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 2026/062

Région du Québec

Analyse du chevauchement de la crevette nordique et des sébastes dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent

David Poissant, Caroline Senay et Hugo Bourdages

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

Septembre 2026

Canada

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/
DFO.CSAS-SCAS.MPO@dfo-mpo.gc.ca

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre du ministère des Pêches et des Océans, 2026

Ce rapport est publié sous la Licence du gouvernement ouvert – Canada

ISSN 2292-4272
ISBN 978-1-100-00329-0 N° cat. Fs70-5/2026-062F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Poissant, D., Senay, C., et Bourdages, H. 2026. Analyse du chevauchement de la crevette nordique et des sébastes dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2026/062. iv + 46 p.

Also available in English :

Poissant, D., Senay, C., and Bourdages, H. 2026. Analysis of the Overlap Between Northern Shrimp and Redfish in the Estuary and Gulf of St. Lawrence. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2026/062. iv + 46 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ iv
INTRODUCTION 1
MÉTHODES 1
DONNÉES UTILISÉES 1
ANALYSES 2
Spécification des modèles 2
Validation croisée 2
Diagnostics des modèles 2
Prédictions et indice de chevauchement spatial 3
RÉSULTATS 3
PRÉDICTIONS 3
Crevette 3
Sébastes 4
CHEVAUCHEMENT DES CREVETTES NORDIQUES ET DES SÉBASTES 4
Cartes de chevauchement 4
Indice de collocation locale 5
DISCUSSION ET CONCLUSION 5
RÉFÉRENCES CITÉES 6
TABLEAUX 8
FIGURES 12
ANNEXE A : RÉSULTATS DE LA VALIDATION CROISÉE 34
ANNEXE B : DIAGNOSTIC DES MODÈLES SPATIOTEMPORELS 35

RÉSUMÉ

La forte augmentation des densités de sébastes (*Sebastes mentella* et *S. fasciatus*) dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent provenant des fortes cohortes de 2011-2013 est mise de l'avant pour expliquer en partie le déclin d'une de ses proies, la crevette nordique (*Pandalus borealis*). Cependant, il y a très peu de documentation sur le chevauchement spatial de ces espèces ainsi que leur fluctuation dans le temps. Dans ce document, nous utilisons les données de relevé du nord du golfe de 1990 à 2025 afin d'estimer la distribution spatiotemporelle de la crevette nordique et des sébastes à l'aide de modèles développés avec l'outil statistique sdmTMB. Nous comparons les fluctuations des superficies de fortes densités de ces espèces et utilisons un indice de collocation locale afin de suivre les fluctuations du degré de chevauchement entre la crevette et les sébastes. Les densités de crevette nordique et de sébastes ont fortement fluctué durant la période d'étude, avec un déclin des sébastes au début des années 1990, suivi par une hausse des densités de crevettes et une diminution du chevauchement spatial, avant que l'arrivée de fortes cohortes de sébaste en 2011-2013 n'inverse cette tendance. Depuis 2015, le chevauchement spatial varie selon les zones : très élevé dans Esquiman et à des valeurs intermédiaires dans les zones d'Anticosti et l'estuaire, et très faibles dans Sept-Îles. Avec l'absence de recrutement et la forte mortalité des sébastes observés, la pression de prédation potentielle subie par la crevette de la part des sébastes devrait continuer de diminuer à l'échelle du golfe du Saint-Laurent.

INTRODUCTION

La crevette nordique (*Pandalus borealis*) affiche un déclin généralisé à l'ensemble du golfe du Saint-Laurent (GSL) entamé au courant des années 2000 (MPO 2025a). Les principaux facteurs cités pour expliquer ce déclin sont le réchauffement et l'appauvrissement en oxygène des eaux occupées par la crevette nordique, ainsi que la prédation par les sébastes (*Sebastes mentella* et *S. fasciatus*). La biomasse chalutable de ces derniers a brusquement augmenté alors que trois cohortes successives en 2011, 2012 et 2013 ont atteint un sommet de 4,3 millions de tonnes en 2019 alors qu'elle était de moins de 100 000 t avant 2013 (Senay *et al*. 2023).

La crevette nordique est la proie d'une large gamme de prédateurs dans le l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (Ouellette-Plante *et al*. 2020), dont font partie les sébastes. Le régime alimentaire de ces derniers change avec sa croissance; les sébastes se nourrissent majoritairement de zooplancton avant d'intégrer la crevette nordique dans leur alimentation, ainsi que d'autres proies lorsqu'ils atteignent environ 20 cm (Brown-Vuillemin *et al*. 2022). Bien que la prédation par les sébastes soit souvent citée comme l'un des facteurs influençant le déclin de la crevette, il y a très peu de travaux documentant le chevauchement spatial entre ces espèces.

Dans ce document de recherche, nous évaluons le chevauchement spatial entre la crevette nordique et les sébastes. Nous utilisons la librairie sdmTMB (Anderson *et al*. 2024) pour construire deux modèles de distribution spatiotemporels, et utilisons les prédictions spatiotemporelles des deux modèles pour visualiser les zones de chevauchement de fortes densités des sébastes et de la crevette et créer un indice de collocation de 1990 à 2025.

MÉTHODES

DONNÉES UTILISÉES

Les données de densité (kg/trait) de crevette nordique et des sébastes proviennent du relevé de l'estuaire et nord du golfe du Saint-Laurent effectué au mois d'août (Figure 1) qui recouvre l'ensemble des zones d'évaluation de stocks de crevettes nordiques (Figure 2). La méthodologie du relevé de l'estuaire et du nord du golfe du Saint-Laurent (NGSL) est décrite dans Chamberland *et al*. (2025). Le relevé a été conduit par trois navires depuis 1990 : Navire de la garde côtière canadienne (NGCC) *Alfred Needler* en 1990-2005, NGCC *Teleost* en 2004-2022, et NGCC *John Cabot* de 2021 à aujourd'hui. Des facteurs de conversion pour pallier aux différences de capturabilité entre les navires ont été appliqués (Bourdages *et al*. 2007; Benoît *et al*. 2024). Un résumé des captures standardisées pour la crevette nordique et les sébastes par zone d'évaluation de stocks est présenté dans les tableaux 1, 2, 3 et 4.

Les données bathymétriques du service hydrographique canadien ont été utilisées pour intégrer la profondeur comme variable environnementale dans les deux modèles spatiotemporels. Les données de profondeur ont été transformées avec une opération logarithmique avant d'être centrées et réduites. La résolution originale de 50 m x 50 m des données a été modifiée en moyennant les valeurs de profondeur pour obtenir une résolution de 1 km x 1 km. Les données de température pour le fond du golfe au mois d'août ont été également utilisées (St-Denis *et al*. 2025) comme variable environnementale dans les deux modèles. Les grilles annuelles de température au fond ont une résolution de 2 km x 2 km; elles ont été transformées en grille de 1 km x 1 km avec une interpolation de distance inverse (Pebesma 2004; Gräler *et al*. 2016). Les données de température ont été centrées et réduites, pour l'ensemble des années agrégées.

ANALYSES

L'ensemble des analyses ont été effectuées dans R version 4.5.1 (R Core Team 2025). La librairie sdmTMB version 0.7.4 a été utilisée afin de modéliser la distribution spatiotemporelle de la crevette et des sébastes indépendamment. sdmTMB permet d'estimer des modèles spatiotemporels mixtes, où un ou des effets fixes (c.-à-d. une ou des variables environnementales) sont combinés à un ou des effets aléatoires pour modéliser la variance spatiotemporelle non expliquée par les effets fixes. Plus de détail sur la méthodologie de sdmTMB est disponible dans Anderson *et al*. (2024).

Spécification des modèles

Le maillage est construit avec la fonction *make_mesh* de la librairie sdmTMB, Une coupure (*cutoff*) de 10 km a été utilisée car cette distance est assez faible pour maximiser la précision des prédictions tout en maintenant un temps de calcul raisonnable. Une barrière (*barrier*) correspondant aux lignes côtières a été incluse dans le maillage afin d'empêcher l'influence spatiale d'observations à travers des zones terrestres. Les modèles sdmTMB de densité de crevette nordique et de sébastes incluent un champ spatial et des champs spatiotemporels de type marche aléatoire (*random walk*). Différentes familles de distribution ont été évaluées pour modéliser la variable dépendante (densité, en kg par trait), mais la distribution de Tweedie a été retenue pour chacune des deux espèces après l'examen des résidus. L'effet des variables environnementales a été modélisé avec une fonction lissante (*s*), en laissant la valeur de *k* (nombre de fonctions de base) à 10, soit celle par défaut. Les variables environnementales ont été extraites de la grille de prédiction pour ajuster les modèles afin d'assurer une mise à l'échelle uniforme entre les données d'ajustement du modèle et les données utilisées pour la prédiction spatiale. L'année de l'observation a également été ajoutée dans les effets fixes. Un décalage (*offset*) correspondant à la surface chalutée pour chaque trait en km^2 a été inclus dans les modèles.

Validation croisée

Afin de déterminer si la température au fond améliore les prédictions du modèle, la fonction *sdmTMB_cv* (voir Anderson *et al*. 2026) a été utilisée afin de réaliser une validation croisée entre un modèle contenant uniquement la profondeur, un modèle contenant la profondeur et la température, puis un modèle avec une interaction entre la profondeur et la température au fond. La validation croisée s'est faite sur 20 blocs de données, les mêmes blocs de données ont été utilisés entre chaque modèle. Le résultat de la validation croisée est présenté dans l'annexe A : résultats de la validation croisée. Pour la crevette et les sébastes, la validation croisée suggère qu'inclure une interaction lissée de la température et de profondeur améliore les prédictions.

Diagnostics des modèles

La fonction *sanity* de sdmTMB a été utilisée pour vérifier la convergence du modèle ainsi que les erreurs standards des paramètres du modèle. Les résidus ont également été examinés avec la librairie DHARMa (Hartig 2016) pour vérifier la distribution théorique et prédite des résidus, l'inflation des zéros, ainsi que l'autocorrélation spatiale. Les résidus simulés sont de type 'mle-mvn' (*Maximum likelihood estimate-multivariate normal*). Les figures de diagnostic des modèles spatiotemporels de la crevette et des sébastes sont disponibles dans l'annexe B : diagnostic des modèles spatiotemporels.

Prédictions et indice de chevauchement spatial

Les prédictions ont été effectuées sur une grille contenant la profondeur et la température pour chaque année entre 1990 et 2025. Uniquement les cellules avec des profondeurs de 35 m et plus ont été retenues, ce qui correspond à la profondeur minimale échantillonnée durant le relevé. Les prédictions ont été faites avec un décalage (*offset*) correspondant à la surface balayée par un trait de chalut standard de 15 minutes sur le NGCC *John Cabot*, soit 0,0227 km^2.

Afin de cartographier le chevauchement spatiotemporel de la crevette et des sébastes, la distribution des densités prédites a été divisée en trois catégories, pour chaque espèce séparément, avant d'être croisée, pour créer une matrice de neuf catégories. Les catégories de captures prédites pour les sébastes sont 0-10 kg, 10-390 kg, et 390 kg et plus. Les catégories pour la crevette sont de 0-1 kg, 1-24 kg, et 24 kg et plus. Ces catégories représentent les terciles des captures observées dans le relevé durant les années de plus forte abondance (crevette nordique : 2004-2012, sébastes : 2018-2022). La matrice des catégories de densité permet ainsi de représenter spatialement les endroits où les faibles, moyennes et fortes densités de chacune des crevettes et des sébastes se sont superposées, ainsi que de mesurer le changement temporel de la superficie des faibles, moyennes et fortes densités de chacune des crevettes et des sébastes.

L'indice de collocation locale (équation 1) a été calculé séparément pour chaque année. L'indice de collocation locale évalue la co-occurrence de deux groupes d'organismes en utilisant leur proportion de biomasse respective pour déterminer leur corrélation (Carroll *et al*. 2019). Étant donné que l'indice de collocation locale utilise la proportion annuelle de la biomasse des espèces, l'indice représente uniquement le dégrée de chevauchement spatial pour une année et est insensible aux fluctuations interannuelles de la biomasse absolue.

$$I_j = \frac{\sum_i^n \left(p_{crevette\,ji} * \ p_{sébastes\,ji} \right)}{\sqrt{\sum_i^n p_{crevette\,ji}^2 * \ \sum_i^n p_{sébastes\,ji}^2}} \qquad (1)$$

Où I_j est l'indice de collocation locale pour une année *j*, $p_{crevette\,ji}$ est la proportion de la biomasse de crevette nordique annuelle de l'année *j* dans une cellule *i* et $p_{sébaste\,ji}$ est la proportion de la biomasse de sébaste annuelle de l'année *j* dans une cellule *i*.

RÉSULTATS

PRÉDICTIONS

Crevette

Le modèle spatiotemporel de crevette situe les plus fortes captures de crevette à des profondeurs entre environ 150 et 300 m et à des températures entre 2.5 °C et 7.5°C (Figure 3). Les figures 4, 5, 6 et 7 montrent les prédictions spatiales annuelles pour la crevette nordique. Les densités les plus élevées sont situées au nord de l'île d'Anticosti en 2007 (Figure 5), ainsi que dans l'estuaire en 2021 (Figure 7). La densité de crevette montre de fortes fluctuations dans toutes les zones; elle a augmenté depuis 1990 pour atteindre un sommet au cours des années 2000 dans Anticosti, Esquiman, Sept-Îles, et en 2021 dans Estuaire avant de retomber à des valeurs similaires à celles observées au début des années 1990 dans toutes les zones, à l'exception de l'estuaire (Figure 8). Cependant, l'examen des résidus révèle que 40 % des valeurs prédites les plus élevées sous-estiment les captures observées et que le modèle souffre

de sous-dispersion (voir ANNEXE B : DIAGNOSTIC DES MODÈLES SPATIOTEMPORELS). De plus, les captures maximales prédites par le modèle (environ 13.5 tonnes) outrepassent largement les valeurs maximales de captures réellement observées dans le relevé (valeur maximale de 940 kg [résultat absent des figures]).

Sébastes

Le modèle spatiotemporel des sébastes situe les plus fortes captures de sébastes à environ 200 m et à environ 6 °C (Figure 9). Les figures 10, 11, 12 et 13 montrent les prédictions spatiales annuelles pour les sébastes. Les valeurs prédites de capture de sébastes ont connu des fluctuations importantes au cours de la période d'analyse, chutant en 1992, avant de rebondir à partir de 2013. Dans les années récentes, les agrégations de sébastes les plus importantes sont situées dans Esquiman ainsi que dans la zone de Sept-Îles, sur le talus du plateau madelinien (Figure 13).

La densité des sébastes a fortement chuté du début des années 1990 dans Anticosti, Esquiman et Sept-Îles et est demeurée très faible jusqu'en 2011, où la biomasse a fortement augmenté pour atteindre un sommet en 2019, avant de redescendre légèrement. Dans l'estuaire, la densité de sébastes est demeurée beaucoup plus faible que dans les autres zones (Figure 8). L'examen des résidus ne révèle pas d'enjeu majeur pour le modèle spatiotemporel de sébaste (voir ANNEXE B : DIAGNOSTIC DES MODÈLES SPATIOTEMPORELS).

CHEVAUCHEMENT DES CREVETTES NORDIQUES ET DES SÉBASTES

Cartes de chevauchement

Les figures 14, 15, 16 et 17 montrent le chevauchement spatiotemporel des crevettes nordiques et des sébastes. Dans la zone Estuaire, les densités de crevette ont montré de fortes fluctuations de couverture spatiale. La superficie de fortes densités de sébastes est restée très faible dans l'estuaire; une faible superficie de forte densité de crevette et de sébastes est observée de 2015 à 2017 (Figure 18). La zone Estuaire doit cependant être analysée avec prudence, car il s'agit de la zone dont la qualité des prédictions des modèles spatiotemporels semble la plus basse (voir ANNEXE B : DIAGNOSTIC DES MODÈLES SPATIOTEMPORELS), que certaines strates y ont été ajoutées seulement à partir de 2008, et que la couverture spatiale du relevé y a particulièrement fluctué au cours du relevé (Tableau 1).

En ce qui concerne la zone de Sept-Îles, les fortes densités de crevette et de sébastes se sont chevauchées principalement de 2013 à 2019 (Figure 19). Les années 1994 à 2013 sont marquées par une grande superficie de fortes densités de crevettes nordiques exempte de sébastes dans la zone de Sept-Îles. La grande majorité de la couverture spatiale des fortes densités de sébastes s'est concentrée dans des zones de faible densité de crevette nordique.

Dans Anticosti, les fortes densités de crevette et de sébastes se sont superposées de 1990 à 1993, puis plus significativement à partir de 2014 (Figure 20). Les années 1993 à 2014 sont marquées par de fortes densités de crevettes et de très faibles densités de sébastes dans Anticosti. La majorité de la superficie qui était couverte par de fortes densités de sébastes à partir de 2014 était de densité faible ou moyenne pour la crevette nordique; les fortes densités des crevettes et sébastes se sont superposées sur une superficie relativement faible.

Dans la zone Esquiman, le début des années 1990 comportait une faible superficie de chevauchement de forte densité de crevette et de sébastes (Figure 21). La période de 1995 à 2013 est marquée par de forte densité de crevette et de faible densité de sébastes. Depuis 2015, la superficie de la densité de sébastes a augmenté de façon marquée; cette hausse a été

plus importante dans des zones de densité moyenne de crevette, et dans des proportions similaires des zones de faible et de forte densité de crevette.

Indice de collocation locale

L'indice de collocation indique que le chevauchement spatial de la crevette nordique et du sébaste a connu d'importantes fluctuations au cours de la période d'étude. Dans Estuaire, à la suite d'un chevauchement relativement élevé entre 1990 et 2010, l'indice de chevauchement a décliné graduellement pour atteindre un plancher en 2020. Depuis, l'indice de chevauchement y remonte graduellement pour revenir vers sa moyenne historique. Dans la zone de Sept-Îles, le chevauchement a atteint un sommet historique en 2014-2015, avant de chuter de façon marquée pour atteindre la plus faible valeur de la série en 2020, alors que la densité moyenne de sébaste était parmi les valeurs les plus élevées observées. L'indice de chevauchement y demeure très faible depuis.

Dans la zone d'Anticosti, le chevauchement a connu deux sommets, l'un entre 1990-1992, et un second en 2013-2015, avant de chuter brusquement en 2017, et de remonter à un niveau intermédiaire depuis (Figure 22). Dans la zone d'Esquiman, l'indice de collocation locale indique un chevauchement relativement important en 1990-1992, suivi d'une brusque diminution avant d'effectuer une hausse graduelle jusqu'à 2025; l'indice en 2025 est parmi les valeurs les plus élevées de la période d'étude. La zone d'Esquiman est la seule où de fortes valeurs d'indice de collocation coïncident temporellement avec les fortes valeurs de densité de sébaste.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les densités et le chevauchement spatial de la crevette nordique et des sébastes ont connu des fluctuations importantes durant la période étudiée. À l'échelle du GSL, le début des années 1990 est caractérisé par des densités de sébastes importantes, de faibles densités de crevette nordique, et un chevauchement spatial important. Le déclin du sébaste en 1993 est suivi d'une hausse généralisée des densités de crevette et d'une diminution importante du chevauchement spatial dans le golfe du Saint-Laurent. L'arrivée des importantes cohortes de sébaste de 2011-2013 s'est traduite par une hausse du chevauchement spatial des deux espèces, une hausse très marquée dans la densité des sébastes, et implicitement une hausse probable du potentiel de prédation.

Depuis, les tendances du chevauchement spatial fluctuent selon les zones. Dans Estuaire, malgré un chevauchement spatial en hausse tel qu'indiqué par l'indice de collocation locale, les très faibles densités de sébastes estimées limitent vraisemblablement l'impact que pourraient avoir la prédation par les sébastes sur les stocks de crevette nordique. Après un sommet de chevauchement en 2014-2015 dans Sept-Îles, les deux espèces occupent maintenant des superficies distinctes. Dans Anticosti, après avoir brusquement chuté en 2017, le chevauchement spatial affiche une tendance à la hausse. Dans Esquiman, le chevauchement spatial demeure parmi les valeurs les plus élevées de la série historique.

La pression de prédation potentielle des sébastes sur la crevette nordique est un thème sous-jacent à l'analyse présentée dans ce document. Cependant, plusieurs limitations empêchent d'établir un lien direct entre le chevauchement spatial et la prédation effective. L'absence d'observations durant d'autres mois de l'année limite la compréhension des variations saisonnières du chevauchement de ces espèces. De plus, l'estimation de la pression de prédation est limitée par l'estimation des variations dans la consommation individuelle de crevette par les sébastes, qui peut varier en fonction de la densité de la crevette et du sébaste (Boussens-Dumon *et al*. 2025), ainsi que par sa taille (Brown-Vuillemin *et al*. 2022). De plus amples efforts seront nécessaires afin d'intégrer ces variables à un modèle qui permettrait de

suivre précisément la pression de prédation du sébaste sur la crevette nordique (voir Lindmark *et al*. (2025) pour un exemple). Par ailleurs, le modèle spatiotemporel de crevette nordique affiche toujours des problèmes visibles dans le diagnostic des résidus, malgré l'examen de différentes formulations de modèle qui n'a pas permis d'obtenir un meilleur ajustement (non présentées dans ce document). De plus amples efforts seraient également nécessaires afin d'améliorer la qualité des prédictions du modèle de crevette. La crevette nordique constitue également la proie de plusieurs prédateurs, notamment la morue franche (*Gadus morhua*) et le flétan du Groenland (*Reinhardtius hippoglossoides*), dont les populations ont connu d'importantes fluctuations durant la période d'étude. De futurs travaux de modélisation pourraient incorporer ces prédateurs pour mieux comprendre les dynamiques de la crevette. Quoi qu'il en soit, avec l'absence de recrutement, la croissance limitée et la forte mortalité observée pour le sébaste dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (MPO 2025b), il est probable que le potentiel de prédation par les sébastes continue de diminuer à l'échelle du golfe.

RÉFÉRENCES CITÉES

Anderson, S.C., Ward, E.J., English, P.A., Barnett, L.A.K., and Thorson, J.T. 2024. sdmTMB: An R Package for Fast, Flexible, and User-Friendly Generalized Linear Mixed Effects Models with Spatial and Spatiotemporal Random Fields. bioRxiv: 2022.03.24.485545. Cold Spring Harbor Laboratory. doi:10.1101/2022.03.24.485545.

Anderson, S.C., Ward, E.J., English, P.A., Barnett, L.A.K., and Thorson, J.T. 2026, February 6. Cross-validation for model evaluation and comparison. sdmTMB. [accessed 8 February 2026].

Benoît, H., Yin, Y., and Bourdages, H. 2024. Results of comparative fishing between the CCGS Teleost and CCGS John Cabot in the Estuary and Northern Gulf of St. Lawrence in 2021 and 2022. https://science-ouverte.canada.ca/items/47f5de86-139d-4b7b-9db0-16f54a0af560 [accessed 11 February 2026].

Bourdages, H., Savard, L., Archambault, D., and Valois, S. 2007. Results from the August 2004 and 2005 comparative fishing experiments in the northern Gulf of St. Lawrence between the CCGS Alfred Needler and the CCGS Teleost. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci 2750: 57.

Boussens-Dumon, G., Pedersen, E., Senay, C., Robert, D., and Deslauriers, D. 2025. Functional response shift and opportunistic predation of Northern Shrimp (*Pandalus borealis*) by Redfish (*Sebastes sp*.) under prey rarefaction and environmental change. Authorea Preprints. Authorea. doi:10.22541/au.173621921.15248273/v3.

Brown-Vuillemin, S., Chabot, D., Nozères, C., Tremblay, R., Sirois, P., and Robert, D. 2022. Diet composition of Redfish (*Sebastes sp*.) during periods of population collapse and massive resurgence in the Gulf of St. Lawrence. Front. Mar. Sci. 9: 963039. Frontiers Media S.A. doi:10.3389/FMARS.2022.963039.

Carroll, G., Holsman, K.K., Brodie, S., Thorson, J.T., Hazen, E.L., Bograd, S.J., Haltuch, M.A., Kotwicki, S., Samhouri, J., and Spencer, P. 2019. A review of methods for quantifying spatial predator–prey overlap. Global Ecology and Biogeography. 28(11): 1561–1577. Wiley Online Library.

Chamberland, J.-M., Bourdages, H., Desgagnés, M., Galbraith, P., Isabel, L., Ouellette-Plante, J., Roux, M.-J., Scallon-Chouinard, P.-M., et Senay, C. 2025. Résultats préliminaires du relevé écosystémique d'août 2024 dans l'estuaire et le nord du golfe du Saint-Laurent. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2025/032. iv + 102 p.

Gräler, B., Pebesma, E., and Heuvelink, G. 2016. Spatio-temporal interpolation using gstat. R Journal. 8(1): 204–218. Technische Universitaet Wien. doi:10.32614/rj-2016-014.

Hartig, F. 2016. DHARMa: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models. CRAN: Contributed Packages. doi:10.32614/CRAN.PACKAGE.DHARMA.

Lindmark, M., Griffiths, C.A., Bartolino, V., Thunell, V., Maioli, F., Anderson, S.C., Belgrano, A., Casini, M., Nadolna-Ałtyn, K., and Pawlak, J. 2025. Weak effects of local prey density and spatial overlap on predation intensity in a temperate marine ecosystem. Ecological Applications. 35(7): e70136. Wiley Online Library.

MPO. 2023. Révision de l'approche de précaution et évaluation des stocks de crevette nordique de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent en 2023. Secr. can. des avis sci. du MPO. Rép. des Sci 2023/044.

MPO. 2025a. Mise à jour de l'état des stocks de crevette nordique (*Pandalus borealis*) de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent en 2024. Secr. can. des avis sci. du MPO. Rép. des Sci. 2025/002.

MPO. 2025b. Évaluation des stocks des sébastes (*Sebastes fasciatus* et *Sebastes mentella*) des unités 1 et 2 en 2024. Secr. can. des avis sci. du MPO. Avis sci. 2025/014.

Ouellette-Plante, J., Chabot, D., Nozères, C., and Bourdages, H. 2020. Diets of demersal fish from the CCGS *Teleost* ecosystemic surveys in the estuary and northern Gulf of St. Lawrence, August 2015-2017. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 3383: v + 121 p.

Pebesma, E.J. 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. Comput. Geosci. 30(7): 683–691. Pergamon. doi:10.1016/j.cageo.2004.03.012.

R Core Team. 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Senay, C., Rousseau, S., Brûlé, C., Chavarria, C., Isabel, L., Parent, G.J., Chabot, D., et Duplisea, D. 2023. État des stocks des sébastes (*Sebastes mentella* et *S. fasciatus*) de l'unité 1 en 2021. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2023/036. xii + 130 p.

St-Denis, B., Roy, V., Juillet, C., and Galbraith, P.S. 2025. Développement de l'approche écosystémique de la gestion des pêches en milieu côtier (région du Québec) : accroître l'acquisition et l'accessibilité de données océanographiques. Rapp. tech. can. hydrogr. sci. océan. 395 : ix + 42 p.

TABLEAUX

Tableau 1 : Résumé des captures brutes (kg, en équivalent d'un trait standard du NGCC John Cabot) de crevette nordique et de sébastes par année dans la zone d'évaluation de stocks de la crevette nordique Estuaire.

Année	Nombre de traits aléatoires réussis	Crevette nordique		Sébaste spp.	
		Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum
1990	12	7.1	24.1	3.1	8.7
1991	11	5.8	20.8	2.3	8.5
1992	11	4.6	35.6	4.4	13.4
1993	12	5.5	34.4	1.0	7.3
1994	8	9.1	52.6	1.5	3.2
1995	18	1.4	9.4	0.5	2.5
1996	17	13.8	80.7	0.4	1.6
1997	16	3.0	26.3	0.6	5.8
1998	14	2.5	12.9	1.6	10.2
1999	21	12.9	98.5	1.0	15.7
2000	17	8.2	30.0	0.6	1.8
2001	19	4.7	27.0	2.8	42.8
2002	12	2.4	14.8	8.7	91.6
2003	11	6.4	49.5	0.8	3.3
2004	9	14.9	78.1	6.3	39.5
2005	24	8.5	42.8	1.9	24.7
2006	12	3.6	11.5	2.8	26.0
2007	12	2.7	13.9	0.4	2.3
2008	21	28.1	133.6	0.4	1.8
2009	23	26.3	104.1	0.5	6.9
2010	24	22.0	194.8	1.1	12.2
2011	21	27.1	189.8	8.2	120.0
2012	19	23.4	97.1	0.3	1.4
2013	20	22.2	113.6	3.3	13.5
2014	15	28.6	102.6	6.2	47.5
2015	14	12.9	45.8	17.7	97.1
2016	15	33.2	192.1	66.7	512.9
2017	14	7.6	41.8	80.1	273.7
2018	17	21.8	259.0	43.2	238.9
2019	10	30.9	163.6	68.9	430.4
2020	10	6.5	42.3	9.4	35.8
2021	26	58.0	383.5	3.0	16.7
2022	32	73.0	742.0	2.1	18.6
2023	0	-	-	-	-
2024	15	39.2	248.4	0.2	1.1
2025	16	25.3	255.0	0.6	5.2

Tableau 2 : Résumé des captures brutes (kg, en équivalent d'un trait standard du NGCC John Cabot) de crevette nordique et de sébastes par année dans la zone d'évaluation de stocks de la crevette nordique Sept-Îles.

Année	Nombre de traits aléatoires réussis	Crevette nordique		Sébaste spp.	
		Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum
1990	86	12.8	167.6	209.5	4324.7
1991	96	20.2	279.4	77.8	1301.3
1992	86	7.1	89.9	47.3	330.3
1993	69	10.2	66.2	61.8	2979.8
1994	71	14.8	115.1	10.6	81.7
1995	73	19.7	117.2	19.2	239.0
1996	92	26.1	186.5	9.3	108.2
1997	74	29.6	169.3	11.7	84.8
1998	69	29.0	161.5	41.6	2247.4
1999	84	27.1	146.5	11.1	123.3
2000	72	41.7	160.1	14.2	174.4
2001	78	36.1	271.4	12.2	147.2
2002	73	40.8	341.1	7.9	151.8
2003	62	91.9	860.2	89.1	4355.8
2004	52	56.0	254.7	16.0	236.2
2005	123	40.8	228.2	15.7	156.4
2006	66	38.4	251.7	17.0	231.8
2007	72	48.9	420.4	20.3	558.3
2008	66	40.5	242.6	48.8	1808.7
2009	68	27.3	255.4	14.3	440.3
2010	53	35.0	168.5	28.4	927.7
2011	59	22.6	91.3	17.3	139.3
2012	64	29.8	319.2	19.9	127.2
2013	62	23.0	277.0	59.1	2009.5
2014	67	29.6	334.9	74.8	688.7
2015	72	25.1	167.5	133.0	2322.5
2016	62	19.9	272.3	335.9	2416.0
2017	69	8.4	102.2	449.9	4729.0
2018	51	6.6	65.2	452.1	2518.4
2019	51	8.4	124.5	663.3	4892.9
2020	56	13.1	119.9	814.1	21329.7
2021	62	7.9	81.8	556.8	3908.3
2022	121	1.8	52.3	362.2	4889.4
2023	43	2.4	33.6	687.0	11062.2
2024	61	4.4	57.6	397.6	3163.2
2025	47	6.3	74.3	495.6	11205.0

Tableau 3 : Résumé des captures brutes (kg, en équivalent d'un trait standard du NGCC John Cabot) de crevette nordique et de sébastes par année dans la zone d'évaluation de stocks de la crevette nordique Anticosti.

Année	Nombre de traits aléatoires réussis	Crevette nordique		Sébaste spp.	
		Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum
1990	37	17.8	68.0	171.5	1013.8
1991	49	13.9	43.5	205.2	2359.7
1992	51	13.3	118.8	261.2	7177.0
1993	44	10.0	87.1	54.2	823.2
1994	35	7.5	39.1	25.5	420.0
1995	35	17.2	100.6	10.4	73.0
1996	39	33.5	185.5	14.1	119.6
1997	33	26.6	125.1	41.9	1159.0
1998	50	21.3	61.5	9.3	115.1
1999	47	21.6	86.2	7.5	51.4
2000	49	28.8	133.5	8.9	97.6
2001	9	10.3	20.9	13.3	61.5
2002	25	32.5	126.6	12.7	122.7
2003	25	47.5	263.6	13.1	141.9
2004	18	41.6	307.0	3.3	19.4
2005	65	41.5	234.4	14.3	143.6
2006	41	27.7	203.9	16.2	181.9
2007	39	42.4	409.3	19.4	155.6
2008	40	15.9	66.6	34.5	821.2
2009	33	30.9	110.3	8.8	95.0
2010	31	26.2	123.6	15.6	147.9
2011	29	10.7	71.7	13.9	105.3
2012	30	13.3	60.9	18.2	219.0
2013	24	19.5	121.2	12.3	92.7
2014	31	21.1	157.6	59.9	447.0
2015	38	24.6	256.9	135.2	795.2
2016	35	12.0	88.8	509.3	3236.7
2017	35	16.8	131.1	687.8	4932.0
2018	39	9.2	82.4	771.4	4453.8
2019	23	14.2	86.0	1123.4	4169.5
2020	21	13.5	70.9	450.6	3450.2
2021	34	10.4	155.8	750.1	5583.1
2022	86	4.9	60.2	673.3	4995.9
2023	25	3.8	25.0	546.8	2996.3
2024	31	7.9	33.7	468.2	3552.9
2025	35	14.3	92.9	280.2	2714.2

Tableau 4 : Résumé des captures brutes (kg, en équivalent d'un trait standard du NGCC John Cabot) de crevette nordique et de sébastes par année dans la zone d'évaluation de stocks de la crevette nordique Esquiman.

Année	Nombre de traits aléatoires réussis	Crevette nordique		Sébaste spp.	
		Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum
1990	49	13.4	105.1	264.4	2203.2
1991	86	6.9	67.7	161.5	2724.9
1992	86	4.7	59.2	85.6	616.0
1993	79	5.4	42.3	29.3	501.6
1994	55	5.3	50.7	120.0	5198.1
1995	51	10.9	111.9	26.1	214.4
1996	63	11.3	125.3	26.7	356.9
1997	56	25.9	390.7	34.4	443.2
1998	64	14.7	121.7	20.2	249.4
1999	63	22.0	336.7	21.5	417.2
2000	64	19.4	218.6	27.4	210.6
2001	70	17.4	129.6	30.2	1102.7
2002	54	6.4	105.7	43.4	1060.7
2003	59	33.5	241.3	27.4	257.8
2004	49	23.6	245.2	12.5	228.1
2005	131	16.2	257.8	41.2	1031.5
2006	65	23.0	284.3	46.9	991.5
2007	55	15.0	109.4	54.8	988.4
2008	69	15.5	257.1	24.3	229.0
2009	50	21.0	125.6	9.6	70.2
2010	34	26.3	195.9	8.6	38.5
2011	52	23.9	161.5	11.7	93.4
2012	66	17.4	402.8	11.9	131.9
2013	41	23.2	170.8	45.1	836.3
2014	66	17.2	187.3	53.0	667.9
2015	60	13.0	171.5	72.5	862.1
2016	49	14.4	208.9	263.6	2610.6
2017	49	8.8	63.6	532.0	4847.0
2018	55	9.8	160.9	765.7	6653.0
2019	38	19.2	158.8	1271.2	11416.7
2020	54	6.7	94.4	459.7	5907.4
2021	42	10.6	68.8	688.3	4811.9
2022	109	8.5	111.7	710.1	11163.2
2023	38	7.4	65.2	582.0	3998.2
2024	53	4.0	39.4	375.7	2221.3
2025	54	5.6	57.0	364.0	2040.4

FIGURES

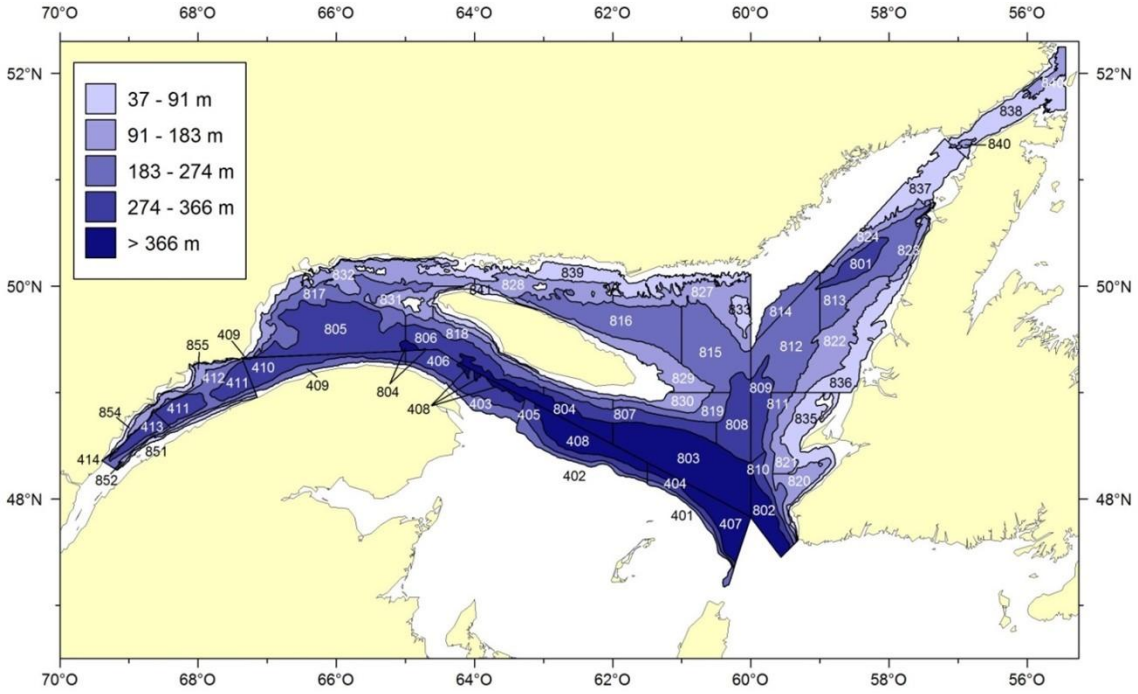

Figure 1 : Schéma de stratification utilisée pour le relevé de recherche sur les poissons de fond et la crevette dans l'estuaire et le nord du golfe du Saint-Laurent.

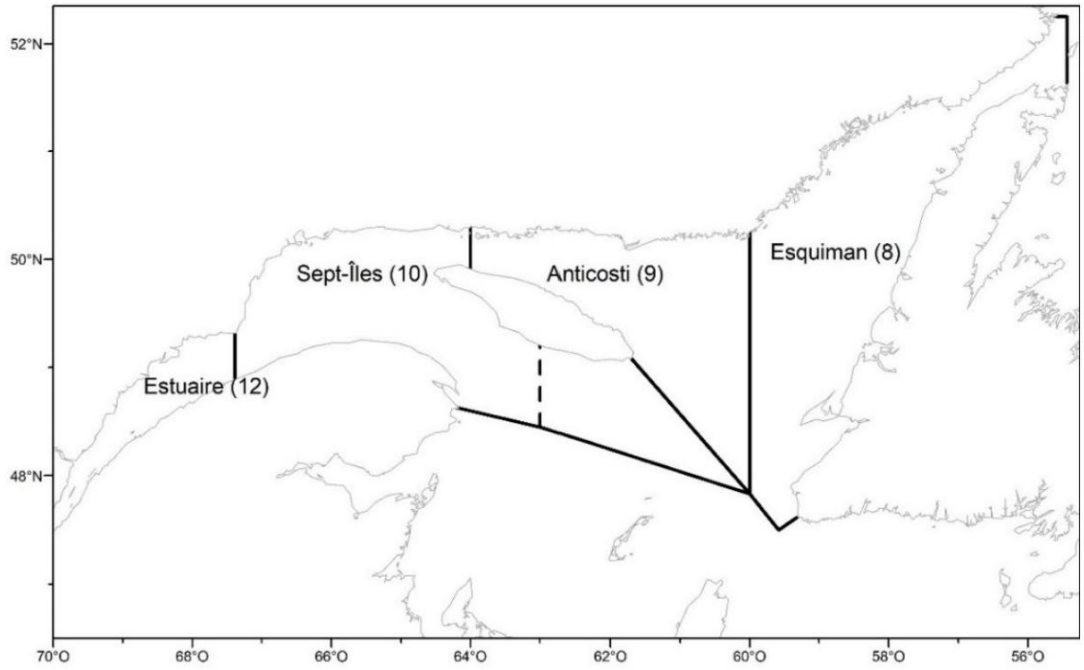

Figure 2 : Délimitations des zones d'évaluation des stocks de crevette nordique (ligne continue). La ligne pointillée au sud de l'Île d'Anticosti correspond à l'ancienne délimitation séparant les zones Sept-Îles et Anticosti. Tirée de MPO (2023).

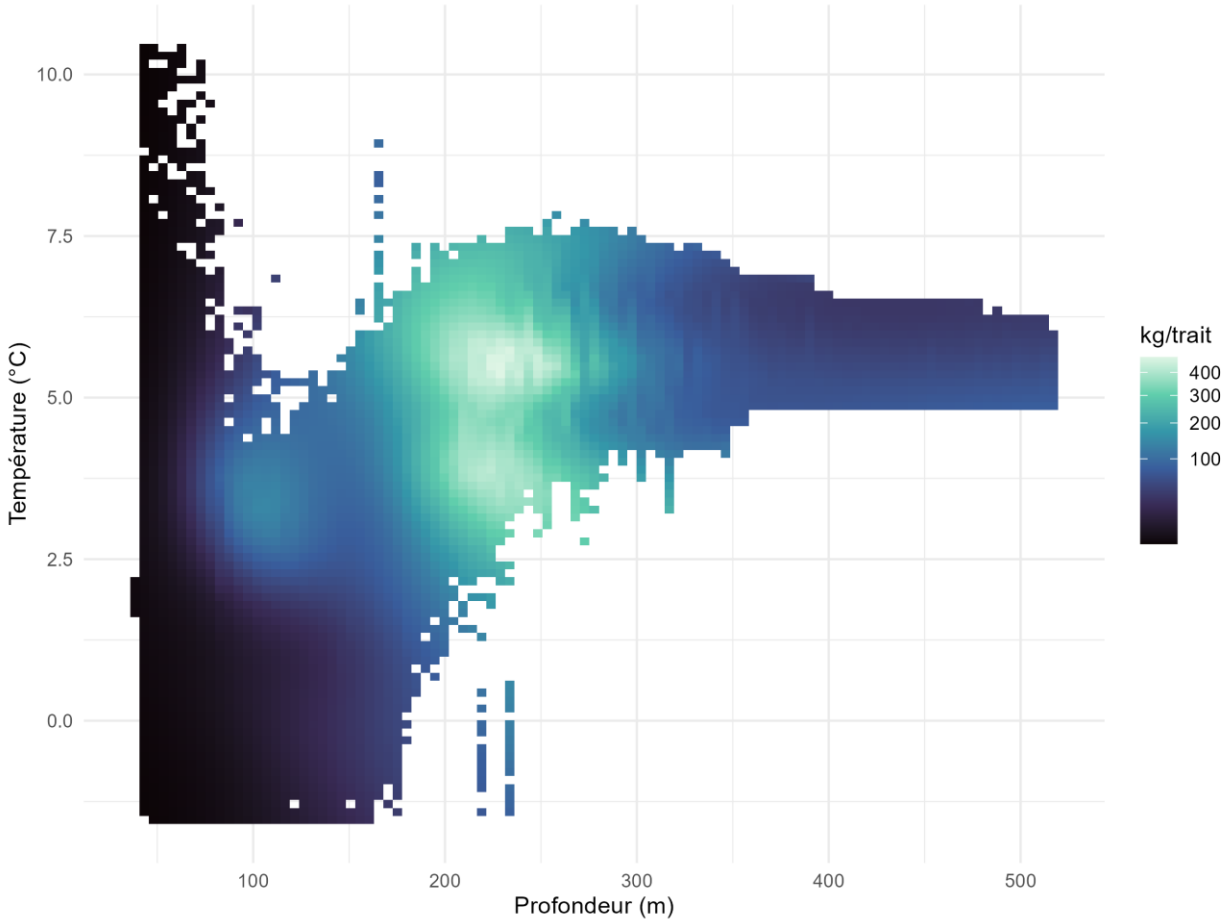

Figure 3 : Effet de la profondeur et de la température sur la densité de crevette selon le modèle. Uniquement les combinaisons existantes de profondeur et de température observées dans la grille de prédiction ont été retenues.

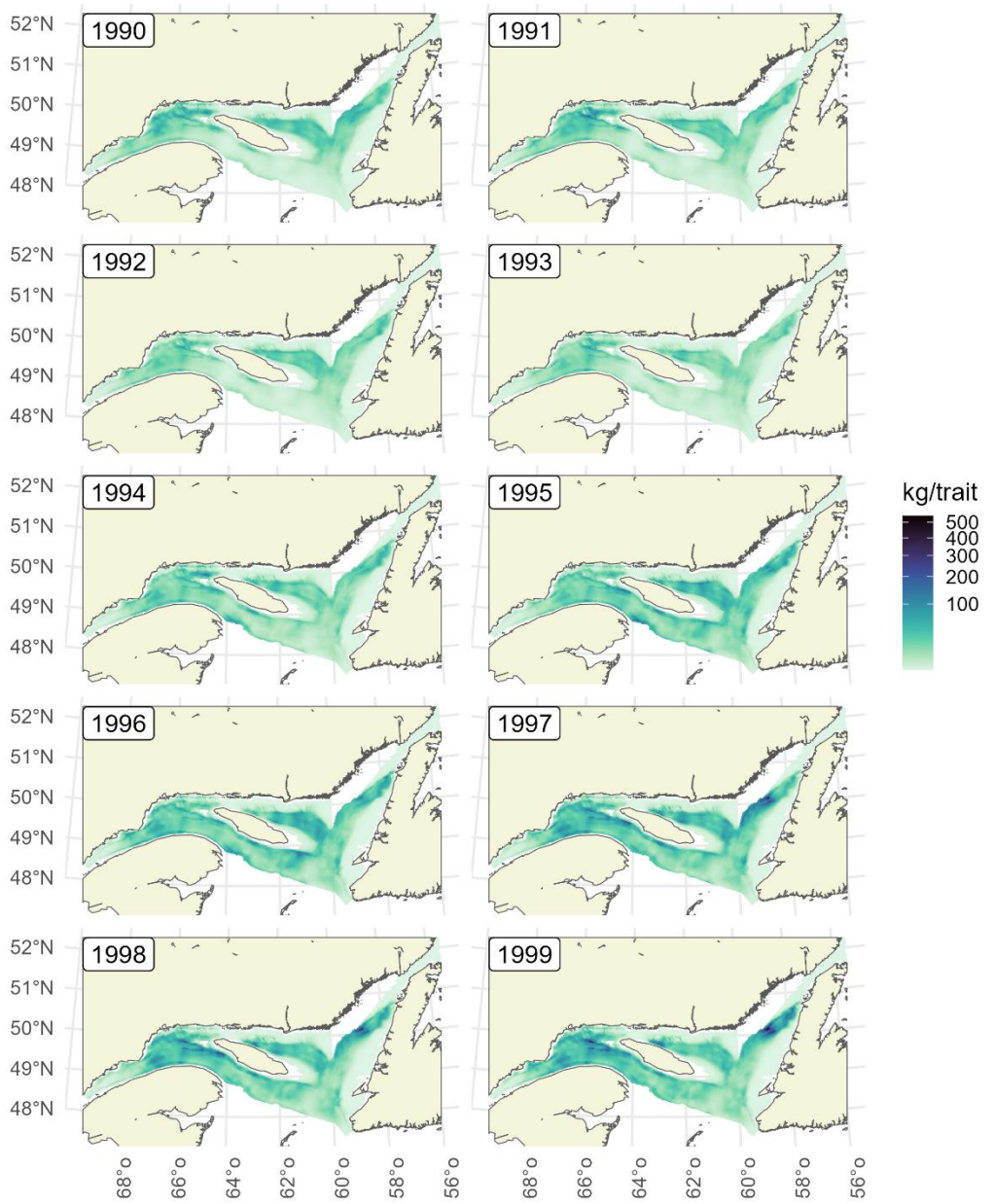

Figure 4 : Prédictions des densités de crevette nordique du modèle spatiotemporel pour le golfe du Saint-Laurent, en août, entre 1990 et 1999.

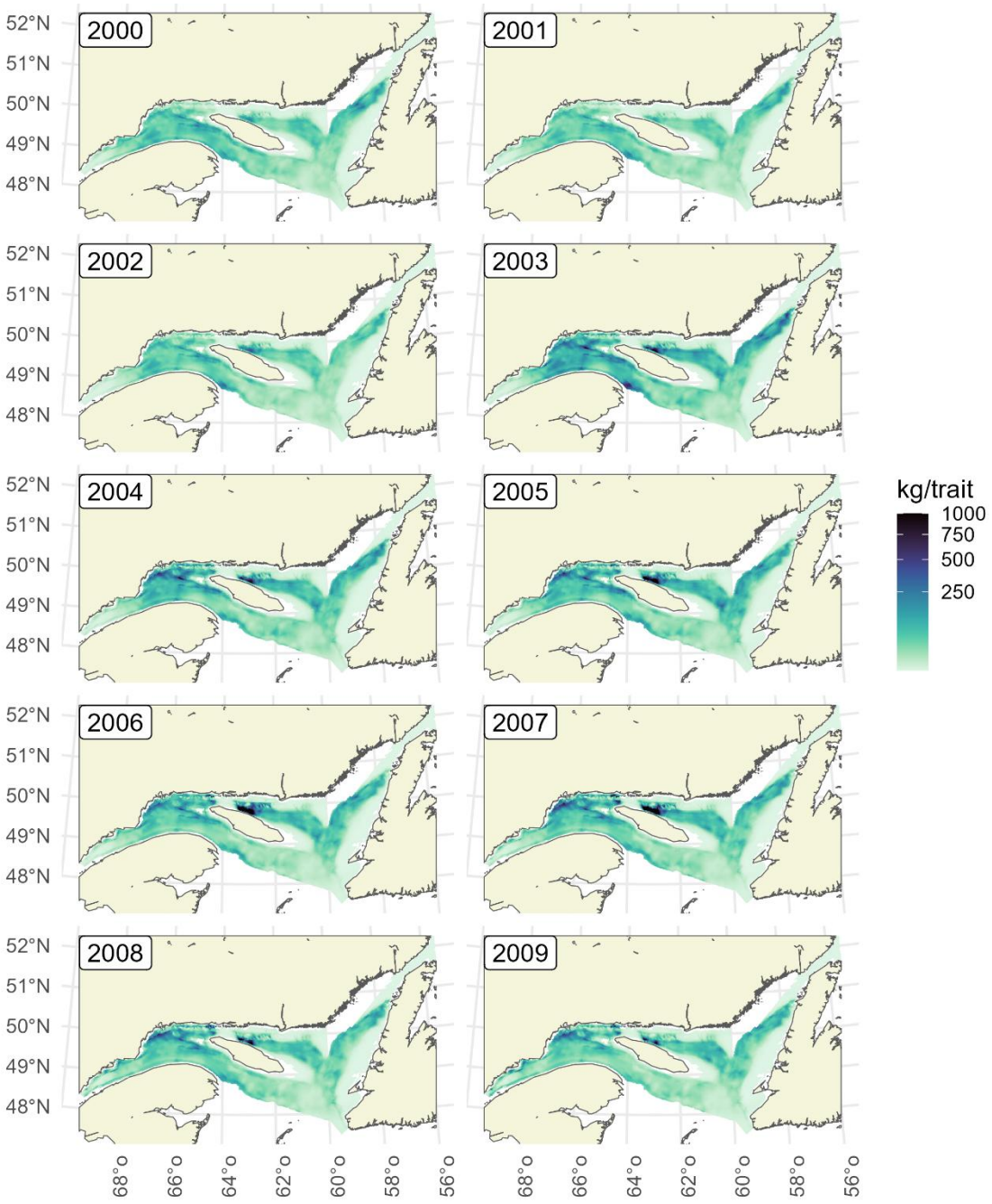

Figure 5 : Prédictions des densités de crevette nordique du modèle spatiotemporel pour le golfe du Saint-Laurent, en août, entre 2000 et 2009. Les valeurs de plus de 1000 kg ont été bornées à 1000 kg pour améliorer la visibilité des valeurs à l'échelle de la zone d'étude.

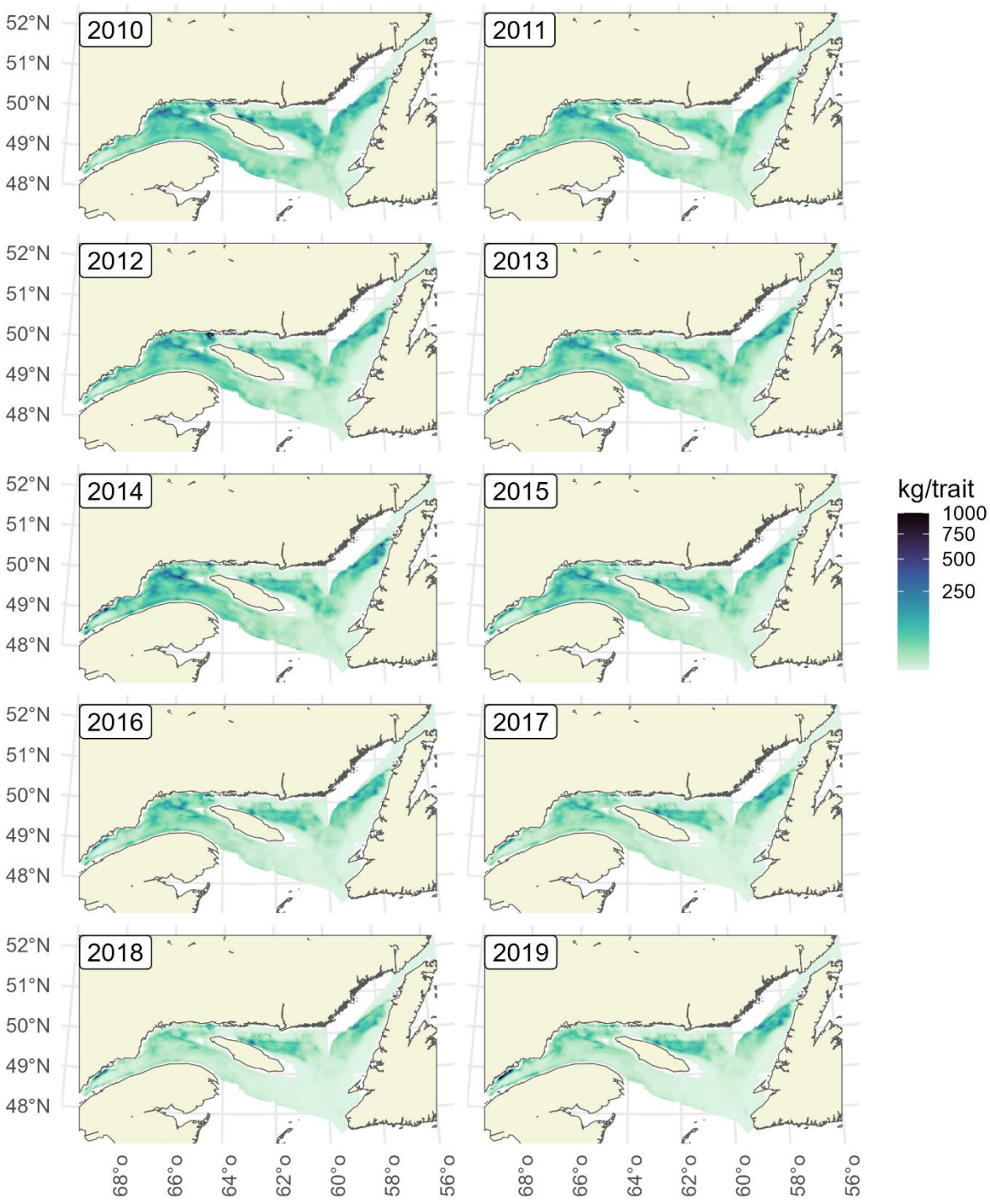

Figure 6 : Prédictions des densités de crevette nordique du modèle spatiotemporel pour le golfe du Saint-Laurent, en août, entre 2010 et 2019. Les valeurs de plus de 1000 kg ont été bornées à 1000 kg pour améliorer la visibilité des valeurs à l'échelle de la zone d'étude.

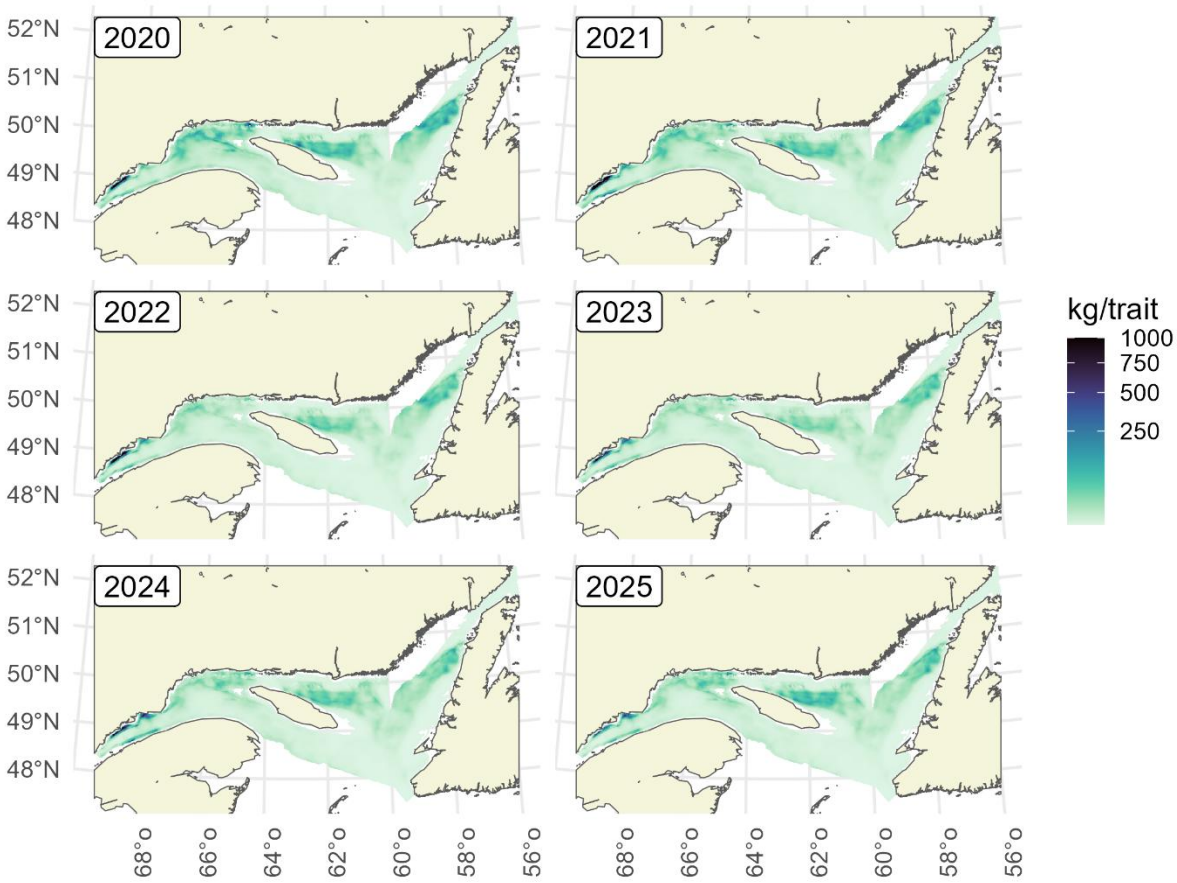

Figure 7 : Prédictions des densités de crevette nordique du modèle spatiotemporel pour le golfe du Saint-Laurent, en août, entre 2020 et 2025. Les valeurs de plus de 1000 kg ont été bornées à 1000 kg pour améliorer la visibilité des valeurs à l'échelle de la zone d'étude.

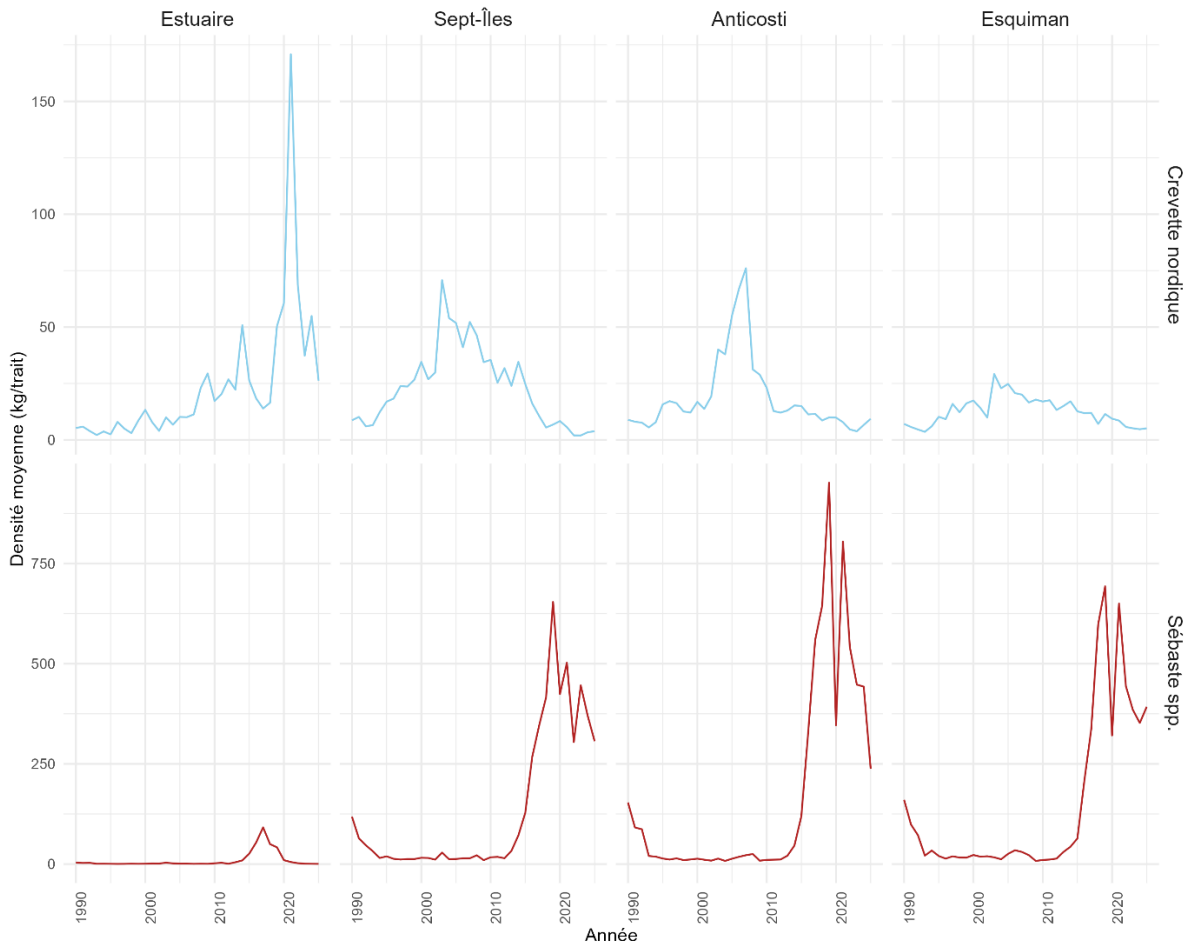

Figure 8 : Densité moyenne de la crevette nordique et des sébastes dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent entre 1990 et 2025, selon la zone d'évaluation de stocks de crevette nordique.

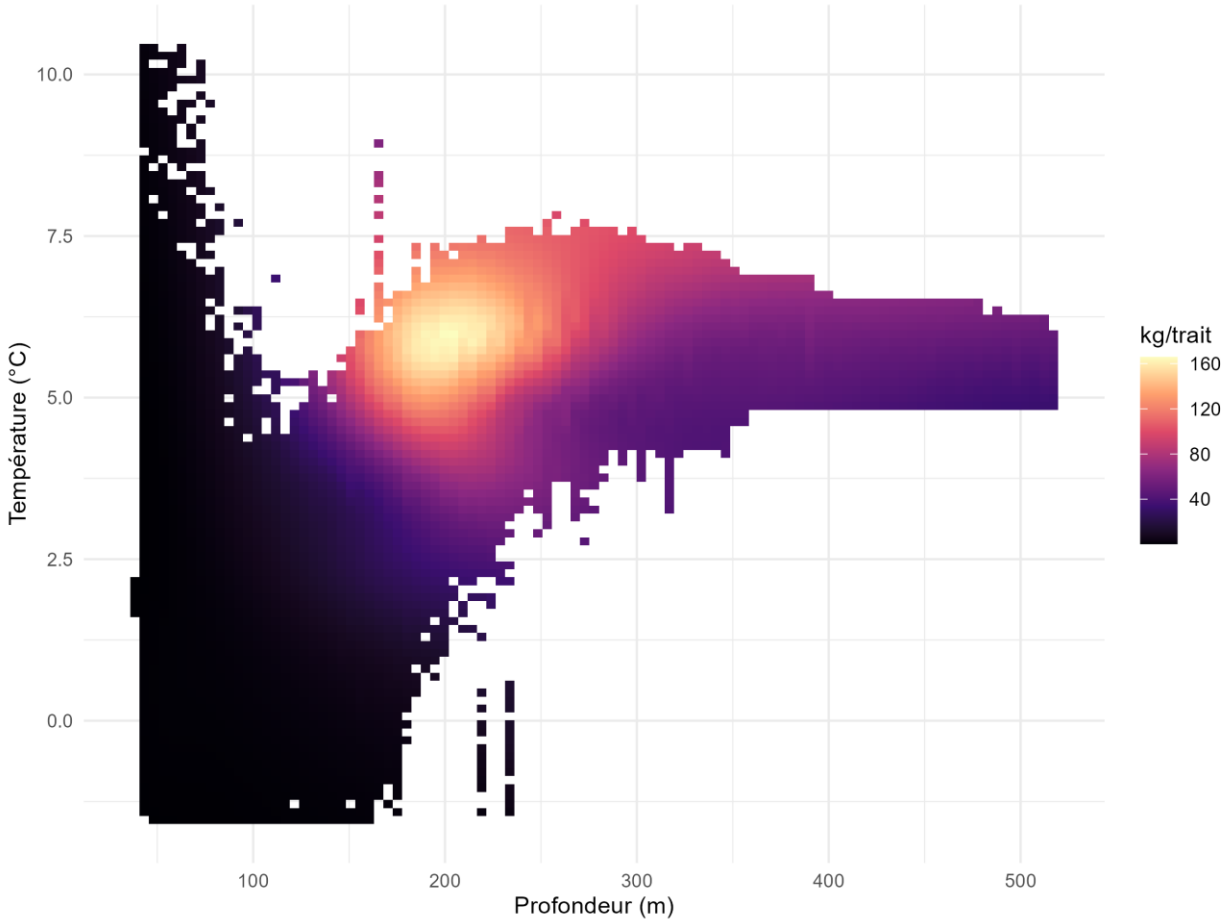

Figure 9 : Effet de la profondeur et de la température sur la densité des sébastes selon le modèle. Uniquement les combinaisons existantes de profondeur et de température observées dans la grille de prédiction ont été retenues.

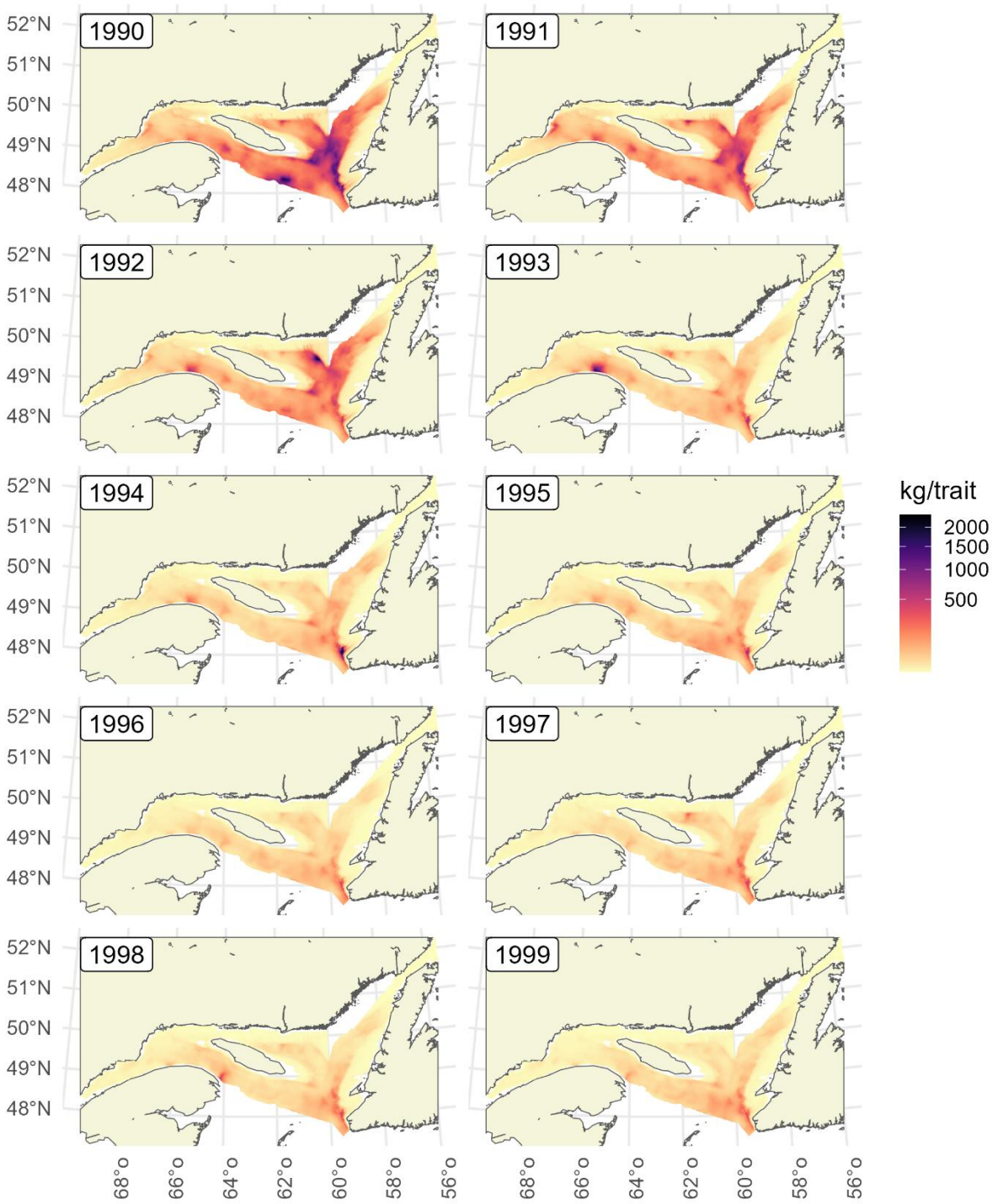

Figure 10 : Prédictions des densités de sébastes du modèle spatiotemporel pour le golfe du Saint-Laurent, en août, entre 1990 et 1999.

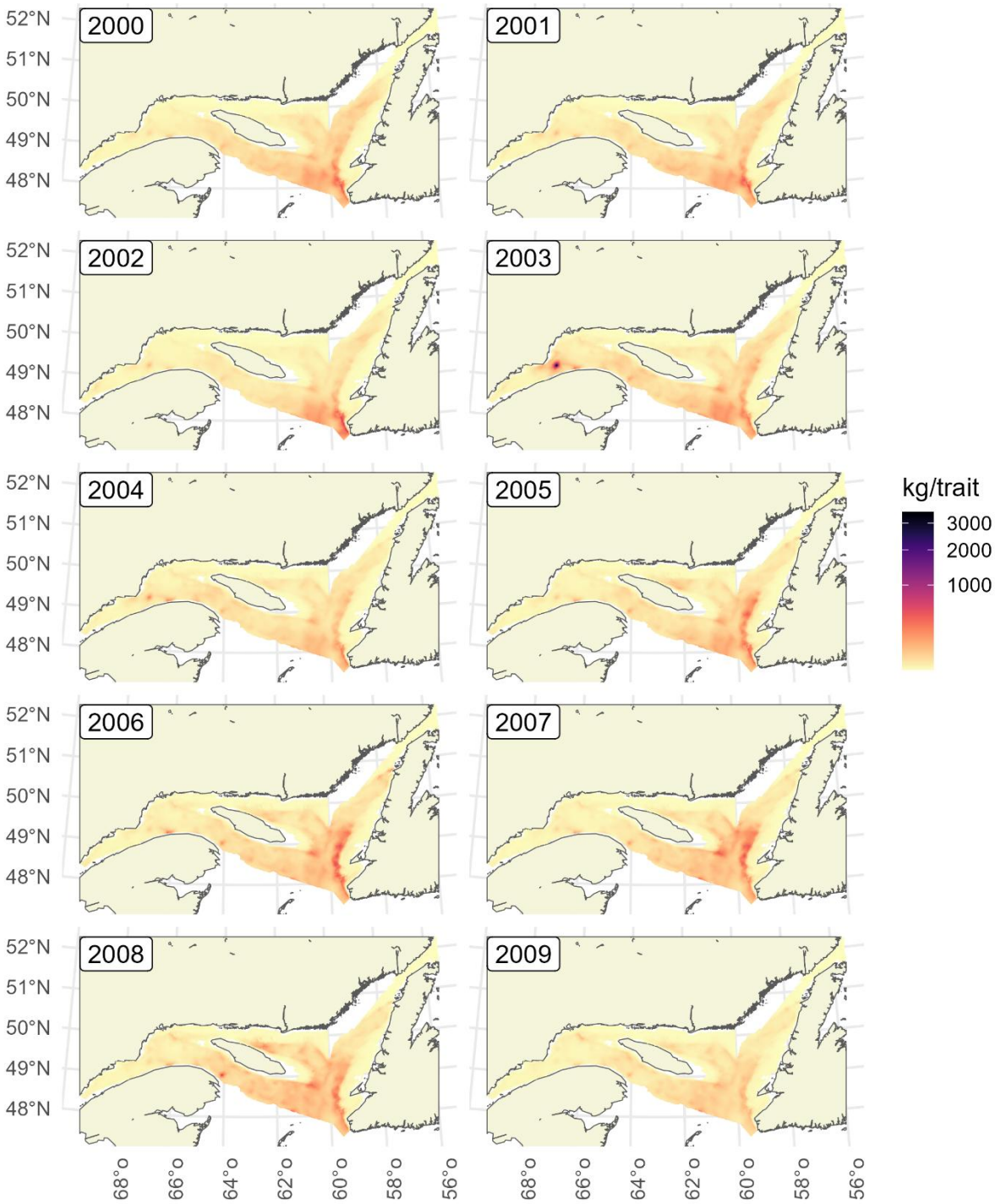

Figure 11 : Prédictions des densités de sébastes du modèle spatiotemporel pour le golfe du Saint-Laurent, en août, entre 2000 et 2009.

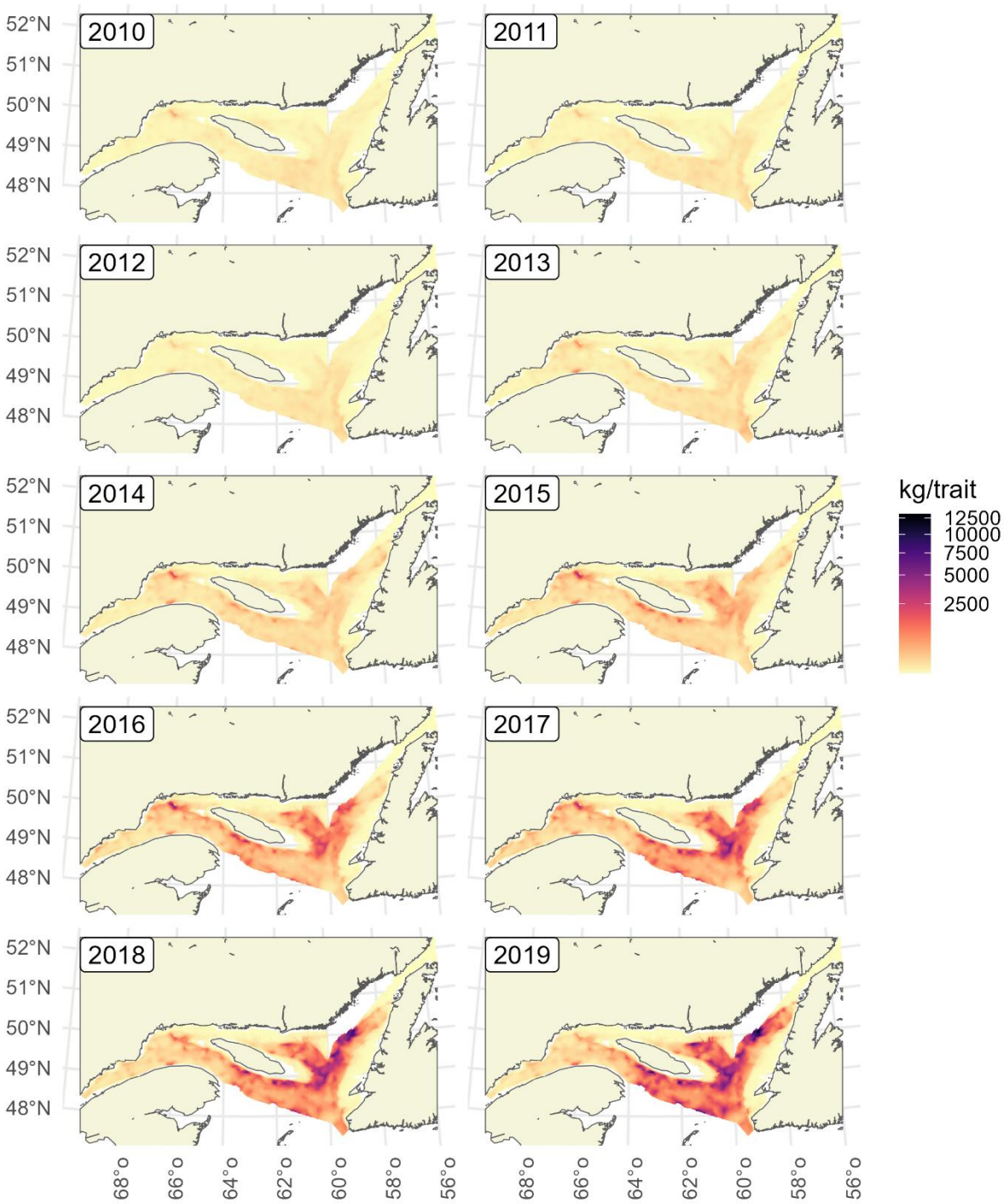

Figure 12 : Prédictions des densités de sébastes du modèle spatiotemporel pour le golfe du Saint-Laurent, en août, entre 2010 et 2019.

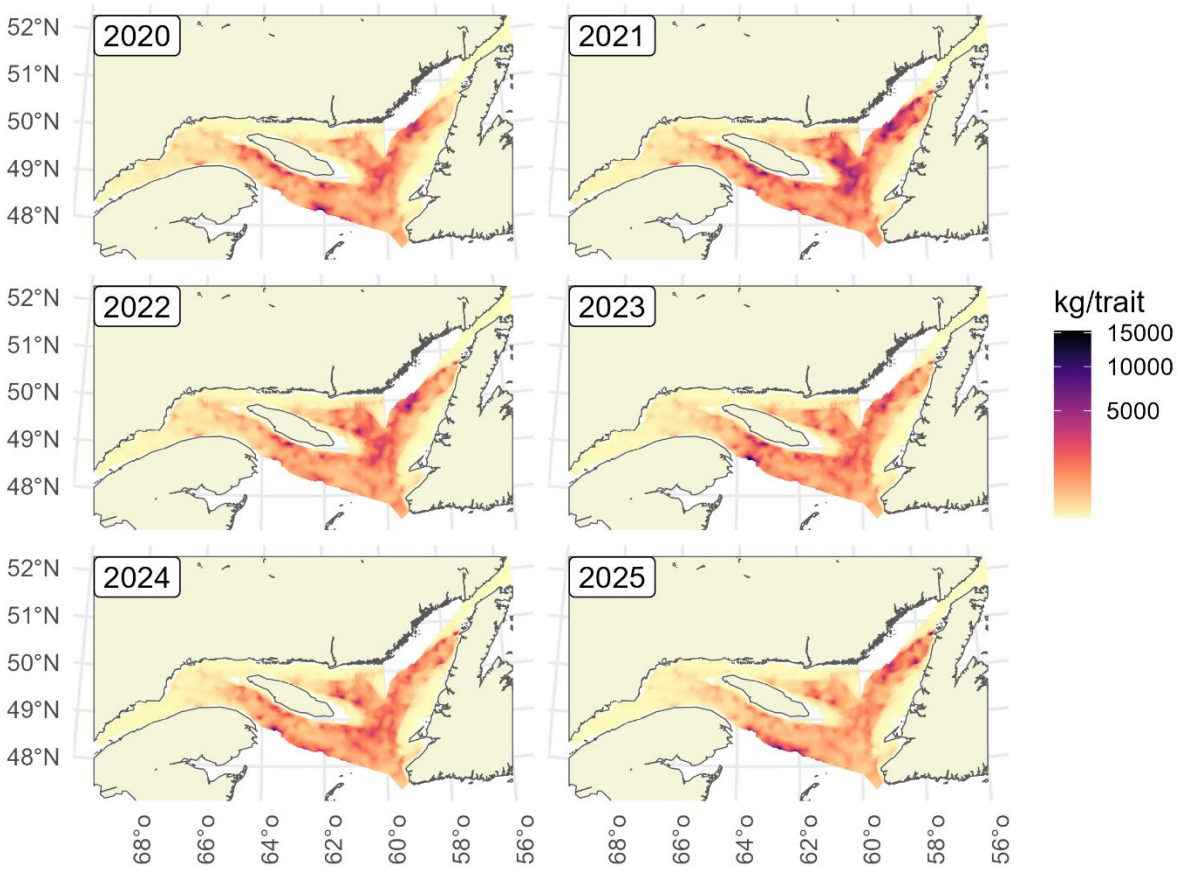

Figure 13 : Prédictions des densités de sébastes du modèle spatiotemporel pour le golfe du Saint-Laurent, en août, entre 2020 et 2025.

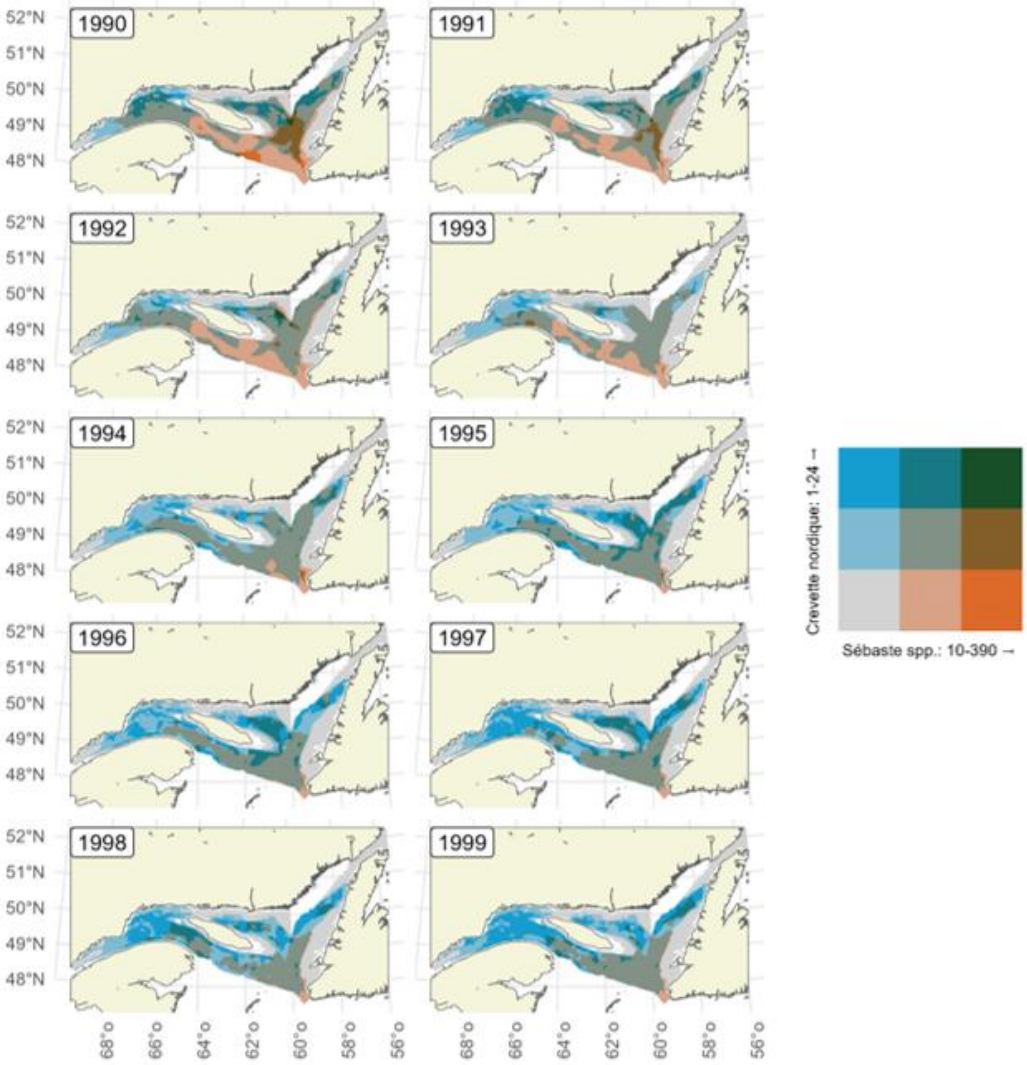

Figure 14 : Chevauchement selon les prédictions de densités de crevette nordique et de sébastes dans le golfe du Saint-Laurent en août de 1990 à 1999. Les couleurs correspondent au croisement des terciles de densité de crevette nordique et des sébastes. Pour la crevette nordique (sur l'axe vertical de la légende) : 0-1 kg, 1-24 kg, 24 kg et plus. Pour les sébastes (sur l'axe horizontal) : 0-10 kg, 10-390 kg, 390 kg et plus.

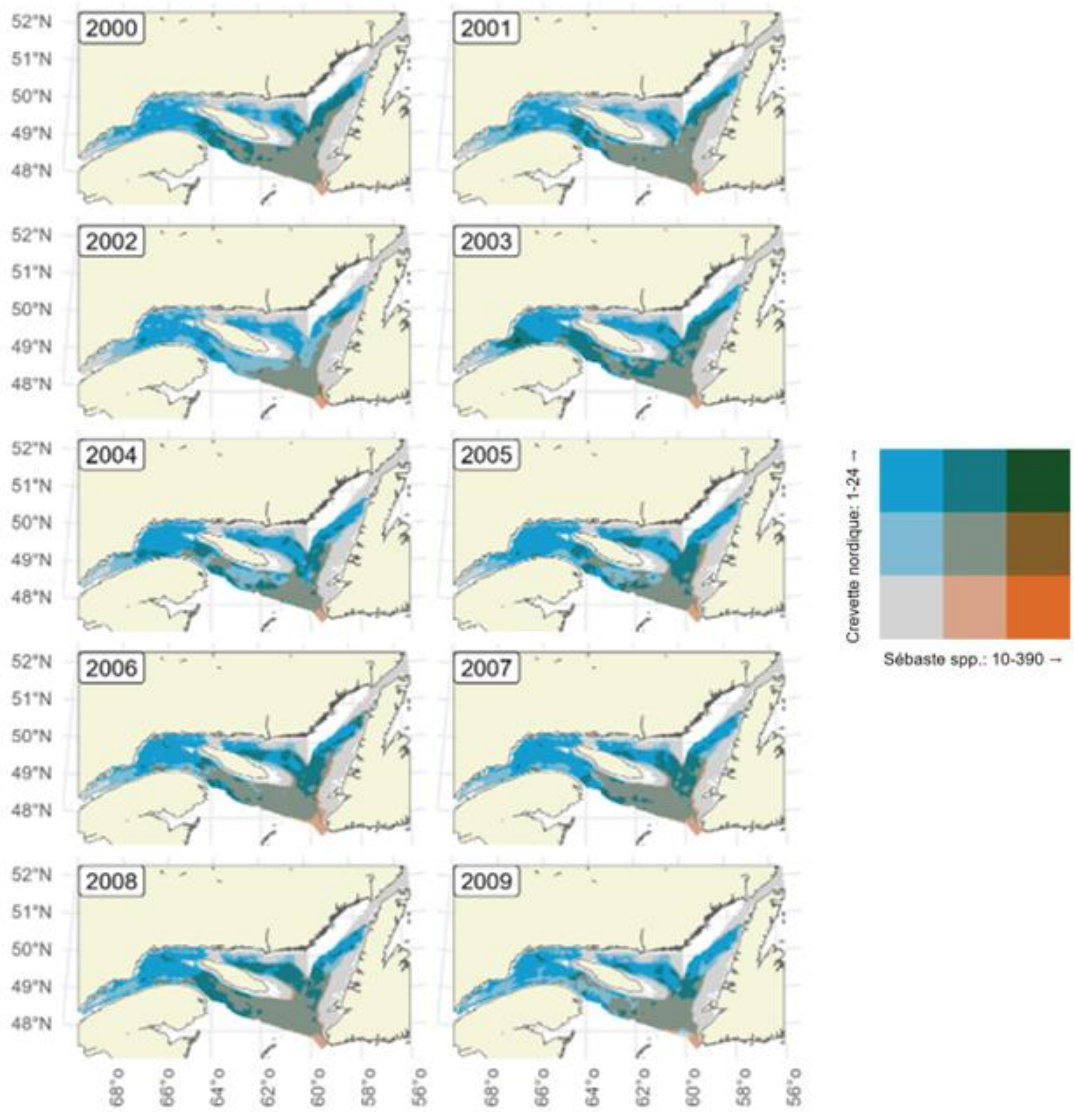

Figure 15 : Chevauchement selon les prédictions de densités de crevette nordique et de sébastes dans le golfe du Saint-Laurent en août de 2000 à 2009. Les couleurs correspondent au croisement des terciles de densité de crevette nordique et des sébastes. Pour la crevette nordique (sur l'axe vertical de la légende) : 0-1 kg, 1-24 kg, 24 kg et plus. Pour les sébastes (sur l'axe horizontal) : 0-10 kg, 10-390 kg, 390 kg et plus.

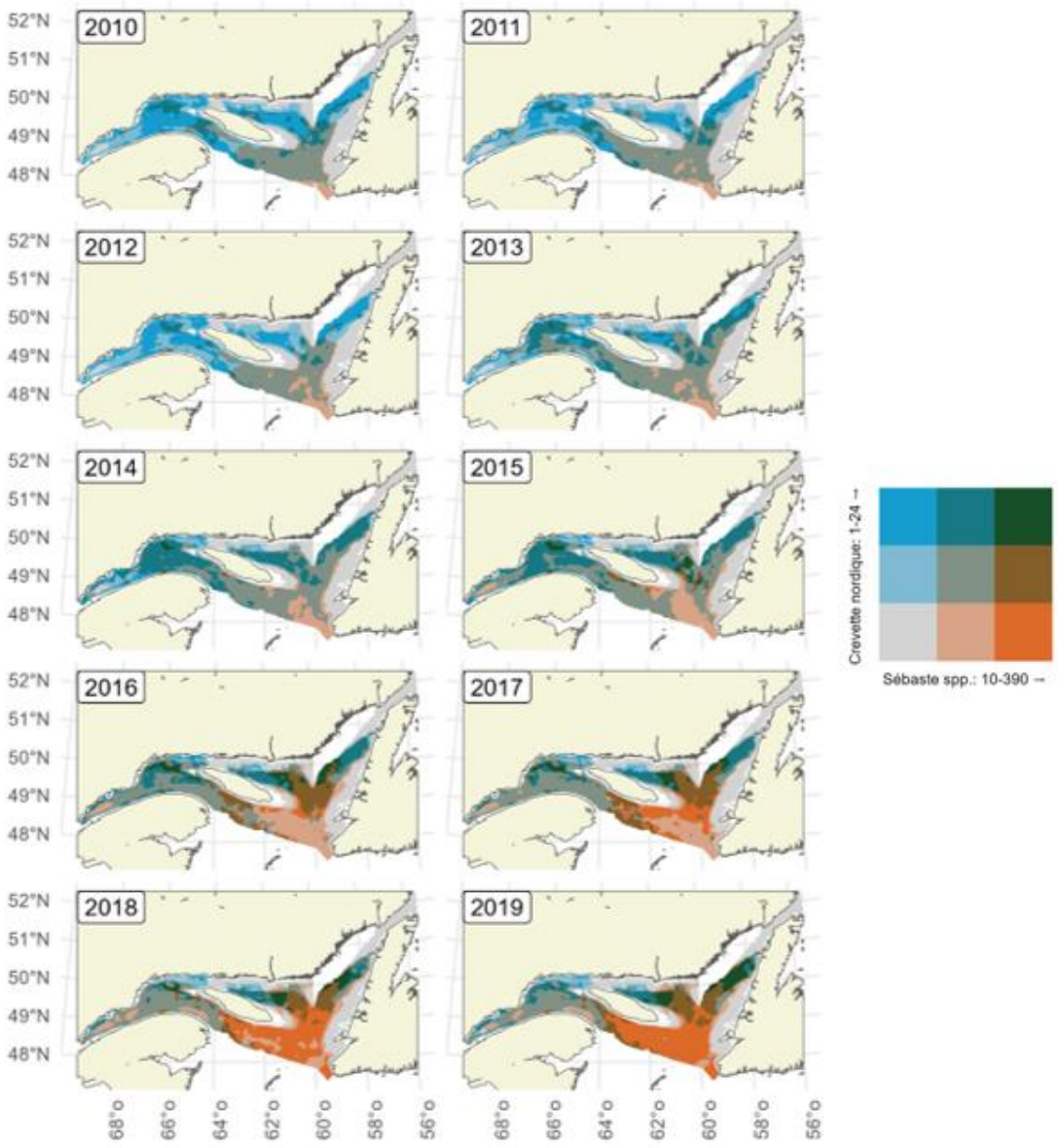

Figure 16 : Chevauchement selon les prédictions de densités de crevette nordique et de sébastes dans le golfe du Saint-Laurent en août de 2010 à 2019. Les couleurs correspondent au croisement des terciles de densité de crevette nordique et des sébastes. Pour la crevette nordique (sur l'axe vertical de la légende) : 0-1 kg, 1-24 kg, 24 kg et plus. Pour les sébastes (sur l'axe horizontal) : 0-10 kg, 10-390 kg, 390 kg et plus.

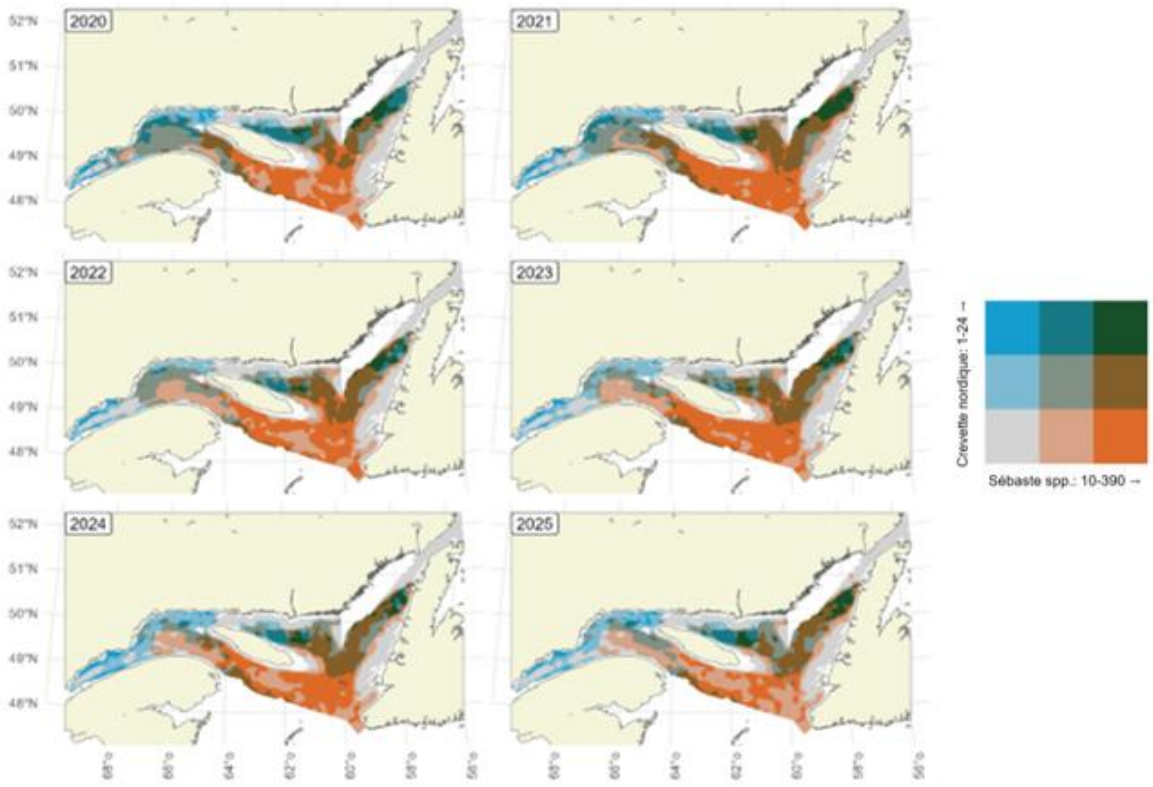

Figure 17 : Chevauchement selon les prédictions de densités de crevette nordique et de sébastes dans le golfe du Saint-Laurent en août de 2020 à 2025. Les couleurs correspondent au croisement des terciles de densité de crevette nordique et des sébastes. Pour la crevette nordique (sur l'axe vertical de la légende) : 0-1 kg, 1-24 kg, 24 kg et plus. Pour les sébastes (sur l'axe horizontal) : 0-10 kg, 10-390 kg, 390 kg et plus.

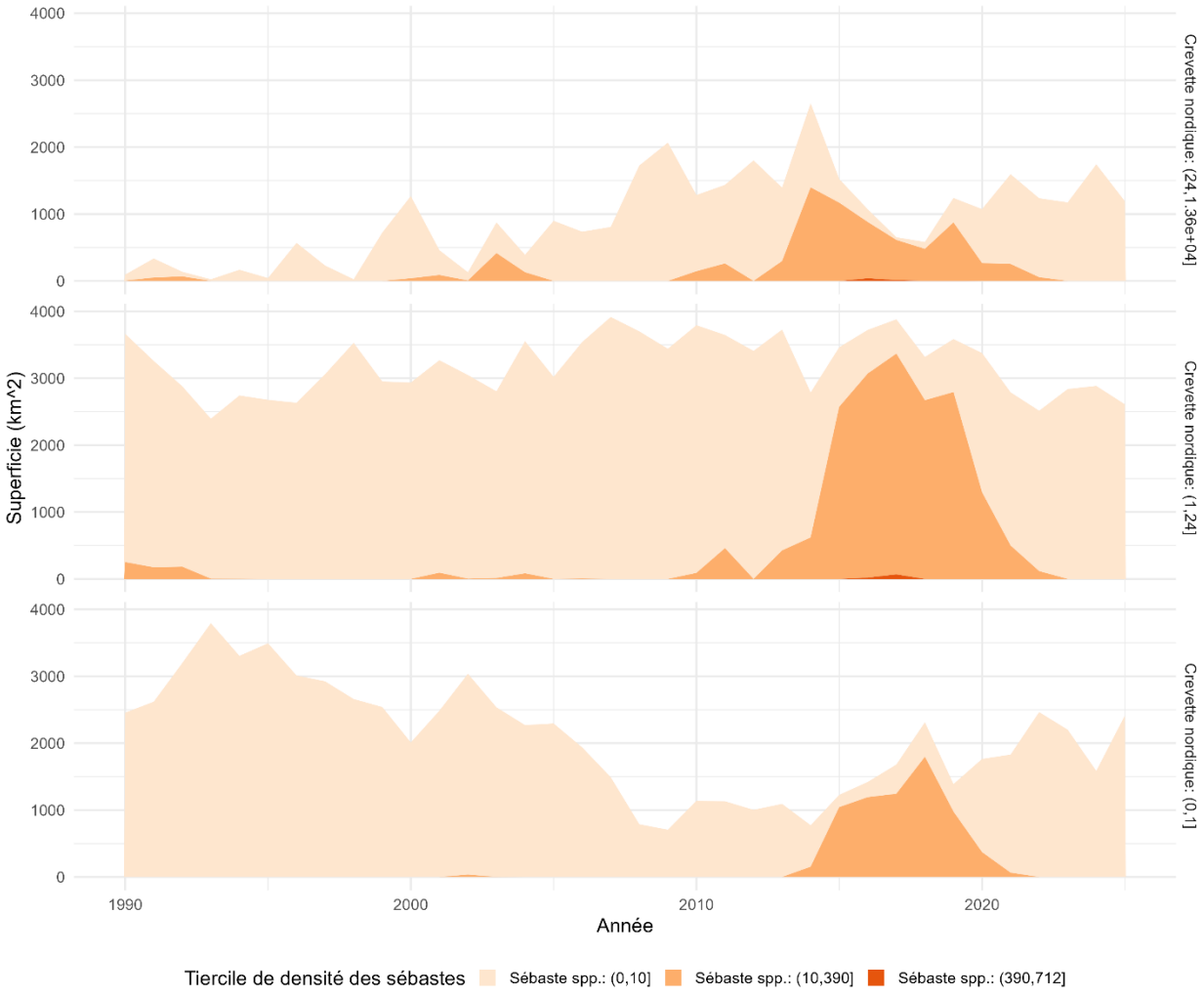

Figure 18 : Superficie des terciles de densité de crevette nordique et de sébastes pour la zone de Estuaire par année. Le panneau du haut montre la superficie de fortes densités de crevette nordique, le panneau du milieu de moyenne densité, et le panneau du bas de faible densité.

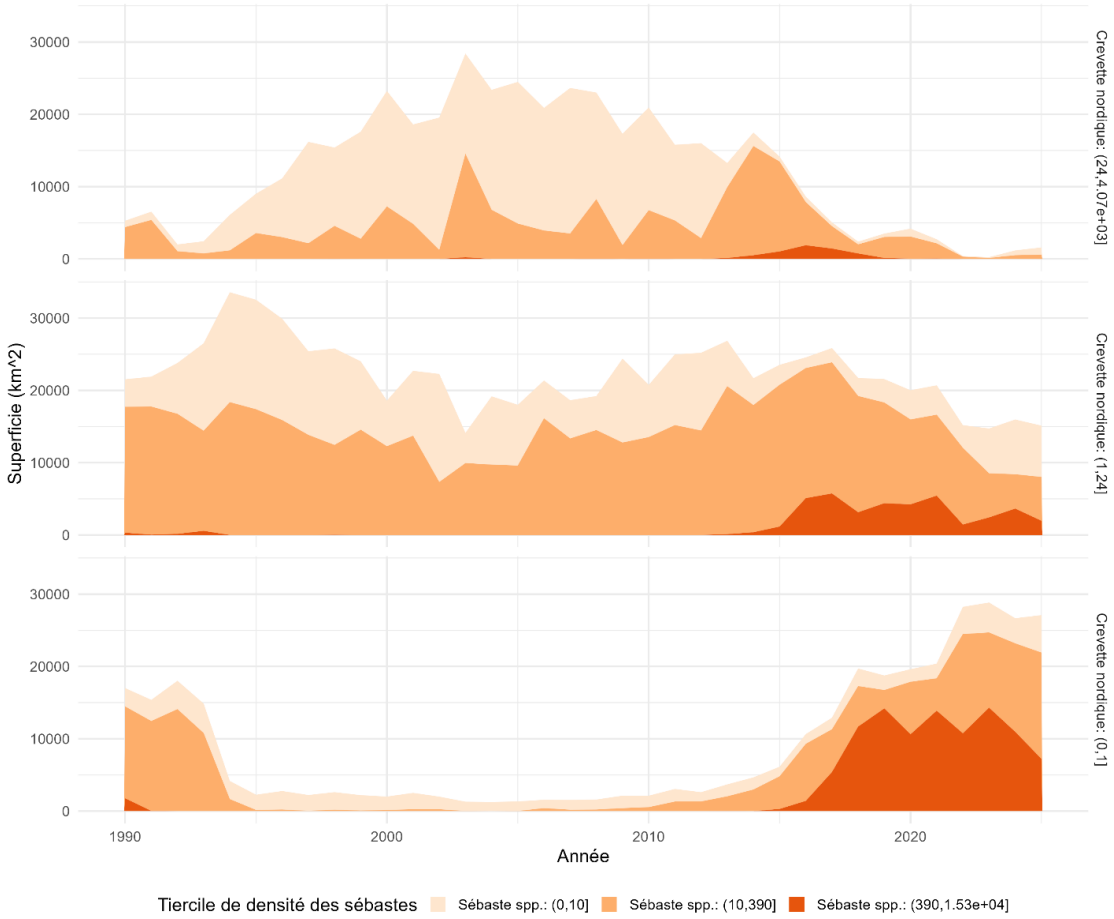

Figure 19 : Superficie des terciles de densité de crevette nordique et de sébastes pour la zone Sept-Îles par année. Le panneau du haut montre la superficie de fortes densités de crevette nordique, le panneau du milieu de moyenne densité, et le panneau du bas de faible densité.

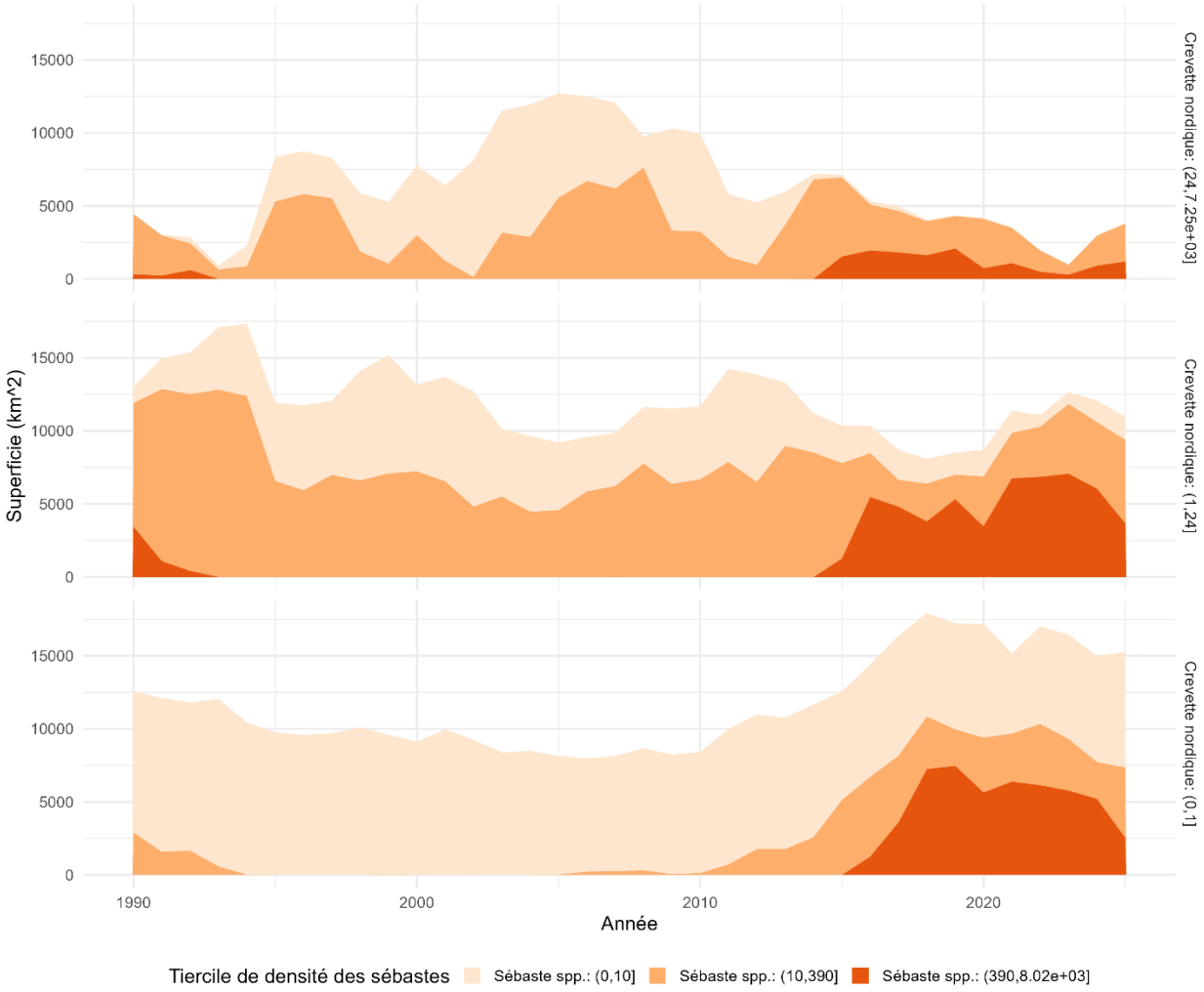

Figure 20 : Superficie des terciles de densité de crevette nordique et de sébastes pour la zone Anticosti par année. Le panneau du haut montre la superficie de fortes densités de crevette nordique, le panneau du milieu de moyenne densité, et le panneau du bas de faible densité.

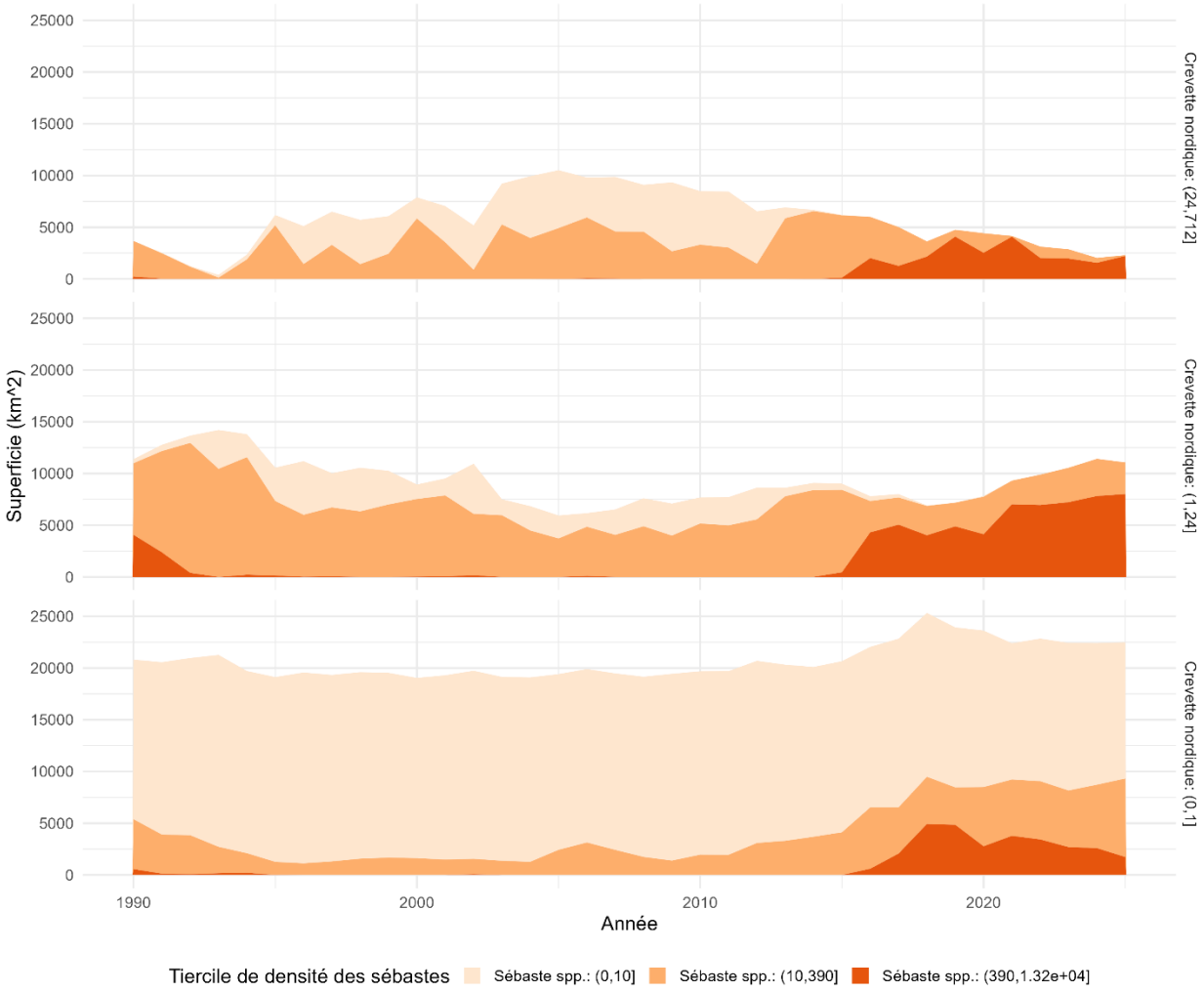

Figure 21 : Superficie des terciles de densité de crevette nordique et de sébastes pour la zone Esquiman par année. Le panneau du haut montre la superficie de fortes densités de crevette nordique, le panneau du milieu de moyenne densité, et le panneau du bas de faible densité.

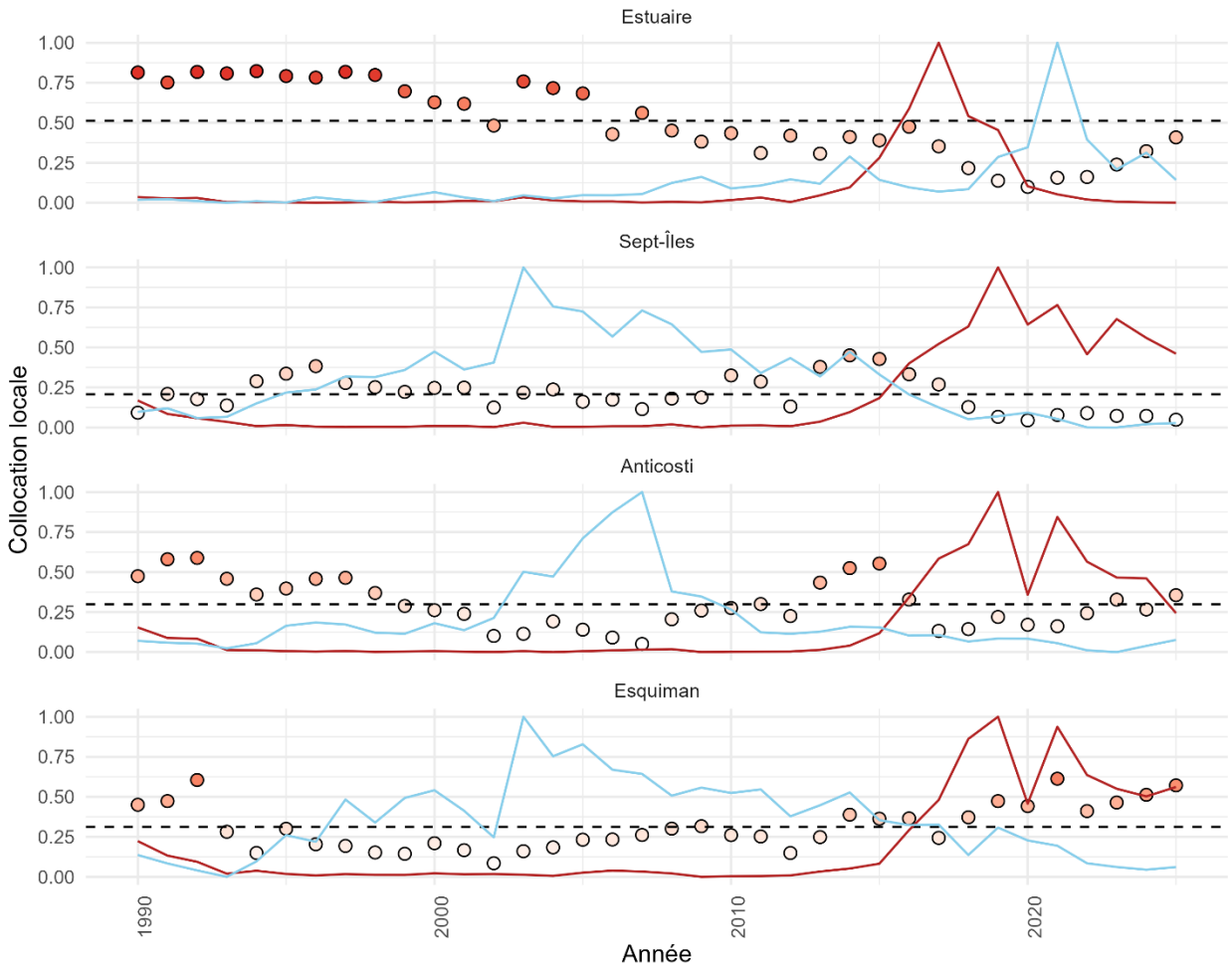

Figure 22 : Indice de collocation locale calculé par année et par zone d'évaluation de stock de crevette nordique selon les prédictions des modèles spatiotemporels de crevette nordique et de sébastes. La ligne pointillée représente la moyenne de l'indice de collocation locale durant la période d'étude pour chaque zone. La couleur des points est relative à leur valeur. Les lignes bleu et rouge représentent la densité moyenne, rééchelonnée entre 0 et 1 pour chaque secteur, de la crevette nordique et des sébastes respectivement.

ANNEXE A : RÉSULTATS DE LA VALIDATION CROISÉE

Tableau A-1 : Résultats de la validation croisée pour les modèles de densité de crevette nordique.

Modèles (effets fixes)	Somme de la vraisemblance	Racine de l'erreur quadratique moyenne	*AIC	*Delta AIC
1- Profondeur + année	-20366.24	41.98	38990.72	161.58
2- Profondeur + température + année	-20329.62	41.71	38858.33	29.19
3 -Profondeur*température + année	-20216.33	42.87	38829.14	0.00

**L'AIC a été calculée pour l'intégralité des données, c'est-à-dire à l'extérieur du processus de validation croisée.*

La validation croisée pour la crevette nordique suggère soit le modèle 2 ou 3, dépendamment de l'indicateur de performance utilisée (soit la somme de la vraisemblance ou la racine de l'erreur quadratique moyenne). Nous avons retenu le modèle 3, car la somme de la vraisemblance est l'indicateur de performance privilégié dans la méthodologie de sdmTMB (voir Anderson *et al*. 2026).

Tableau A-2 : Résultats de la validation croisée pour les modèles de densités de sébastes.

Modèles (effets fixes)	Somme de la vraisemblance	Racine de l'erreur quadratique moyenne	*AIC	*Delta AIC
1- Profondeur + année	-30889.74	522.07	53728.52	108.50
2- Profondeur + température + année	-30872.67	517.03	53649.23	29.22
3-Profondeur*température + année	-30769.17	512.08	53620.02	0.00

**L'AIC a été calculée pour l'intégralité des données, c'est-à-dire à l'extérieur du processus de validation croisée.*

La validation croisée suggère que le modèle 3 améliore la qualité des prédictions pour les sébastes.

ANNEXE B : DIAGNOSTIC DES MODÈLES SPATIOTEMPORELS

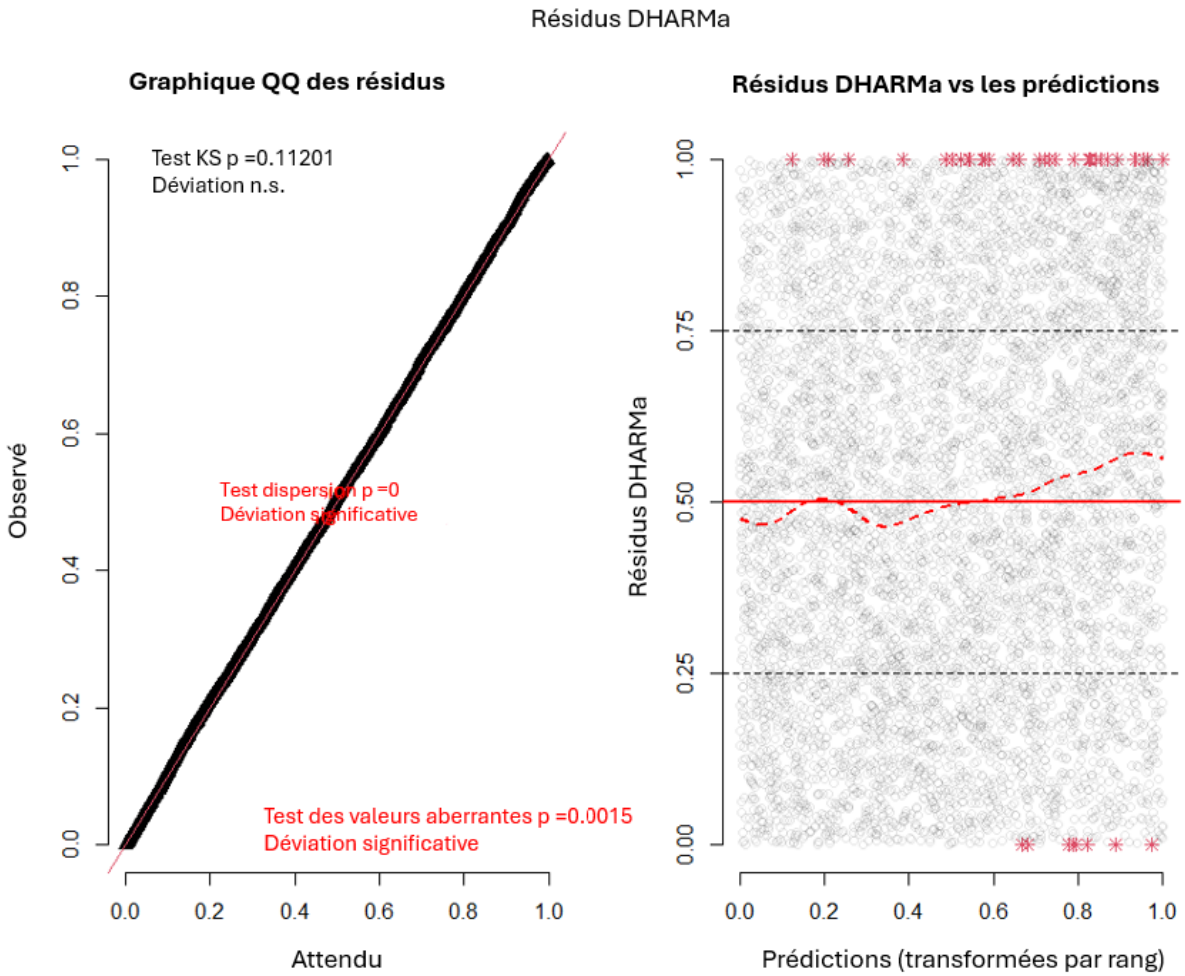

Figure B-1 : Distribution des résidus du modèle spatiotemporel de la crevette nordique : graphique quantile-quantile (gauche) et résidus DHARMa (simulés) à droite.

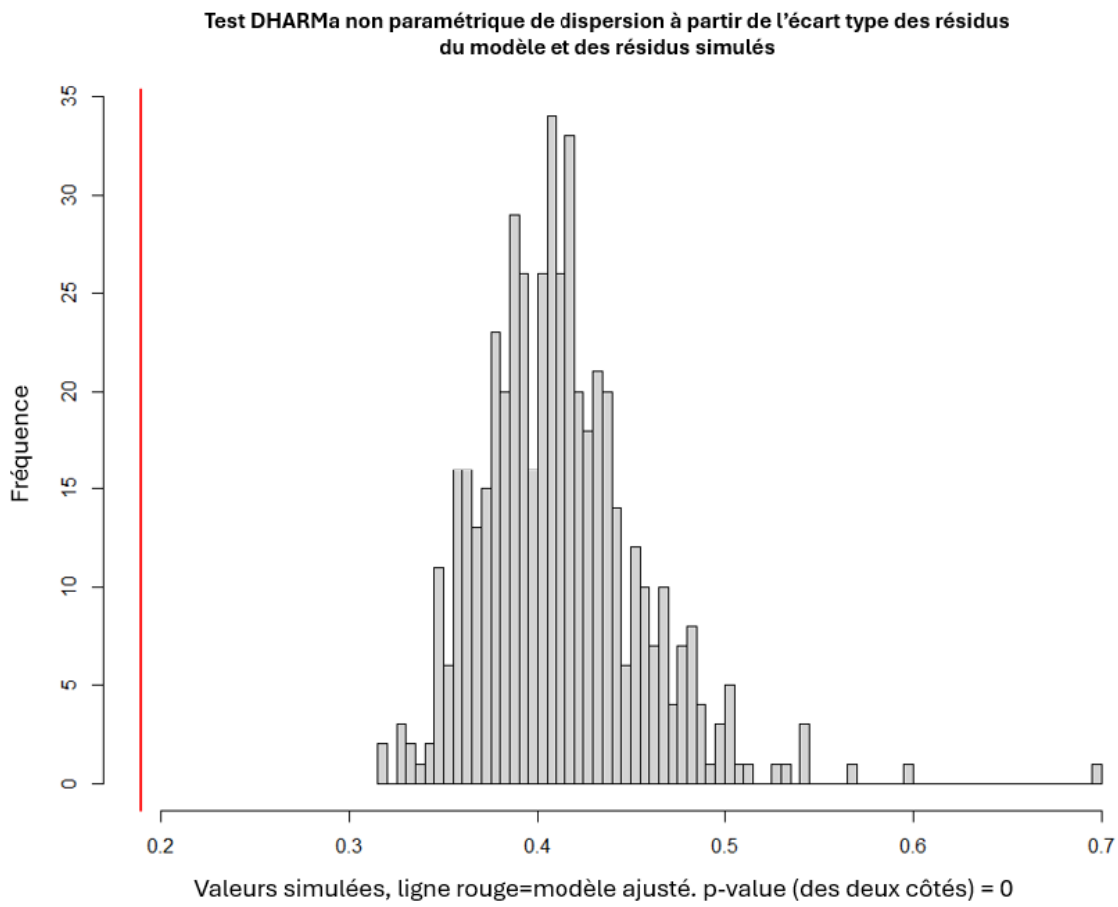

Figure B-2 : Test de surdispersion DHARMa du modèle spatiotemporel de la crevette nordique.

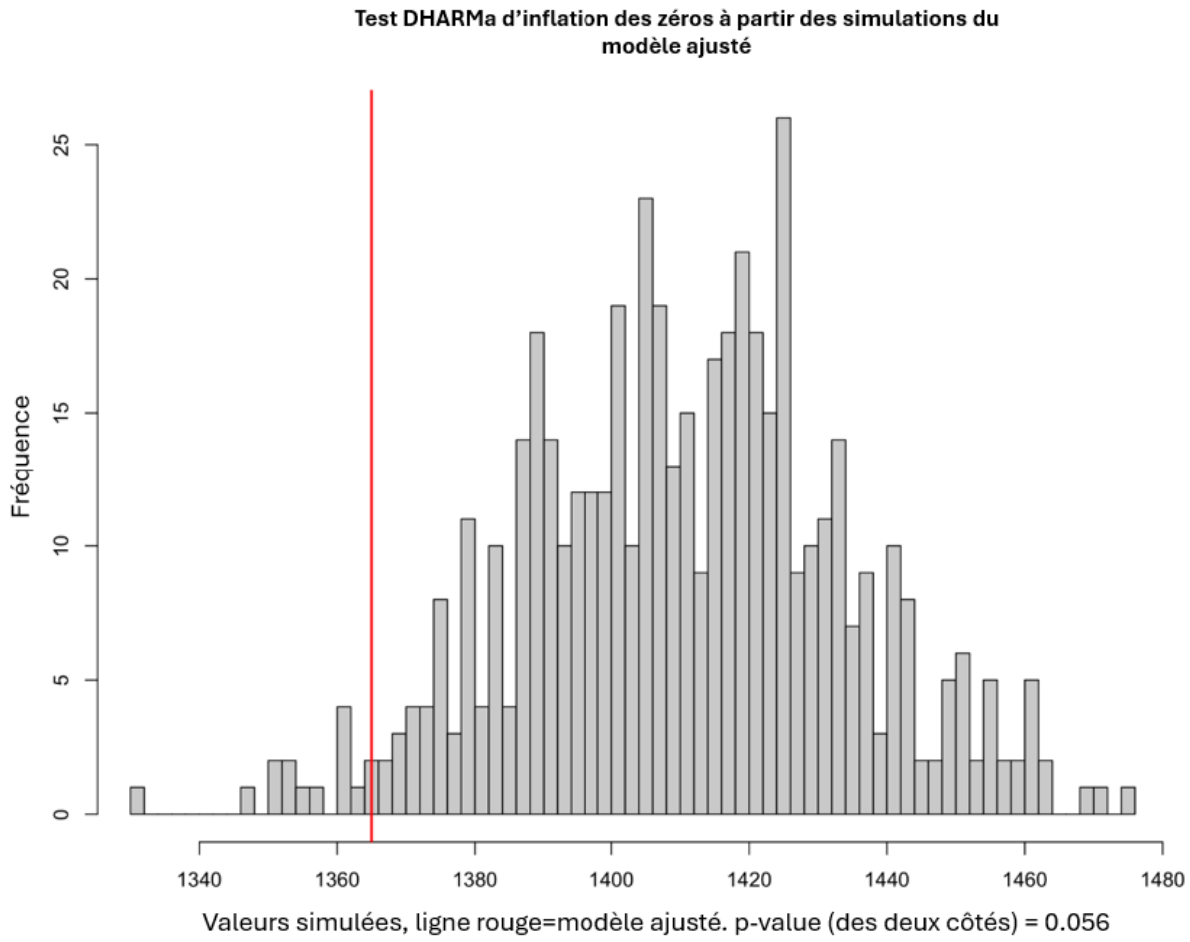

Figure B-3 : Test d'inflation des zéros du modèle spatiotemporel de la crevette nordique.

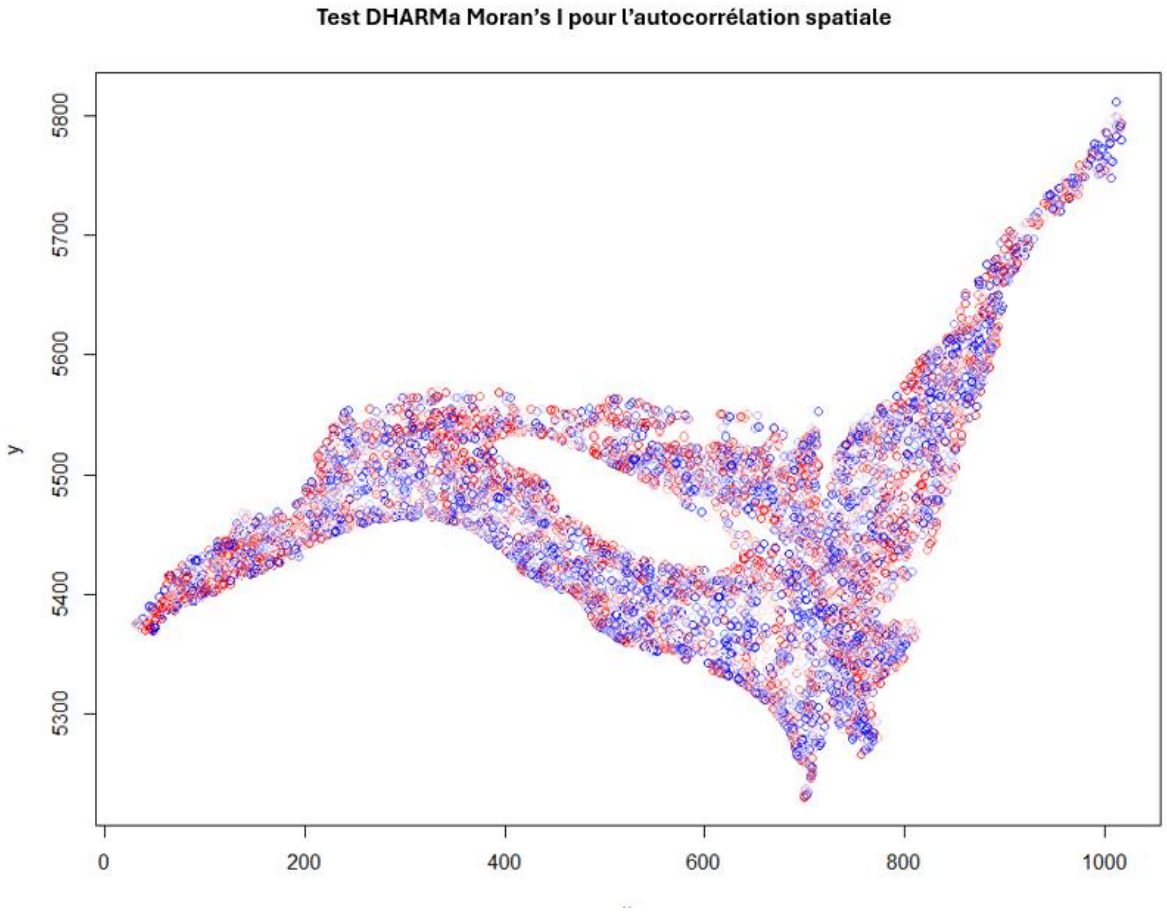

Figure B-4 : Distribution spatiale des résidus DHARMa (test d'autocorrélation spatiale Moran's I : p-value=3.173^{e}-11) du modèle spatiotemporel de la crevette nordique. Les points rouges représentent des valeurs surestimées; les points bleus représentent des valeurs sous-estimées.

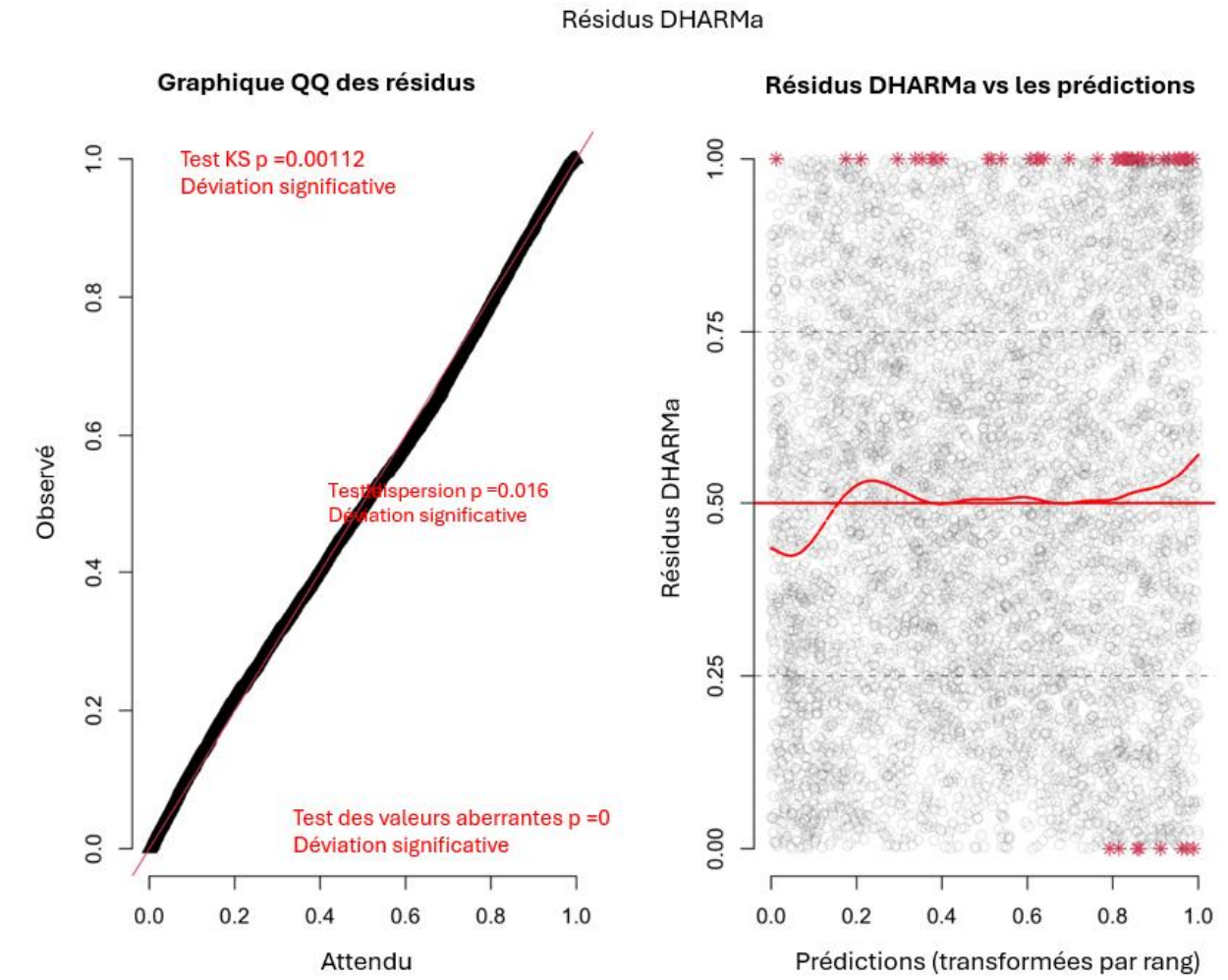

Figure B-5 : Distribution des résidus du modèle spatiotemporel des sébastes : graphique quantile-quantile (gauche) et résidus DHARMa (simulés) à droite.

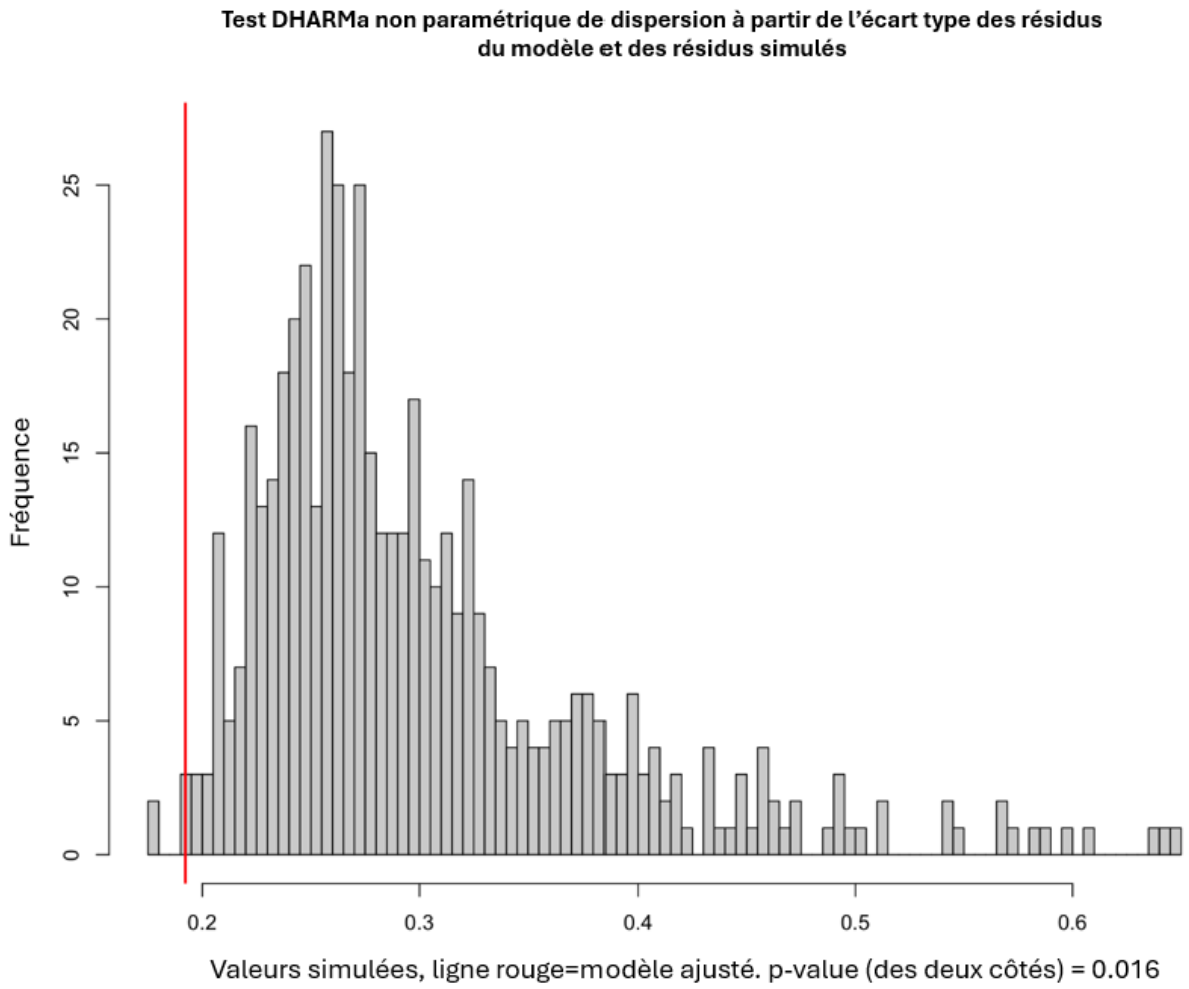

Figure B-6 : Test de surdispersion DHARMa du modèle spatiotemporel des sébastes.

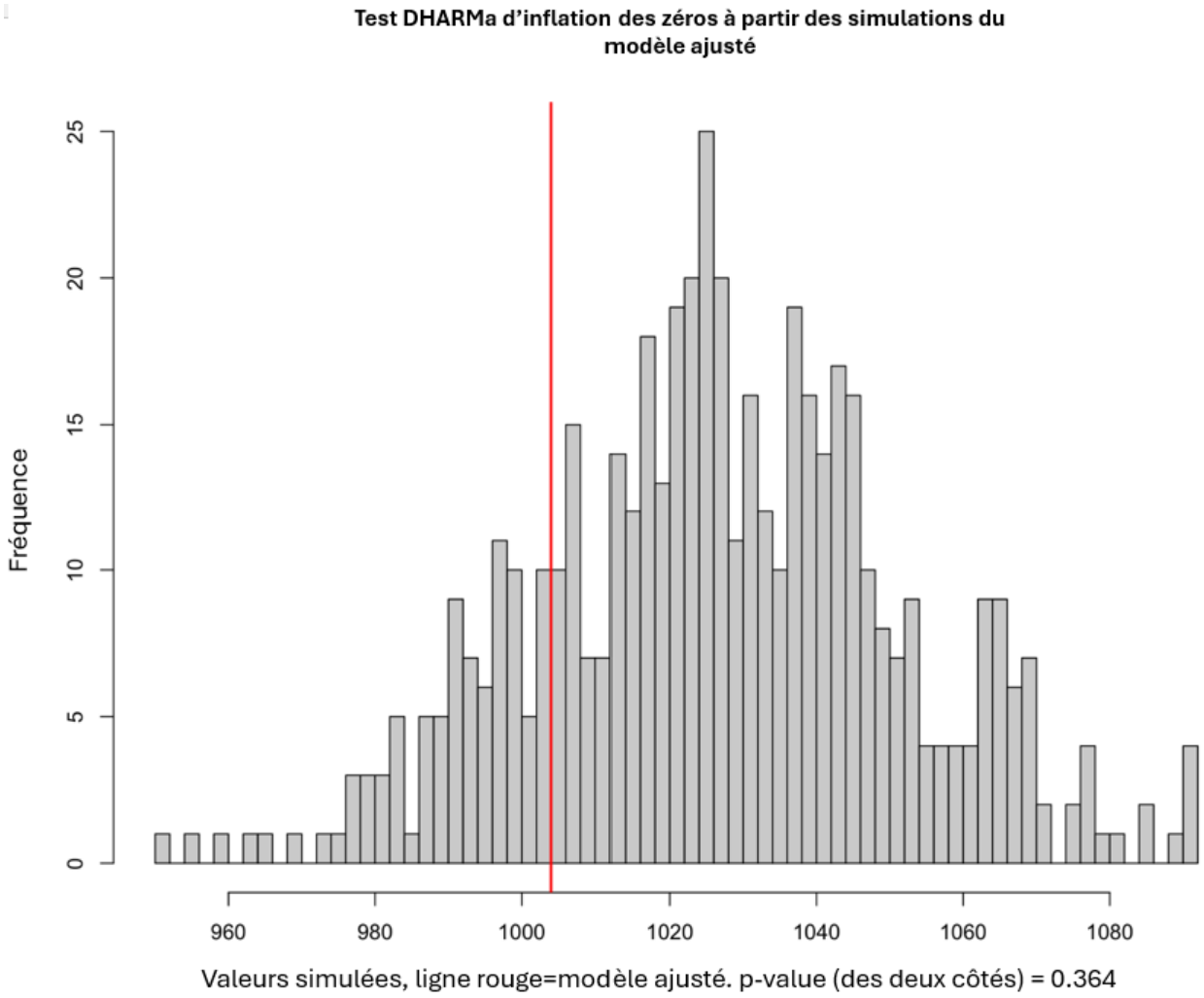

Figure B-7 : Test d'inflation des zéros du modèle spatiotemporel des sébastes.

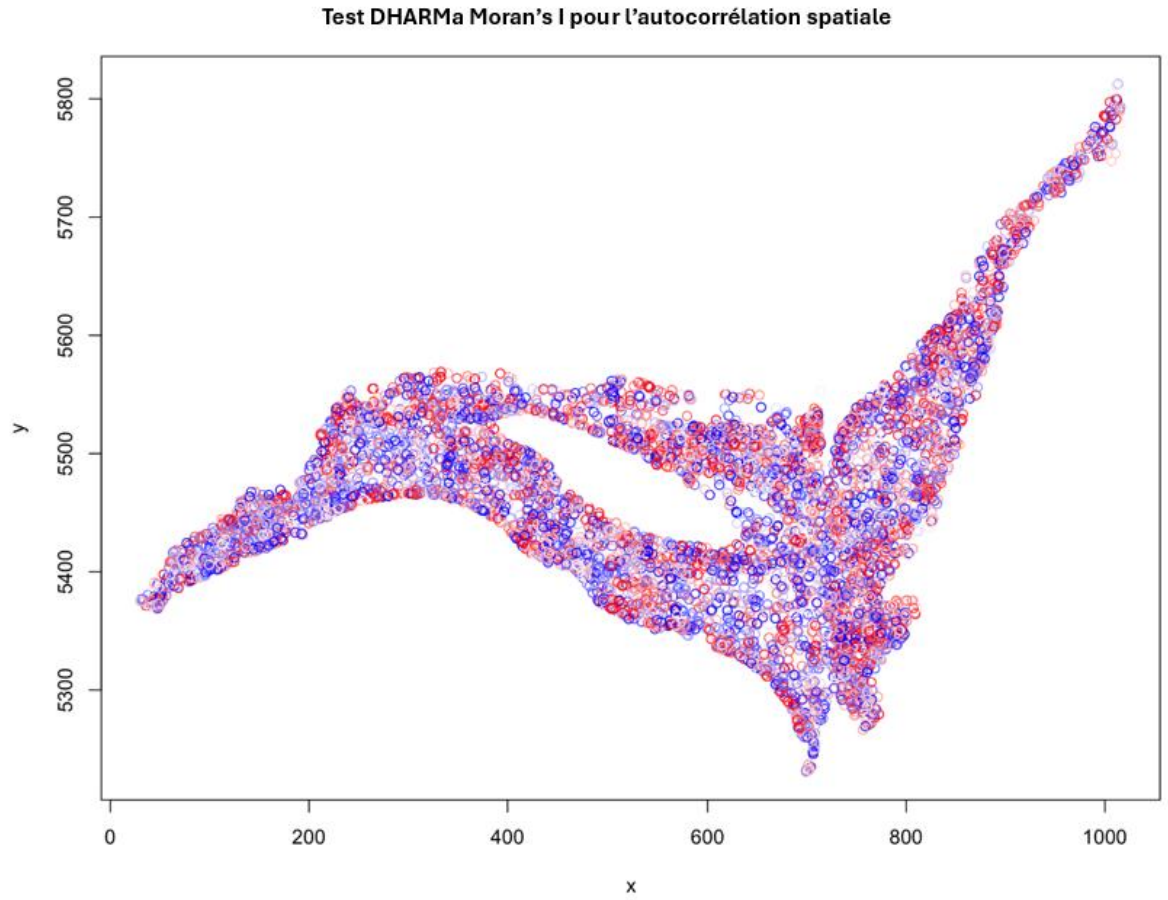

Figure B-8 : Distribution spatiale des résidus DHARMa (test d'autocorrélation spatiale Moran's I : p-value=3.173^{e}-11) du modèle spatiotemporel des sébastes. Les points rouges représentent des valeurs surestimées; les points bleus représentent des valeurs sous-estimées.

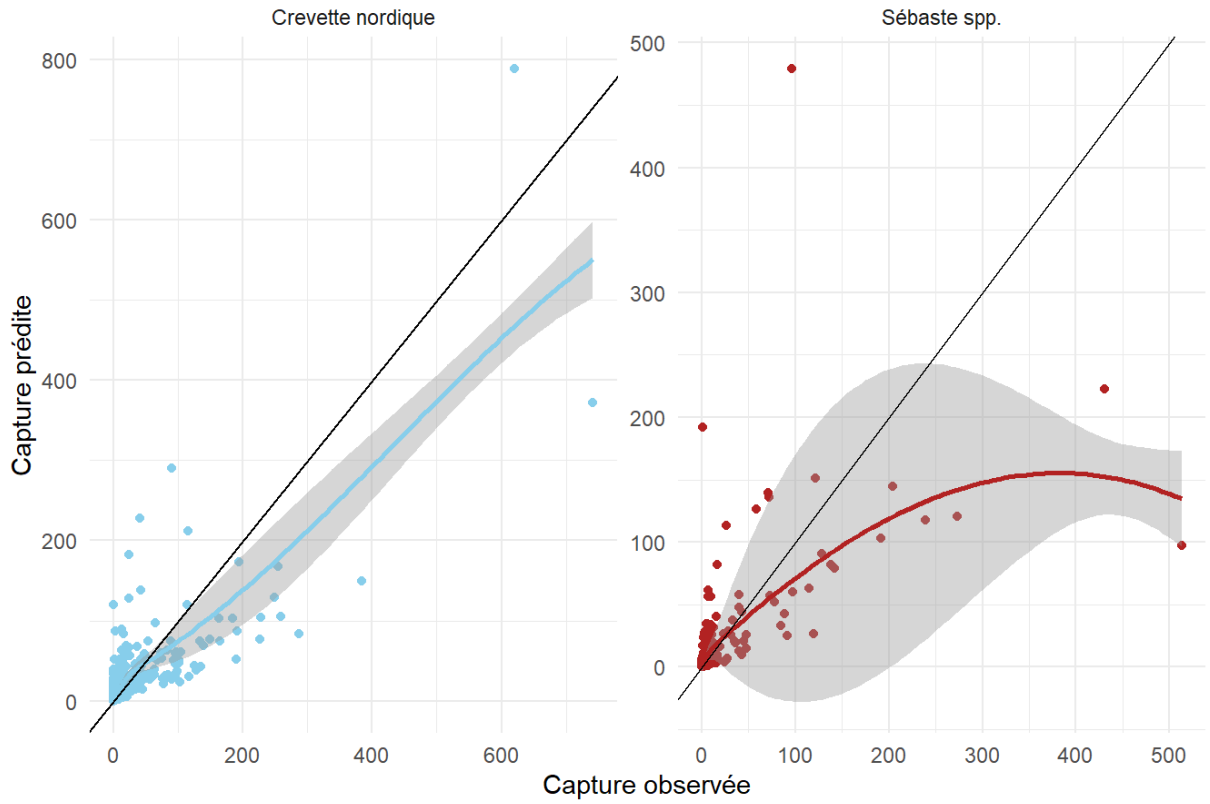

Figure B-9 : Comparaison des valeurs de capture observée (kg) et des valeurs prédites (kg) selon les modèles spatiotemporels de crevette nordique (panneau de gauche, en bleu, R^2_{adj}=0.6261) et de sébastes (droite, en rouge, R^2_{adj}=0.3819) dans la zone de l'estuaire. La ligne noire a une pente de 1 et une ordonnée à l'origine de 0. La surface ombragée représente l'intervalle de confiance de 95 %.

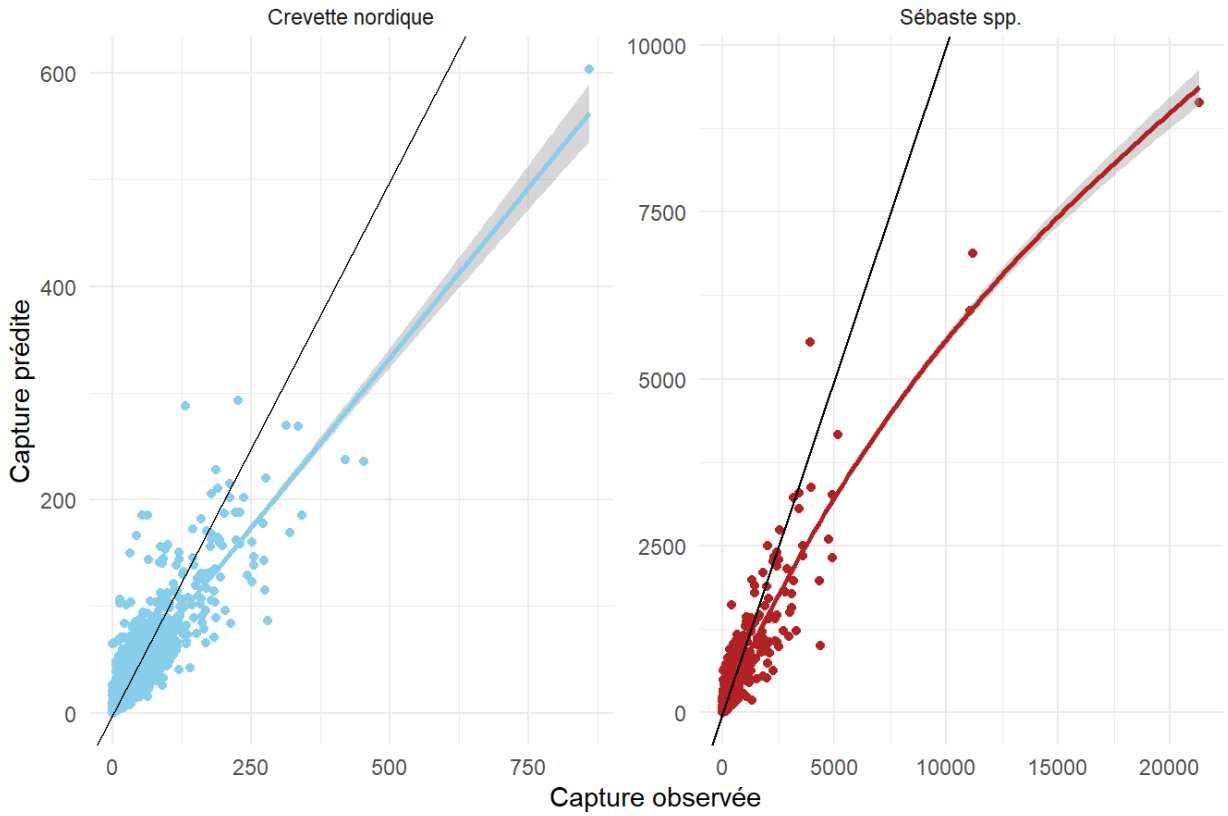

Figure B-10 : Comparaison des valeurs de densité observée (kg) et des valeurs prédites (kg) selon les modèles spatiotemporels de crevette nordique (panneau de gauche, en bleu, R^2_{adj}=0.8050) et de sébastes (droite, en rouge, R^2_{adj}=0.8364) dans la zone Sept-Îles. La ligne noire a une pente de 1 et une ordonnée à l'origine de 0. La surface ombragée représente l'intervalle de confiance de 95 %.

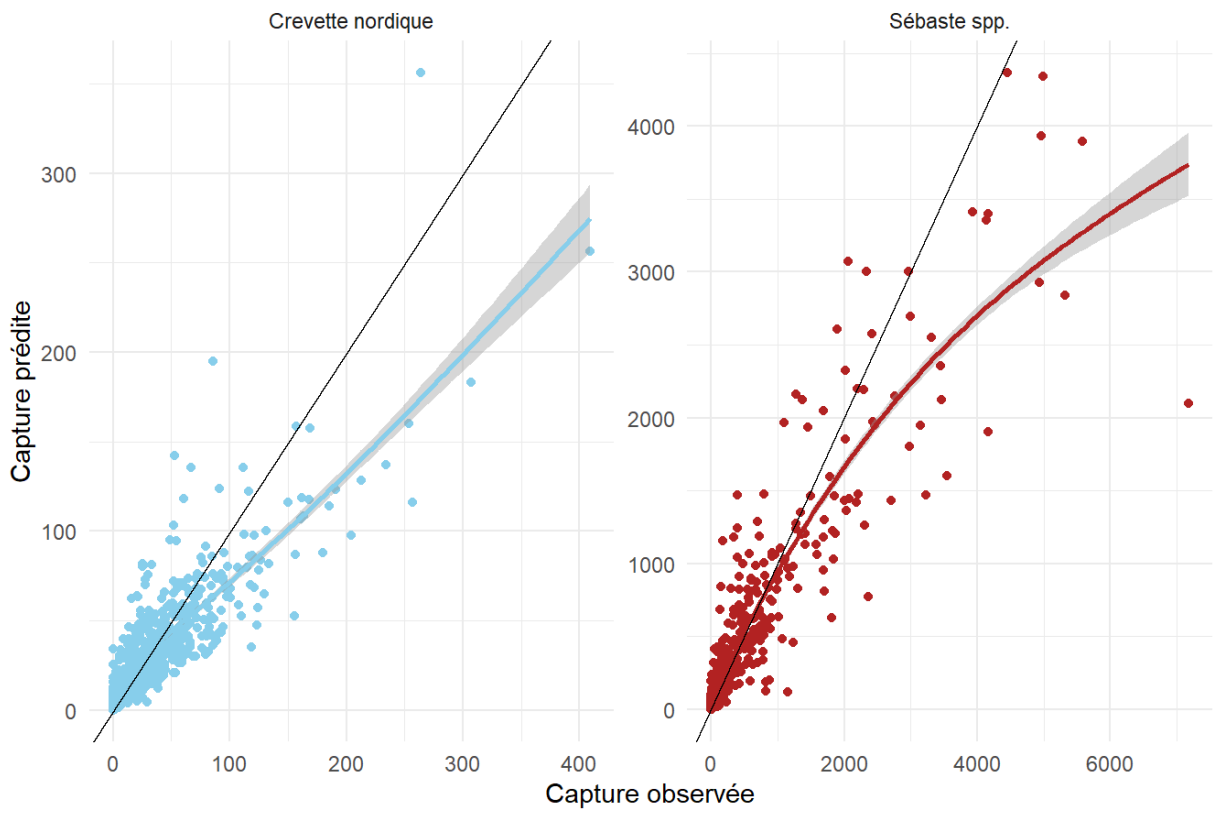

Figure B-11 : Comparaison des valeurs de densité observée (en x) et des valeurs prédites (en y) selon les modèles spatiotemporels de crevette nordique (panneau de gauche, en bleu, R^2_{adj}=0.7739) et de sébastes (droite, en rouge, R^2_{adj}=0.8393) dans la zone Anticosti. La ligne noire a une pente de 1 et une ordonnée à l'origine de 0. La surface ombragée représente l'intervalle de confiance de 95 %.

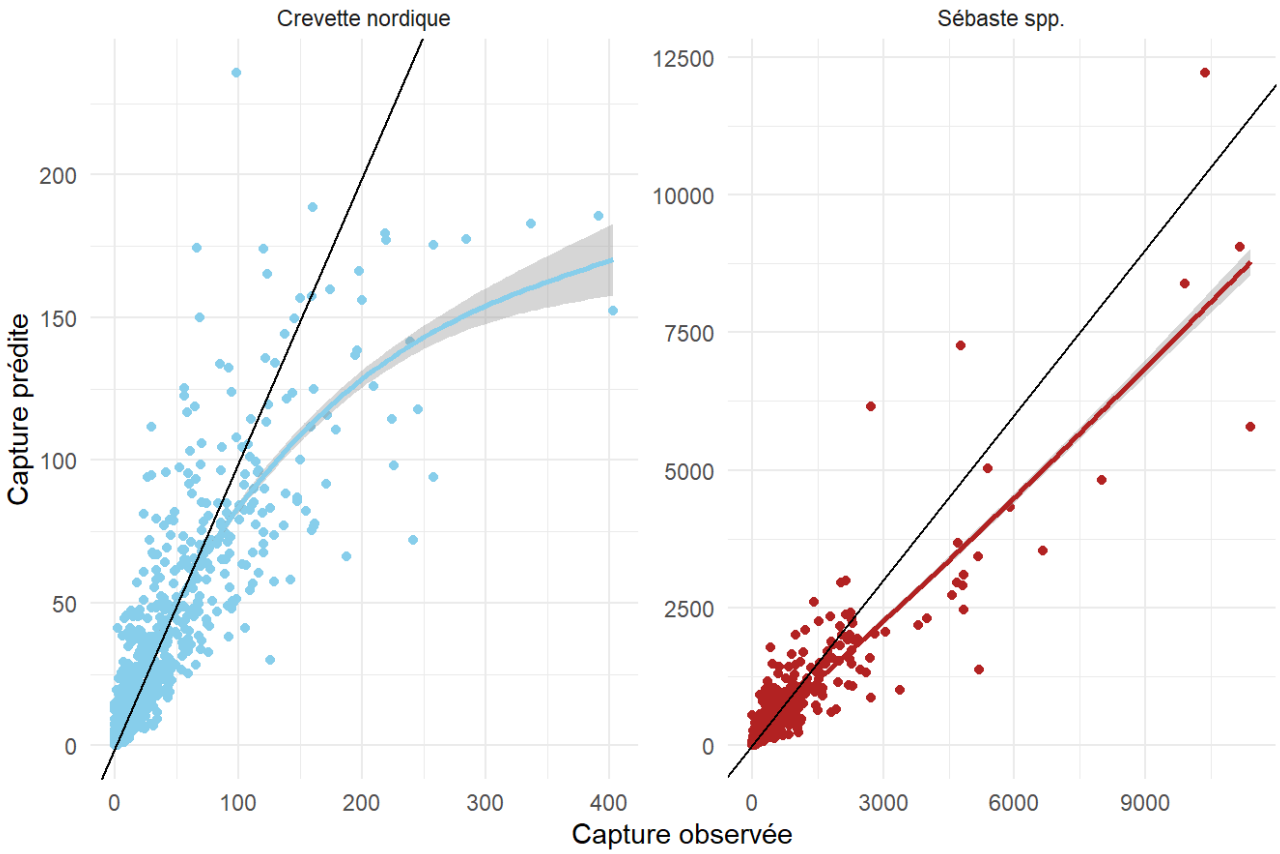

Figure B-12 : Comparaison des valeurs de densité observée (en x) et des valeurs prédites (en y) selon les modèles spatiotemporels de crevette nordique (panneau de gauche, en bleu, R^2_{adj}=0.7841) et de sébastes (droite, en rouge, R^2_{adj}=0.8449) dans la zone d'Esquiman. La ligne noire a une pente de 1 et une ordonnée à l'origine de 0. La surface ombragée représente l'intervalle de confiance de 95 %.