011). Voir Pedersen *et al.* (2019) à la section II pour une présentation plus détaillée de ces méthodes.

Les modèles additifs généralisés des prédicteurs ont été ajustés à l'aide du progiciel **mgcv** (Wood 2017). Pour toutes les entrées du modèle résolues spatialement, les tendances spatiotemporelles ont été estimées en utilisant trois termes lisses :

1. Un effet d'année, où chaque année a été traitée comme une fonction de base unique; ce terme a permis d'estimer la valeur moyenne de chaque variable au fil du temps.
2. Un terme spatial, où chaque cellule était traitée comme une fonction de base unique, et où chaque trait de chalut était affecté à une cellule (en utilisant la structure de cellule indiquée ci-dessus); ce terme a permis d'estimer la distribution moyenne de chaque prédicteur dans l'espace.
3. Une interaction année-espace, calculée comme une interaction tenseur-produit (Wood, 2006a) de l'année et des termes spatiaux; ce terme a permis d'estimer dans quelle mesure chaque terme du modèle variait relativement aux moyennes propres à l'année et à l'emplacement.

Les termes de l'année ont été pénalisés au moyen d'une pénalisation d'effet aléatoire (Wood 2017), qui a pénalisé tous les coefficients pour la moyenne d'ensemble (la pénalisation pour chaque coefficient étant proportionnelle à la valeur au carré de ce coefficient; figure 9). Cette pénalisation sert à lisser les estimations, mais ne pénalise pas spécifiquement les années proches les unes des autres plus fortement entre elles que par rapport aux autres années, de sorte que les changements rapides d'une année à l'autre n'ont pas été pénalisés. Les termes spatiaux ont été ajustés à l'aide d'un lissage du champ aléatoire de Markov (CAM) (Wood 2017), qui pénalise les différences au carré entre les coefficients des polygones directement adjacents les uns aux autres. Cela agit pour lisser spatialement les polygones adjacents les uns aux autres (échange d'information entre les zones avoisinantes sur la valeur moyenne d'une variable prédictive donnée), avec une pénalisation qui diminue avec la distance, de sorte que les polygones éloignés les uns des autres peuvent être estimés librement. Le terme d'interaction spatiotemporelle a été pénalisé par le produit tensoriel d'un champ aléatoire de Markov (CAM) et une pénalisation d'effet aléatoire, utilisant la fonction τ_i dans **mgcv** (Wood, 2006a), de sorte que les polygones voisins de la même année ont été pénalisés les uns envers les autres et vers la moyenne d'ensemble.

Cette approche fondée sur un modèle pour estimer la densité de la crevette nordique et les prédicteurs spatiaux permet d'estimer non seulement la valeur moyenne de chaque prédicteur à un emplacement et à un moment donnés, mais aussi les fourchettes d'incertitude associées à chaque estimation à la fois pour les estimations propres à l'emplacement et pour les fonctions de ces estimations, comme la biomasse moyenne tout au long de l'année. Pour calculer l'incertitude pour un point donné, le modèle additif généralisé a été traité comme une régression bayésienne (Wood 2006b; Marra et Wood 2012), les termes et les matrices de pénalisation correspondant aux *a priori* normaux multivariés des divers termes lisses (lorsqu'elle est traitée comme une estimation du modèle bayésien, l'estimation du lissage de la probabilité maximale restreinte [REML] correspond à une approximation du modèle bayésien empirique avec des *a priori* uniformes dans le logarithme des paramètres de lissage; Wood, 2006b). Pour estimer les intervalles d'incertitude postérieurs pour les valeurs souhaitées, de nouvelles valeurs de

coefficients aléatoires ont été générés à partir d'une distribution normale multivariée avec une moyenne des valeurs de coefficient estimées et la matrice variance-covariance égale à la matrice variance-covariance postérieure du modèle. Ces vecteurs de coefficient d'échantillon postérieurs ont été multipliés par les fonctions de base qui correspondaient aux valeurs prédictives pour lesquelles un intervalle d'incertitude était souhaité. Cela a produit un vecteur de valeurs prédites pour chaque combinaison de prédicteurs d'intérêt, et les quantiles de cette distribution ont été utilisés pour calculer les intervalles souhaités. Dans tous les cas, 1 000 vecteurs de coefficient simulés ont été générés pour calculer les intervalles d'incertitude. Ces valeurs simulées ont également été utilisées pour calculer les intervalles d'incertitude pour les statistiques dérivées (comme la biomasse totale dans une ZPC donnée). La procédure est la même que ci-dessus, sauf que les statistiques sommaires souhaitées sont calculées à partir des valeurs simulées avant d'agréger les valeurs en intervalles d'incertitude.

Dynamique actuelle de la biomasse de la crevette nordique

La procédure ci-dessus a été utilisée pour modéliser la dynamique spatiotemporelle de la densité de la biomasse des crevettes dans les trois régions du relevé qui sont au cœur du présent document, ainsi que la dynamique de la ZPC 7. Bien que la ZPC 7 soit gérée en vertu d'un cadre de gestion distinct de l'OPANO, elle est spatialement liée à la ZPC 6 et les changements démographiques dans cette zone peuvent fournir des renseignements supplémentaires sur les facteurs qui peuvent influencer le stock. À l'heure actuelle, les stocks plus au nord (zone d'évaluation est et zone d'évaluation ouest) ne sont pas inclus dans ces modèles, mais il serait possible d'étendre cette approche pour intégrer ces régions dans les futurs modèles.

Toutes les prises du relevé au chalut ont d'abord été converties en densités en divisant le poids total de la crevette nordique capturée dans un chalut donné par la superficie balayée par ce chalut en km², où la superficie balayée correspondait à la distance parcourue par le chalut multipliée par l'écartement entre les ailes du chalut Campelen (16,8 m). Le modèle spatiotemporel de la biomasse dans les quatre ZPC a ensuite été calculé à l'aide du modèle additif généralisé décrit dans la section « Stratégie générale de modélisation spatiale ». On a supposé que la densité des crevettes serait répartie selon une distribution de Tweedie (Wood 2017). La distribution de Tweedie suppose que le poids observé capturé dans un chalut suit une distribution composée Poisson-Gamma, où l'on suppose que la crevette vit dans des agrégations dont chacune a une biomasse unique suivant une distribution Gamma, et que la probabilité de capturer n agrégations suit une distribution de Poisson. Cette distribution permet la possibilité d'avoir à la fois des chaluts sans prise (lorsqu'aucune agrégation n'est capturée) et des chaluts avec des prises très élevées (lorsqu'une ou plusieurs agrégations sont capturées) et elle s'est révélée efficace pour modéliser les profils spatiaux complexes de l'abondance des populations dans d'autres pêches (Lecomte *et al.* 2013).

La figure 10 illustre la configuration spatiale des densités de crevettes nordiques estimées par le modèle. Il y a des tendances constantes d'agrégation spatiale de la biomasse de crevettes sur le plateau, mais les déclinés de la biomasse dans l'ensemble de l'aire de répartition au cours des dernières années sont évidents.

L'évaluation actuelle de la crevette nordique dans les ZPC 4 à 6 repose sur les estimations de la biomasse obtenues à l'aide de la méthode de cartographie par ogive (Ogmap) (Evans *et al.* 2000), au lieu des estimations fondées sur le modèle additif généralisé comme utilisées dans ce modèle. La méthode Ogmap repose sur l'utilisation des biomasses de crevettes observées dans les chaluts pour créer une fonction de distribution cumulative empirique pondérée (FDCE) pour chaque point du domaine d'intérêt, les poids étant fondés sur les distances et les différences de profondeur entre cet emplacement et d'autres points de relevé. Ces fonctions

sont ensuite utilisées pour estimer la biomasse moyenne ou médiane (ou d'autres quantiles de la distribution locale), à chaque point d'une grille, qui est ensuite additionnée pour estimer les quantités comme la biomasse totale dans une région. Cette approche peut également être utilisée pour estimer les intervalles d'incertitude pour la biomasse agrégée, par rééchantillonnage *bootstrap* (Efron 1982) à partir de l'ensemble des FDCE pondérées afin de générer un nouvel échantillon de relevé au chalut et une nouvelle estimation de la biomasse de la population.

Nous avons choisi d'utiliser des estimations de la distribution spatiale de la biomasse fondées sur le modèle additif généralisé et d'autres indicateurs plutôt que sur la méthode Ogmap, parce qu'il n'y a actuellement aucune méthode en place dans l'approche Ogmap pour propager l'incertitude des estimations pour de multiples emplacements spatiaux simultanément (ce que fait l'approche bayésienne empirique décrite ci-dessus). De plus, la méthode Ogmap a actuellement tendance à générer des intervalles de confiance trop serrés, en raison de problèmes non résolus quant à la façon dont les chalutages à un emplacement donné sont inclus dans l'ajustement des paramètres pour la fonction de pondération par rapport à l'utilisation d'Ogmap pour estimer les quantités dérivées (Evans, communication personnelle). Toutefois, pour nous assurer que l'approche utilisée pour estimer la biomasse utilisée pour ce modèle était comparable à l'approche Ogmap, nous avons comparé les résultats de la méthode Ogmap et du modèle additif généralisé pour chaque ZPC et pour chaque cellule des ZPC.

Le modèle additif généralisé lisse de la densité de la biomasse a été intégré à une estimation de la biomasse dans chaque ZPC pour chaque année en multipliant la densité estimée de chaque cellule par sa superficie, puis en faisant la somme de toutes les cellules dans chaque ZPC. Les intervalles d'incertitude pour ces estimations annuelles de la biomasse ont été calculés de la façon décrite dans la section « Stratégie générale de modélisation spatiale ». Ces estimations de la biomasse et les intervalles de confiance à 95 % sont présentés à la figure 11, avec les estimations de la biomasse et les intervalles de confiance à 95 % pour les estimations utilisées dans l'évaluation actuelle de la crevette nordique des ZPC 4 à 6 (MPO 2019). La procédure du modèle additif généralisé a donné des estimations de biomasse très semblables dans toutes les ZPC comparativement à la procédure Ogmap (Evans *et al.* 2000), et des intervalles de confiance plus larges pour les ZPC 6 et 7. Cet écart peut être attribuable au fait que la version actuelle d'Ogmap renvoie des intervalles d'incertitude trop serrés, en raison du problème lié à l'inclusion de points de chalut individuels susmentionnés. De plus, les deux méthodes ont donné des estimations très semblables de la dynamique des biomasses moyennes dans chaque cellule (figure 12), les seules différences notables entre les densités moyennes des cellules entre les deux cellules se produisant dans de petites cellules à la limite de l'aire de répartition, comme V3, V4 et V60 (figure 7). Par conséquent, les estimations de la biomasse du modèle additif généralisé ont été jugées conformes aux estimations de la biomasse de la méthode Ogmap, qui ont été utilisées dans le reste de ce modèle comme estimation primaire de la biomasse.

Ces indicateurs de la biomasse peuvent être convertis en estimations de la biomasse exploitable, en multipliant les valeurs de la biomasse totale par la fraction du poids total estimé qui se produit lorsque la longueur de carapace des crevettes dépasse 17 mm chaque année pour chaque ZPC. Ce facteur de conversion a été calculé en transformant les dénombrements de crevettes dans chaque catégorie de taille observée dans le relevé par NR en poids au moyen de l'équation (1), puis en divisant le poids moyen par trait de chalut de toutes les crevettes trouvées dans le chalut du relevé par NR dans une ZPC et une année données par les poids additionnés. Le ratio de la biomasse exploitable par rapport à la biomasse totale est demeuré relativement constant dans chaque ZPC, mais variait entre les ZPC, la fraction

exploitable moyenne augmentant du sud au nord, de 84 % dans la ZPC 7 à 98 % dans la ZPC 4 (figure 13).

Densité des prédateurs

La densité des prédateurs de crevettes a été estimée à partir des estimations de la biomasse tirées des relevés au chalut d'été (NSRF) et d'automne (NR du MPO)². Trois prédateurs potentiels (reconnus précédemment comme des consommateurs importants de crevettes) ont été identifiés : la morue franche, le sébaste atlantique et le flétan du Groenland. Pour chaque espèce, la biomasse totale de chaque chalut a été transformée en densité par km² en mesurant la biomasse par zone de chalutage. Les modèles de régression spatiotemporelle ont été adaptés à chaque espèce à l'aide d'une famille Tweedie et de la procédure décrite à la section « Stratégie générale de modélisation spatiale ». Les cartes estimées de la densité de ces espèces sont présentées aux figures 14, 15 et 16. La densité moyenne de chacune des trois espèces dans les ZPC 4 à 7 est illustrée à la figure 17.

Température au fond

Le champ de la température au fond a été estimé à partir des mesures de température prises à chaque station dans le cadre des relevés d'été et d'automne par NR. Le modèle spatiotemporel de la température au fond a été estimé à l'aide de l'approche de modélisation lisse, en supposant que les températures résiduelles étaient normalement réparties en fonction de leurs estimations moyennes sur le terrain. La figure 18 présente une estimation du profil spatial de la température. Les températures moyennes au fond sont indiquées à la figure 19.

Indice de l'oscillation nord-atlantique

L'oscillation nord-atlantique (ONA) est un indicateur de l'état du climat à grande échelle, défini comme la différence des pressions atmosphériques au niveau de la mer en hiver entre les Açores et l'Islande. Il est fortement corrélé avec les conditions climatiques générales sur les plateaux de Terre-Neuve-et-Labrador, les conditions positives de l'oscillation nord-atlantique étant associées aux eaux généralement plus froides et plus douces sur le plateau (Colbourne *et al.* 2017). Ce prédicteur a été calculé pour l'ensemble du plateau sur une échelle annuelle en faisant la moyenne de toutes les valeurs mensuelles de l'oscillation nord-atlantique d'une année donnée (figure 20A) obtenues du Climate Prediction Center [centre de prévision climatique] de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) [en anglais seulement]. Comme l'oscillation nord-atlantique d'hiver (l'indice de l'ONA moyenne de décembre à mars) a été déterminée comme un prédicteur important de la dynamique de la crevette au Groenland (Hamilton *et al.* 2003), cet indice a également été calculé pour toutes les années.

Plancton

Les estimations de l'abondance du zooplancton ont été obtenues à partir des données estivales du Programme de monitoring de la zone Atlantique (PMZA) provenant des transects de la station 27, de Bonavista, de l'île Seal, du banc Makkovik et du Bonnet flamand. En suivant la procédure de normalisation décrite dans Pepin *et al.* (2017), les estimations à l'échelle de la biomasse pour chaque transect ont été dérivées des mesures de la biomasse totale du zooplancton en soustrayant la biomasse moyenne enregistrée pendant l'été dans ce transect au

² Ces estimations ne représentent pas les estimations de la biomasse des poissons aux fins de l'évaluation des stocks, et elles sont uniquement conçues comme mesures de l'abondance relative de ces espèces à l'échelle spatiale utilisée pour modéliser la dynamique de la crevette.

cours de la période de référence du zooplancton du PMZA de 1998 à 2010, et en la divisant par l'écart-type des mesures de la biomasse au cours de la même période de référence. La moyenne des écarts de la biomasse pour toutes les mesures au cours d'une année donnée a ensuite été calculée pour donner un seul écart de biomasse du zooplancton pour cette année, ce qui indique combien d'écart-types, en moyenne, la biomasse du zooplancton a dépassé ou si elle est tombée en deçà de la biomasse moyenne pour la période de référence (figure 20B).

Les estimations de l'abondance du phytoplancton étaient fondées sur des images satellites de la prolifération printanière de phytoplancton, en utilisant des estimations de l'ampleur (concentration de chlorophylle intégrée à l'ensemble de la prolifération, figure 20C) et du moment d'apparition (figure 20D) de la prolifération tiré de Pepin *et al.* (2017). Les indicateurs d'abondance du phytoplancton ont été mis à l'échelle à l'aide de la même méthode que celle utilisée pour les abondances du zooplancton.

Pression de la pêche

Le total des prises de crevettes nordiques a été déterminé pour chaque cellule chaque année en additionnant les prises de tous les chalutages qui ont eu lieu dans chaque cellule d'après les registres des observateurs des prises des navires de gros tonnage et les registres des prises des petits bateaux. Ces mesures ont été mises à l'échelle du total des débarquements déclarés au cours de cette année, car les prises totales fondées sur les données du journal de bord ou des observateurs ne correspondaient pas toujours exactement au total des débarquements. Les prises de l'année la plus récente (2018) ont été mises à l'échelle en fonction du contingent total attribué pour la ZPC, car les données finales des observateurs, du journal de bord et des débarquements n'étaient pas disponibles au moment de la rédaction. Les prises ont été transformées en densités de prises en divisant les prises attribuées à chaque cellule chaque année par la superficie de la cellule.

Profils spatiaux du recrutement

Compte tenu de la vigueur et de la constance du courant du Labrador en direction sud et de la durée prolongée de la phase larvaire de la crevette nordique, les nouvelles recrues qui entrent dans la population à un endroit donné proviennent probablement principalement du nord de cet endroit, et on s'attend à un degré élevé de connectivité du recrutement entre les ZPC (Le Corre *et al.* 2019). Ainsi, les profils de recrutement structurés spatialement ont été considérés comme un déterminant potentiel de la dynamique des populations de crevettes. Pour estimer les taux de dispersion des larves à partir de chaque cellule vers les autres, le modèle de dispersion océanographique élaboré dans Le Corre *et al.* (2019) a été utilisé pour simuler les trajectoires de dérive des larves à partir d'une grille de 267 points répartis dans les quatre ZPC (figure 21). Pour chaque point de départ, 100 larves simulées par jour ont été libérées et suivies pendant 105 jours, au cours de trois années de simulation distinctes (1999, 2009 et 2010, choisies pour couvrir une gamme de conditions de l'oscillation nord-atlantique). Toute larve trouvée dans une cellule donnée entre le 86^e et le 105^e jour depuis le début de sa dispersion (la période de compétence larvaire présumée; Le Corre *et al.* 2019) a été présumée pouvoir s'y disperser à partir de son point de départ. Pour chaque paire de cellules, a et b , la fraction des individus se dispersant de a à b a été calculée comme étant le nombre de jours où une larve capable d'établissement provenant de a se trouvait dans la cellule b , divisé par le nombre total de larves-jours capables d'établissement pour toutes les larves de a . Cela a été répété pour toutes les paires de cellules.

Ces fractions observées ont été utilisées pour estimer une matrice de connectivité en faisant une régression de la fraction établie entre les cellules a et b sur une interaction du champ aléatoire de Markov entre tous les sites (de sorte que les sites proches les uns des autres ont

été pénalisés pour avoir un nombre similaire de larves se dispersant d'eux vers d'autres sites, et à partir d'autres sites vers eux). Cette matrice de connectivité a ensuite été mise à l'échelle en fonction de la taille totale de la cellule émettrice et réceptrice, pour tenir compte du fait que différentes cellules auraient une densité différente, étant donné qu'un nombre fixe de larves se déplaçant dans une cellule plus petite aurait un plus grand effet sur la densité de la cellule que le même nombre se déplaçant dans une cellule plus grande.

Enfin, cette matrice de connectivité modifiée a été convertie en un indice estimatif de recrutement pour chaque cellule chaque année, en multipliant la matrice de connectivité par un vecteur de densités estimées pour tous les emplacements de départ (calculé à partir du modèle décrit dans la section « Dynamique actuelle de la biomasse de la crevette nordique »). Cela signifiait que l'indice de recrutement pour un site donné était une moyenne pondérée des densités estimées de crevettes pour tous les autres sites, où la pondération dépendait du taux de connectivité modélisé et des superficies relatives des deux cellules.

MODÈLES SPATIAUX DE PRODUCTION EXCÉDENTAIRE

Contexte du modèle de production excédentaire

Les taux de variation de chaque cellule quant à la biomasse dans l'ensemble de la région ont été modélisés à l'aide d'une série de modèles de production excédentaire écosystémiques structurés spatialement. Ces modèles de production excédentaire supposaient que la densité de population dans une cellule i et une année t données (D_{it}) est égale à la densité observée à cet endroit l'année précédente (D_{it-1}) multipliée par un taux de production annuel propre à la cellule et à l'année $e^{r_{it}}$, moins la densité totale des prises à cet endroit, C_{it} (où C_{it} est égal à la masse totale de toutes les crevettes nordiques capturées dans la cellule divisée par la superficie de la cellule). Le terme de la croissance englobe tous les effets non liés à la pêche qui entraînent une variation de la biomasse, y compris le recrutement, la croissance et la mortalité :

$$D_{it} = D_{it-1}e^{r_{it}} - C_{it} \quad (2)$$

Ces modèles présumaient que les prélèvements de poissons se faisaient après le recrutement, la croissance et la mortalité, de sorte qu'en l'absence de pression de la pêche, toutes les crevettes capturées seraient toujours présentes dans la population au moment du relevé.

On suppose que la productivité instantanée dépend à son tour de la densité de la cellule au cours de l'année précédente (D_{it-1}) et d'autres facteurs potentiellement propres à la cellule et à l'année (\mathbf{V}_{it}) :

$$r_{it} = f(D_{it-1}, \mathbf{V}_{it}) \quad (3)$$

En réorganisant l'équation (2) puis en effectuant une transformation logarithmique des deux côtés et en les substituant dans l'équation (3), on obtient l'équation suivante pour la production :

$$\log\left(\frac{D_{it} + C_{it}}{D_{it-1}}\right) = f(D_{it-1}, \mathbf{V}_{it}) \quad (4)$$

Les modèles élaborés mettaient l'accent sur les versions additives linéaires de l'équation (4), où l'on supposait que les prédicteurs écosystémiques étaient liés linéairement à la productivité instantanée. Cela correspondrait à un modèle Ricker simple si $f(D_{it-1}, \mathbf{V}_{it}) = \hat{r} - \beta \cdot D_{it-1}$, où \hat{r} est le taux de croissance indépendant de la densité et β représente le taux de croissance dépendant de la densité. Dans le cas de l'additif linéaire, l'équation (5) peut être estimée en faisant une régression du logarithme du ratio de la densité actuelle plus le nombre de prises par

rapport à la densité de l'année précédente sur la densité passée et d'autres prédicteurs potentiels :

$$\log\left(\frac{D_{it} + C_{it}}{D_{it}}\right) = \hat{r}_i + \beta_i \cdot D_{it-1} + \sum_j \gamma_j \cdot V_{j\,it-1} + \epsilon_{it} \quad (5)$$

La variabilité spatiale de la productivité maximale est saisie par le terme \hat{r}_i , qui correspond au taux de croissance prévu dans les cellules i à faible densité en l'absence d'autres déterminants. La variabilité spatiale de la dépendance à la densité est saisie par le terme β_i , qui détermine la rapidité avec laquelle les taux de croissance diminuent avec la densité croissante; les valeurs inférieures de β_i correspondraient à une capacité de charge locale plus élevée dans un site, toutes les autres conditions étant égales. Les effets d'autres prédicteurs mesurés de l'écosystème sont mesurés par les termes γ_j , avec des termes positifs signifiant que la productivité devrait être élevée en moyenne lorsque ce prédicteur est élevé, et des termes négatifs impliquant une réduction de la productivité lorsque ce prédicteur est à des niveaux élevés. Si les prédicteurs de l'écosystème changent au fil du temps, cela aura pour effet net de modifier à la fois la productivité maximale possible et la capacité de charge maximale d'une cellule à un moment donné. On a supposé que tous les facteurs non mesurés influant sur la productivité entraînent par le terme d'erreur ϵ_{it} (qui incorpore également les effets des erreurs de mesure des biomasses de l'année précédente et de l'année en cours). Pour tous les modèles, on a supposé que l'erreur ϵ_{it} suivait la loi de Student, qui est semblable à la loi de Laplace-Gauss standard, mais qui a des queues plus longues, ce qui permet la possibilité d'importants changements positifs ou négatifs occasionnels.

Caractéristiques des modèles

Quatre modèles de production excédentaire ont été adaptés afin de déterminer quels prédicteurs écosystémiques étaient en mesure de prédire avec précision les variations annuelles de la densité de la biomasse et de déterminer si des structures de modèle plus complexes étaient en mesure de mieux prédire la dynamique de la population. Tous les modèles ont été estimés en faisant une régression des valeurs moyennes estimées de $\log\left(\frac{D_{it} + C_{it}}{D_{it}}\right)$ des modèles spatiaux de densité de la crevette nordique sur différentes combinaisons de prédicteurs environnementaux, à l'aide de la fonction MAG du progiciel R **mgcv**. Tous les modèles comprenaient un lissage du champ aléatoire de Markov entre les cellules pour modéliser les tendances des variations spatiales des taux de croissance. La biomasse des densités de sébaste et de flétan du Groenland dans chaque cellule a été additionnée pour produire un seul autre prédateur composite (en plus de la morue du Nord), car la densité estimée du flétan du Groenland est demeurée relativement constante tout au long de la série chronologique dans toutes les ZPC. La densité, le recrutement et la densité des prédateurs de chaque cellule ont été utilisés comme prédicteurs de la variation de la biomasse à l'échelle de la cellule. Bien que des estimations de la température au fond étaient disponibles à l'échelle du chalut et des cellules, la température a été agrégée à l'échelle de la ZPC en prenant la température moyenne de chaque ZPC pour l'ensemble des cellules. Nous avons agrégé la température à l'échelle des ZPC, car le profil spatial de la température ne montrait pas de variation importante d'une année à l'autre, et elle était fortement colinéaire avec l'emplacement spatial et était donc déjà prise en compte efficacement en incluant des prédicteurs de taux de croissance moyens pour chaque cellule. Seules des estimations annuelles étaient disponibles pour tous les autres prédicteurs inclus dans les modèles (indices du zooplancton, indices du phytoplancton, oscillation nord-atlantique).

Les quatre modèles testés étaient les suivants :

1. Modèle autorégressif avec décalage- 1 : Ce modèle comprenait tous les prédictors potentiels (zooplancton, phytoplancton, oscillation nord-atlantique, température, indice de recrutement, densité de la morue et densité des autres prédateurs) en termes linéaires avec un décalage d'un an par rapport à l'année en cours. La densité de la crevette nordique de l'année précédente a été incluse comme terme décalé d'un an avec une pente qui varie spatialement, en utilisant un lissage du champ aléatoire de Markov sur la pente pour empêcher les tendances observées de surélévation :

$$\log\left(\frac{D_{it} + C_{it}}{D_{it}}\right) = \hat{r}_i + \beta_i \cdot \text{densité de la crevette}_{i,t-1} + \\ \gamma_1 \cdot \text{indice de recrutement}_{i,t-3} + \\ \gamma_2 \cdot \text{densité de la morue}_{i,t-1} + \gamma_3 \cdot \text{densité des autres prédateurs}_{i,t-1} + \\ \gamma_4 \cdot \text{indice d'ONA}_{t-1} + \gamma_5 \cdot \text{température au fond}_{sfa,t-1} + \\ \gamma_6 \cdot \text{ampleur du phytoplancton}_{t-1} + \gamma_7 \cdot \text{moment d'apparition du phytoplancton}_{t-1} + \\ \gamma_8 \cdot \text{biomasse du zooplancton}_{t-1} + \\ \epsilon_{it}$$

2. Modèle autorégressif avec décalage- 1 simplifié : ce modèle ne comprenait que les termes significatifs du modèle précédent, soit la densité de la morue, la densité des autres prédateurs, l'indice de l'oscillation nord-atlantique et la biomasse de la crevette nordique :

$$\log\left(\frac{D_{it} + C_{it}}{D_{it}}\right) = \hat{r}_i + \beta_i \cdot \text{densité de la crevette}_{i,t-1} + \\ \gamma_1 \cdot \text{densité de la morue}_{i,t-1} + \gamma_2 \cdot \text{densité des autres prédateurs}_{i,t-1} + \\ \gamma_3 \cdot \text{indice d'ONA}_{t-1} + \\ \epsilon_{it}$$

3. Modèle autorégressif avec décalages multiples : ce modèle comprenait des décalages allant jusqu'à cinq ans pour tous les prédictors, de sorte que l'effet d'un prédictor donné sur le taux de croissance était donné par $\sum_l \gamma_l \cdot V_{t-l}$. Les γ_l pour chaque lissage ont été pénalisées l'une envers l'autre au moyen d'une fonction spline de type plaque mince. L'objectif de ce modèle était de déterminer s'il y avait des preuves d'effets décalés au-delà d'une seule année.

$$\log\left(\frac{D_{it} + C_{it}}{D_{it}}\right) = \hat{r}_i + \sum_{k=1}^5 \beta_k \cdot \text{densité de la crevette}_{i,t-k} + \\ \gamma_{1k} \cdot \text{indice de recrutement}_{i,t-k} + \\ \gamma_{2k} \cdot \text{densité de la morue}_{i,t-k} + \gamma_{3k} \cdot \text{densité des autres prédateurs}_{i,t-k} + \\ \gamma_{4k} \cdot \text{température au fond}_{sfa,t-k} + \gamma_{5k} \cdot \text{indice d'ONA}_{t-k} + \\ \gamma_{6k} \cdot \text{biomasse du zooplancton}_{t-k} + \\ \epsilon_{it}$$

4. Variation spatiale du modèle autorégressif avec décalage- 1 : ce modèle avait la même structure que le modèle 1, sauf que l'effet de chaque prédictor sur les taux de croissance pouvait varier d'une cellule à l'autre de sorte que l'effet d'un prédictor donné sur les taux de croissance dans une cellule donnée serait exprimé par $\gamma_i \cdot V_{t-1}$ avec les termes de régression variant spatialement γ_i ajustés à l'aide d'un lissage du champ aléatoire de Markov pour pénaliser les estimations de cellules voisines les unes par rapport aux autres.

$$\log\left(\frac{D_{it} + C_{it}}{D_{it}}\right) = \hat{\rho}_i + \beta_i \cdot \text{densité de la crevette}_{i,t-1} + \gamma_{1i} \cdot \text{indice de recrutement}_{i,t-3} + \\ \gamma_{2i} \cdot \text{densité de la morue}_{i,t-1} + \gamma_{3i} \cdot \text{densité des autres prédateurs}_{i,t-1} + \\ \gamma_{4i} \cdot \text{température au fond}_{5i} + \gamma_{5i} \cdot \text{indice d'ONA}_{t-1} + \\ \gamma_{6i} \cdot \text{biomasse du plancton}_{t-1} + \\ \epsilon_{it}$$

Pour évaluer la qualité de l'ajustement de chaque modèle, plusieurs années de données ont été conservées comme ensemble de tests, et n'ont pas été utilisées pour ajuster le modèle. Les années utilisées pour les tests du modèle allaient de 2006 à 2008 (pendant la période de pic de la biomasse de la crevette nordique) et de 2016 à 2018 (pendant la période de déclin rapide de la population), agissant efficacement comme un test rétrospectif de la qualité de l'ajustement qui a été évalué en comparant la qualité des prédictions de chaque modèle des taux de changement au sein des cellules pour toutes les années testées. Le fait de conserver les données des trois dernières années sert d'analyse rétrospective pour déterminer si le modèle a tendance à surestimer ou à sous-estimer les variations de la biomasse au cours des années qui ont suivi son ajustement. La qualité de l'ajustement était fondée sur des comparaisons visuelles entre les taux de changement prévus et observés au sein des cellules, et sur la comparaison de l'écart moyen quadratique (EMQ) des prédictions de la productivité du modèle par rapport à la productivité observée de chaque cellule, à l'aide des deux ensembles de données conservées.

Comparaisons des modèles

Tous les modèles ont estimé avec précision la productivité au sein de la cellule pour les années testées au cours de la période précédant le déclin de la crevette (2006 à 2008; figure 22 points rouges), sauf dans la ZPC 7, où tous les modèles prédisaient constamment un taux de déclin plus faible que celui observé. Les modèles autorégressifs avec décalage- 1 et avec décalage- 1 simplifié ont donné les prévisions les plus précises de la productivité hors échantillon pour les années suivant les déclin de population (figure 22). Le modèle avec décalage- 1 simplifié donnait des prédictions aussi exactes ou meilleures que le modèle avec décalage- 1 complet pour toutes les ZPC pour la période de 2006 à 2008 et de 2016 à 2018 (tableau 1) avec moins de prédictors, de sorte qu'il a été adopté comme modèle principal pour les comparaisons subséquentes du modèle et les tests de sensibilité.

Le modèle avec décalage- 1 simplifié a permis d'estimer avec précision les taux de productivité instantanée à l'échelle de la ZPC pour toutes les ZPC et pour les trois ensembles de données (entraînement, tests avant le déclin et tests des données après le déclin; figure 23). Ce modèle a également permis de saisir efficacement la dynamique dans la plupart des cellules du paysage (voir les figures supplémentaires). Les inadaptations les plus importantes entre les prédictions du modèle et les productivités observées à l'échelle des cellules se sont produites dans les cellules en eau peu profonde, comme les cellules V6 (figure S1), V4 (figure S2), V33 (figure S10) ou V70 (figure S12), ou de petites cellules en eau profonde au bord du plateau, comme V17 (figure S3), V44 (figure S6) ou V55 (figure S7). Dans tous les cas, ces cellules ne représentent qu'une petite fraction de la biomasse totale dans leurs ZPC respectives, de sorte que ce niveau d'inadaptation n'est probablement pas un problème. Toutefois, cela indique que les prévisions du modèle dans les régions très peu profondes ou très profondes devraient recevoir moins de poids que les prévisions dans les fourchettes de profondeur de base pour la crevette nordique (200 à 500 m).

Vérfications de la robustesse du modèle

Plusieurs spécifications de modèle de rechange ont également été testées afin de déterminer la robustesse des hypothèses utilisées pour élaborer le modèle avec décalage- 1 simplifié. Trois modèles de rechange ont été comparés au modèle avec décalage- 1 simplifié :

1. **Modèle monospécifique** : Ce modèle ne comprenait qu'un point d'intersection variable spatialement et un effet de densité de la crevette nordique, en supposant une productivité maximale indépendante du temps (c.-à-d. constante). Ce modèle a été utilisé comme modèle nul pour déterminer si l'inclusion de prédicteurs écosystémiques a considérablement amélioré l'ajustement du modèle, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'échantillon.
2. **Oscillation nord-atlantique d'hiver** : L'oscillation nord-atlantique d'hiver (l'indice de l'ONA moyenne de décembre à mars) a été déterminée comme étant un prédicteur important de la dynamique de la crevette au Groenland (Hamilton *et al.* 2003), et la variabilité multidéennale de l'ONA d'hiver est corrélée avec la variabilité de la température à la surface de la mer de l'Atlantique Nord (Chelliah et Bell 2004). Cet indice a également été calculé pour toutes les années. Pour vérifier si l'oscillation nord-atlantique d'hiver était un meilleur prédicteur que l'oscillation nord-atlantique d'une année complète, nous avons modifié le modèle avec décalage- 1 simplifié en utilisant l'oscillation nord-atlantique d'hiver comme covariable.
3. **Modèle non spatial** : Ce modèle a été utilisé pour déterminer si l'inclusion de la variabilité spatiale dans le recrutement améliorerait les prévisions du modèle comparativement à une approche plus typique de stock unique. Les abondances de la crevette nordique, de la morue franche et d'autres prédateurs ont été calculées pour chaque ZPC et pour chaque année en additionnant les densités estimées multipliées par les superficies des cellules pour l'ensemble des cellules. La productivité de chaque année a été calculée en additionnant les prises à l'échelle de la ZPC de cette année-là à la biomasse de l'année. On a ensuite effectué une régression de la productivité à l'échelle de la ZPC sur l'abondance de la crevette à l'échelle de la ZPC, de l'abondance des autres prédateurs et de l'oscillation nord-atlantique, tous décalés d'un an, avec des pentes propres à la ZPC pour les abondances de la crevette et des prédateurs, pour tenir compte du fait que les capacités de charge et le chevauchement spatial prévu des crevettes avec les aires de répartition des prédateurs devraient varier en fonction de la ZPC.

Pour comparer les trois tests de sensibilité avec le modèle avec décalage- 1 simplifié sur des échelles de mesure similaires, tous les modèles ont été utilisés pour estimer les productivités annuelles pour chaque ZPC pour les ensembles de données d'entraînement et de test. Les modèles ont été comparés à l'aide de l'EMQ (tableau 2) et par comparaison visuelle (figure 25). Les deux groupes d'ensembles de données de test ont été regroupés pour les comparaisons de l'EMQ entre les tests de sensibilité, car il n'y avait que six points de test totaux à comparer, et l'EMQ aura tendance à être une mesure d'ajustement très bruyante dans les petits ensembles de données.

Le modèle avec décalage- 1 simplifié convient mieux aux productivités annuelles observées que le modèle monospécifique dans toutes les ZPC, à l'exception de la ZPC 5 dans l'ensemble de données d'entraînement, mais il a été surpassé par le modèle monospécifique dans les ZPC 4 et 5 dans l'ensemble de données de test (tableau 2). Le modèle d'oscillation nord-atlantique d'hiver s'est ajusté à peu près aussi bien que le modèle de prévision de toutes les ZFC dans les données d'entraînement, et a légèrement surpassé le modèle de prévision lors de la prévision des tendances dans l'ensemble de données de test (tableau 2). Toutefois, le terme d'oscillation nord-atlantique d'hiver n'était pas statistiquement significatif dans ce modèle, ce qui

indique que le signe de l'effet du terme d'oscillation nord-atlantique d'hiver était incertain. Le modèle non spatial a eu un rendement prédictif inférieur à celui du modèle avec décalage -1 simplifié pour toutes les ZPC dans l'ensemble de données d'entraînement, et un rendement prédictif inférieur dans les ZPC 4 et 5 comparativement au modèle avec décalage -1 simplifié dans l'ensemble de données de test. Toutefois, le modèle non spatial a surpassé le modèle avec décalage -1 simplifié dans les ZPC 6 et 7 dans l'ensemble de données de test (tableau 2).

Globalement, le modèle monospécifique a moins bien réussi à prédire les périodes d'augmentation ou de diminution rapide des ZPC 6 et 7 (figure 25, colonne 2), ce qui est conforme aux éléments de preuve présentés précédemment selon lesquelles ces stocks ont subi au moins deux changements de productivité à grande échelle dans cette série chronologique. Le modèle d'oscillation nord-atlantique d'hiver convient à peu près aussi bien ou mieux que le modèle avec décalage -1 simplifié (figure 25, colonne 3). Le modèle non spatial avait tendance à sous-estimer les périodes d'augmentation et de diminution des ZPC 4 à 6 et à surestimer les changements de productivité dans la ZPC 7 (figure 25, colonne 4). Bien que le modèle avec décalage -1 simplifié ait été moins performant que le test des autres modèles dans certaines incidences (p. ex., décalages pluriannuels, données de test après le déclin de la ZPC 7), le modèle avec décalage -1 simplifié a été choisi pour sa simplicité relative et son adéquation globale et a été adopté comme modèle principal pour prévoir les variations de ce stock. Ce modèle a été modifié à l'aide de données de toutes les années pour s'assurer que les paramètres du modèle étaient estimés à l'aide de toutes les données disponibles. Ce modèle réajusté a été utilisé pour produire le reste des résultats du présent rapport, et est ci-après appelé le modèle de prévision.

Le modèle de prévision final comprenait des termes pour la densité de la morue franche, la densité des autres prédateurs, l'oscillation nord-atlantique, un point d'intersection variable spatialement et un terme de densité-dépendance variable spatialement. L'équation complète décrivant le modèle de prévision est la suivante :

$$\log\left(\frac{D_{i,t} + C_{i,t}}{D_{i,t}}\right) = \hat{r}_i + \beta_i \cdot \text{densité de la crevette}_{i,t-1} + \gamma_1 \cdot \text{densité de la morue}_{i,t-1} + \gamma_2 \cdot \text{densité des autres prédateurs}_{i,t-1} + \gamma_3 \cdot \text{indice d'ONA}_{t-1} + \epsilon_{i,t}$$

$$\epsilon_{i,t} \sim \sigma \cdot t(df)$$

Paramètres du modèle de prévision

Le modèle de prévision a montré une variation spatiale importante des paramètres démographiques. Le taux de croissance estimé des points d'intersection (figure 24A) variait de $0,37 \text{ année}^{-1}$ dans la ZPC 7 à $>1,5 \text{ année}^{-1}$ dans la limite nord de la ZPC 4 et au centre de la ZPC 5 (il s'agit du taux de croissance présumé en l'absence de toute prédation et de récolte au cours d'une année d'oscillation nord-atlantique neutre). Les effets estimés liés à la densité (figure 24B) variaient de $-5 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{année}^{-1}$ au centre de la ZPC 5 à $-5 \times 10^{-5} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{année}^{-1}$ au sud de la ZPC 4 et dans les régions de la ZPC 6 (où les valeurs plus proches de zéro indiquent une plus faible dépendance à la densité).

Le paramètre estimé pour la morue franche était $-3,7 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{année}^{-1}$ ($\pm 0,5 \cdot 10^{-4}$ 2 s.e.) (figure 24C), ce qui signifie qu'une augmentation de la densité de la morue de 1 tonne $\cdot \text{km}^{-2}$ dans une cellule donnée correspondrait à une diminution de $0,37 \text{ year}^{-1}$ de la productivité instantanée dans cette cellule. Le paramètre estimé pour les autres prédateurs était $-1,8 \times 10^{-5} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{année}^{-1}$ ($\pm 1,8 \cdot 10^{-4}$ 2 s.e.) (figure 24D), ce qui signifie qu'une

augmentation de la densité de $1 \text{ tonne} \cdot \text{km}^{-2}$ du sébaste et du flétan du Groenland dans une cellule donnée correspondrait à une diminution de $0,018 \text{ year}^{-1}$ de la productivité instantanée. Le paramètre estimé pour l'oscillation nord-atlantique était $0,12 \text{ year}^{-1}$ ($\pm 0,072 \text{ s.e.}$) (figure 24E), ce qui se traduirait par des productivités instantanées de la crevette de $0,24 \text{ year}^{-1}$ de plus dans les années d'oscillation nord-atlantique positives (indiquant des conditions froides et fraîches) comparativement aux années d'oscillation nord-atlantique négatives.

Le paramètre estimé des degrés de liberté (df) pour le terme d'erreur était de 4,3, et le paramètre d'échelle (σ) était de 0,4, ce qui signifie que la variance estimée des résidus par cellule était de $0,3 \text{ year}^{-1}$ (puisque la variance de la loi de Student est égale à $\frac{df}{df-2} \cdot \sigma^2$). Le faible paramètre df estimé indique que les niveaux de productivité excédentaire propres aux cellules présentaient des queues gaussiennes beaucoup plus longues, indiquant la possibilité d'hétérogénéité non modélisée.

Tests de sensibilité du modèle

Plusieurs analyses ont été effectuées pour tester la sensibilité du modèle de prévision par rapport aux changements des paramètres des déterminants (densité des prédateurs et oscillation nord-atlantique).

Le premier test était une analyse rétrospective pour voir ce que le modèle aurait prédit pour la dynamique de la crevette nordique dans la période précédant le début du relevé plurispécifique au chalut. Comme il n'y a pas d'estimations comparables de la biomasse pour cette période, ce qui fait qu'il est impossible de générer les taux de changement prévus avant 1995, le modèle de prévision a plutôt été utilisé pour prédire la capacité de charge pour différentes années, comme approximation de l'abondance maximale de crevettes possible pendant cette période.

Comme il y a eu un changement d'engin entre 1994 et 1995, qui aurait eu une incidence sur la capturabilité des espèces prédatrices (et donc sur l'effet prévu sur les taux de productivité de la crevette), les densités de prédateurs d'avant 1995 ont été mises en échelle par un facteur de capturabilité estimé. Ces facteurs de capturabilité ont été calculés en examinant un sous-ensemble des données sur les chaluts au cours des deux années précédant et suivant 1995 (c.-à-d. de 1993 à 1996), en utilisant seulement les chalutages des ZPC 6 et 7 (les deux seules ZPC qui ont fait l'objet d'un échantillonnage constant au cours de cette période). Cette approche a été adaptée de la méthode utilisée dans Pedersen *et al.* (2017). Les poids des espèces de prédateurs à partir de ces données ont été modélisés à l'aide d'un modèle additif généralisé avec une distribution de Tweedie pour le terme d'erreur, d'un terme de lissage du champ aléatoire de Markov pour la cellule (afin de modéliser les variations des répartitions spatiales de la densité des prédateurs) et d'un effet d'année aléatoire (pour modéliser les différences d'une année à l'autre dans la biomasse), plus un effet de relevé fixe, pour modéliser les différences moyennes entre 1993-1994 et 1995-1996. Cet effet fixe estimé a ensuite été utilisé comme facteur de conversion de l'engin, en multipliant les densités de prédateurs avant le changement d'engin par l'inverse du facteur de conversion. L'effet de l'engin a été estimé à 2,1 pour la morue franche (c.-à-d. que la capturabilité de la morue avec l'engin Engel était la moitié de celle de l'engin Campelen), à 3,4 pour le sébaste et à 2,5 pour le flétan du Groenland.

Le modèle de prévision a été utilisé pour estimer la capacité de charge variable dans le temps K_t pour chaque ZPC en trouvant la densité de crevettes pour chaque cellule de chaque année qui donnerait la valeur moyenne de l'équation (5) équivalant à zéro compte tenu des prédicteurs pour les cellules de ces années (c.-à-d. la densité de la morue franche, la densité des autres prédateurs et l'oscillation nord-atlantique), puis en multipliant toutes les valeurs à l'échelle de la cellule $K_{i,t}$ par la superficie de la cellule et en faisant le total dans chaque ZPC. Cela a été fait

pour toutes les années de 1995 à 2018 pour toutes les ZPC qui comportaient des données, et pour 1990 à 1995 pour les ZPC 6 et 7, afin de déterminer la capacité de charge prévue par le modèle avant l'effondrement de la morue franche.

Le modèle a prédit que les capacités de charge des ZPC 6 et 7 étaient très faibles en 1990 et qu'elles ont augmenté rapidement pour atteindre un sommet en 1995 (figure 26). Cette capacité de charge était supérieure à la biomasse estimée de la crevette nordique jusqu'en 2000 dans la ZPC 6 et en 2001 dans la ZPC 7, mais cela correspond au fait que ces stocks ont commencé à une très faible densité et qu'il faudrait du temps pour atteindre leur capacité de charge. Les capacités de charge modélisées impliquent que la densité dans la ZPC 7 aurait dû commencer à augmenter avant les premières augmentations majeures en 2000, et indiquent qu'elle avait diminué considérablement en deçà de sa capacité de charge après 2010. C'est peut-être une preuve de la dépendance de la ZPC 7 à la ZPC 6 pour le recrutement, comme l'ont prédit Le Corre *et al.* (2019) et cela peut indiquer la nécessité d'inclure la connectivité interrégionale pour faire des prévisions pour la ZPC 7 à l'avenir.

Le modèle de prévision indiquait que la capacité de charge de la crevette aurait dû être nulle en 1990 (figure 26), lorsque la morue franche se trouvait à un niveau élevé pour la dernière fois (le modèle utilise la biomasse de 1989 de la morue comme prédicteur). Cela montre que le modèle surestime probablement soit l'effet de la morue franche à des densités très élevées de morue, soit l'effet de refuge à faible densité pour la crevette, car une capacité de charge de zéro ne correspond pas aux densités de crevettes observées précédemment dans ces régions; elles ont été estimées à environ 250 000 tonnes dans ces deux ZPC au cours de la même période d'après les données sur le régime alimentaire (figure 4).

Pour tester la sensibilité du modèle de prévision aux grandes variations des valeurs prédictives, le modèle de prévision a été utilisé pour prédire la capacité de charge pour chaque ZPC en utilisant les covariables pour 2019 (c.-à-d. covariables à partir des données recueillies en 2018), et pour les mêmes données, mais avec des abondances de prédateurs et la mise à l'échelle de l'oscillation nord-atlantique à des niveaux fixes. L'abondance des prédateurs a varié de -75 % des niveaux de 2018 à +300 % (quatre fois) de leur densité en 2018, et les valeurs de l'indice de l'oscillation nord-atlantique pour l'année en cours, +1, 0 et -1, ont été testées.

Le modèle prédisait que le fait de doubler la densité actuelle des prédateurs aurait un effet négatif important sur la capacité de charge de la crevette nordique dans les ZPC 6 et 7, les effets les plus importants ayant été observés dans la ZPC 6 (figure 27). Cela aurait un effet plus faible dans la ZPC 5, et un effet presque imperceptible sur les abondances dans la ZPC 4, ce qui indique qu'à la densité actuelle de prédateurs, la crevette nordique de la ZPC 4 n'est pas soumise à un fort contrôle descendant. Des variations importantes de l'indice de l'oscillation nord-atlantique (de son niveau de 2018 de 1,08 à un faible indice de -1, proche du niveau minimal observé de -1,15) devraient avoir des effets importants sur la capacité de charge dans les quatre régions. Ce test de sensibilité a également indiqué que les densités de prédateurs supérieures de 300 % à la densité actuelle (c.-à-d. quatre fois la densité actuelle) mèneraient à une capacité de charge nulle dans la ZPC 6, peu importe l'oscillation nord-atlantique.

Cette analyse de sensibilité est conforme à la première analyse de sensibilité, ce qui indique que le modèle de prévision surestime probablement les effets des très fortes densités de prédateurs, et qu'il peut surestimer l'effet des très grandes fluctuations de l'oscillation nord-atlantique. Par conséquent, il est recommandé de réévaluer ce modèle si la densité des prédateurs augmente de plus de 50 % par rapport à leur abondance actuelle, ou si les plateaux de Terre-Neuve-et-Labrador subissent une autre longue période de réchauffement ou de refroidissement.

DISCUSSION

INCERTITUDES SCIENTIFIQUES

Le modèle proposé intègre les connaissances écologiques les plus récentes sur l'état de ces stocks. Cependant, plusieurs questions scientifiques en suspens pourraient avoir une incidence sur les prévisions du modèle.

Dynamique de la structure des stocks

Le modèle d'évaluation proposé met l'accent sur la productivité totale et ne répartit pas les taux de croissance en catégories de taille ou en étapes du cycle de vie. De plus, il ne tente pas de mesurer si les variations des variables de l'écosystème entraînent des changements dans les tendances de la dynamique du recrutement, de la croissance individuelle au fil du temps ou des taux de mortalité. Des modèles structurés selon la taille ont été élaborés pour le stock de crevettes nordiques dans le golfe du Maine (Cao *et al.* 2016a, 2016b), qui intègrent la dynamique de la croissance, de la mortalité et du recrutement, y compris l'effet des déterminants écosystémiques comme la prédation sur la mortalité; cette approche est au cœur de l'évaluation de la crevette nordique du golfe du Maine (Hunter *et al.* 2018). Toutefois, ce modèle n'est pas directement transférable aux stocks de Terre-Neuve-et-Labrador, car il est paramétré pour des conditions environnementales très différentes et ne comprend pas de mécanismes pour le transport des larves ou des adultes entre les régions.

Il est difficile d'adapter ce type de modèle pour les stocks de T.-N.-L., car ils ne montrent habituellement pas de cohortes distinctes de recrues se déplaçant dans la population au fil du temps, et les tendances exactes des déplacements des crevettes adultes à l'intérieur des régions et entre elles au fil du temps sont actuellement mal comprises. À l'heure actuelle, le MPO travaille en partenariat avec le milieu universitaire pour tenter d'élaborer un modèle bayésien de ces stocks structuré selon la longueur, dans le but de répartir les effets de la pression de la pêche, de la prédation et des facteurs environnementaux ascendants sur le recrutement, la croissance individuelle et la mortalité dans ces stocks. Toutefois, ce modèle n'est actuellement pas suffisamment fiable à des fins d'évaluation. Si une version fiable de ce modèle est élaborée, elle pourrait être utilisée pour générer des prévisions de stocks dans les évaluations futures.

Capturabilité

L'une des incertitudes les plus importantes est la capturabilité de la crevette nordique dans le relevé au chalut par NR. À l'heure actuelle, les estimations de la population d'Ogmap et du modèle additif généralisé supposent que toutes les crevettes qui étaient présentes dans le volume balayé par le chalut ont été capturées. Étant donné que les crevettes passent au moins une partie de leur temps dans la colonne d'eau loin de l'alimentation en milieu benthique, il est probable qu'il manque au moins une fraction de la population totale disponible dans le relevé par NR. De plus, le relevé au chalut par NR ne semble pas capturer efficacement la crevette nordique de moins de 15 mm, ce qui signifie que les nouvelles recrues ne sont pas bien échantillonnées.

Dans la mesure où la capturabilité ne dépend pas de la densité, cela n'aura pas d'effet sur les taux de variation estimés par unité de biomasse, puisque ces paramètres dépendent du rapport entre les estimations de la biomasse au cours de deux années quelconques, plutôt que de la valeur absolue. Toutefois, une faible capturabilité signifierait que les estimations actuelles de la biomasse sous-estimeraient la taille réelle de la population et, par conséquent, surestimeraient les répercussions de la pêche sur la productivité.

À l'heure actuelle, il n'y a pas de mesure validée à l'externe de la capturabilité des engins, alors il faut supposer qu'elle est égale à un. Nous recommandons que d'autres recherches sur cette question soient entreprises, et que des estimations de la capturabilité puissent être facilement intégrées dans le modèle élaboré ici.

Taux de prédation de la crevette nordique

Le modèle de production excédentaire proposé dans le présent document repose sur l'abondance de la morue franche, du sébaste atlantique et du flétan du Groenland dans les relevés au chalut par NR comme approximation des effets de l'ensemble du champ prédateur sur la crevette nordique. La morue franche, le flétan du Groenland et le sébaste ont été choisis comme principales mesures, car ces espèces ont été échantillonnées de façon uniforme tout au long de la période d'évaluation, ont montré des changements démographiques à grande échelle et sont facilement identifiables. Par conséquent, les prises du relevé de la NSRF sont les plus susceptibles d'être comparables aux prises automnales des NR. Il est à noter que l'effet partiel de la morue franche est beaucoup plus fort (~10x) que l'effet partiel des autres prédateurs, ce qui indique que la morue franche a un effet considérable et disproportionné sur l'abondance des crevettes. L'effet important de la morue franche sur l'abondance des crevettes a également été observé en Islande (Björnsson *et al.* 2017). Cependant, on sait qu'un large éventail d'espèces de poissons de fond se nourrissent de crevettes, et bon nombre de ces espèces fluctuent sur des échelles temporelles différentes de celles de ces trois espèces (Pedersen *et al.* 2017). De plus, le modèle de production excédentaire suppose que la mortalité instantanée de la crevette dépend de façon linéaire de l'abondance des prédateurs et de l'abondance de la crevette, ce qui ne tient pas compte du potentiel de satiété des prédateurs lorsque la densité de la crevette est élevée localement, ou de réduction des taux de prédation à de très faibles densités de crevettes en raison des effets de refuge ou d'autres mécanismes (Walters et Martell 2004).

C'est une explication possible de la raison pour laquelle le modèle prédit une abondance beaucoup plus faible de crevettes nordiques que les relevés antérieurs indiquent en 1990, car les niveaux de morue franche ont peut-être encore été très élevés pendant cette période. Si les niveaux de prédateurs augmentent considérablement, il est recommandé de tester de nouvelles réponses fonctionnelles pour empêcher le modèle de prévoir des taux de croissance négatifs constants de la population. Un projet de recherche en cours au MPO porte sur l'estimation de la variation spatiale des taux de prédation de plusieurs espèces de poisson de fond sur la crevette nordique dans toutes les eaux canadiennes de l'Atlantique. Cette recherche est toujours en cours, mais les résultats pourraient être intégrés aux futurs modèles d'évaluation de ces stocks et à l'élaboration de nouvelles réponses fonctionnelles de la prédation.

Cette modélisation n'inclut pas non plus les effets d'autres prédateurs de la crevette nordique, comme les mammifères marins. Des recherches précédentes ont relevé que les phoques du Groenland s'attaquent à la crevette nordique (bien que la crevette rayée soit généralement une proie plus commune; Parsons, 2005). Il est peu probable que la prédation par les phoques du Groenland ait été la principale cause du déclin des abondances de crevettes, car les abondances de phoques augmentaient en même temps que les populations de crevettes dans les années 1980 et 1990, et s'étaient largement stabilisées avant le début du déclin de la crevette nordique dans les ZPC 6 et 7 (DFO 2014). Toutefois, les fluctuations du nombre de phoques du Groenland et d'autres mammifères marins prédateurs pourraient entraîner des modifications des stocks de crevettes nordiques à l'avenir, à mesure que les conditions environnementales continuent de changer. L'abondance plus élevée de phoques à l'heure actuelle comparativement aux années 1980 pourrait signifier que la biomasse à l'équilibre de la crevette pourrait être inférieure à ce qu'elle était dans les années 1980 si les prédateurs du poisson de fond augmentaient jusqu'à leurs abondances précédentes.

Déplacements des crevettes larvaires et adultes entre les régions

Les simulations de dispersion pour les quatre régions indiquent qu'il devrait y avoir un transport important des larves des ZPC 4 et 5 à la ZPC 6, et des ZPC 6 à la ZPC 7. Toutefois, l'indice de recrutement utilisé dans les modèles de production excédentaire présentait un rendement prévisionnel médiocre par rapport à d'autres indicateurs écosystémiques. Plusieurs facteurs peuvent en être la cause :

1. Les modèles de croissance actuels ne tiennent compte que de la croissance totale de la population, plutôt que de suivre explicitement les cohortes de recrues; par conséquent, les effets du recrutement peuvent être masqués par d'autres changements affectant la structure des stocks de crevettes. Les travaux en cours sur l'élaboration de modèles écosystémiques structurés selon la longueur pour ces stocks pourraient améliorer l'ajustement de cet indice.
2. L'inadaptation de cet indice peut être le résultat du manque d'estimations de la biomasse des populations en amont de la ZPC 4. Le modèle de recrutement actuel ne tient pas compte des populations au nord de la ZPC 4 et, par conséquent, sous-estime probablement le nombre de recrues disponibles pour les ZPC 4 et 5.
3. Il peut y avoir un décalage entre l'emplacement des stocks de crevettes nordiques au moment du relevé et l'emplacement des populations lorsque les femelles libèrent leurs œufs. On sait que les crevettes nordiques effectuent des déplacements saisonniers, mais l'ampleur et le moment de ces déplacements dans les ZPC 4 à 7 sont mal compris.
4. Cela peut représenter un mauvais ajustement du modèle, où les tendances simulées de dispersion des larves ne correspondent pas aux trajectoires de dispersion réelles.

Au-delà de la dispersion des larves, on sait très peu de choses sur les déplacements à petite échelle (d'une cellule à l'autre) des crevettes post-larvaires, que ce soit par des migrations saisonnières ou par des déplacements de dispersion. Le potentiel de déplacement post-larvaire est actuellement implicitement inclus dans les modèles de lissage spatial pour la densité de population, car la pénalisation du champ aléatoire de Markov dans le lissage implique que les changements de densité de population dans une cellule devraient prédire les changements dans les cellules avoisinantes. Cependant, des travaux beaucoup plus poussés sont nécessaires pour comprendre le déplacement post-larvaire dans ces stocks.

Le modèle de prévision élaboré dans le présent rapport n'inclut pas explicitement la connectivité interrégionale. La connectivité pourrait être incluse dans le modèle s'il pouvait être démontré que la surexploitation dans les ZPC 4 et 5 entraîne des effets en aval sur les taux de croissance dans les ZPC 6 et 7. Toutefois, à l'heure actuelle, il n'y a que peu de données probantes qui indiquent que le recrutement en amont limite les taux de croissance de la population.

Facteurs écosystémiques dans les ZPC 4 et 5

Le modèle de production excédentaire proposé est le plus précis pour prédire la dynamique de la biomasse dans les ZPC 6 et 7, où les abondances de poissons de fond observées sont les plus élevées. Les ZPC 4 et 5 ont montré plusieurs années de déclin de la biomasse qui ne sont pas prévues par le modèle, y compris des baisses importantes au cours des dernières années (2016 à 2018). Cependant, les causes de ces déclins ne sont pas bien connues. Il est nécessaire de poursuivre les recherches sur les conditions environnementales qui affectent ces stocks.

ORIENTATIONS FUTURES DE L'ÉLABORATION DU MODÈLE

Le modèle de prévision élaboré dans le présent rapport ne doit pas être considéré comme un outil final, mais plutôt comme la première version d'un ensemble de modèles de prévision à élaborer au fil du temps. Comme il a été mentionné précédemment, il existe encore des questions importantes sur la façon d'inclure les effets écosystémiques importants connus, comme les déplacements des larves ou des adultes, et les effets de prédation non linéaires. De plus, le modèle actuel ne comprend aucun effet ascendant (c.-à-d. nourriture, abri ou maladie) sur la production de crevettes nordiques, sauf l'effet implicite du climat par l'entremise de l'indice de l'oscillation nord-atlantique. Bien que l'indice de l'oscillation nord-atlantique soit fortement prédictif du climat de l'océan Atlantique Nord (Chelliah et Bell 2004), il ne s'agit toujours pas d'une mesure directe des conditions climatiques actuelles qui peuvent avoir une incidence sur la production de crevettes.

Ce modèle pourrait être amélioré au moyen de plusieurs techniques. La première serait d'inclure la structure de taille de la crevette nordique, comme cela a été fait dans le golfe du Maine (Cao *et al.* 2016b; Hunter *et al.* 2018). Cela permettrait de modéliser explicitement la dynamique du recrutement spatial et les effets selon la taille de la pression de la pêche sur la productivité des stocks. Comme la structure de taille de la crevette nordique dans les ZPC 4 et 7 est demeurée stable au cours des deux dernières décennies, il pourrait être difficile de paramétrer les termes de mortalité et de croissance selon la taille requis pour ce type de modèle en l'absence d'hypothèses antérieures très solides sur la dynamique de croissance.

La deuxième façon de développer ce modèle serait d'inclure des estimations explicites de la consommation des prédateurs fondées sur les données sur le régime alimentaire des prédateurs actuellement recueillies dans le cadre du relevé au chalut. Cela nécessiterait une estimation de la quantité de biomasse consommée par les prédateurs par unité de temps, et un modèle de réponse fonctionnel qui peut prédire comment cette quantité varierait avec la densité des prédateurs et des proies.

RÉFÉRENCES CITÉES

- Barraquand, F., and D.J. Murrell. 2013. Scaling up predator–prey dynamics using spatial moment equations. *Meth. Ecol. Evol.* 4(3):276-289.
- Björnsson, B., Burgos, J.M., Sólmundsson, J., Ragnarsson, S.Á., Jónsdóttir, I.G., and U. Skúladóttir. 2017. Effects of cod and haddock abundance on the distribution and abundance of northern shrimp. *Mari. Ecol. Prog. Ser.* 572:209-221.
- Blangiardo, M., and M. Cameletti. 2015. *Spatial and spatio-temporal Bayesian models with R - INLA*. John Wiley & Sons, West Sussex, UK.
- Brodie, W. 1996. A Description of the 1995 Fall Groundfish Survey in Division 2J3KLMNO. NAFO SCR Doc 27: N2700.
- Brosset, P., Bourdages, H., Blais, M., Scarratt, M., Plourde, S., and Handling Editor: Emory Anderson. 2018. Local environment affecting northern shrimp recruitment: A comparative study of Gulf of St. Lawrence stocks. *ICES J. Mar. Sci.* fsy185-fsy185.
- Cao, J., Chen, Y., and R.A. Richards. 2016a. Improving assessment of *Pandalus* stocks using a seasonal, size-structured assessment model with environmental variables. Part II: Model evaluation and simulation. *Can. J. Fish. Aqua. Sci.* 74(3):363-376.

-
- Cao, J., Chen, Y., and R.A. Richards. 2016b. Improving assessment of *Pandalus* stocks using a seasonal, size-structured assessment model with environmental variables. Part I: Model description and application. *Can. J. Fish. Aqua. Sci.* 74(3):349-362.
- Carruthers, E.H., Parlee, C.E., Keenan, R., and P. Foley. P. 2019. Onshore benefits from fishing: Tracking value from the northern shrimp fishery to communities in Newfoundland and Labrador. *Marine Policy* 103:130-137.
- Chelliah, M., and G.D. Bell. 2004. Tropical multidecadal and interannual climate variability in the NCEP–NCAR reanalysis. *J. Clim.* 17(9):1777-1803.
- Colbourne, E., Holden, J., Snook, S., Han, G., Lewis, S., Senciall, D., Bailey, W., Higdon, J., and N. Chen. 2017. Physical oceanographic conditions on the Newfoundland and Labrador shelf during 2016. NAFO SCR Doc. 2017/079.
- DFO. 2009. [Proceedings of the precautionary approach workshop on Canadian shrimp and prawn stocks and fisheries; November 26-27, 2008](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Proceed. Ser. 2008/031.
- Efron, B. 1982. The jackknife, the bootstrap and other resampling plans. Society for Industrial; Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA.
- Evans, G., Parsons, D., Veitch, P., and D. Orr. 2000. A local-influence method of estimating biomass from trawl surveys, with Monte Carlo confidence intervals. *J. North. Atl. Fish. Sci.* 27:133-138.
- Fortin, M.-J., and M.R.T. Dale. 2005. Spatial analysis: A guide for ecologists. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hamilton, L.C., Brown, B.C., and R.O. Rasmussen. 2003. West Greenland's cod-to-shrimp transition: Local dimensions of climatic change. *Arctic* 56(3):271-282.
- Hunter, M., Whitmore, K., Atwood, R., Richards, A., Miller, A., Drew, K., and M. Ware. 2018. Assessment report for Gulf of Maine Northern Shrimp-2018. Northern Shrimp Technical Committee Stock Assessment Report, Atlantic States Marine Fisheries Commission.
- Hvingel, C., and M.C. Kingsley. 2006. A framework to model shrimp (*Pandalus borealis*) stock dynamics and to quantify the risk associated with alternative management options, using Bayesian methods. *ICES J. Mar. Sci.* 63(1):68-82.
- Jorde, P.E., Søvik, G., Westgaard, J.-I., Orr, D., Han, G., Stansbury, D., and K.E. Jørstad. 2015. Genetic population structure of northern shrimp, *Pandalus borealis*, in the Northwest Atlantic: adaptation to different temperatures as an isolation factor. *Mole. Ecol.* 24(8):1742-1757.
- Lecomte, J.-B., Benoît, H.P., Ancelet, S., Etienne, M.-P., Bel, L., and E. Parent. 2013. Compound Poisson-gamma vs. Delta-gamma to handle zero-inflated continuous data under a variable sampling volume. *Meth. Ecol. Evol.* 4(12):1159-1166.
- Le Corre, N., Pepin, P., Han, G., Ma, Z., and P.V.R. Snelgrove. 2019. Assessing connectivity patterns among management units of the Newfoundland and Labrador shrimp population. *Fish. Ocean.* 28(2):183-202.
- Le Corre, N., Pepin, P., Burmeister, A., Walkusz, W., Skanes, K., Wang, Z., Brickman, D., and P.V.R. Snelgrove. 2020. Larval connectivity of northern shrimp (*Pandalus borealis*) in the Northwest Atlantic. *Can. J. Fish. Aqua. Sci.* 77(8):1332-1347.
-

-
- Lilly, G.R., Parsons, D.G., and D.W. Kulka. 2000. Was the increase in shrimp biomass on the northeast Newfoundland shelf a consequence of a release in predation pressure from cod? *J. North. Atl. Fish. Sci.* 27:45-62.
- Marra, G., and S.N. Wood. 2012. Coverage properties of confidence intervals for generalized additive model components. *Scand. J. Stat.* 39(1):53-74.
- McCallum, B., and S. Walsh. 1996. Groundfish survey trawls used at the Northwest Atlantic Fisheries Centre, 1971-present. NAFO SCR Doc. 96/50.
- MPO. 2014. [État de la population de phoques du Groenland \(*Pagophilus groenlandicus*\) du Nord-Ouest de l'Atlantique](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2014/011
- MPO. 2017. [Examen des points de référence utilisés dans l'approche de précaution pour la crevette nordique \(*Pandalus borealis*\) dans la zone de pêche à la crevette 6](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Rép. des Sci. 2017/009.
- MPO. 2018a. [Évaluation du stock de morue du Nord \(divisions 2J3KL de l'OPANO\) en 2018](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Avis sci. 2018/038. (Erratum : Août 2018)
- MPO. 2018b. [Annexe J – Plan de rétablissement de la crevette nordique ZPC 6](#).
- MPO. 2018c. [Crevette nordique et crevette ésope – Zones de pêche à la crevette \(ZPC\) 0, 1, 4-7, zones d'évaluation est et ouest et division 3M de l'Organisation des pêches de l'Atlantique Nord-Ouest \(OPANO\)](#).
- MPO. 2019. [Évaluation de la crevette nordique \(*Pandalus borealis*\) dans les zones de pêche à la crevette 4 à 6 et de la crevette ésope \(*Pandalus montagui*\) dans la zone de pêche à la crevette 4 en 2018](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2019/027.
- Parsons, D.G. 1982. Biological characteristics of northern shrimp (*Pandalus borealis* Kroyer) in areas off Labrador. Master's thesis, Memorial University, St. John's, NL, Canada.
- Parsons, D.G. 2005. Predators of northern shrimp, *Pandalus borealis* (Pandalidae), throughout the North Atlantic. *Mar. Bio. Res.* 1(1):48-58.
- Pebesma, E. 2018. Simple features for R: Standardized support for spatial vector data. *The R Journal*.
- Pedersen, E.J., Thompson, P.L., Ball, R.A., Fortin, M.-J., Gouhier, T.C., Link, H., Moritz, C., Nenzen, H., Stanley, R.R.E., Taranu, Z.E., Gonzalez, A., Guichard, F., and P. Pepin. 2017. Signatures of the collapse and incipient recovery of an overexploited marine ecosystem. *Royal Society Open Science* 4(7).
- Pepin, P., Maillet, G., Fraser, S., Doyle, G., Robar, A., Shears, T., and G. Redmond. 2017. [Optical, chemical, and biological oceanographic conditions on the Newfoundland and Labrador Shelf during 2014-2015](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2017/009.
- Power, D., Ings, D., Rideout, R., and B.P. Healey. 2016. Performance and description of Canadian multi-species bottom trawl surveys in NAFO Subarea 2 + Divisions 3KLMNO, with emphasis on 2014-2015. NAFO SCR Doc. 16/28.
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rideout, R., and D. Ings. 2018. Temporal and spatial coverage of Canadian (Newfoundland and Labrador Region) spring and autumn multi-species RV bottom trawl surveys, with an emphasis on surveys conducted in 2017. NAFO SCR Doc. 18/017.
- Rose, G.A., and S. Rowe. 2015. Northern cod comeback. *Can. J. Fish. Aqua. Sci.* 1789-1798.

-
- Shumway, S.E., Perkins, H.C., Schick, D.F., and A.P. Stickney. 1985. Synopsis of biological data on the pink shrimp, *Pandalus borealis* Kroyer, 1838. NOAA Technical Report.
- Tamdrari, H., Benoît, H.P., Hanson, J.M., Bourdages, H., and J.C. Brêthes. 2018. Environmental associations and assemblage structure of shrimp species in the Gulf of St. Lawrence (Canada) following dramatic increases in abundance. *Mar. Ecol. Prog. Se.* 596:95-112.
- Walters, C.J., and S.J.D. Martell. 2004. Fisheries ecology and management. Princeton University Press, Princeton, N.J., U.S.A.
- Wood, S.N. 2006a. Low-rank scale-invariant tensor product smooths for generalized additive mixed models. *Biometrics* 62(4): 1025-1036.
- Wood, S.N. 2006b. On confidence intervals for generalized additive models based on penalized regression splines. *Australian & New Zealand J. Stat.* 48(4):445-464.
- Wood, S.N. 2011. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *J. Roy. Stat. Soc. Series B (Statistical Methodology)* 73(1):3-36.
- Wood, S.N. 2017. Generalized Additive Models: An Introduction with R, 2nd Edition. *In* 2nd editions. CRC Press, Boca Raton, FL.

TABLEAUX

Tableau 1 : Qualité de l'ajustement hors échantillon (EMQ) pour quatre spécifications de modèle testées.

	Décalage- 1 (complet)	Décalage- 1 (simplifié)	Décalages pluriannuels	Décalage- 1 variant spatialement
Données de test avant le déclin (2006 à 2008)				
ZPC 4	0.70	0.69	0.84	0.77
ZPC 6	0.52	0.47	0.56	0.52
ZPC 7	0.52	0.51	0.63	0.57
Données de test après le déclin (2016 à 2018)				
ZPC 4	0.93	0.99	1.03	1.18
ZPC 5	0.61	0.60	0.68	0.64
ZPC 6	0.60	0.56	0.62	0.55
ZPC 7	0.80	0.82	0.73	0.79

Tableau 2 : Qualité d'ajustement hors échantillon à l'échelle de la ZPC (EMQ) pour les comparaisons de sensibilité du modèle.

	Prévision	Monospécifique	ONA d'hiver	Non spatial
Données d'entraînement				
ZPC 4	0.29	0.32	0.32	0.43
ZPC 5	0.27	0.24	0.28	0.30
ZPC 6	0.14	0.20	0.14	0.22
ZPC 7	0.38	0.47	0.41	0.52
Données de test (2006 à 2008, 2016 à 2018)				
ZPC 4	0.28	0.22	0.24	0.39
ZPC 5	0.33	0.28	0.31	0.37
ZPC 6	0.30	0.36	0.28	0.17
ZPC 7	0.55	0.57	0.54	0.36

FIGURES

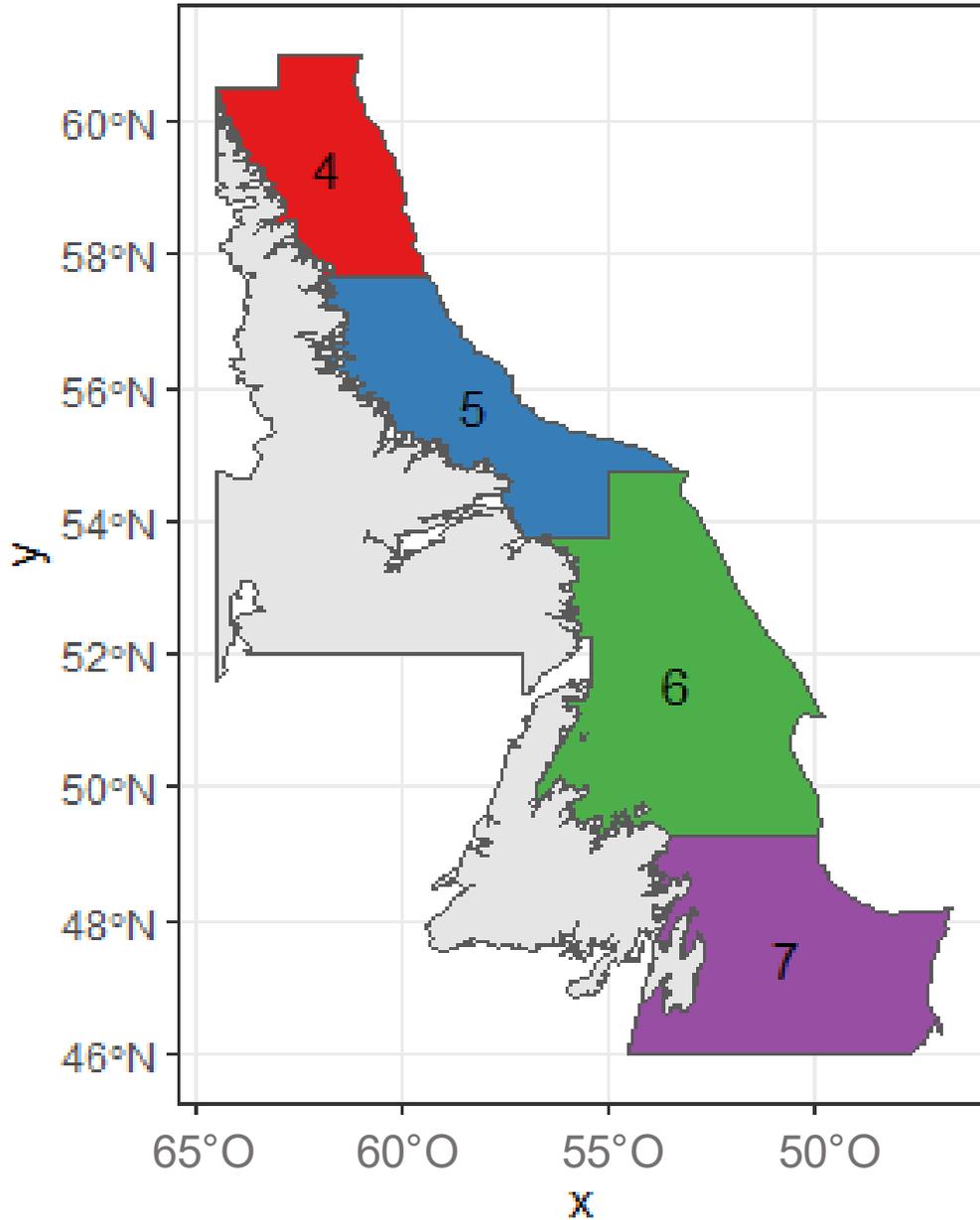


Figure 1 : Carte des zones de gestion de la crevette nordique sur les plateaux de Terre-Neuve-et-Labrador. La ZPC 7, sur les Grands Bancs, est incluse par souci de clarté, mais elle est gérée dans le cadre d'un plan de gestion distinct de l'OPANO.

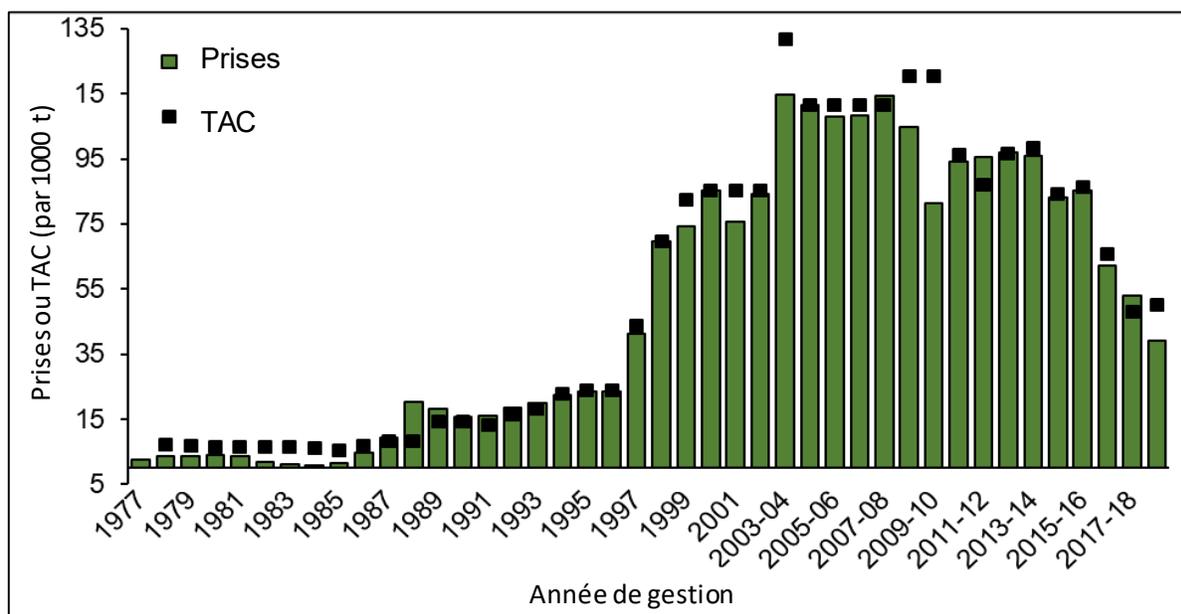


Figure 2 : Prises antérieures de crevette nordique et TAC (ZPC 4 à 6 combinées) pour la période de 1977 à 2018-2019. Les prises de 2018-2019 sont préliminaires en date du 7 février 2019.

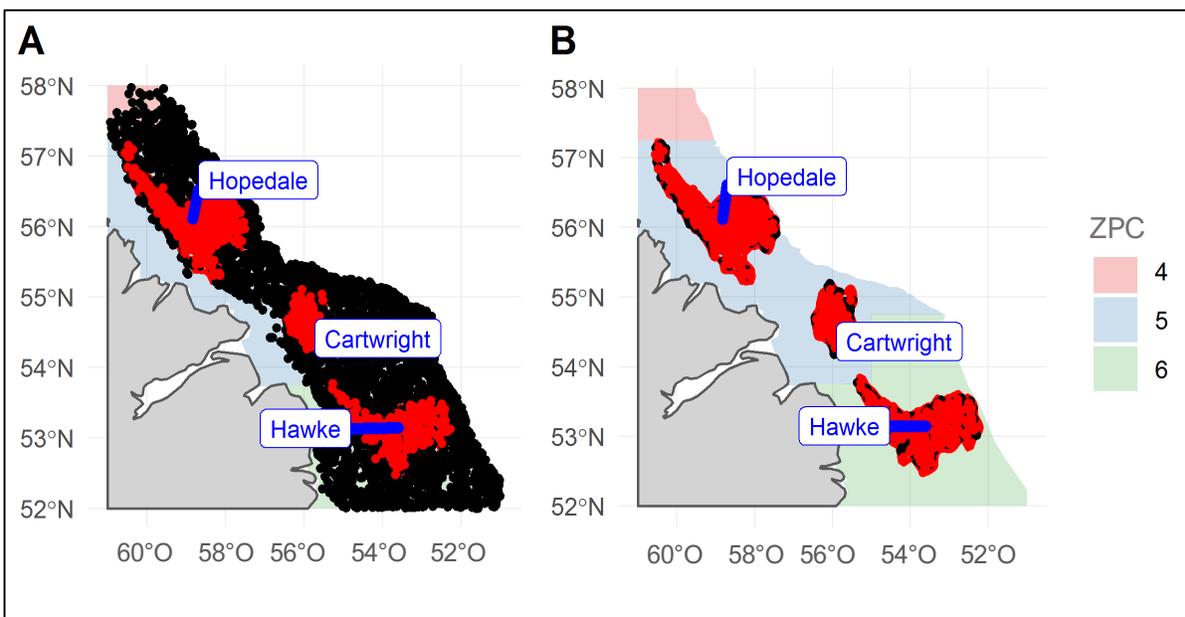


Figure 3 : A) Répartition des chalutages antérieurs et actuels par NR dans les trois chenaux et données historiques sur les relevés au chalut. B) Répartition des relevés par NR antérieurs et actuels appariés pour l'analyse comparative des séries chronologiques. Les points rouges indiquent les chalutages antérieurs, et les points noirs indiquent l'emplacement des chalutages à partir du relevé actuel par NR.

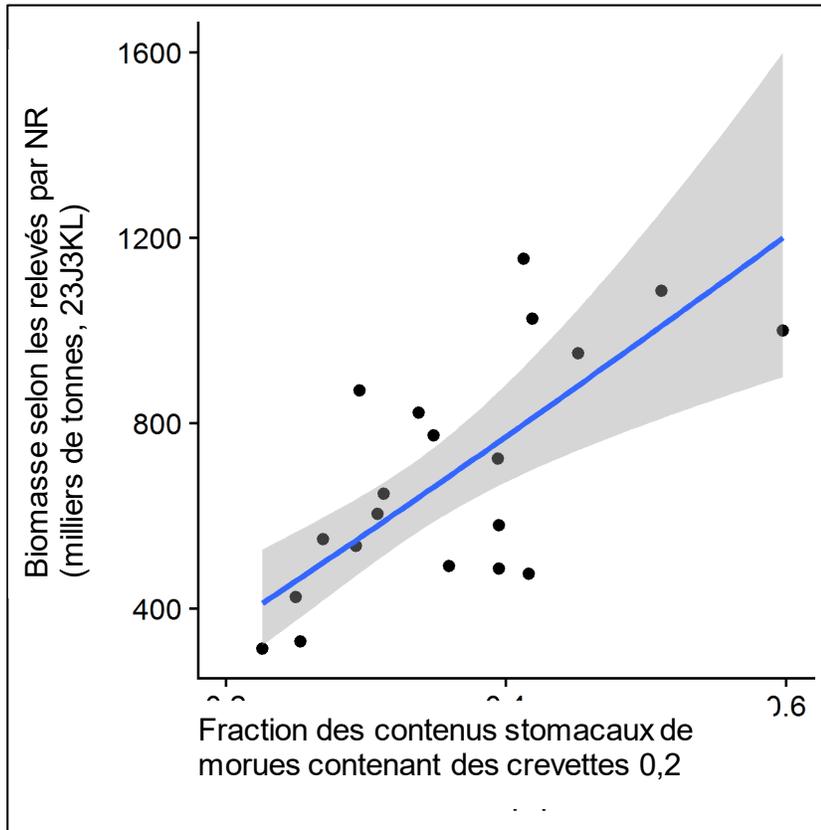


Figure 4 : Régression de la biomasse des relevés par NR de la crevette nordique dans la ZPC 6 sur la fraction du régime alimentaire de la morue franche avec présence de crevettes. La ligne bleue représente la relation estimée (régression du MLG de la biomasse sur la fraction de l'estomac, en supposant une biomasse distribuée par Tweedie). La bande grise indique un IC de 95 % pour la relation de régression.

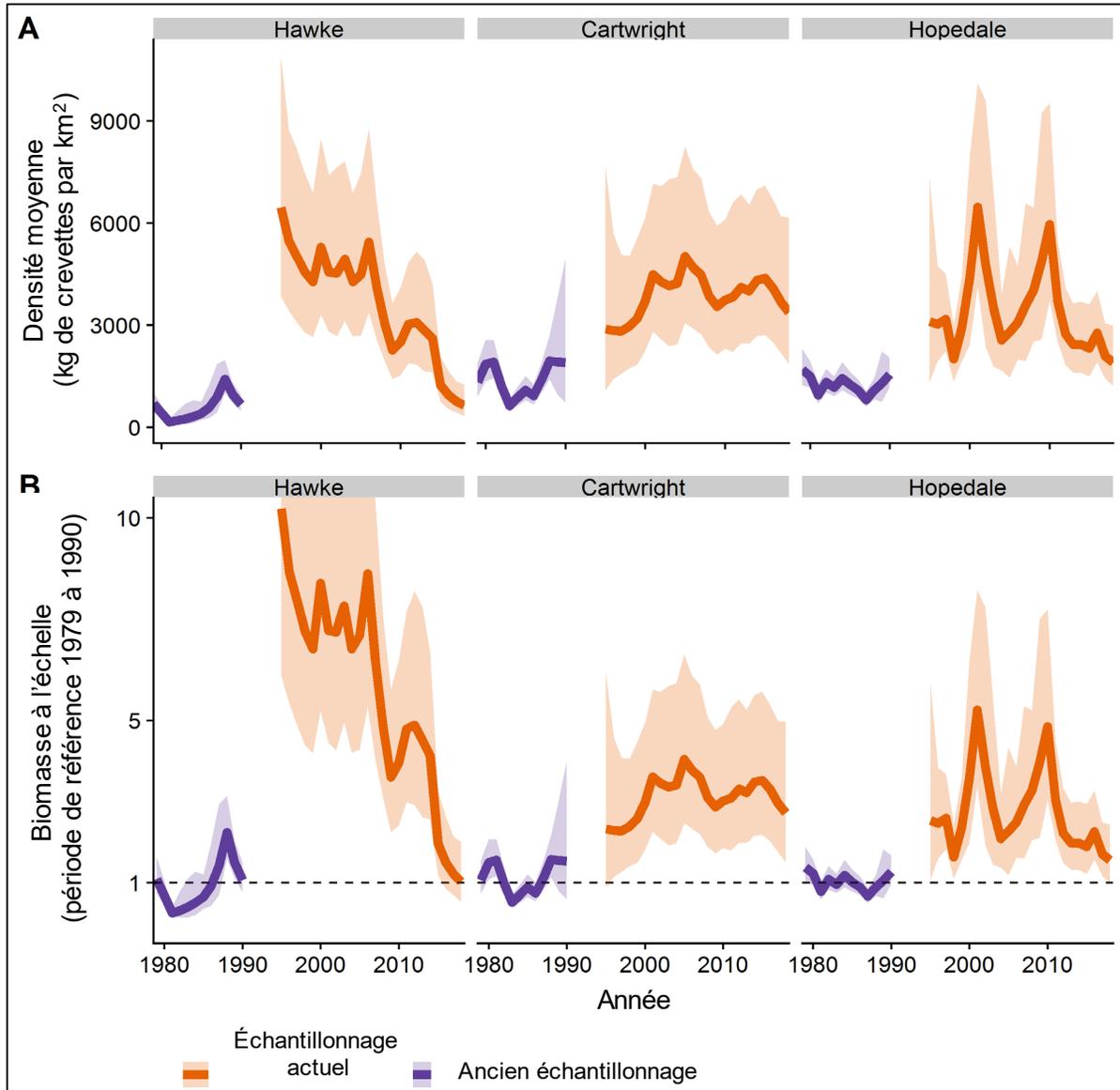


Figure 5 : Série chronologique de la densité estimée de la crevette nordique dans trois chenaux focaux avant et après le début du relevé plurispécifique par NR, fondée sur des relevés au chalut appariés. A) Densité estimée selon les régimes d'échantillonnage antérieurs (violet) et actuels (orange), avec des lignes indiquant la densité moyenne estimée et des rubans indiquant des IC à 95 %. B) Estimations de la densité à l'échelle pour déterminer l'ampleur du changement entre 1990 et 1995. Les séries chronologiques ont été mises à l'échelle en divisant toutes les observations par la valeur moyenne de 1980 à 1990. La ligne pointillée indique le niveau de référence.

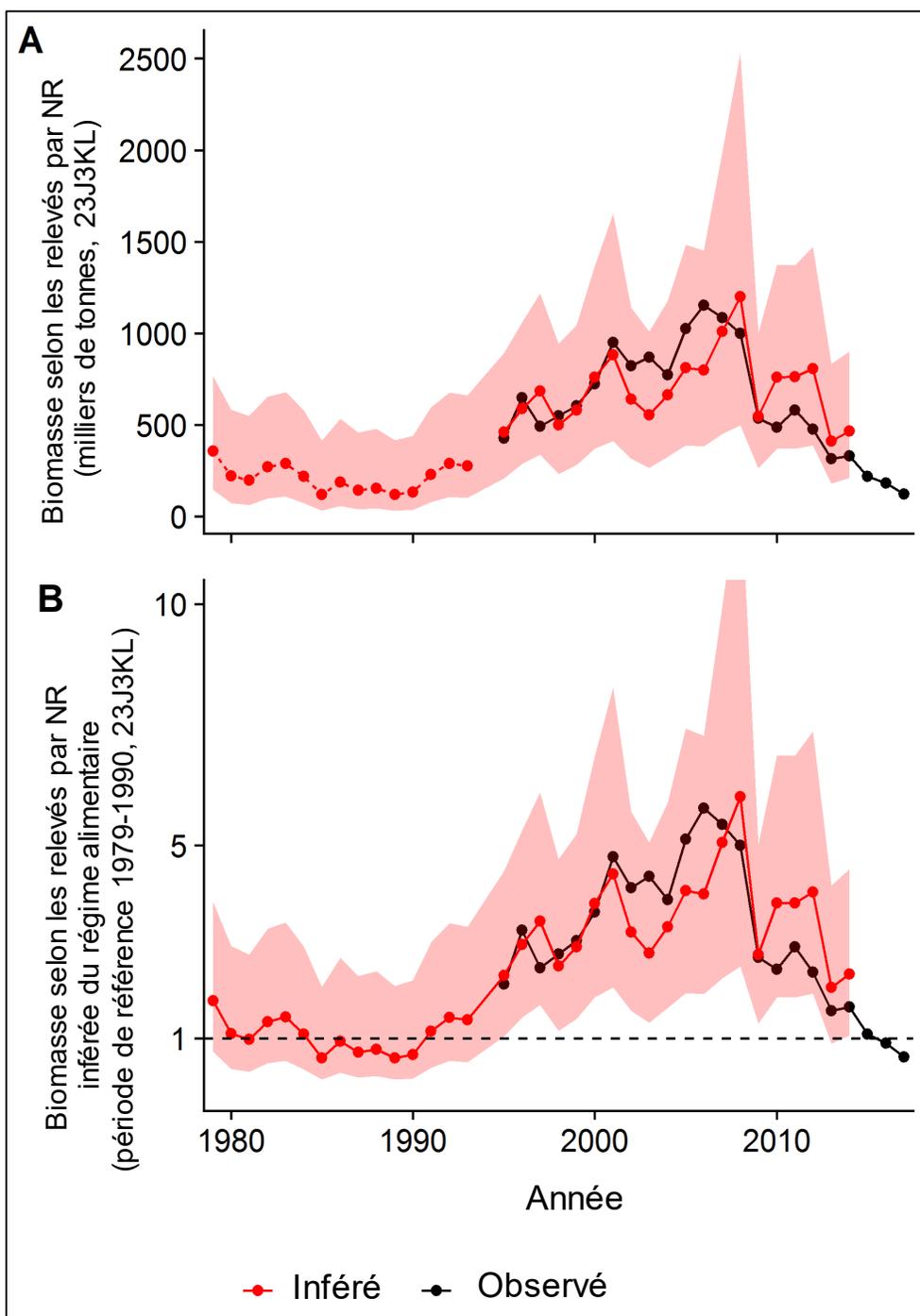


Figure 6 : Série chronologique de la densité estimée de la crevette nordique dans la ZPC 6 avant et après le début du relevé par NR, fondée sur la biomasse déduite du régime alimentaire de la morue. A) Biomasse des relevés par NR observée (noir) et biomasse déduite du régime alimentaire (rouge), avec une ligne indiquant la moyenne de la relation inférée et le ruban illustrant l'IC à 95 %. La ligne pointillée indique les points où aucune estimation de la biomasse des relevés par NR de plusieurs espèces n'était disponible. B) Estimations de la biomasse à l'échelle du régime alimentaire pour déterminer l'ampleur du changement entre 1990 et 1995. Les séries chronologiques ont été mises à l'échelle en divisant toutes les observations en A) par leur valeur moyenne de 1980 à 1990.

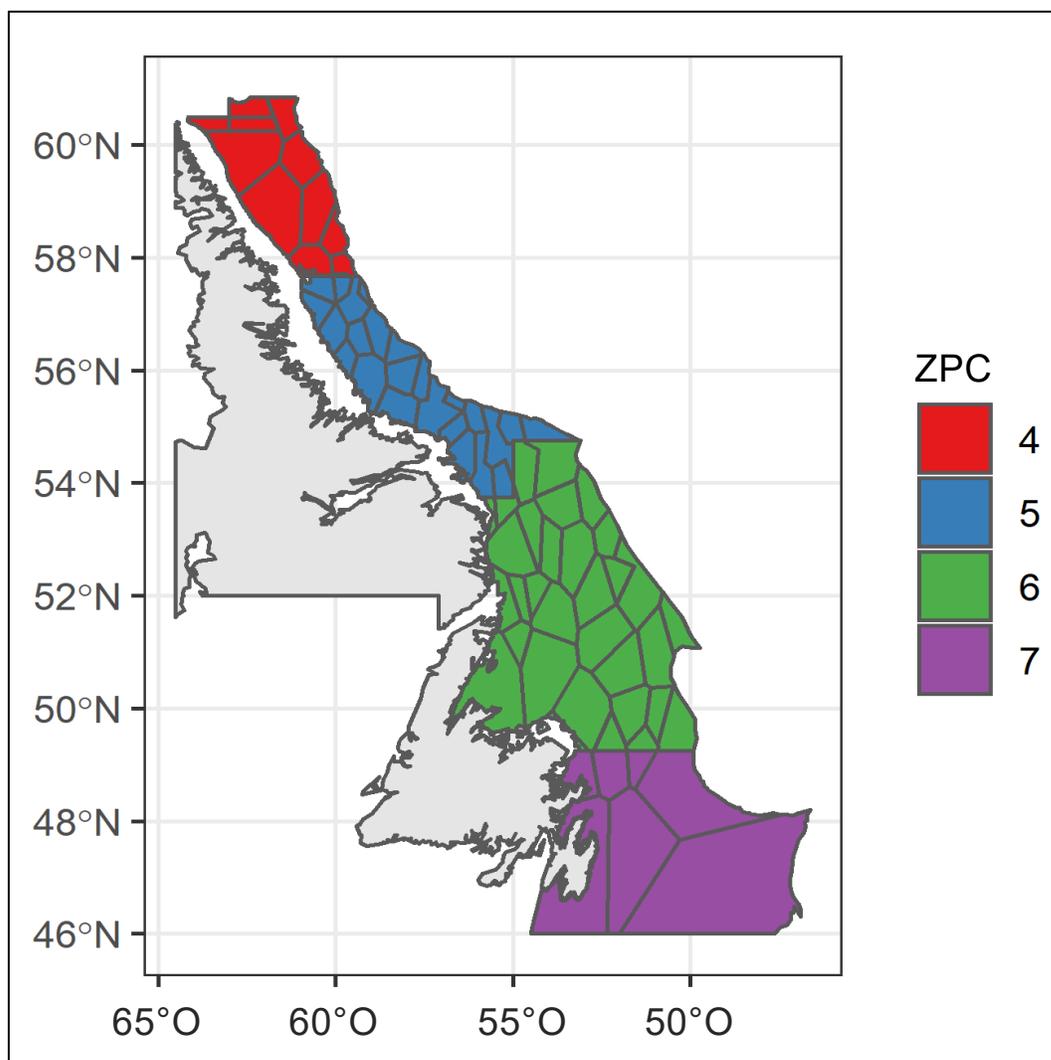


Figure 7 : Cellules basées sur le diagramme de Voronoï utilisé pour les analyses structurées spatialement, colorées par ZPC.

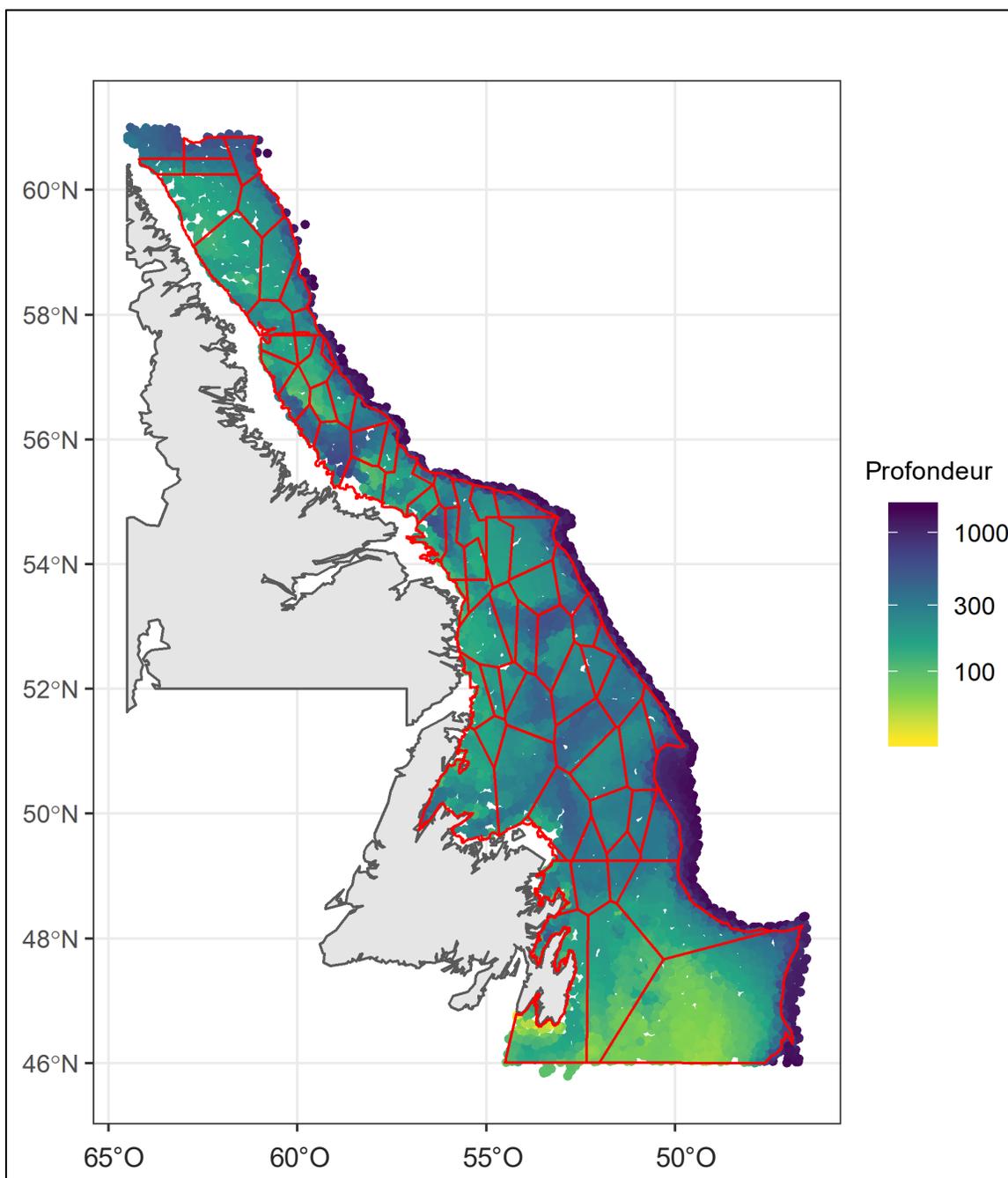


Figure 8 : Cellules du diagramme de Voronoï avec répartition de la profondeur du chalut. Les lignes rouges indiquent les limites de la cellule. Les couleurs représentent les profondeurs du chalut, les jaunes correspondant aux profondeurs les plus faibles et les bleus aux plus grandes (veuillez noter que l'échelle des couleurs de profondeur est logarithmique pour mieux illustrer les contrastes). Les couleurs couvrent tous les emplacements des relevés par NR de 1995 à 2016, y compris les données des relevés estivaux.

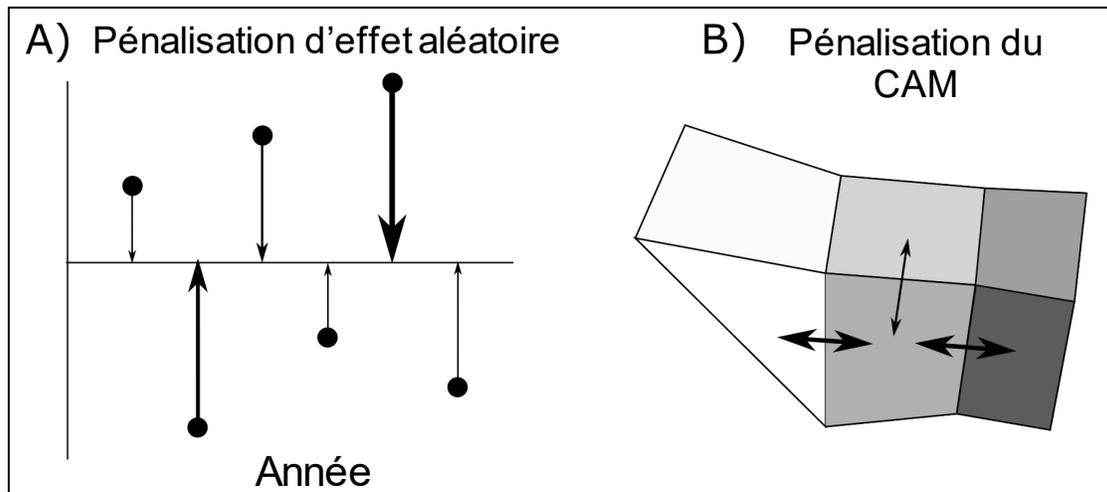


Figure 9 : Illustration de la façon dont les termes de pénalisation concourent à lisser les estimations les unes par rapport aux autres. Pour (A) un effet de lissage aléatoire, tous les coefficients sont pénalisés vers la moyenne globale; la taille de la flèche indique la force de la pénalisation appliquée à chaque coefficient. (B) Pour les pénalisations du CAM, tous les termes sont pénalisés par rapport à la moyenne de leurs voisins immédiats; par exemple, les estimations vers le polygone gris moyen inférieur (où la couleur indique la valeur du paramètre ajusté) seraient pénalisées par rapport à ses trois polygones adjacents, indiqués par des flèches; la pénalisation sera plus forte pour les voisins à gauche et à droite dont la valeur diffère fortement de celle du polygone central, par rapport au polygone au-dessus de celui du centre qui a une valeur très similaire. Ces voisins seraient également pénalisés symétriquement par rapport au polygone gris, ainsi qu'à leurs autres voisins immédiats.

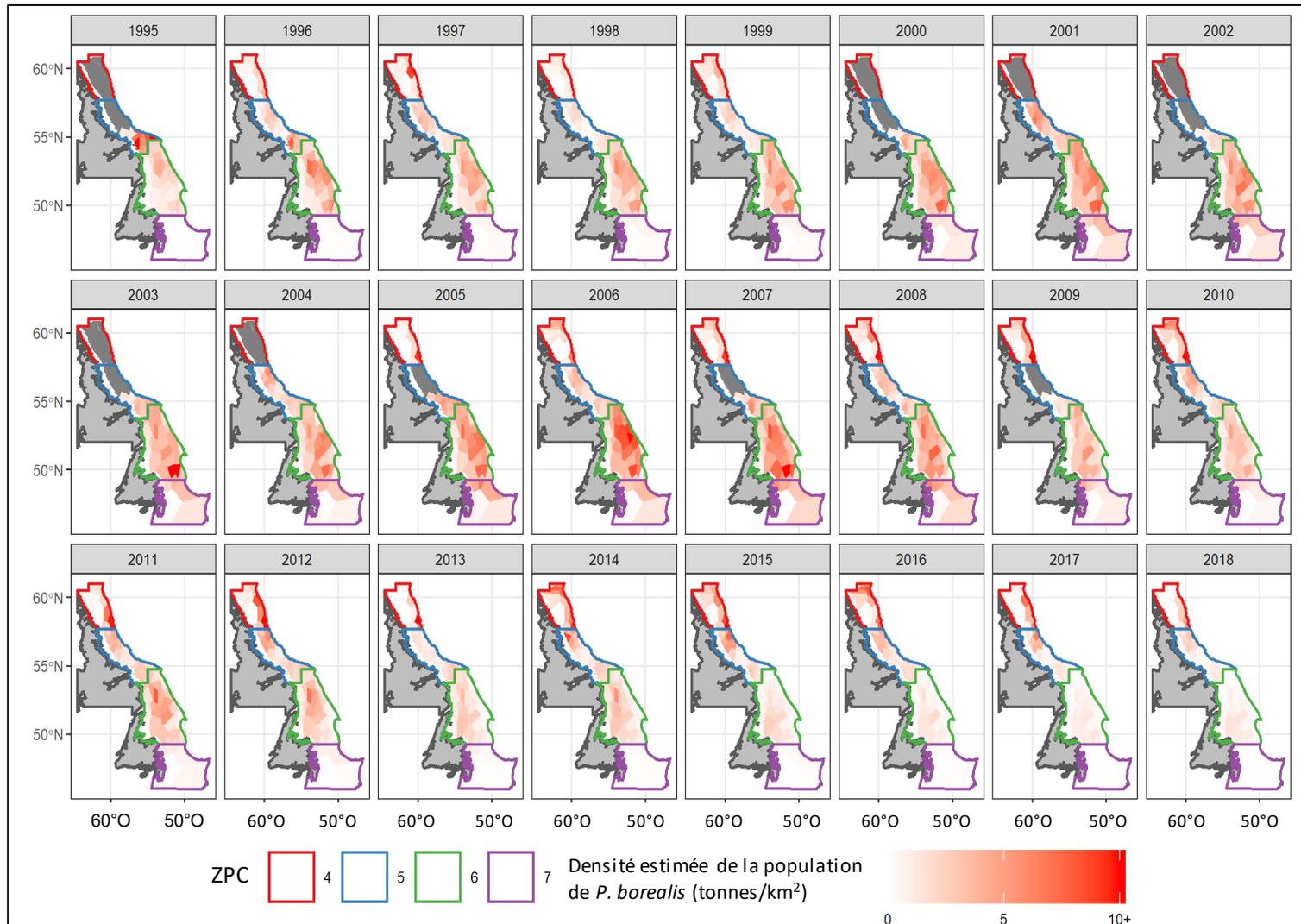


Figure 10 : Répartition spatiale de la densité de la crevette nordique en tonnes par kilomètre carré; les couleurs plus foncées indiquent une densité plus faible et les couleurs plus claires indiquent des densités plus élevées. Les polygones gris foncé indiquent les zones où il manquait de données pour une année donnée.

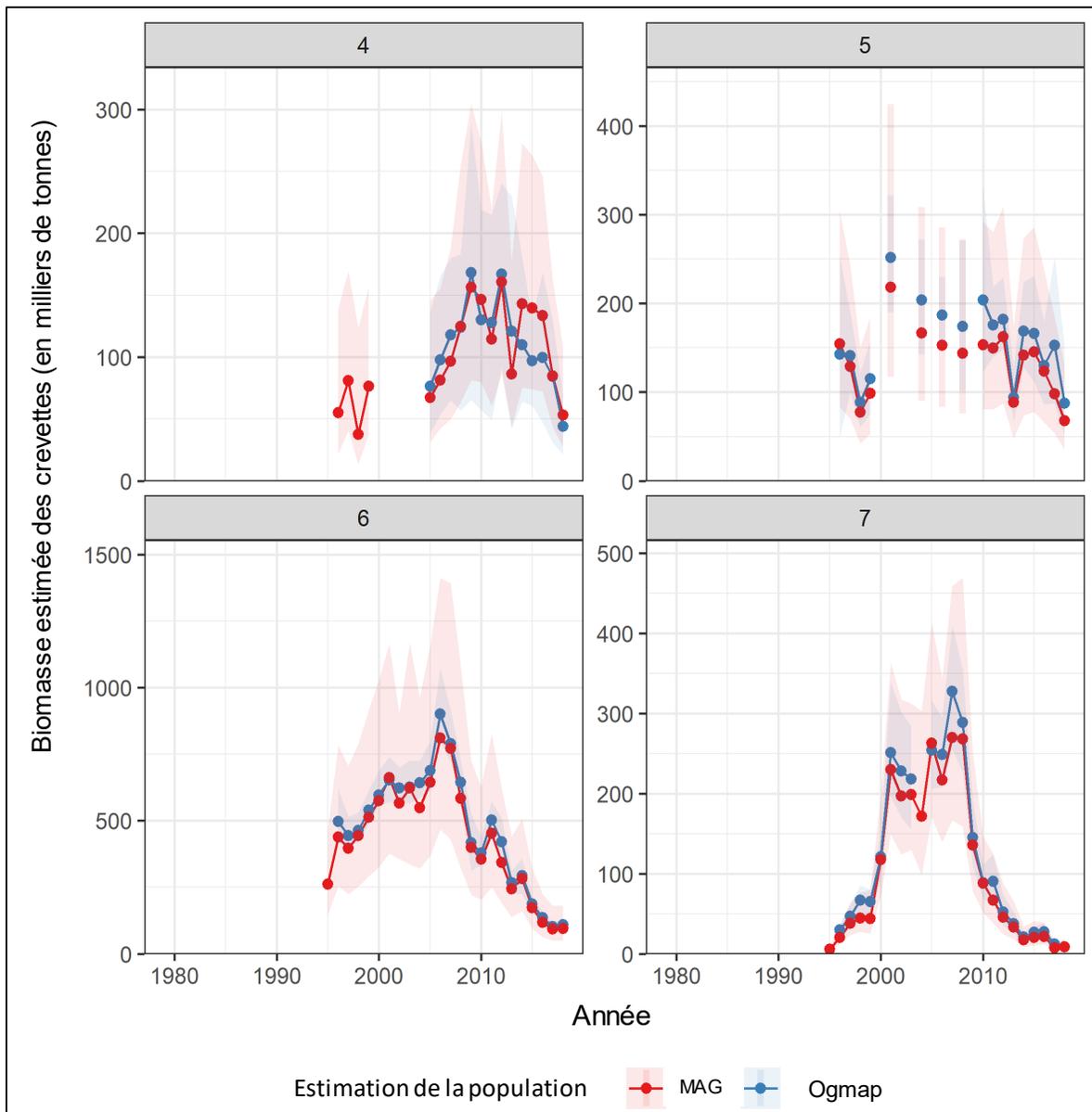


Figure 11 : Comparaison de la biomasse lissée par MAG par rapport aux estimations antérieures d'Ogmap. Les points et les lignes rouges indiquent les moyennes annuelles estimées par le MAG, et les points et les lignes bleus indiquent les estimations de l'approche actuelle d'estimation à l'aide de l'Ogmap. Les rubans colorés indiquent des IC à 95 % pour les deux méthodes.

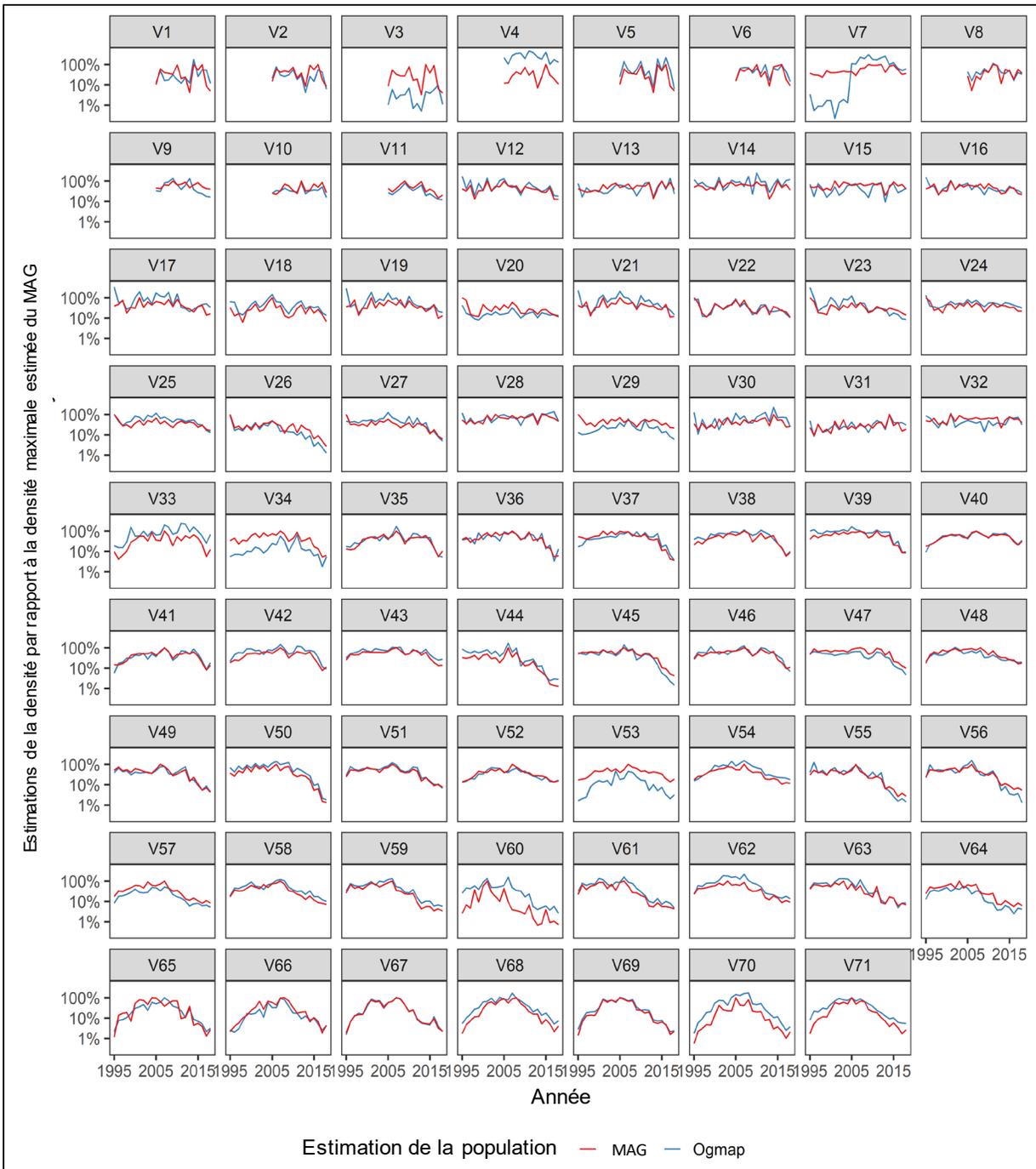


Figure 12 : Comparaison de la biomasse lissée par MAG par rapport aux estimations antérieures d'Ogmapp dans chaque cellule. Les lignes rouges indiquent les moyennes annuelles estimées par le MAG, et les lignes bleues indiquent les estimations de l'approche actuelle d'estimation à l'aide de l'Ogmapp. Toutes les estimations de densité ont été mises à l'échelle par l'estimation maximale de la biomasse pour cette cellule à partir de la méthode du MAG, afin de permettre des comparaisons plus faciles à l'intérieur de la cellule.

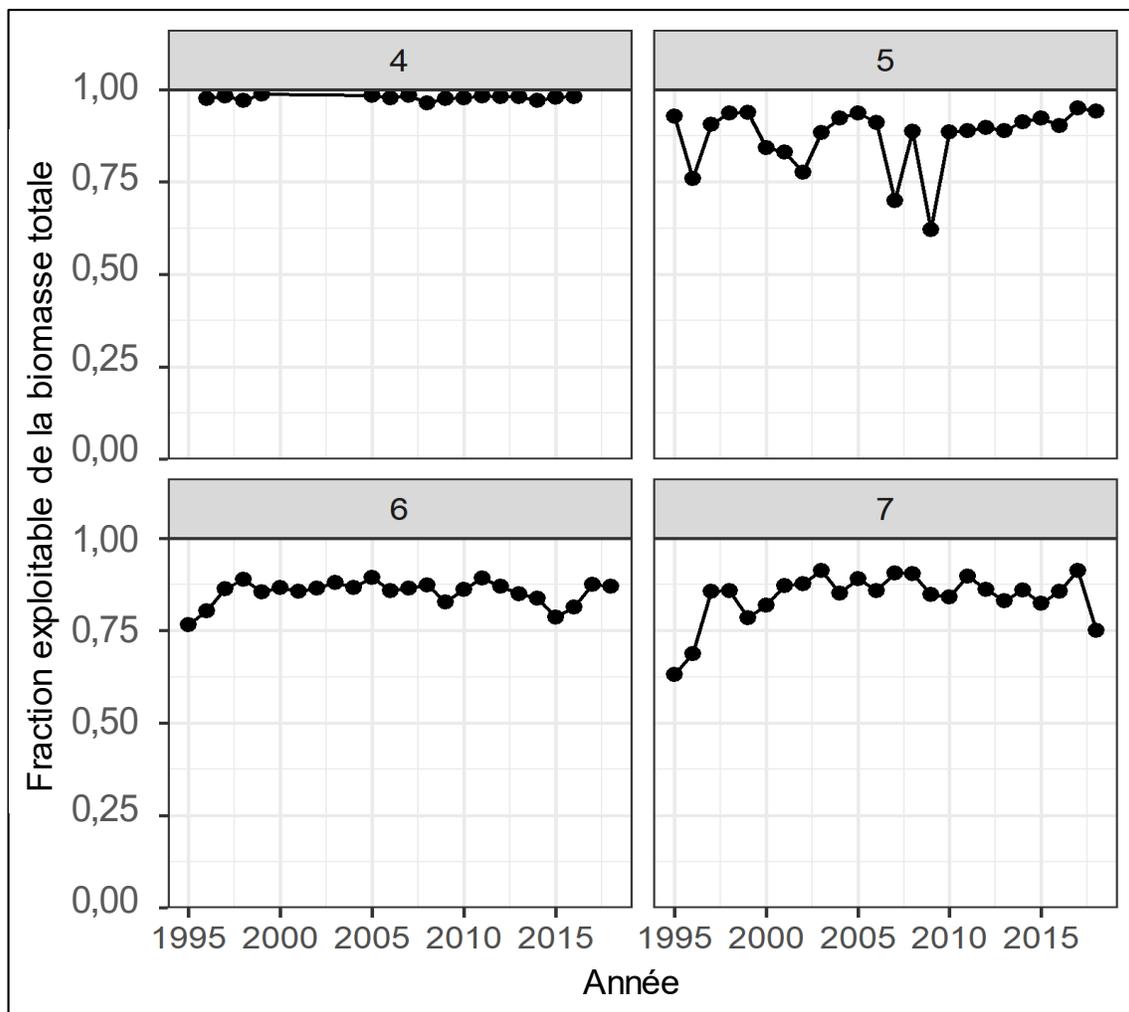


Figure 13 : Fraction de la biomasse totale dans chaque ZPC considérée comme étant de la biomasse exploitable (longueur de carapace >17 mm).

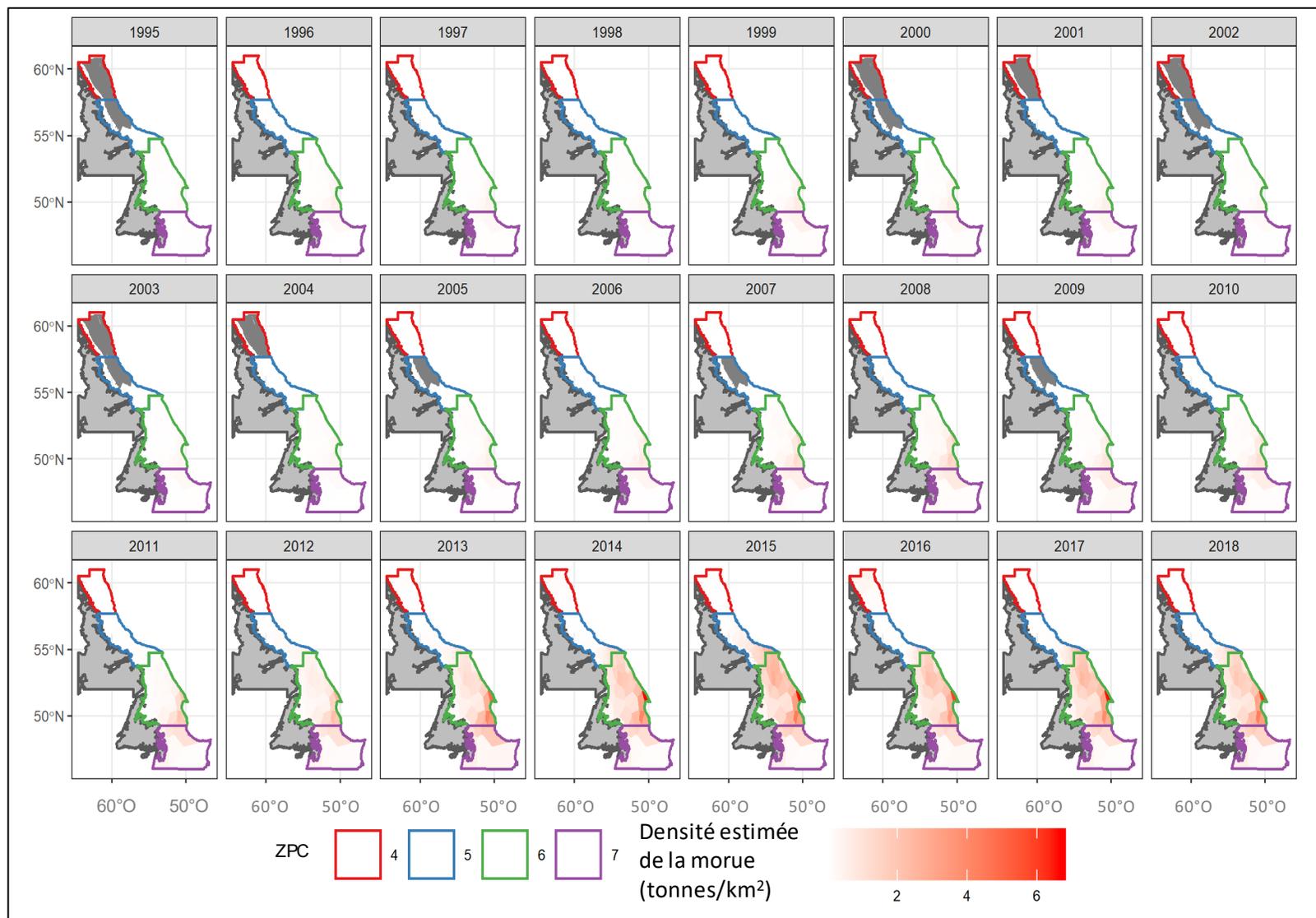


Figure 14 : Répartition spatiale de la densité de la morue franche (*Gadus morhua*) en tonnes par kilomètre carré; les couleurs plus foncées indiquent une densité plus faible et les couleurs plus claires indiquent des densités plus élevées. Les polygones gris foncé indiquent les zones où il manquait de données pour une année donnée.

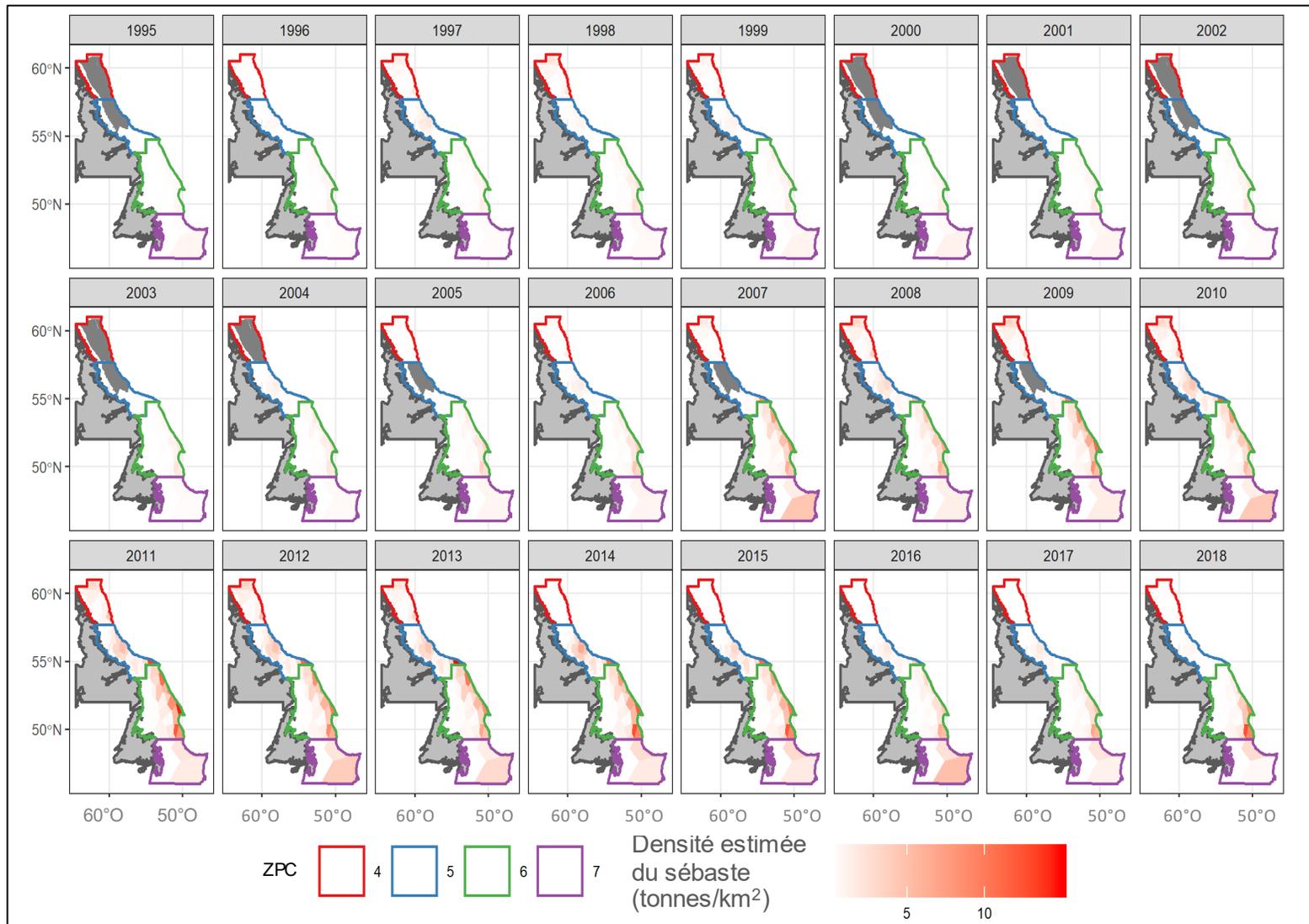


Figure 15 : Répartition spatiale de la densité du sébaste atlantique (*Sebastes mentella*) en tonnes par kilomètre carré; les couleurs plus foncées indiquent une densité plus faible et les couleurs plus claires indiquent des densités plus élevées. Les polygones gris foncé indiquent les zones où il manquait de données pour une année donnée.

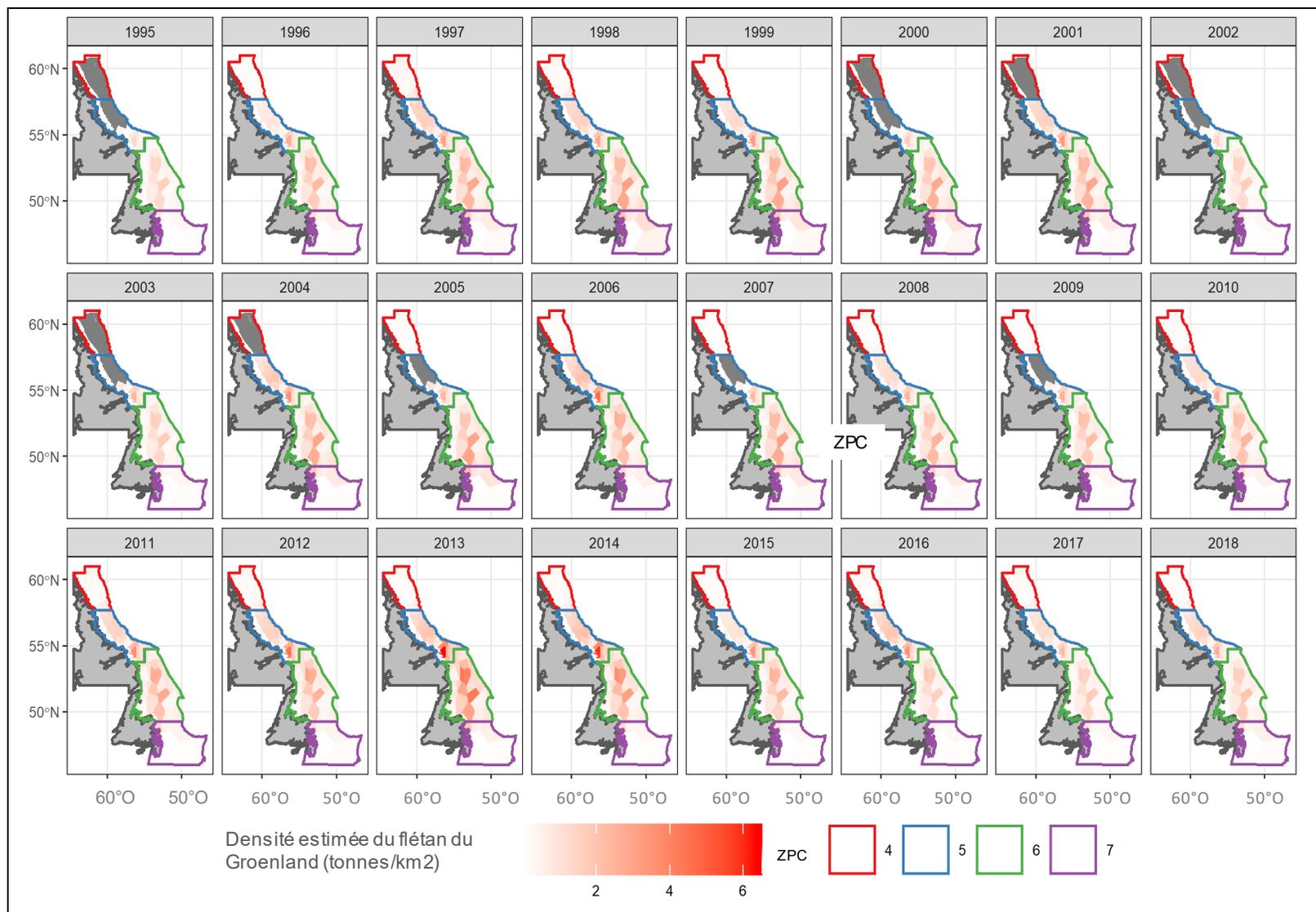


Figure 16 : Répartition spatiale de la densité du flétan du Groenland (*Reinhardtius hippoglossoides*) en tonnes par kilomètre carré; les couleurs plus foncées indiquent une densité plus faible et les couleurs plus claires indiquent des densités plus élevées. Les polygones gris foncé indiquent les zones où il manquait de données pour une année donnée.

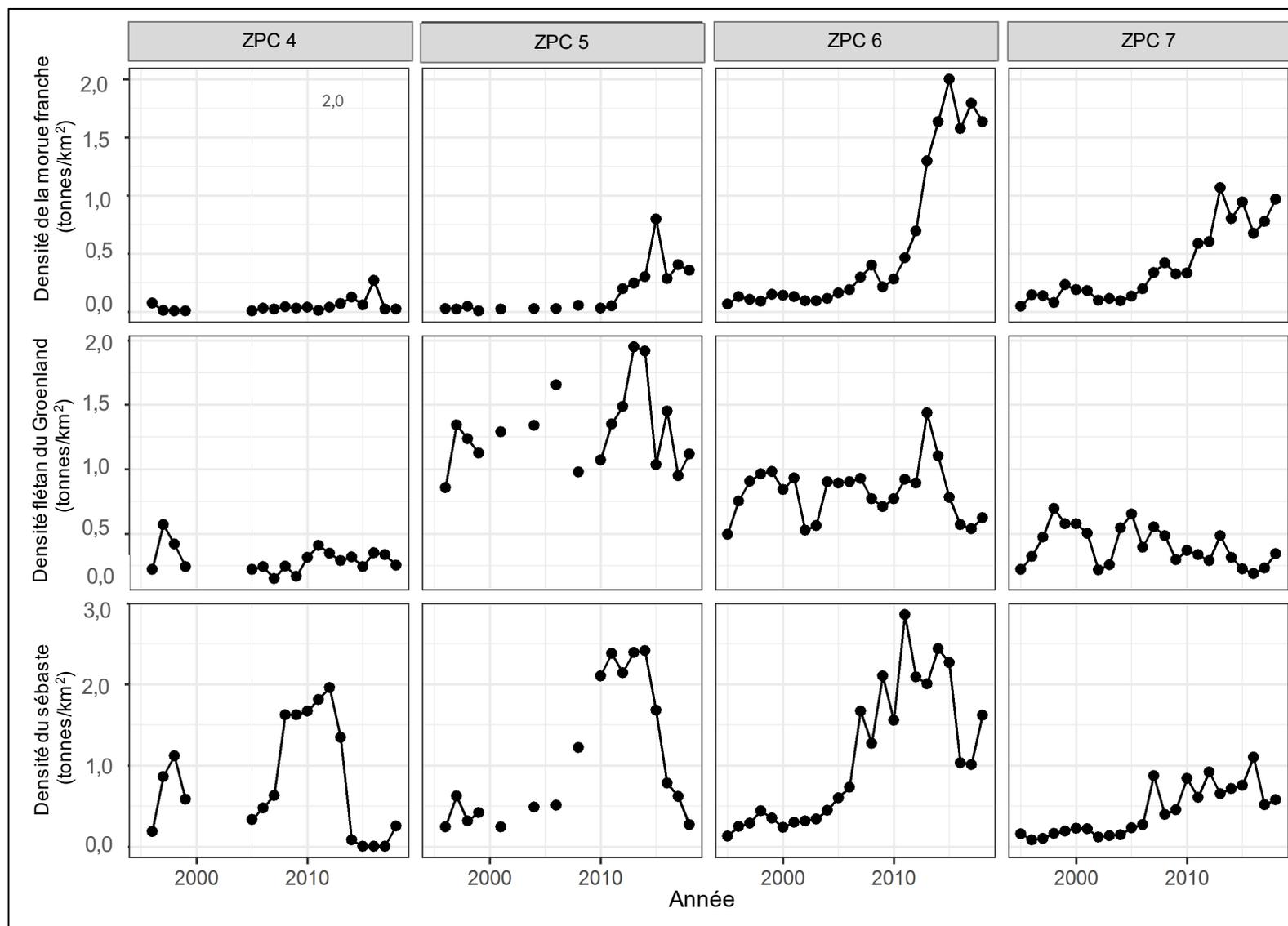


Figure 17 : Densités des prédateurs primaires (morue franche, sébaste et flétan du Groenland) dans chaque ZPC d'une année à l'autre, dont la moyenne est calculée sur l'ensemble des ajustements du modèle de régression spatiotemporelle correspondant à chaque espèce.

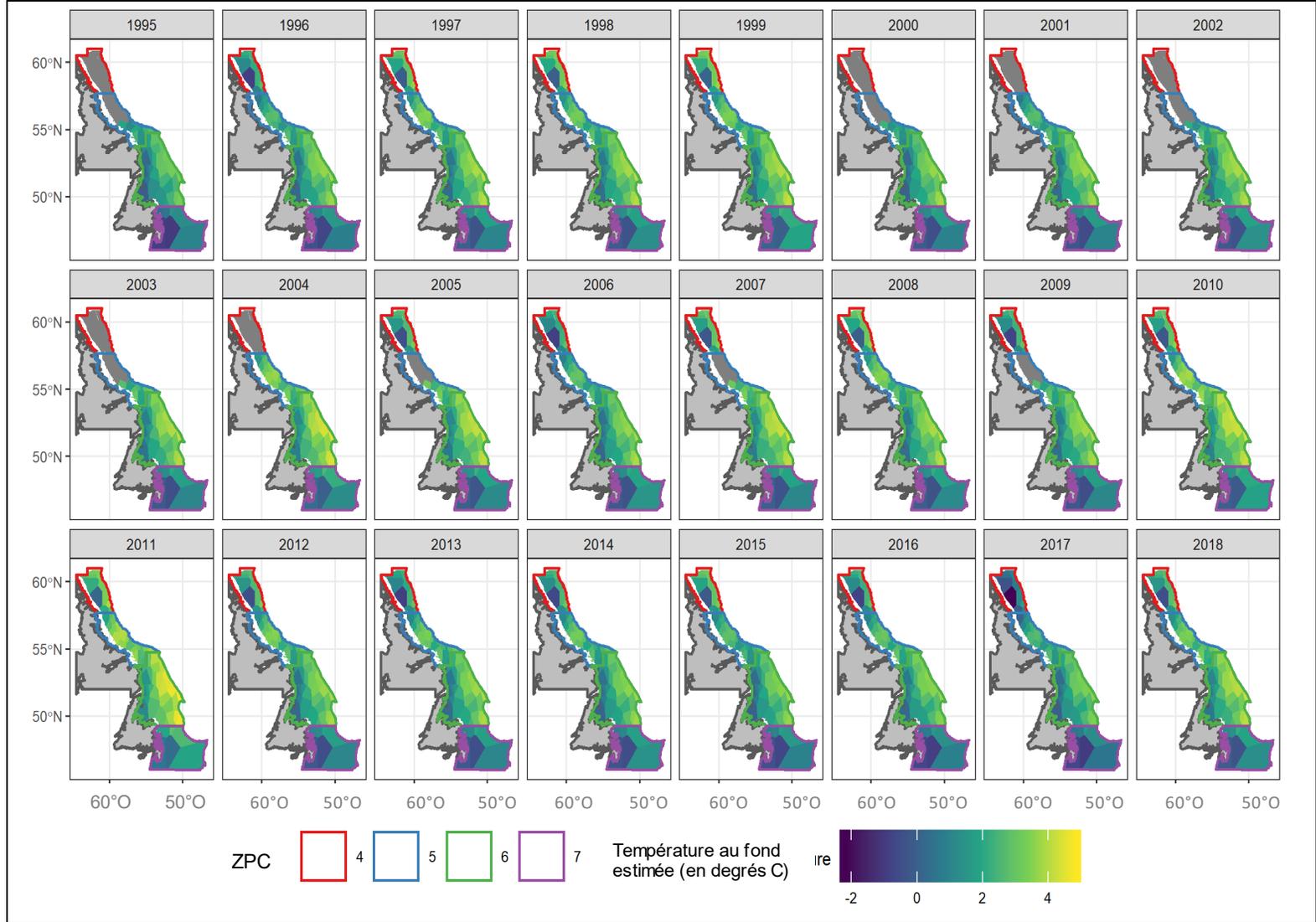


Figure 18 : Répartition spatiale de la température au fond en °C; les couleurs plus foncées indiquent une température plus basse et les couleurs plus claires indiquent des températures plus élevées. Les polygones gris foncé indiquent les zones où il manquait des données sur les chaluts pour une année donnée.

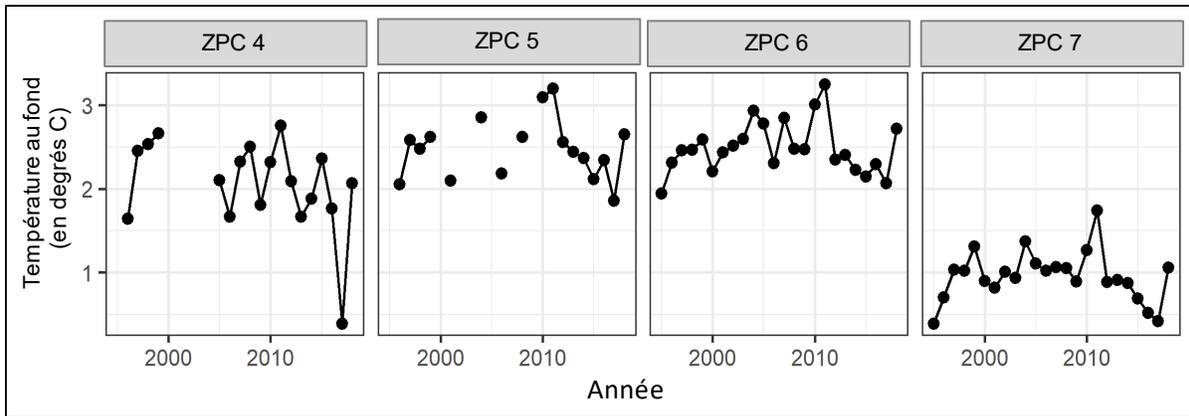


Figure 19 : Température au fond annuelle moyenne dans chaque ZPC, agrégée entre les cellules.

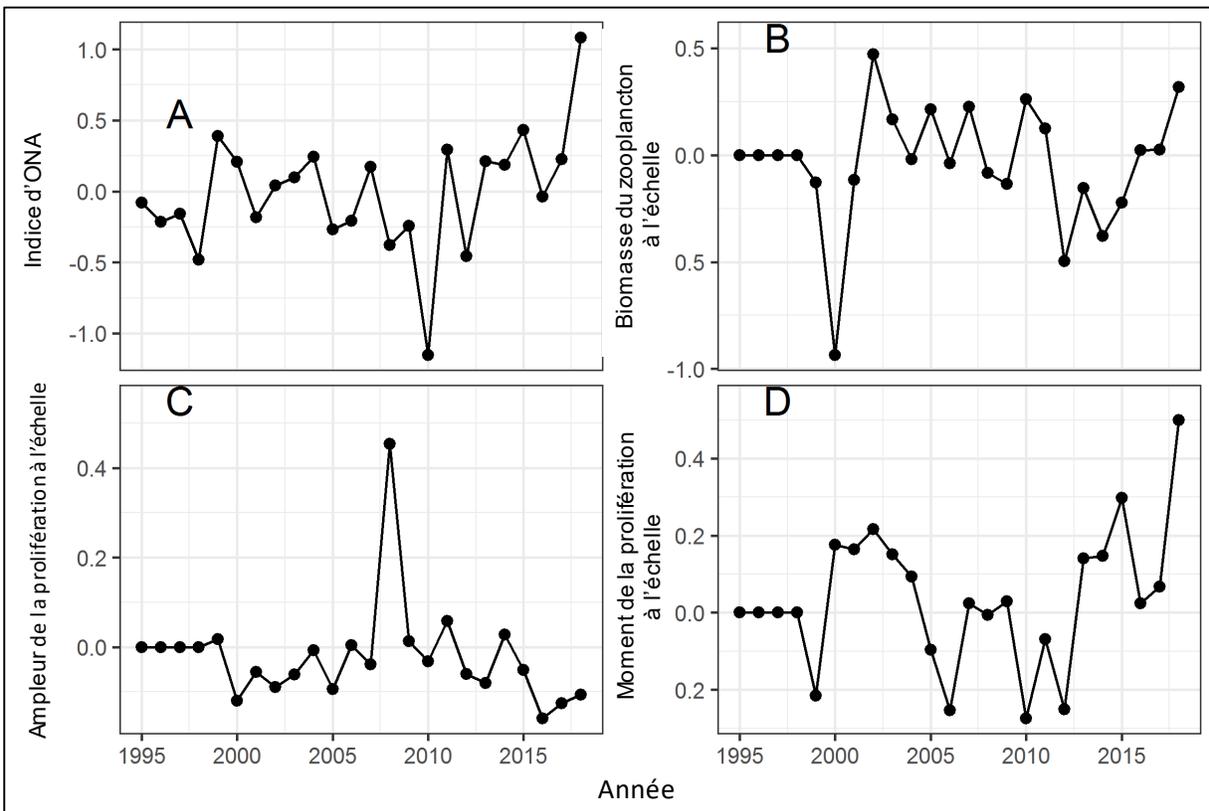


Figure 20 : Série chronologique moyenne annuelle de (A) l'indice d'ONA, (B) l'abondance du zooplancton à l'échelle, (C) l'ampleur de la prolifération de phytoplancton à l'échelle et (D) le moment d'apparition du phytoplancton à l'échelle.

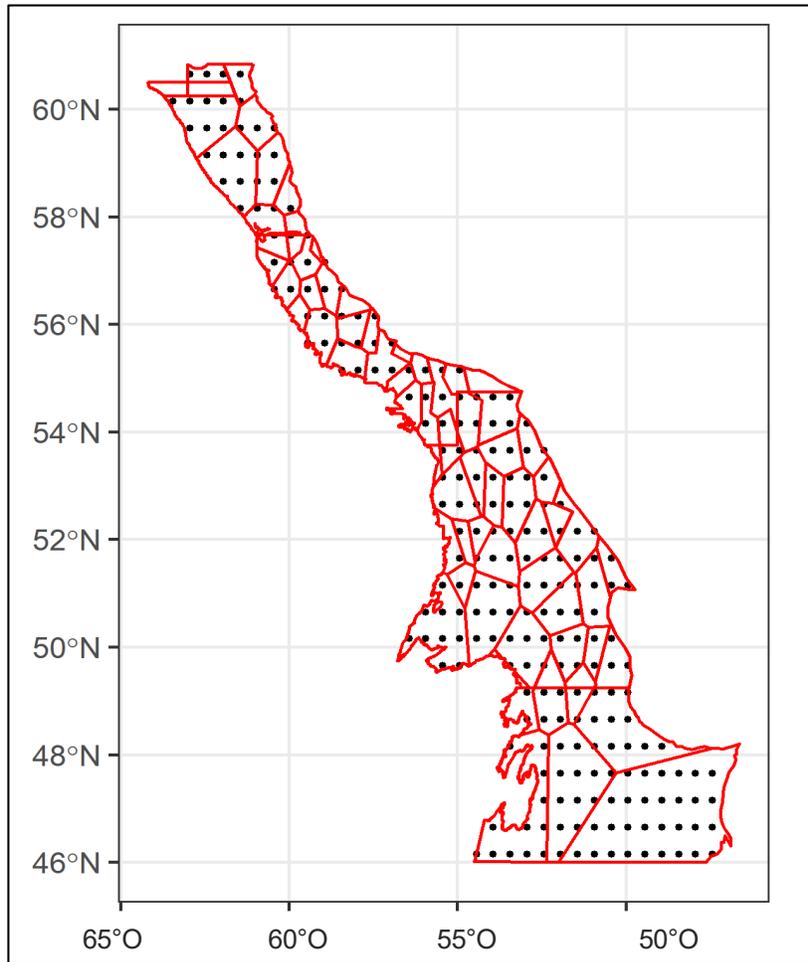


Figure 21 : Points de départ des simulations de la dérive des larves.

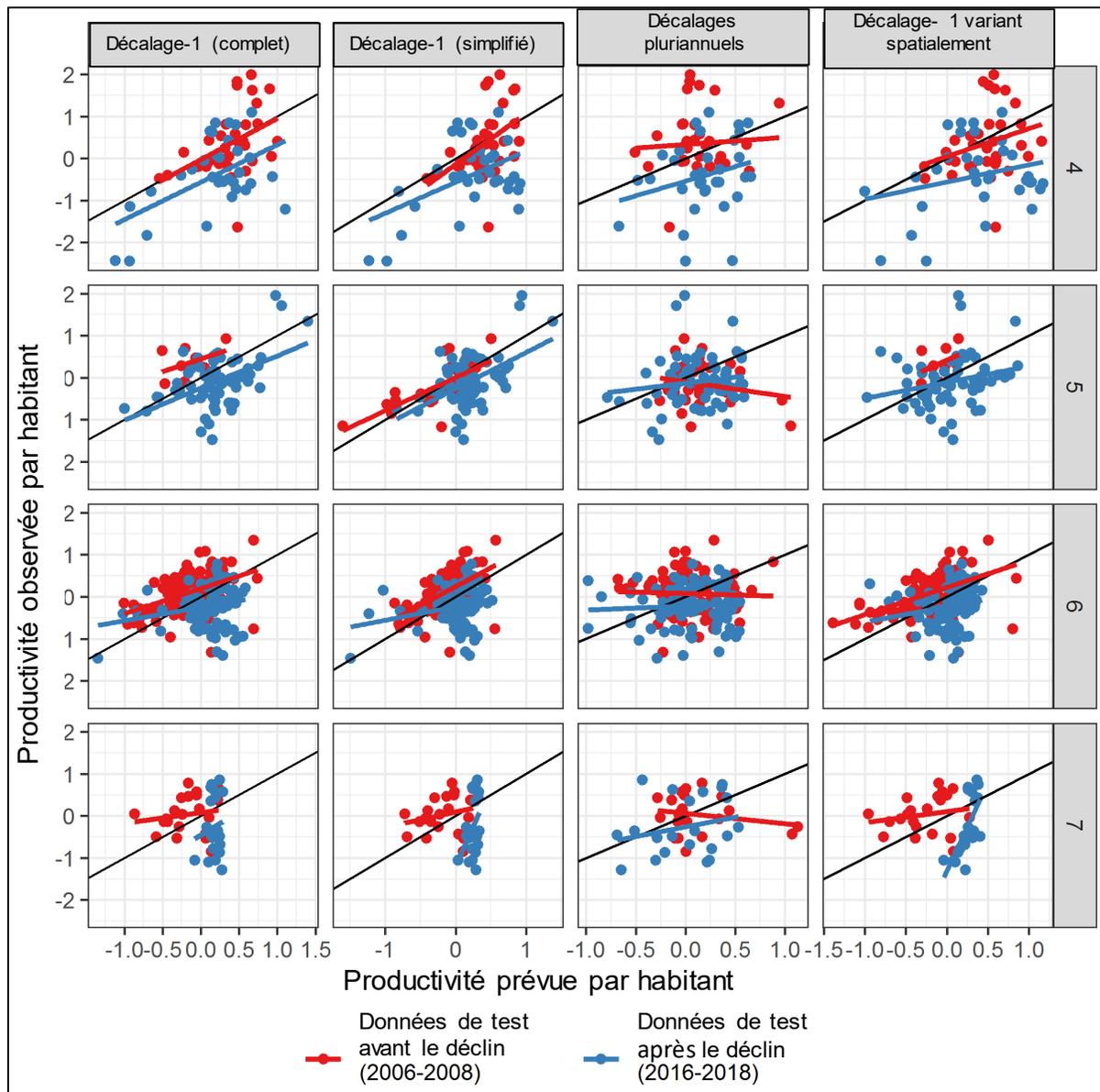


Figure 22 : Valeurs de productivité observées par cellule en années réservées aux tests du modèle, comparativement aux taux de productivité prévus. Si un modèle prédisait parfaitement les taux de croissance, tous les points se trouveraient sur la ligne d'égalité 1-1 (en noir). La variation autour de cette ligne indique une variation inexpliquée de la productivité. Les lignes de couleur représentent des régressions linéaires simples des valeurs observées sur les valeurs prédites, pour illustrer la relation réelle entre les taux de changement prévus et observés; les régressions linéaires plates correspondent à des modèles sans pouvoir prédictif, et les lignes de régression se produisant de façon constante au-dessus (au-dessous) de la ligne 1-1 indiquent des modèles qui prédisent constamment des taux de croissance inférieurs (supérieurs) aux taux de croissance observés. Les points et les lignes rouges indiquent les données de 2006 à 2008, avant les déclin importants de la crevette nordique. Les points et les lignes bleus indiquent les données de 2016 à 2018, après les déclin importants de la crevette nordique.

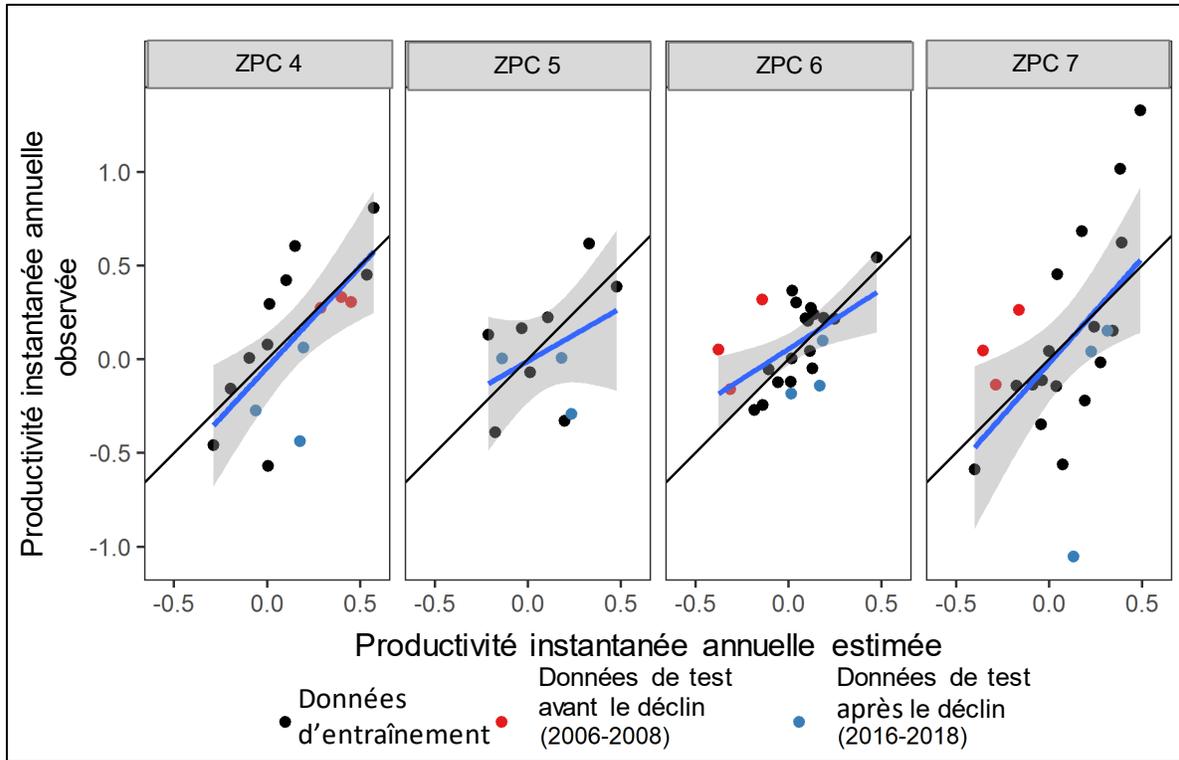


Figure 23 : Valeurs de productivité observées à l'échelle de la ZPC pour toutes les ZPC. La ligne noire indique la ligne d'égalité 1-1, et les lignes bleues représentent une régression linéaire simple des valeurs observées sur les valeurs prédites. Les points et les lignes rouges indiquent les données de 2006 à 2008, avant les déclin importants de la crevette nordique. Les points et les lignes bleus indiquent les données de 2016 à 2018, après les déclin importants de la crevette nordique.

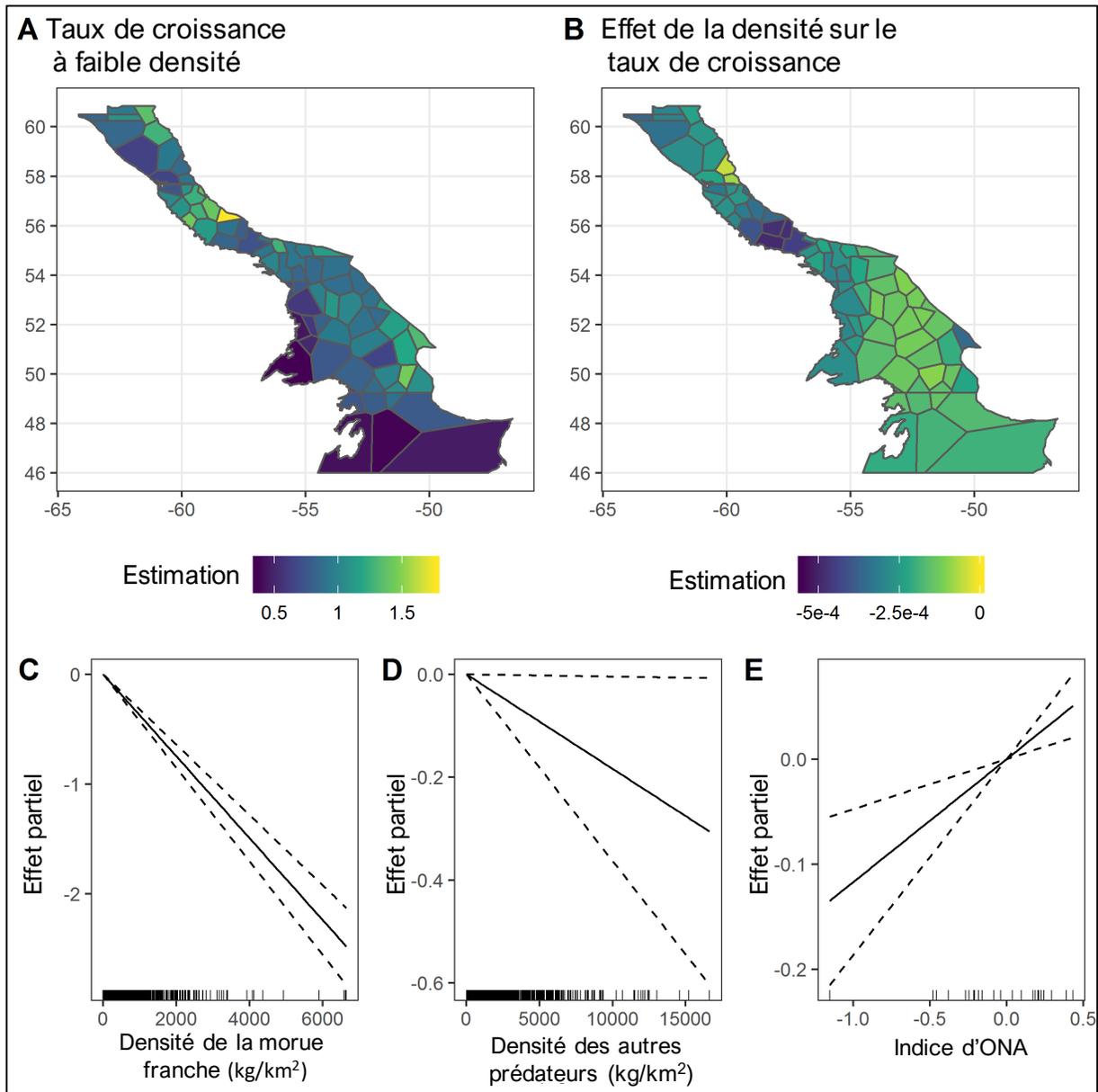


Figure 24 : Estimations des coefficients tirés du modèle de prévision. A) La productivité instantanée estimée dans chaque cellule en l'absence d'effets de densité-dépendance, de prédation de la morue et d'effet de l'oscillation nord-atlantique. B) Le terme estimé de densité-dépendance, qui indique à quelle vitesse la productivité devrait diminuer avec chaque kg supplémentaire de crevettes par km². C) Effet de la densité de la morue franche, indiquant à quelle vitesse la productivité devrait diminuer avec chaque kg supplémentaire de morue franche par km². D) Effet de la densité des autres prédateurs. E) Effet de l'ONA sur la productivité, avec des valeurs d'ONA élevées correspondant à des conditions généralement plus froides et plus douces.

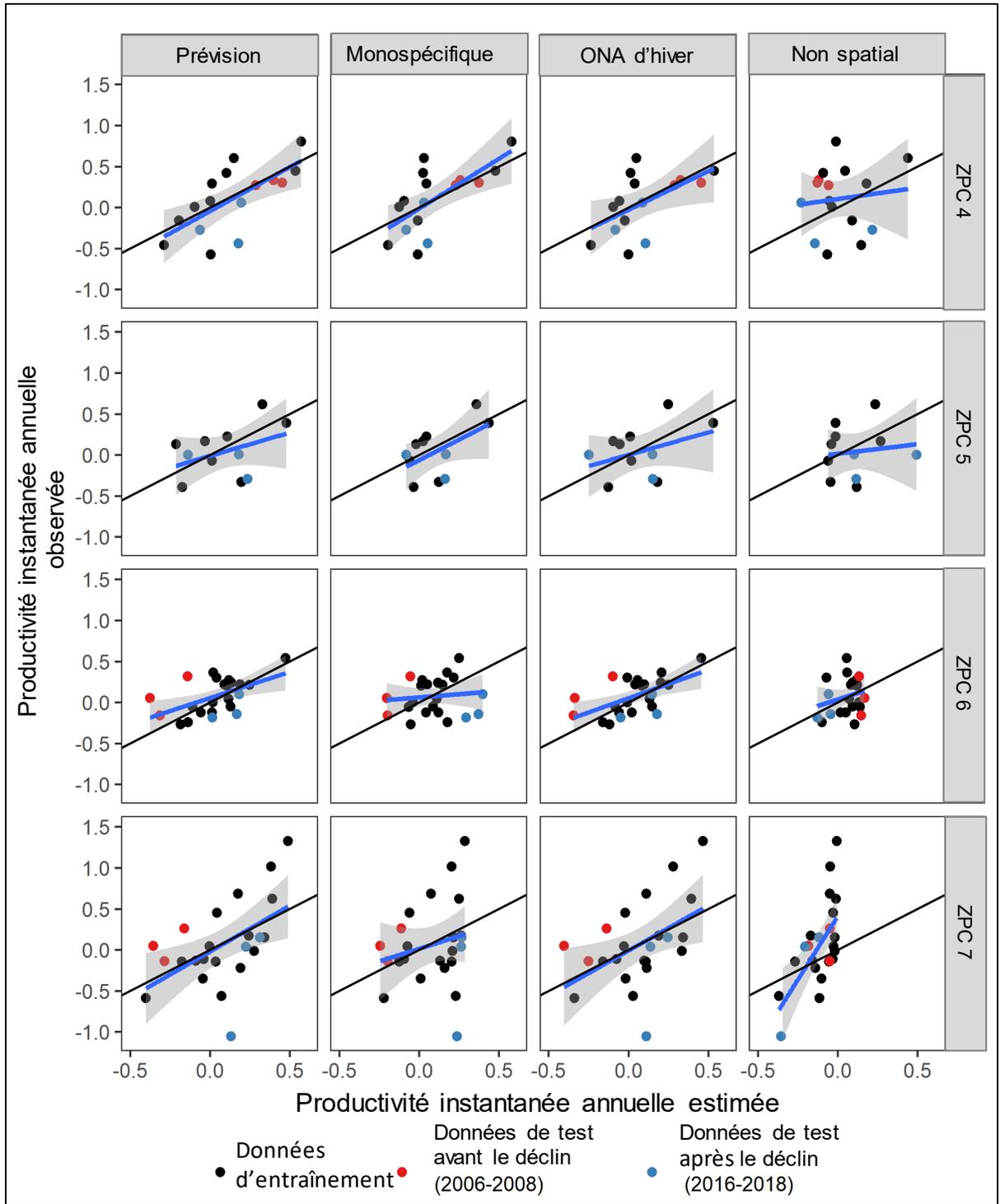


Figure 25 : Valeurs de productivité observées à l'échelle de la ZPC pour les tests de sensibilité de toutes les ZPC. La ligne noire indique la ligne d'égalité 1-1, et les lignes bleues représentent une régression linéaire simple des valeurs observées sur les valeurs prédites. Les points et les lignes rouges indiquent les données de 2006 à 2008, avant les déclin importants de la crevette nordique. Les points et les lignes bleus indiquent les données de 2016 à 2018, après les déclin importants de la crevette nordique.

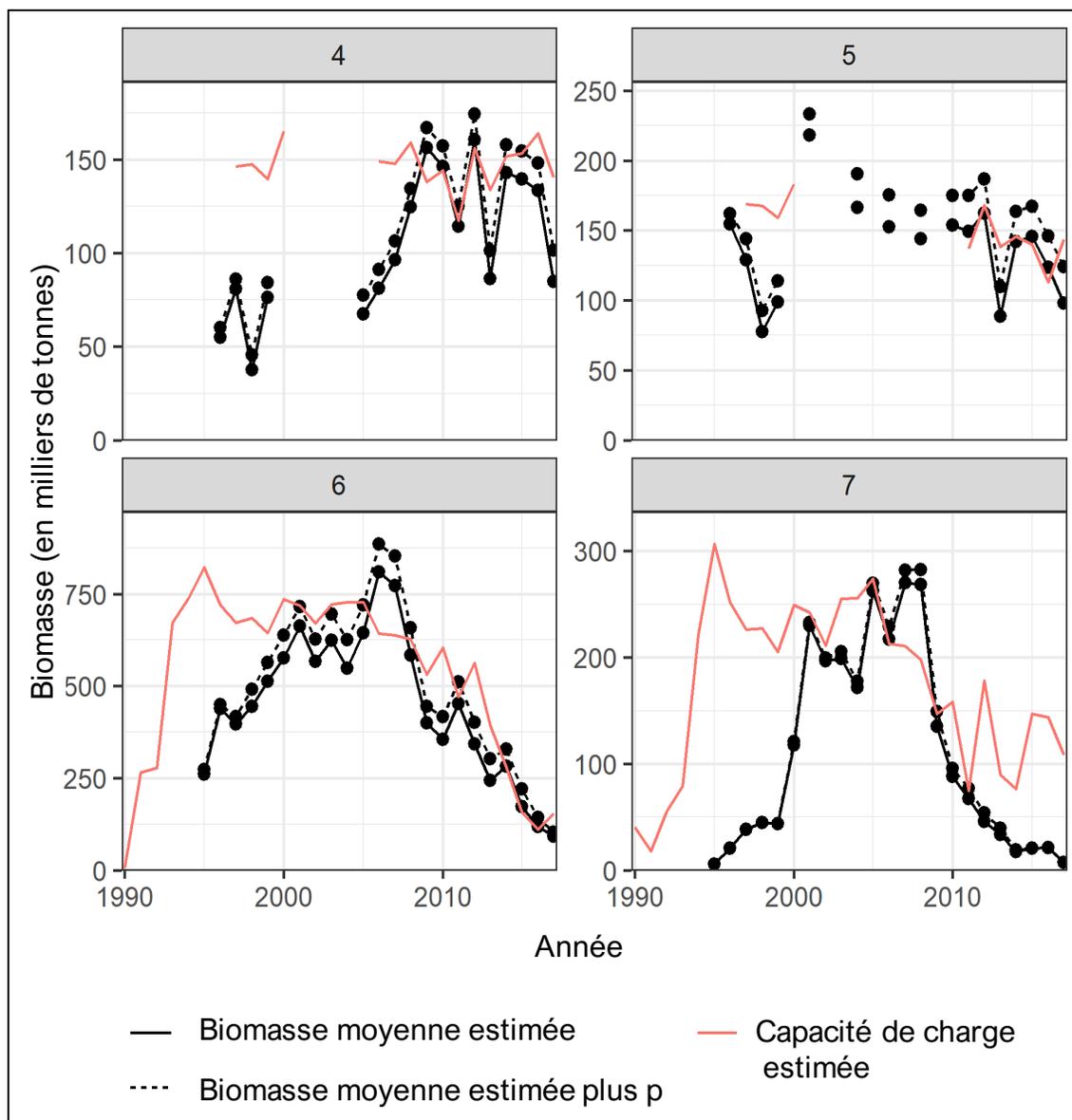


Figure 26 : Biomasse modélisée pour chaque ZPC incluant les prises commerciales (ligne noire pointillée) et restant après la récolte (ligne noire pleine). Les capacités de charge estimées variant dans le temps à l'échelle de la ZPC pour chaque année, compte tenu des conditions environnementales observées, sont indiquées par des lignes rouges.

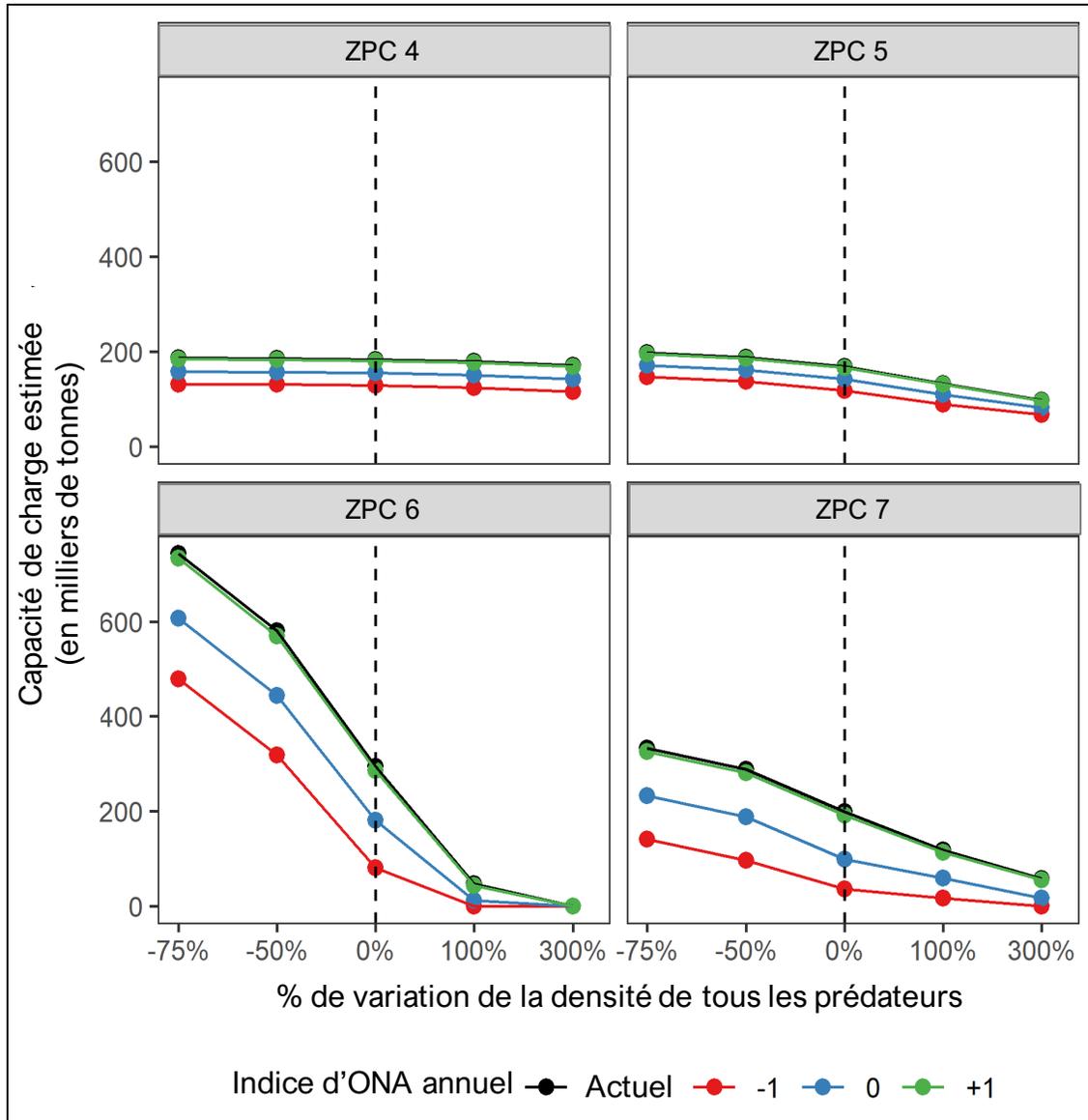


Figure 27 : Sensibilité de la capacité de charge estimée pour chaque ZPC aux variations des entrées du modèle pour 2019.

FIGURES SUPPLÉMENTAIRES

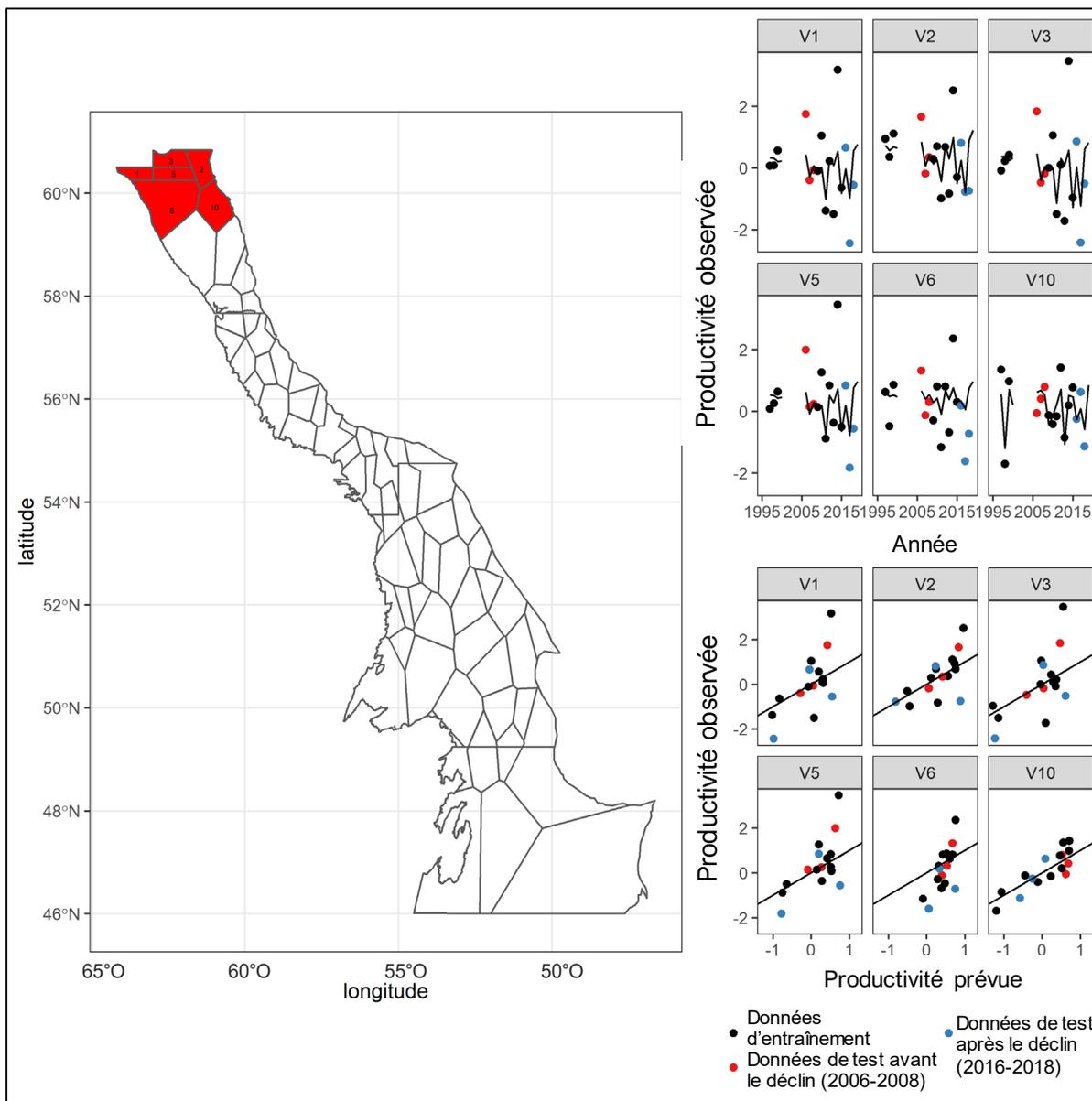


Figure S1 : Ajustements du modèle pour les cellules V1, V2, V3, V5, V6 et V10. Gauche : carte illustrant l'emplacement des cellules. En haut à droite : graphique des productivités observées à l'échelle d'une cellule en fonction du temps. La ligne noire indique la productivité prévue par le modèle. En bas à droite : productivité observée par rapport à la productivité prévue dans chaque cellule chaque année. La ligne noire indique la ligne 1:1.

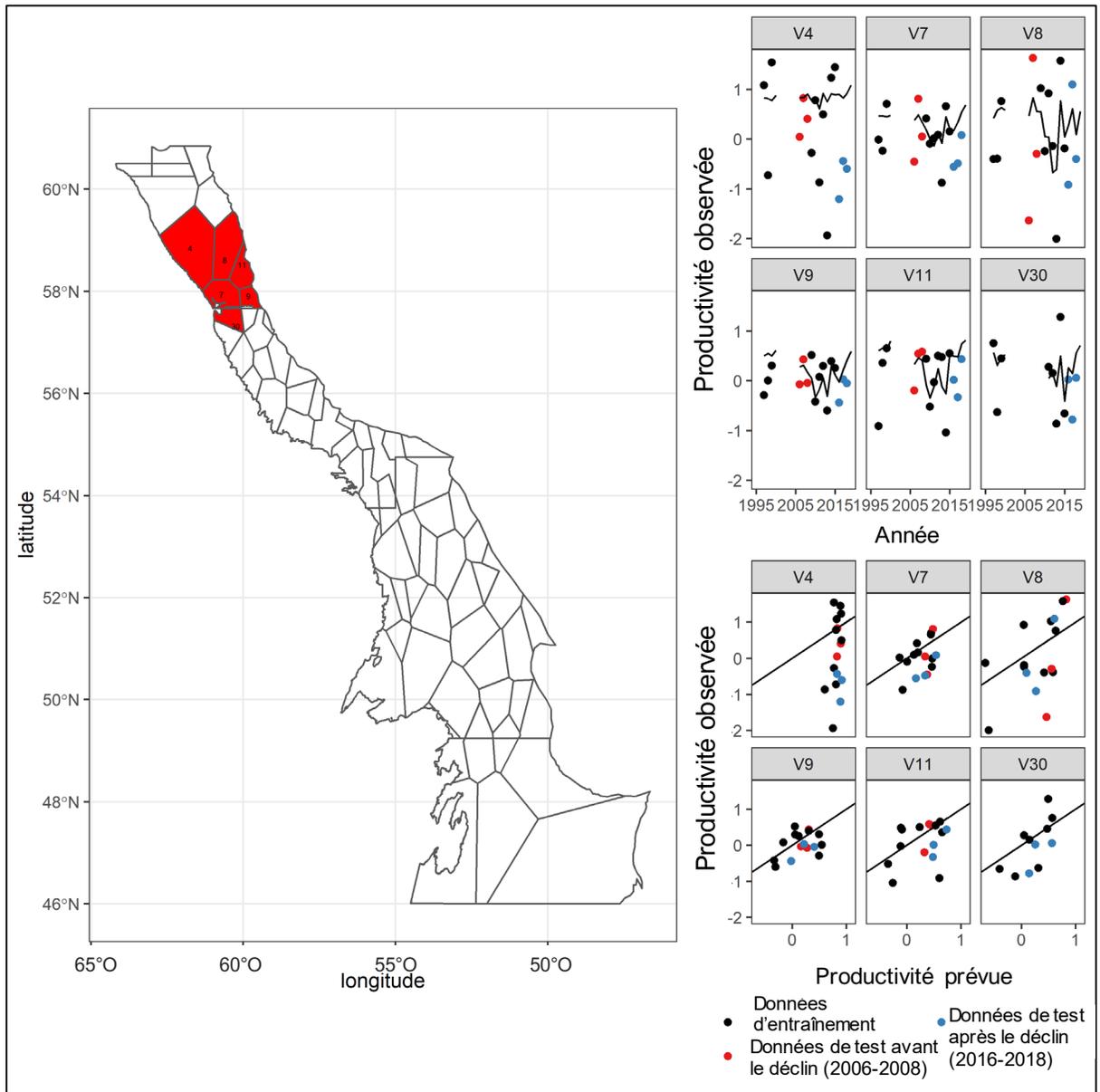


Figure S2 : Ajustements du modèle pour les cellules V4, V7, V8, V9, V11 et V30. Gauche : carte illustrant l'emplacement des cellules. En haut à droite : graphique des productivités observées à l'échelle d'une cellule en fonction du temps. La ligne noire indique la productivité prévue par le modèle. En bas à droite : productivité observée par rapport à la productivité prévue dans chaque cellule chaque année. La ligne noire indique la ligne 1:1.

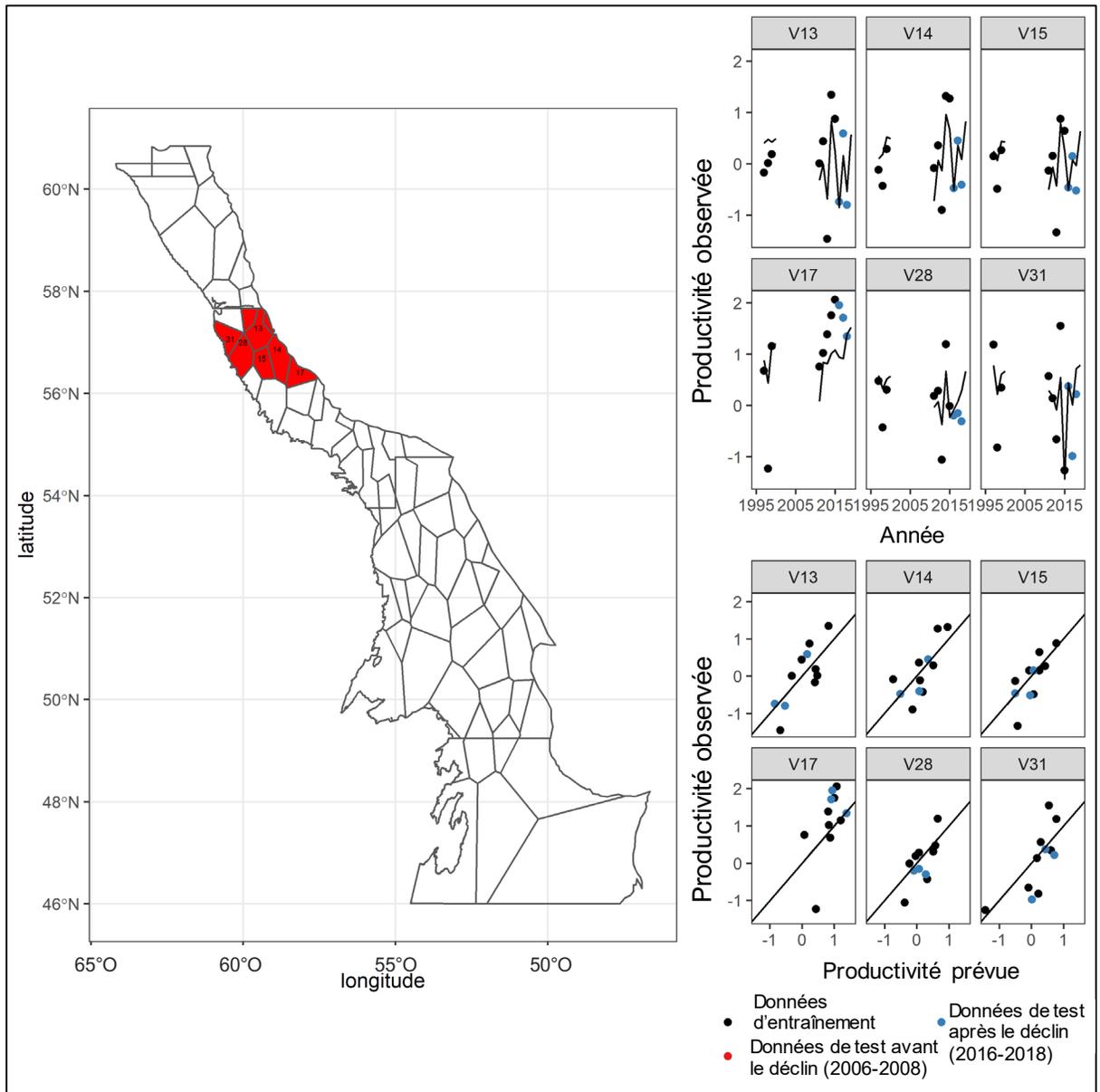


Figure S3 : Ajustements du modèle pour les cellules V13, V14, V15, V17, V28 et V31. Gauche : carte illustrant l'emplacement des cellules. En haut à droite : graphique des productivités observées à l'échelle d'une cellule en fonction du temps. La ligne noire indique la productivité prévue par le modèle. En bas à droite : productivité observée par rapport à la productivité prévue dans chaque cellule chaque année. La ligne noire indique la ligne 1:1.

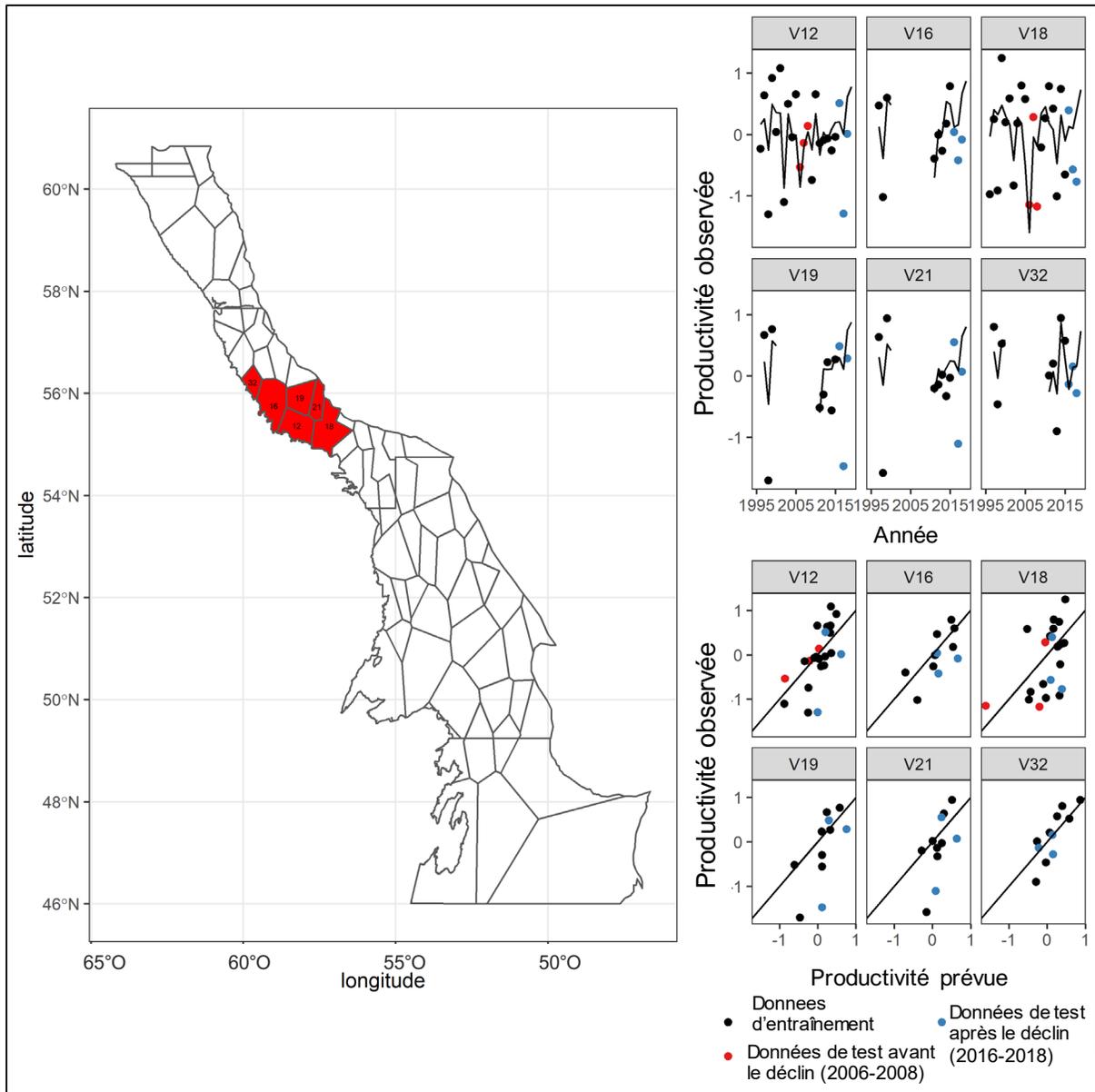


Figure S4 : Ajustements du modèle pour les cellules V12, V16, V18, V19, V21 et V32. Gauche : carte illustrant l'emplacement des cellules. En haut à droite : graphique des productivités observées à l'échelle d'une cellule en fonction du temps. La ligne noire indique la productivité prévue par le modèle. En bas à droite : productivité observée par rapport à la productivité prévue dans chaque cellule chaque année. La ligne noire indique la ligne 1:1.

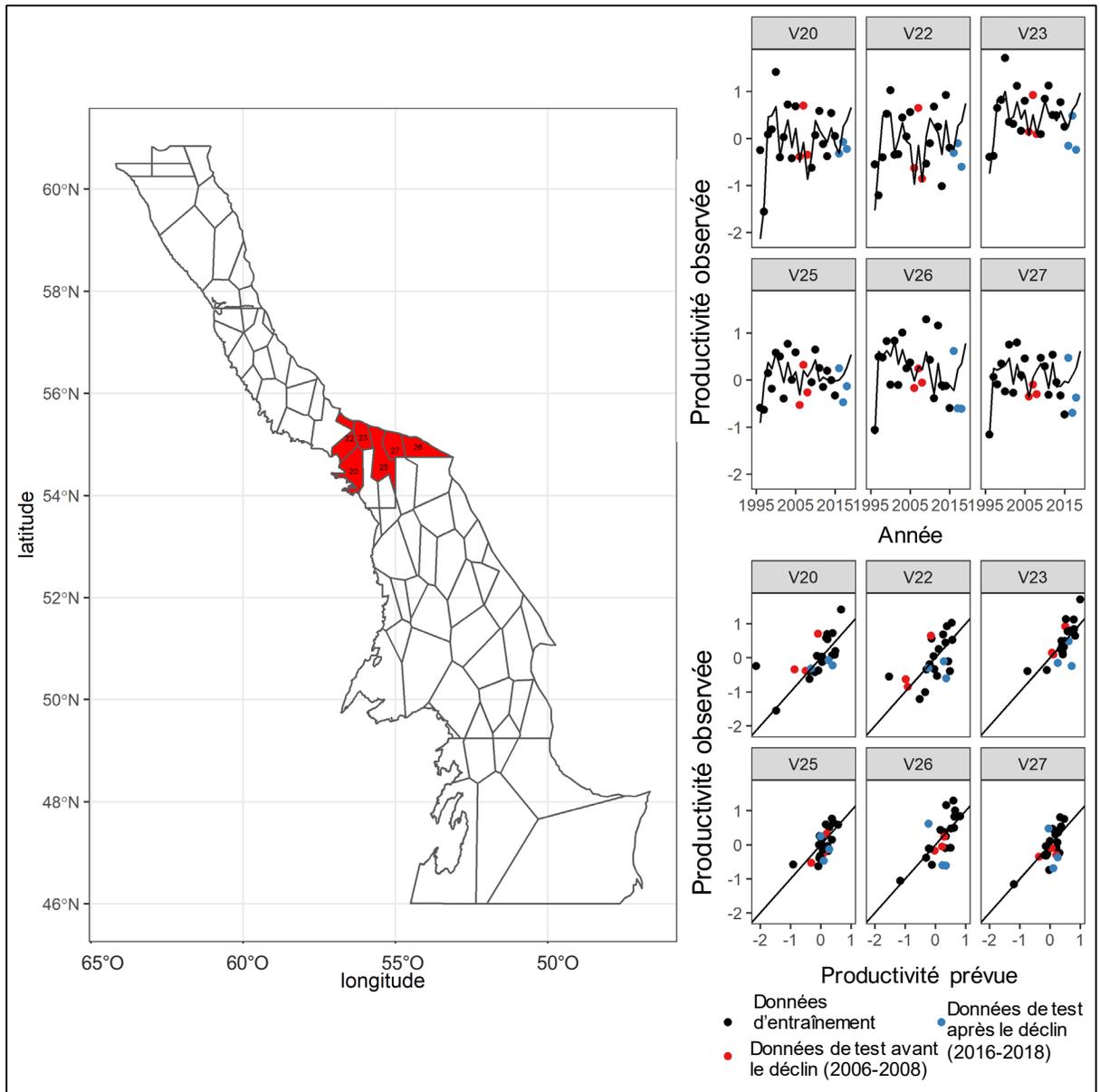


Figure S5 : Ajustements du modèle pour les cellules V20, V22, V23, V25, V26 et V27. Gauche : carte illustrant l'emplacement des cellules. En haut à droite : graphique des productivités observées à l'échelle d'une cellule en fonction du temps. La ligne noire indique la productivité prévue par le modèle. En bas à droite : productivité observée par rapport à la productivité prévue dans chaque cellule chaque année. La ligne noire indique la ligne 1:1.

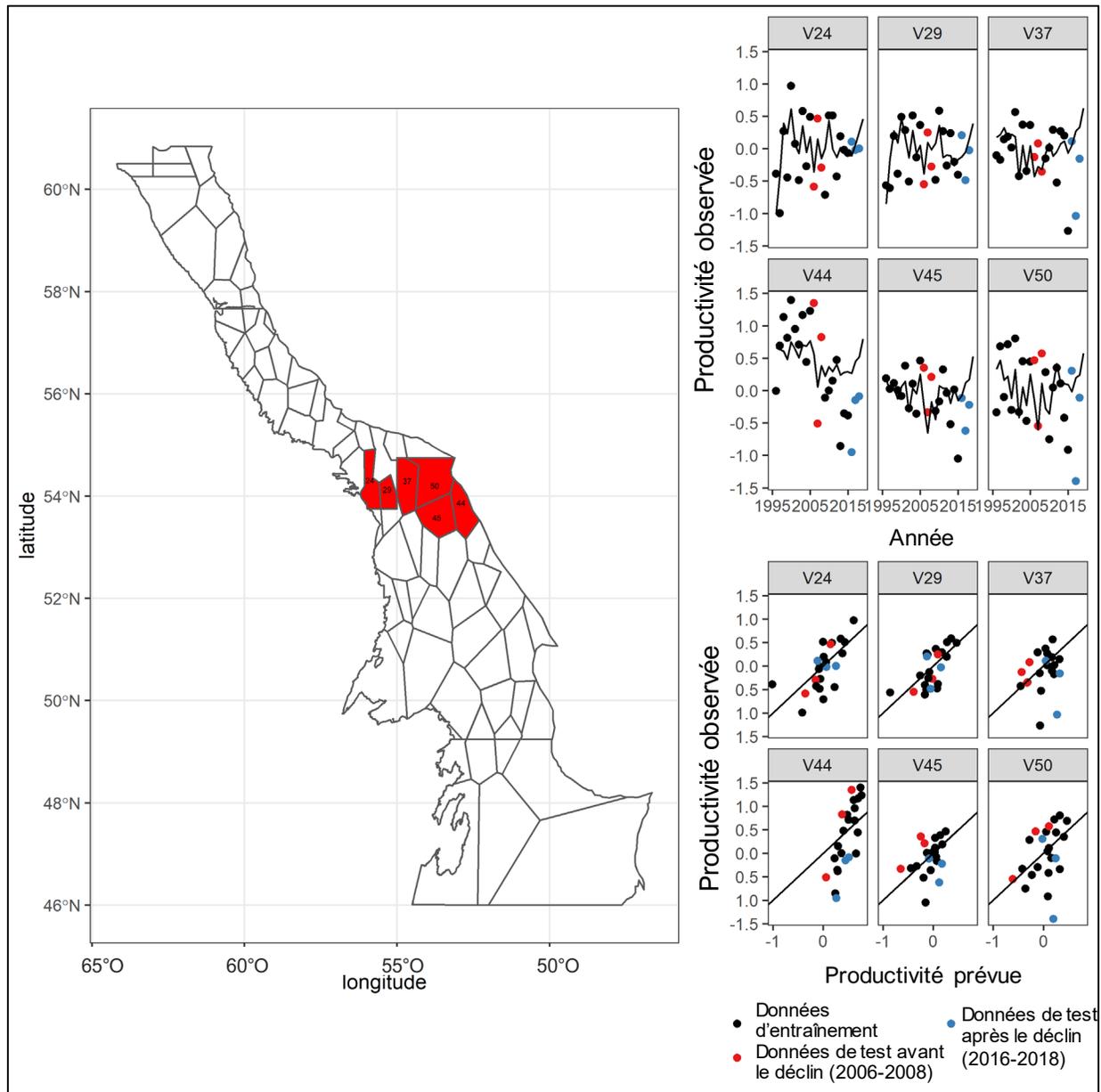


Figure S6 : Ajustements du modèle pour les cellules V24, V29, V37, V44, V45 et V50. Gauche : carte illustrant l'emplacement des cellules. En haut à droite : graphique des productivités observées à l'échelle d'une cellule en fonction du temps. La ligne noire indique la productivité prévue par le modèle. En bas à droite : productivité observée par rapport à la productivité prévue dans chaque cellule chaque année. La ligne noire indique la ligne 1:1.

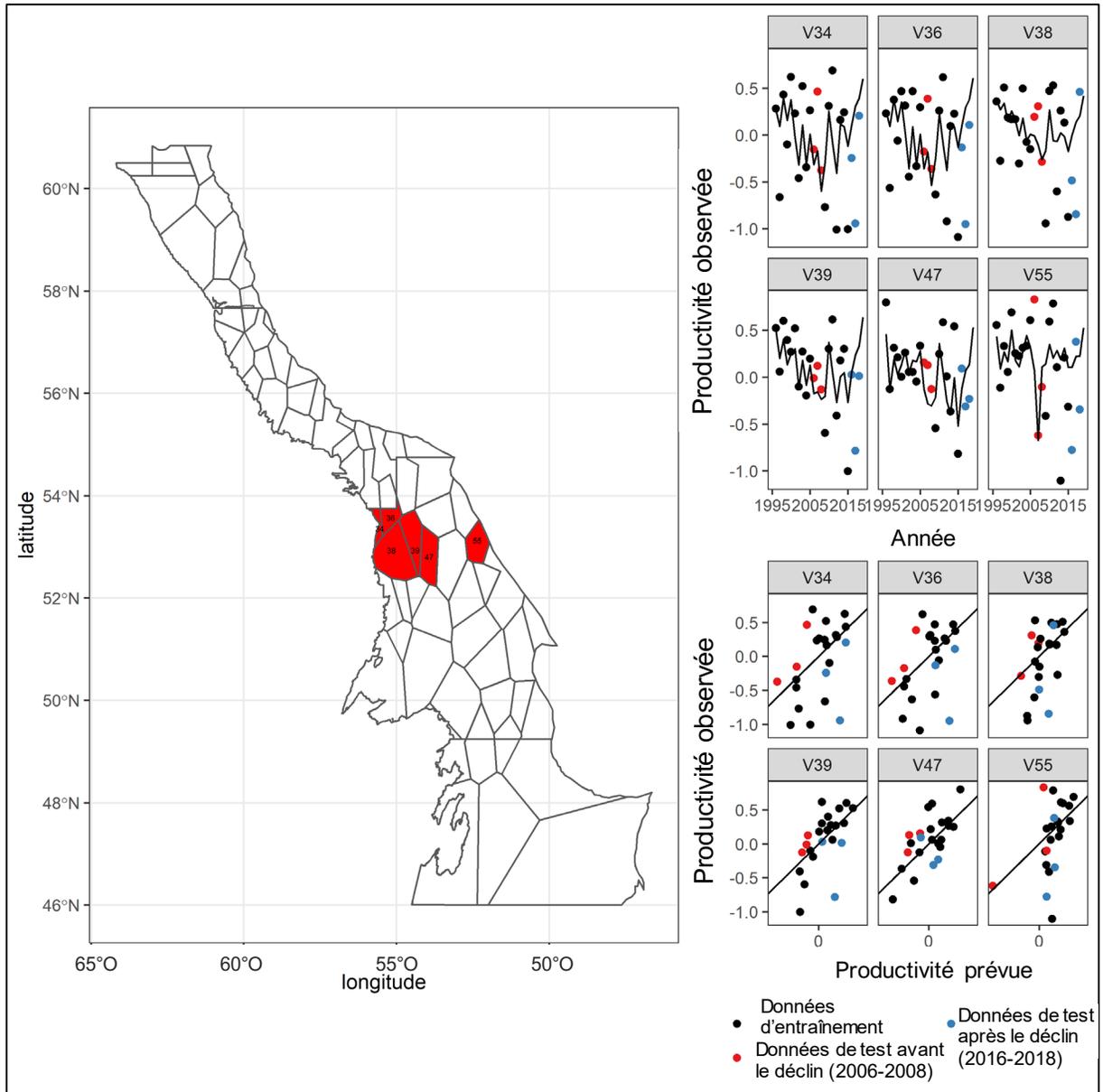


Figure S7 : Ajustements du modèle pour les cellules V34, V36, V38, V39, V47 et V55. Gauche : carte illustrant l'emplacement des cellules. En haut à droite : graphique des productivités observées à l'échelle d'une cellule en fonction du temps. La ligne noire indique la productivité prévue par le modèle. En bas à droite : productivité observée par rapport à la productivité prévue dans chaque cellule chaque année. La ligne noire indique la ligne 1:1.

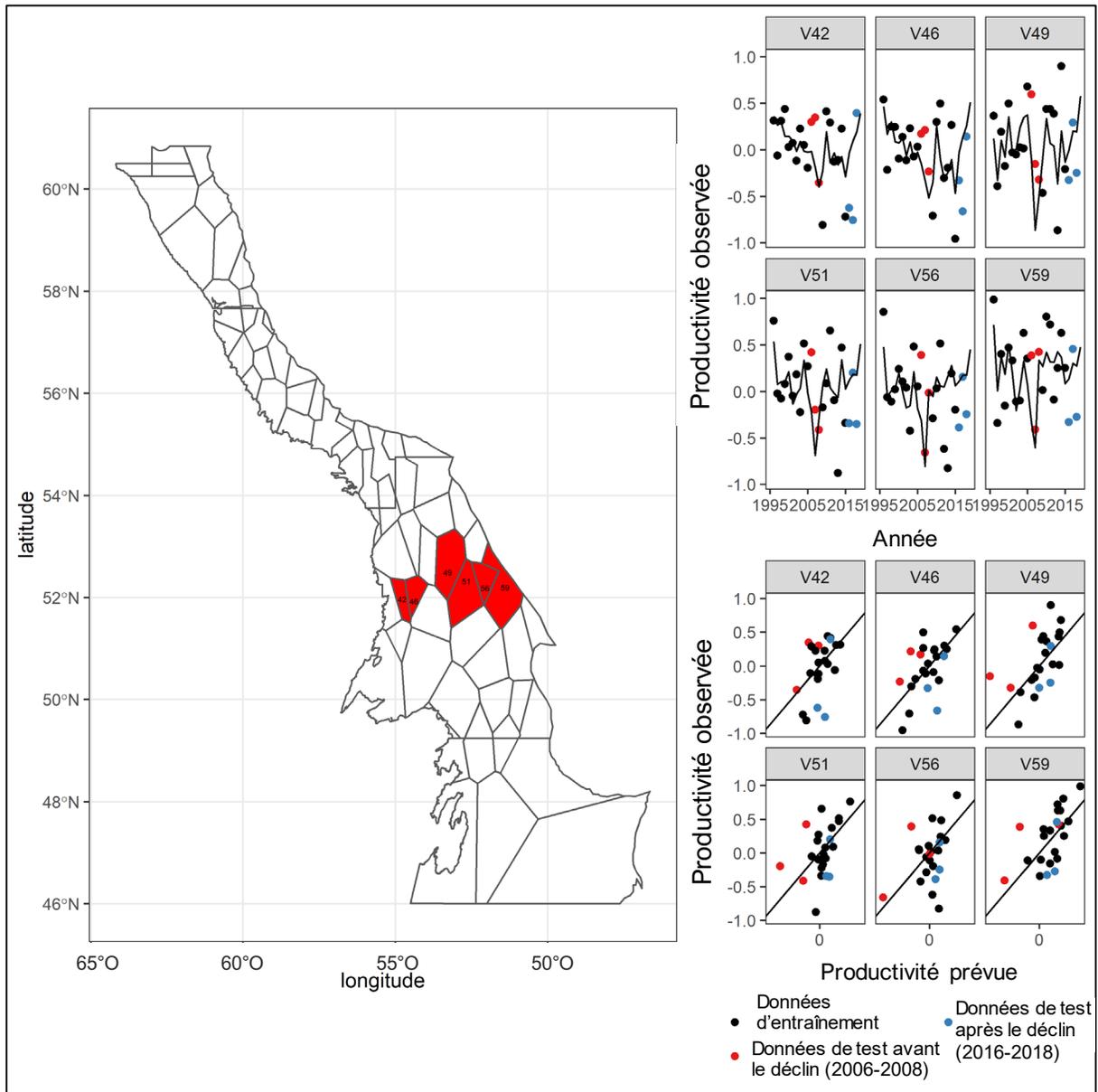


Figure S8 : Ajustements du modèle pour les cellules V42, V46, V49, V51, V56 et V59. Gauche : carte illustrant l'emplacement des cellules. En haut à droite : graphique des productivités observées à l'échelle d'une cellule en fonction du temps. La ligne noire indique la productivité prévue par le modèle. En bas à droite : productivité observée par rapport à la productivité prévue dans chaque cellule chaque année. La ligne noire indique la ligne 1:1.

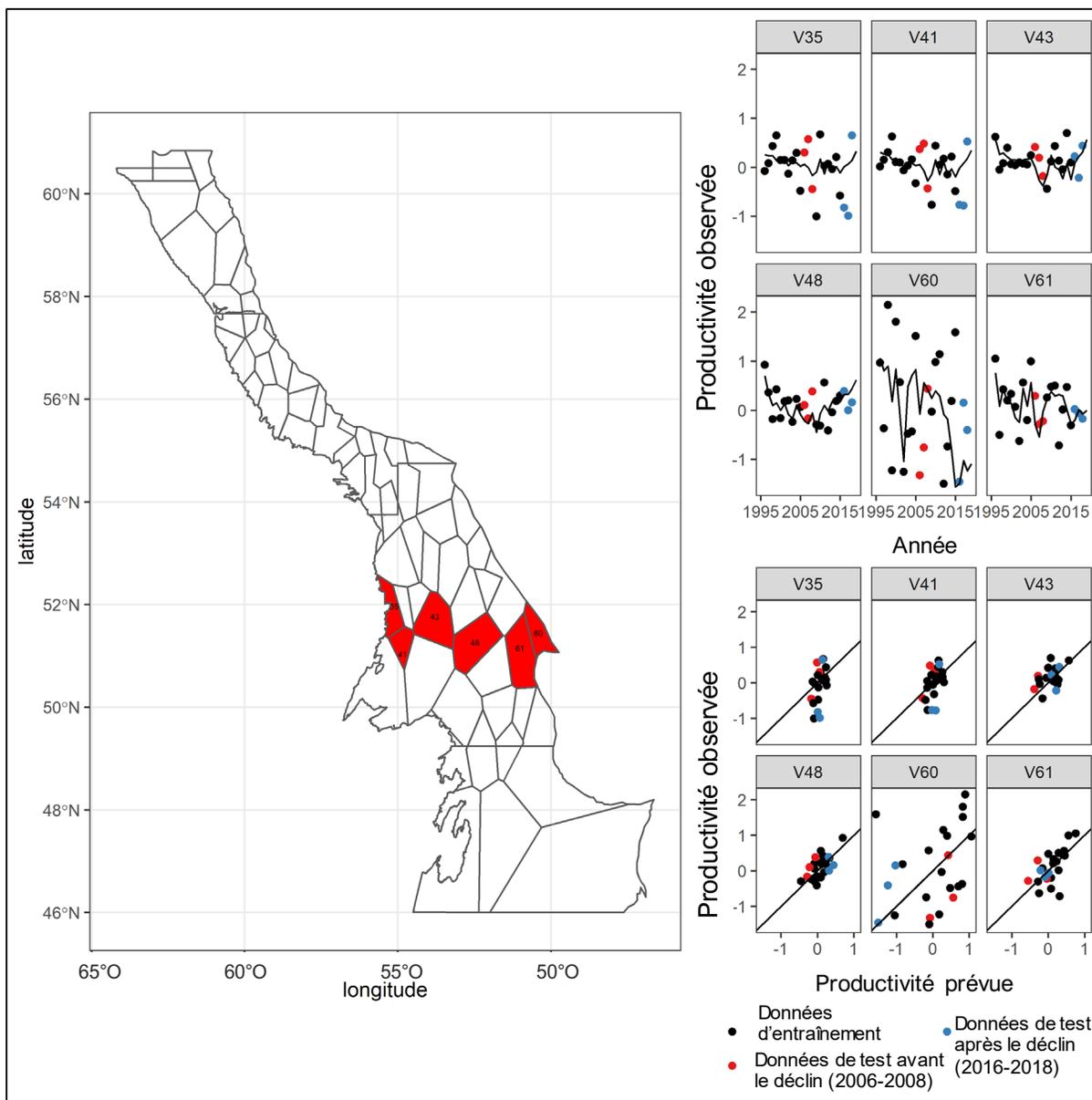


Figure S9 : Ajustements du modèle pour les cellules V35, V41, V43, V48, V60 et V61. Gauche : carte illustrant l'emplacement des cellules. En haut à droite : graphique des productivités observées à l'échelle d'une cellule en fonction du temps. La ligne noire indique la productivité prévue par le modèle. En bas à droite : productivité observée par rapport à la productivité prévue dans chaque cellule chaque année. La ligne noire indique la ligne 1:1.

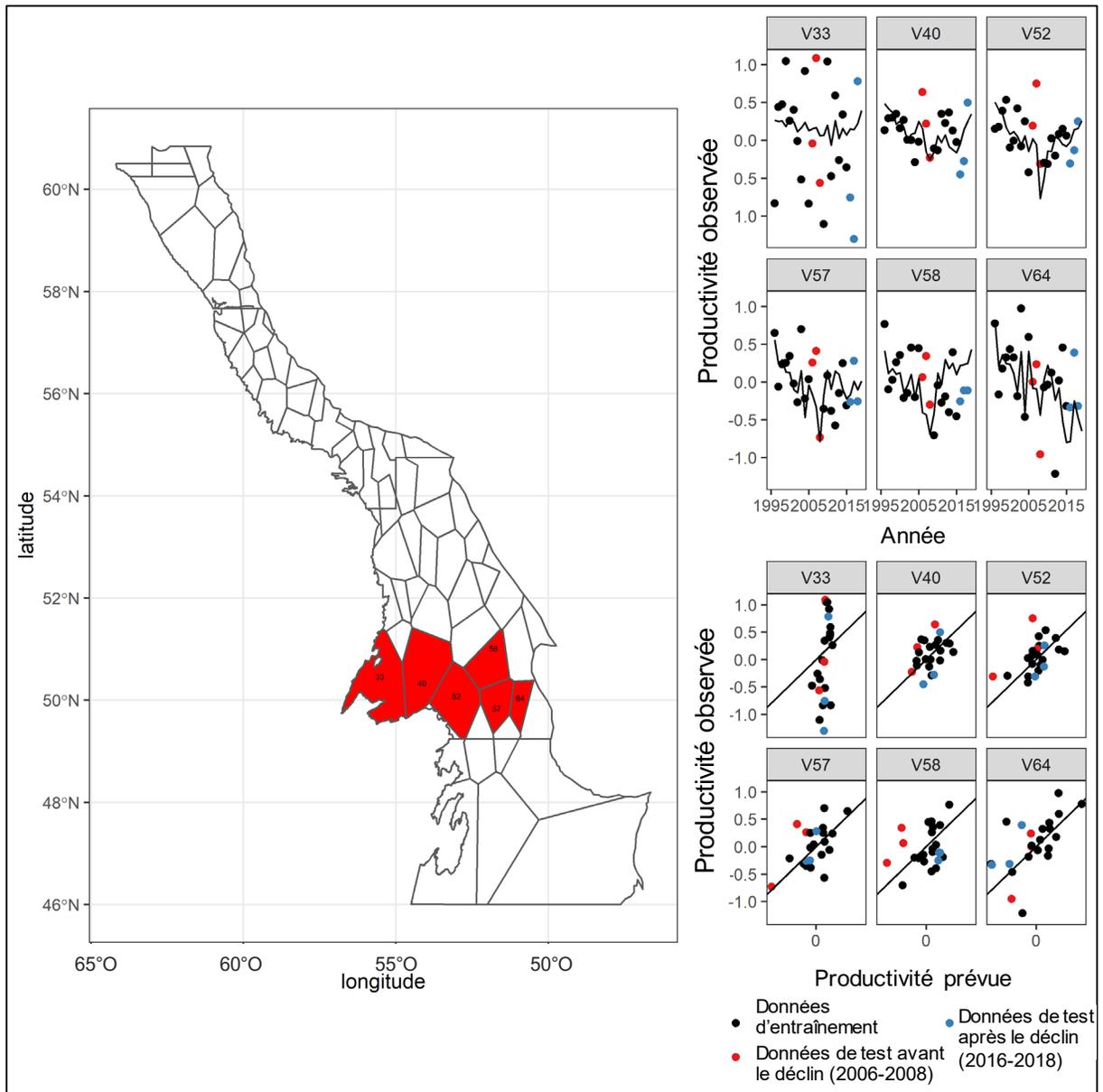


Figure S10 : Ajustements du modèle pour les cellules V33, V40, V52, V57, V58 et V64. Gauche : carte illustrant l'emplacement des cellules. En haut à droite : graphique des productivités observées à l'échelle d'une cellule en fonction du temps. La ligne noire indique la productivité prévue par le modèle. En bas à droite : productivité observée par rapport à la productivité prévue dans chaque cellule chaque année. La ligne noire indique la ligne 1:1.

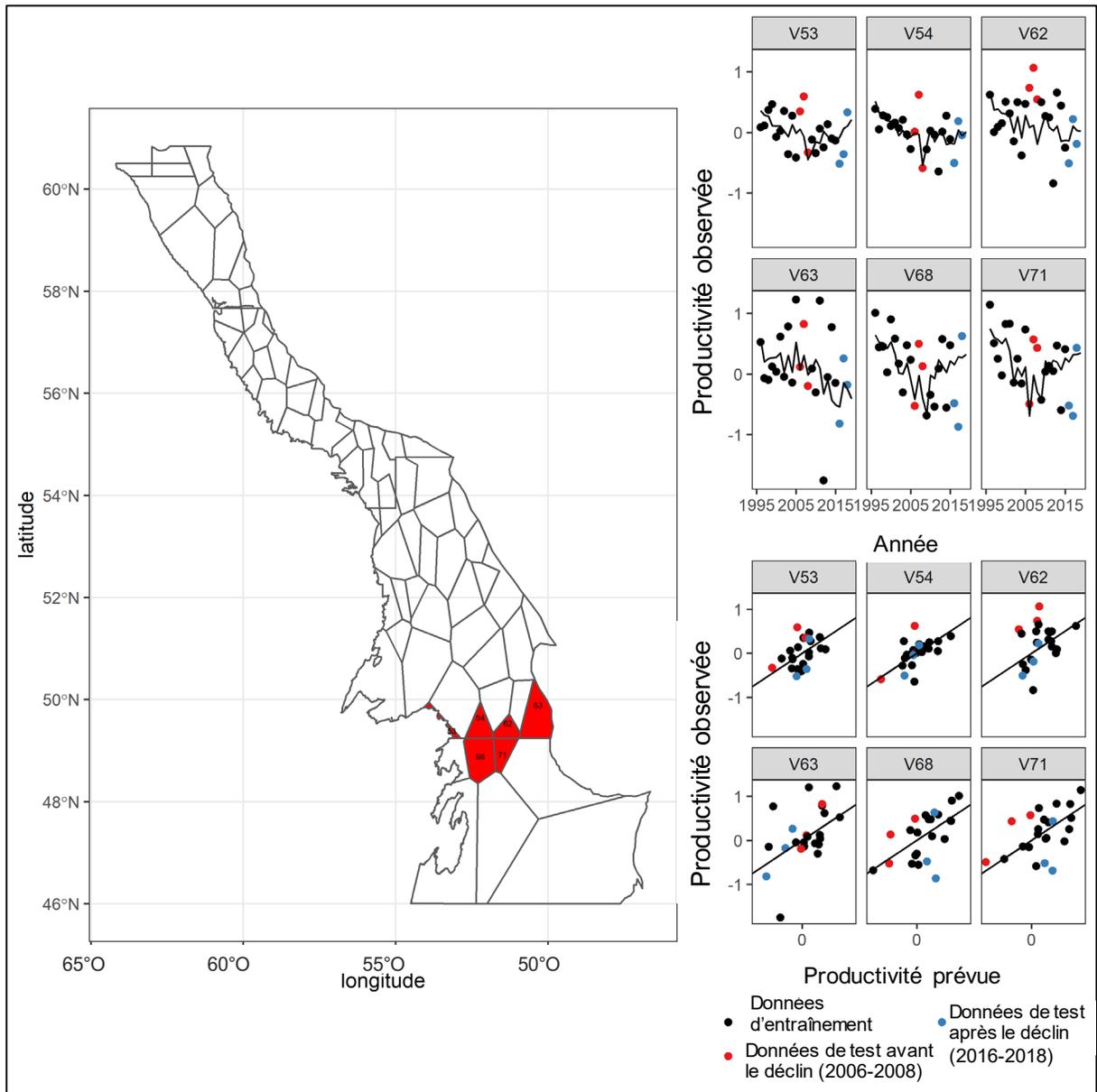


Figure S11 : Ajustements du modèle pour les cellules V53, V54, V62, V63, V68 et V71. Gauche : carte illustrant l'emplacement des cellules. En haut à droite : graphique des productivités observées à l'échelle d'une cellule en fonction du temps. La ligne noire indique la productivité prévue par le modèle. En bas à droite : productivité observée par rapport à la productivité prévue dans chaque cellule chaque année. La ligne noire indique la ligne 1:1.

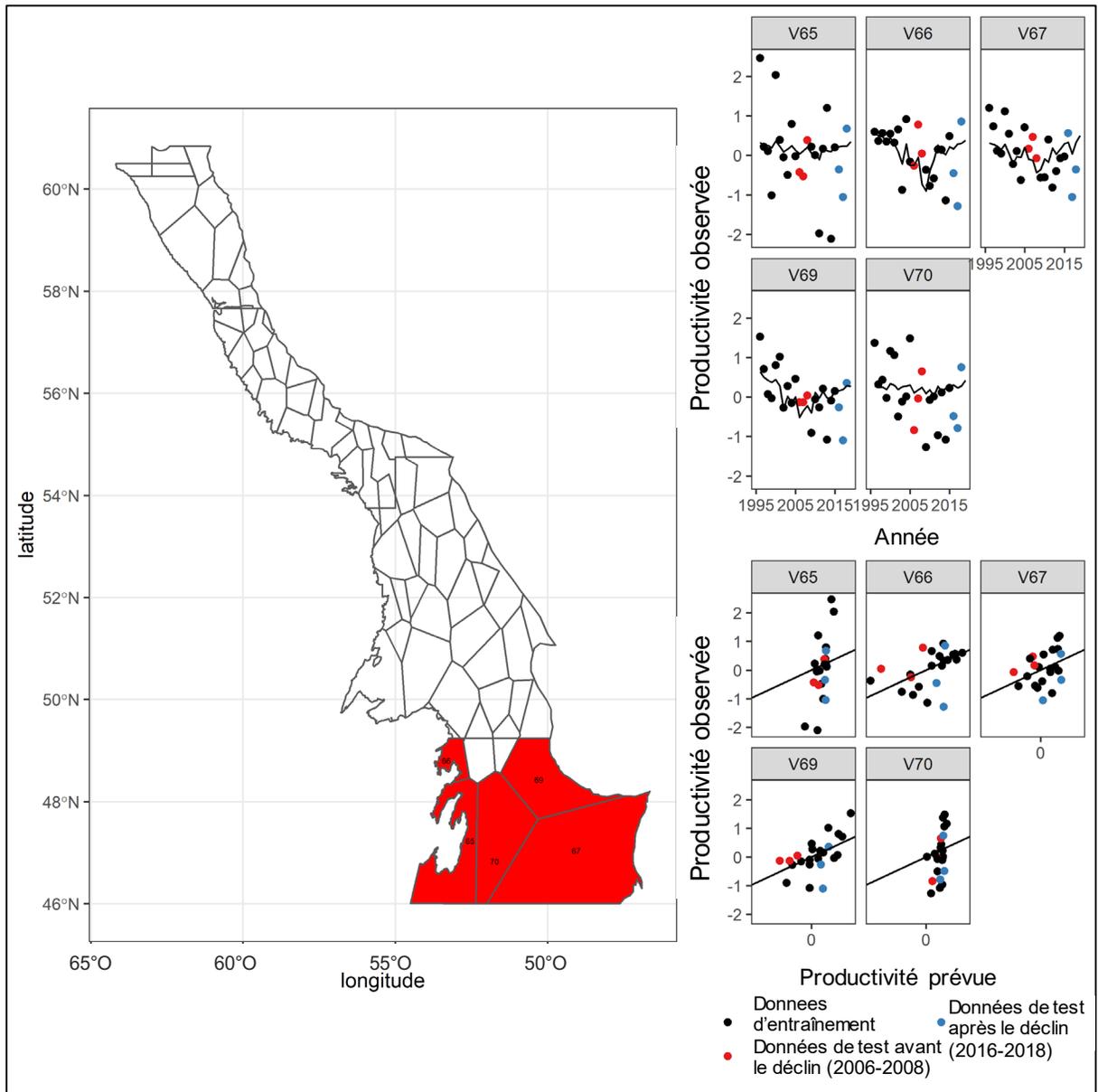


Figure S12 : Ajustements du modèle pour les cellules V65, V66, V67, V69 et V70. Gauche : carte illustrant l'emplacement des cellules. En haut à droite : graphique des productivités observées à l'échelle d'une cellule en fonction du temps. La ligne noire indique la productivité prévue par le modèle. En bas à droite : productivité observée par rapport à la productivité prévue dans chaque cellule chaque année. La ligne noire indique la ligne 1:1.

ANNEXE I : MODIFICATION

Une erreur dans le code de modélisation du modèle non spatial utilisé dans la version originale de ce document a été trouvée. Cette erreur a ajouté une interaction imprévue supplémentaire dans le modèle non spatial. L'erreur n'a pas modifié considérablement le classement relatif global des modèles. Les valeurs corrigées et les modifications apportées au texte se limitent aux valeurs de l'erreur quadratique moyenne (tableau 2), aux visualisations (figure 25) pour le modèle non spatial mis à jour, et aux paragraphes des résultats comparant ce modèle à d'autres résultats de modélisation (pages 16 et 17). Les paragraphes corrigés décrivant les résultats, le tableau 2 et la figure 25 sont présentés ci-dessous.

Texte révisé (page 16 et 17) :

Le modèle avec décalage- 1 simplifié convient mieux aux productivités annuelles observées que le modèle monospécifique dans toutes les ZPC, à l'exception de la ZPC 5 dans l'ensemble de données d'entraînement, mais il a été surpassé par le modèle monospécifique dans les ZPC 4 et 5 dans l'ensemble de données de test (tableau 2). Le modèle d'oscillation nord-atlantique d'hiver s'est ajusté à peu près aussi bien que le modèle de prévision de toutes les ZFC dans les données d'entraînement, et a légèrement surpassé le modèle de prévision lors de la prévision des tendances dans l'ensemble de données de test (tableau 2). Toutefois, le terme d'oscillation nord-atlantique d'hiver n'était pas statistiquement significatif dans ce modèle, ce qui indique que le signe de l'effet du terme d'oscillation nord-atlantique d'hiver était incertain. Le modèle non spatial a eu un rendement prédictif inférieur à celui du modèle avec décalage -1 simplifié pour les ZPC 4 et 6 dans l'ensemble de données d'entraînement, et un rendement prédictif égal ou inférieur dans toutes les ZPC sauf pour la ZPC 7 comparativement au modèle avec décalage -1 simplifié dans l'ensemble de données de test (tableau 2).

Globalement, le modèle monospécifique a moins bien réussi à prédire les périodes d'augmentation ou de diminution rapide des ZPC 6 et 7 (figure 25, colonne 2), ce qui est conforme aux éléments de preuve présentés précédemment selon lesquelles ces stocks ont subi au moins deux changements de productivité à grande échelle dans cette série chronologique. Le modèle d'oscillation nord-atlantique d'hiver convient à peu près aussi bien ou mieux que le modèle avec décalage -1 simplifié (figure 25, colonne 3). Le modèle non spatial avait tendance à sous-estimer les périodes d'augmentation et de diminution dans la ZPC 4 (figure 25, colonne 4). Bien que le modèle avec décalage -1 simplifié ait été moins performant que le test des autres modèles dans certaines incidences (p. ex., décalages pluriannuels, données de test après le déclin de la ZPC 7), le modèle avec décalage -1 simplifié a été choisi pour sa simplicité relative et son adéquation globale et a été adopté comme modèle principal pour prévoir les variations de ce stock. Ce modèle a été modifié à l'aide de données de toutes les années pour s'assurer que les paramètres du modèle étaient estimés à l'aide de toutes les données disponibles. Ce modèle réajusté a été utilisé pour produire le reste des résultats du présent rapport, et est ci-après appelé le modèle de prévision.

Tableau 2 révisé : Qualité d'ajustement hors échantillon à l'échelle de la ZPC (EMQ) pour les comparaisons de sensibilité du modèle.

	Prévision	Monospécifique	ONA d'hiver	Non spatial
Données d'entraînement				
ZPC 4	0.29	0.32	0.32	0.36
ZPC 5	0.27	0.24	0.28	0.24
ZPC 6	0.14	0.20	0.14	0.16
SFA 7	0.38	0.47	0.41	0.28
Test data (2006–2008, 2016–2018)				
ZPC 4	0.28	0.22	0.24	0.44

	Prévision	Monospécifique	ONA d'hiver	Non spatial
ZPC 5	0.33	0.28	0.31	0.51
ZPC 6	0.30	0.36	0.28	0.30
ZPC 7	0.55	0.57	0.54	0.48

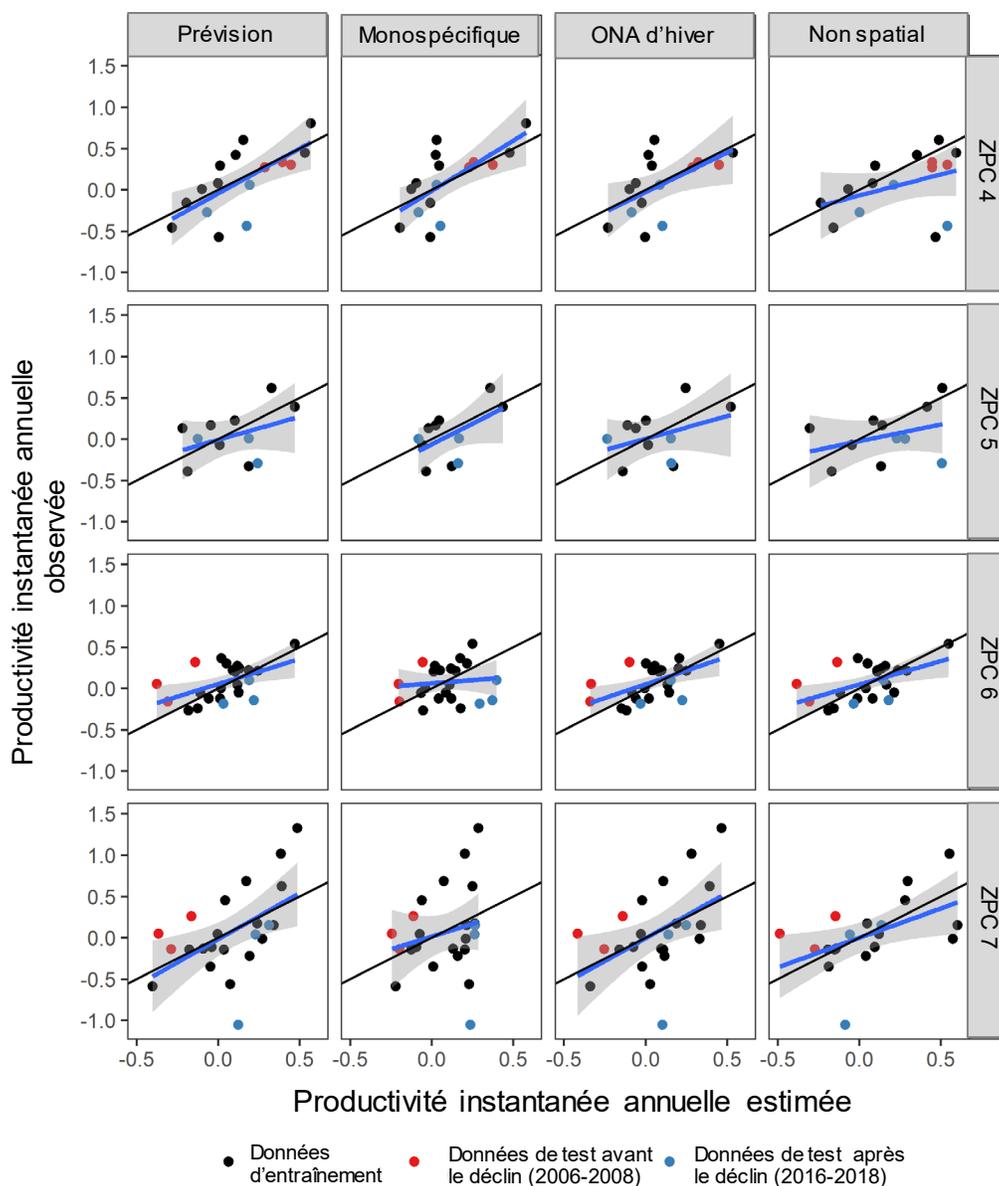


Figure 25 révisée : Valeurs de productivité observées à l'échelle de la ZPC pour les tests de sensibilité de toutes les ZPC. La ligne noire indique la ligne d'égalité 1-1, et les lignes bleues représentent une régression linéaire simple des valeurs observées sur les valeurs prédites. Les points et les lignes rouges indiquent les données de 2006 à 2008, avant les déclins importants de la crevette nordique. Les points et les lignes bleus indiquent les données de 2016 à 2018, après les déclins importants de la crevette nordique.