



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 2022/046

Région du Golfe

**Indices de biomasse des reproducteurs d'automne du hareng de l'Atlantique
(*Clupea harengus*) de la division 4TVn de l'OPANO selon le relevé
hydroacoustique sur les frayères**

François Turcotte, Jenni L. McDermid, Rachel A. DeJong, Lysandre Landry et Nicolas Rolland

Pêches et Océans Canada
Centre des Pêches du Golfe
343 Avenue Université, Boîte Postale 5030
Moncton, Nouveau-Brunswick, E1C 9B6

Avant-propos

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

Publié par :

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

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



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2022

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-44143-6 N° cat. Fs70-5/2022-046F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Turcotte, F., McDermid, J.L., DeJong, R.A., Landry, L. et Rolland, N. 2022. Indices de biomasse des reproducteurs d'automne du hareng de l'Atlantique (*Clupea harengus*) de la division 4TVn de l'OPANO selon le relevé hydroacoustique sur les frayères. DFO Secr. can. de avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2022/046. iv + 19 p.

Also available in English :

Turcotte, F., McDermid, J.L., DeJong, R.A., Landry, L. and Rolland, N. 2022. Biomass indices of NAFO Division 4TVn fall spawning Atlantic Herring (Clupea harengus) from hydroacoustic surveys on spawning grounds. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2022/046. iv + 18 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iv
INTRODUCTION	1
MÉTHODES	2
RÉSULTATS.....	4
DISCUSSION.....	11
INDICE DE BIOMASSE.....	11
CALENDRIER D'ÉCHANTILLONNAGE DU RELEVÉ	12
MÉTHODES D'ÉCHANTILLONNAGE DU RELEVÉ.....	13
REMERCIEMENTS	14
RÉFÉRENCES CITÉES.....	14
ANNEXE 1	17
ANNEXE 2	18

RÉSUMÉ

Dans le sud du golfe du Saint-Laurent, le hareng de l'Atlantique est présent du nord de la Gaspésie à l'extrémité nord de l'île du Cap-Breton, territoire comprenant les îles de la Madeleine. Le hareng de l'Atlantique qui y fraie à l'automne est évalué à l'aide de modèles par région (nord, centre et sud). Depuis 2015, on effectue un relevé hydroacoustique chaque année dans six grandes frayères utilisées par les reproducteurs d'automne dans le sud du golfe du Saint-Laurent. Comme des échantillons manquaient, on a recouru à un modèle prédictif de la biomasse nocturne du hareng de l'Atlantique pour obtenir une grille complète de données d'où tirer des indices de biomasse exempts de biais. Les covariables incluses dans le modèle binomial négatif ont permis d'obtenir des données prédictives pour les valeurs manquantes dans les données observées. Les tendances de la biomasse du hareng de l'Atlantique selon ce relevé hydroacoustique correspondent bien aux tendances observées pour d'autres indices de population et estimations d'état des stocks selon le modèle de population. Dans la région du nord, la biomasse a accusé une très forte baisse jusqu'en 2021. Dans la région du centre, la décroissance a semblé plus lente et plus variable d'une année à l'autre. Enfin, dans la région du sud, la tendance à la baisse pourrait s'être inversée; en effet, en 2021, les niveaux de biomasse ont été aussi élevés qu'au début de la série chronologique. La qualité de l'échantillonnage et les biais possibles sont aussi discutés.

INTRODUCTION

Dans le sud du golfe du Saint-Laurent, le hareng de l'Atlantique est présent du nord de la Gaspésie à l'extrémité nord de l'île du Cap-Breton, territoire comprenant les îles de la Madeleine (division 4T de l'Organisation des pêches de l'Atlantique nord-ouest (OPANO)). Le hareng de l'Atlantique est une espèce pélagique qui se rassemble en bancs, plus particulièrement pour l'alimentation, la reproduction, la migration annuelle et l'hivernage. Dans le sud du golfe, la population de hareng de l'Atlantique est divisée en deux composantes : les individus frayant au printemps et ceux frayant à l'automne. Au printemps, la fraie a lieu principalement en avril et mai dans des eaux peu profondes. En automne, la fraie se déroule de la mi-août à la mi-octobre à des profondeurs de 5 à 20 m, mais elle peut débuter dès le 1^{er} juillet. Les reproducteurs de printemps et les reproducteurs d'automne de la division 4TVn constituent des stocks distincts qui sont évalués séparément. Le hareng de l'Atlantique se caractérise par une grande fidélité à la frayère de naissance (Wheeler et Winters 1984; McQuinn 1997; Brophy *et al.* 2006). Les stocks locaux sont pêchés au filet maillant dans les frayères et à la senne coulissante dans les aires d'alimentation et les couloirs de migration. Dans le sud du golfe, le hareng de l'Atlantique frayant à l'automne est donc évalué à l'aide de modèles par région (nord, centre et sud).

Le hareng de l'Atlantique de la division 4TVn de l'OPANO qui fraie à l'automne (ci-après simplement appelé « hareng ») est évalué à l'aide d'un modèle statistique de population fondé sur les prises selon l'âge depuis 2020 (Turcotte *et al.* 2021). Le nouveau modèle et l'ancien modèle d'analyse de population virtuelle dégagent tous deux des tendances rétrospectives des estimations. Une solution possible à ce problème consiste à utiliser des indices supplémentaires de la biomasse du hareng pour mieux éclairer les estimations de modèle. Comme il permet une vaste observation spatiotemporelle de la dynamique de la biomasse dans toutes les grandes frayères utilisées en automne dans le sud du golfe, le relevé acoustique sur les frayères est probablement la meilleure source de données pour améliorer le rendement du modèle de population. Les techniques hydroacoustiques servent fréquemment à estimer l'abondance et la biomasse de poissons (Simmonds et MacLennan 2005). Elles conviennent bien à des espèces pélagiques comme le Maquereau, les Salmonidés, les Anchois et les harengs (Simmonds et MacLennan 2005), y compris le hareng de l'Atlantique (voir, par exemple, Axelsen *et al.* 2000, Surette *et al.* 2015 et Singh *et al.* 2020). On sait que le hareng de l'Atlantique fraie à des périodes précises de l'année, se rassemblant en des points géographiques bien délimités (Stephenson *et al.* 2009). On recourt donc à des relevés sur les frayères pour estimer la biomasse des stocks dans des lieux comme la baie de Fundy (Singh *et al.* 2020), le golfe du Saint-Laurent (Surette *et al.* 2015), les eaux au large de l'Irlande (O'Malley *et al.* 2021) et le golfe du Maine (Wurtzell *et al.* 2016).

Le relevé dont il est question ici est le fruit d'une collaboration entre Pêches et Océans Canada (MPO) et des associations de pêcheurs. L'effort d'échantillonnage a varié d'une région et d'une année à l'autre, ce qui a entraîné des valeurs manquantes non-aléatoires, pouvant donner lieu à des estimations biaisées de la biomasse dans le calcul de la valeur annuelle moyenne. Pour tenir compte des échantillons manquants, il est possible, grâce à un modèle prédictif de la biomasse nocturne du hareng, d'obtenir une grille complète de données et d'en tirer des indices de biomasse exempts de biais. Le présent document vise à 1) établir un modèle prédictif de la biomasse nocturne du hareng de l'Atlantique frayant à l'automne dans les trois régions d'évaluation; 2) employer ce modèle pour produire les valeurs manquantes dans la grille d'échantillonnage du relevé acoustique; 3) estimer un indice de biomasse par région pour les années 2015 à 2021. Les indices de biomasse ainsi obtenus seront utilisés lors de l'évaluation de 2022 du hareng de l'Atlantique frayant à l'automne.

MÉTHODES

Depuis 2015, un relevé hydroacoustique est effectué chaque année dans six grandes frayères que le hareng d'automne utilise dans le sud du golfe, c'est-à-dire à Gaspé (Québec), à Miscou et Escuminac (Nouveau-Brunswick), à l'ouest et l'est de l'Île-du-Prince-Édouard et à Pictou (Nouvelle-Écosse); voir la Figure 1. On a établi des strates pour les diverses frayères à l'aide des données acoustiques recueillies lors d'études réalisées en partenariat avec l'industrie. Les strates se veulent assez grandes pour comprendre les frayères reconnues depuis longtemps dans chaque région. On a tracé les transects au hasard dans les différentes strates à des intervalles minimaux de 400 m selon un plan de relevé aléatoire stratifié.

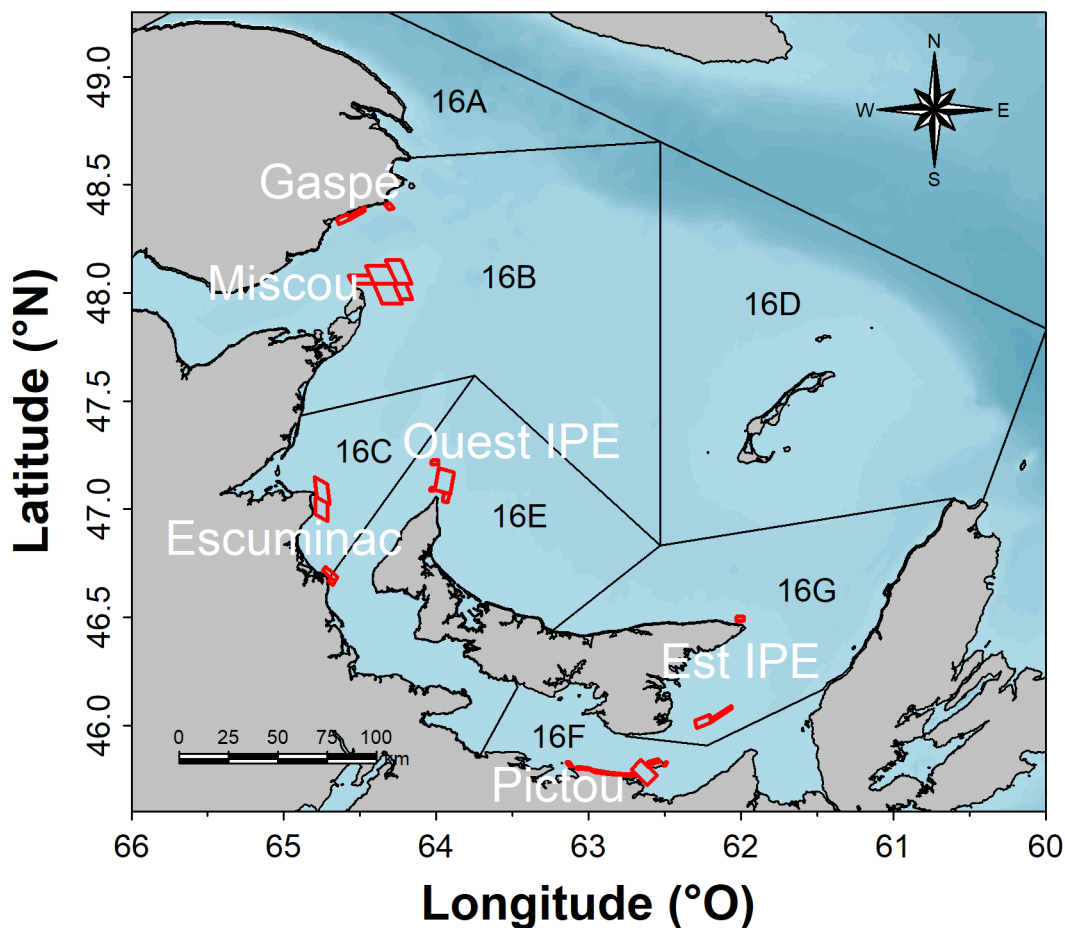


Figure 1: Carte générale des strates (traits en rouge) du relevé acoustique sur frayère annuelle.

Les navires utilisés étaient munis soit d'un échosondeur numérique DE9320 et d'un transducteur à faisceau unique de 120 kHz à angle de 14 degrés (de Femto Electronics Limited) étalonnés conformément à Clay et Claytor (1998), ou d'un échosondeur SIMRAD ES80 et d'un transducteur ES120-7C étalonnés conformément à Demer *et al.* (2015). Les sondeurs acoustiques ES80 ont progressivement remplacé les DE9320 et tous les navires sont équipés d'un ES80 depuis 2020. L'échantillonnage a eu lieu entre le crépuscule et l'aube à une vitesse de 10 nœuds ou moins selon les transects. Toute la zone d'échantillonnage devait être échantillonnée en une nuit, ou en deux nuits consécutives si nécessaire.

Un ou deux bateaux de pêche par frayère (voir l'appendice 1 pour les détails des bateaux et équipements) ont recueilli des données acoustiques jusqu'à une semaine avant la saison de pêche, pendant les fermetures de fin de semaine et jusqu'à une semaine après la fin de la saison de pêche. En général, au plus cinq relevés ont été réalisés par frayère chaque année (Tableau 1). L'effort d'échantillonnage a varié d'une frayère et d'une année à l'autre en raison de la disponibilité des participants, des conditions météorologiques, de la fermeture de la pêche commerciale la fin de semaine et de défauts de fonctionnement de l'équipement ou des navires utilisés.

Tableau 1 : Nombre d'échantillons hydroacoustiques par région et par frayère chaque année.

Région	Frayère	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Nord	Gaspé	5	5	1	5	7	5	5
Nord	Miscou	5	5	4	5	5	6	4
Centre	Escuminac	2	2	1	0	1	6	3
Centre	Ouest de l'Î.-P.-É.	2	1	2	6	4	7	4
Sud	Pictou	5	5	4	4	5	5	5
Sud	Est de l'Î.-P.-É.	0	3	5	2	2	3	0

Les échogrammes ont été traités à l'aide du logiciel Echoview. Pour effectuer la conversion des données acoustiques en estimations de biomasse, les données sur la fréquence des tailles du hareng des relevés expérimentaux au filet maillant effectués dans les frayères chaque semaine pendant la pêche commerciale ont été utilisées (Surette *et al.* 2016). Voir McDermid *et al.* (2018) et Turcotte *et al.* (2021) pour des descriptions détaillées des méthodes et des résultats annuels.

L'exploration des données a eu lieu conformément à Zuur *et al.* (2010), et la sélection et la validation du modèle, conformément à Zuur *et al.* (2013). Une modélisation préliminaire a démontré que le faible nombre d'échantillons et les données asymétriques ne permettaient pas de modéliser la biomasse en fonction des strates et des frayères. Par conséquent, la plus grande finesse possible de regroupement spatial se situait au niveau de la région (nord, centre et sud), ce qui correspond au niveau d'agrégation spatiale du modèle de population permettant d'évaluer les stocks de hareng frayant à l'automne.

Comme le modèle par distribution de Poisson était en surdispersion, on a employé un modèle linéaire général sous forme de distribution binomiale négative avec un lien logarithmique pour modéliser la biomasse nocturne du hareng en fonction des covariables (année, région et jour du calendrier julien). La fonction lien logarithmique garantit l'obtention de valeurs ajustées positives et la distribution binomiale négative est normalement appliquée à des données de dénombrement. On a testé l'ajustement du modèle pour une surdispersion statistique. Les sources de surdispersion considérées ont été les covariables et les termes d'interaction manquants, les valeurs aberrantes, les tendances non linéaires et les variations plus amples que la distribution. On a vérifié les hypothèses du modèle en examinant un graphique des résidus par rapport aux valeurs ajustées. On a vérifié l'indépendance en traçant les résidus de Pearson par rapport à chacune des covariables. On a estimé que l'autocorrélation était faible (0,8 %). On a jugé qu'un terme d'autocorrélation ne viendrait pas améliorer le modèle par les

moindres carrés généralisés. Ainsi, aucun terme d'autocorrélation n'a été ajouté au modèle. On a pris le paquet MASS (Venables et Ripley 2002) dans le logiciel R (R Core Team 2021) pour l'ajustement du modèle. Voici comment se présente le modèle prédictif complet :

$$Biomasse_{ij} = \beta_1 + \beta_2 f_{Année_{ij}} + \beta_3 f_{Région_{ij}} + \beta_4 Jour_{ij}$$

où $Biomasse_{ij}$ est la j ème observation de la i ème combinaison année-région, où $f_{Année_{ij}}$ est une variable catégorique pour l'effet fixe d'année (2015 à 2021), où $f_{Région_{ij}}$ est une variable catégorique pour l'effet fixe de région (nord, centre et sud) et où enfin $Jour_{ij}$ est l'effet du jour julien de l'année (222 à 309).

Pour chaque région, on a défini la durée de la saison d'échantillonnage en prenant les premier et dernier jours juliens des échantillons pour toutes les années en combinaison. On a divisé la durée de la saison en cinq cellules égales en délimitant les périodes où des échantillons étaient prévus (le protocole d'échantillonnage prévoyait cinq échantillons par frayère et par an). On attendait deux échantillons par cellule, chaque région contenant deux frayères, pour un total de 10 échantillons par région et par an. Le modèle prédictif a permis d'obtenir des données pour les cellules où des échantillons manquaient. À l'aide de la grille complète comportant des données tant observées que prédites dans le cas des échantillons manquants, on a calculé les indices de biomasse pour l'évaluation des stocks en tant que biomasse moyenne par région et par an. À des fins de comparaisons, les indices de biomasse ont aussi été calculés comme 1) la moyenne des données observées sans remplacer les valeurs manquantes et 2) en remplaçant les valeurs manquantes par la moyenne des biomasses observées par région et par année (Annexe 2).

RÉSULTATS

La biomasse observée diminuait généralement avec la progression des jours juliens dans l'ensemble des années et des régions (Figure 2A), ainsi que dans les diverses régions à l'échelle des années (Figure 2B). La régression linéaire de la biomasse par jour julien sur l'ensemble des années et des régions était statistiquement significative, mais elle n'expliquait qu'une petite partie de la variation ($R = 0,05$, $F = 7,742$, $p = 0,00607$). En revanche, elle n'était pas statistiquement significative dans chaque région à l'échelle des années.

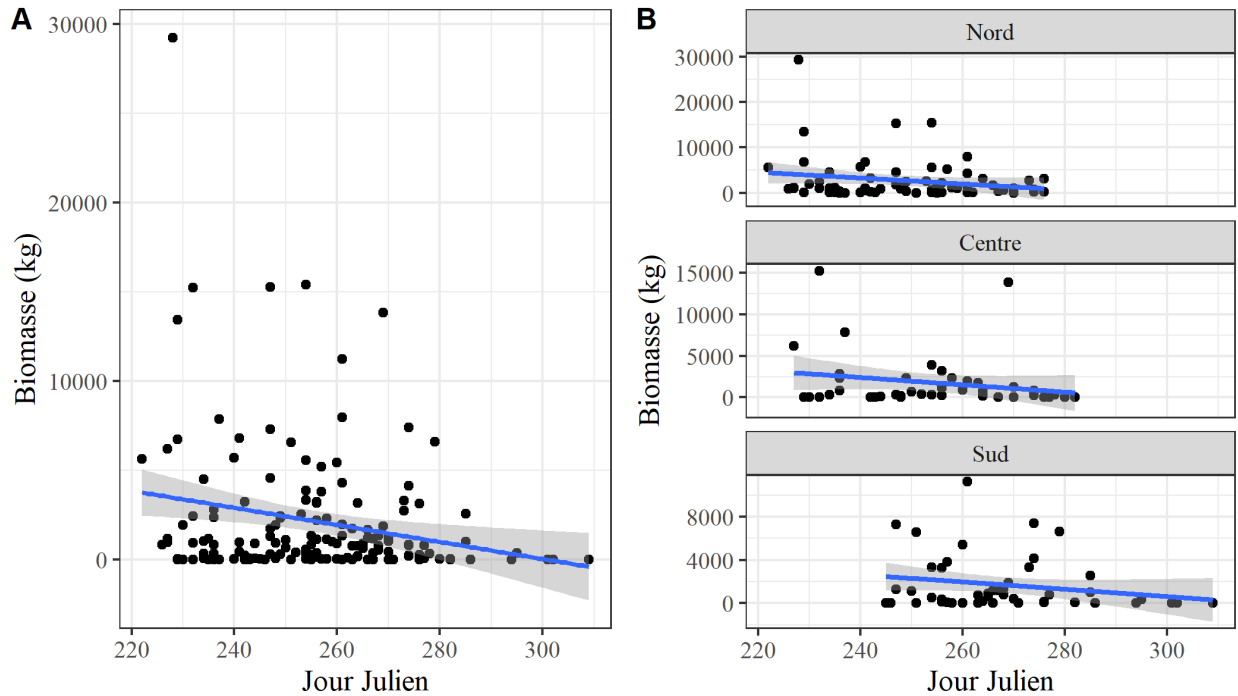


Figure 2: Biomasse observée (points) du hareng sur l'ensemble des années et des régions (A) et à l'échelle des années pour les trois régions (B; nord, centre et sud). Le trait bleu et le grisé correspondent à la régression linéaire et à un intervalle de confiance à 95 %.

La validation du modèle n'a révélé aucun sujet d'inquiétude (Figure 3). Les résidus tracés par rapport aux valeurs ajustées ont montré que leur homoscedasticité était acceptable. On a évalué l'indépendance en traçant les résidus de Pearson par rapport à chacune des covariables sans dégager de tendances non linéaires claires. L'analyse par distance de Cook n'a pas révélé de valeurs aberrantes dans les données.

Le modèle binomial négatif était légèrement en sous-dispersion (paramètre de dispersion = 0,73) et quelques valeurs extrêmement élevées ne pouvaient être prédites par celui-ci. Comme on peut le voir à la Figure 4, le modèle ne pouvait prédire la plupart des valeurs de biomasse au-dessus de 15 000 tonnes. Cependant, les autres valeurs étaient d'une distribution homogène autour de la ligne 1:1, ce qui indique l'absence de biais dans les prédictions du modèle. À la Figure 5, la variance était plus grande pour les valeurs observées que pour les valeurs prédites dans la plupart des années et régions.

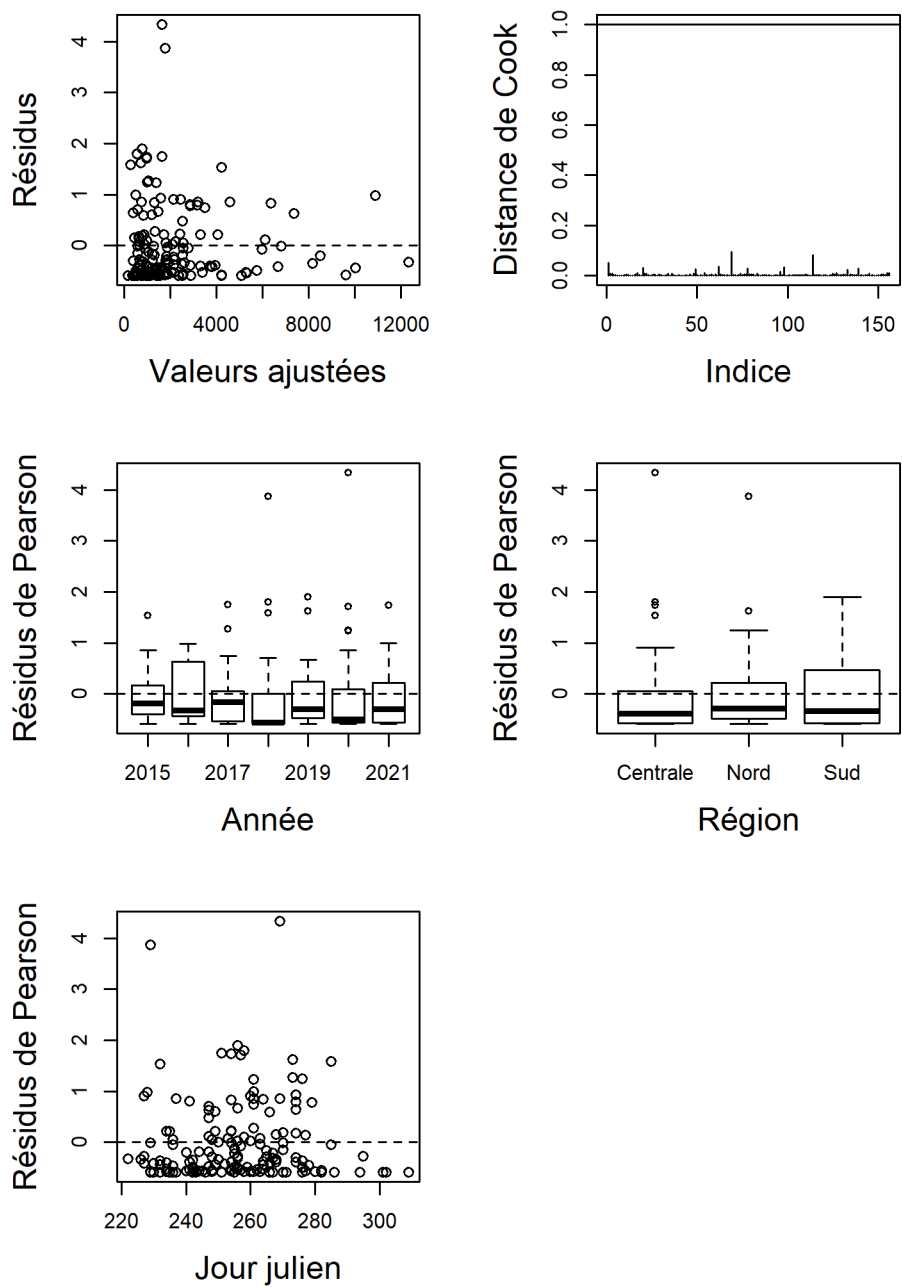


Figure 3: Résidus de Pearson par rapport aux valeurs ajustées (en haut, à gauche), valeurs de distance de Cook (en haut, à droite), et résidus de Pearson par rapport à l'année, la région et le jour julien.

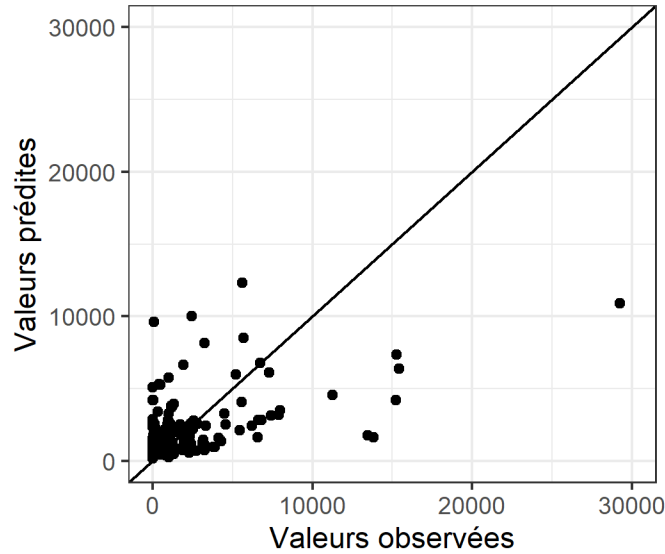


Figure 4: Valeurs observées par rapport aux valeurs prédites, la diagonale étant la ligne 1:1.

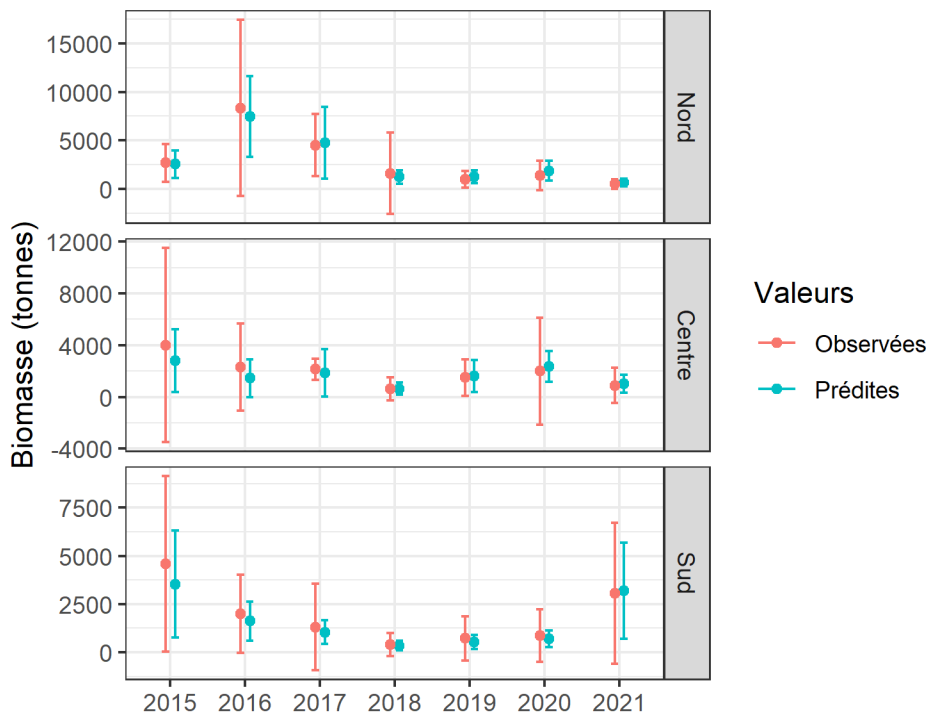


Figure 5: Comparaison des valeurs observées et des valeurs prédites par le modèle selon la région et l'année; les points correspondent à la moyenne et les barres, à l'erreur-type.

La Figure 6 présente les données observées et les données prédites par région, année et jour julien. En majeure partie, les points de données observées sont proches de l'intervalle d'écart-type. À l'échelle des régions et des années, les données prédites font voir une baisse des valeurs avec la progression du calendrier julien, tel que vu dans la plupart des années-régions.

La Figure 7 présente les données prédites pour les échantillons manquants. Pour certaines régions et années, les valeurs prédites de la biomasse par jour julien se situent dans la plage des valeurs observées et la tendance au fil des jours juliens correspond généralement à la tendance des valeurs observées de baisse de la biomasse à mesure qu'avancent les jours juliens. Les indices de biomasse calculés accusent des tendances qui varient selon les régions (Figure 8). Dans la région du nord, la biomasse a augmenté de 2015 à 2016 pour ensuite tomber progressivement à son plus bas niveau en 2021. Dans la région du centre, elle a diminué de 2015 à 2016 pour demeurer ensuite à ce niveau avec une certaine variation. Dans la région du sud, elle a constamment diminué de 2015 à 2018 avant de croître de 2019 à 2021.

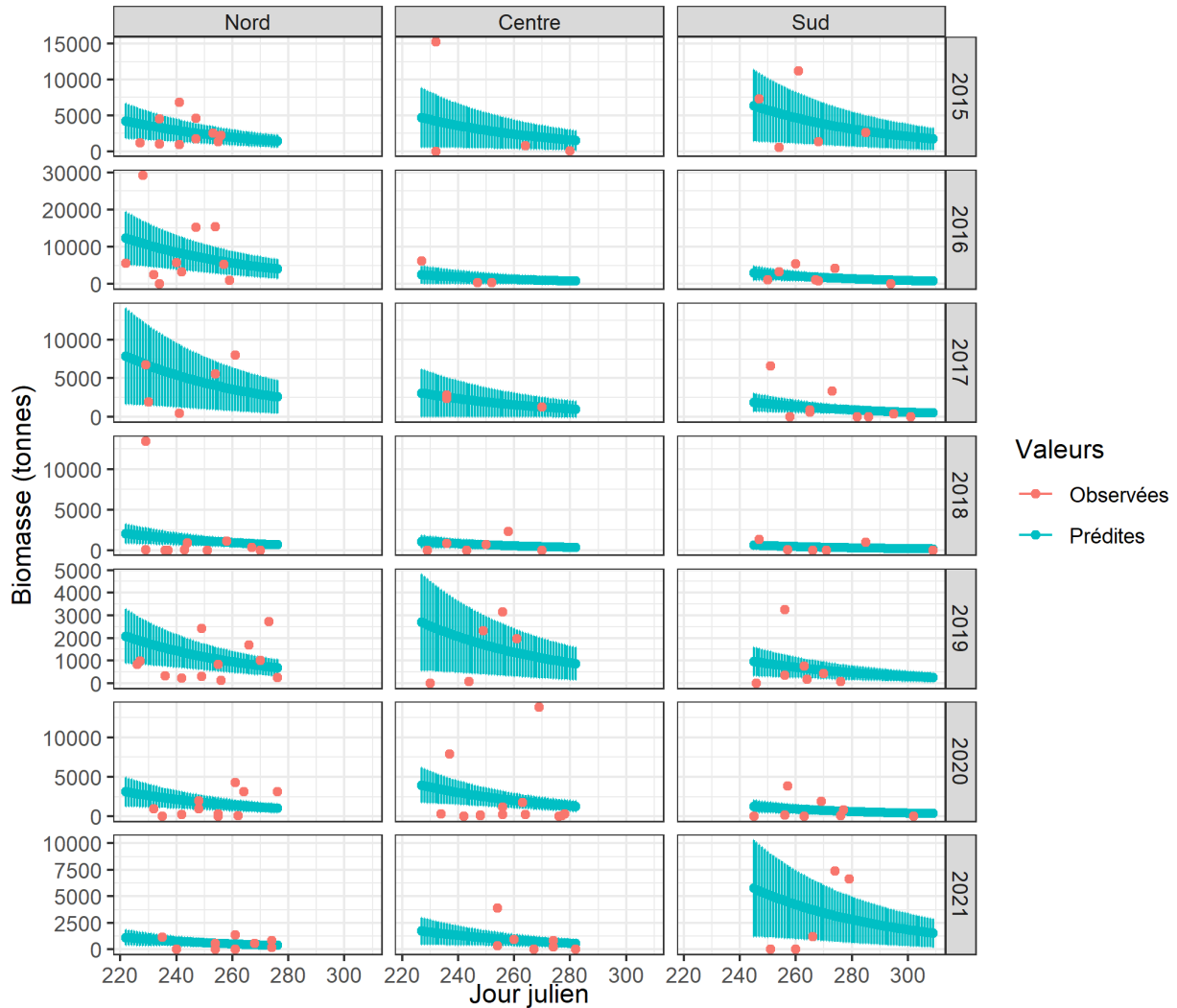


Figure 6: Comparaison des valeurs observées et des valeurs prédites par le modèle selon la région, l'année et le jour julien. Les points rouges correspondent aux valeurs observées, les points verts, aux valeurs prédites et les barres, à l'erreur-type.

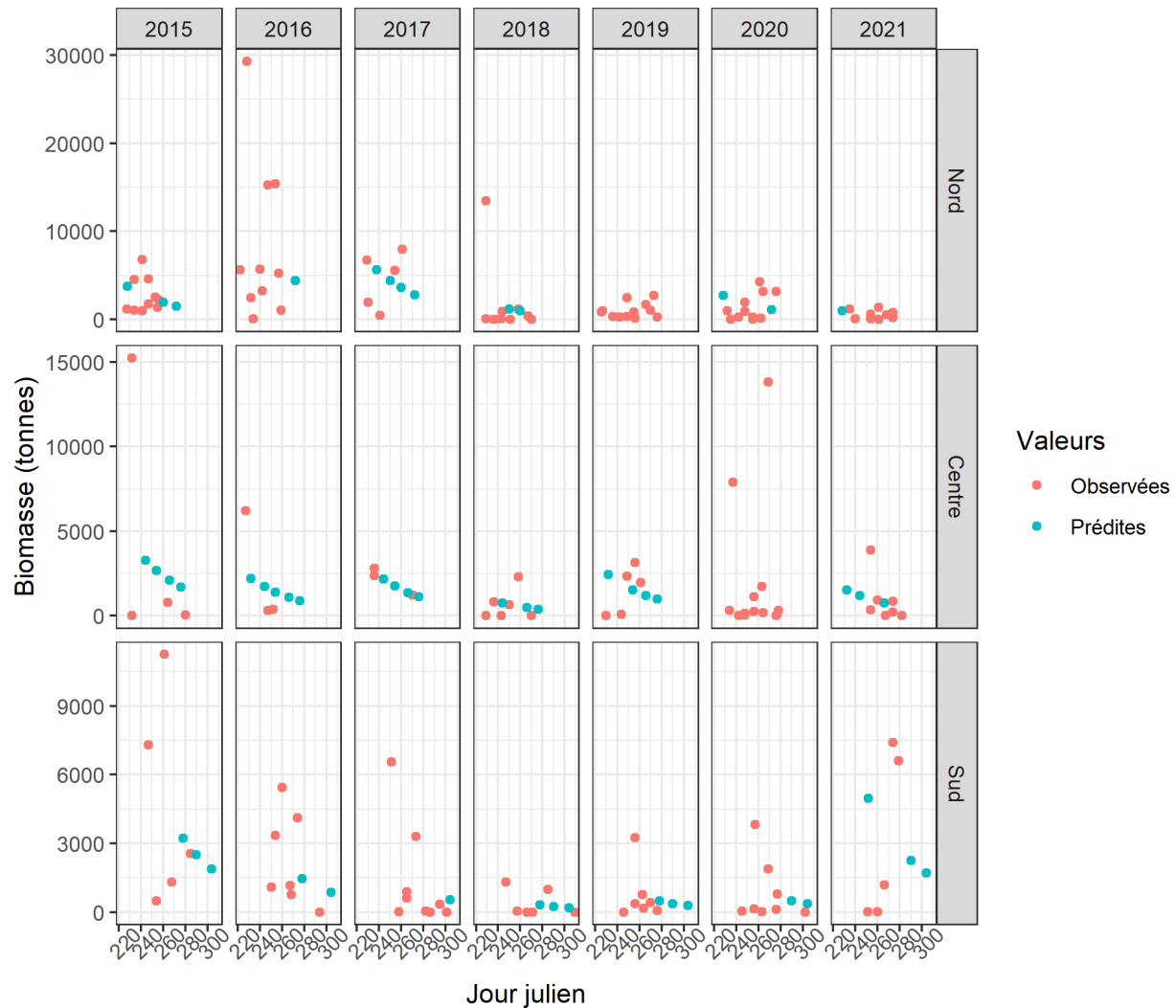


Figure 7: Données servant à produire les indices de biomasse avec les données observées et les données prédites par le modèle selon la région, l'année et le jour julien.

Les valeurs annuelles moyennes de la biomasse variaient de 338 tonnes dans la région du sud en 2018 à 7 667 dans la région du nord en 2016 (Tableau 2). Les valeurs moyennes de la biomasse se ressemblent entre les régions sans qu'une région présente une valeur supérieure ou inférieure dans l'ensemble. À l'échelle des années, la biomasse moyenne a été de 2 672 tonnes (erreur-type = 462 tonnes), 1 661 (252) et 1 536 (252) dans les régions du nord, du centre et du sud, respectivement.

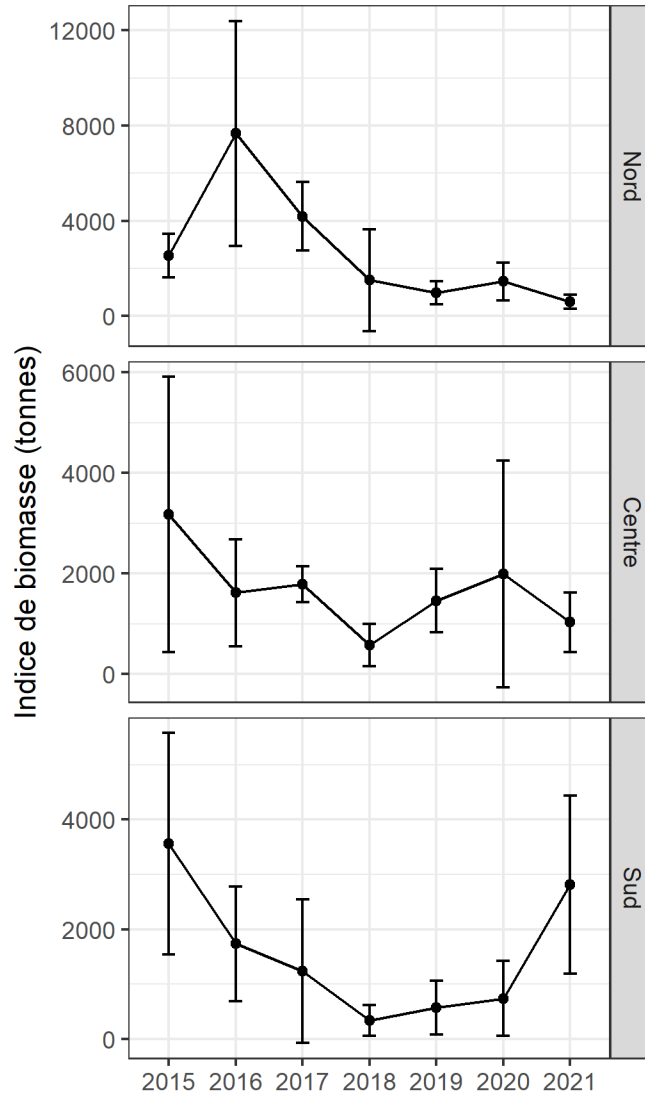


Figure 8: Indices de la biomasse du hareng de l'Atlantique de la division 4T de l'OPANO frayant à l'automne selon le relevé acoustique du Programme de recherche conjointe en sciences halieutiques pour les régions du nord, du centre et du sud, entre 2015 et 2021. Les points correspondent à la moyenne et les traits verticaux, à l'intervalle de confiance à 95 %.

Tableau 2: Biomasse moyenne (tonnes) du hareng de l'Atlantique de la division 4T de l'OPANO frayant à l'automne pour les régions du nord, du centre et du sud, entre 2015 et 2021.

Région	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Nord	2 531,39	7 667,64	4 180,55	1 503,72	975,00	1 449,03	600,13
Centre	3 175,44	1 616,30	1 786,29	576,92	1 463,08	1 995,85	1 036,41
Sud	3 563,53	1 737,44	1 236,30	338,45	569,38	740,42	2 816,26

DISCUSSION

INDICE DE BIOMASSE

Les tendances de la biomasse du hareng de ce relevé concordent généralement avec les tendances observées pour d'autres indices de population et estimations d'état des stocks tirés du modèle de population (Turcotte *et al.* 2021). Les indices d'abondance du relevé au chalut de fond et du relevé acoustique des juvéniles ont marqué un déclin constant entre le milieu des années 2000 et 2019, tendance qui se retrouvait dans les estimations de la biomasse des reproducteurs (Turcotte *et al.* 2021). Selon le relevé, la biomasse a chuté à de très basses valeurs en 2021 dans la région du nord. Dans la région du centre, la décroissance a été plus lente avec plus de variation interannuelle. Enfin, la tendance à la baisse dans la région du sud pourrait s'être inversée; en effet, en 2021, les niveaux de biomasse étaient aussi élevés qu'au début de la série chronologique. La série chronologique du relevé acoustique sur les frayères est courte, mais des tendances en ressortent nettement et ses données seront fort probablement informatives pour la modélisation à l'échelle de la population. Ce relevé est le plus vaste sur le plan spatiotemporel comparativement à d'autres. Il emploie une méthode uniforme, et un prélèvement fréquent d'échantillons tout au long de la saison de fraie permet de d'obtenir des données riches sur la biomasse par région. Ajoutons que, comme le hareng de l'Atlantique fraie à des périodes connues de l'année et se caractérise par une fidélité à la frayère de naissance (Wheeler et Winters 1984; Stobo 1987; Stephenson *et al.* 2009), le relevé permet de viser un groupe d'âge bien précis au sein de la population (les reproducteurs, en l'occurrence) en des temps et des lieux prévisibles.

Les covariables incluses dans le modèle binomial négatif ont permis de prédire les valeurs manquantes dans l'ensemble de données observées. L'interaction région-année a par ailleurs permis au modèle de prédire les différentes tendances à l'échelle des années et entre les régions, et les tendances dégagées correspondaient à celles des données observées. Enfin, la covariable du jour julien a permis au modèle de prédire les données des échantillons manquants spécifiquement pour les périodes en saison d'échantillonnage où les données étaient manquantes. Comme la biomasse diminuait de façon générale au fil de la saison d'échantillonnage (plus spécifiquement la biomasse la plus élevée est souvent observée à la première nuit d'échantillonnage), prédire des valeurs de biomasse spécifiques au jour julien a permis de réduire le biais dans le calcul de l'indice de biomasse.

Le rendement du modèle était acceptable même si celui-ci était légèrement en sous-dispersion. Les quelques valeurs très élevées de biomasse, rencontrées peu souvent, ne pouvaient pas être prédites par le modèle. On s'y attendait, car il s'agissait d'occurrences rares dans les données observées. En témoigne une variance moins grande autour de la moyenne prédite qu'autour de la moyenne observée. La conséquence de cette sous-dispersion est que le modèle ne pourra jamais prédire de valeurs aussi élevées que les rares valeurs extrêmes observées. Il reste que, comme le modèle prédit des valeurs pour les échantillons manquants, on a intérêt à obtenir des valeurs prédites empreintes de prudence.

On peut penser que la vaste couverture spatiotemporelle du relevé représente un grand avantage s'il s'agit de caractériser la biomasse des harengs reproducteurs, mais le relevé risque toujours d'être entaché de biais. Ceux-ci tiendraient surtout aux incertitudes quant 1) à la durée de séjour en frayère et à l'intervalle de temps entre les relevés et 2) aux méthodes d'échantillonnage.

CALENDRIER D'ÉCHANTILLONNAGE DU RELEVÉ

Une incertitude avec le modèle prédictif utilisé ici est qu'il assume une relation linéaire entre les covariables et la variable réponse. Le hareng de l'Atlantique fraie par vagues, et plusieurs vagues sont observées dans une même saison de fraie (Lambert et Messieh 1989; McPherson *et al.* 2003; Stephenson *et al.* 2009). Peu après la fraie, le banc de poissons quitte la frayère, faisant place à la vague suivante (Stephenson *et al.* 2009). Un modèle qui tiendrait compte de ce processus d'aggrégation-désaggrégation sur les frayères pourrait potentiellement expliquer une partie plus importante de la variation dans les données. Par contre, aucune information est disponible sur ces processus pour le hareng du sud du golfe, et des tentatives similaires ont donné des résultats problématiques dans d'autres régions.

Si on souhaite effectuer un dénombrement, il importe de se fonder sur l'hypothèse que les poissons présents dans une frayère pendant un relevé hydroacoustique seront absents au relevé suivant si on veut être certain de ne pas compter les individus en double (voir Melvin *et al.* 2014). Mais si on devait trop espacer les relevés, on se trouverait à manquer une partie des poissons qui fraient. Dans d'autres études sur le hareng de l'Atlantique réalisées selon un plan semblable, l'intervalle était de 7 jours (Wurtzell *et al.* 2016), de 10 à 14 jours (Singh *et al.* 2020) ou de 14 jours (Melvin *et al.* 2014). On a estimé que la périodicité des vagues de fraie, mesurée selon l'intervalle entre les cohortes larvaires, était d'aussi peu que de six (McPherson *et al.* 2003) à huit jours (Lambert 1984), mais une étude par marquage a permis de constater que certains individus marqués en frayère y étaient encore après cinq ou six semaines (Clark 2006), ce qui témoigne de la grande diversité des durées de séjour estimées. Dans une étude, le taux de roulement estimé des reproducteurs était de 81 à 87 % aux 14 jours; ce taux dépendait de la région (Melvin *et al.* 2014). Dans une autre, le taux estimé était de 90 % aux 13 à 18 jours (Martin 2014). Un taux de 50 % a été estimé aux quatre à cinq jours (Martin 2014), indice que, avec un intervalle de sept jours, il y aurait probablement des poissons comptés deux fois.

On pourrait appliquer des facteurs de correction aux estimations de la biomasse pour tenir compte de la durée de séjour (Melvin *et al.* 2020). Toutefois, hors de toute certitude au sujet de la durée de séjour propre au hareng du sud du golfe et avec la possibilité de différences propres aux régions ou de variations temporelles des taux de roulement, il est probablement plus sage d'estimer la capturabilité au relevé. Cela permettrait de tenir compte de la variation interannuelle de l'erreur d'échantillonnage, mais on peut supposer que la haute périodicité de l'échantillonnage intrasaison donnerait une biomasse moyenne représentative chaque année dans chaque région. Si on laisse le modèle de population estimer le coefficient de capturabilité au relevé (ce qui est une pratique courante lors de l'évaluation de stocks de poissons; voir Wilberg *et al.* 2009), on se trouve à tenir compte des poissons comptés deux fois ou manqués. Dans ce relevé, l'échantillonnage acoustique a constamment été réalisé à un intervalle de six à huit jours; c'est la fréquence de relevé qui est permise par la fermeture de la pêche commerciale la fin de semaine dans la région.

On recueille souvent des données hydroacoustiques lors d'activités de pêche (voir, par exemple, les références dans ICES 2007 ainsi que Surette *et al.* 2015). Les relevés comme celui dont il est question ici, qui sont expressément destinés à recueillir des données à des fins d'estimation de l'abondance ou de la biomasse, sont à préférer à des données recueillies occasionnellement (ICES 2007). Dans d'autres études consacrées au hareng de l'Atlantique, on a aussi utilisé des grilles avec des transects aléatoires et des données recueillies par plusieurs navires (voir, par exemple, Wurtzell *et al.* 2016 et O'Malley *et al.* 2021).

MÉTHODES D'ÉCHANTILLONNAGE DU RELEVÉ

Les relevés hydroacoustiques effectués par les pêcheurs peuvent être une méthode efficace et économique si on les compare à ceux qui se font à bord des navires de recherche scientifique, car on augmente aussi bien la quantité de travaux pouvant être menés simultanément dans une même période que la répartition spatiale de ces travaux (ICES 2007; Surette *et al.* 2015; Wurtzell *et al.* 2016). Dans les études de comparaison des données hydroacoustiques recueillies selon la configuration du relevé (équipement de différents fabricants, fréquences diverses et, dans certains cas, différentes méthodes d'analyse, etc.), on a constaté que les valeurs estimatives de la biomasse (Wanzenböck *et al.* 2003; Draščík et Kubečka 2005) ou les valeurs des aires de rétrodiffusion (ICES 1998) étaient statistiquement homogènes. Dans une de ces études comparatives, on a bel et bien relevé une différence entre les données recueillies par deux navires, mais cette différence était légère (Simmonds et MacLennan 2005). Le remplacement de l'équipement FEMTO par de l'équipement SIMRAD dans le présent relevé n'aura sans doute pas d'effet significatif sur les estimations de la biomasse, puisque les configurations de relevé se ressemblent, faisant appel au même transducteur de fréquence, au même logiciel d'analyse de données et aux mêmes méthodes analytiques.

Il a été démontré que, dans certains cas, les navires utilisés lors de relevés acoustiques influent sur le comportement des poissons, dont le hareng (ICES 2007). On a pu constater que, en réaction au bruit des navires, le hareng manifestait un comportement d'évitement de prédateurs en formant des bancs plus compacts, en gagnant des eaux plus profondes et en nageant plus vite (voir, par exemple, van der Knaap *et al.* 2022). Les navires conformes aux normes de réduction du bruit du ICES peuvent quand même causer de l'évitement chez le hareng à des profondeurs de moins de 20 m (voir ICES 2007, et ses références). On a observé que, lors du passage de navires, le hareng n'ayant pas frayé ou en hivernage s'enfonçait dans la colonne d'eau à cause du bruit ou des feux des navires (Olsen 1979; Ona et Toresen 1988; Vabo *et al.* 2002; Skaret *et al.* 2006). La même constatation a été faite pour des bancs en migration de fraie (Misund 1990). Les études en question ont eu lieu en eau peu profonde (30 à 40 m) ou profonde (200 à 400 m). La profondeur à laquelle on observe habituellement le hareng lors du relevé sur les frayères dans le sud du golfe est de 20 à 30 m. En revanche, dans un relevé du hareng en cours de fraie (à une profondeur de 30 à 40 m), on n'a pas constaté que les poissons réagissent outre mesure au bruit des navires, ce qu'on a attribué à l'importance accrue du comportement de fraie à ce moment-là (Skaret *et al.* 2005). Dans le sud du golfe, le relevé a été effectué avec des navires de l'industrie sans dispositif de réduction du bruit. Toutefois, comme il a eu lieu pendant la période de fraie et que la plupart des bancs observés étaient près du fond, il est probable que les poissons n'aient pas trop réagi à la présence des navires.

Les autres sources de bruit sont les interférences d'appareils électriques et d'échosondeurs et la formation de bulles d'air. On a vérifié les données après le premier relevé chaque année dans chaque région pour corriger le facteur observé d'interférence électrique et pour s'assurer qu'aucun autre sondeur ne fonctionnait à la même fréquence ou à une fréquence parasite au moment du relevé. On a retranché les données à moins de cinq mètres dans l'analyse, sauf si des poissons étaient manifestement présents dans l'échogramme.

Le potentiel de biais induits par le bruit pour une même frayère est faible dans ce relevé. Le même bateau/capitaine a été utilisé toutes les années dans l'ouest de l'Î.-P.-É. et la plupart des années à Miscou, Gaspé et Pictou. Si elles sont présentes, les différences de biais de bruit pourraient être plus importantes entre les régions plutôt qu'au sein des régions, en raison du nombre relativement faible de changements de navires au sein d'une région. Cependant, dans les frayères de l'Est de l'Î.-P.-É. et d'Escuminac, où les bateaux/capitaines ont changé plus régulièrement au cours de la série chronologique, on peut s'attendre à ce que les différences de

biais de bruit soient plus importantes que dans d'autres régions. Le potentiel de biais liés au bruit des navires sera mesuré au cours des prochaines saisons de relevés en enregistrant le bruit passif sur tous les navires d'échantillonnage. Si des différences significatives de bruit entre les navires sont constatées, les données seront corrigées afin d'améliorer la comparabilité entre les régions.

REMERCIEMENTS

Cette étude a reçu l'appui du Programme de recherche conjointe en sciences halieutiques de Pêches et Océans Canada. Les auteurs remercient tous les participants de l'industrie, les pêcheurs et les associations. Ils souhaitent également remercier les techniciens de Pêches et Océans Canada qui ont procédé aux échantillonnages au port et en laboratoire.

RÉFÉRENCES CITÉES

- Axelsen, B.E., Nottestad, L., Ferno, A., Johannessen, A., and Misund, O.A. 2000. 'Await' in the pelagic: Dynamic trade-off between reproduction and survival within a herring school splitting vertically during spawning. *Marine Ecology Progress Series* 205: 259–269.
- Brophy, D., Danilowicz, B.S., and King, P.A. 2006. Spawning season fidelity in sympatric populations of Atlantic herring (*Clupea harengus*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 63(3): 607–616.
- Clark, K.J. 2006. [An Examination of Turnover Rate of Herring on the Spawning Grounds of Scots Bay and German Bank using Tagging Data](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2006/47.
- Clay, A., and Claytor, R. 1998. [Hydroacoustic Calibration Techniques used for southern Gulf of St. Lawrence Herring Fishing Vessels - 1997](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. (1998/96).
- Demer, D.A., Berger, L., Bernasconi, M., Bethke, E., Boswell, K., Cgu, D., Domokos, R., Dunford, A., Fassler, S., Gauthier, S., Hufnagle, L.T., Jech, M.J., Bouffant, N., Lebourges-Dhaussy, A., Lurton, X., Macaulay, G.J., Perrot, Y., Ryan, T., Parker-Stetter, S., Stienessen, S., Weber, T., and Williamson, N. 2015. Calibration of acoustic instruments. *ICES Coop. Res. Rep.* (326): 130.
- Draštík, V., and Kubečka, J. 2005. Fish avoidance of acoustic survey boat in shallow waters. *Fisheries Research* 72(2-3): 219–228.
- ICES. 1998. Report of the planning group for herring surveys. ICES CM 1998/G:4, Bergen, Norway.
- ICES. 2007. Collection of Acoustic Data From Fishing Vessels. Edited by W.A. Karp. ICES Cooperative Research Report No. 287.
- Lambert, T.C. 1984. Larval cohort succession in herring (*Clupea harengus*) and capelin (*Mallotus villosus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 41(11): 1552–1564.
- Lambert, T.C., and Messieh, S.N. 1989. Spawning Dynamics of Gulf of St. Lawrence Herring (*Clupea harengus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 46: 2085–2094.
- Martin, J.R. 2014. Turnover time and annual migration of (*Clupea harengus*) Atlantic herring on the German Bank and Scot ' s Bay spawning grounds : a mark and recapture study. PhD thesis, University of New Brunswick.

-
- McDermid, J.L., Swain, D.P., Turcotte, F., Robichaud, S.A., et Surette, T. 2018. [Évaluation des stocks de hareng de l'Atlantique \(*Clupea harengus*\) de la division 4T de l'OPANO dans le sud du golfe du Saint-Laurent en 2016 et 2017](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2018/052. xvi + 125 p
- McPherson, A.A., Stephenson, R.L., and Taggart, C.T. 2003. Genetically different Atlantic herring. Marine Ecology Progress Series 247: 303–309.
- McQuinn, I.H. 1997. Metapopulations and the Atlantic herring. Rev. Fish Biol. Fish. 7: 297–329.
- Melvin, G.D., Martin, R., and Power, M. J. 2014. [Estimating German Bank and Scots Bay Herring Spawning Ground Turnover Rates from Tag Returns](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2014/068. iv + 22 p.
- Melvin, G.D., Singh, R., Martin, R., et Power, M.J. 2020. [Mise à jour des estimations de la biomasse féconde pour le hareng du banc German et de la baie Scots selon les taux de renouvellement du hareng dans les frayères d'après les retours d'étiquettes](#). Secr. can. De consult. sci. du MPO, Doc. de rech. 2020/008. iv + 25 p.
- Misund, O.A. 1990. Sonar observations of schooling herring: school dimensions, swimming behavior, and avoidance of vessel and purse seine. Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer 189: 135–146.
- Olsen, K. 1979. Observed avoidance behaviour in herring in relation to passage of an echo survey vessel. C.M. 1979/B:18. International Council for the Exploration of the Sea, Bergen, Norway.
- O'Malley, M., Mullins, E., and Nolan, C. 2021. FEAS Survey Series : Industry Acoustic Atlantic Herring in 6aS / 7b , Industry Acoustic Survey Cruise Report November-December 2020 and January 2021. Marine Institute.
- Ona, E., and Toresen, R. 1988. Avoidance reactions of herring to a survey vessel, studied by scanning sonar. C.M. 1988/H:46 Pelagic Fish Committee: 8.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Simmonds, J., and MacLennan, D. 2005. Fisheries Acoustics. In 2nd editions. Blackwell Science Ltd, Oxford, UK.
- Singh, R., Knox, D., MacIntyre, A., et Melvin, G.D. 2020. [Évaluation des stocks de hareng des divisions 4VWX de l'Organisation des pêches de l'Atlantique Nord-Ouest \(OPANO\) en 2018](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Doc. de rech. 2020/062. vi + 167 p.
- Skaret, G., Axelsen, B.E., Nøttestad, L., Fernö, A., and Johannessen, A. 2005. The behaviour of spawning herring in relation to a survey vessel. ICES Journal of Marine Science 62(6): 1061–1064.
- Skaret, G., Slotte, A., Handegard, N.O., Axelsen, B.E., and Jørgensen, R. 2006. Pre-spawning herring in a protected area showed only moderate reaction to a surveying vessel. Fisheries Research 78(2-3): 359–367.
- Stephenson, R.L., Melvin, G.D., and Power, M.J. 2009. Population integrity and connectivity in Northwest Atlantic herring: A review of assumptions and evidence. ICES Journal of Marine Science 66(8): 1733–1739.

-
- Stobo, W.T. 1987. Atlantic herring (*Clupea harengus*) movement along the Scotian Shelf and management considerations. In Proceedings of the conference on forage fishes of the southeastern Bering sea. US Department of the Interior, Minerals Management Services, Alaska OCS Region, Anchorage, Alaska. pp. 55–60.
- Surette, T.J., LeBlanc, C.H., and Mallet, A. 2016. [Abundance indices and selectivity curves from experimental multi-panel gillnets for the southern Gulf of St. Lawrence fall herring fishery.](#) DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2016/067. vi + 23 p.
- Surette, T., LeBlanc, C.H., Claytor, R.R., and Loots, C. 2015. Using inshore fishery acoustic data on Atlantic herring (*Clupea harengus*) spawning aggregations to derive annual stock abundance indices. Fisheries Research 164: 266–277. Elsevier B.V.
- Turcotte, F., Swain, D.P., McDermid, J.L. et DeJong, R.A. 2021. [Évaluation des stocks de Hareng de l'Atlantique \(*Clupea harengus*\) de la zone 4TVn de l'OPANO dans le sud du golfe du Saint-Laurent en 2018-2019.](#) Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2021/030. xv + 167 p.
- Vabo, R., Olsen, K., and Huse, I. 2002. Vessel avoidance of wintering Norwegian spring spawning herring. The Journal of the Acoustical Society of America 103(5): 3035–3035.
- van der Knaap, I., Ashe, E., Hannay, D., Bergman, A.G., Nielsen, K.A., Lo, C.F., and Williams, R. 2022. Behavioural responses of wild Pacific salmon and herring to boat noise. Marine Pollution Bulletin 174: 113257.
- Venables, W.N., and Ripley, B.D. 2002. Modern applied statistics with s. In Fourth. Springer, New York.
- Wanzenböck, J., Mehner, T., Schulz, M., Gassner, H., and Winfield, I.J. 2003. Quality assurance of hydroacoustic surveys: The repeatability of fish-abundance and biomass estimates in lakes within and between hydroacoustic systems. ICES Journal of Marine Science 60(3): 486–492.
- Wheeler, J.P., and Winters, G.H. 1984. Homing of Atlantic Herring (*Clupea harengus*) in Newfoundland Waters as Indicated by Tagging Data. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 41: 108–117.
- Wilberg, M.J., Thorson, J.T., Linton, B.C., and Berkson, J. 2009. Incorporating time-varying catchability into population dynamic stock assessment models. Reviews in Fisheries Science 18(1): 7–24.
- Wurtzell, K.V., Baukus, A., Brown, C.J., Jech, J.M., Pershing, A.J., and Sherwood, G.D. 2016. Industry-based acoustic survey of Atlantic herring distribution and spawning dynamics in coastal Maine waters. Fisheries Research 178: 71–81.
- Zuur, A.F., Hilbe, J.M., and Ieno, E.N. 2013. A beginner's guide to GLM and GLMM with R. Highland Statistics Ltd.
- Zuur, A.F., Ieno, E.N., and Elphick, C.S. 2010. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. Methods in Ecology and Evolution 1(1): 3–14.

ANNEXE 1

Tableau A1.1. Détails sur les navires et l'équipement utilisés pour effectuer des relevés acoustiques par frayère et par année. FEMTO indique un équipement FEMTO avec un transducteur de 120 kHz et SIMRAD indique SIMRAD ES80 avec des transducteurs de 120 kHz.

Frayère	Année	Navire	Équipement
Gaspé	2015	Mary David	FEMTO
Gaspé	2016	Mary David	FEMTO
Gaspé	2017	Mary David	FEMTO
Gaspé	2018	Miss Amy Lynn	SIMRAD
Gaspé	2019	Miss Amy Lynn	SIMRAD
Gaspé	2020	Miss Amy Lynn	SIMRAD
Gaspé	2021	NigNag	SIMRAD
Miscou	2015	Autumn Breeze / B-Carll	FEMTO
Miscou	2016	B-Carll	FEMTO
Miscou	2017	Hebert Boys	FEMTO
Miscou	2018	Hebert Boys	SIMRAD
Miscou	2019	Hebert Boys	SIMRAD
Miscou	2020	Hebert Boys	SIMRAD
Miscou	2021	Hebert Boys	SIMRAD
Escuminac	2015	Alicia G	FEMTO
Escuminac	2016	Alicia G	FEMTO
Escuminac	2017	Alicia G	SIMRAD
Escuminac	2018	N/A	N/A
Escuminac	2019	Miss Tate	SIMRAD
Escuminac	2020	Sea Princess No. 1	SIMRAD
Escuminac	2021	Sea Princess No. 1	SIMRAD
Ouest I.P.É	2015	Sting Rae	FEMTO
Ouest I.P.É	2016	Sting Rae	FEMTO
Ouest I.P.É	2017	Sting Rae	FEMTO
Ouest I.P.É	2018	Sting Rae	FEMTO
Ouest I.P.É	2019	Sting Rae	FEMTO
Ouest I.P.É	2020	Sting Rae	SIMRAD
Ouest I.P.É	2021	Sting Rae	SIMRAD
Est I.P.É	2015	N/A	N/A
Est I.P.É	2016	Sunrise Sail II	FEMTO
Est I.P.É	2017	Sunrise Sail II	FEMTO
Est I.P.É	2018	Sunrise Sail II	SIMRAD
Est I.P.É	2019	Katherine Maureen	FEMTO
Est I.P.É	2020	Katherine Maureen	SIMRAD
Est I.P.É	2021	N/A	N/A
Pictou	2015	Northport Lady II / Slack Tide	FEMTO
Pictou	2016	Northport Lady II	FEMTO
Pictou	2017	Slack Tide	FEMTO
Pictou	2018	Slack Tide	SIMRAD
Pictou	2019	Slack Tide	SIMRAD
Pictou	2020	Slack Tide	SIMRAD
Pictou	2021	Slack Tide	SIMRAD

ANNEXE 2

La Figure A2.1 montre une comparaison des indices de biomasse acoustique pour les régions nord, centre et sud, entre 2015 et 2021, en utilisant trois options d'analyse pour traiter les données manquantes. La première option consiste à ignorer les données manquantes et à utiliser la moyenne de toutes les valeurs observées par région et par année ("Moyenne" dans la légende de la figure). La deuxième option consiste à remplacer les valeurs manquantes par la valeur moyenne des observations de la région-année (« Moyenne manquante » dans la légende de la figure). La troisième option est le modèle prédictif développé dans ce document de recherche (« Modèle » dans la légende de la figure).

Comme il y a très peu de données manquantes dans la région du nord, il n'y a presque pas de différence dans les valeurs moyennes ou d'erreur entre les trois méthodes. Pour les régions du centre et du sud, où le nombre de valeurs manquantes est plus élevé, certaines différences apparaissent, bien que mineures. En général, l'utilisation de la moyenne des valeurs observées génère des estimations d'erreur plus élevées autour des valeurs moyennes. Il faut s'y attendre, car cet ensemble de données contient moins d'échantillons que les ensembles de données des deux autres méthodes. Les valeurs moyennes de la biomasse obtenues à l'aide de la méthode de la moyenne ou de la méthode de la moyenne manquante sont presque identiques pour toutes les années et toutes les régions. Les méthodes de moyenne manquante et de modèle ont produit une erreur similaire autour des valeurs moyennes, car le nombre d'échantillons de ces deux ensembles de données est le même. Certaines années et certaines régions, les valeurs moyennes utilisant la méthode du modèle sont différentes de celles des deux autres méthodes. Par exemple, dans la région sud en 2015, la valeur moyenne de la méthode du modèle est inférieure à la valeur moyenne de la méthode moyenne manquante. Dans cette région-année, les trois échantillons manquants provenaient tous de la fin de la saison (Figure 7). Le modèle a ainsi prédit des valeurs plus faibles, ce qui a généré une valeur de biomasse moyenne plus faible que les autres méthodes.

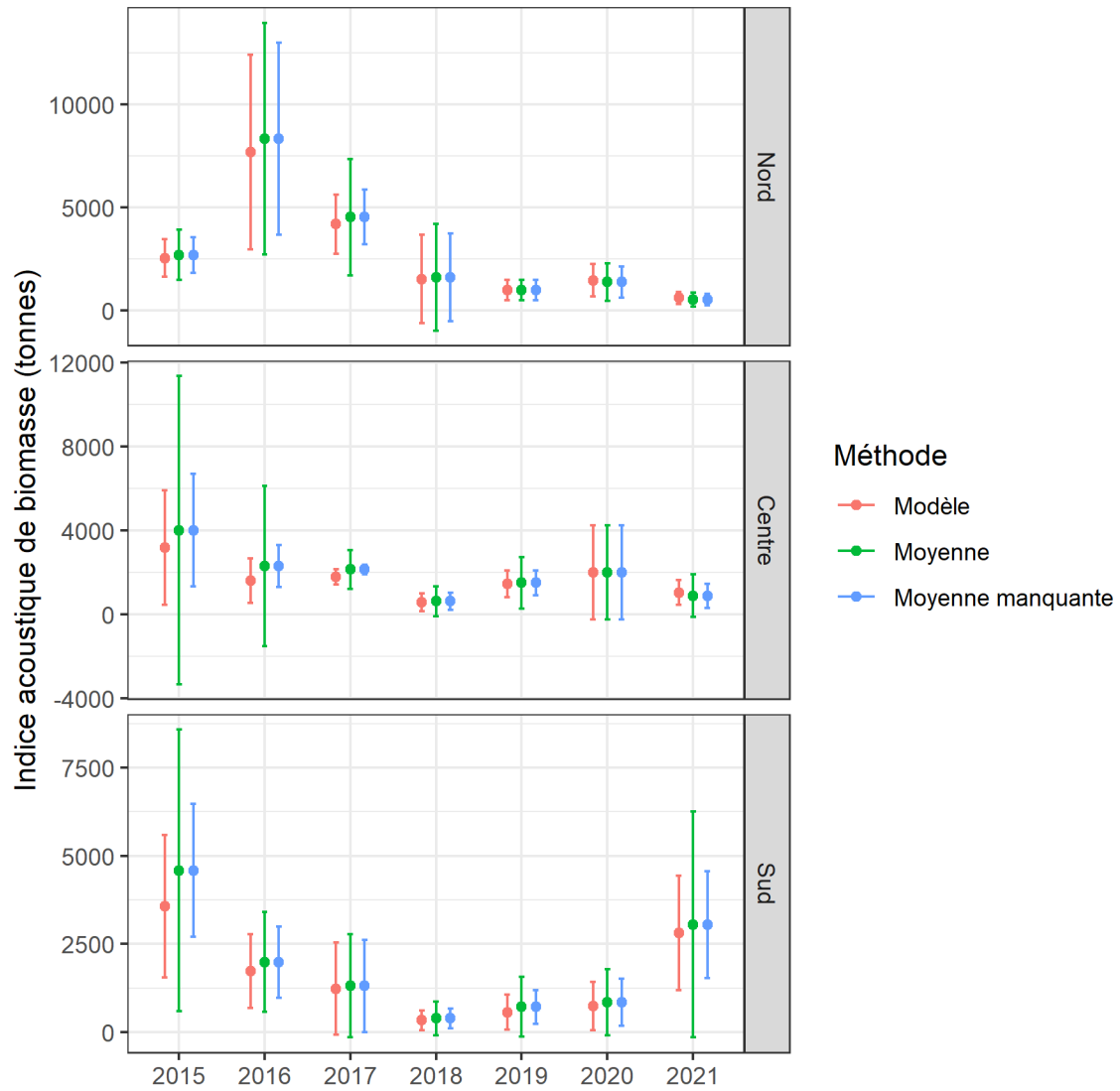


Figure A2.1: Indice acoustique de la biomasse (tonnes) du hareng de l'Atlantique frayant à l'automne dans les régions du nord, du centre et du sud entre 2015 et 2021, calculé comme la moyenne des valeurs observées (en vert), en remplaçant les valeurs manquantes par la moyenne de la combinaison région-année (en bleu), ou en utilisant le modèle prédictif de ce document de recherche (en rouge).