



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 2021/077

Région de Québec

Caractéristiques biologiques, facteurs affectant la capturabilité et indices d'abondances du capelan dans les relevés multi spécifiques au chalut de fond du sud et du nord du golfe du Saint-Laurent

Jean-Martin Chamberland, Stéphane Plourde et Hugues P. Benoît

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

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



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2022
ISSN 2292-4272
ISBN 978-0-660-41843-8 N° cat. Fs70-5/2021-077F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Chamberland, J.-M., Plourde, S. et Benoît, H. B. 2022. Caractéristiques biologiques, facteurs affectant la capturabilité et indices d'abondances du capelan dans les relevés multi spécifiques au chalut de fond du sud et du nord du golfe du Saint-Laurent. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2021/077. iv + 47 p.

Also available in English:

Chamberland, J.-M., Plourde, S. and Benoît, H. B. 2022. Biological characteristics, factors affecting catchability, and abundance indices of capelin in the southern and northern Gulf of St. Lawrence multi species bottom trawl surveys. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2021/077. iv + 41 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iv
1. INTRODUCTION	1
2. MÉTHODES.....	2
2.1. ZONE D'ÉTUDE, PLANS DE RELEVÉ ET ENGIN D'ÉCHANTILLONNAGE	2
2.2. MODÈLE CONCEPTUEL DE LA RÉPARTITION VERTICALE DU CAPELAN DANS LE GOLFE DU SAINT-LAURENT	2
2.3. STRUCTURE SELON LA TAILLE.....	4
2.4. INFLUENCE DES INDICES DE LA PRÉDATION ET DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SUR LA CAPTURABILITÉ DU CAPELAN	5
2.4.1. Indices de la prédation	5
2.4.2. Relations entre la prédation, l'environnement et la capturabilité du capelan	6
2.5. INDICES D'ABONDANCE DU CAPELAN.....	7
2.6. ESTIMÉ DE L'ORDRE DE GRANDEUR DE LA MORTALITÉ PAR PÊCHE.....	9
3. RÉSULTATS.....	9
3.1. PRÉFÉRENCE DU CAPELAN EN MATIÈRE D'HABITAT	9
3.2. STRUCTURE SELON LA TAILLE.....	11
3.3. INFLUENCE DES INDICES DE PRÉDATION ET DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SUR L'ABONDANCE DU CAPELAN	11
3.4. INDICES D'ABONDANCE DU CAPELAN.....	13
3.5. ORDRE DE GRANDEUR ESTIMÉ DE LA MORTALITÉ PAR PÊCHE.....	13
4. DISCUSSION.....	13
5. CONCLUSION	16
REMERCIEMENTS	17
RÉFÉRENCES CITÉES	17
TABLEAUX	22
FIGURES	23
ANNEXE 1	39
ANNEXE 2	41
ANNEXE 3	46

RÉSUMÉ

L'objectif principal de cette étude était d'examiner, sur la base de nouvelles analyses et d'un modèle conceptuel de l'utilisation de l'habitat d'alimentation estivale du capelan, si des indices d'abondance du capelan biologiquement valables pouvaient être dérivés à partir des relevés multi spécifiques au chalut de fond effectués dans le sud et le nord du golfe du Saint-Laurent (GSL). Les analyses des données des relevés ont étayé une série de prédictions générées par le modèle conceptuel, selon lequel le capelan est associé à la couche intermédiaire froide (CIF) et effectue des migrations verticales nyctémérales qui le rendent plus accessible aux chaluts de fond durant le jour. Les distributions de la fréquence de taille du capelan capturé dans les relevés multi spécifiques au chalut de fond ont indiqué des différences régionales dans la structure selon la taille. Comparativement aux fréquences de longueur dans la pêche commerciale ciblant les poissons reproducteurs, les relevés ont capturé en moyenne des capelans plus petits (et plus jeunes). Le potentiel effet négatif du risque de prédation sur la capturabilité du capelan dans les chaluts de fond a été quantifié en prenant en compte d'autres descripteurs de l'habitat. Les résultats ont montré que, pour le sud du golfe du Saint-Laurent (sGSL), la capturabilité du capelan était négativement liée au risque de prédation, mais avec un faible effet global par rapport aux autres facteurs. Parmi les indices d'abondance présentés, un indice calculé à partir de traits effectués dans l'habitat thermique de prédilection du capelan est prometteur, car il prend en compte le comportement du capelan et a une moins variabilité. Cet indice suppose toutefois que la densité du capelan est horizontalement homogène dans la couche intermédiaire froide, et cette hypothèse n'a pas encore été validée. Une estimation de l'ordre de grandeur de la mortalité par pêche, fondée sur les indices d'abondance nouvellement élaborés, est également présentée et est considérée comme faible par rapport à des estimations prudentes de la mortalité naturelle du capelan, bien que le risque d'épuisement local aux endroits où la pêche est concentrée n'ait pas été étudié. Ces nouvelles analyses apportent des informations utiles à l'évaluation du stock de capelan dans les divisions 4RST de l'OPANO.

1. INTRODUCTION

Le capelan est une espèce des eaux froides, présente généralement à des températures comprises entre -1 °C et 3 °C (Crook *et al.* 2017, Ingvaldsen et Gjørseter 2013, Olafsdottir et Rose 2012). Cette préférence semble forte, car il a été démontré que la répartition de l'espèce suit les changements dans la répartition de son habitat thermique optimal (Rose 2005). Le capelan effectue une migration verticale nyctémérale afin de se nourrir pendant la journée des concentrations denses de ses principales proies, les copépodes du genre *Calanus* et le krill (Dalpadado et Mowbray 2013, Aarflot *et al.* 2020). Dans la mer de Barents, les abondances plus élevées de capelan sont généralement associées à des régions de moins de 200 m de profondeur, typiques des bancs peu profonds et de leurs talus, où la température est optimale et la quête de nourriture plus fructueuse, car les niveaux de lumière et la densité des proies zooplanctoniques sont plus élevés (Aarflot *et al.* 2020).

L'évaluation du stock de capelan dans les divisions 4RST de l'Organisation des pêches de l'Atlantique Nord-Ouest (OPANO) est considérée comme pauvre en données. Le capelan figure couramment parmi les captures des relevés multi spécifiques au chalut de fond dans le sud et le nord du golfe du Saint-Laurent (GSL) depuis 1990 (respectivement relevés sGSL et nGSL; Grégoire *et al.* 2012, Savoie 2014). O'Driscoll et ses collaborateurs (2002) ont proposé deux incertitudes majeures associées à l'utilisation des chaluts de fond pour évaluer l'abondance des poissons pélagiques. Tout d'abord, l'efficacité de capture (q_e) dans la zone de chalutage est incertaine, car il est difficile de savoir dans quelle mesure les prises sont représentatives du volume échantillonné. Ensuite, la proportion de poissons disponibles pour le relevé (c.-à-d. dans l'habitat chalutable; q_a) est possiblement faible et variable d'une année à l'autre, car le volume échantillonné par le chalut de fond ne représente qu'une petite proportion de l'habitat du capelan compte tenu de la répartition verticale et du comportement migratoire de ce poisson pélagique. Une augmentation de l'occupation de l'habitat suprabenthique par le capelan et le hareng Atlantique, observée au début des années 1990, a étayé la possibilité de variations interannuelles de la répartition verticale diurne du capelan et de sa disponibilité pour le chalut de fond, remettant en question la valeur des relevés au chalut de fond à long terme effectués par Pêches et Océans Canada (MPO) pour fournir des renseignements utiles à l'évaluation du capelan (Mowbray 2002, McQuinn 2009). L'augmentation de l'occupation de l'habitat suprabenthique par le capelan et le hareng a été interprétée comme une réponse comportementale à l'effondrement des stocks de morue franche dans le golfe du Saint-Laurent et à Terre-Neuve, impliquant explicitement que l'abondance locale de la morue influencerait les prises de capelan dans le chalut de fond. Cependant, il n'y a pas eu jusqu'à présent d'analyses empiriques ciblées visant à vérifier cette prédiction.

Notre étude avait cinq objectifs distincts, mais complémentaires, visant à élaborer et à valider des indices d'abondance du capelan en utilisant les relevés au chalut de fond du sGSL et du nGSL afin de guider l'évaluation du stock de capelan dans les divisions 4RST. En premier lieu, nous avons élaboré un modèle conceptuel de la répartition verticale du capelan dans le golfe du Saint-Laurent en décrivant la préférence thermique du capelan et en mettant à l'essai les prédictions sur la variation nyctémérale et leurs effets attendus sur l'occurrence et l'abondance du capelan dans l'habitat suprabenthique d'après les prises au chalut de fond. Deuxièmement, nous avons comparé les distributions de la fréquence de taille du capelan dans les relevés au chalut de fond à celles de la pêche commerciale qui a lieu au printemps et au début de l'été. Ces résultats ont été interprétés dans le contexte des données historiques sur la longueur selon l'âge dans le golfe du Saint-Laurent. Troisièmement, nous avons explicitement testé l'hypothèse selon laquelle le capelan évite la couche suprabenthique échantillonnée par le chalut de fond lorsque l'abondance des prédateurs démersaux est élevée, diminuant ainsi sa capturabilité

dans les relevés, et nous avons quantifié son importance par rapport aux caractéristiques de l'habitat physique. Quatrièmement, nous avons calculé des indices d'abondance tenant compte des résultats obtenus à partir des objectifs précédents et en avons évalué la variabilité. Enfin, nous avons combiné les indices d'abondance aux données sur la pêche et aux coefficients de capturabilité pour les poissons pélagiques échantillonnés par les relevés au chalut de fond afin de fournir une estimation grossière de l'ampleur relative de la mortalité par pêche et de la mortalité naturelle du capelan dans le golfe du Saint-Laurent. Ce rapport constitue un indicateur de la durabilité de la pêche du stock. Ces analyses faisaient partie d'une approche multidisciplinaire visant à intégrer des connaissances basées sur l'écosystème afin d'améliorer l'évaluation du stock de capelan dans les divisions 4RST, pauvre en données.

2. MÉTHODES

2.1. ZONE D'ÉTUDE, PLANS DE RELEVÉ ET ENGIN D'ÉCHANTILLONNAGE

Le GSL est un grand écosystème semi-fermé atteignant des profondeurs de plus de 500 m. Le sGSL est un plateau peu profond avec des profondeurs relativement homogènes, la plupart inférieures à 100 m, avec une profondeur moyenne échantillonnée dans le relevé autour de 80 m. Le nGSL est un environnement plus hétérogène que le sud et comprend des chenaux profonds, des talus et des têtes de chenaux avec une profondeur moyenne du fond échantillonnée de 240 m dans le relevé. La température estivale de l'eau dans le golfe du Saint-Laurent est caractérisée par trois couches : une couche de surface chaude, la couche intermédiaire froide (CIF) principalement formée en hiver et couvrant des profondeurs d'environ 50 à 120 m, et une couche profonde et légèrement plus chaude provenant de l'Atlantique (Galbraith *et al.* 2019). La CIF couvre une grande partie de la zone du fond dans le sGSL, mais pas dans le nord. Par conséquent, l'habitat thermique estival de prédilection du capelan serait principalement contraint verticalement par les couches de surface et profondes plus chaudes dans le nGSL, et par la couche de surface plus chaude et le plancher océanique dans le sGSL.

Les relevés au chalut de fond dans le sud et le nord du GSL suivent tous deux un plan d'échantillonnage aléatoire stratifié, dans lequel la zone d'étude est divisée en strates de profondeurs relativement homogènes. Le nombre de stations échantillonnées annuellement dans chaque strate (effort) a généralement été proportionnel à la superficie de la strate (figure 1). Les relevés sont menés respectivement en septembre et en août. Les données sur les prises ont été standardisées afin d'ajuster pour les changements de navires et d'engins et, par conséquent, chacun des deux relevés est considéré individuellement comme standardisé (Benoît et Swain 2003a, 2003 b; Bourdages *et al.* 2007). Cependant, les deux relevés ont utilisé des chaluts de fond différents depuis le milieu des années 1980 et ne peuvent être considérés comme interétalonnés. L'ensemble de données des relevés au chalut de fond dans le sGSL utilisé dans cette étude s'étend de 1971 à 2020, mais celui du nGSL va de 1990 à 2020. Un historique détaillé des relevés et des protocoles est donné dans Chadwick *et al.* (2007), avec des détails supplémentaires dans Hurlbut et Clay (1990) pour le sGSL.

2.2. MODÈLE CONCEPTUEL DE LA RÉPARTITION VERTICALE DU CAPELAN DANS LE GOLFE DU SAINT-LAURENT

La préférence en matière d'habitat thermique du capelan a d'abord été étudiée en déterminant les discontinuités dans la distribution de fréquence cumulative empirique (DFC) des températures pondérées par les prises normalisées de capelan (Perry et Smith 1994) pour les relevés au chalut de fond dans le sud et le nGSL.

Les résultats des analyses de la préférence thermique, d'autres analyses exploratoires et de travaux antérieurs ont indiqué que le capelan préfère les eaux froides dans une plage correspondant à la CIF dans le golfe du Saint-Laurent en été (-1 °C à 3 °C) (Galbraith *et al.* 2019). La force de cette préférence donne à penser que le capelan pourrait en fait être largement limité à la CIF dans cet écosystème pendant l'été. Ainsi, bien que le capelan ait été capturé dans de vastes zones géographiques lors des relevés au chalut de fond dans le golfe du Saint-Laurent (p. ex. Grégoire *et al.* 2012), les prises dans les traits de chalut plus profondes que la CIF peuvent refléter les captures pendant la remontée du filet et, dans une moindre mesure, pendant son déploiement (puisque le chalut n'est pas complètement ouvert), lorsqu'il traverse la CIF plutôt que les captures pendant le trait standard sur le fond. Il n'y a pas eu d'analyses des données hydroacoustiques dans le golfe du Saint-Laurent permettant de confirmer l'hypothèse selon laquelle le capelan se limite à la CIF pendant les mois d'été. Cependant, cette hypothèse génère plusieurs prédictions qui peuvent être évaluées à l'aide des données des relevés au chalut. Plus précisément :

1. Les prises dans les traits de relevés réalisés à des profondeurs au-dessus de la CIF, dans la couche mixte chaude, devraient tout au plus refléter des individus errants.
 - a. Les prises seront donc sporadiques, avec une faible probabilité d'occurrence, et comprendront de très faibles densités lorsqu'elles se produiront.
2. Les prises dans les traits de relevés effectués à des profondeurs correspondant à celles de la CIF devraient refléter la capture des capelans disponibles près du fond.
 - b. Les densités de capelan dans les prises devraient y être les plus élevées, par rapport à celles des traits effectués au-dessus ou au-dessous de la CIF.
 - c. Les captures devraient varier au cours du cycle nyctéméral, car on sait que le capelan effectue des migrations verticales nyctémérales dans son habitat de préférence; les prises devraient aussi être les plus importantes pendant le jour, lorsque la distribution du capelan selon la profondeur est la plus profonde (O'Driscoll *et al.* 2002).
3. Les captures dans les traits de chalut réalisés en dessous de la CIF devraient refléter les prises effectuées uniquement lorsque le chalut traverse la CIF, principalement pendant la remontée. Ainsi,
 - d. La probabilité d'occurrence du capelan dans ces traits devrait être similaire à celle des traits effectués dans la CIF, mais peut-être légèrement inférieure en raison de la stochasticité associée à une durée d'échantillonnage beaucoup plus limitée.
 - e. Les densités du capelan dans ces traits devraient être considérablement plus faibles que dans les traits effectués dans la CIF.
 - f. Les traits standard des relevés durent généralement plus longtemps (30 minutes) dans le sGSL que dans le nord (20 à 24 minutes, 1990 à 2003 et certains traits en 2004-2005; 15 minutes depuis) et la récupération du chalut représente donc une plus petite fraction du temps que le chalut passe dans l'eau dans le sGSL. De ce fait, la différence dans les densités des prises entre les traits des relevés effectués dans la CIF et en dessous devrait être plus grande dans le sGSL que dans le nGSL.
 - g. Les migrations verticales nyctémérales du capelan ne devraient pas influencer les captures dans les traits de chalut à des profondeurs plus importantes si ces migrations verticales sont limitées à la CIF. En d'autres termes, il ne devrait pas y avoir de variation nyctémérale des prises dans les traits plus profonds.

Ces prédictions ont été évaluées en analysant les prises dans les relevés au chalut. Les données du sud et du nGSL ont été analysées séparément parce que ces relevés utilisent des chaluts différents dont on ne connaît pas la capturabilité relative. En outre, le fait de traiter les relevés séparément permet d'évaluer la prédiction 3c. Les données des relevés dans le sGSL ont été limitées à la période 1990-2020, car les prises de capelan étaient faibles et peu fréquentes (moins de 12,5 % des traits) avant 1990. Les analyses ont été menées séparément pour les prises positives (à l'exclusion des zéros) et pour la présence-absence, principalement parce que des prédictions différentes ont été faites pour les densités de prise et la probabilité d'occurrence, bien que le traitement séparé des prises nulles ait quelque peu simplifié les analyses.

Le modèle de base dans chaque cas avait la forme suivante :

$$Response \sim \beta_0 + depth\ class + s(time) \times depth\ class + year_strat + \varepsilon$$

où

- β_0 est l'ordonnée à l'origine,
- *depth class* est un facteur représentant des catégories de profondeur de 25 ou 50 m, selon la disponibilité des données,
- *time* est l'heure de la journée modélisée à l'aide d'une fonction lissante (« spline ») de type régression cubique cyclique, désignée par $s()$,
- *year_strat* est un effet aléatoire permettant de tenir compte grossièrement de la variation spatio-temporelle des densités moyennes,
- $year_strat \sim N(0, \sigma^2)$ et
- ε est le terme d'erreur.

La modélisation des densités de prises a utilisé $\log(\text{captures standard})$ comme réponse, où les prises étaient limitées aux captures positives et ajustées pour la superficie balayée. La modélisation de l'occurrence a utilisé la présence comme une réponse de Bernoulli dans un modèle binomial, et une variable de décalage (« offset ») a été ajoutée au modèle de base pour tenir compte des différences dans la superficie balayée. Les modèles ont été ajustés à l'aide de la librairie `gamm4` (Wood et Scheipl 2020) dans R (R Core Team 2020).

2.3. STRUCTURE SELON LA TAILLE

Dans le cadre du relevé au chalut de fond du sGSL, le total des prises de capelans dans un trait de chalut a été pesé, une fréquence de longueur (longueur totale, cm) a été obtenue soit pour le total des prises lorsqu'il était petit, soit à partir d'un échantillon aléatoire d'environ 100 individus, et un sous-échantillonnage stratifié par la longueur a été utilisé pour obtenir un poids individuel (g) pour 1 poisson par cm. Le pourcentage annuel de poissons dans les catégories de longueur de 1 cm a été calculé, en tenant compte de tout sous-échantillonnage (les fréquences de longueur du capelan ont été ajustées au nombre capturé dans le trait). Dans le relevé au chalut de fond du nGSL, le total des prises de capelan dans un trait a été pesé et un échantillon aléatoire d'environ 30 poissons a été choisi pour obtenir des longueurs individuelles (longueur totale, mm) et des poids (g). Les fréquences de longueur du capelan ont également été ajustées en fonction de la capture dans le trait avant de calculer les distributions annuelles de longueur. On a comparé les distributions de la fréquence relative de la taille entre les relevés pour les traits situés dans les strates 415, 425 et 439 du sGSL (strates échantillonnées par les deux relevés, figure 1). La structure selon la taille dans les deux relevés a également été comparée aux distributions de la fréquence de taille dans les pêches commerciales dans le

nord (divisions 4R et 4S de l'OPANO) et le sud du GSL (division 4T de l'OPANO). Elles ont aussi été comparées aux données sur la longueur selon l'âge recueillies de 1984 à 1993 dans le nGSL, comme décrit dans Hurtubise (1994) et Grégoire *et al.* (1995). L'âge a été déterminé selon la méthode décrite dans Bailey *et al.* (1977; le 1^{er} janvier a été choisi comme date de naissance).

2.4. INFLUENCE DES INDICES DE LA PRÉDATION ET DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SUR LA CAPTURABILITÉ DU CAPELAN

L'augmentation de la présence de petits poissons pélagiques dans le relevé au chalut de fond à l'est du plateau néo-écossais après l'effondrement des stocks de poissons de fond dans les années 1990 a été interprétée par certains auteurs (Frank *et al.* 2005) comme une réponse trophique à la réduction de la prédation. D'autre part, McQuinn (2009) et Jech et McQuinn (2016) ont soutenu que la hausse des indices au chalut de fond pour les petits poissons pélagiques était principalement due à leur plus grande disponibilité dans la zone démersale en raison d'un changement dans leur répartition verticale (occupation de l'habitat suprabenthique; OHS). Selon l'hypothèse de l'occupation de l'habitat suprabenthique, la capturabilité du capelan dans les relevés au chalut de fond dans le golfe du Saint-Laurent devrait être négativement corrélée au risque de prédation dans la zone démersale. De plus, la relation entre les abondances du capelan observées et le risque de prédation ne devrait pas varier si l'on tient compte des préférences en matière d'habitat.

Les analyses visant à vérifier ces prédictions ont été conçues en utilisant les données des relevés au chalut de fond dans le sud et le nord du GSL. Ces analyses ont été structurées de manière à tenir compte de la différence de l'utilisation de l'habitat par le capelan et les prédateurs qui produirait des relations négatives. Les prédateurs ont été choisis en raison de la prévalence du capelan dans leur régime alimentaire et de l'abondance locale dans la zone démersale suffisamment large pour que l'on puisse s'attendre à un effet du risque de prédation sur la capturabilité du capelan : morue franche (*Gadus morhua*) et flétan du Groenland (*Reinhardtius hippoglossoides*, ci-après dénommé turbot).

2.4.1. Indices de la prédation

Les données des relevés au chalut de fond dans le sud et le nord du GSL ont été traitées selon la même approche (sauf indication contraire), mais ont été analysées séparément.

Les indices de la prédation ont été calculés par trait sur la base de l'abondance des prédateurs et de leur taux de consommation présumée de proies. La consommation a été estimée d'après les lois d'échelle et la théorie métabolique (Kleiber 1932, 1947), qui stipule que le taux métabolique des poissons est proportionnel à la masse corporelle de l'individu (M_j) et à la température (t) :

$$\text{metabolic rate} \sim M_j^{0,75} e^{0,036 t}$$

La consommation de proies devrait être proportionnelle au métabolisme, et nous avons donc calculé notre indice de prédation :

$$\text{predation.index}_i \propto \sum_{j=1}^{\text{Max length}} N_{ij} M_j^{0,75} e^{0,036 t_i}$$

où

- N_{ij} est le nombre normalisé de poissons dans le trait i de la classe de taille j ,

- M_j est la masse moyenne d'un poisson de cette classe de taille selon la relation longueur-poids de l'année correspondante et
- t_i est la température de l'eau au fond enregistrée pendant le trait i .

Les prédateurs des classes de taille connues pour consommer des quantités nulles ou insignifiantes de capelan ont été exclus du calcul des indices de la prédation. Les indices de la prédation par la morue franche ont été calculés respectivement sur la base des individus de plus de 25 cm (Hanson 2011). L'indice de la prédation par le turbot utilisait des individus de toutes tailles (Bernier et Chabot 2013).

Les séries chronologiques des abondances de la morue et du turbot dans les relevés au chalut de fond sont disponibles pour référence à l'Annexe 1.

2.4.2. Relations entre la prédation, l'environnement et la capturabilité du capelan

Pour quantifier l'impact des indices de la prédation et environnementaux sur la capturabilité relative du capelan dans les relevés au chalut de fond, trois ensembles de modèles additifs généralisés négatifs binomiaux à effets mixtes ont été ajustés et comparés : un modèle fondé sur les indices de la prédation, un modèle fondé à la fois sur les indices de la prédation et les covariables de l'habitat, et un modèle fondé uniquement sur les covariables de l'habitat. Les modèles étaient formulés comme suit

$$g(\mu) = \beta_0 + s(x1) + s(x2) + s(x3) + \dots + \text{offset}(\log.\text{area}_{ij}) + \text{year_strat}_i + \varepsilon_i$$

où

- μ est la prise de capelan (en nombre),
- $g()$ est la fonction de lien logarithmique,
- β_0 est l'ordonnée à l'origine,
- $s()$ sont des fonctions lisses des covariables ($x1, x2, x3, \dots$)
- ε_i est la variable d'erreur.

Les modèles comprenaient une fonction lissante de type régression cubique cyclique pour le moment du jour (heure) avec un maximum de 4 nœuds pour modéliser la disponibilité nyctémérale du capelan dans la zone démersale (Benoît et Swain 2003b). Nous avons utilisé des fonctions lissantes de type régression en plaques minces pour les indices de prédation et environnementaux permettant une réduction, avec un maximum de 5 degrés de liberté estimés (del) pour éviter les effets multimodaux trop complexes. Nous avons inclus une variable de décalage ($\text{offset}[\log.\text{area}_{ij}]$) pour prendre en compte les changements dans la superficie balayée et la standardisation du navire et de l'engin utilisés pour le relevé dans le sGSL. Tous les modèles comprenaient la combinaison de l'année et de la strate (year_strat_i) comme ordonnées à l'origine aléatoires afin de tenir compte de l'autocorrélation spatiale et temporelle des prises (modèle G dans Pedersen *et al.* 2019). Dans nos modèles, cet effet aléatoire intégrait également la densité moyenne de capelan dans les cellules strate-année. Comme nous avons supposé que les strates avaient des densités de capelan homogènes, nous modélisons effectivement les effets relatifs des covariables sur les écarts par rapport à ces prises moyennes, représentant ainsi leurs effets sur la capturabilité du capelan. La distribution négative binomiale a été utilisée comme distribution de référence parce qu'elle est considérée comme appropriée pour modéliser les données de dénombrement des relevés au chalut (Cadigan 2011). Nous avons appliqué la fonction gam de la librairie mgcv (Wood 2019). Pour

chaque espèce modélisée, les effets des prédicteurs, le critère d'information d'Akaike (CIA) et la déviance expliquée ont été comparés.

Les ensembles de données utilisés dans cette section comprennent les années de relevé au chalut de fond de 1971 à 2016 dans le sGSL et de 1990 à 2018 dans le nord du GSL. Avant les analyses, nous avons éliminé les observations dans chaque combinaison d'année et de strate où le capelan était absent afin de respecter la prémisse du modèle d'une ordonnée à l'origine aléatoire à distribution normale. Toutes les covariables ont été centrées et réduites (moyenne de 0 et un écart-type de 1).

Dans l'ajustement préliminaire du modèle pour les données du nGSL, l'effet estimé de l'heure ne correspondait pas aux migrations verticales nyctémérales attendues du capelan, prédisant des abondances maximales du capelan vers 3 heures du matin. De nombreuses études ont montré que le capelan accomplit des migrations verticales nyctémérales au cours desquelles on le trouve plus profondément pendant le jour et plus près de la surface pendant la nuit (Bailey *et al.* 1977, O'Driscoll et Rose 1999, Mowbray 2002, Davoren *et al.* 2006, Regular *et al.* 2010). Des abondances plus fortes devraient être observées pendant la journée dans les relevés au chalut de fond, lorsque le capelan se trouve dans la zone la plus profonde de sa répartition. D'après ces informations, nous avons interprété l'effet de l'heure comme erroné dans les prises dans le nGSL. Comme une plus grande proportion des traits de chaluts est effectuée à des profondeurs supérieures à l'habitat thermique préféré du capelan dans le nGSL que dans le sud (voir la section 3.1), le capelan a probablement été échantillonné lorsque le chalut passait dans la colonne d'eau plutôt que lorsqu'il pêchait sur le fond. Le risque de prédation par les poissons démersaux ne devrait pas avoir d'effet sur la capturabilité du capelan échantillonné dans la colonne d'eau plutôt que sur le fond. Nous avons donc réajusté par la suite les mêmes modèles en utilisant le sous-ensemble des traits limités à l'habitat thermique précédemment déterminé et avons comparé l'effet de l'heure aux résultats précédents.

Nous avons validé les hypothèses du modèle en examinant les résidus mis à l'échelle (quantile) avec les outils de diagnostic DHARMA (Hartig 2020) : graphique quantile-quantile, tests de Kolmogorov-Smirnov, de dispersion et des valeurs aberrantes, et résidus par rapport aux valeurs prédites. Les résidus simulés ont été conditionnés par les effets aléatoires ajustés (les effets aléatoires n'ont pas été simulés à nouveau). Toutes les analyses statistiques et les figures ont été effectuées dans R (R Core Team 2020).

2.5. INDICES D'ABONDANCE DU CAPELAN

Les prises de petits poissons pélagiques dans les relevés au chalut sont souvent très variables. Les modèles supposant une erreur négative binomiale et une moyenne log-linéaire se sont avérés appropriés pour modéliser les nombres de prises dans de tels cas, ainsi que pour modéliser les données des relevés au chalut de fond en général (Cadigan 2011, Surette 2016).

Le relevé dans le nGSL ne peut régulièrement pas échantillonner une ou plusieurs strates une année en raison des contraintes de calendrier et de durée du relevé. Cela s'est également produit pour le relevé du sGSL, mais dans une moindre mesure. Pour éviter d'introduire des biais dans les indices estimés des relevés, les densités de prises moyennes dans les cellules strate-année manquantes ont été imputées à l'aide d'une estimation ad hoc utilisant des modèles linéaires généraux fondés sur les prises dans le relevé les années voisines.

Nous utilisons ici un modèle supposant une erreur négative binomiale (NB) et une moyenne log-linéaire qui est une fonction d'un effet global fixe de la strate et d'un effet annuel de la strate qui suit un processus autorégressif de premier ordre (AR[1]). L'utilisation d'un terme AR(1) par strate permet d'estimer des moyennes annuelles de la strate même en l'absence d'échantillonnage pendant le relevé et contribuera à atténuer les fortes fluctuations

interannuelles des moyennes des strates résultant des prises très variables des relevés. Plus précisément, le modèle a été défini comme suit :

$$Y_{i,s,t} \sim \text{NB}(\mu_{s,t}, k)$$

$$E[y_{i,s,t}] = \mu_{s,t} = \exp(\lambda_s + \delta_{s,t} + \text{offset}), \text{ where } \delta_{s,t} = \phi \delta_{s,t-1} + \varepsilon_{s,t}$$

$$\text{Var}[y_{i,s,t}] = \mu_{s,t} + \mu_{s,t}^2/k$$

$$\bar{x}_t = \frac{\sum_{s=1}^L N_s \mu_{s,t}}{N} \text{ where } N = \sum_{s=1}^L N_s$$

où

- $Y_{i,s,t}$ est la prise en nombre dans le trait i , la strate s et l'année t ,
- $\mu_{s,t}$ est la densité moyenne dans la strate s et l'année t ,
- k est le paramètre de dispersion négatif binomial,
- λ_s est l'effet global de la strate,
- $\delta_{s,t}$ est l'effet strate-année qui suit un processus AR(1) avec un paramètre d'autocorrélation ϕ ,
- \bar{x}_t est le nombre moyen par trait pour l'année t ,
- N_s est la pondération de la strate s (proportion de la zone d'étude dans la strate s).

Les intervalles de confiance sur \bar{x}_t ont été dérivés selon la méthode delta. La variable de décalage (offset) était égale au log(superficie balayée/superficie balayée standard), et pour les prises des relevés avant 1992 dans le sGSL, elle intégrait également les différences de capturabilité associées aux navires et aux chaluts utilisés, par rapport à ceux employés depuis 1992 (Benoît et Swain 2003a; Benoît 2006). En 2003, le navire de la Garde côtière canadienne (NGCC) *Wilfred Templemen* a été utilisé pour le relevé dans le sGSL. Bien que ce navire n'ait pas été spécifiquement calibré pour le relevé, c'était le navire jumeau du navire de relevé régulier, le NGCC *Alfred Needler*, et il a été supposé qu'il pêchait de façon comparable à ce dernier. Aucune conversion pour les changements de navire ou d'engin n'est requise pour le capelan dans les relevés dans le nGSL (Bourdages *et al.* 2007). Les prises de capelan provenant du relevé dans le nGSL effectué dans la partie de la division 4T de l'OPANO qui chevauche spatialement le relevé dans le sGSL (figure 1) ont été supprimées afin de maintenir l'indépendance des indices de l'abondance des deux zones.

Il a été démontré que les captures de capelan varient selon le cycle nycthéral dans le relevé du sGSL (Benoît et Swain 2003b). Il faut normalement prendre cet effet en compte pour produire les indices d'abondance à partir des données du relevé dans le sGSL parce que ce relevé n'était opérationnel que pendant les heures de jour (7 h à 19 h) de 1971 à 1984, et que l'omission de cet effet nycthéral introduirait un biais pour ces premières années par rapport à la période après 1984, où le relevé est opérationnel 24 heures sur 24. Cependant, les analyses présentées ci-après ont révélé que la variation nycthérale des prises ne se produit pas dans toutes les strates et qu'il est donc inapproprié d'appliquer une correction globale comme le suggèrent Benoît et Swain (2003 b). Il n'a pas été possible d'appliquer les effets nycthéraux propres aux strates dans le modèle ci-dessus à temps pour le présent document. Bien que cela entraîne un certain biais dans la série du sGSL, ce biais devrait être faible et sans conséquence, car les prises de capelan dans le relevé avant les années 1990 étaient peu fréquentes et de faible ampleur.

Deux séries d'indices d'abondance ont été estimées pour les relevés dans le sud et le nord du GSL. La première utilisait toutes les strates qui ont toujours fait partie du plan d'échantillonnage pendant la série de relevés, de 1971 à 2020 pour le sGSL (strates 415 à 439) et de 1990 à 2020 pour le nGSL (strates 401 à 841). La seconde a permis d'estimer la densité moyenne du capelan dans les strates se trouvant dans son habitat de prédilection (à peu près la CIF) et supposait que ces densités étaient également pertinentes aux emplacements du relevé plus profonds que cet habitat. Dans les strates du relevé qui se trouvaient au-dessus de l'habitat préféré (sGSL seulement), les densités ont été estimées à l'aide des prises des relevés. En d'autres termes, les moyennes annuelles des strates ont été estimées comme d'habitude pour les strates situées au-dessus ou dans l'habitat de prédilection du capelan, et les moyennes des strates situées en dessous de cet habitat ont été fixées à la moyenne de l'habitat préféré, en partant de l'hypothèse que le capelan est réparti de façon à peu près homogène dans cet habitat. D'après l'analyse de la préférence en matière d'habitat (section 3.1), les strates pour lesquelles les profondeurs étaient principalement contenues dans la tranche de 50 à 120 m ont été considérées comme reflétant l'habitat de prédilection pour le relevé du sGSL, tandis que la tranche de 50 à 175 m a été utilisée pour le relevé du nGSL (figure 2).

2.6. ESTIMÉ DE L'ORDRE DE GRANDEUR DE LA MORTALITÉ PAR PÊCHE

L'ordre de grandeur de la mortalité par pêche a été estimé pour l'ensemble du stock de capelan (4RST) à l'aide des données des relevés au chalut de fond, des coefficients de capturabilité (q) tirés de la littérature pour les petits poissons pélagiques dans ce type de relevé et des débarquements moyens des trois dernières années (8 946 t/an; 2018 à 2020). Plus précisément, pour chaque relevé et indice d'abondance (strates principales et de la CIF), le nombre moyen par trait (NMPT) pour la période 2017-2020 a été multiplié par le poids individuel moyen et le nombre d'unités chalutables du relevé pour obtenir la biomasse chalutable moyenne. Nous avons obtenu une estimation de l'ordre de grandeur de la biomasse et des taux d'exploitation, respectivement, en divisant la biomasse chalutable par les coefficients de capturabilité et en divisant les débarquements moyens par l'ordre de grandeur estimé de la biomasse. Le choix de la période pour les débarquements moyens (en excluant les faibles débarquements de 2017), le NMPT (en excluant la valeur élevée de 2017 pour les deux relevés) et la valeur de q (valeur maximale dans la documentation) ont été faits de manière à obtenir une estimation prudente de l'ordre de grandeur de la mortalité par pêche. Les résultats ont ensuite été comparés aux estimations de la mortalité naturelle (M) obtenues selon trois méthodes différentes :

- Équation de Hoenig (1983) pour tous les groupes d'espèces,
- Équation 8 de Hamel (2015) combinant les estimations de M provenant de trois méthodes utilisant l'âge maximal (méthodes à un paramètre t_{max} , Hoenig_{lm} et Hoenig_{nlis}; voir le tableau 3 dans Then *et al.* 2015),
- Méthode de Hoenig actualisée (Then *et al.* 2015).

L'âge maximal a été fixé à 7 ans et les estimations de M sont donc considérées comme prudentes. Tous les calculs et analyses statistiques ont été effectués en R (R Core Team 2020).

3. RÉSULTATS

3.1. PRÉFÉRENCE DU CAPELAN EN MATIÈRE D'HABITAT

L'association du capelan avec l'habitat thermique dans le sGSL montre que 94 % des poissons ont été capturés à des températures au fond inférieures à 2,2 °C, alors que cette plage de

températures ne représentait que 61 % de tous les traits du relevé, dénotant clairement une préférence pour ces températures (figure 3). En moyenne, les températures au fond inférieures à 2,0 °C se rencontrent à des profondeurs comprises entre 50 et 125 m dans le sGSL. Dans le nGSL, 87 % des capelans ont été capturés à des températures au fond inférieures à 3,3 °C, alors que cette plage de températures ne représentait que 28 % de tous les traits du relevé (figure 4). En moyenne, des températures au fond inférieures à 3,3 °C sont enregistrées en dessous de 170 m dans le nGSL.

Les traits effectués dans l'habitat thermique préféré du capelan représentaient en moyenne 55,3 % des traits dans le sGSL, mais seulement 28,4 % dans le nGSL (figure 5). Dans le nord du golfe, les traits réalisés dans l'habitat thermique de prédilection du capelan étaient limités aux strates plus côtières le long de la Côte-Nord du Québec, de l'île d'Anticosti et de la côte ouest de Terre-Neuve (figure 5).

D'après les résultats des préférences thermiques dans chaque relevé, l'habitat préféré du capelan devrait se situer entre 50 et 120 m dans le sGSL et entre 50 et 175 m dans le nord, ce qui correspond à peu près à la CIF. Les résultats des analyses visant à évaluer si le capelan est essentiellement restreint à cette couche confirment généralement les prédictions faites pour le modèle conceptuel à la section 2.2.

Tant les densités moyennes que la probabilité d'occurrence étaient très faibles dans les strates moins profondes que l'habitat de prédilection dans le sGSL (figure 6; de telles profondeurs sont pratiquement absentes dans le nord du golfe). En outre, il n'y avait aucune preuve d'une variabilité nyctémérale des prises. Ce résultat est conforme à la prédiction 1a, selon laquelle les capelans capturés dans les traits de chalut à ces profondeurs sont probablement des poissons errants.

Les prises dans l'habitat de prédilection étaient plus importantes en moyenne aux profondeurs préférées, en particulier à l'extrémité inférieure de la plage de ces profondeurs dans les deux relevés, conformément aux prédictions 2a et 3b (figure 6, figure 7). De plus, la variation nyctémérale des prises positives, qui se traduit par un pic des captures vers midi, n'a été constatée que pour ces classes de profondeur dans le sud et le nGSL (tableau A4, tableau A6). Bien qu'un effet significatif de l'heure ait également été estimé pour certaines classes de profondeur plus basses dans le nGSL (tableau A6), l'amplitude de la variation était considérablement plus faible et déphasée par rapport aux tendances nyctémérales pour les profondeurs préférées (figure 7). Ces résultats sont conformes à la prédiction 2 b, et quelque peu incompatibles avec la prédiction 3d.

D'une manière générale, la probabilité d'occurrence était d'une ampleur similaire dans les classes de profondeur se trouvant dans l'habitat de prédilection et en dessous dans les deux relevés (figure 6, figure 7, tableau A5, tableau A7). Le relevé du nGSL présentait une exception notable, où la probabilité moyenne diminuait pour les stations pêchant à des profondeurs plus grandes (plus de 400 m). Cela pourrait refléter une ouverture réduite du chalut lorsqu'il traversait la CIF en raison de la période de récupération plus longue, mais pourrait également indiquer une présence (et une densité) réduite du capelan dans les zones où la CIF est nettement au-dessus du fond. Ces résultats sont en partie conformes à la prédiction 3a.

Enfin, la différence dans les densités maximales (prises positives moyennes) dans les classes de profondeur couvrant l'habitat de prédilection et celles situées en dessous était plus grande dans le sud que dans le nGSL pour les profondeurs échantillonnées par les deux relevés (moins de 375 m; figure 6, figure 7). Cela correspond à la prédiction 3c, selon laquelle les prises accidentelles de capelan pendant que le chalut traverse la CIF devraient être relativement plus faibles dans le relevé dans le sGSL étant donné que la récupération et le déploiement du chalut

représentent une plus petite fraction du temps total que le chalut passe dans l'eau dans ce relevé.

Combinés, ces résultats indiquent que la répartition du capelan équivaut principalement aux eaux froides caractéristiques de la CIF et pourrait y être largement limitée. Certaines preuves donnent à penser que les prises des relevés dans les traits réalisés en dessous de la CIF peuvent se produire en grande partie ou exclusivement lorsque le chalut traverse cette couche. Il n'est cependant pas possible de conclure si les densités dans la CIF sont spatialement homogènes. Selon les analyses, les prises positives moyennes et l'occurrence diminuent particulièrement pour les traits effectués à des profondeurs plus grandes dans le nGSL. Bien que cela puisse indiquer que la densité du capelan dans la CIF à ces endroits est plus faible, il est possible que le temps et la distance de récupération plus longs du chalut entraînent une ouverture plus petite du chalut lors de son passage dans la CIF, ce qui réduirait alors le nombre des prises et l'occurrence. Une évaluation des données de mensuration des chaluts permettrait de confirmer cette hypothèse.

3.2. STRUCTURE SELON LA TAILLE

Les distributions annuelles de la fréquence de longueur relative du capelan dans les relevés au chalut de fond du sGSL présentaient généralement un mode autour de 110 mm, parfois accompagné d'un second mode plus petit autour de 60 mm, alors qu'un seul mode autour de 140 mm était habituellement observé dans les relevés au chalut de fond du nGSL (figure 8). Il convient de noter que le mode de taille dans le relevé au chalut de fond du sGSL en 1991 et 2013 était plus grand que d'habitude.

Les distributions de la longueur dans les deux relevés au chalut de fond limités aux strates 415, 425 et 439 du sGSL (couvertes par les deux relevés) étaient plus similaires les unes aux autres que le profil général (figure 9, figure 10). Le capelan du relevé du sGSL échantillonné dans ces strates en septembre affichait un mode à 110-120 mm alors que le capelan échantillonné dans ces strates pendant le relevé dans le nGSL en août affichait un mode plus grand, entre 120 et 140 mm (figure 9), légèrement différent du profil général pour ce relevé (figure 10). Ces résultats indiquent que la sélectivité de taille des deux relevés est similaire pour le capelan. Par conséquent, les différences dans les fréquences de la longueur à l'échelle de zones entières de relevé reflètent probablement des différences dans la taille des capelans présents dans ces zones.

D'après les données sur la longueur selon l'âge recueillies dans la pêche commerciale entre avril et juillet de 1984 à 1993 (Hurtubise 1994), les capelans capturés dans les relevés au chalut de fond du sGSL seraient surtout des individus de 1 et 2 ans, le relevé au chalut de fond du nGSL capturerait surtout des individus de 2 et 3 ans, alors que la pêche commerciale dans le sud et le nord du GSL cible des individus correspondant surtout à des individus matures de 3 ans et plus (figure 10).

3.3. INFLUENCE DES INDICES DE PRÉDATION ET DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SUR L'ABONDANCE DU CAPELAN

Après avoir exclu les combinaisons année-strate sans capelan (et exclu les traits en dehors de l'habitat préféré du capelan dans le nGSL), 3 634 et 969 traits ont été conservés pour les analyses concernant le sGSL et le nGSL, respectivement. L'absence de capelan pourrait refléter un évitement complet du fond en présence de prédateurs et, par conséquent, cette étape de sélection des données pourrait biaiser l'estimation de l'effet du risque de prédation. Afin de vérifier si cela pouvait être le cas, nous avons comparé la distribution de la fréquence des valeurs des indices de la prédation pour les ensembles de données incluant ou excluant les

strates sans capture de capelan de manière à déterminer si l'exclusion coïncidait avec l'exclusion des valeurs élevées du risque de prédation. Pour les données du sGSL (morue, turbot) et du nGSL (morue), il n'y avait pas de différence frappante entre les ensembles de données incluant ou excluant les strates sans capture de capelan (annexe 2, figure A22, figure A23). Dans les données du nGSL, des valeurs plus élevées du risque de prédation par le turbot étaient associées à l'absence de capelan dans certaines combinaisons année-strate et ont donc été exclues. Cependant, compte tenu des analyses précédentes, nous interprétons ce résultat comme une coïncidence étant donné que ce prédateur se trouve principalement dans des eaux plus profondes et plus chaudes (figures 11 et 32 dans Bourdages *et al.* 2020) qui n'est pas l'habitat de prédilection du capelan pour des raisons physiologiques, et non à cause de la présence de prédateurs.

Les graphiques de diagnostic pour le meilleur modèle pour le sGSL (3.1) montraient des résiduels avec un écart mineur par rapport à la distribution uniforme (test de Kolmogorov-Smirnov significatif), comme on le voit sur les graphiques quantile-quantile et résiduels par rapport aux valeurs ajustées. La fréquence observée des prises sans capelan (prise nulle) se situait dans les intervalles de confiance de 95 % des valeurs simulées par le modèle ajusté. L'écart-type des résiduels (dispersion) se situait également dans les 95 % des valeurs simulées (figure 11). Tous les autres résiduels du modèle du sGSL présentaient le même écart mineur par rapport à la distribution uniforme et aucun autre problème apparent (résultats non illustrés). Globalement, nous concluons de ces diagnostics que les hypothèses des modèles employés ont été respectées.

Les résiduels quantiles du meilleur modèle pour le nGSL (2.1) s'écartaient davantage de la distribution uniforme : pour les valeurs prédites moyennes à grandes, les valeurs simulées étaient plus petites que la valeur observée. Moins de zéros étaient observés dans les données que le nombre prévu par le modèle ajusté, mais aucune surdispersion ou sous-dispersion n'était apparente (figure 12). Tous les autres modèles du nGSL avaient les mêmes problèmes, y compris les modèles ajustés avec les données de toutes les strates principales. Comme les graphiques de diagnostic montraient que les modèles du nGSL n'étaient pas correctement ajustés aux données, l'interprétation des effets des covariables pourrait être trompeuse et les résultats n'ont pas été présentés. Il est intéressant de mentionner que le modèle du nGSL intégrant uniquement les traits effectués dans l'habitat thermique de prédilection du capelan a produit un effet de l'heure correspondant au comportement attendu des poissons (plus grandes abondances observées dans la journée).

Le meilleur modèle pour le sGSL, sur le plan du critère d'information d'Akaike, comprenait l'heure du jour, les indices de la prédation par la morue et les descripteurs de l'habitat. Ce modèle a donné une augmentation de 7,9 % de la déviance expliquée par rapport à un modèle incluant uniquement l'ordonnée à l'origine aléatoire et l'heure de la journée (tableau 1). Un léger effet négatif des indices de la prédation par la morue sur les prises de capelan a été estimé, et il existait une faible relation positive avec l'indice de la prédation par le turbot (figure 13). Des relations négatives et bimodales ont été observées, respectivement, pour les effets de la température au fond et de la profondeur (figure 13). L'ajout ou la suppression de covariables dans les modèles a eu un impact très faible, voire nul, sur les effets des autres descripteurs ou sur leur probabilité d'erreur de type 1 (valeurs de p).

L'inclusion des indices de la prédation et des descripteurs de l'habitat dans les modèles comprenant uniquement l'ordonnée à l'origine aléatoire ou l'ordonnée à l'origine aléatoire et l'heure de la journée a augmenté la déviance expliquée d'un maximum de 9,9 % pour les modèles du sGSL (tableau 1). L'inclusion des seuls indices de la prédation n'a pas produit d'augmentation de la déviance expliquée de plus de 1,5 % (tableau 2). L'effet de la prédation

sur la capturabilité du capelan était donc faible et son omission entraînera tout au plus un biais mineur dans le calcul des indices d'abondance.

3.4. INDICES D'ABONDANCE DU CAPELAN

Comparé à l'estimateur traditionnel fondé sur le plan d'échantillonnage utilisé pour estimer les indices d'abondance dans les relevés au chalut, le modèle NB AR(1) a produit des estimations généralement plus précises et moins variables dans le temps (voir la figure 14 pour le sGSL; les résultats pour le nord du golfe ne sont pas présentés). Tous les résultats qui suivent sont issus de ce dernier modèle. Les ajustements du modèle NB AR(1) semblent corrects (figure A21, pour le relevé dans le sGSL présenté comme exemple).

Le capelan était capturé très rarement et seulement en petit nombre dans le relevé dans le sGSL avant 1990 (figure 14). L'indice d'abondance pour les strates principales a augmenté à partir du milieu des années 1990 jusqu'à un pic autour de 2000, avant de décliner au milieu des années 2000 et de se redresser à nouveau pour atteindre le maximum de la série en 2010-2011. L'indice a baissé par la suite. L'indice fondé sur l'hypothèse d'une densité homogène dans la CIF suivait des tendances similaires, bien que le pic autour de 2010 ait été plus prononcé, tandis que la période suivante était plus variable et suggérait un déclin moins prononcé (figure 15).

L'indice d'abondance pour toutes les strates dans le nGSL était élevé et a quelque peu augmenté dans les années 1990, avant de diminuer jusqu'à son niveau le plus bas pendant la première moitié des années 2000, puis d'augmenter progressivement pour culminer en 2011 (figure 16). L'indice a ensuite diminué et, à l'exception de 2017, a fluctué autour d'un niveau relativement bas. Lorsque l'on inclut dans l'indice les strates de l'estuaire du Saint-Laurent ajoutées au relevé en 2008, les tendances générales demeurent, bien que la différence entre le nombre moyen par trait durant le pic de la fin des années 2000 et la période subséquente soit plus prononcée. L'indice reposant sur l'hypothèse d'une densité homogène dans la CIF affichait une tendance similaire à celles décrites pour toutes les strates (figure 17).

3.5. ORDRE DE GRANDEUR ESTIMÉ DE LA MORTALITÉ PAR PÊCHE

Si l'on considère uniquement la biomasse chalutable (tableau 2), les estimations du taux d'exploitation varient entre 16 et 36 % (respectivement $F = 0,17$ et $F = 0,44$) selon le choix de l'indice d'abondance et sa variation interannuelle. Avec une estimation de l'ordre de grandeur de la biomasse totale calculée à partir de la biomasse chalutable et une valeur maximale de q trouvée dans la documentation ($q = 0,0045$, hareng dans le relevé dans le sGSL, Benoît et Swain 2008), les taux d'exploitation estimés varient entre 0,07 et 0,16 % (respectivement $F = 0,0007$ et $F = 0,0016$). Par comparaison, les estimations prudentes de la mortalité naturelle obtenues à partir d'équations empiriques se situaient entre 46 et 56 % (respectivement $M = 0,62$ et $M = 0,82$; tableau 3).

4. DISCUSSION

Les résultats présentés dans la section 3.1 ont montré que l'association du capelan avec des eaux à 3 °C ou moins dans le nGSL et à 2 °C ou moins dans le sGSL est cohérente avec l'examen de Ingvaldsen et Gjørseter (2013) et de Rose (2005) de la préférence thermique du capelan (principalement moins de 2 °C). De plus, la variation nycthémerale des prises positives aboutissant à un pic des captures vers midi n'a été constatée que dans l'habitat thermique préféré du capelan, conformément au comportement de migration verticale nycthémerale bien documenté du capelan (p. ex. O'Driscoll et Rose 1999, Mowbray 2002, Regular *et al.* 2010). Les données des relevés multi spécifiques au chalut de fond dans le GSL appuient donc l'idée

que le capelan est associé à des conditions froides et qu'il effectue des migrations verticales nyctémérales, ce qui le rend plus accessible aux relevés au chalut de fond pendant la journée, lorsque la pêche sur le fond a lieu dans son habitat thermique de prédilection.

En plus de refléter les préférences thermiques de l'espèce, l'association du capelan avec la CIF se traduirait probablement par des possibilités de quête de nourriture favorables près du fond le long des talus des chenaux profonds du nGSL et sur de grandes zones dans le sGSL (Plourde *et al.* 2019). Dans la mer de Barents, le succès de l'alimentation du capelan à la fin de l'été est associé à une profondeur du fond au-dessus de 200 m, où le niveau de lumière et les fortes densités de ses principales proies, les espèces de *Calanus* et le krill, favorisent un taux élevé de rencontre des proies (Dalpanado et Mowbray 2013, Aarflot *et al.* 2020). Dans le golfe du Saint-Laurent, la répartition verticale des stades hivernants des espèces de *Calanus* est limitée par les profondeurs du fond au-dessus de 200 m, et les densités pourraient être plus élevées près du fond que dans les zones plus profondes (Plourde *et al.* 2019). De plus, les concentrations diurnes denses de krill dans le nGSL se rencontrent généralement sur les pentes des chenaux profonds, aux profondeurs et températures typiques de la CIF et de l'habitat thermique de prédilection du capelan (Plourde *et al.* 2014, Maps *et al.* 2014, McQuinn *et al.* 2015). Ces conditions optimales pour la quête de nourriture pourraient limiter la répartition du capelan horizontalement dans le nGSL et le rendre plus « disponible » pour le chalutage dans la zone du talus que dans les chenaux profonds.

Il y a une certaine incertitude quant à savoir si la densité du capelan est à peu près homogène horizontalement dans l'habitat thermique de prédilection ou si les densités dans cet habitat sont plus faibles lorsque celui-ci se trouve au-dessus de plus grandes profondeurs. La réponse à cette question permettrait d'orienter les hypothèses formulées lors de la conception d'un indice d'abondance, comme le modèle négatif binomial AR(1) qui suppose des densités pour les sites plus profonds. Un examen des données de mensuration des chaluts des relevés pour déterminer la réduction de l'ouverture du chalut à mesure que le chalut remonte dans la colonne d'eau pendant la récupération pourrait réduire cette incertitude. L'analyse approfondie des données acoustiques recueillies lors des relevés au chalut de fond pourrait également être utile pour valider l'hypothèse d'une densité horizontale homogène dans la CIF et éventuellement mener à l'élaboration d'un indice d'abondance acoustique.

Les capelans capturés dans le relevé au chalut de fond en septembre dans le sGSL sont en moyenne plus petits que ceux capturés dans la pêche commerciale et, dans une moindre mesure, plus petits que les capelans observés dans le relevé au chalut de fond du nGSL. La comparaison des fréquences de longueur du capelan dans les relevés aux données historiques sur la longueur à l'âge de la pêche commerciale dans le GSL permet de penser que les capelans capturés dans le relevé du sGSL seraient surtout des individus de 1 et 2 ans et que le relevé du nGSL capturerait surtout des individus de 2 ans, avec une faible proportion de poissons de 1 et 3 ans. Ces observations renforcent l'hypothèse déjà proposée que le sGSL agirait comme une zone pouponnière pour le GSL (O'Boyle et Lett 1977, Hodder et Winters 1972).

Il est peu probable que les différences observées dans les distributions de la fréquence de longueur du capelan entre les relevés au chalut de fond du sud et le nord du GSL nGSL soient dues à des différences dans la sélectivité des engins. Le chalut Western IIA utilisé dans le sGSL est un chalut pour le poisson de fond muni d'une doublure fine dans le cul de chalut (19 mm), alors que dans le nGSL, le relevé au chalut de fond a utilisé un chalut URI (1990 à 2005, doublure de 19 mm dans le cul de chalut), puis un chalut à crevettes Campelen (2004 à aujourd'hui, doublure de 12,7 mm dans le cul de chalut). Les différences de sélectivité devraient se traduire par une rétention plus faible des petits poissons dans le chalut Western IIA (sGSL) par rapport au chalut Campelen (nGSL). Les différences observées dans les fréquences de

longueur de capelan entre les relevés vont dans le sens inverse, ce qui suggère qu'elles ne sont pas dues à des différences dans les engins utilisés. Surtout, une comparaison des fréquences de longueur entre les relevés dans la zone où ils se chevauchent spatialement a révélé très peu de différences entre les relevés. Les différences dans la structure de taille observées entre les relevés dans le nord et le sud du GSL suggèrent des différences régionales dans la structure démographique.

D'après les caractéristiques connues du cycle biologique (mortalité naturelle élevée) et la faible mortalité par pêche présumée dans le golfe du Saint-Laurent, les capelans capturés dans la pêche commerciale ne sont probablement pas disponibles pour les relevés au chalut de fond en raison de la sénescence après le frai. La sénescence est un déclin lié à l'âge de la valeur adaptative des adultes, se traduisant par une augmentation du taux de mortalité et une baisse de la fécondité. On sait que la mortalité du capelan est élevée après le frai, presque tous les mâles mourant après la première reproduction, tandis que des proportions variables de femelles meurent dans la période qui suit le frai (20 à 60 %, Burton et Flynn 1998, Flynn *et al.* 2001). Une étude plus récente a montré qu'une population de capelans norvégiens se reproduisant dans l'océan était sémelpare (mort des deux sexes après la reproduction), tandis que les deux sexes d'une population se reproduisant sur la plage étaient itéropares (Christiansen *et al.* 2008). Dans la même étude, la mortalité après le frai était également apparente dans la population itéropare puisque les taux de mortalité des mâles et des femelles étaient respectivement d'environ 80 et 25 % dans les trois mois suivant la reproduction.

Nos analyses représentent la première approche empirique visant à tester l'hypothèse de changements induits par les prédateurs dans les prises d'un poisson pélagique dans les relevés au chalut de fond. L'effet de la prédation par la morue franche sur les prises de capelan était représentatif de l'ensemble de la période (figure A22, figure A23), mais nous ne pouvons pas rejeter définitivement cette hypothèse pour la période précédant l'effondrement des stocks de poisson de fond dans les années 1990, car plus de 90 % des données utilisées dans les analyses ont été recueillies après 1990. Bien que nos analyses aient montré que les prédateurs démersaux réduisaient significativement la capturabilité du capelan dans le relevé au chalut de fond du sGSL, cet effet représentait moins de 1,5 % de la variation expliquée des captures de capelan. McQuinn (2009) a montré que la répartition verticale du hareng de l'Atlantique en 1989 différait de façon frappante de celle de six relevés effectués en automne au large du plateau de la côte ouest de Terre-Neuve entre 1991 et 2002. Il a interprété ce changement comme le fait que le hareng occupe de plus en plus l'habitat suprabenthique laissé vacant par ses prédateurs démersaux en nombre réduit et a donc soutenu que l'augmentation d'abondance du hareng dans les relevés au chalut de fond serait principalement causée par des changements de comportement associés à des changements dans la pression de la prédation. La question de savoir si cette interprétation est transposable au capelan dans le golfe du Saint-Laurent est cependant discutable. Hanson et Chouinard (2002) ont conclu que la faible occurrence du capelan dans les contenus stomacaux de la morue franche dans le sGSL reflétait sa faible disponibilité par rapport au hareng entre 1959 et 2002. De plus, du capelan devrait être capturé lors de la montée et de la descente du chalut de fond si le capelan était abondant dans l'habitat pélagique, se traduisant par une occurrence relativement élevée dans le relevé. Enfin, le fait que l'abondance du capelan dans le relevé soit restée faible jusqu'à la fin des années 1990 (figure 14), c'est-à-dire plusieurs années après l'effondrement du stock de morue, donne à penser que l'augmentation des indices d'abondance du capelan dans le sGSL dans les années 2000 ne serait pas uniquement associée à des changements de comportement du capelan induits par des changements dans la pression de prédation. L'effet des prédateurs sur la capturabilité du capelan dans la zone démersale ne peut être exclu, mais nos analyses des données des relevés du sGSL, couvrant principalement la période après 1990, suggèrent qu'il n'est ni fort ni dominant.

L'inclusion des descripteurs de l'habitat a contribué davantage à la déviance expliquée que les indices de la prédation et le moment de la journée dans les modèles de capturabilité du capelan dans le sGSL. Cependant, les changements dans les caractéristiques de la CIF, comme sa profondeur et son épaisseur, n'ont pas été liés à la capturabilité du capelan dans les relevés et pourraient biaiser les indices d'abondance. Des analyses supplémentaires seraient nécessaires pour examiner les effets de ces changements et réduire les incertitudes associées aux variations possibles de la capturabilité du capelan dans les relevés.

Le choix d'estimer les moyennes annuelles des strates du relevé pour les strates plus profondes, directement à partir des prises dans ces strates, ou de supposer que ces moyennes sont égales aux moyennes des strates dans l'habitat de prédilection n'influe pas sur la perception des tendances à long terme d'abondance du capelan. Toutefois, ce choix peut avoir une certaine influence sur les tendances à une échelle plus fine (p. ex. semi-décennale). Dans l'ensemble, l'abondance du capelan dans le sGSL, composé principalement d'individus âgés de 1 et 2 ans, a augmenté durant les années 1990 et à nouveau à la fin des années 2000, pour atteindre un pic de la série. Au cours de la dernière décennie, l'abondance semble avoir diminué pour retomber à des niveaux comparables ou légèrement supérieurs à ceux de la première moitié des années 2000.

Le capelan était capturé très rarement et seulement en petit nombre dans le relevé dans le sGSL avant 1990 (figure 14). Cela reflète probablement une très faible abondance dans cet écosystème durant cette période, car il a été démontré que le capelan peut être capturé pendant que le chalut traverse la colonne d'eau (figures 6 et 7). Par conséquent, on aurait observé de faibles prises, même en présence d'un fort évitement des habitats démersaux par le capelan. Une diminution de la capturabilité causée par les grands prédateurs pendant cette période ne peut être exclue, mais les preuves présentées suggèrent qu'elle ne serait pas suffisante pour correspondre au nombre moyen par trait observé.

Contrairement au sGSL, l'abondance du capelan dans le nord du golfe, comprenant principalement des individus âgés de 2 ans, était relativement élevée tout au long des années 1990. Les tendances ultérieures étaient très similaires à celles du sGSL. Comme pour le relevé dans le sud, les abondances récentes étaient relativement faibles et comparables aux niveaux observés dans la première moitié des années 2000. Les valeurs de l'indice du relevé de 2017 constituent une exception, car les deux relevés ont capturé des capelans à des densités plus comparables à celles de la fin des années 2000.

Les niveaux plausibles du taux d'exploitation de la pêche inféré ($F < 0,002$) sont considérés comme faibles par rapport à ceux d'autres stocks de petits poissons pélagiques gérés avec prudence. Patterson (1992) a compilé des données pour 28 stocks de 11 espèces de petits poissons pélagiques et a conclu qu'une valeur de F inférieure ou égale à $2/3 M$ devrait empêcher un déclin de la biomasse. La mortalité par pêche du capelan estimée pour les années 2018 à 2020, bien que grossière, était inférieure d'au moins un ordre de grandeur aux taux de mortalité naturelle supposés. Cependant, ces taux d'exploitation ont été calculés à partir d'estimations de l'ordre de grandeur d'abondance du capelan à l'échelle du GSL, alors que la pêche est concentrée sur la côte ouest de Terre-Neuve. La possibilité d'un épuisement local ne peut être exclue, cette incertitude n'ayant pas été traitée pour le moment.

5. CONCLUSION

Le développement d'indices d'abondance à l'aide de relevés au chalut de fond pour une petite espèce pélagique telle que le capelan est sujet à des biais si la capturabilité change pendant la série chronologique. Cependant, le biais putatif causé par un changement dans l'occupation du capelan de l'habitat démersal résultant de changements dans la prédation et les

caractéristiques environnementales s'est avéré d'une importance mineure pour le relevé du sGSL. De plus, la probabilité d'occurrence et l'abondance du capelan observées dans les relevés au chalut de fond du sud et du nord du GSL concordent avec les prédictions du modèle conceptuel d'utilisation de l'habitat d'alimentation estivale par le capelan. En outre, nous avons constaté que les variations des indices d'abondance du capelan dans le nord et le sud du GSL correspondaient aux variations des conditions environnementales connues pour réguler la survie du capelan et la force des cohortes sur le plateau adjacent de l'est de Terre-Neuve (Lewis *et al.* 2019, Lehoux *et al.* 2022). Dans l'ensemble, ces résultats amènent des évidences que les indices d'abondance du capelan dérivés des relevés au chalut de fond dans le GSL permettent de suivre une partie de la variation d'abondance de la population de capelan et soutiennent donc l'utilisation des données des relevés au chalut de fond dans le GSL pour en tirer des indices d'abondance biologiquement valables. Toutefois, ces indices doivent être interprétés avec prudence, car les intervalles de confiance restent relativement larges et plusieurs sources d'incertitude devront être traitées à l'avenir. En particulier, il n'est pas certain que la densité du capelan soit horizontalement homogène dans la CIF, ni que les densités dans cet habitat soient plus faibles lorsque la CIF se trouve au-dessus de plus grandes profondeurs. La réponse à ces questions permettrait d'orienter les hypothèses formulées pour concevoir un indice d'abondance. L'analyse approfondie des données acoustiques recueillies lors des relevés au chalut de fond pourrait également être utile pour valider l'hypothèse d'une densité horizontale homogène dans la CIF et éventuellement mener à l'élaboration d'un indice d'abondance acoustique.

En conclusion, comme le capelan a une vie courte et que les populations ne sont constituées que de quelques groupes d'âge, leur abondance est sujette à de grandes fluctuations. Étant donné que l'on pense que ces variations sont principalement régulées par des facteurs environnementaux, il est actuellement difficile d'estimer avec précision l'impact de la pêche sur le capelan dans le golfe du Saint-Laurent. Néanmoins, les niveaux plausibles du taux d'exploitation inféré de la pêche étaient inférieurs d'au moins un ordre de grandeur à la mortalité naturelle (M) calculée à partir des caractéristiques du cycle biologique. Il est donc peu probable que la mortalité par pêche actuelle ait un effet négatif sur le stock de capelan dans les divisions 4RST de l'OPANO.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Noël Cadigan, qui a fourni le code R et TMB nécessaire pour ajuster le modèle négatif binomial AR(1), et Jordan Ouellette-Plante, qui a fourni la fonction permettant de calculer les distributions de la fréquence cumulées pour les relevés aléatoires stratifiés. Nous aimerions également souligner la contribution des nombreux techniciens et biologistes qui ont recueilli des données pendant les relevés au chalut de fond du sud sGSL et du nord du GSL, ainsi que de la Garde côtière canadienne. Merci également à tous ceux qui ont contribué à l'examen par les pairs de cette évaluation du stock. Enfin, merci à Caroline Lehoux et Jordan Ouellette-Plante d'avoir révisé une version antérieure de ce document.

RÉFÉRENCES CITÉES

- Aarflot, J. M., Dalpadado, P. and Fiksen, Ø. 2020. Foraging success in planktivorous fish increases with topographic blockage of prey distributions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 644:129-142.
- Bailey, R. F. J., Able, K. W. and Leggett, W. C. 1977. Seasonal and vertical distribution and growth of juvenile and adult capelin (*Mallotus villosus*) in the St. Lawrence Estuary and western Gulf of St. Lawrence. *J. Fish. Res. Board Can.* 34:2015-2029.

-
- Benoît, H.P. 2006. [Normalisation de la série chronologique des relevés au chalut de fond effectués dans le sud du golfe du Saint-Laurent : résultats d'études de pêche comparatives de 2004-2005 et autres recommandations pour l'analyse des données des relevés](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2006/008.
- Benoît, H.P. and Swain, D. P. 2003a. [Standardizing the southern Gulf of St. Lawrence bottom-trawl survey time series: adjusting for changes in research vessel, gear and survey protocol](#). Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. no. 2505:iv + 95 p.
- Benoît, H.P. and Swain, D. P. 2003b. Accounting for length and depth-dependent diel variation in catchability of fish and invertebrates in an annual bottom-trawl survey. ICES J. Mar. Sci. 60:1297–1316.
- Benoît, H.P. and Swain, D. P. 2008. Impacts of environmental change and direct and indirect harvesting effects on the dynamics of a marine fish community. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 65 : 2088-2104.
- Bernier, B. and Chabot, D. 2013. [Évaluation de l'état du stock de flétan du Groenland \(*Reinhardtius hippoglossoides*\) du golfe du Saint-Laurent \(4RST\) en 2010 et description de son régime alimentaire](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2012/140. viii + 85 p.
- Bourdages, H., Brassard, C., Desgagnés, M., Galbraith, P., Gauthier, J., Nozères, C., Scallon-Chouinard, P.-M. and Senay, C. 2020. [Résultats préliminaires du relevé écosystémique d'août 2019 dans l'estuaire et le nord du golfe du Saint-Laurent](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2020/009. iv + 93 p.
- Bourdages, H., Savard, L., Archambault D. and Valois, S. 2007. [Résultats des expériences de pêche comparative d'août 2004 et 2005 dans le nord du golfe du Saint-Laurent, entre le NGCC Alfred Needler et le NGCC Teleost](#). Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 2750:ix + 57 p.
- Burton, M. P. M. and Flynn, S. R. 1998. Differential post spawning mortality among male and female capelin (*Mallotus villosus* Müller) in captivity. Can. J. Zoo. 76:588–592.
- Cadigan, N. G. 2011. Confidence intervals for trawlable abundance from stratified-random bottom trawl surveys. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 68:781-794.
- Chadwick, E., Brodie, W., Colbourne, E., Clark, D., Gascon, D and Hurlbut, T. 2007. [History of annual multi-species trawl surveys on the Atlantic coast of Canada](#). Atlantic Zonal Monitoring Program Bulletin 6:25-42.
- Christiansen, J. S., Præbel, K., Siikavuopio, S.I. and Carscadden, J E. 2008. Facultative semelparity in capelin *Mallotus villosus* (Osmeridae)-an experimental test of a life history phenomenon in a sub-arctic fish. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 360:47-55.
- Crook, K. A., Maxner, E. and Davoren, G. K. 2017. Temperature-based spawning habitat selection by capelin (*Mallotus villosus*) in Newfoundland. ICES J. Mar. Sci. 74:1622-1629.
- Dalpadado, P. and Mowbray, F. 2013. Comparative analysis of feeding ecology of capelin from two shelf ecosystems, off Newfoundland and in the Barents Sea. Prog. Oceanogr. 114:97-105.
- Davoren, G. K., Anderson, J. T. and Montevecchi, W. A. 2006. Shoal behaviour and maturity relations of spawning capelin (*Mallotus villosus*) off Newfoundland: demersal spawning and diel vertical movement patterns. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 63:268-284.
-

-
- Flynn, S. R., Nakashima, B. S. and Burton, M. P. M. 2001. Direct assessment of post-spawning survival of female capelin, *Mallotus villosus*. J. Mar. Biol. Assoc. U.K. 81:307–312.
- Frank, K. T., Petrie, B., Choi, J. S. and Leggett, W. C. 2005. Trophic cascades in a formerly cod-dominated ecosystem. Science 308:1621-1623.
- Galbraith, P.S., Chassé, J., Caverhill, C., Nicot, P., Gilbert, D., Lefaivre, D. and Lafleur, C. 2019. [Conditions océanographiques physiques dans le golfe du Saint-Laurent en 2018](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2019/046. v + 83 p.
- Grégoire, F., Hurtubise, S., Archambault, D., Morneau, R. and Bouchard, H. 1995. [Analyses des données de pêche et de recherche sur le capelan \(*Mallotus villosus*\) du golfe du Saint-Laurent](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 95/55. 64 p.
- Grégoire, F., Bourdages, H., and Ouellet, J.-F. 2012. [Analyses des abondances de capelan \(*Mallotus villosus*\) des relevés multidisciplinaires de poissons de fond et de crevette réalisés dans l'estuaire et le nord du golfe du Saint-Laurent de 1990 à 2009](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2011/022. vi + 94 p.
- Hamel, O. S. 2015. A method for calculating a meta-analytical prior for the natural mortality rate using multiple life history correlates. ICES J. Mar. Sci. 72:62–69.
- Hanson, J. M. 2011. Ontogenetic diet comparison of Atlantic cod and white hake occurring at historically low population abundances. Trans. Am. Fish. Soc. 140:1070-1077.
- Hanson, J. M. and G. A. Chouinard. 2002. Diet of Atlantic cod in the southern Gulf of St Lawrence as an index of ecosystem change, 1959–2000. J. Fish Biol. 60:902-922.
- Harley, S.J., Myers, R. A., Barrowman, N. J., Bowen, K. and Amiro, R. 2001. [Estimation of research trawl survey catchability for biomass reconstruction of the eastern Scotian Shelf](#). Can. Stock Ass. Sec. Res. Doc. 2001/084.
- Hartig, F. 2020. [DHARMa: Residual diagnostics for hierarchical \(multi-level / mixed\) regression models. R package version 0.3.3.0](#).
- Hodder, V. M. and Winters, G. H. 1972. Distribution and size of larval herring and capelin, southern Gulf of St. Lawrence and southwestern Newfoundland, November 1969 and 1970. Fish. Res. Board Can. Tech. Rept. No. 315, 25 p.
- Hoenig, J. M. 1983. Empirical use of longevity data to estimate mortality rates. Fish. Bull. 82:898-903.
- Hurlbut, T. and Clay, D. 1990. Protocols for research vessel cruises within the Gulf Region (demersal fish) (1970–1987). Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci. 2082
- Hurtubise, S. 1994. [Pêche et caractéristiques biologiques du capelan \(*Mallotus villosus*\) dans le golfe du Saint-Laurent](#). MPO Pêches de l'Atlantique. Doc. de rech. 94/028, 24 p.
- Ingvaldsen, R. B. and Gjøsæter, H. 2013. Responses in spatial distribution of Barents Sea capelin to changes in stock size, ocean temperature and ice cover. Mar. Biol. Res. 9:867-877.
- Jech, J. M. and McQuinn, I. H. 2016. Towards a balanced presentation and objective interpretation of acoustic and trawl survey data, with specific reference to the eastern Scotian Shelf. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 73:1914-1921.
- Kleiber, M. 1932. Body size and metabolism. Hilgardia 6:315-353.
- Kleiber, M. 1947. Body size and metabolic rate. Physiol. Rev. 27:511-541.

-
- Lehoux, C., Plourde, S., Chamberland, J.-M. 2022. [Relier les variations interannuelles des indices d'abondance du capelan dans le golfe du Saint-Laurent aux indicateurs environnementaux de la régulation ascendante de la force des cohortes](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2021/068. iv + 58 p.
- Lewis, K. P., Buren, A.D., Regular, P.M., Mowbray, F. K. and Murphy, H. M. 2019. Forecasting capelin *Mallotus villosus* biomass on the Newfoundland shelf. Mar. Ecol. Prog. Ser. 616:171–183.
- Maps, F., Plourde, S., Lavoie, D., McQuinn, I. H. and Chassé, J. 2014. Modelling the influence of daytime distribution on the transport of two sympatric krill species (*Thysanoessa raschii* and *Meganyctiphanes norvegica*) in the Gulf of St Lawrence, eastern Canada. ICES J. Mar. Sci. 71:282-292.
- McQuinn, I. H. 2009. Pelagic fish outburst or suprabenthic habitat occupation: legacy of the Atlantic cod (*Gadus morhua*) collapse in eastern Canada. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 66:2256-2262.
- McQuinn, I. H., Plourde, S., St. Pierre, J.-F. and Dion, M. 2015. Spatial and temporal variations in the abundance, distribution, and aggregation of krill (*Thysanoessa raschii* and *Meganyctiphanes norvegica*) in the lower estuary and Gulf of St. Lawrence. Prog. Oceanogr. 131:159-176.
- Mowbray, F. K. 2002. Changes in the vertical distribution of capelin (*Mallotus villosus*) off Newfoundland. ICES J. Mar. Sci. 59:942-949.
- MPO. 2019a. [Évaluation de la morue franche \(*Gadus morhua*\) du sud du golfe du Saint-Laurent \(Div. de l'OPANO 4T-4Vn \(nov. – avril\)\) jusqu'en 2018](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2019/021.
- MPO. 2019 b. [Évaluation du stock de morue franche du nord du golfe du Saint-Laurent \(3 Pn, 4RS\) en 2018](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2019/032.
- MPO. 2019c. [Évaluation du stock de flétan du Groenland du golfe du Saint-Laurent \(4RST\) en 2018](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2019/023.
- O'Boyle, R. N. and Lett, P. F. 1977. [Status of capelin \(*Mallotus villosus*\) stocks in the Gulf of St. Lawrence](#). CAFSAC Res. Doc. 77/004, 18 p.
- O'Driscoll, R. and Rose, G. A. 1999. [Seasonal changes in abundance, distribution, and vertical migration of capelin in Placentia Bay](#). In Capelin in SA2+Div. 3KL, pp. 182–195. Can. Stock Assess. Sec. Res. Doc. 99/206. 195 p.
- O'Driscoll, R. L., Rose, G. A. and Anderson, J. T. 2002. Counting capelin: a comparison of acoustic density and trawl catchability. ICES J. Mar. Sci. 59:1062-1071.
- Olafsdottir, A. H. and Rose, G. A. 2012. Influences of temperature, bathymetry and fronts on spawning migration routes of Icelandic capelin (*Mallotus villosus*). Fish. Oceanogr. 21:182-198.
- Patterson, K. 1992. Fisheries for small pelagic species: an empirical approach to management targets. Rev. Fish Biol. Fish. 2(4): 321–338.
- Pedersen, E. J., Miller, D. L., Simpson, G. L. and Ross, N. 2019. Hierarchical generalized additive models in ecology: an introduction with mgcv. PeerJ 7:e6876.
- Perry, R. I. and Smith, S. J. 1994. Identifying habitat associations of marine fish using survey data: an application to the northwest Atlantic. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 51:589-602.
-

-
- Plourde, S., Lehoux, C., Johnson, C. L., Perrin, G. and Lesage, V. 2019. North Atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*) and its food:(I) a spatial climatology of *Calanus* biomass and potential foraging habitats in Canadian waters. J. Plankton Res. 41 :667–685.
- Plourde, S., McQuinn, I. H., Maps, F, St-Pierre, J.-F., Lavoie, D and Joly, P. 2014. Daytime depth and thermal habitat of two sympatric krill species in response to surface salinity variability in the Gulf of St Lawrence, eastern Canada. ICES J. Mar. Sci. 71:272-281.
- R Core Team. 2020. [R: A language and environment for statistical computing](#). R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria
- Regular, P.M., Davoren, G. K., Hedd, A. and Montevicchi, W. A. 2010. Crepuscular foraging by a pursuit-diving seabird: tactics of common murrelets in response to the diel vertical migration of capelin. Mar. Ecol. Prog. Ser. 415:295-304.
- Rose, G. A. 2005. Capelin (*Mallotus villosus*) distribution and climate: a sea “canary” for marine ecosystem change. ICES J. Mar. Sci. 62:1524-1530.
- Savoie, L. 2014. [Résultats préliminaires des relevés au chalut de fond de septembre 2012 et 2013 dans le sud du golfe du Saint-Laurent et comparaison avec les relevés précédents de 1971 à 2011](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2014/053. v + 127 p.
- Surette, T. J. 2016. [Abundance indices of Atlantic herring \(*Clupea harengus*\) from the southern Gulf of St. Lawrence based on the September multispecies bottom trawl survey](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2016/064. vii + 33 p.
- Then, A. Y., Hoenig, J. M., Hall, N. G. and Hewitt, D. A. 2015. Evaluating the predictive performance of empirical estimators of natural mortality rate using information on over 200 fish species. ICES J. Mar. Sci. 72 :82–92.
- Wood, S. 2019. [Mixed GAM computation vehicle with automatic smoothness estimation](#). R package version 1.8-29.
- Wood, S. and Scheipl F. 2020. [gamm4: Generalized additive mixed models using “mgcv” and ‘lme4’](#). R package version 0.2-6.

TABLEAUX

*Tableau 1 : Récapitulatif des modèles additifs généralisés mixtes (GAMM) pour le capelan dans le sGSL. Chaque modèle comporte une ordonnée à l'origine aléatoire par année-strate et une variable de décalage (offset) prenant en compte la superficie chalutée et de la calibration entre les navires (n = nombre de traits après suppression des années*strates sans capelan, DLE = degrés de liberté estimés, Dév % = pourcentage de déviance expliquée).*

Modèle	n	n traits retirés	Nombre d'années* strates	Covariables	DLE	ΔCIA	Dév %
sGSL Capelan 0	-	-	-	-	414,7	664,3	49,7
sGSL Capelan 1	-	-	-	Heure	418,0	583,6	51,0
sGSL Capelan 2.1	-	-	-	Heure + Cod25	418,6	505,5	52,2
sGSL Capelan 2.2	3634	2735	508	Heure + Turbot	418,3	575,7	51,2
sGSL Capelan 3.1	-	-	-	Heure + Cod25 + Temp. + Prof.	426,4	0,0	59,6
sGSL Capelan 3.2	-	-	-	Heure + Turbot + Temp. + Prof.	428,8	59,3	58,9
sGSL Capelan 4	-	-	-	Heure + Temp. + Prof.	428,6	58,9	58,9

Tableau 2 : Ordre de grandeur estimé de la biomasse du capelan dans le sud (sGSL) et le nord du GSL (nGSL) d'après le poids moyen individuel (wt), le nombre d'unités chalutables dans les relevés au chalut de fond du sGSL et du nGSL, le nombre moyen par trait (NMPT) et les coefficients de capturabilité (q) pour les petits poissons pélagiques dans ce type de relevé.

Index du relevé	Poids moyen individuel wt (kg)	Unités chalutables dans le relevé	NMPT (2017–2020)	Biomasse chalutable (t)	q	~Biomasse (t)
sGSL strates principales	0,0085	1 806 408	330,4	5 073	0,00450	1 127 359
					0,00087	5 831 168
sGSL CIF strata	0,0085	1 806 408	535,5	8 222	0,00450	1 827 181
					0,00087	9 450 939
nGSL strates principales	0,015	7 933 617	167,6	19 945	0,00450	4 432 222
					0,00087	22 925 287
nGSL CIF strata	0,015	7 933 617	402,1	47 851	0,00450	10 633 691
					0,00087	55 001 149

q=0.00450 basé sur le hareng dans le sGSL (Benoît et Swain 2008)

q=0.00087 basé sur le lançon dans le relevé de poissons de fond anglais (Harley et al. 2001)

Tableau 3 : Estimations de la mortalité naturelle du capelan selon différentes méthodes fondées sur un âge maximal de 7 ans (estimations prudentes). M : taux instantané de mortalité naturelle.

M	Méthode
0,62	Hoenig (1983)
0,77	Hamel (2015)
0,82	Then et al. (2015)

FIGURES

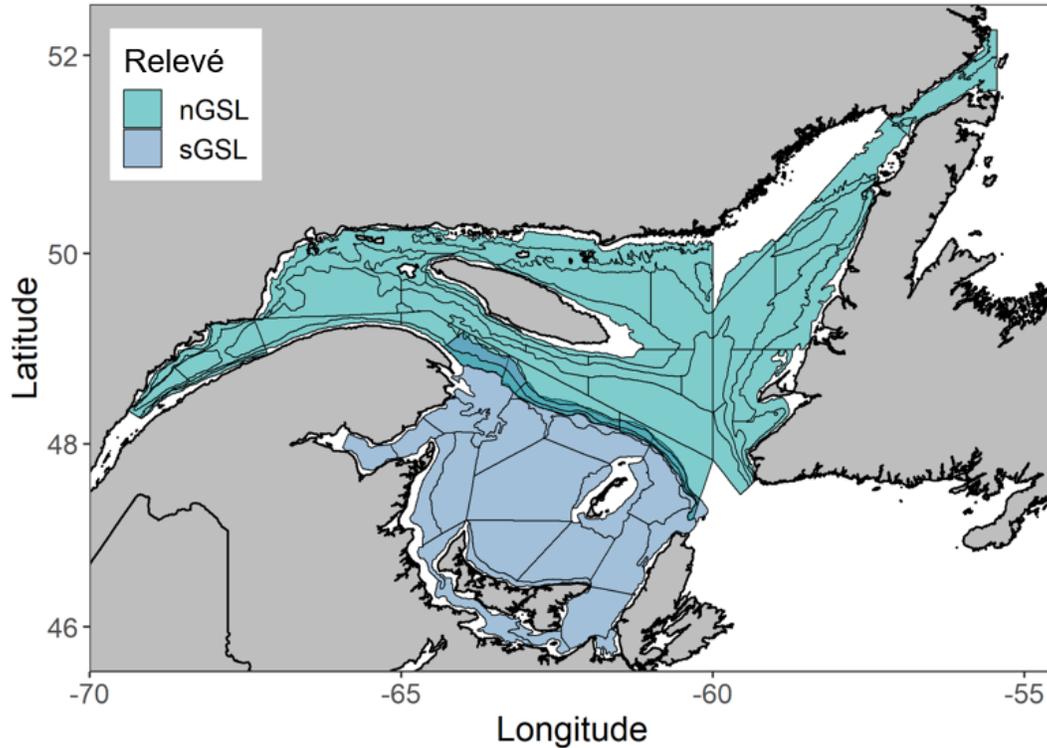


Figure 1 : Carte de la zone d'étude montrant les différentes strates pour le relevé du sud (sGSL, en bleu) et du nord du golfe du Saint-Laurent (nGSL, en vert).

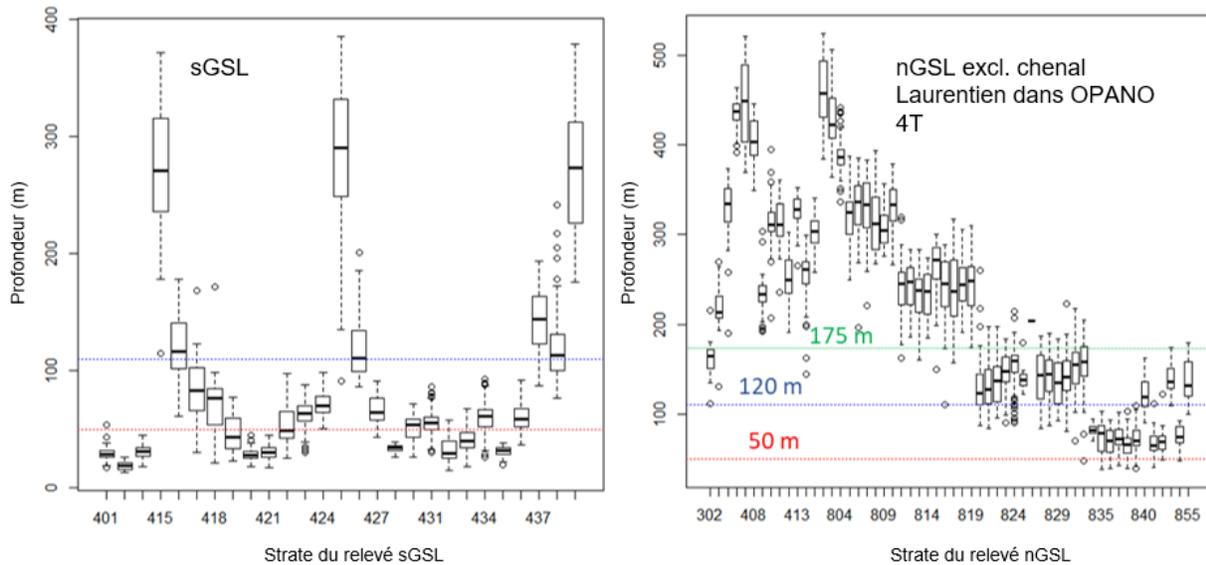


Figure 2 : Diagrammes de quartiles des profondeurs échantillonnées dans chaque strate des relevés au chalut de fond du sud sGSL (sGSL, diagramme de gauche) et du nord du golfe du Saint-Laurent (nGSL, diagramme de droite). Les lignes tiretées indiquent les limites de l'habitat de préférence supposé du capelan, de 50 à 120 m dans le sGSL et de 50 à 175 m dans le nGSL.

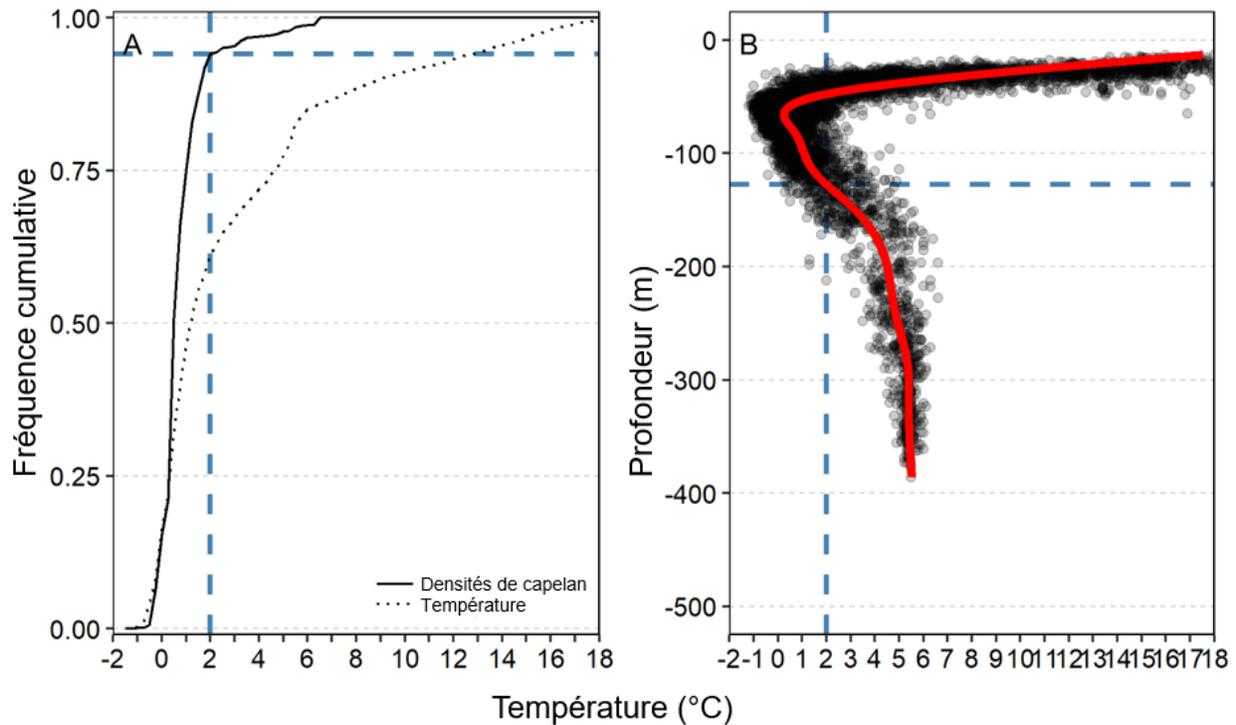


Figure 3 : A) Distribution de la fréquence cumulée empirique des températures observées et des températures pondérées par les densités du capelan d'après le relevé au chalut de fond du sud du golfe du Saint-Laurent (sGSL). Les lignes bleues tiretées indiquent l'endroit où la distribution de la fréquence cumulée change brusquement (2,2 °C, 94 %). B) Profondeurs et température associée observées dans le relevé au chalut de fond du sGSL. Les points gris représentent la température et la profondeur de tous les traits entre 1971 et 2016. La ligne rouge indique la température prédite par une spline de régression cubique utilisant la profondeur comme covariable. Les lignes bleues tiretées indiquent 2,0 °C et la profondeur moyenne associée (128 m).

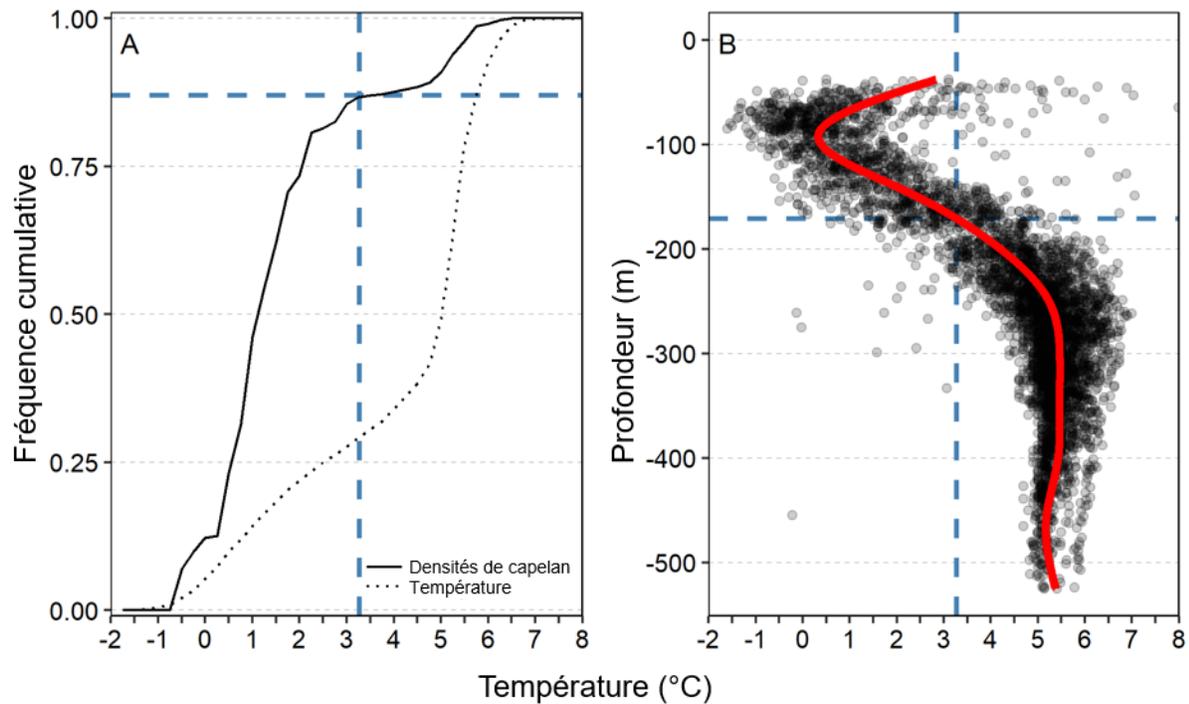


Figure 4 : A) Distribution de la fréquence cumulée empirique des températures observées et des températures pondérées par les densités du capelan d'après le relevé au chalut de fond du nord du golfe du Saint-Laurent (nGSL). Les lignes bleues tiretées indiquent l'endroit où la distribution de la fréquence cumulée change brusquement (3,3 °C, 87 %). B) Profondeurs et température associée observées dans le relevé au chalut de fond du nGSL. Les points gris représentent la température et la profondeur de tous les traits entre 1990 et 2018. La ligne rouge indique la température prédite par une spline de régression cubique utilisant la profondeur comme covariable. Les lignes bleues tiretées indiquent 3,3 °C et la profondeur associée (171 m) selon le modèle.

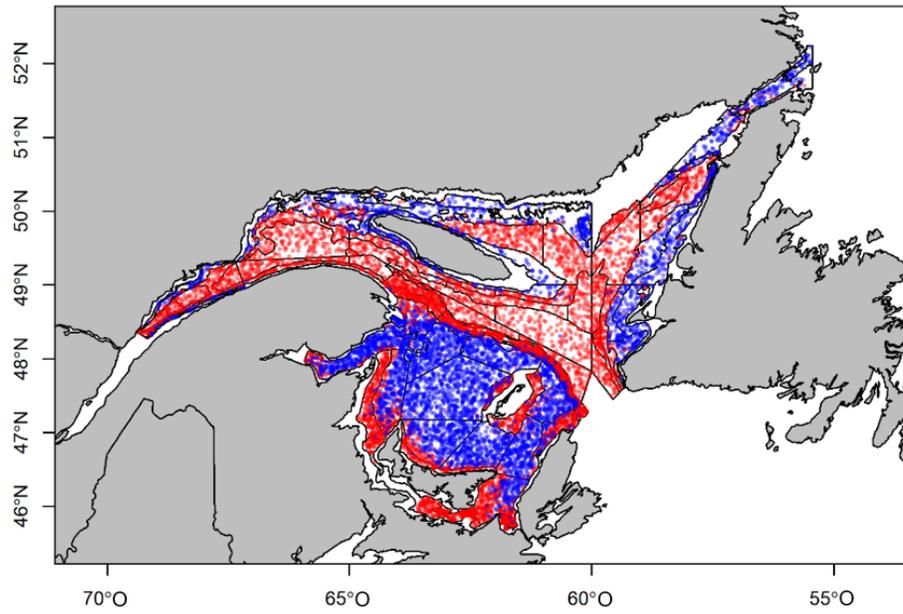


Figure 5 : Carte des traits des relevés au chalut de fond dans le sud et le nord du golfe du Saint-Laurent effectués à l'intérieur (en bleu) et à l'extérieur (en rouge) de l'habitat thermique préféré du capelan.

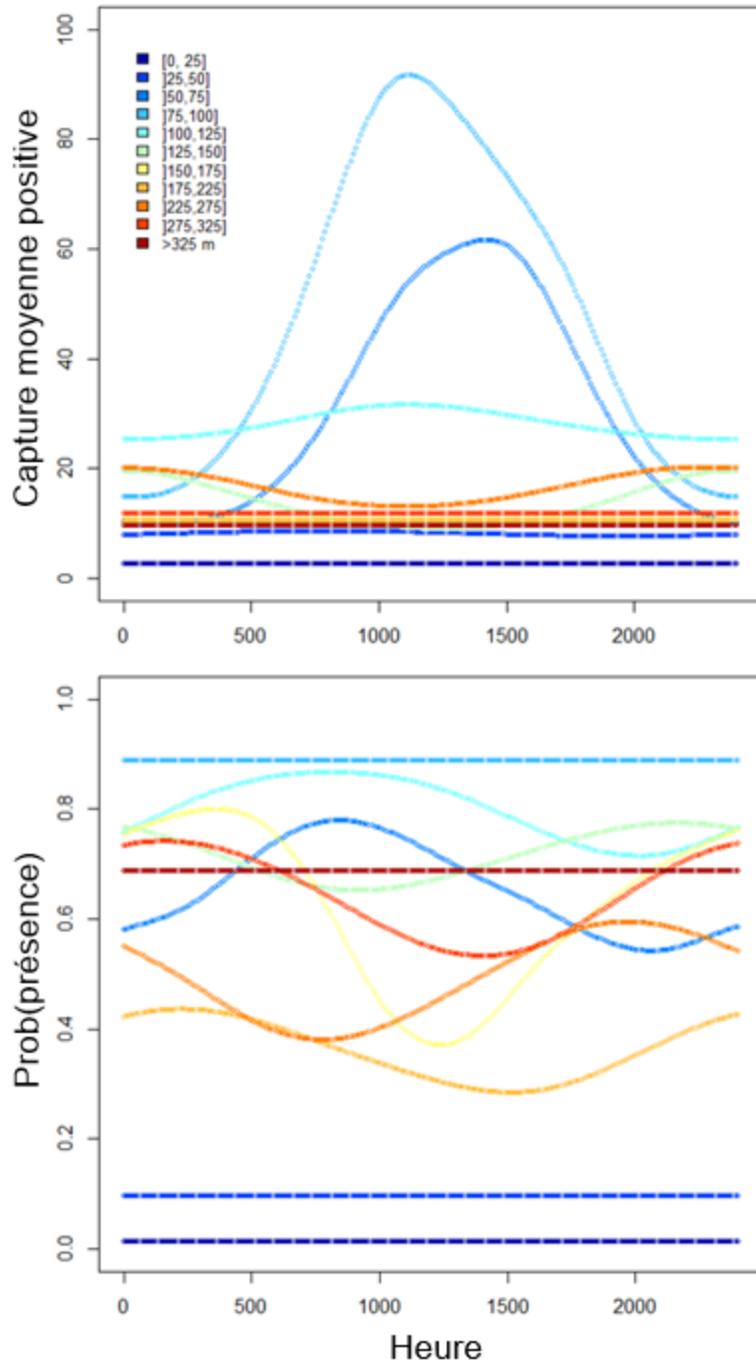


Figure 6 : Prises positives prédites moyennes de capelan (en haut) et probabilité d'occurrence prédite (en bas) dans le relevé au chalut de fond du sud du golfe du Saint-Laurent en fonction de l'heure du jour et par classe de profondeur.

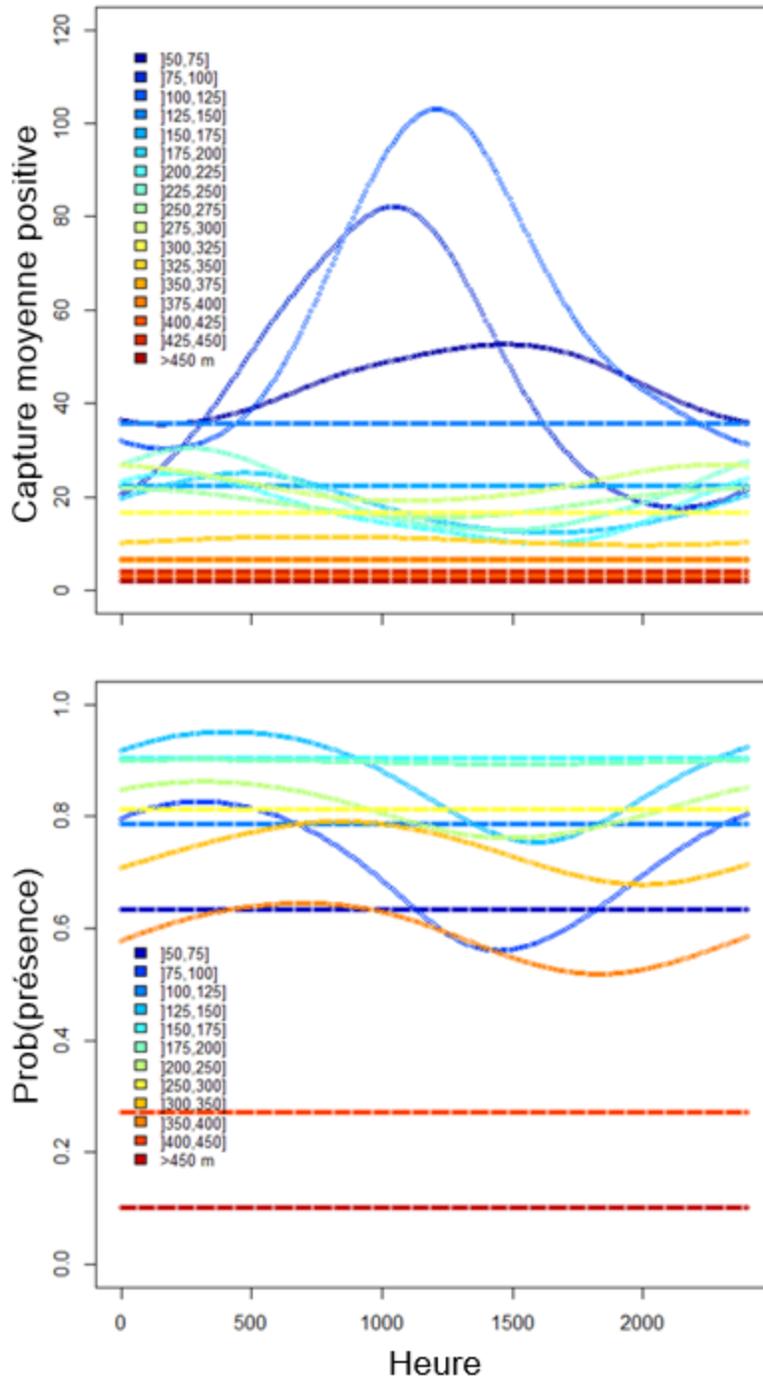


Figure 7 : Prises positives moyennes de capelan prédites (en haut) et probabilité d'occurrence prédite (en bas) dans le relevé au chalut de fond du nord du golfe du Saint-Laurent en fonction de l'heure du jour et par classe de profondeur. Il convient de noter que certaines classes de profondeur ont été combinées pour l'analyse de la probabilité d'occurrence afin d'obtenir une convergence dans l'ajustement du modèle.

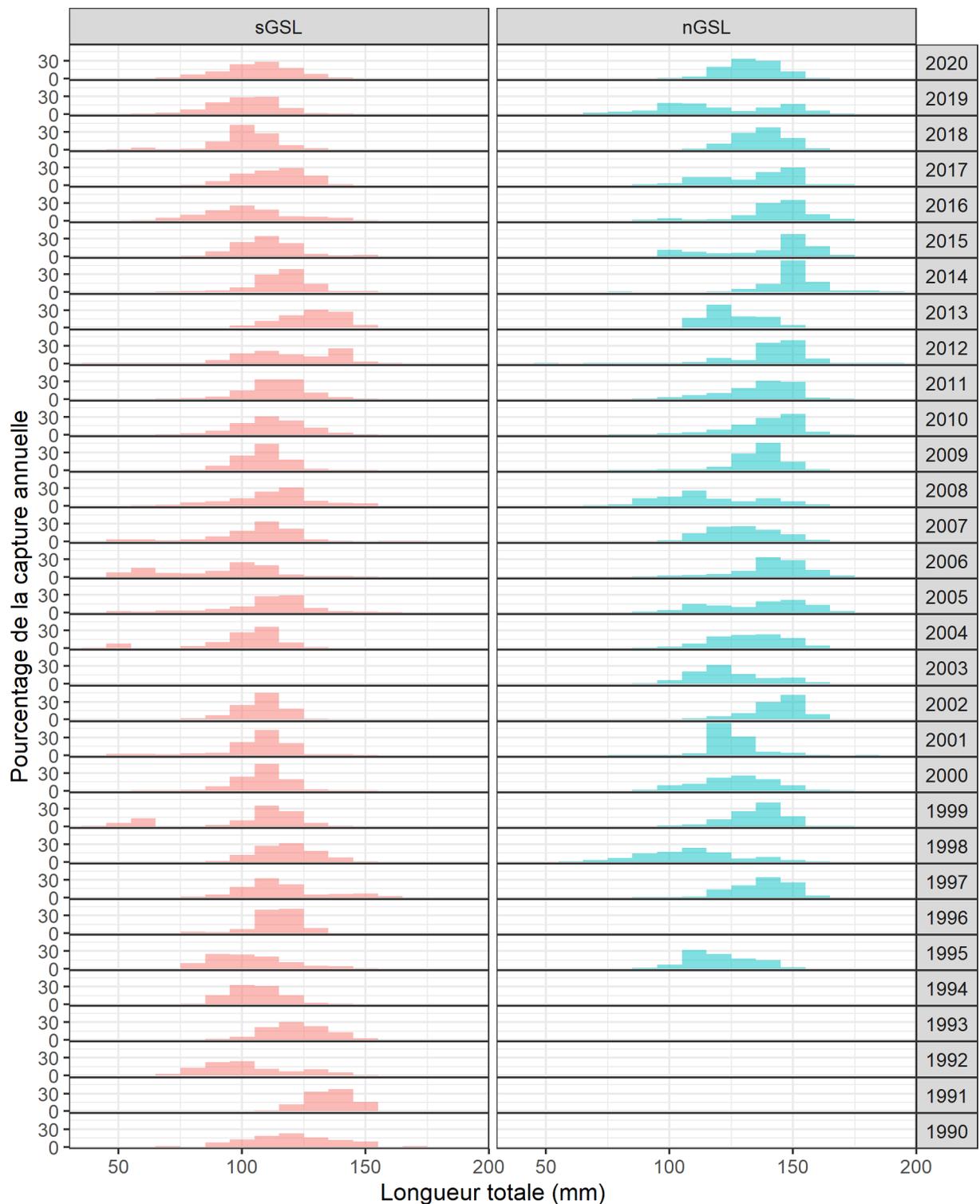


Figure 8 : Comparaison des distributions annuelles de la fréquence de longueur relative des relevés au chalut de fond dans le sud et le nord (nGSL) du golfe du Saint-Laurent, de 1990 à 2020. Il convient de noter que les fréquences de longueur ne sont pas représentées pour les relevés du nGSL de 1990 à 1994, soit parce qu'il n'y en avait pas assez ($n = 63$ en 1990), soit parce qu'aucune donnée de longueur n'a été enregistrée (1991 à 1994).

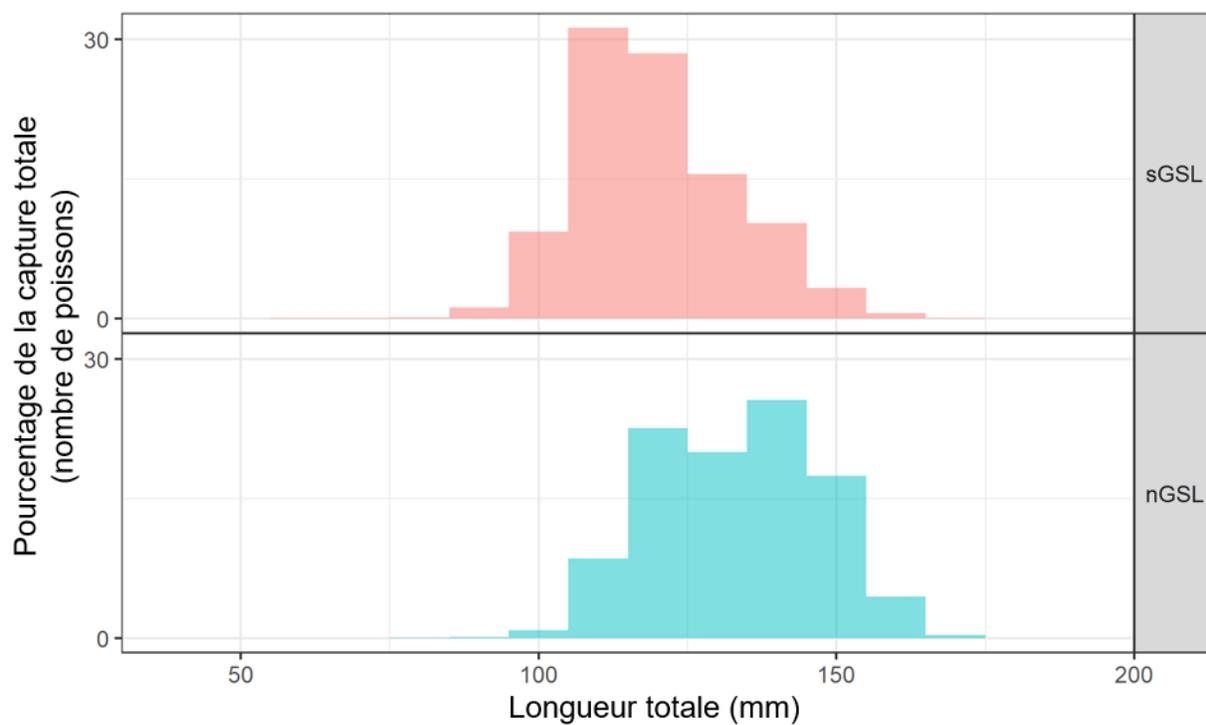


Figure 9 : Comparaison de la distribution de la fréquence de longueur relative du capelan dans les strates qui se chevauchent des relevés au chalut de fond du sud et du nord du golfe du Saint-Laurent, de 1995 à 2020.

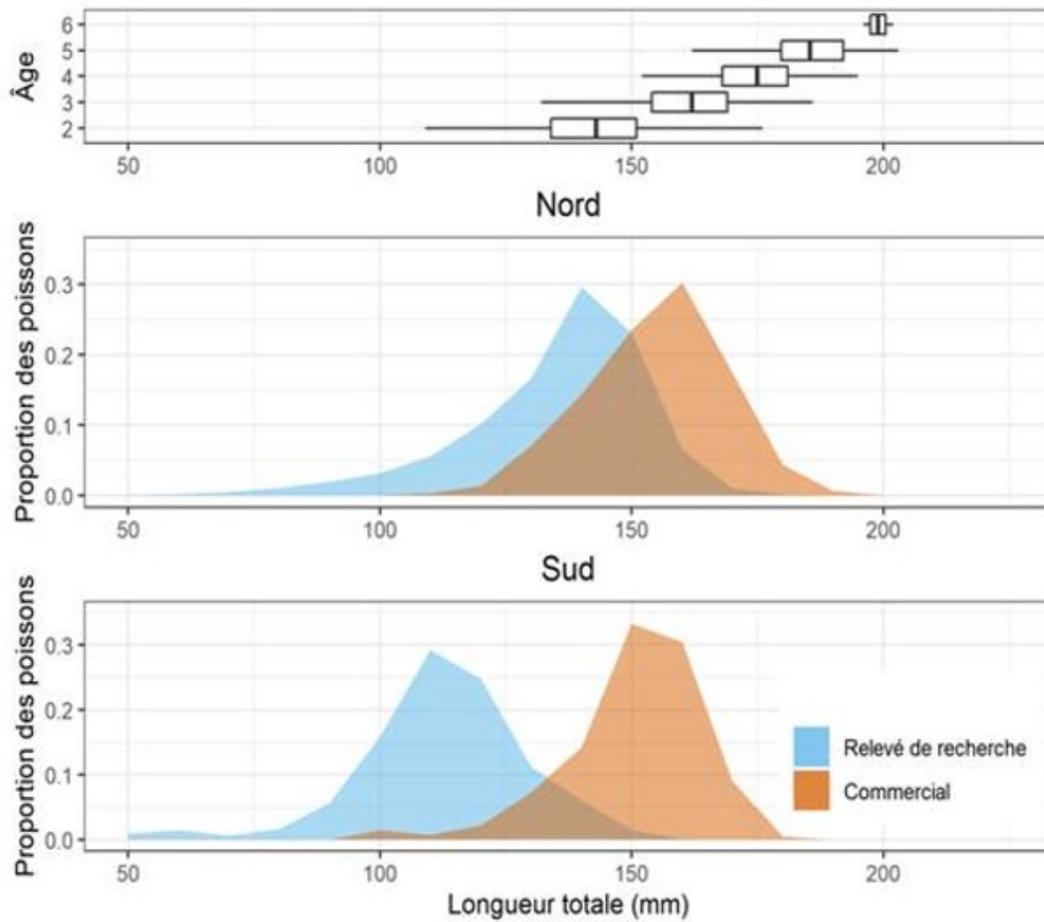


Figure 10 : Longueur selon l'âge (rangée du haut, données sur le capelan dans le GSL de 1984 à 1993, Hurtubise 1994) et distribution des longueurs pour les relevés au chalut de fond dans le nord (au milieu) et le sud (en bas) du GSL (en bleu) par rapport à la distribution des longueurs dans la pêche commerciale. Pour les distributions des longueurs dans la pêche commerciale, nous avons utilisé les divisions 4R et 4S de l'OPANO pour la comparaison au relevé du nGSL, et les données de la pêche commerciale dans la division 4T de l'OPANO pour la comparaison au relevé du sGSL.

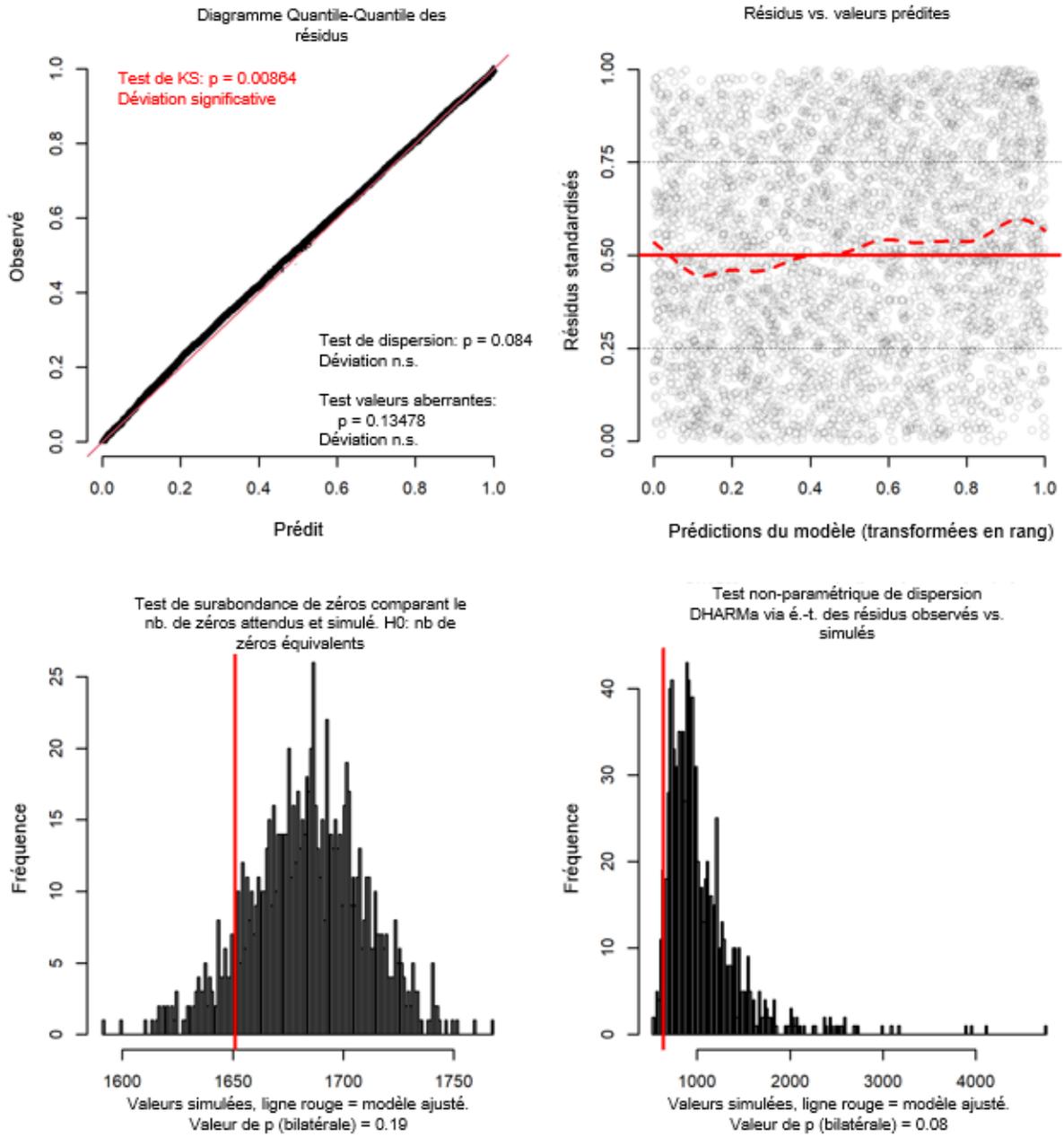


Figure 11 : Graphiques de diagnostic DHARMA du modèle sGSL 3.1.

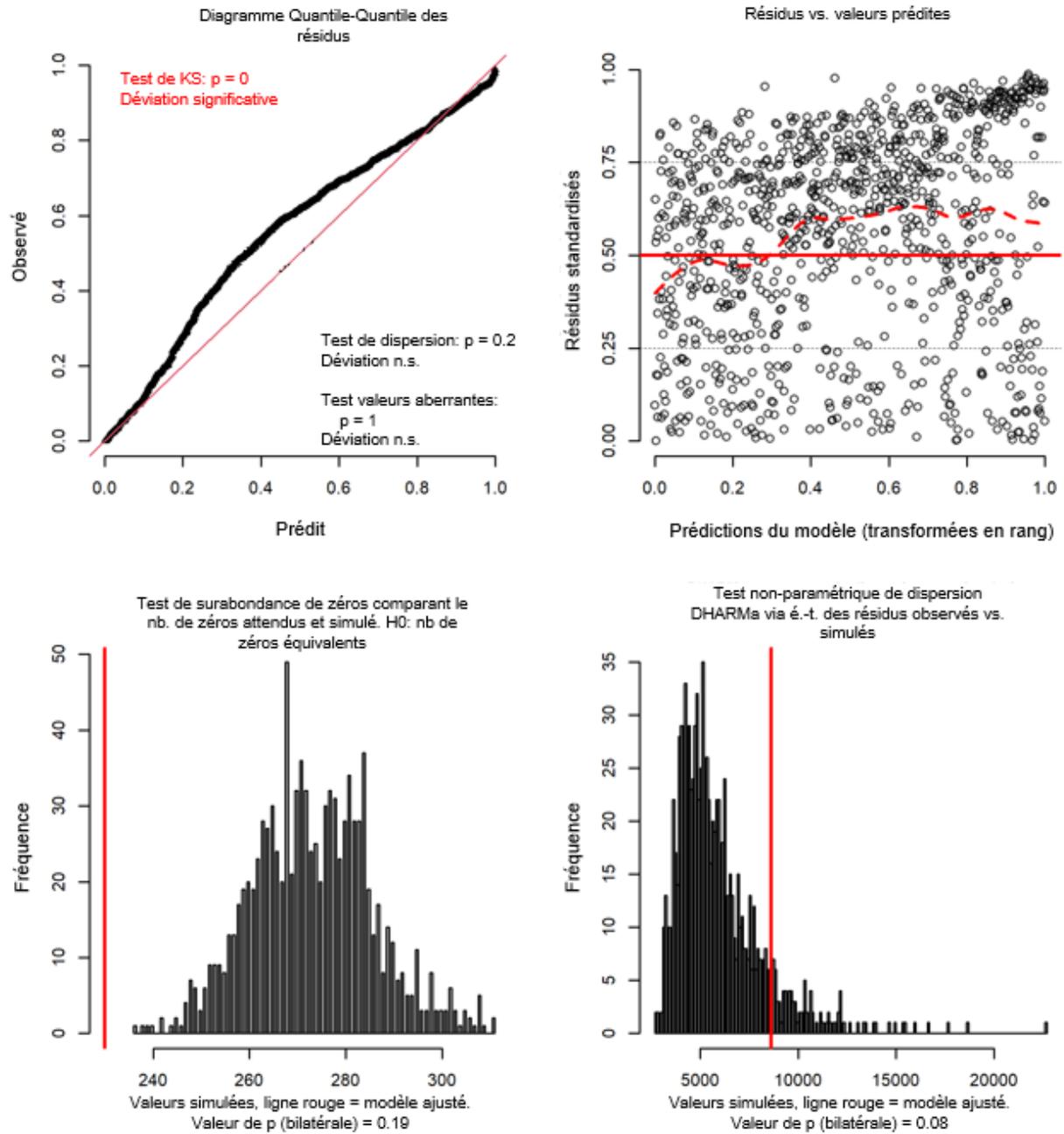


Figure 12 : Graphiques de diagnostic DHARMA du modèle nGSL 2.1.

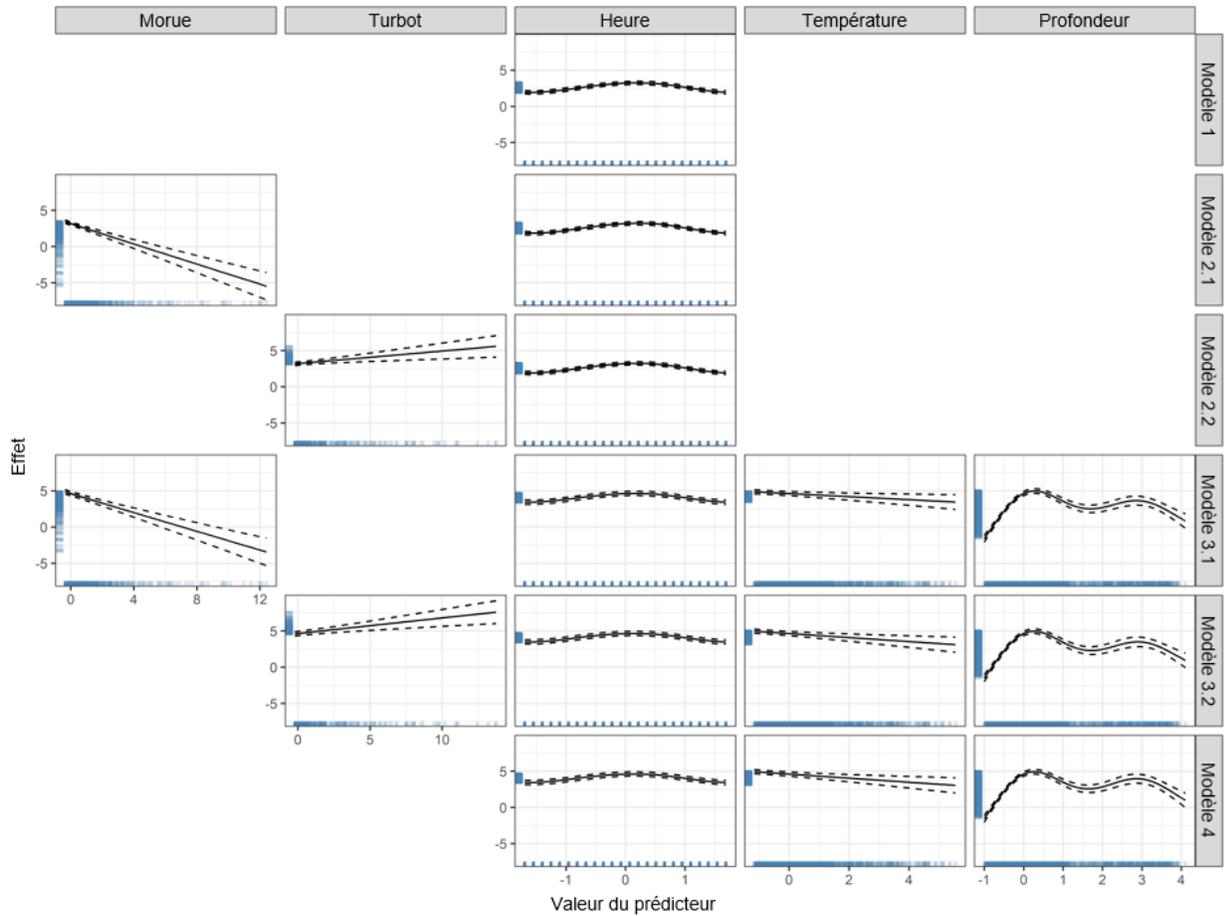


Figure 13 : Graphiques de l'effet des prédicteurs du modèle pour le capelan dans le sGSL pour chaque modèle (lignes) et covariable (colonnes). Les effets sont représentés à l'échelle du prédicteur linéaire. Les lignes tiretées représentent les intervalles de confiance de 95 % (valeur moyenne prédite $\pm 1,96 * \text{erreur-type}$). Les distributions des données pour les prédicteurs normalisés (moyenne = 0, variance = 1) sont représentées sous forme de tirets sur l'axe des abscisses.

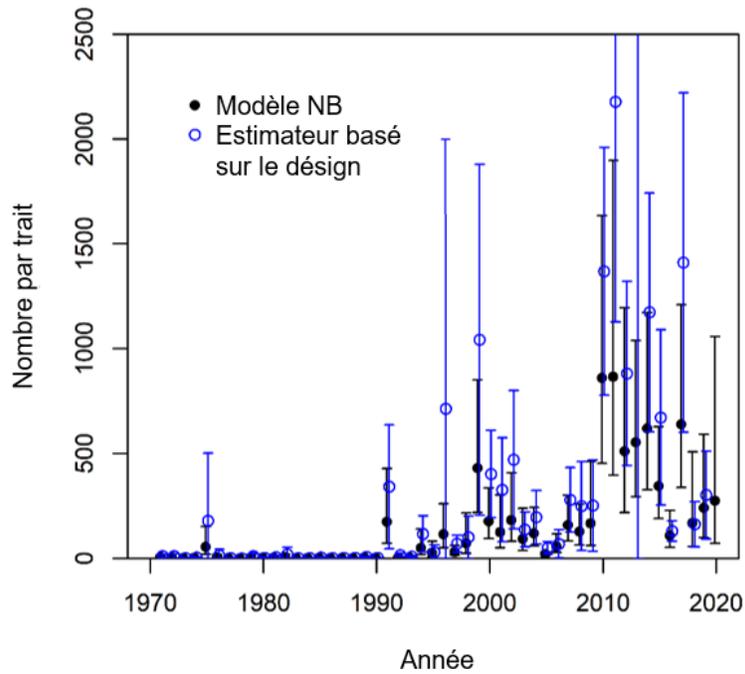


Figure 14 : Indice d'abondance du capelan estimé pour le relevé du sud du golfe du Saint-Laurent à l'aide du modèle négatif binomial $AR(1)$ (en noir) comparé à l'indice fondé sur l'estimateur traditionnel basé sur le plan d'échantillonnage (en bleu). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance de 95 %.

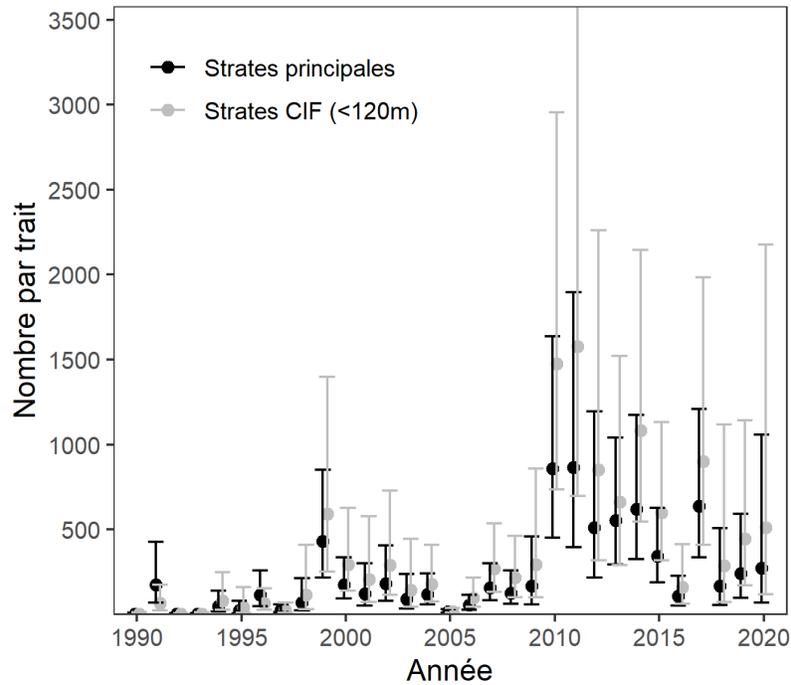


Figure 15 : Indices d'abondance estimés du capelan pour le relevé du sud du golfe du Saint-Laurent (sGSL), fondés sur les strates principales et en supposant que les densités moyennes dans les strates couvrant l'habitat préféré (strates de la couche intermédiaire froide) estiment les densités moyennes dans les strates situées en dessous de cet habitat. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95 %. Les indices pour le sGSL avant 1990 ne sont pas illustrés.

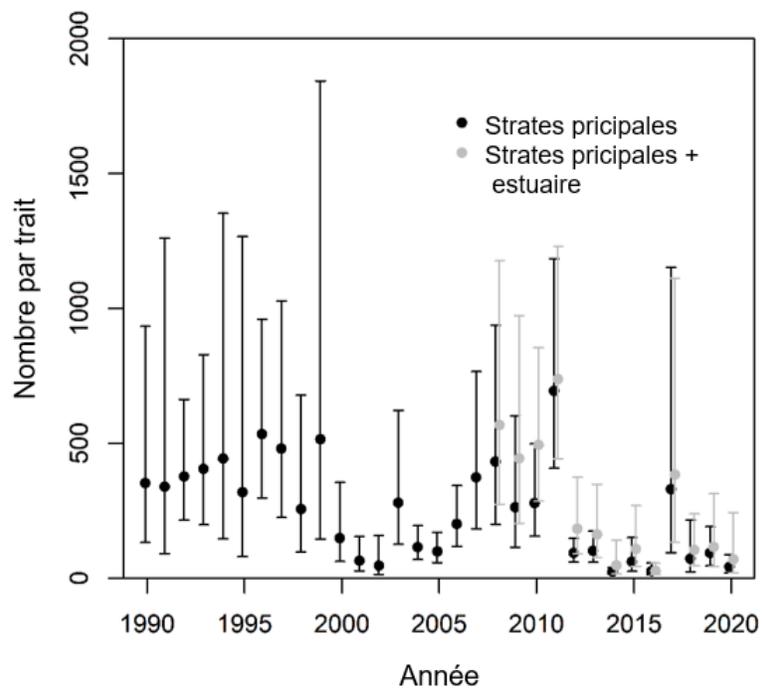


Figure 16 : Indices d'abondance estimés du capelan pour le relevé du nord du golfe du Saint-Laurent, fondés sur toutes les strates (strates principales) qui faisaient partie du plan d'échantillonnage depuis 1990, et y compris les strates de l'estuaire ajoutées en 2008.

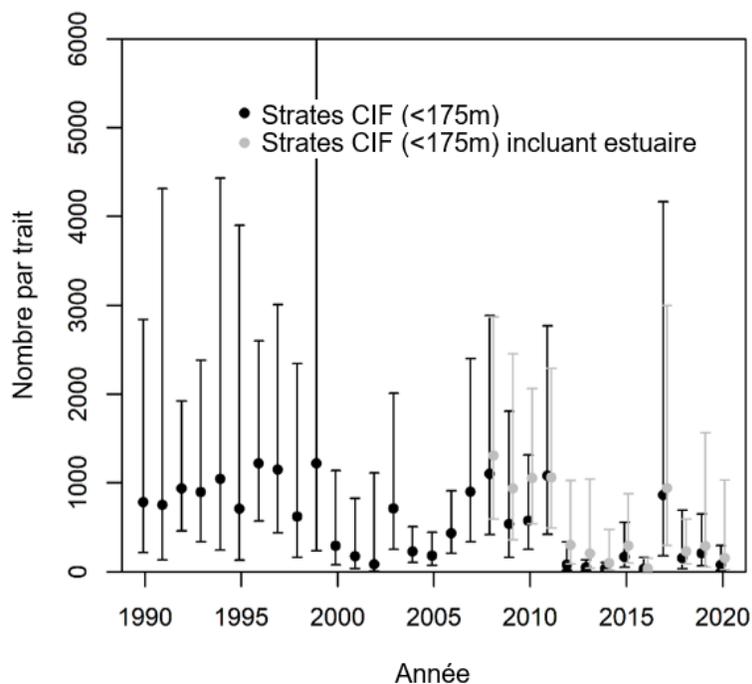


Figure 17 : Indices d'abondance estimés du capelan pour le relevé du nord du golfe du Saint-Laurent, en supposant que les densités moyennes dans les strates couvrant l'habitat préféré (strates de la couche intermédiaire froide) estiment les densités moyennes dans les strates situées en dessous de cet habitat. Des séries séparées sont présentées sur la base de toutes les strates qui faisaient partie du plan d'échantillonnage depuis 1990, et y compris les strates de l'estuaire ajoutées en 2008.

ANNEXE 1

Tendances de l'abondance des principaux prédateurs démersaux du capelan.

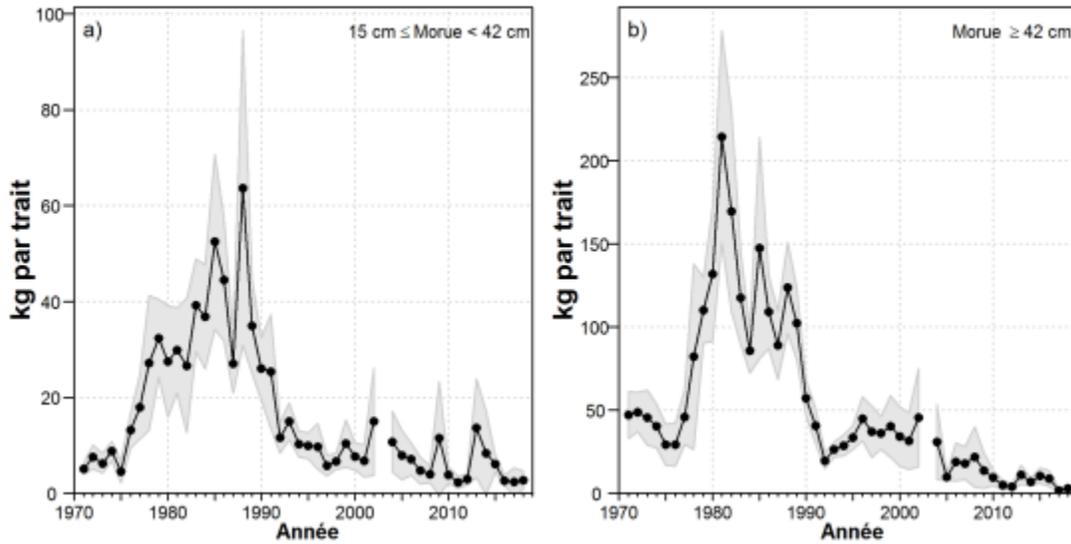


Figure A18 : Indices de biomasse de la morue franche (kg par trait, moyenne et intervalles de confiance à 95 % approximatifs) pour les morues de 15 à 42 cm (graphique de gauche, a) et les morues de taille commerciale (≥ 42 cm; graphique de droite b) dans le relevé de recherche de septembre du sud du golfe du Saint-Laurent. Tiré de MPO 2019a.

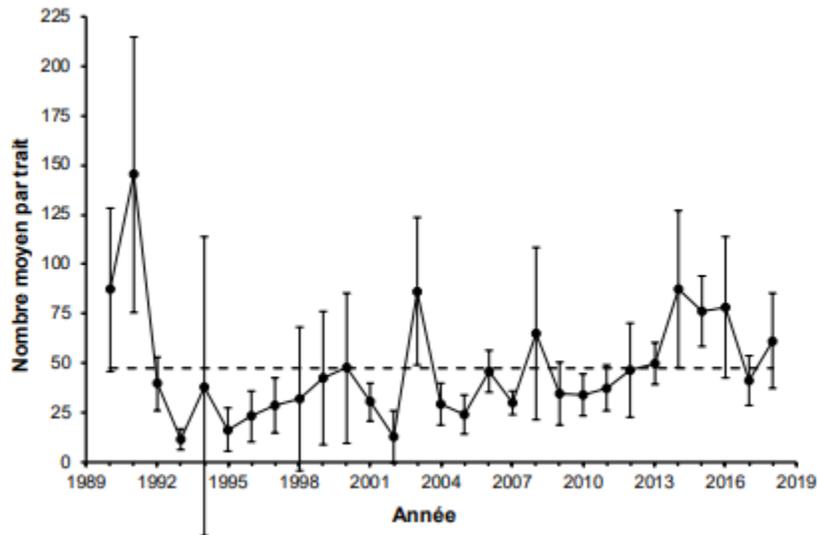


Figure A19 : Nombre moyen de morues par trait (\pm l'intervalle de confiance à 95 %) dans le relevé du MPO dans 4RS. La ligne pointillée indique la moyenne de la période 1990-2017. Tiré de MPO 2019b.

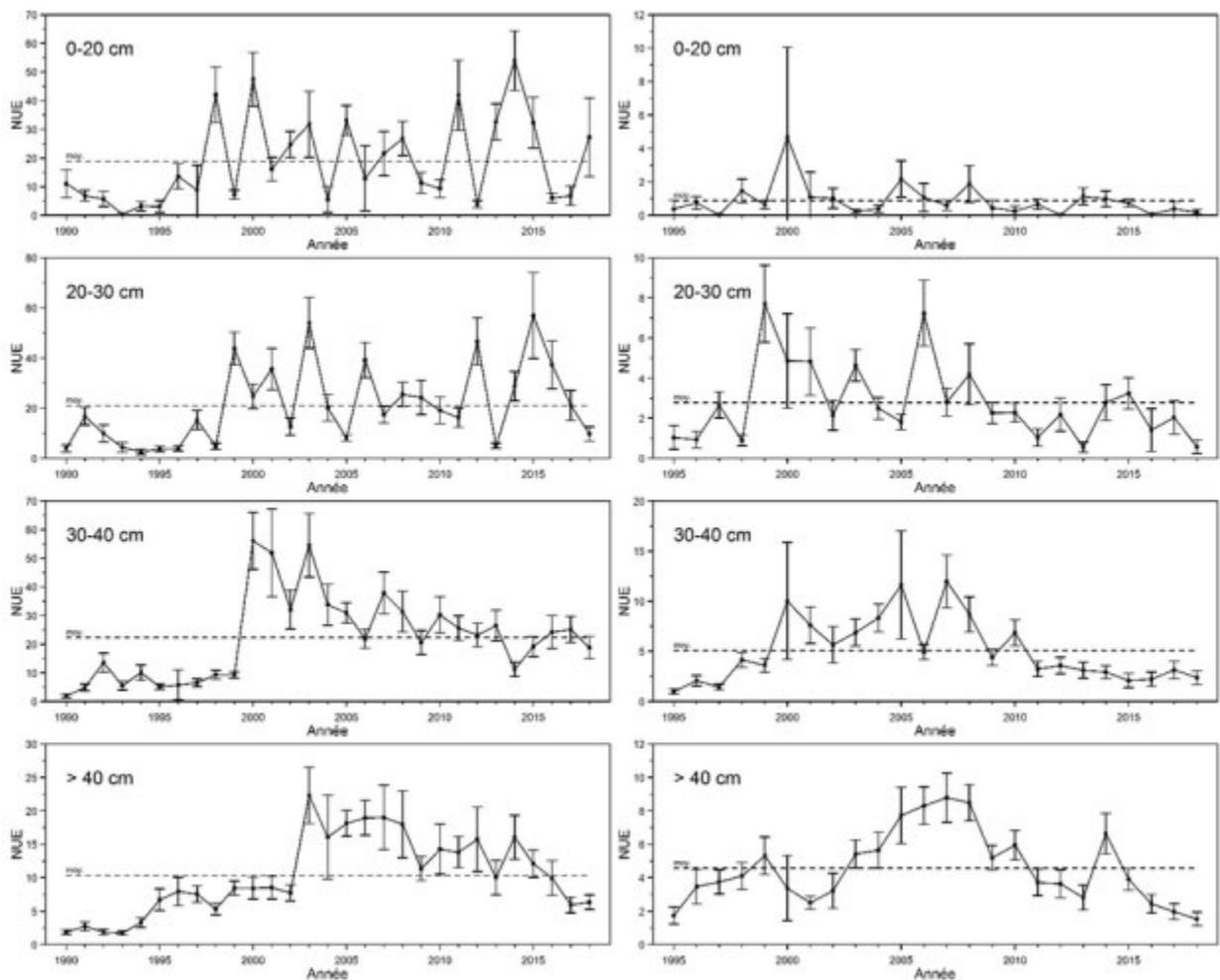


Figure A20 : Indices d'abondance (nombre moyen par trait, NUE) du flétan du Groenland observés pour différentes classes de tailles lors des relevés du nGSL du MPO (gauche) et de PSM (droite). Les barres d'erreur indiquent l'intervalle de confiance à 95 %. Les lignes en pointillé représentent la moyenne de chacune des séries. Tiré de MPO 2019b.

ANNEXE 2

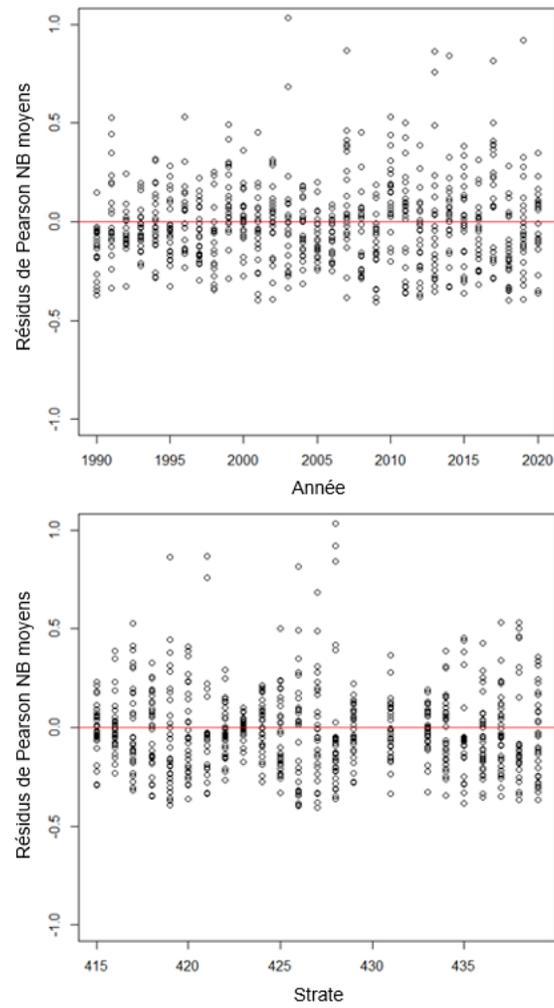


Figure A21 : Moyenne des résidus de Pearson pour le modèle négatif binomial AR(1) du relevé du sud du golfe du Saint-Laurent, toutes les strates, en fonction de l'année (en haut) et de la strate (en bas).

Tableau A4 : Tableau des résultats de la modélisation additive généralisée des prises positives du relevé dans le sud du golfe du Saint-Laurent en fonction de l'heure du jour et de la classe de profondeur (classprof).

Famille : gaussien Fonction de lien : identité

Formule : $\log(\text{capture}) \sim \text{classprof} + s(\text{heure}, \text{bs} = \text{« cc »}, \text{by} = \text{classprof})$

Coefficients paramétriques :

	Estimé	Erreur Std.	Valeur de t	Pr(> t)	
(Ord. origine)	0,9645	0,9379	1 028	0,30391	
classprof25	1,1344	0,9465	1 199	0,23083	
classprof50	2,2707	0,9412	2 413	0,01592	*
classprof75	2,7389	0,9433	2 903	0,00373	**
classprof100	2,3719	0,955	2 484	0,01308	*
classprof125	1,6007	0,9718	1,647	0,09969	.
classprof150	1,4	0,9711	1 442	0,14957	
classprof175	1,3816	1 001	1,38	0,16765	
classprof225	1,8306	0,9766	1 874	0,06101	.
classprof275	1,5095	0,9733	1 551	0,12106	
classprof325	1,3044	0,9785	1 333	0,18265	

Codes de signif. : 0 « *** » 0,001 « ** » 0,01 « * » 0,05 « . » 0,1 « » 1

Signification approximative des termes lisses :

	DLE	dl réf.	F	p-valeur	
s(heure):classprof0	1,19E-05	4	0	1	
s(heure):classprof25	3,87E-01	8	0,052	0,296	
s(heure):classprof50	4,03E+00	8	4,74	< 2,00E-16	***
s(heure):classprof75	3,38E+00	8	1,951	2,09E-09	***
s(heure):classprof100	6,89E-01	8	0,097	0,233	
s(heure):classprof125	1,27E+00	8	0,215	0,106	
s(heure):classprof150	1,33E-07	8	0	1	
s(heure):classprof175	5,41E-05	8	0	0,546	
s(heure):classprof225	8,63E-01	8	0,127	0,198	
s(heure):classprof275	6,48E-04	8	0	0,352	
s(heure):classprof325	2,10E-04	8	0	0,528	

Tableau A5 : Tableau des résultats de la modélisation additive généralisée de la probabilité d'occurrence du relevé du sud du golfe du Saint-Laurent en fonction de l'heure du jour et de la classe de profondeur (classprof).

Famille : binomiale Fonction de lien : logit

Formule : pres ~ classprof + s(heure, bs = « cc », by = classprof)

Coefficients paramétriques :

	Estimé	Erreur Std.	valeur de z	Pr(> z)	
(Ord. origine)	-4,2962	0,7198	-5,969	2,39E-09	***
classprof25	2,0525	0,7251	2,831	0,00464	**
classprof50	4,9533	0,7294	6,791	1,11E-11	***
classprof75	6,3574	0,7486	8,492	< 2,00E-16	***
classprof100	5,7031	0,7767	7,343	2,09E-13	***
classprof125	5,2277	0,8065	6,482	9,04E-11	***
classprof150	4,8221	0,8083	5,966	2,43E-09	***
classprof175	3,7192	0,8509	4,371	1,24E-05	***
classprof225	4,2633	0,81	5,264	1,41E-07	***
classprof275	4,8944	0,8153	6,003	1,94E-09	***
classprof325	5,0814	0,8239	6,168	6,94E-10	***

Codes de signif. : 0 « *** » 0,001 « ** » 0,01 « * » 0,05 « . » 0,1 « » 1

Signification approximative des termes lisses :

	DLE	DI réf	Chi.car	p-valeur	
s(heure):classprof0	4,57E-05	8	0	0,444	
s(heure):classprof25	3,06E-05	8	0	0,5711	
s(heure):classprof50	3,15E+00	8	23,121	6,19E-06	***
s(heure):classprof75	2,21E-02	8	0,008	0,7216	
s(heure):classprof100	1,43E+00	8	3,144	0,0911	.
s(heure):classprof125	9,20E-01	8	1,121	0,2892	
s(heure):classprof150	2,32E+00	8	5,274	0,0677	.
s(heure):classprof175	7,74E-01	8	1,015	0,2603	
s(heure):classprof225	1,22E+00	8	2,144	0,1553	
s(heure):classprof275	1,06E+00	8	2,264	0,1038	
s(heure):classprof325	8,69E-04	8	0	0,7862	

Tableau A6 : Tableau des résultats de la modélisation additive généralisée des prises positives du relevé dans le nGSL en fonction de l'heure du jour et de la classe de profondeur (classprof).

Famille : gaussienne Fonction de lien : identité

Formule : log(capture) ~ classprof + s(heure, bs = « cc », by = classprof)

Coefficients paramétriques :

	Estimé	Erreur Std.	Valeur de t	Pr(> t)	
(Ord. origine)	3,7761	0,19	19,876	< 2,00E-16	***
classprof75	-0,1089	0,2263	-0,481	0,630355	
classprof100	0,194	0,2414	0,804	0,421667	
classprof125	-0,199	0,2385	-0,834	0,404212	
classprof150	-0,67	0,2298	-2,915	0,003581	**
classprof175	-0,908	0,2409	-3,769	0,000167	***
classprof200	-0,9875	0,2306	-4,283	1,89E-05	***
classprof225	-0,7989	0,2262	-3,531	0,000419	***
classprof250	-0,8578	0,2211	-3,879	0,000107	***
classprof275	-0,6603	0,2231	-2,96	0,0031	**
classprof300	-0,9656	0,2279	-4,237	2,32E-05	***
classprof325	-1,4208	0,2439	-5,826	6,23E-09	***
classprof350	-1,9176	0,2713	-7,068	1,92E-12	***
classprof375	-1,9087	0,3008	-6,345	2,53E-10	***
classprof400	-2,7145	0,3588	-7,566	4,98E-14	***
classprof425	-2,4244	0,3992	-6,073	1,40E-09	***
classprof450	-3,0772	0,3959	-7,773	1,02E-14	***

Codes de signif. : 0 « *** » 0,001 « ** » 0,01 « * » 0,05 « . » 0,1 « » 1

Signification approximative des termes lisses :

	DLE	DI de réf	F	p-valeur	
s(heure):classprof50	1,10E+00	8	0,179	0,158251	
s(heure):classprof75	2,43E+00	8	0,961	0,000357	***
s(heure):classprof100	2,41E+00	8	0,839	0,001118	**
s(heure):classprof125	3,05E-07	8	0	1	
s(heure):classprof150	4,13E-07	8	0	1	
s(heure):classprof175	1,65E+00	8	0,385	0,036659	*
s(heure):classprof200	2,43E+00	8	0,766	0,002264	**
s(heure):classprof225	2,25E+00	8	0,829	0,001013	**
s(heure):classprof250	1,36E+00	8	0,264	0,087432	.
s(heure):classprof275	1,32E+00	8	0,257	0,089813	.
s(heure):classprof300	5,12E-07	8	0	1	
s(heure):classprof325	6,42E-01	8	0,093	0,245219	
s(heure):classprof350	9,76E-06	8	0	0,576478	
s(heure):classprof375	7,26E-06	8	0	0,564095	
s(heure):classprof400	5,40E-07	8	0	0,82631	
s(heure):classprof425	3,65E-07	8	0	0,817549	
s(heure):classprof450	7,27E-06	8	0	0,748861	

Tableau A7 : Tableau des résultats de la modélisation additive généralisée de la probabilité d'occurrence du relevé dans le nGSL en fonction de l'heure du jour et de la classe de profondeur.

Famille : binomiale Fonction de lien : logit

Formule : prés ~ classprof + s(heure, bs = « cc », by = classprof)

Coefficients paramétriques :

	Estimé	Erreur Std.	Valeur de z	Pr(> z)	
(Ord. origine)	0,5444	0,3314	1,643	0,100481	
classprof75	0,3811	0,3744	1,018	0,308726	
classprof100	0,7594	0,4369	1,738	0,082166	.
classprof125	1,4629	0,4445	3,291	0,000997	***
classprof150	1,6804	0,4447	3,779	0,000158	***
classprof175	1,6131	0,4801	3,359	0,000781	***
classprof200	0,9429	0,4092	2,304	0,021208	*
classprof250	0,9193	0,395	2,328	0,019936	*
classprof300	0,4916	0,4124	1,192	0,233145	
classprof350	-0,1977	0,4497	-0,44	0,660234	
classprof400	-1,5364	0,511	-3,006	0,002643	**
classprof450	-2,7436	0,6542	-4,194	2,74E-05	***

Codes de signif. : 0 « *** » 0,001 « ** » 0,01 « * » 0,05 « . » 0,1 « » 1

Signification approximative des termes lisses :

	DLE	DI.réf	Chi.car	p-valeur	
s(heure):classprof50	3,32E-03	8	0,001	0,8197	
s(heure):classprof75	1,81E+00	8	5,057	0,0398	*
s(heure):classprof100	1,99E-05	8	0	0,8414	
s(heure):classprof125	1,92E+00	8	7,036	0,0128	*
s(heure):classprof150	7,13E-03	8	0,002	0,8231	
s(heure):classprof175	1,32E-01	8	0,125	0,3835	
s(heure):classprof200	1,45E+00	8	3,244	0,0865	.
s(heure):classprof250	5,17E-03	8	0,004	0,4781	
s(heure):classprof300	1,31E+00	8	2,359	0,1468	
s(heure):classprof350	9,60E-01	8	1,584	0,178	
s(heure):classprof400	6,07E-03	8	0,001	0,9476	
s(heure):classprof450	3,54E-04	8	0	0,8091	

ANNEXE 3

Comparaison des ensembles de données originaux et restreints pour les analyses de la capturabilité du capelan.

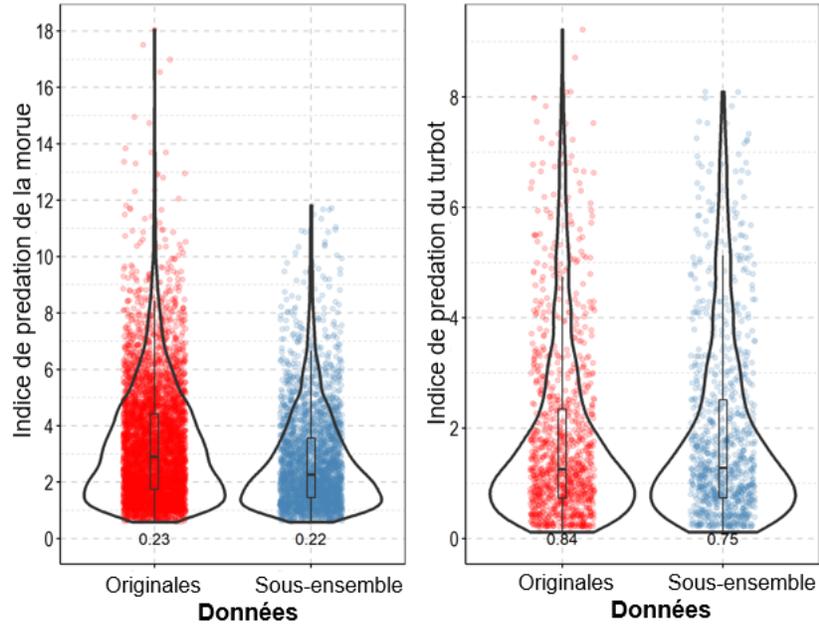


Figure A22 : Diagrammes de quartiles et graphiques en violon des indices de la prédation sur le capelan dans le sGSL comparant les ensembles de données originaux et restreints pour satisfaire aux prémisses du modèle. Les indices de prédation d'une valeur de zéro ont été retirés pour avoir une meilleure idée des distributions. La proportion de zéros est indiquée sous chaque indice de la prédation.

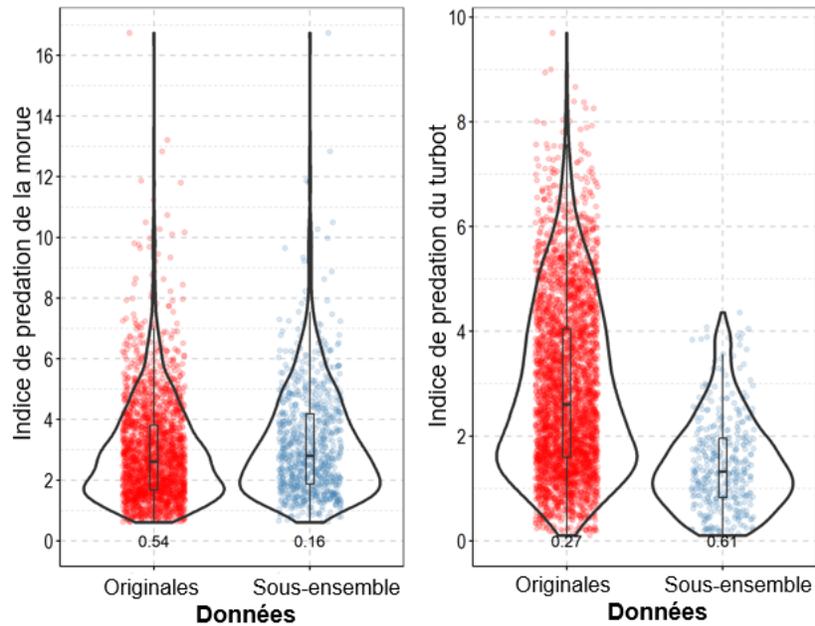


Figure A23 : Diagrammes de quartiles et graphiques en violon des indices de la prédation sur le capelan dans le nGSL comparant les ensembles de données originaux et restreints pour satisfaire aux prémisses du modèle. Les indices de prédation d'une valeur de zéro ont été retirés pour avoir une meilleure idée des distributions. La proportion de zéros est indiquée sous chaque indice de la prédation.