



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 2021/068

Région du Québec

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

Caroline Lehoux, Stéphane Plourde, Jean-Martin Chamberland et Hugues Benoît

Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
850, route de la Mer
Mont-Joli, Québec Canada 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 978-0-660-41159-0 N° cat. Fs70-5/2021-068F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Lehoux, C., Plourde, S., Chamberland, J.-M., et Benoît, H. 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. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2021/068. iv + 58 p.

Also available in English :

Lehoux, C., Plourde, S., Chamberland, J.-M., and Benoît, H. 2022. Linking interannual variations of capelin abundance indices in the Gulf of St. Lawrence to environmental proxies of bottom-up regulation of cohort strength. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2021/068. iv + 51 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iv
1. INTRODUCTION.....	1
2. MÉTHODES	2
2.1. INDICES DU STOCK DE CAPELAN ET INDICES ENVIRONNEMENTAUX.....	2
2.1.1. Indices de l'abondance.....	2
2.1.2. Indice de l'abondance des larves	3
2.1.3. Indices de condition.....	4
2.1.4. Indices environnementaux.....	4
2.2. MODÈLES	5
2.2.1. Approche de modélisation, sélection et validation des modèles	5
2.2.2. K_n	5
2.2.3. Abondance	6
3. RÉSULTATS	7
3.1. INDICES DU STOCK DE CAPELAN ET INDICES ENVIRONNEMENTAUX.....	7
3.1.1. Indice de l'abondance des larves	7
3.1.2. Indices environnementaux.....	8
3.2. MODÈLES	8
3.2.1. K_n	8
3.2.2. Abondance	9
4. DISCUSSION ET CONCLUSION	10
4.1. SOURCES D'INCERTITUDE	12
5. REMERCIEMENTS.....	13
6. RÉFÉRENCES CITÉES.....	13
TABLEAUX.....	17
FIGURES	22
ANNEXE 1.....	39
ANNEXE 2.....	43
ANNEXE 3.....	45
ANNEXE 4.....	48

RÉSUMÉ

Dans cette étude, nous avons appliqué un modèle conceptuel reliant la force des cohortes du capelan aux processus ascendants à l'aide d'indices de l'abondance du capelan nouvellement mis au point et de descripteurs des conditions océanographiques physiques et biologiques dans le golfe du Saint-Laurent (GSL). L'objectif principal des analyses était de fournir des preuves que les indices de l'abondance estimés à partir des relevés au chalut de fond dans le GSL suivent une partie de la variation attendue résultant des conditions environnementales connues pour contrôler les variations de la force des cohortes du capelan sur l'est du plateau de Terre-Neuve. De plus, nous avons cherché à améliorer notre compréhension des facteurs environnementaux de la dynamique et de la productivité du capelan dans le GSL au cours des trois dernières décennies. Notre approche comprenait : (1) l'élaboration d'un indice de l'abondance des larves du capelan considéré comme une variable explicative potentielle dans les (2) analyses conceptuelles visant à documenter les liens entre les conditions océanographiques physiques, la prolifération printanière et la dynamique des *Calanus* et la condition corporelle du capelan dans le GSL, et (3) des modèles non linéaires multivariés reliant les indices de l'abondance du capelan dans différentes sous-régions du GSL avec les indices environnementaux ou l'état du capelan utilisés comme indicateurs du potentiel de survie du capelan. Nos résultats ont montré que la phénologie saisonnière et l'abondance en juin de *Calanus hyperboreus* étaient associées à la dynamique de la glace et de la prolifération printanière, tandis que la phénologie et l'abondance de *C. finmarchicus* étaient principalement associées aux indices de la température de la surface de la mer (TSM) au printemps et au début de l'été. Une condition corporelle élevée du capelan (Kn) en juin était liée au retrait précoce des glaces ou à l'abondance élevée et le développement hâtif de *C. hyperboreus* qui y sont liés, tandis qu'un Kn élevé en août-septembre a été observé les années où le développement de la population de *C. finmarchicus* était tardif ou les années de forte abondance de *C. finmarchicus* et de TSM élevée pendant l'été. Les variations des indices de l'abondance du capelan étaient généralement associées à des variations du Kn en juin ou en août-septembre ou à leurs indicateurs environnementaux pendant la première ou la deuxième année de vie du capelan, mais pas aux indices de l'abondance des larves de capelan. La période du retrait des glaces a été choisie dans cinq modèles sur six, et les indicateurs de Kn en août-septembre dans trois des quatre modèles. Nos résultats ont donc permis de déterminer que la dynamique de la glace de mer (fin de l'hiver et début du printemps) ou la TSM (fin du printemps et été) sont des facteurs clés potentiels de la dynamique des espèces de *Calanus* et de la condition du capelan, confirmant l'hypothèse ascendante implicitement considérée dans le modèle prédictif de la biomasse du capelan sur l'est du plateau de Terre-Neuve. Nos résultats ont également confirmé que les indices de l'abondance du capelan dérivés des relevés au chalut de fond dans le GSL suivent généralement la variation de l'abondance attendue résultant des processus ascendants connus régulant la force des cohortes du capelan.

1. INTRODUCTION

L'évaluation du stock de capelan dans le golfe du Saint-Laurent (divisions 4RST de l'OPANO) est considérée comme pauvre en données (MPO 2018). Les évaluations antérieures à 2021 étaient fondées sur les données limitées de la pêche commerciale et les données biologiques (sexe, longueur), et aucun indice de l'abondance accepté n'était disponible pour ce stock (Chamberland *et al.* 2022a).

Pour l'évaluation de 2021, Chamberland *et al.* (2022b) ont conçu un ensemble d'analyses visant à déterminer l'influence des préférences du capelan en matière d'habitat physique et du risque de prédation par les poissons démersaux sur les prises de capelan dans les relevés au chalut de fond dans le sud et le nord du golfe du Saint-Laurent (sGSL et nGSL ici après). Les résultats ont montré que : (1) le capelan était principalement capturé dans des zones où la température au fond correspond à la température de prédilection du capelan (<3 °C, soit des fonds à une profondeur de 50 à 175 m); (2) le niveau de prise dans cet habitat thermique de prédilection du capelan variait conformément à la prédiction que le capelan serait plus disponible pour le chalut de fond pendant la journée lorsqu'il est plus proche du fond; et (3) les indices du risque de prédation par les poissons démersaux expliquaient moins de 1,5 % des variations dans les prises. De plus, la distribution de la fréquence des tailles du capelan donne à penser que les poissons de 2 à 3 ans et de 1 à 2 ans dominent les prises de capelan dans les relevés de fond menés dans le nord du golfe du Saint-Laurent et le sud du golfe du Saint-Laurent, respectivement. Les indices de l'abondance ont été calculés en tenant compte des préférences en matière d'habitat thermique (profondeur) du capelan. Ces indices ont affiché des variations considérables à moyen terme (mais seulement des variations interannuelles modérées) entre 1990 et 2020, avec une certaine cohérence entre le sGSL et le nGSL (Chamberland *et al.* 2022b).

Lewis *et al.* (2019) ont exploré diverses hypothèses pour expliquer les variations interannuelles de l'abondance du capelan de 2 ans estimée lors du relevé acoustique printanier dans les divisions 3KL. Ils ont constaté que l'abondance des poissons de 2 ans au printemps (t_0) était mieux prédite par l'abondance des larves émergentes deux ans auparavant (t_0-2), la condition corporelle du capelan de 1 an au cours de l'automne précédent (t_0-1) et le début du retrait des glaces (t_0) (Lewis *et al.* 2019). Les deux derniers prédicteurs ont été interprétés comme des indicateurs du potentiel de survie du capelan durant son deuxième hiver et au printemps suivant. Lewis *et al.* (2019) ont implicitement émis l'hypothèse que le début du retrait des glaces contrôlerait celle de la prolifération printanière de phytoplancton, ainsi que l'abondance et la phénologie des *Calanus*, et donc la disponibilité et la survie des proies du capelan au printemps (Dalpadado et Mowbray 2013; Buren *et al.* 2002, Mowbray 2002, Mullaney *et al.* 2016).

Les indices de l'abondance des poissons pélagiques dérivés des relevés au chalut de fond sont considérés comme très incertains, car on estime que cet engin est un mauvais échantillonneur de poissons pélagiques pour diverses raisons (O'Driscoll *et al.* 2002, Mowbray 2002, McQuinn 2009). Cependant, le lien étroit entre la force des cohortes du capelan (abondance) et les processus ascendants décrits dans les divisions 3KL offre un cadre pour effectuer une validation de premier ordre des indices de l'abondance dérivés des relevés au chalut de fond du MPO dans le GSL. Dans cette étude, nous avons mis au point un modèle conceptuel de la survie (force des cohortes) pour le capelan dans les divisions 4RST à l'aide d'indices de l'abondance du capelan dans le golfe du Saint-Laurent nouvellement mis au point d'après Chamberland *et al.* (2022b) afin de : (1) fournir des preuves que les indices de l'abondance estimés à partir de relevés au chalut de fond dans le golfe du Saint-Laurent permettent de refléter significativement une partie de la variation de l'abondance attendue résultant des différentes conditions environnementales connues pour contrôler la force des cohortes du

capelan dans les divisions 3KL; et (2) améliorer notre compréhension des facteurs environnementaux de la dynamique et de la productivité du capelan dans le GSL au cours des trois dernières décennies. Le modèle de survie du capelan s'inspire largement de celui mis au point pour le capelan dans les divisions 3KL (Lewis *et al.* 2019), mais il est adapté aux données et aux caractéristiques de l'écosystème propres au GSL. Nous avons d'abord décrit les processus ascendants dans le réseau trophique inférieur dont nous avons émis l'hypothèse qu'ils contrôlent la survie du capelan en reliant l'état de la glace de mer, la dynamique du plancton et l'état corporel du capelan dans les différentes régions du GSL. Nous avons ensuite adapté le modèle conceptuel de la survie du capelan et de la force des cohortes dans les divisions 3KL et vérifié si les variations interannuelles de l'abondance du capelan observées entre 1990 et 2020 dans le GSL étaient associées à des processus ascendants connus pour réguler la survie du capelan et la force des cohortes. Nos analyses représentent une application d'une approche écosystémique de la gestion des pêches avec pour objectif premier d'améliorer les connaissances actuelles couramment disponibles pour l'évaluation des stocks de capelan dans les divisions 4RST à l'appui de l'avis scientifique.

2. MÉTHODES

2.1. INDICES DU STOCK DE CAPELAN ET INDICES ENVIRONNEMENTAUX

2.1.1. Indices de l'abondance

Les indices de l'abondance utilisés dans ces analyses ont été calculés à partir des relevés multidisciplinaires au chalut de fond réalisés dans le nGSL (août) et le sGSL (septembre) de 1990 à 2020 (Figure 1). Ces relevés ciblent principalement les poissons démersaux, mais une analyse détaillée a montré que le capelan capturé au chalut de fond était principalement associé à des températures au fond comprises entre -1°C et $3,3^{\circ}\text{C}$, typiques de la couche intermédiaire froide (CIF, Galbraith *et al.* 2020) et à des prises suivant les tendances correspondant aux migrations verticales nyctémérales du capelan (prises plus importantes pendant la journée lorsque le capelan est près du fond) (Benoît et Swain 2003; Chamberland *et al.* 2022b). Par conséquent, les indices de l'abondance du capelan utilisés dans nos analyses ont été calculés pour le nord-ouest et le nord-est du golfe du Saint-Laurent (respectivement noGSL et neGSL ci-après; Figure 2) à partir des prises dans les traits dont la température au fond était inférieure à $3,3^{\circ}\text{C}$, et normalisés comme s'ils avaient été capturés pendant la journée. Plus précisément, nous avons modélisé l'abondance du capelan par trait avec un modèle linéaire généralisé (GLM) suivant une distribution binomiale négative en utilisant l'interaction année (comme facteur) * régions du nGSL, jour/nuit codé comme variable binaire, ainsi qu'une correction de prévision tenant compte du log de la superficie couverte par les traits. Nous avons ensuite prédit des indices de l'abondance (nombre moyen par trait) pour le noGSL et le neGSL, pour chaque année, pour un trait standard (15 minutes à 3 nœuds avec une largeur d'ouverture du chalut de 16,94 m) effectué pendant le jour. Les indices de l'abondance du capelan dans le sGSL utilisés dans la présente étude étaient ceux calculés avec le modèle binomial négatif avec un effet de strate annuel suivant un processus autorégressif de premier ordre [modèle NB AR(1)] dans Chamberland *et al.* (2022b). L'utilisation d'indices régionaux de l'abondance (noGSL, neGSL et sGSL) a été motivée par les différences régionales dans les conditions environnementales (Blais *et al.* 2019) et a permis des relations entre le capelan et l'environnement à plus fines échelles. Ainsi, les indices de l'abondance pour le noGSL et le neGSL utilisés dans ce manuscrit diffèrent de ceux de Chamberland *et al.* (2022b) parce qu'ils n'ont pas tenu compte des différences régionales de l'abondance dans le temps pour la préparation du présent document. Néanmoins, les indices de l'abondance utilisés dans ce manuscrit révèlent la même tendance générale de variabilité puisqu'ils sont corrélés à l'indice

de l'abondance élaboré pour l'ensemble du nGSL dans Chamberland *et al.* (2022b) (neGSL : $r = 0,52$, $p = 0,03$; noGSL : $r = 0,46$, $p = 0,01$; nGSL : $r = 0,58$, $p = 0,0007$).

2.1.2. Indice de l'abondance des larves

Dans leur modèle de force des cohortes de capelan dans les divisions 3KL, Lewis *et al.* (2019) ont utilisé un indice saisonnier intégré de l'abondance des larves émergentes de capelan dans une baie de référence considérée comme représentative de la fraie du capelan dans la région (Murphy *et al.* 2018). Afin d'appliquer ce modèle au capelan dans le GSL, nous avons élaboré un indice de l'abondance des larves à l'aide des données recueillies lors d'un relevé synoptique sur les œufs et les larves effectué en juin dans le sGSL depuis 1983 (aucun relevé en 1995 ou en 1997). Les larves de capelan sont capturées chaque année pendant ce relevé, qui est généralement entrepris pendant ou légèrement après le pic de fraie du capelan sur les plages de la région, c'est-à-dire que ce relevé pourrait fournir des indices de l'abondance pour les jeunes larves produites localement (Grégoire *et al.* 2014, Chamberland *et al.* 2022a). En bref, un quadrillage de 65 stations a été échantillonné à l'aide de filets Bongo d'un maillage de 333 μm (61 cm) selon des traits doubles obliques dans les 50 m supérieurs de la colonne d'eau pendant au moins 10 minutes à une vitesse du navire d'environ 2,5 nœuds. Afin de (1) valider que le relevé a échantillonné principalement des larves petites et jeunes près de leur moment d'émergence et (2) tenir compte des effets potentiels des variations dans la période du relevé et de l'émergence des larves de capelan, nous avons mesuré les longueurs de 10 larves de capelan provenant d'un sous-ensemble de stations où les larves étaient présentes. Ces mesures nous ont permis de calculer la longueur moyenne des larves de la station, à partir de laquelle nous avons estimé le nombre de jours depuis l'émergence à l'aide de courbes de croissance estimant que les larves de capelan grandissaient d'entre 0,2 et 0,35 mm par jour (Jacquaz *et al.* 1977), ainsi que le nombre de jours depuis l'émergence en supposant que les larves de capelan ont éclos à 5 mm. La date d'éclosion a été définie comme la différence de jours entre la date d'échantillonnage et le nombre de jours depuis l'éclosion. Pour les stations où aucune larve n'a été mesurée, des dates d'émergence ont été attribuées à chaque station selon une approche hiérarchique en utilisant : (1) la date d'éclosion moyenne pondérée par la distance des trois stations les plus proches dans un rayon de 100 km, (2) la date d'éclosion annuelle moyenne pour les stations situées à plus de 100 km des stations pour lesquelles des mesures de longueur sont disponibles ou (3) la date d'éclosion moyenne de 1983 à 2019 les années où aucune mesure de longueur n'était disponible (1991, 1992, 1994, 1999 et 2012) (Annexe 1, Figure A.1.1).

L'abondance des larves ($N\text{ m}^{-2}$) a été normalisée à l'aide d'un modèle additif généralisé (MAG) avec une distribution binomiale négative et un lien logarithmique. L'objectif de cette normalisation était d'obtenir des indices de l'abondance comme si le relevé avait été constamment entrepris pendant le pic d'émergence larvaire. Nous avons utilisé un lissage de produit tensoriel pour modéliser la répartition spatiale des larves de capelan pour chaque année et l'interaction du produit tensoriel et l'effet principal de la date d'échantillonnage et de la date d'émergence des larves (jour de l'année) à chaque station (Wood 2006). Nous avons également testé l'effet du nombre de jours depuis l'émergence pour remplacer la date d'éclosion et d'autres modèles moins complexes avec différentes combinaisons de ces variables. Les formules de chaque modèle testé sont présentées dans le tableau 1. Nous avons choisi le modèle avec le critère d'information d'Akaike le plus bas et simulé les valeurs ajustées pour vérifier la dispersion et la proportion de valeurs nulles dans 1 000 ensembles de données simulés (Zuur et Ieno 2016). Nous avons vérifié visuellement l'homogénéité des résidus. Nous avons examiné la corrélation temporelle et spatiale des résidus avec la fonction acf et un variogramme, respectivement, pour respecter l'hypothèse de l'indépendance des résidus. À l'aide du modèle sélectionné, nous avons prédit l'abondance à chaque station du quadrillage

pour chaque année en utilisant le jour moyen d'échantillonnage de 1983 à 2019 (jour de l'année = 170) et la date d'émergence moyenne (jour de l'année = 160). Nous avons utilisé l'abondance moyenne normalisée ($N\ m^{-2}$) pour chaque année comme indice larvaire. Nous n'avons pas normalisé les stations où les larves étaient absentes avant de calculer la moyenne annuelle.

2.1.3. Indices de condition

Les indices de condition (Kn, Le Cren 1951) ont été calculés à partir d'échantillons biologiques prélevés pendant la pêche commerciale et des relevés au chalut de fond réalisés dans le nGSL (août) et le sGSL (septembre). Pour les échantillons de la pêche commerciale, nous avons ajusté des GLM avec une distribution gaussienne et un lien logarithmique en utilisant le Kn comme variable de réponse et l'année, le mois et l'engin de pêche comme facteurs (Chamberland *et al.* 2022a). Le Kn de la pêche commerciale a été normalisé en prédisant la moyenne annuelle pour chaque sexe et chaque région en fixant les facteurs « mois » et « engin de pêche » à la majeure partie des échantillons, c'est-à-dire juin et sennes respectivement, et est appelé « Kn en juin » ci-après. Nous avons utilisé des indices Kn dans nos modèles comme indicateurs du succès de l'alimentation du capelan et du potentiel de survie au printemps. Pour les relevés au chalut de fond (Kn en août ou Kn en septembre), nous avons utilisé des poissons de moins de 120 mm selon notre objectif d'évaluer le rôle du potentiel de survie pendant l'hiver suivant chez les capelans d'âges 1 et 2 (voir les modèles conceptuels de survie du capelan M1 et M2 ci-après). Selon les mesures de Hurtubise (1994), ces capelans plus petits auraient entre 1 et 2 ans et le dimorphisme sexuel à cette taille serait minime. Des relations distinctes taille-poids propres au sexe n'étaient donc pas nécessaires (Figure 3). La variation interannuelle des indices Kn est présentée à l'annexe 2 (Figure A.2.1).

2.1.4. Indices environnementaux

Les indices environnementaux ont été extraits de la matrice de l'écosystème du GSL (Duplisea *et al.* 2020). Cette matrice contient divers indices physiques, biochimiques et biologiques produits par le Programme de monitoring de la zone Atlantique (PMZA) et utilisés pour décrire l'état de l'océan sur une base annuelle (Galbraith *et al.* 2020; Blais *et al.* 2019). Ces indices environnementaux ont été choisis en fonction de leur disponibilité, de leurs effets présumés sur la dynamique du zooplancton, la condition corporelle et la survie du capelan (Buren *et al.* 2014; Mullaney *et al.* 2016; Murphy *et al.* 2018; Lewis *et al.* 2019), ainsi que des caractéristiques locales (c.-à-d. les différences dans les communautés de zooplancton entre le plateau de Terre-Neuve et le GSL) (Tableau 2). Les indices physiques étaient disponibles pour une période plus longue (1982 à 2019; Galbraith *et al.* 2020) que les indices du zooplancton en général (2001 à 2019; Blais *et al.* 2019). Les indices physiques sélectionnés étaient la température de la surface de la mer (TSM) en juin et de mai à août, le début du printemps (semaine de l'année où la TSM atteint 10 °C) et le retrait des glaces (dernier jour de glace). Nous avons inclus la période du début de la prolifération printanière de phytoplancton dans différentes régions du GSL afin de décrire le lien implicite supposé par Lewis *et al.* (2019) entre le retrait des glaces, le début de la prolifération printanière de phytoplancton et la dynamique du zooplancton (1998 à 2019; Blais *et al.* 2019). Les indices du zooplancton comprenaient l'abondance des principaux copépodes qui sont les proies des larves de capelan (*Pseudocalanus*; Murphy *et al.* 2018) et des capelans de 1 à 2 ans (*C. finmarchicus*, *C. hyperboreus*; Vesin *et al.* 1981; Ménard 1998; Astthorsson et Gislason 1997; Orlova *et al.* 2009; Dalpadado et Mowbray 2013) pendant différentes saisons (juin, juillet à décembre), ainsi que les indices du développement de la population des espèces de *Calanus* utilisés comme indicateur de leur phénologie au printemps (Tableau 2). Nous avons calculé les indices environnementaux pour cinq régions différentes du GSL (Figure 2) et les avons combinés comme suit pour les faire correspondre aux données des relevés sur la condition corporelle et l'abondance du capelan : région 1 (nord-ouest du golfe du Saint-

Laurent : noGSL), 2, 3 et 4 (nord-est du golfe du Saint-Laurent : neGSL) et 5 (sud du golfe du Saint-Laurent : sGSL). Nous avons pondéré les moyennes annuelles par la superficie de chaque région de l'approche écosystémique afin de calculer une seule estimation annuelle (Duplisea *et al.* 2020). Les séries chronologiques des indices environnementaux sont présentées à l'annexe 2 (Figure A.2.2).

2.2. MODÈLES

2.2.1. Approche de modélisation, sélection et validation des modèles

Nous avons choisi des modèles additifs généralisés (GAM) plutôt que des modèles linéaires généralisés (GLM) parce que l'analyse préliminaire a montré un potentiel de réponses non linéaires des variables indépendantes à certains prédicteurs. Les GAM suivaient une distribution gaussienne et une fonction de lien logarithmique. Nous avons vérifié les corrélations et les relations entre les prédicteurs et les prédicteurs corrélés ($> 0,6$) n'ont pas été inclus simultanément dans les modèles. Nous avons vérifié les valeurs aberrantes à l'aide d'un diagramme de points et avons supprimé les valeurs de $Kn > 1,3$ et $< 0,75$ qui étaient également associées à une petite taille de l'échantillon. Tous les modèles intégraient un maximum de trois variables prédictives et ont été testés afin de réduire le potentiel de surajustement; nous les avons évalués en fonction de leur critère d'information d'Akaike corrigé en fonction de la petite taille de l'échantillon (AICc, Burnham et Anderson 2002; Hurvich et Tsai 1989). La dimension de base (k) a été fixée à un maximum de 3 pour éviter les relations multimodales irréalistes et le surajustement. Nous avons calculé le R^2 entre les prédictions et les observations et la déviance expliquée, et évalué la robustesse du modèle à l'aide d'un échantillonnage avec remise (auto-amorçage) et d'une validation croisée excluant un élément (jackknife) (Guisan et Zimmermann 2000). L'auto-amorçage consistait à rééchantillonner les prédicteurs et à réajuster le modèle 1 000 fois. Nous avons calculé la déviance expliquée pour chaque itération et comparé la déviance expliquée par le modèle à cette distribution. La déviance expliquée par le modèle sélectionné doit être supérieure au 95^e centile des ensembles de données simulés pour que le modèle soit conservé. Chaque modèle a également été testé à l'aide de la méthode jackknife. Pour chaque modèle, nous avons supprimé une année à la fois, ajusté le modèle et prédit la valeur. Nous avons ensuite comparé les valeurs prédites aux valeurs observées et calculé le coefficient de corrélation de Pearson (r) entre les observations et les prédictions. Le modèle final sélectionné avait l'AICc le plus bas ($\Delta < 2$), était significatif ($< 0,05$) dans l'auto-amorçage et résistait aux années manquantes ($\Delta r \text{ jackknife} < 0,1$). Lorsque deux modèles avaient des rendements similaires sur tous les indicateurs, le modèle le plus parcimonieux a été sélectionné. Nous avons vérifié l'autocorrélation temporelle des résidus du modèle à l'aide de la fonction acf dans R. Toutes les analyses ont été effectuées dans R v.4.0.2 (R Core Team 2020) et les GAM ont été ajustés à l'aide du progiciel mgcv (Wood 2017). Les conditions d'application (homogénéité, normalité et valeurs observées par rapport aux valeurs ajustées) ont été vérifiées visuellement.

2.2.2. Kn

Nous avons ajusté des GAM pour le Kn du capelan afin de (1) décrire les liens entre la condition corporelle du capelan et les processus ascendants (dynamique de la glace de mer et du plancton) et (2) déterminer les principaux indicateurs environnementaux de Kn qui peuvent être utilisés dans les modèles d'abondance du capelan. L'effet attendu (hypothèse) de ces prédicteurs sur le Kn du capelan est décrit dans le tableau 2. Le Kn en juin était lié aux conditions environnementales au printemps, tandis que le Kn en août (nGSL) ou en septembre (sGSL) était lié aux indices environnementaux du printemps à la fin de l'été. Nous avons adopté une approche par étapes pour examiner les prédicteurs environnementaux de différentes

catégories : (1) les indices physiques représentant la plus longue série chronologique (1983-2019) et (2) les indices physiques et du zooplancton correspondant aux séries chronologiques plus courtes (2001-2018). L'abondance de *C. finmarchicus* et de *C. hyperboreus* (juin, juillet à septembre) et les indices du développement (niveau d'avancement) en juin ont été pris en compte, car ces espèces constituent généralement une grande proportion du régime alimentaire du capelan de 1 an et de 2 ans (Vesin *et al.* 1981; Dalpadado et Mowbray 2013).

2.2.3. Abondance

D'après les données sur la longueur selon l'âge provenant d'échantillons des pêches commerciales dans le GSL de 1984 à 1993 (Hurtubise 1994), les capelans capturés dans le relevé au chalut de fond dans le sGSL seraient principalement composés d'individus âgés de 1 et 2 ans, ceux pêchés dans le relevé au chalut de fond dans le nGSL seraient principalement des individus âgés de 2 et 3 ans, tandis que la pêche commerciale dans le sGSL et le nGSL capturerait principalement des capelans de 3 ans et plus (Figure 3) (Chamberland *et al.* 2022b).

Dans notre étude, nous avons tenu compte de l'incertitude associée à la structure d'âge du capelan dans les indices de l'abondance annuels en élaborant différentes structures de modèles d'abondance. Selon Lewis *et al.* (2019), le premier modèle conceptuel (voir ci-après et la Figure 4 pour les prédictors) a émis l'hypothèse que l'abondance du capelan dominée par les individus âgés de 2 ans (modèle M2) varierait en fonction des processus additifs suivants :

(M2) Abondance du capelan (t_0) = production/survie des larves $(t-2)$ + survie hivernale du capelan (1 an) $(t-1)$ + survie après l'hiver du capelan (2 ans) (t_0)

Dans le deuxième modèle, l'abondance du capelan dominée par les individus de 3 ans (modèle M3) varierait en fonction de ce qui suit :

(M3) Abondance du capelan (t_0) = production/survie des larves $(t-3)$ + survie hivernale du capelan (1 an) $(t-2)$ + survie après l'hiver du capelan (2 ans) $(t-1)$

Enfin, le troisième modèle émettait l'hypothèse que l'abondance du capelan dominée par les individus âgés de 1 an (modèle M1) varierait en fonction de ce qui suit :

(M1) Abondance du capelan (t_0) = production/survie des larves $(t-1)$ + survie après l'hiver du capelan (1 an) (t_0)

Le modèle M2 (prises dominées par les capelans de 2 ans) a été appliqué aux indices de l'abondance dans le neGSL, noGSL et le sGSL. Le modèle M3 (prises dominées par les capelans de 3 ans) a été appliqué aux indices du neGSL et du noGSL. Le modèle M1 (prises dominées par les capelans de 1 an) n'a été appliqué qu'au sGSL.

Les prédictors associés à chaque terme du modèle sont présentés sur la figure 4 et leur effet attendu (hypothèse) sur le Kn et la survie du capelan sont détaillés dans le tableau 2. Selon les modèles, une survie élevée (faible) au cours de deux ou trois événements clés successifs se produisant dans la première ou la deuxième année de vie de chaque cohorte entraînerait des indices de l'abondance élevés (faibles), tandis que des variations de la survie entre ces événements produiraient une abondance modérée. Nous avons utilisé l'abondance des espèces de *Pseudocalanus* de juillet à octobre à la station de la vallée de Shediac (sGSL) et à la station de Rimouski (noGSL) comme indicateur de la survie des larves (Murphy *et al.* 2018). Nous avons utilisé le Kn à l'automne et au printemps, respectivement, comme indicateur du potentiel de survie du capelan en hiver (principalement le capelan immature sur le plan de la reproduction < 120 mm) ou au printemps (principalement le capelan mature sur le plan de la reproduction) (Buren *et al.* 2014; Lewis *et al.* 2019).

Étant donné que les séries chronologiques de Kn sont discontinues (aucun échantillon ou n trop petit; voir Chamberland *et al.* 2022a), leur utilisation comme prédicteurs de la survie a donné des séries chronologiques variables et plus courtes que celles des indices environnementaux physiques. Nous avons donc également tenu compte des prédicteurs environnementaux de Kn (voir la Figure 4 et la section 3.2.1), les séries chronologiques des indices physiques étant plus longues que les séries chronologiques sur le zooplancton (Tableau 2). La longueur différente des séries chronologiques a mené à une approche hiérarchique d'essai de modèles, où les prédicteurs étaient retirés du modèle si leur effet n'appuyait pas l'hypothèse correspondante (Tableau 2) ou n'améliorait pas les résultats de la méthode jackknife par rapport à la série chronologique plus longue. Nous avons retenu de préférence les séries chronologiques plus longues si la différence entre le R² ou la corrélation lors du jackknife entre la série chronologique plus longue et la plus petite était inférieure à 0,1. Nous avons ajusté et validé les GAM à l'aide d'une approche similaire à celle appliquée aux modèles ajustés pour le Kn, sauf que les formules étaient fondées sur des hypothèses au lieu de permettre des combinaisons de variables. L'abondance du capelan a subi la transformation logarithmique avant l'ajustement du modèle. Les hypothèses ne comportaient jamais plus de quatre variables simultanément pour éviter un surajustement en raison de la courte série chronologique.

3. RÉSULTATS

3.1. INDICES DU STOCK DE CAPELAN ET INDICES ENVIRONNEMENTAUX

3.1.1. Indice de l'abondance des larves

La longueur des larves variait entre 2 mm et 19,7 mm, avec un mode dominant de larves de moins de 10 mm la plupart des années (Figure 5A). Le jour moyen de l'année du relevé sur les œufs de maquereau dans le sGSL était 171 (écart-type = 5,6), tandis que le jour d'éclosion moyen estimé était 160 (écart-type = 8,2) (Figure 5B). Le GAM ayant l'AIC le plus bas comprenait l'effet spatial et les principaux effets (ainsi que leur interaction) de la date d'échantillonnage et de la date d'éclosion estimée (Tableau 1). L'effet spatial expliquait une plus grande déviance que le jour de l'échantillonnage et de l'éclosion, mais tous les effets étaient significatifs (les intervalles de confiance des effets partiels excluaient la ligne pointillée sur 0; Figure A.1.2). Le modèle sélectionné expliquait 1,3 % plus de déviance que l'effet spatial seul. Nous avons vérifié les prémisses du modèle sélectionné : le modèle ne présentait aucun signe de surdispersion, prédisait un nombre d'absences similaire aux données et les résidus n'affichaient aucun signe d'autocorrélation ou d'hétérogénéité temporelle ou spatiale. L'effet spatial a montré que la répartition des larves variait d'une année à l'autre, bien que des abondances plus élevées de larves aient généralement été observées près de la baie des Chaleurs (Annexe 1, Figure A.1.2). L'abondance des larves était positivement et négativement liée au jour de l'échantillonnage et au jour de l'éclosion, respectivement. Cependant, leur terme d'interaction a indiqué que les abondances plus élevées des larves se produisaient lorsque ces deux dates différaient de 10 à 20 jours, ce qui donne à penser que des abondances plus faibles que prévu étaient associées soit à un jour d'échantillonnage trop proche du jour de l'éclosion (probablement parce qu'une grande fraction des œufs n'avaient pas encore éclos) ou trop tard après l'éclosion (probablement en raison de la mortalité cumulative pendant le développement des larves) (Annexe 1, Figure A.1.3). L'abondance des larves était généralement réduite par l'ajustement du modèle entre 1983 et 2006, mais elle a ajusté à la hausse depuis que le relevé a été avancé en 2009 (Annexe 1, Figure A.1.4). Certains indices de l'abondance normalisés très élevés ont été estimés au début (1986, 1990) et à la fin (2017 à 2019) de la série chronologique; ils ont été superposés à une tendance caractérisée par une diminution générale entre le début des années 1980 et le milieu des années 1990, suivie d'une période de valeurs

généralement plus élevées centrées à la fin des années 2000 (Figure 6). La période du relevé n'expliquait que partiellement les fortes abondances des larves observées en 2018 et 2019. Les valeurs normalisées de 2018-2019 restent 3 à 10 fois plus grandes que toutes les valeurs de la série chronologique.

3.1.2. Indices environnementaux

Les coefficients de corrélation de Pearson (r) entre les indices environnementaux sont décrits dans cette section. Le début de la prolifération phytoplanctonique printanière a été positivement corrélé avec le retrait des glaces dans toutes les régions, bien que la corrélation n'ait pas été statistiquement significative dans le neGSL ($r = 0,48$, valeur de $p = 0,2$) (Figures 7,8 et 9). Ce résultat appuie généralement l'hypothèse selon laquelle le retrait de la glace de mer contrôle celle le début de la prolifération de phytoplancton dans le GSL. Le début du printemps (première semaine où la TSM = 10 °C) était négativement corrélé avec la TSM de mai à août, ce qui indique qu'une hausse plus précoce (plus tardive) de la TSM a entraîné une TSM moyenne plus élevée (plus faible) pendant le printemps et l'été (Figures 7,8 et 9). Dans toutes les régions, le début du printemps n'a pas été corrélé avec le retrait de la glace de mer, ce qui montre que ces deux processus sont contrôlés par un forçage environnemental différent (Figures 7, 8 et 9; Galbraith *et al.* 2020).

Dans le neGSL (Figure 7), l'indice de développement de *C. hyperboreus* en juin a été corrélé négativement avec le retrait des glaces ($-0,68$, $p = 0,0006$), c'est-à-dire que le développement de la nouvelle génération de *C. hyperboreus* était plus avancé lorsque le retrait des glaces (et le début de la prolifération du phytoplancton) était plus précoce. L'abondance de *C. hyperboreus* en juin a été corrélée négativement avec son indice de développement ($-0,45$, $p = 0,06$). L'indice de développement de *C. finmarchicus* a été corrélé avec le début du printemps ($0,60$, $p = 0,02$), mais pas avec le retrait des glaces. Plus les eaux de surface atteignaient tard une température de 10 °C, plus le développement de la population était tardif, l'abondance de *C. finmarchicus* était positivement corrélée à son indice de développement ($0,63$, $p = 0,006$).

Dans le noGSL (Figure 8), l'abondance et l'indice du développement de *C. finmarchicus* en juin étaient corrélés ($0,58$, $p = 0,01$). L'abondance de *C. hyperboreus* en juin et de juillet à septembre était également positivement corrélée ($0,89$, $p < 0,0001$).

Dans le sGSL (Figure 9), l'indice du développement de *C. hyperboreus* en juin était corrélé négativement au retrait des glaces ($-0,47$, $p = 0,07$). L'abondance de *C. hyperboreus* était corrélée à l'indice de son développement ($0,51$, $p = 0,02$), ce qui indique qu'une abondance plus élevée était associée à un développement plus précoce. L'indice du développement de *C. finmarchicus* était positivement corrélé au début du printemps ($0,52$, $p = 0,047$).

En résumé, le début de la prolifération printanière dans le GSL était généralement associé au retrait des glaces. Nos résultats ont également montré que l'indice de développement et l'abondance de *C. hyperboreus* en juin étaient associés à la dynamique de la glace et de la prolifération printanière, tandis que l'indice de développement et l'abondance de *C. finmarchicus* étaient davantage associés aux indices environnementaux liés à la TSM.

3.2. MODÈLES

3.2.1. Kn

Dans le neGSL, le meilleur modèle pour Kn en juin comprenait la TSM en juin et le retrait des glaces (Figure 10 et Tableau 3). Ce modèle avait l'AIC le plus bas, mais un R^2 faible ($0,18$) avec un mauvais rendement pour les méthodes jackknife et d'auto-amorçage. Il a néanmoins été présenté parce que la relation entre Kn et le retrait des glaces était cohérente avec l'hypothèse

selon laquelle le printemps plus froid combiné à un retrait précoce des glaces serait favorable à Kn en juin. La TSM et le retrait des glaces ont montré des effets négatifs sur Kn, mais l'effet de la TSM n'était pas significatif. Toutefois, le modèle avait une portée limitée et devait être considéré avec prudence.

Dans le noGSL (Tableau 4), aucun modèle n'a été sélectionné pour le Kn en juin (Annexe 4, Tableau A.4.3). Pour le Kn en août (tout le nGSL), un modèle comprenant un effet positif de l'indice du développement de *C. finmarchicus* en juin ($R^2 = 0,5$) a été sélectionné pour son AIC plus bas et son rendement dans les méthodes d'auto-amorçage et jackknife (Figure 11, Tableau 4, Tableau A.4.3). Ce modèle suggère qu'un développement plus tardif de la population de *C. finmarchicus* à la fin du printemps et au début de l'été serait bénéfique pour le Kn du capelan en août.

Dans le sGSL (Tableau 5), le retrait des glaces a de nouveau eu un effet négatif significatif sur le Kn en juin. Cependant, comme dans le neGSL, le modèle n'était pas significatif selon l'essai par auto-amorçage (Tableau A.4.4). Cependant, un modèle tenant compte des indices du zooplancton a été choisi. En juin, le Kn était négativement lié à l'indice de développement de *C. hyperboreus* (Figure 12 et Tableau 5). Ce modèle avait un R^2 ajusté = 0,78 et a bien fonctionné à la fois dans les méthodes d'auto-amorçage et jackknife. Ce modèle a été choisi même si son AIC était plus élevé parce que d'autres modèles ayant un AIC inférieur étaient probablement surajustés. Cet effet pourrait également être lié à l'abondance, car l'indice du développement et l'abondance de *C. hyperboreus* étaient corrélés (Figure 9). Le Kn en septembre était négativement lié à la TSM de mai à août (1990 à 2019) (Figure 13) ou positivement lié à l'abondance de *C. finmarchicus* de juillet à septembre (1999 à 2019) (Figure 14), cette dernière présentant un ajustement amélioré de $R^2 = 0,50$ et du rendement de la méthode jackknife par rapport au modèle qui ne comprenait que la TSM (Tableau 5).

En résumé, une valeur élevée de Kn en juin était liée à un retrait précoce des glaces ou à une forte abondance de *C. hyperboreus* et à un développement précoce. Une valeur élevée de Kn en août-septembre était associée soit à un développement tardif de la population de *C. finmarchicus*, soit à une forte abondance de *C. finmarchicus* et à une STT élevée pendant l'été (juillet à septembre).

3.2.2. Abondance

Les indices de l'abondance des larves tirés du relevé de juin dans le sGSL n'ont montré aucun effet significatif dans aucun des meilleurs modèles M1, M2 et M3 (Tableaux 3 à 5), ni dans aucun des modèles construits selon notre procédure analytique par étapes (Annexe 4).

Dans le neGSL, le meilleur modèle d'abondance supposait que les prises étaient dominées par les capelans de 3 ans (M3) et incluait le Kn en juin à l'âge de 1 an et le retrait des glaces à l'âge de 2 ans comme variables explicatives (Tableau 3). Le retrait des glaces présentait un effet de forme de dôme indiquant que les années extrêmes étaient défavorables à la survie du capelan de 1 an au printemps, tandis que l'effet positif de Kn en juin refléterait une meilleure survie du capelan de 2 ans (Figure 15). Le rendement du modèle supposant que les prises étaient dominées par les poissons âgés de 2 ans (M2) n'était que légèrement inférieur avec les mêmes variables explicatives (Tableau 3). Les deux modèles montraient que les années de forte (faible) abondance du capelan étaient associées à des effets positifs (négatifs) des variables explicatives, c'est-à-dire au cours des deux premières années de la vie du capelan (Figure 15, Figure A.3.1).

Dans le noGSL, le meilleur modèle d'abondance supposait également que les prises étaient dominées par les capelans de 3 ans (M3) et incluait le Kn en juin à l'âge de 1 an (Tableau 4). L'effet était généralement positif et le modèle a bien réussi à prédire une partie des abondances

extrêmement faibles de capelan ainsi que les périodes contrastées d'abondance principalement forte (2007 à 2012) et faible (2013 à 2019) (Figure 16). Le modèle supposant que les prises étaient dominées par les individus de 2 ans (M2) comprenait un effet positif et significatif de l'abondance de *C. finmarchicus* de juillet à septembre à l'âge de 1 an, suggérant qu'une bonne condition d'alimentation estivale pourrait favoriser la survie du capelan au cours de l'hiver suivant (Tableau 4, Figure A.3.2). Toutefois, le retrait des glaces correspondant à la survie du capelan à l'âge de 2 ans n'était pas significatif et le rendement global du modèle était plus faible (Tableau 4).

Dans le sGSL, le meilleur modèle d'abondance supposait que les prises étaient dominées par les capelans âgés de 2 ans (M2) et incluait la TSM de mai à août à l'âge de 1 an (effet positif) et le retrait des glaces à l'âge de 2 ans (effet négatif) comme variables explicatives (Tableau 5, Figure 17). La TSM de mai à août a été associée à une valeur plus élevée de Kn en septembre (comme indicateur d'une plus grande survie des individus âgés de 1 an l'hiver suivant), tandis qu'un retrait plus précoce des glaces favoriserait une survie plus élevée du capelan âgé de 2 ans au printemps suivant (Tableau 5). Le modèle a bien prédit la faible abondance du capelan au début des années 1990, l'abondance plus élevée au cours de la décennie suivante avec des valeurs maximales vers 2010, mais a sous-estimé l'abondance de 2011 à 2015 (Figure 17). Le meilleur modèle supposant que les prises étaient dominées par les individus âgés de 1 an (M1) n'incluait que le retrait des glaces à l'âge de 1 an comme variable explicative, mais avec un rendement nettement inférieur à celui du modèle M2 (Tableau 5, Figure A.3 1).

En résumé, les variations des indices de l'abondance du capelan dans les relevés au chalut de fond ont été associées à des variations de Kn (comme indicateurs de la survie) en juin ou en août-septembre ou à leurs indicateurs environnementaux. Le retrait des glaces a été choisi dans cinq modèles sur six, et les indicateurs de Kn en août-septembre dans trois des quatre modèles dans le sGSL et le noGSL. Les ajustements des modèles étaient meilleurs pour les modèles M3 dans le neGSL et le noGSL et pour les modèles M2 dans le sGSL. C'est le modèle M2 dans le sGSL qui a affiché le meilleur rendement parmi tous les modèles. De ce fait, nos résultats appuient en grande partie le modèle conceptuel prédisant que l'abondance du capelan (force des cohortes) serait associée à des variations de la survie entraînées par des processus ascendants dans la première ou la deuxième année de vie.

4. DISCUSSION ET CONCLUSION

Nos résultats appuient l'hypothèse selon laquelle les conditions environnementales et biologiques connues pour réguler la survie et la force des cohortes du capelan (Lewis *et al.* 2019) expliquent en partie la variation des indices de l'abondance du capelan d'après les relevés au chalut de fond dans le GSL. Ils ont également permis de déterminer une corrélation entre la dynamique de la glace de mer (fin de l'hiver et début du printemps) ou la TSM (fin du printemps et été) et la dynamique des *Calanus* et l'état du capelan, ce qui appuie l'hypothèse de processus ascendants implicitement supposée dans le modèle prédictif de la biomasse du capelan dans les divisions 3KL (Buren *et al.* 2014; Lewis *et al.* 2019). Les variations dans les indices de l'abondance du capelan étaient principalement associées à des variations de Kn en juin et/ou en août-septembre ou de leurs indicateurs environnementaux, ce qui appuie l'hypothèse conceptuelle selon laquelle l'abondance du capelan âgé de 2 ans est largement associée à des variations de la survie des poissons âgés de 1 et/ou 2 ans (Lewis *et al.* 2019). Selon nos résultats avec les modèles M2 et M3 et notre description des relations *Calanus*-environnement propres à l'espèce, il faut que de bonnes conditions environnementales en été et à l'automne à l'âge de 1 an (bons Kn et survie l'hiver suivant) précèdent des conditions environnementales tout aussi favorables à l'âge de 2 ans le printemps suivant (bon Kn et survie) pour produire une cohorte forte (abondance élevée).

Une corrélation entre le retrait des glaces et le début de la prolifération printanière a été observée dans la plupart des régions. Nos résultats ont également indiqué que la période de la prolifération de *C. hyperboreus* et son abondance étaient associées au retrait de la glace de mer, un retrait de la glace plus précoce (ou plus tardif) (avec son effet sur la période de la prolifération printanière) se traduisant par un développement plus précoce (ou plus tardif) de la population de *C. hyperboreus*. La période de la prolifération de *C. finmarchicus* et son abondance n'étaient pas associées au retrait des glaces, mais plutôt aux conditions environnementales après la prolifération (début du printemps, TSM en juin), un réchauffement printanier plus précoce (plus tardif) entraînant un développement plus précoce (plus tardif) de la population de *C. finmarchicus*. Ces liens propres à l'espèce avec les conditions environnementales au printemps et au début de l'été correspondent à leur stratégie de cycle vital respective. *C. hyperboreus* se reproduit en utilisant ses réserves énergétiques en eaux profondes en hiver, sa progéniture profitant de la prolifération printanière pour se développer rapidement dans la couche superficielle (0 à 100 m) avant d'entrer en diapause à la fin du printemps ou au début de l'été (Plourde *et al.* 2003). *C. finmarchicus* est un reproducteur utilisant ses apports énergétiques externes, dont la population se développe activement dans la couche superficielle pendant l'été et entre en diapause à la fin de l'été (Plourde *et al.* 2001; Blais *et al.* 2019). Dans toutes les régions, l'absence de corrélation entre le de la glace de mer et le début du printemps indique que les dynamiques de *C. hyperboreus* et de *C. finmarchicus* sont quelque peu découplées et potentiellement influencées différemment une année donnée.

Le fait que le Kn en juin était lié au retrait des glaces ou aux indices de *C. hyperboreus*, alors que le Kn en août-septembre était associé à la dynamique de *C. finmarchicus* ou à la moyenne saisonnière de la TSM (mai à août) correspondait à la dynamique saisonnière générale des *Calanus* décrite ci-dessus. *C. hyperboreus* arrive souvent en première, deuxième ou troisième position, en nombre, dans les contenus stomacaux des capelans pêchés au printemps et au début de l'été (Vesin *et al.* 1981; Ménard 1998; Astthorsson et Gislason 1997; Orlova *et al.* 2009; Dalpanado et Mowbray 2013). En raison de sa taille beaucoup plus grande et de sa teneur élevée en lipides, il pourrait ainsi représenter un contributeur dominant de l'apport énergétique du capelan (Lehoux *et al.* 2020). Nous avançons donc que la survie du capelan âgé de 1 ou 2 ans après l'hiver (indicateur = Kn en juin) est principalement régulée par la dynamique de la glace de mer-*C. hyperboreus* et la présence de cette espèce dans la couche superficielle au printemps. Par ailleurs, la survie du capelan âgé de 1 an l'hiver suivant (indicateur = Kn en août-septembre) serait principalement déterminée par la dynamique de la TSM estivale-*C. finmarchicus* et la présence de cette espèce dans la couche superficielle en été. Les profils de répartition verticale saisonnière propres à chaque espèce de *Calanus* et la présence de ces espèces dans la couche superficielle déterminent probablement leur disponibilité pour l'alimentation du capelan (Plourde *et al.* 2019; Aarflot *et al.* 2020). On observe habituellement des *C. hyperboreus* en diapause à plus de 250 m de profondeur et, par conséquent plus profond que l'habitat thermique optimal du capelan dans le nGSL, tandis que *C. finmarchicus* hiverne généralement dans des eaux plus froides à une profondeur de 150 à 175 m (Plourde *et al.* 2019). Le rôle clé de *C. hyperboreus* (printemps) et de *C. finmarchicus* (été) étayé par nos résultats diffère du modèle conceptuel élaboré pour le capelan dans les divisions 3KL, où seul *C. finmarchicus* était pris en compte (Buren *et al.* 2014; Lewis *et al.* 2019).

Contrairement au nGSL, du fait de la faible profondeur (moins de 100 m) du sGSL, *C. hyperboreus* pourrait être disponible pour la quête de nourriture du capelan, même après son entrée en diapause à la fin du printemps, comme le laissent supposer les modèles montrant un effet positif significatif de l'abondance de *C. hyperboreus* (juin) sur le Kn du capelan en septembre (Tableau A.4.3). La répartition verticale de *C. hyperboreus* en diapause est limitée par la profondeur du fond dans le sGSL, ce qui accroît sa densité et sa disponibilité pour

l'alimentation du capelan par rapport au nGSL (Plourde *et al.* 2019; Aarflot *et al.* 2020). Les *Calanus* en diapause, concentrés près du fond dans le sGSL, seraient également peu touchés par le transport et resteraient longtemps (3 à 4 mois) dans la région (Brennan *et al.* 2019).

L'abondance des larves de capelan dans le sGSL ne présentait pas l'association positive prévue avec les indices de l'abondance du capelan dans le sGSL et le nGSL (Murphy *et al.* 2018; Lewis *et al.* 2019). Murphy *et al.* (2018) ont constaté que les densités de larves plus âgées n'étaient pas liées au recrutement, contrairement à la densité des larves émergentes. Il n'est pas possible de distinguer si l'absence de relation observée dans le GSL était attribuable au fait que notre indice de l'abondance des larves est un mauvais indicateur de l'abondance des larves à l'émergence, parce que les processus qui se produisent plus tard dans la première ou la deuxième année cernés dans nos analyses sont dominants dans la détermination de l'abondance du capelan dans le GSL ou si d'autres facteurs influent sur la survie post-larvaire. Enfin, l'advection des larves de l'estuaire du Saint-Laurent et du noGSL plus tard durant l'été pourrait contribuer aux processus généraux menant à l'abondance du capelan lors du relevé au chalut de fond effectué en septembre dans la région (Ouellet *et al.* 2013).

4.1. SOURCES D'INCERTITUDE

Nous avons élaboré un indice larvaire fondé sur l'abondance des larves dans le sGSL en juin. Les GAM sélectionnés ont révélé un effet et une interaction significatifs entre la date de l'échantillonnage et celle de l'éclosion, justifiant la nécessité de normaliser l'indice larvaire. Les larves de capelan sont habituellement concentrées dans les 20 premiers mètres (Courtois *et al.* 1982; Fortier et Leggett 1983) de la colonne d'eau et peuvent donc être soumises à un transport en surface important. La distribution de la longueur des larves au cours du relevé de juin donne à penser que ces larves ont été principalement pondues dans le sGSL et que le transport à partir du noGSL était minime au moment du relevé (Ouellet *et al.* 2013). L'indice larvaire a été normalisé pour la période de l'échantillonnage par rapport à celle de l'éclosion, estimée à partir de la longueur des larves et des taux de croissance standard. Nous avons supposé que la période de développement était constante à la fois dans le temps et l'espace, ce qui représente une source d'incertitude compte tenu des conditions environnementales hétérogènes potentielles dans l'ensemble du sGSL (Galbraith *et al.* 2020). La distribution multimodale de la longueur des larves certaines années dénotait des événements de fraie locaux consécutifs ou diverses origines des larves, mais pour simplifier notre analyse, nous avons utilisé la longueur moyenne pour calculer la période de développement. L'effet de la température sur le développement des larves et l'estimation de la date d'éclosion pourraient être explorés. Nous avons également supposé que l'abondance des larves dans le sGSL serait un bon indicateur des variations de l'intensité annuelle de la reproduction du capelan dans l'ensemble du GSL, mais cette hypothèse reste à valider.

Le krill pourrait être une proie importante des capelans plus gros ou plus âgés (Dalpadado et Mowbray 2013; Orlova *et al.* 2010). Aucune série chronologique sur l'abondance du krill n'est encore disponible pour le GSL (ou ailleurs dans les eaux de l'est du Canada). Dans l'ensemble, la biomasse du krill est beaucoup plus importante dans le nGSL que dans le sGSL, la densité du krill étant plus élevée sur les pentes (profondeur du fond < 175 m) des chenaux profonds (McQuinn *et al.* 2015). Le fait de ne pas le considérer comme une proie clé pour les capelans plus gros ou plus âgés pourrait expliquer le rendement généralement plus faible des modèles dans le nGSL (noGSL, neGSL) par rapport au sGSL.

Tout au long de cet exercice, nous avons supposé qu'il n'y avait pas de migration active entre les régions du GSL, ni à partir des régions adjacentes. Nous avons présumé que l'abondance du capelan résultait des conditions environnementales locales et de la mortalité. Cependant, la distribution de la longueur (âge) des capelans adultes donne à penser qu'ils quittent le sGSL

pour le noGSL et le neGSL. L'abondance mesurée dans le nGSL pourrait alors également dépendre des événements de survie qui se produisent dans le sGSL durant les premières années de la vie et des événements de survie qui se produisent dans le nGSL plus tard.

La dépendance à la densité et la compétition n'ont pas été incluses dans nos modèles. Lewis *et al.* (2019) ont suggéré d'inclure la prédation et la mortalité par pêche. Cependant, l'intégration des interactions biotiques peut être difficile parce que ces prédateurs/compétiteurs interagissent également et sont corrélés avec l'environnement (Dormann *et al.* 2018).

5. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'équipe d'évaluation du capelan dans la région de Terre-Neuve (F. Mowbray, A. Adamack, K. Lewis, H. Murphy, M. Koen-Alonso) pour les discussions clés sur leur modèle de prévision de l'abondance du capelan à la fin de l'automne 2019. Nous remercions également l'équipe d'évaluation du capelan de la région du Québec (Mélanie Boudreau, Linda Girard) pour son travail dévoué nécessaire pour fournir des données biologiques sur le capelan, ainsi qu'A. Smith pour les analyses préliminaires pour la modélisation des indices de l'abondance des larves de capelan. Nous n'oublions pas Marjolaine Blais, Peter Galbraith et le reste de l'équipe de la matrice des écosystèmes de la région du Québec pour leur travail visant à rendre les données environnementales facilement accessibles. Enfin, nous voulons remercier Keith Lewis et Andrew Smith pour leurs commentaires sur ce manuscrit.

6. RÉFÉRENCES CITÉES

- Aarflot, J. M., Dalpadado, P., et Fiksen, Ø. 2020. Foraging success in planktivorous fish increases with topographic blockage of prey distributions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 644: 129–142.
- Astthorsson, O. S., et Gislason, A. 1997. On the food of capelin in the subarctic waters north of Iceland. *Sarsia*, 82: 81-86.
- Benoît, H.P., et Swain, D.P. 2003. 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.
- Blais, M., Galbraith, P.S., Plourde, S., Scarratt, M., Devine, L. et Lehoux, C. 2019. [Les conditions océanographiques chimiques et biologiques dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en 2018](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2019/059. iv + 67 pp.
- Brennan, C. E., Maps, F., Gentleman, W. C., Plourde, S., Lavoie, D., Chassé, J., Lehoux, C., Krumhansl, K. A., et Johnson, C. L. 2019. How transport shapes copepod distributions in relation to whale feeding habitat : Demonstration of a new modelling framework. *Prog. Oceanogr.* 171: 1–21.
- Buren, A. D., Koen-Alonso, M., Pepin, P., Mowbray, F., Nakashima, B., Stenson, G., Ollerhead, N., et Montevecchi, W. A. 2014. Bottom-up regulation of capelin, a keystone forage species. *PLoS ONE*, 9: e87589.
- Burnham, K. P. et Anderson, D. R. 2002. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. 2nd ed. New York, Springer-Verlag.
- Chamberland, J.-M., Smith, A.D., Girard, L., Boudreau, M., et Plourde, S. 2022a. [Le capelan dans l'estuaire et le golfe du Saint Laurent \(OPANO 4RST\) en 2018, 2019 et 2020](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2021/075. iv + 46 p.

-
- Chamberland, J.-M., Plourde, S. et Benoît, H. B. 2022b. [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.
- Courtois, R., M. Simoneau, et J. J. Dodson. 1982. Interactions multispécifiques: répartition spatio-temporelle des larves de capelan (*Mallotus villosus*), d'éperlan (*Osmerus mordax*) et de hareng de l'Atlantique (*Clupea harengus harengus*) au sein de la communauté planctonique de l'estuaire moyen du Saint-Laurent. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 39:1164-1174.
- Dalpadado, P., et 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.
- Dormann, C. F., Bobrowski, M., Dehling, D. M., Harris, D. J., Hartig, F., Lischke, H., Moretti, M. D., Pagel, J., Pinkert, S., Schleuning, M., Schmidt, S. I., Sheppard, C. S., Steinbauer, M. J., Zeuss, D., et Kraan, C. 2018. Biotic interactions in species distribution modelling: 10 questions to guide interpretation and avoid false conclusions. Glob. Ecol. Biogeogr. 27: 1004-1016.
- Duplisea, DE. Merette, D., Roux, M.-J., Benoît, H., Blais, M., Galbraith, P., et Plourde, S. 2020. gsla: [the Gulf of St Lawrence ecosystem approach data matrix R-package](#). R package version 0.1.
- Fortier, L., et Leggett, W. C. 1983. Vertical Migrations and Transport of Larval Fish in a Partially Mixed Estuary. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 40:1543-1555.
- Galbraith, P.S., Chassé, J., Shaw, J.-L., Dumas, J., Caverhill, C., Lefavre, D. et Lafleur, C. 2020. [Conditions océanographiques physiques dans le golfe du Saint-Laurent en 2019](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Doc. de rech. 2020/030. iv + 88 p
- Grégoire, F., Girard, L. et Boudreau, M. 2014. [Résultats des relevés du programme de monitoring zonal atlantique \(PMZA\)-maquereau bleu \(*Scomber scombrus* L.\) réalisés dans le sud du golfe du Saint-Laurent en 2012 et 2013](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2014/075. v + 82 p.
- Guisan, A. et Zimmermann, N. E. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. Ecol Modell, 135: 147–186.
- Hurtubise, S. 1994. Pêche et caractéristiques biologiques du capelan (*Mallotus villosus*) dans le golfe du Saint-Laurent. Rapp. can. ind. sci. halieut. aquat. 94 /28: + 24 p.
- Hurvich, C. M. et Tsai, C.-L. 1989. Regression and time series model selection in small samples,. Biometrika 76: 297–307.
- Jacquaz, B., Able, K. W., et Leggett, W. C. 1977. Seasonal Distribution, Abundance, and Growth of Larval Capelin (*Mallotus villosus*) in the St. Lawrence Estuary and Northwestern Gulf of St. Lawrence. J. Fish. Res. Board. Can. 34: 2008-2014.
- Le Cren, E. D. 1951. The length-weight relationship and seasonal cycle in gonad weight and condition in the Perch (*Perca flavescens*). J. Anim. Ecol. 20: 201–219.
- Lehoux, C., Plourde S., et Lesage, V. 2020. [Importance des espèces dominantes de zooplancton pour les habitats potentiels d'alimentation des baleines noires de l'Atlantique Nord dans le golfe du Saint Laurent : une approche bioénergétique](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2020/033. iv + 45 p.
-

-
- Lewis, K. P., Buren, A. D., Regular, P. M., Mowbray, F. K., et Murphy, H. M. 2019. Forecasting capelin *Mallotus villosus* biomass on the Newfoundland shelf. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 616: 171–183.
- 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., et 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.
- Ménard, N. 1998. Répartition spatiale et structure des bancs de poissons pélagiques dans une aire d'alimentation des cétacés de l'estuaire du Saint-Laurent. Thèse (M. Sc.)--Université Laval, 1998. Xi+ 123 pp
- Mowbray, F.K. 2002. Changes in the vertical distribution of capelin (*Mallotus villosus*) off Newfoundland. *ICES J. Mar. Sci.* 59: 942-949.
- MPO. 2018. [Évaluation du stock de capelan de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent \(Divisions 4RST\) en 2017](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Avis sci. 2018/037
- Mullowney, D., Maillet, G., Dawe, E., Rose, G., et Rowe, S. 2016. Spawning delays of northern capelin (*Mallotus villosus*) and recovery dynamics: A mismatch with ice-mediated spring bloom? *Prog. Oceanogr.* 141: 144–152.
- Murphy, H. M., Pepin, P., et Robert, D. 2018. Re-visiting the drivers of capelin recruitment in Newfoundland since 1991. *Fish. Res.* 200: 1–10.
- O'Driscoll, R. L., Rose, G. A. et Anderson, J. T. 2002. Counting capelin: a comparison of acoustic density and trawl catchability. *ICES J. Mar. Sci.* 59: 1062-1071.
- Ouellet, P., Bui, A. O. V., Lavoie, D., Chassé, J., Lambert, N., Ménard, N., et Sirois, P. 2013. Seasonal distribution, abundance, and growth of larval capelin (*Mallotus villosus*) and the role of the Lower Estuary (Gulf of St. Lawrence, Canada) as a nursery area. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 70: 1508–1530.
- Orlova, E. L., Dolgov, A. V., Rudneva, G. B., Oganin, I. A., et Konstantinova, L. L. 2009. Trophic relations of capelin *Mallotus villosus* and polar cod *Boreogadus saida* in the Barents Sea as a factor of impact on the ecosystem. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 56: 2054-2067.
- Orlova, E. L., Rudneva, G. B., Renaud, P. E., Eiane, K., Savinov, V., et Yurko, A. S. 2010. Climate impacts on feeding and condition of capelin *Mallotus villosus* in the Barents Sea: Evidence and mechanisms from a 30 year data set. *Aquat. Biol.* 10: 105–118.
- Plourde, S., Joly, P., Runge, J. A., Zakardjian, B. et Dodson, J. J. 2001. Life cycle of *Calanus finmarchicus* in the lower St. Lawrence Estuary: the imprint of circulation and late timing of the spring phytoplankton bloom. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 58: 647–658.
- Plourde, S., Joly, P., Runge, J. A., Dodson, J. J. et Zakardjian, B. 2003. Life cycle of *Calanus hyperboreus* in the lower St. Lawrence Estuary and its relationship to local environmental conditions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 255: 219–233.
- Plourde, S., Lehoux, C., Johnson, C. L., Perrin, G., et Lesage, V. 2019. North Atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*) and its food : (I) a spatial climatology of *Calanus* biomass and potential foraging habitats in Canadian waters. *J. Plankton Res.* 41: 667-685–19.

-
- R Core Team. 2020. R: [A language and environment for statistical computing](#). R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Vesin, J. P., Leggett, W. C., et Able, K. W. 1981. Feeding ecology of capelin (*Mallotus villosus*) in the estuary and western Gulf of St. Lawrence and its multispecies implications. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 38: 257-267.
- Wood, S.N. 2006. Low rank scale-invariant tensor product smooths for generalized additive mixed models. *Biometrics.* 62: 1025-1036.
- Wood, S.N. 2017. *Generalized Additive Models: An Introduction with R* (2nd edition). Chapman and Hall/CRC.
- Zuur, A. F., and Ieno, E. N. 2016. A protocol for conducting and presenting results of regression-type analyses. *Methods Ecol. Evol.*: 7: 636–645.

TABLEAUX

Tableau 1. Sommaire des GAM pour la normalisation de l'indice larvaire. L'abondance des larves de capelan par m² est la variable de réponse. Les prédictors comprenaient un effet spatial où x.m et y.m sont des coordonnées projetées (en mètres/10⁵) dans la projection conique conforme de Lambert, la date d'échantillonnage (S), la date d'éclosion (H) et le nombre de jours depuis l'éclosion (date S – date H). La distribution binomiale négative utilise un lien logarithmique entre l'abondance et les prédictors. « Ti » est une interaction de produit tensoriel et « te » est un lissage de produit tensoriel utilisé lorsque les effets principaux ne sont pas inclus. Le modèle sélectionné ayant l'AIC le plus bas est indiqué en gras. ΔAIC est la différence entre l'AIC de chaque modèle et le modèle en gras. « Df » est le nombre de degrés de liberté. Le poids est le poids Akaike.

Modèles	AIC	ΔAIC	df	poids	% déviance expliquée
Log(Nm ⁻²)~ ti(S date) + ti(H date) + ti(S date, H date)	5413	1371	10,2	0	7,9
Log(Nm ⁻²)~ te(x.m × y.m × année)	4100	57,9	259,7	0	85,7
Log(Nm ⁻²)~ te(x.m × y.m × année) + s(S date)	4061	19,2	258,9	0	86,3
Log(Nm ⁻²)~ te(x.m × y.m × année) + s(S date) +s(H date)	4056	14,4	258,9	0,001	86,6
Log(Nm⁻²)~ te(x.m × y.m × année) + ti(S date) + ti(H date) + ti(S date, H date)	4042	0,0	268,3	0,801	87,0
Log(Nm ⁻²)~ te(x.m × y.m × année) + ti(S date) + ti(nombre de jours depuis l'éclosion) + ti(S date, nombre de jours depuis l'éclosion)	4045	2,8	267	0,199	86,9

Tableau 2. Données utilisées dans les modèles d'abondance du capelan et effets prévus sur le Kn et la survie du capelan.

Période		Variable	Unités	Interprétation/rôle dans le modèle d'abondance du capelan	Références
nGSL	sGSL				
1990-2020		Indices d'abondance des relevés aux chaluts de fond du nGSL et du sGSL (août-septembre)	nombre moyen par trait	Indicateur de l'abondance de la population de capelan dans le nGSL (âge 2-3 ans) et le sGSL (âge 1-2 ans)	Chamberland <i>et al.</i> (2022b)
-	1983-2019	Indice d'abondance larvaire (sGSL, juin)	moyenne N m ⁻²	Indicateur de la production reproductive de la population de capelan	-
1984-2020	1986-2020 ¹	Kn Juin (printemps, principalement âge 3-4 ans)	-	Un plus grand Kn indique une plus grande survie du capelan après l'hiver	-
1999-2020	1990-2020	Kn Août-Septembre (automne) (principalement âge 1-2 ans)	-	Un Kn plus important indique un potentiel de survie du capelan plus élevé au cours de l'hiver suivant	-
1980-2019	1990-2019 ²	TSM juin et TSM mai-août	°C	Une TSM plus élevée favorise le Kn du capelan en automne et le potentiel de survie pendant l'hiver suivant	Galbraith <i>et al.</i> 2020
1980-2019	1990-2019	Début du printemps	semaine de l'année où la TSM atteint 10°C	Un réchauffement plus précoce favorise la production de zooplancton, le Kn du capelan et la survie après l'hiver (t0)	
1980-2019	1990-2019	Période de retrait des glaces	jour julien	Un retrait plus précoce de la glace favorise une floraison printanière et une production de zooplancton plus précoces, ainsi que la survie du capelan	
1998-2018		Début de floraison	jour julien	Une floraison printanière plus précoce favorise la production précoce de zooplancton et la survie du capelan	Blais <i>et al.</i> 2019
2001-2018		Abondance de <i>C. fin.</i> (Juin)	10 ³ ind m ⁻²	Favorise le Kn du capelan (juin) (et la survie au printemps)	
		Abondance de <i>C. hyp.</i> (Juin)	10 ³ ind m ⁻²		
		Abondance de <i>Pseudocalanus</i> spp (Juin) (seulement dans le noGSL)	10 ³ ind m ⁻²	Favorise la survie des larves de capelan	

Période		Variable	Unités	Interprétation/rôle dans le modèle d'abondance du capelan	Références
nGSL	sGSL				
		Indice de développement de <i>C. fin.</i> (Juin)	C1-C4/C1-C6	Indices de l'état de développement de la population : plus l'indice est élevé, plus le développement de <i>C. fin.</i> est tardif et plus faible est le Kn (juin) (et la survie au printemps)	
2001-2019		Indice de développement de <i>C. hyp.</i> (Juin)	C4/C1-C4	Indices de l'état de développement de la population : plus l'indice est élevé, plus le développement de <i>C. hyp.</i> est précoce et plus le Kn du capelan (juin) et la survie (juin) sont élevés.	Blais. M. MPO, Comm. pers.
1992-2019		Abondance de <i>C. fin</i> Juil-Sept	ind m ⁻²	Favorise le Kn du capelan (août-septembre) (et la survie l'hiver suivant)	Blais <i>et al.</i> 2019
		Abondance de <i>C. hyp</i> Juil-Sept	ind m ⁻²		
		Abondance de <i>Pseudocalanus</i> (Juil-Novembre) (sGSL and neGSL)	ind m ⁻²	Favorise la survie des larves de capelan	

¹ forte proportion d'années manquantes dans la série chronologique

² Les variables environnementales physiques sont accessibles avant 1990, mais elles n'ont pas été extraites parce qu'elles n'étaient pas nécessaires pour cette série chronologique.

Tableau 3. Sommaire des GAM sélectionnés pour le Kn et l'abondance du capelan aux âges 2 (M2) et 3 (M3) dans le neGSL. Les autres modèles examinés sont présentés dans les tableaux A.4.1, A.4.4 et A.4.5 de l'annexe 4. L'effet de chaque prédicteur sélectionné sur la variable de réponse peut être positif (+), négatif (-), en forme de cloche (∩) ou en forme de U (∪). Les effets non significatifs sont indiqués par « n.s. ». Le rendement de chaque modèle est évalué avec le R², la comparaison de la déviance expliquée avec l'auto-amorçage (* pour significativement supérieur à la distribution obtenue par auto-amorçage et « n.s. » sinon) et la corrélation de Pearson entre les valeurs prédites et observées pendant la méthode jackknife.

Variable de réponse	Années	Variables	Effet	R ²	% de déviance expliquée	Auto-amorçage	Jackknife
Kn Juin	1984-2019	TSM Juin Retrait des glaces	-n.s. -	0,18	23	n.s.	0,16
Abondance (M2)	1995-2020	Kn Juin Retrait des glaces t-1	+. -n.s.	0,37	44	*	0,55
Abondance (M3)	1997-2020	Kn Juin t-1 Retrait des glaces t-2	+ ∩	0,40	49	*	0,47

Tableau 4. Sommaire des GAM sélectionnés pour le Kn et l'abondance du capelan aux âges 2 (M2) et 3 (M3) dans nwGSL. Les autres modèles examinés sont présentés dans les tableaux A.4.2, A.4.6 et A.4.7 de l'annexe 4. L'effet de chaque prédicteur sélectionné sur la variable de réponse peut être positif (+), négatif (-), en forme de cloche (∩) ou en forme de U (∪). Les effets non significatifs sont indiqués par « n.s. ». Le rendement de chaque modèle est évalué avec le R², la comparaison de la déviance expliquée avec l'auto-amorçage (* pour significativement supérieur à la distribution obtenue par auto-amorçage et « n.s. » sinon) et la corrélation de Pearson entre les valeurs prédites et observées pendant la méthode jackknife.

Variable de réponse	Années	Variables	Effet	R ²	% déviance expliquée	auto-amorçage	Jackknife
Kn Juin	-	Aucun modèle sélectionné	-	-	-	-	-
Kn Août (nGSL)	2001-2018	Ind. dével. de <i>C. finmarchicus</i> (début de l'été)	-	0,50	55	*	0,56
Abondance (M2)	1993-2019	Abondance de <i>C. finmarchicus</i> Juil-Sept t-1 Retrait des glaces	+ -n.s.	0,25	33	*	0,44
Abondance (M3)	1992-2020	Kn Juin t-1	∩	0,46	51	*	0,49

Tableau 5. Sommaire des GAM sélectionnés pour le Kn et l'abondance du capelan aux âges 1 (M1) et 2 (M2) dans le sGSL. Les autres modèles examinés sont présentés dans les tableaux A.4.3, A.4.8 et A.4.9 de l'annexe 4. L'effet de chaque prédicteur sélectionné sur la variable de réponse peut être positif (+), négatif (-), en forme de cloche (∩) ou en forme de U (∪). Les effets non significatifs sont indiqués par « n.s. ». Le rendement de chaque modèle est évalué avec le R^2 , la comparaison de la déviance expliquée avec l'auto-amorçage (* pour significativement supérieur à la distribution obtenue par auto-amorçage et « n.s. » sinon) et la corrélation de Pearson entre les valeurs prédites et observées pendant la méthode jackknife.

Variable de réponse	Années	Variabes	Effet	R ²	% déviance expliquée	auto-amorçage	Jackknife
Kn Juin	2006-2018	Ind. dével. de <i>C. hyperboreus</i> (début été)	+	0,78	83	*	0,84
Kn Septembre	1990-2019	TSM Mai- Août	-	0,22	27	*	0,34
Kn Septembre	1999-2019	Abondance de <i>C. finmarchicus</i> Juil-Sept	+	0,50	54	*	0,48
Abondance (M1)	1990-2019	Retrait des glaces	-	0,31	34	*	0,47
Abondance (M2)	1991-2019	TSM Mai-Août t-1	+	0,57	61	*	0,67
		Retrait des glaces	-				

FIGURES

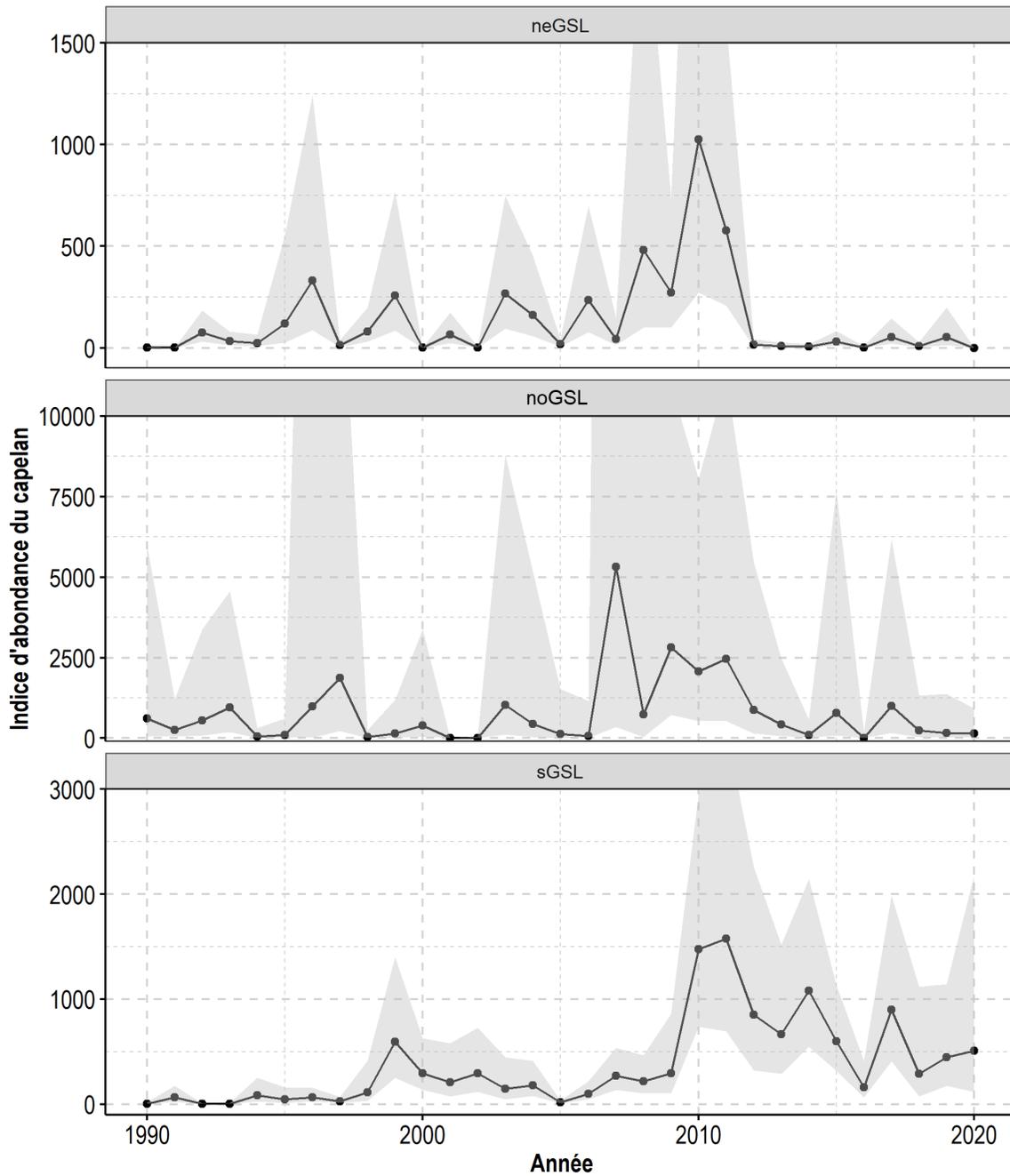


Figure 1. Indices de l'abondance du capelan calculés à l'aide des relevés multidisciplinaires au chalut effectués en août dans le neGSL et le noGSL et en septembre dans le sGSL. La zone ombrée représente les intervalles de confiance autour des indices estimés. Voir les emplacements des régions sur la figure 2.

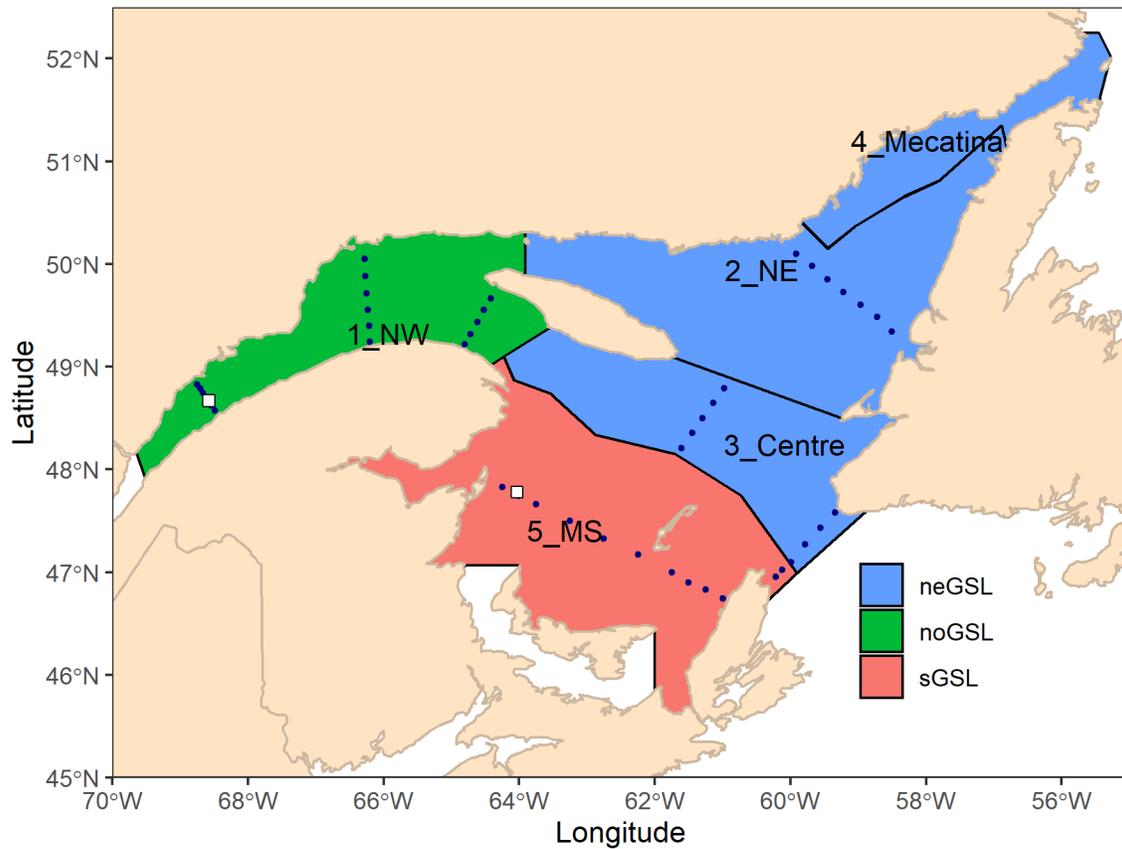


Figure 2. Régions de l'approche écosystémique utilisée pour extraire les données environnementales. Les couleurs indiquent les régions correspondant aux différents indices de l'abondance du capelan, les étiquettes et les lignes noires donnent les régions correspondantes dans l'approche de l'écosystème, les carrés blancs montrent la position des stations fixes du PMZA pour les échantillons de zooplancton (juillet à septembre ou juillet à novembre) et les cercles noirs, la position des transects du PMZA échantillonnés au début de l'été.

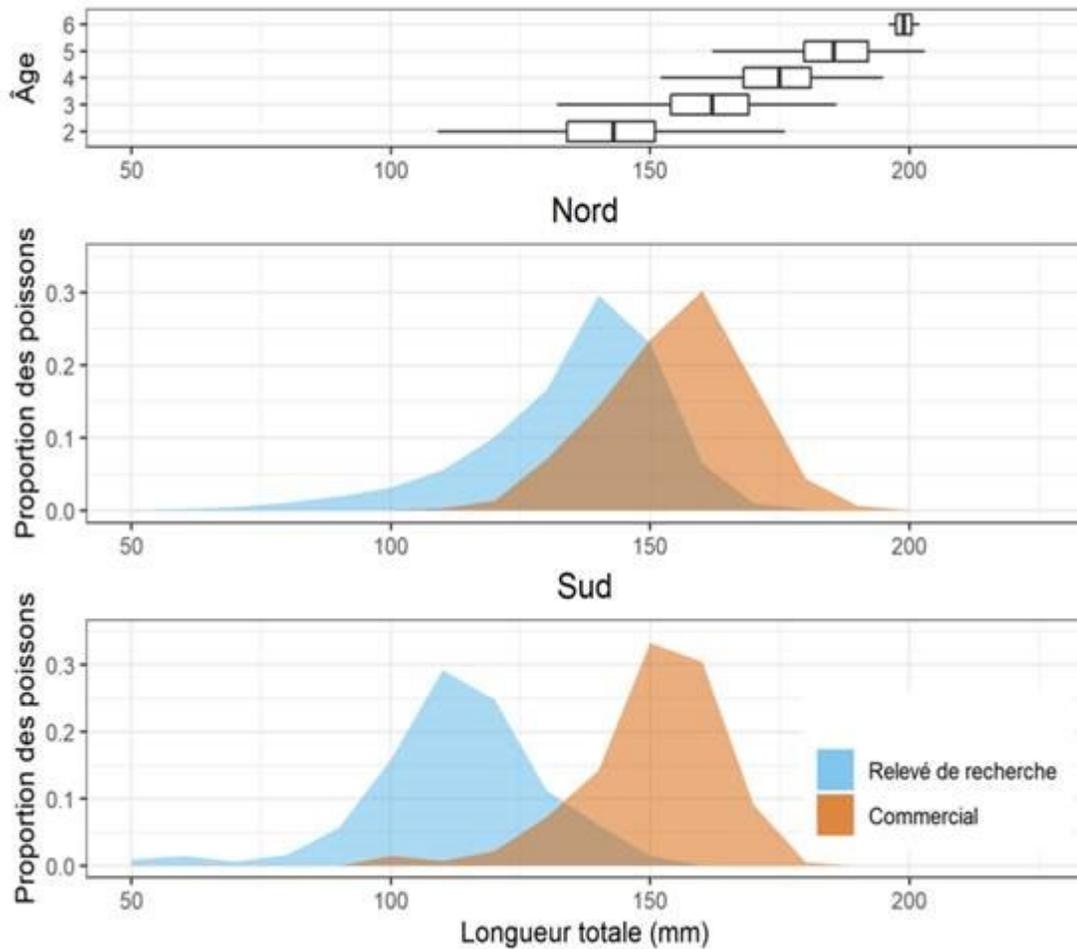


Figure 3. Longueur selon l'âge (première rangée, données sur le capelan dans le GSL de 1984 à 1993; Hurtubise 1994) et la distribution des longueurs pour les relevés effectués par les navires de recherche dans le nGSL et le sGSL (en bleu) par rapport à la distribution des longueurs dans la pêche commerciale (en orange). Pour les distributions des longueurs dans la pêche commerciale, les divisions 4R et 4S de l'OPANO ont été tracées dans le graphique du nord, et les données de la pêche commerciale dans la division 4T ont été tracées dans le graphique du sud.

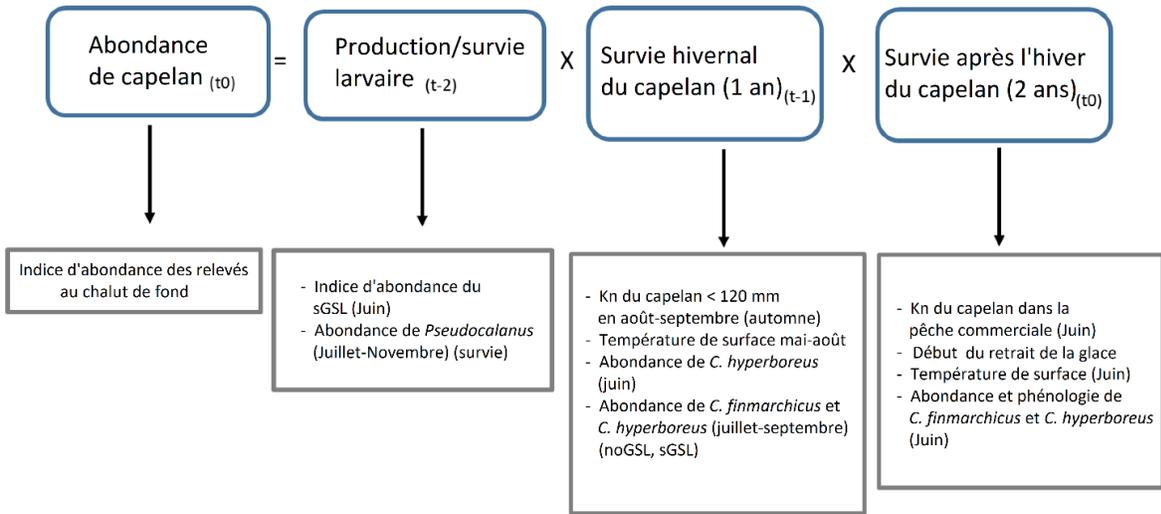


Figure 4. Structure du modèle d'abondance du capelan M2 et variables connexes. Nous avons utilisé Kn ou ses prédicteurs environnementaux déterminés dans les GAM comme indicateurs du potentiel de survie du capelan pendant l'hiver ou au printemps. Voir la description des effets attendus des approximations des indicateurs environnementaux sur le Kn et la survie du capelan dans le tableau 2.

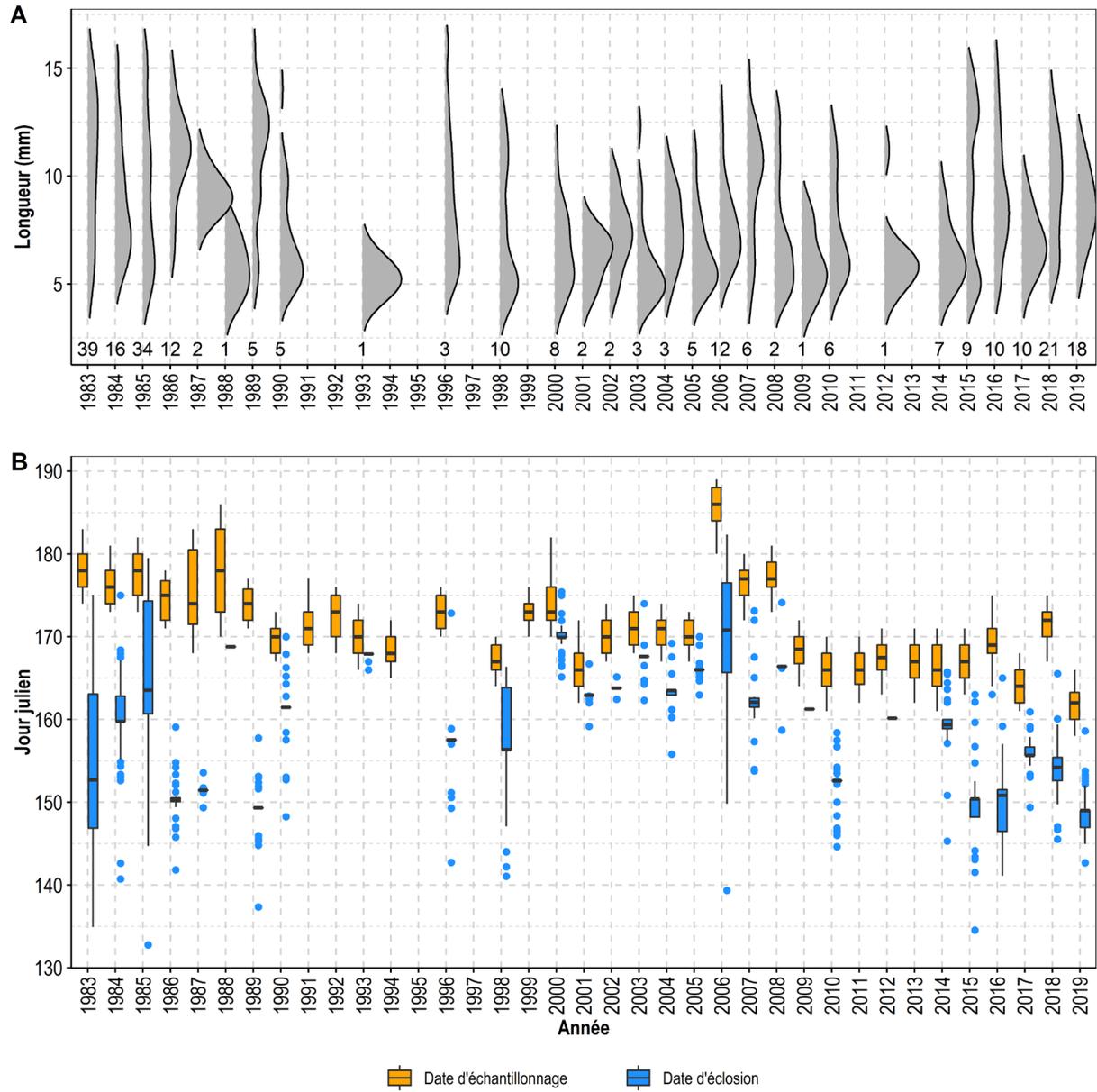


Figure 5. Distribution des longueurs des larves de capelan (A). Le nombre de stations où la longueur des larves a été échantillonnée est indiqué au-dessus de l'axe des x. Date d'échantillonnage (en orange) et date d'éclosion calculée (en bleu) pour le relevé sur les larves dans le sGSL (B).

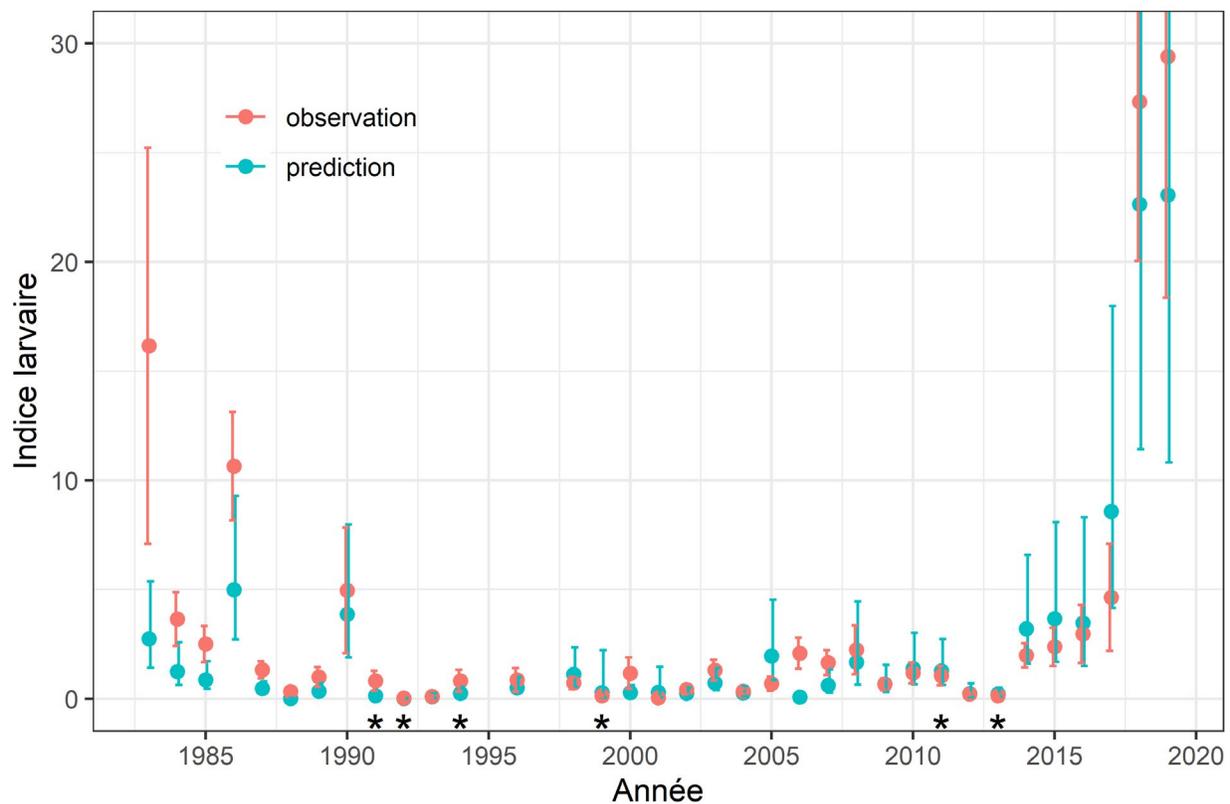


Figure 6. Indice larvaire observé (en orange) avec erreur-type et indice larvaire normalisé (en bleu) avec erreur-type moyenne du modèle. * : Années sans mesures des larves pour lesquelles la date d'éclosion moyenne de 1983 à 2019 a été utilisée.

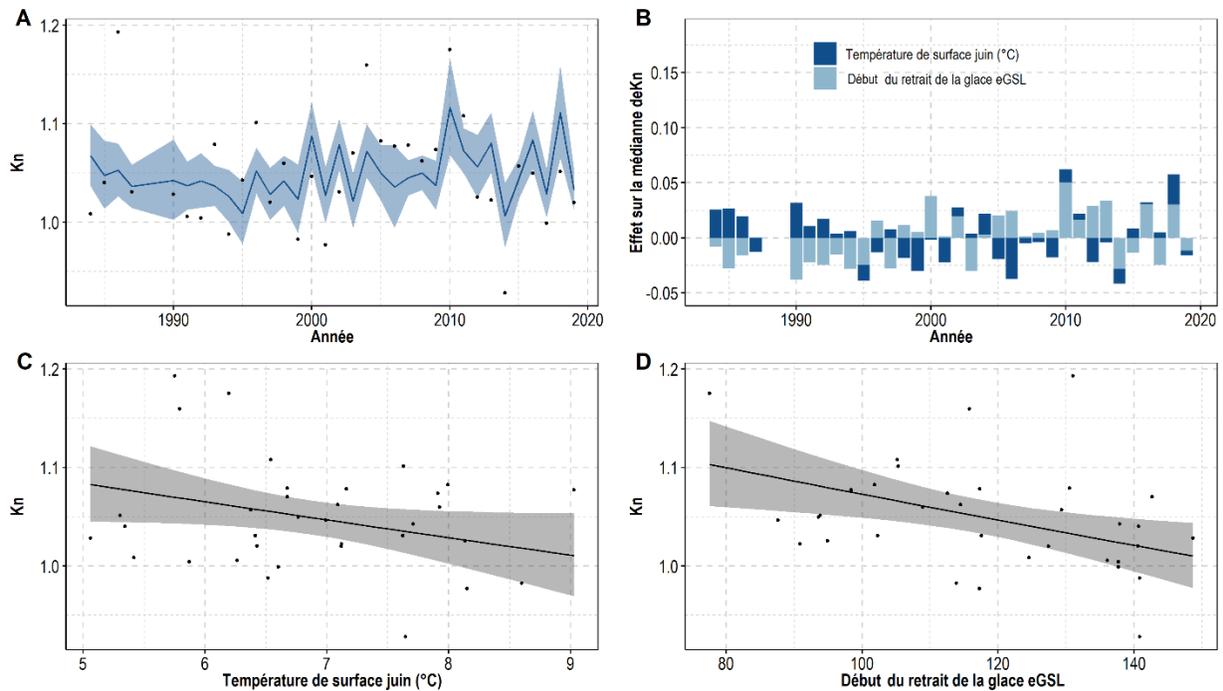


Figure 10. GAM sélectionné pour le Kn en juin dans le neGSL : A) les Kn observés (cercles noirs) sont superposés aux prédictions du GAM (ligne bleue) et des intervalles de confiance à 95 % sur les prédictions (zone ombrée en bleu); B) contribution de chaque variable au Kn prévu chaque année; C) effet de la température de la surface de la mer en juin; et D) effet du retrait des glaces (jour julien) sur le Kn. Les zones grises indiquent les intervalles de confiance à 95 %.

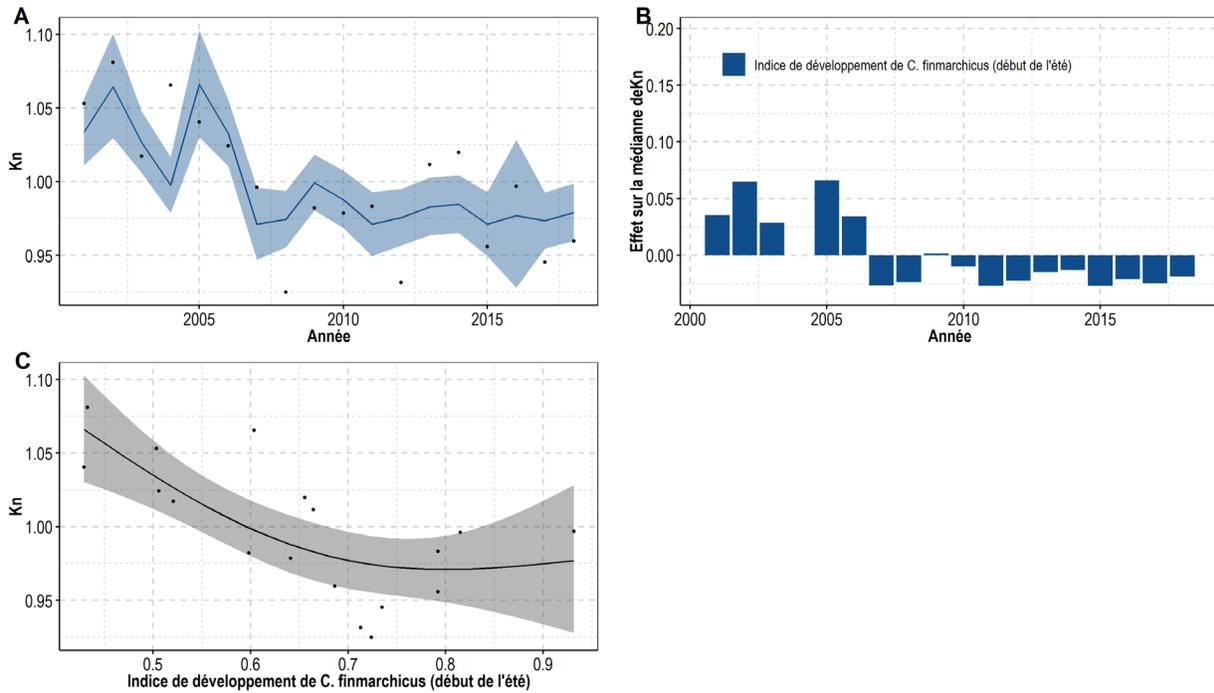


Figure 11. GAM sélectionné pour le Kn en août dans le nGSL : A) les Kn observés (cercles noirs) sont superposés aux prédictions du GAM (ligne bleue) et des intervalles de confiance à 95 % sur les prédictions (zone ombrée en bleu); B) contribution de chaque variable au Kn prévu chaque année; C) effet de l'indice de développement de *C. finmarchicus* sur le Kn. Les zones grises indiquent les intervalles de confiance à 95 %.

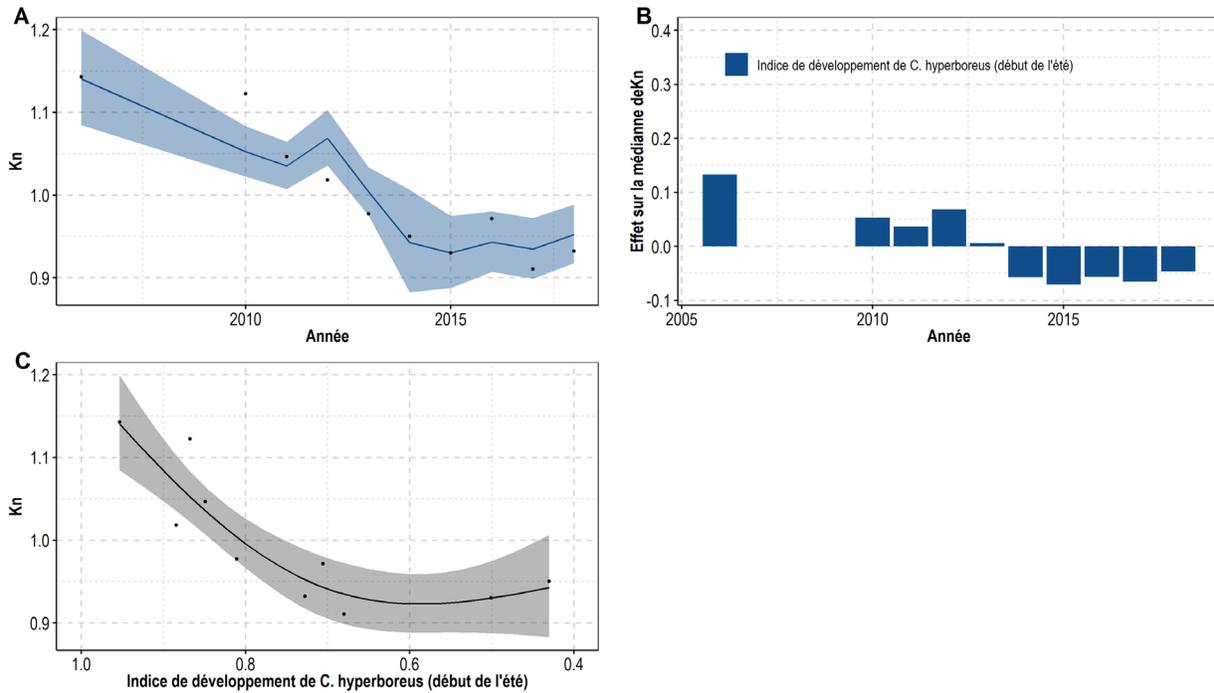


Figure 12. GAM sélectionné pour le Kn en juin dans le sGSL : A) les Kn observés (cercles noirs) sont superposés aux prédictions du GAM (ligne bleue) et des intervalles de confiance à 95 % sur les prédictions (zone ombrée en bleu); B) contribution de chaque variable au Kn prévu chaque année; C) effet de l'indice de développement de *C. hyperboreus* (proportion du stade CIV) sur le Kn . Les zones grises indiquent les intervalles de confiance à 95 %.

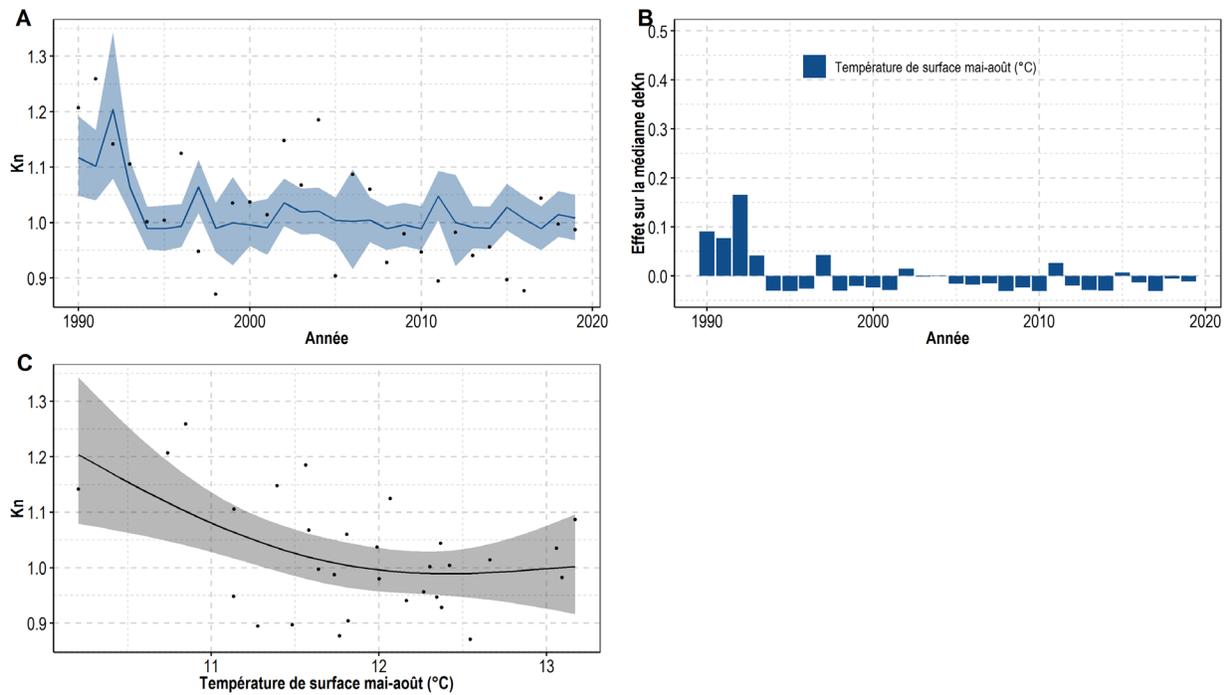


Figure 13. GAM sélectionné pour le Kn en septembre dans le sGSL : A) les Kn observés (cercles noirs) sont superposés aux prédictions du GAM (ligne bleue) et des intervalles de confiance à 95 % sur les prédictions (zone ombrée en bleu); B) contribution de chaque variable au Kn prévu chaque année; C) effet de la température de la surface de la mer de mai à août sur le Kn. Les zones grises indiquent les intervalles de confiance à 95 %.

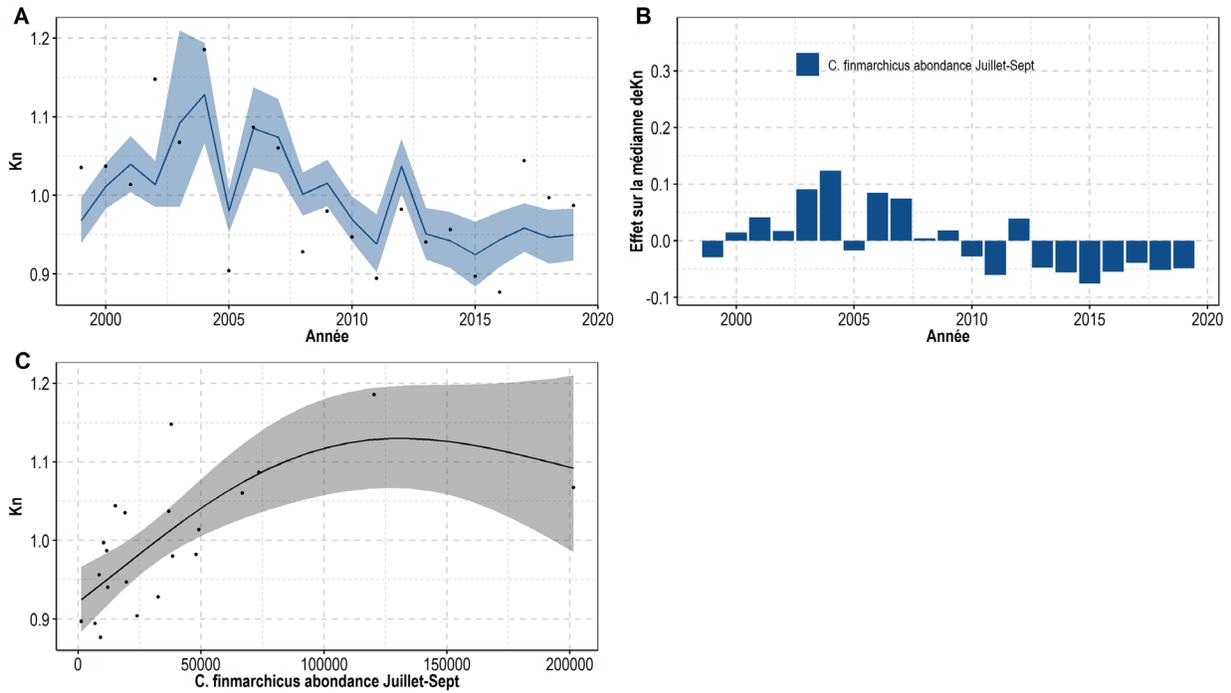


Figure 14. GAM sélectionné pour le Kn en septembre dans le sGSL : A) les Kn observés (cercles noirs) sont superposés aux prédictions du GAM (ligne bleue) et des intervalles de confiance à 95 % sur les prédictions (zone ombrée en bleu); B) contribution de chaque variable au Kn prévu chaque année; C) effet de l'abondance de *C. finmarchicus* de juillet à septembre (ind m^{-2}) sur le Kn . Les zones grises indiquent les intervalles de confiance à 95 %.

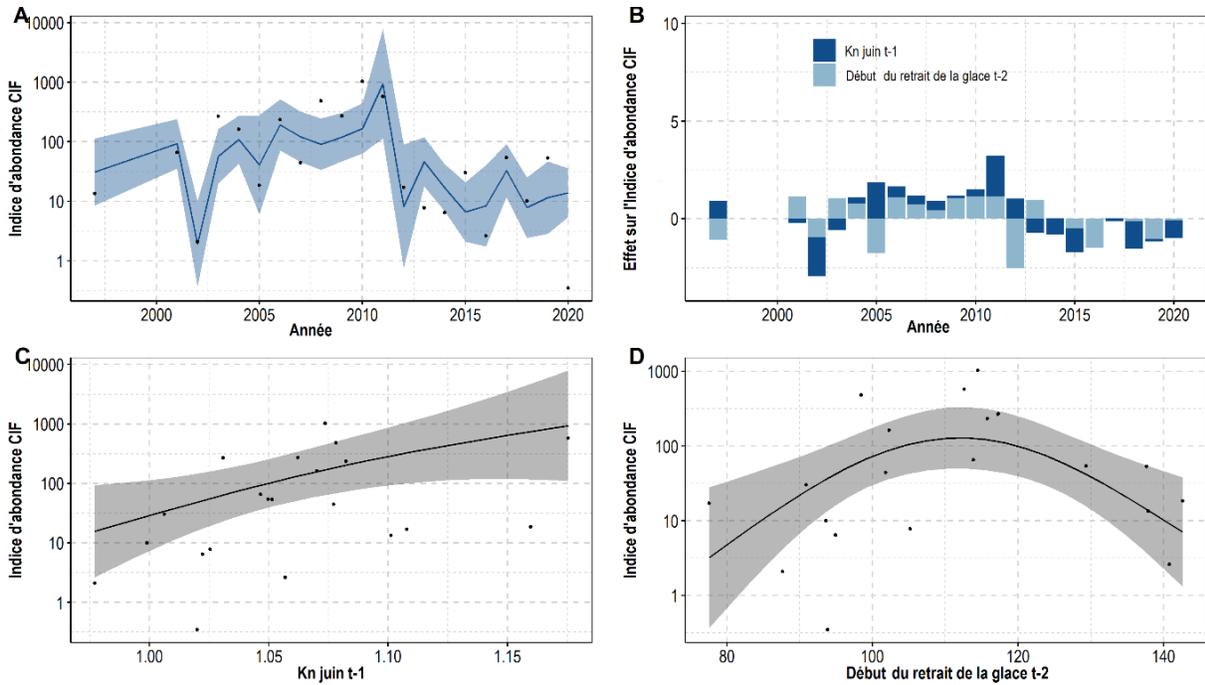


Figure 15. GAM sélectionné pour l'indice de l'abondance du capelan à l'âge de 3 ans dans le neGSL (M3) : A) l'indice d'abondance du capelan (cercles noirs) est superposé aux prédictions du GAM (ligne bleue) et des intervalles de confiance à 95 % sur les prédictions (zone ombrée en bleu); B) contribution de chaque variable à l'indice de l'abondance prévu chaque année; C) effet du Kn en juin à l'âge de 2 ans sur l'indice de l'abondance du capelan; D) effet du retrait des glaces à l'âge de 1 an sur l'indice de l'abondance du capelan. Les zones grises indiquent les intervalles de confiance à 95 %.

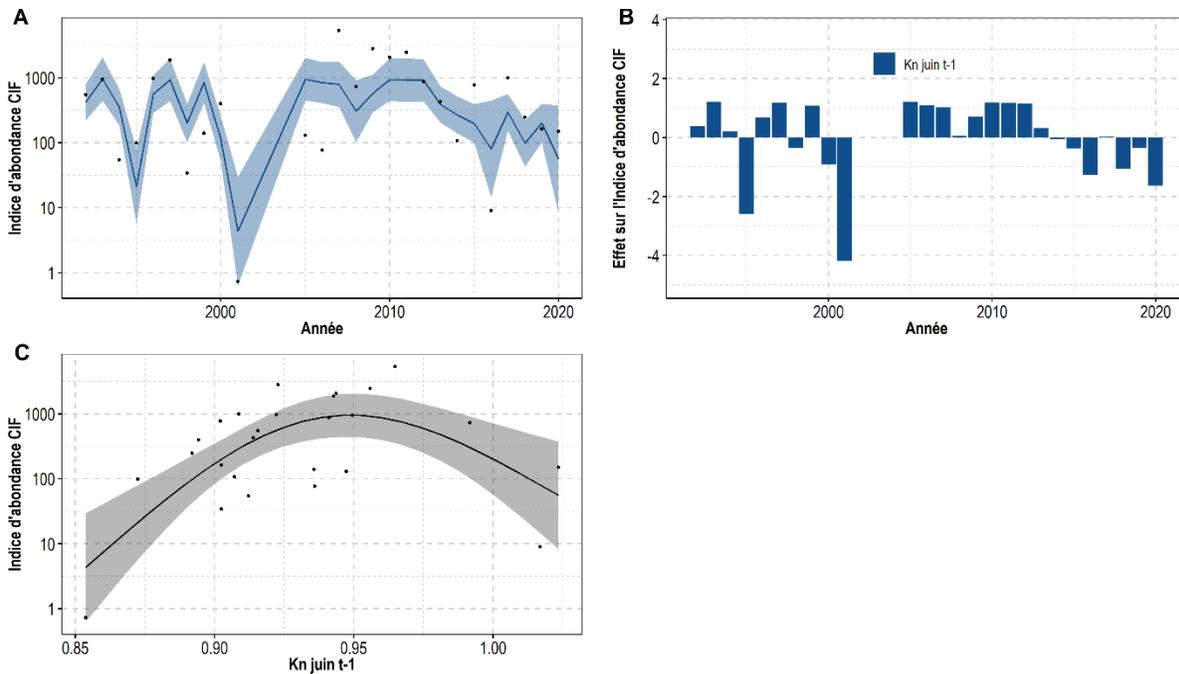


Figure 16. GAM sélectionné pour l'indice de l'abondance du capelan à l'âge de 3 ans dans noGSL (M3) : A) l'indice d'abondance du capelan (cercles noirs) est superposé aux prédictions du GAM (ligne bleue) et des intervalles de confiance à 95 % sur les prédictions (zone ombrée en bleu); B) contribution de chaque variable à l'indice de l'abondance prévu chaque année; C) effet du Kn en juin à l'âge de 2 ans sur l'indice de l'abondance du capelan. Les zones grises indiquent les intervalles de confiance à 95 %.

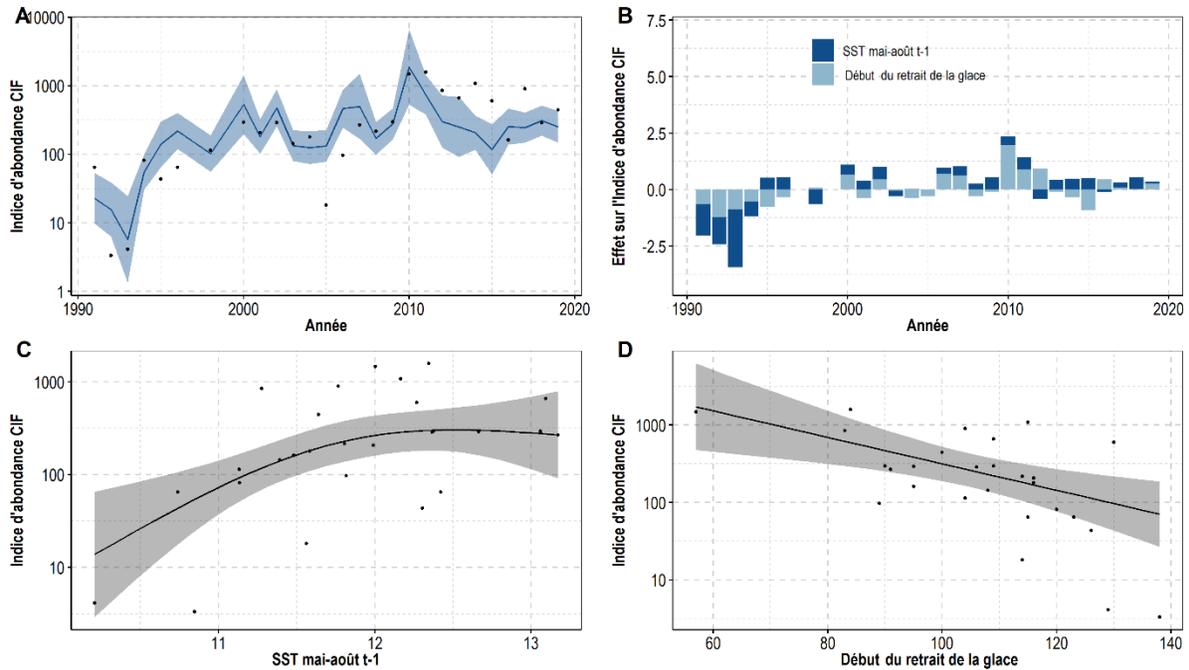


Figure 17. GAM sélectionné pour l'indice de l'abondance du capelan à l'âge de 2 ans dans le sGSL (M2) : A) l'indice d'abondance du capelan (cercles noirs) est superposé aux prédictions du GAM (ligne bleue) et des intervalles de confiance à 95 % sur les prédictions (zone ombrée en bleu); B) contribution de chaque variable à l'indice de l'abondance prévu chaque année; C) effet de la TSM de mai à août à l'âge de 1 an; D) effet du retrait des glaces à l'âge de 2 ans sur l'indice de l'abondance du capelan. Les zones grises indiquent les intervalles de confiance à 95 %.

ANNEXE 1

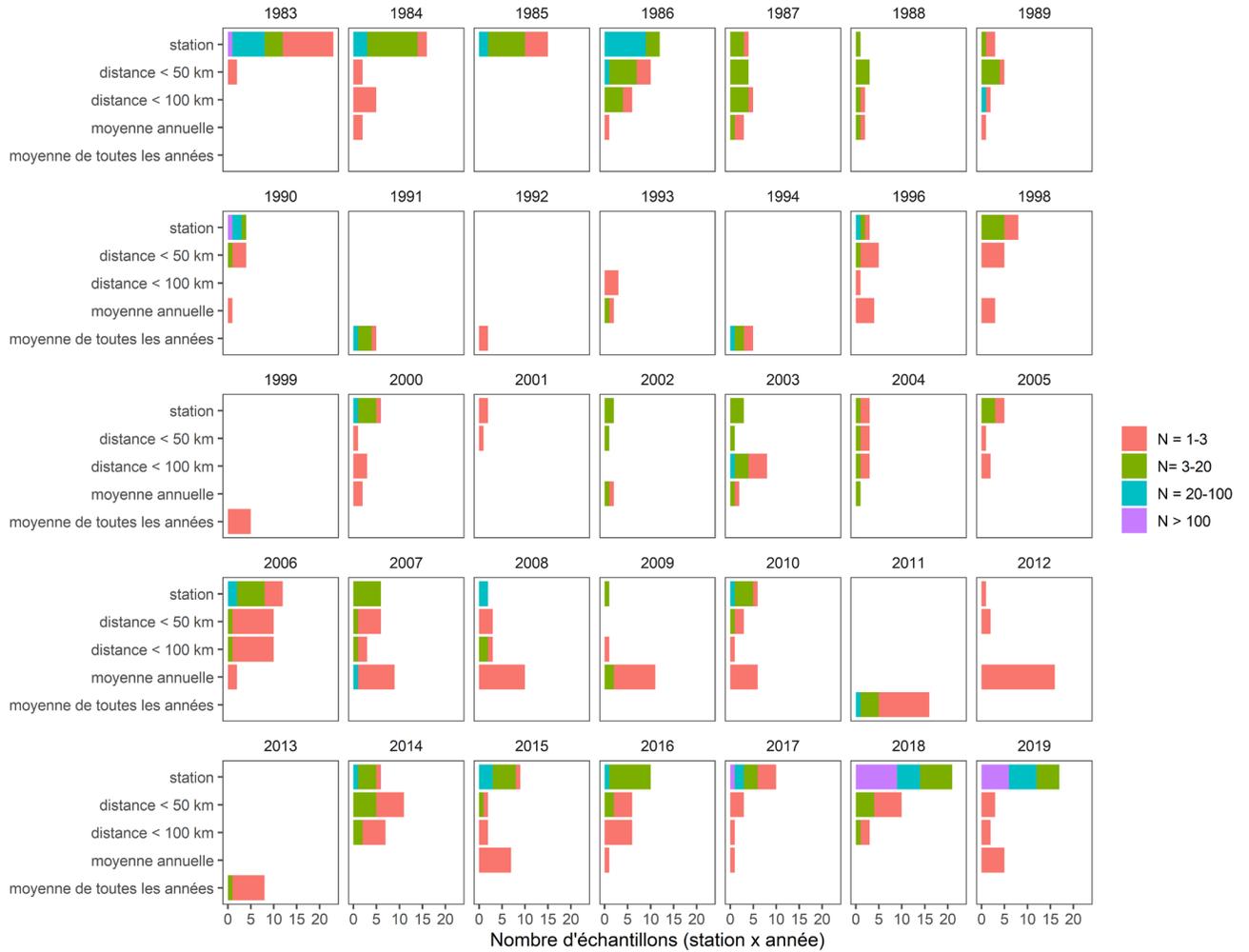


Figure A.1.1. Méthodes (axe des y) pour calculer la date d'éclosion pour chaque station et chaque année. Les stations avec une abondance de 0 ont été omises sur cette figure afin de la rendre plus facile à interpréter. Les stations sont regroupées (codées par couleur) en fonction de l'abondance des larves.

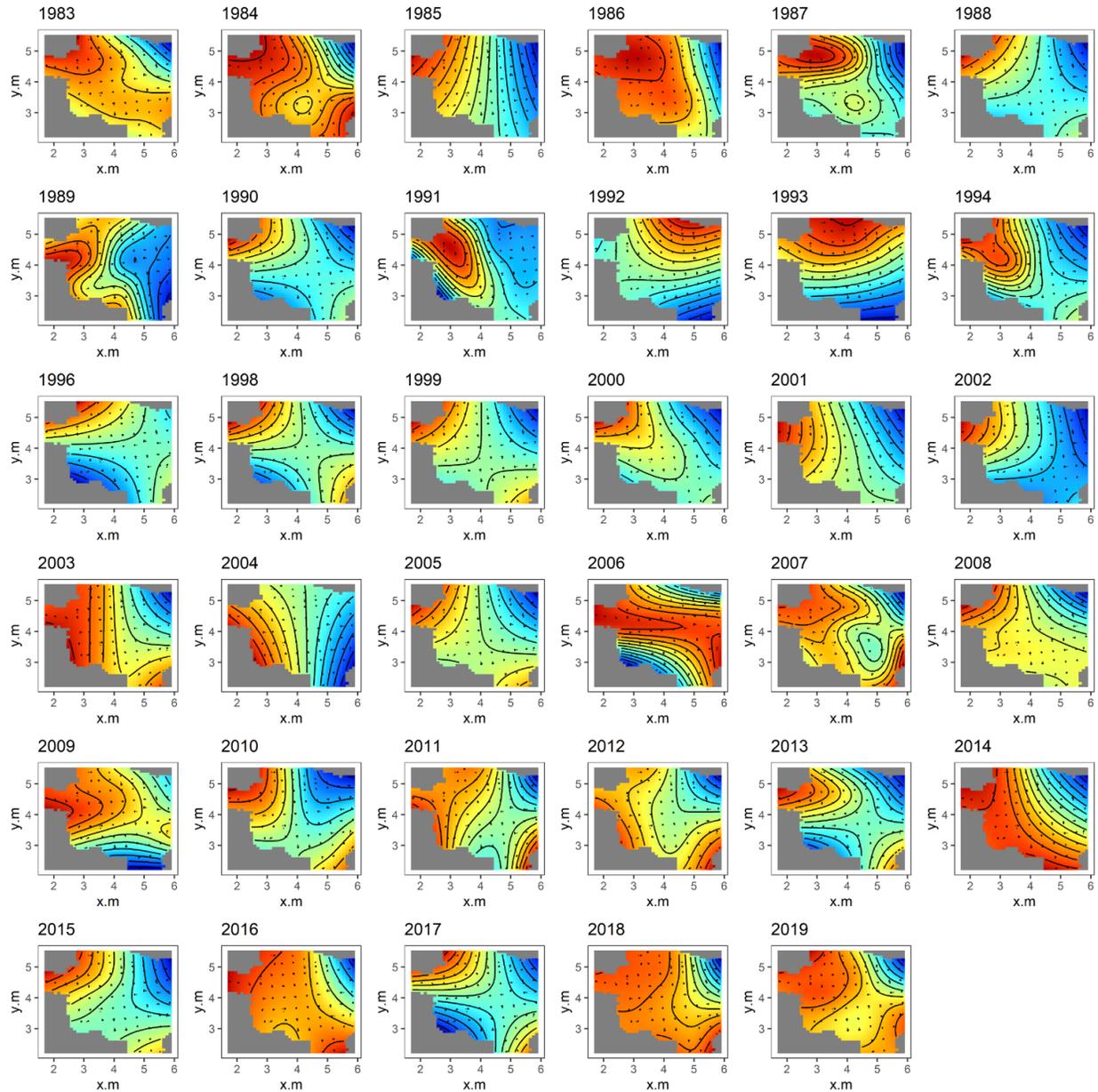


Figure A.1.2. Effet spatial sur l'abondance des larves pour le GAM sélectionné utilisé pour calculer l'indice larvaire. Les effets sont présentés à l'échelle du prédicteur linéaire, le bleu au rouge représentant l'effet négatif à positif sur l'abondance des larves. Points noirs : emplacement des stations, ligne noire : courbes de niveau. D'autres effets de ces GAM sont présentés à la figure A.1.3. Équation du GAM sélectionné : $\text{Log}(Nm-2) \sim te(x.m \times y.m \times \text{année}) + ti(S \text{ date}) + ti(H \text{ date}) + ti(S \text{ date}, H \text{ date})$

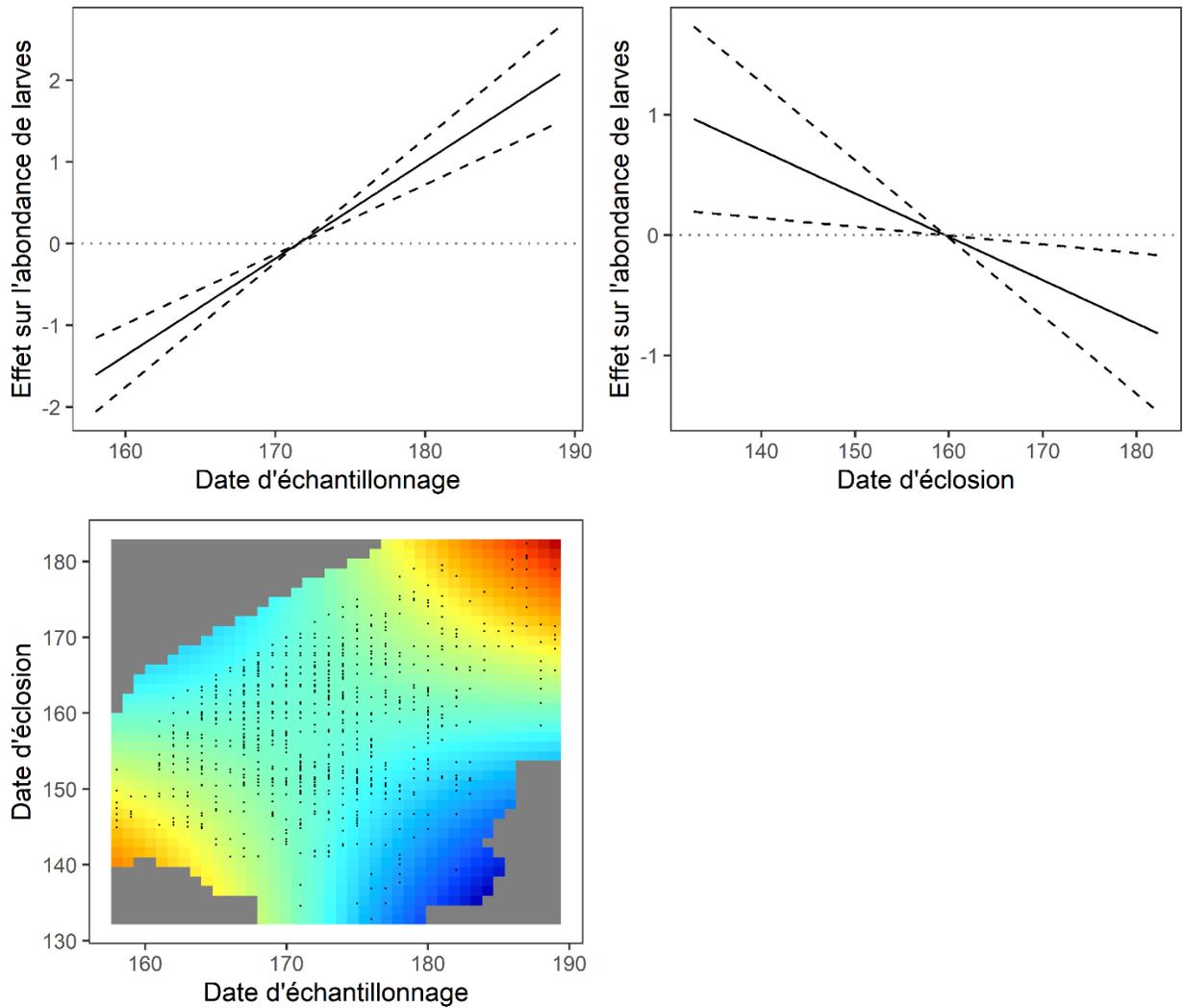


Figure A.1.3. Effet de la date d'échantillonnage et de la date d'éclosion (graphiques du haut) et de leur interaction de produit tensoriel (graphiques du bas) sur l'abondance des larves. Ligne pleine : effet principal; ligne tiretée : 95^e intervalles de confiance; ligne pointillée grise : ordonnée à l'origine. Les points dans le graphique d'interaction représentent des données. Effet négatif à positif de l'abondance = Bleu à rouge. D'autres effets de ces GAM sont présentés à la figure A.1.2. Équation du GAM sélectionné : $\text{Log}(Nm-2) \sim te(x.m \times y.m \times \text{année}) + ti(S \text{ date}) + ti(H \text{ date}) + ti(S \text{ date}, H \text{ date})$

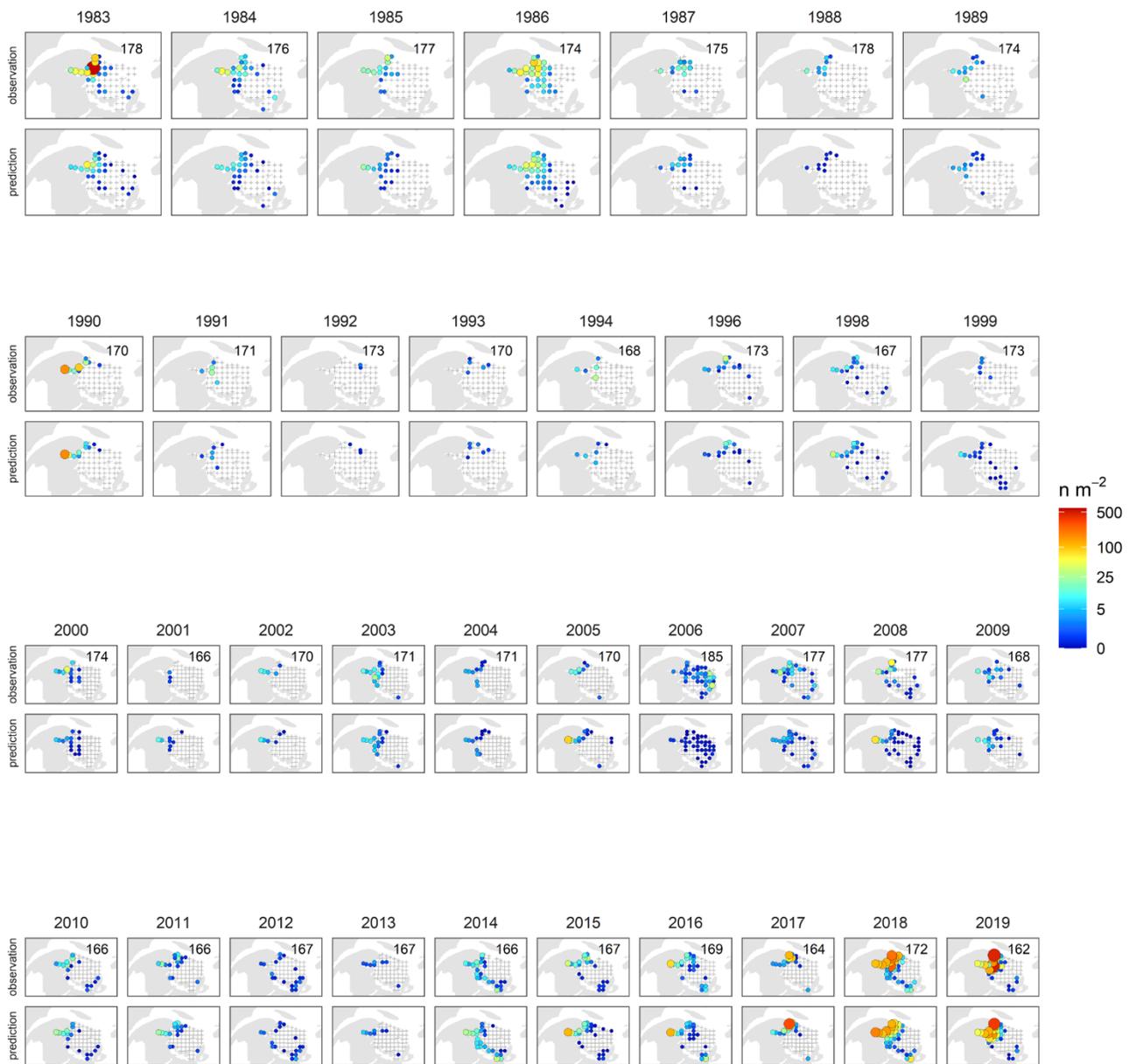


Figure A.1.4. Abondance des larves échantillonnée (graphiques « d'observation » du haut) et abondance normalisée par le GAM (graphiques « de prédiction » du bas) chaque année. Les croix grises représentent l'absence de larves. La couleur et la taille des bulles changent avec la transformation logarithmique de l'abondance des larves. La date d'échantillonnage moyenne pour chaque année est indiquée en haut à droite de chaque carte des graphiques « d'observation ».

ANNEXE 2

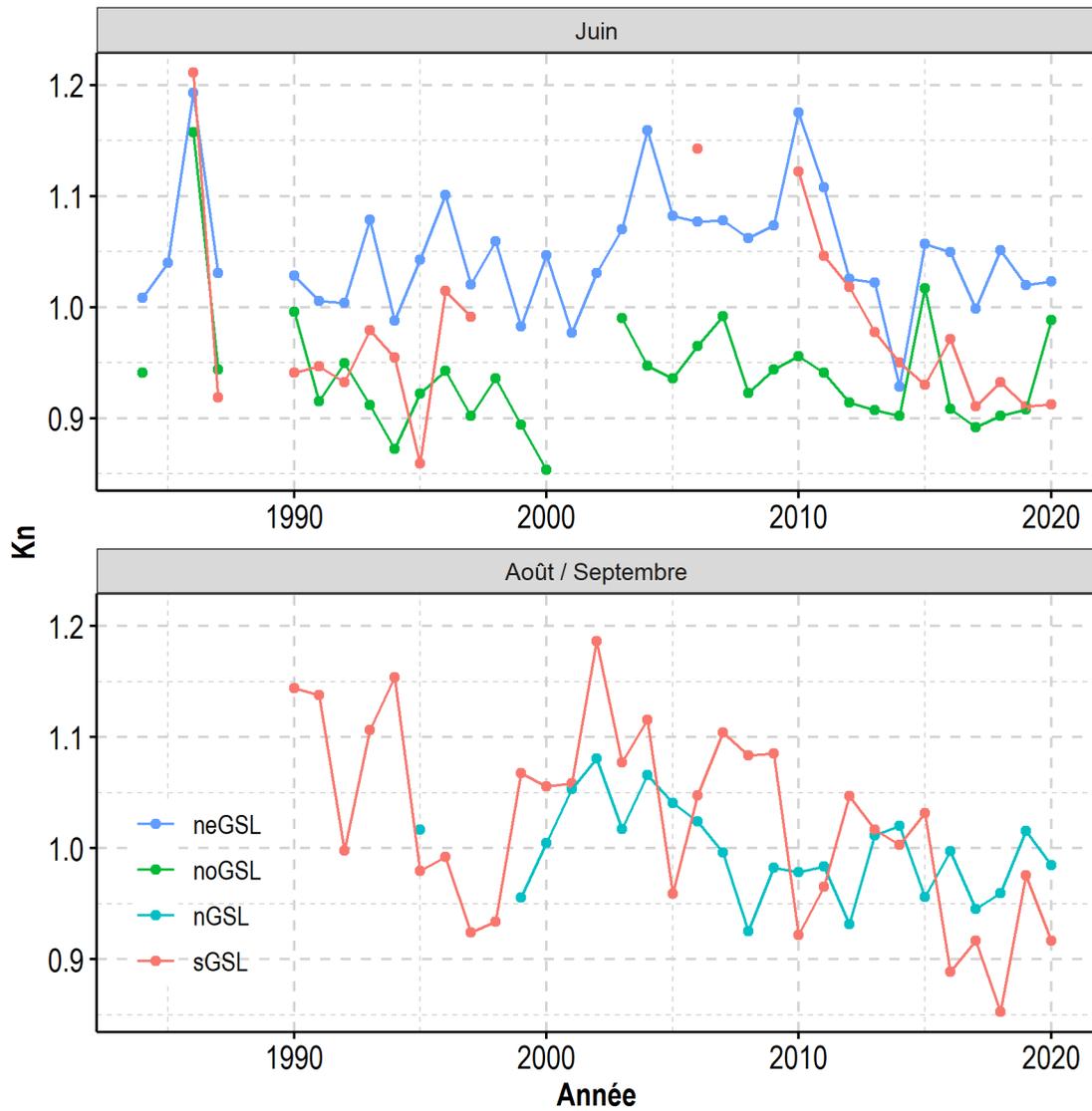


Figure A.2.1. Variation temporelle du Kn normalisé pour juin (prises commerciales) et pour les poissons de moins de 120 mm en août (nGSL) et en septembre (sGSL). Il convient de noter que les données ne sont pas décalées.



Figure A.2.2. Variation temporelle des données environnementales extraites de la matrice de l'approche écosystémique et utilisées dans les modèles d'abondance et de Kn du capelan. Il convient de noter que les séries chronologiques ne sont pas décalées sur cette figure. Le retrait des glaces est exprimée en jour julien, le début du printemps en semaine de l'année, la TSM en °C, l'abondance des copépodes en juin par 10^3 ind m^{-2} (ind m^{-2} de juillet à septembre) et l'indice de développement des copépodes est le rapport entre les stades copépodites. Voir les détails dans le texte.

ANNEXE 3

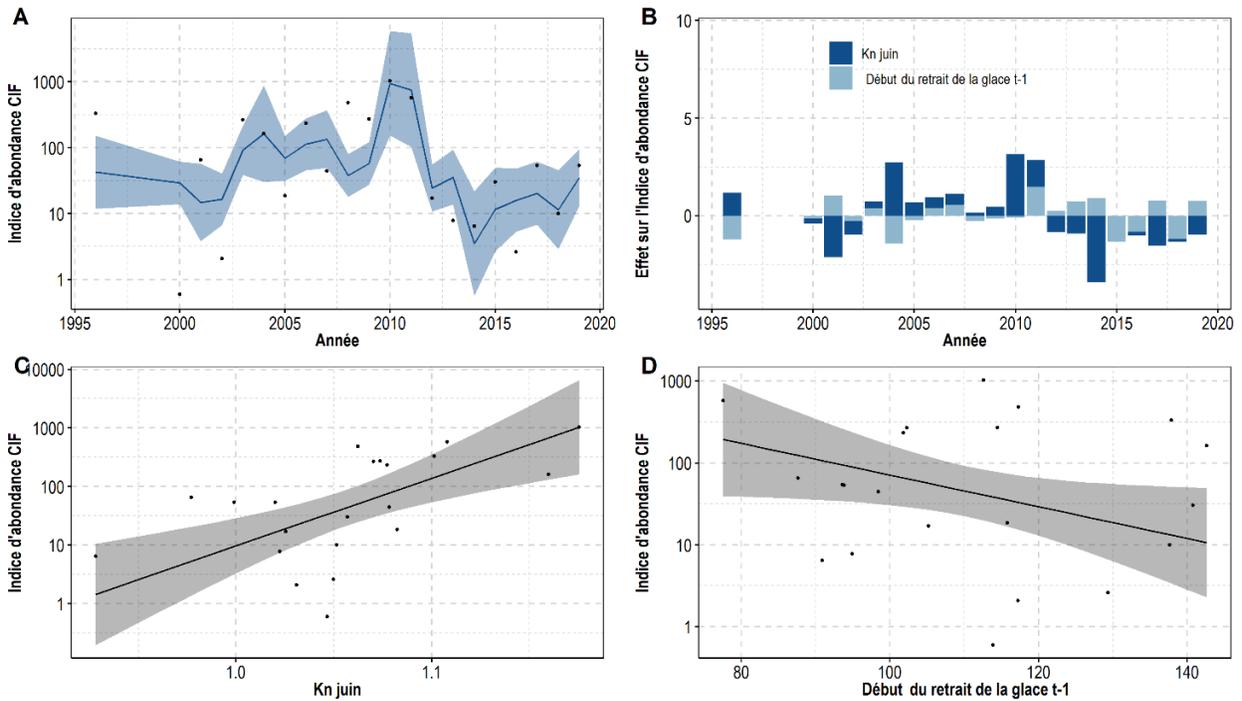


Figure A.3.1. GAM sélectionné pour l'indice de l'abondance du capelan à l'âge de 2 ans dans le neGSL (M2) : A) l'indice d'abondance du capelan (cercles noirs) est superposé aux prédictions du GAM (ligne bleue) et des intervalles de confiance à 95 % sur les prédictions (zone ombrée en bleu); B) contribution de chaque variable à l'indice de l'abondance prévu chaque année; C) effet du Kn en juin à l'âge de 2 ans sur l'indice de l'abondance du capelan; D) effet du retrait des glaces à l'âge de 1 an sur l'indice de l'abondance du capelan. Les zones grises indiquent les intervalles de confiance à 95 %.

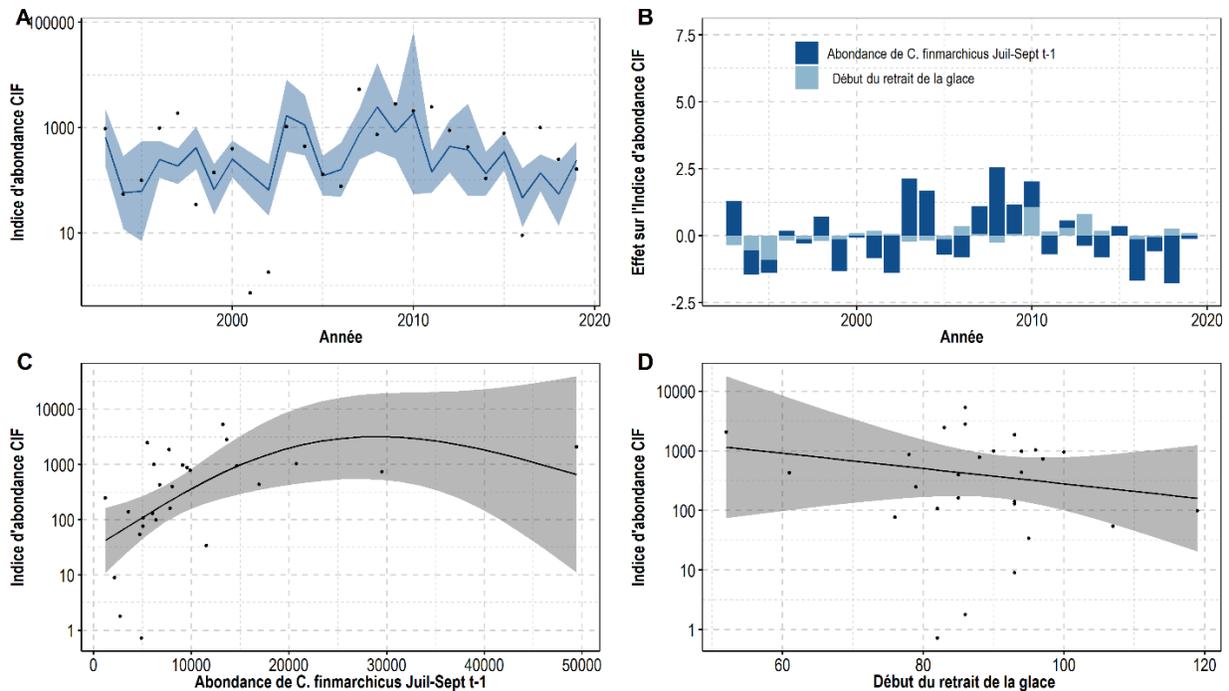


Figure A.3.2. GAM sélectionné pour l'indice de l'abondance du capelan à l'âge de 2 ans dans le noGSL (M2) : A) l'indice d'abondance du capelan (cercles noirs) est superposé aux prédictions du GAM (ligne bleue) et des intervalles de confiance à 95 % sur les prédictions (zone ombrée en bleu); B) contribution de chaque variable à l'indice de l'abondance prévu chaque année; C) effet de *Calanus finmarchicus* de juillet à septembre à l'âge de 1 an; D) effet du retrait des glaces à l'âge de 2 ans sur l'indice de l'abondance du capelan. Les zones grises indiquent les intervalles de confiance à 95 %.

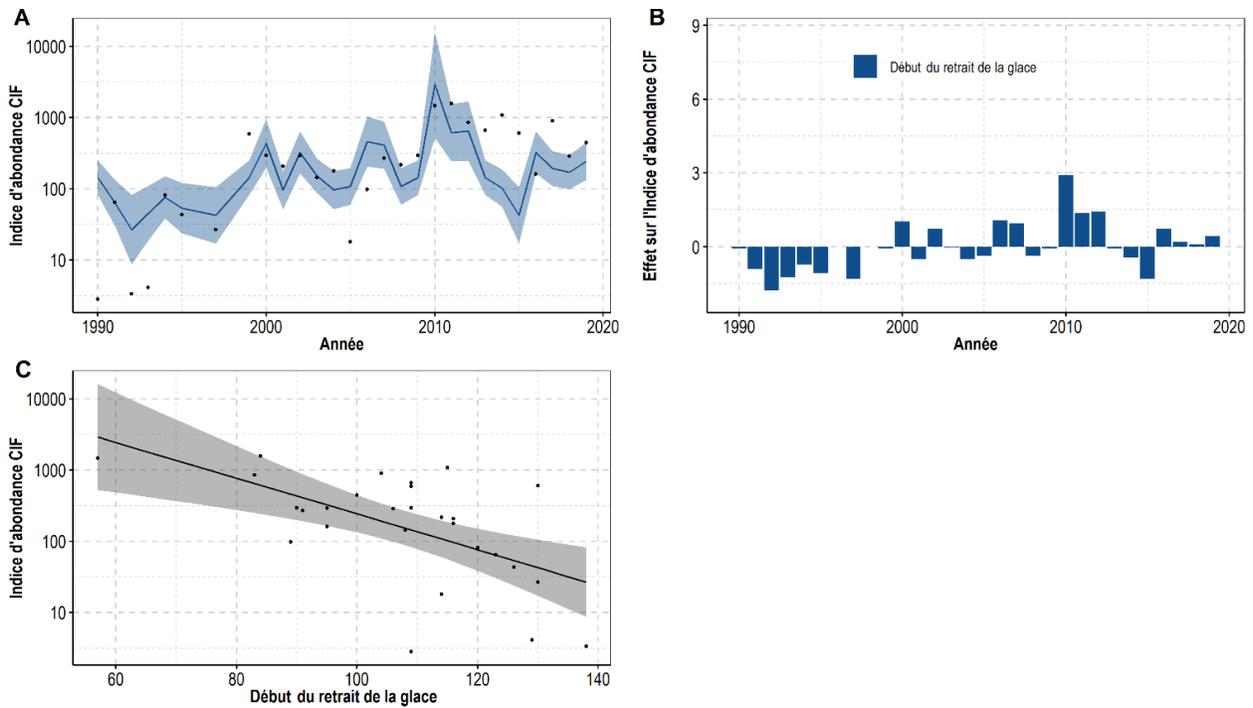


Figure A.3.3. GAM sélectionné pour l'indice de l'abondance du capelan à l'âge de 1 an dans le sGSL (M1) : A) l'indice d'abondance du capelan (cercles noirs) est superposé aux prédictions du GAM (ligne bleue) et des intervalles de confiance à 95 % sur les prédictions (zone ombrée en bleu); B) contribution de chaque variable à l'indice de l'abondance prévu chaque année; C) effet du retrait des glaces à l'âge de 1 an sur l'indice de l'abondance du capelan. Les zones grises indiquent les intervalles de confiance à 95 %.

ANNEXE 4

Tableau A.4.1. Sommaire des GAM pour le Kn du capelan dans le **neGSL**. Les modèles sont triés par AIC et le haut du tableau est présenté. Les modèles sélectionnés présentés dans le tableau 3 sont surlignés en gris. L'effet de chaque prédicteur sélectionné sur la variable de réponse peut être positif (+), négatif (-), en forme de cloche (∩) ou en forme de U (∪). Les effets non significatifs sont indiqués par « n.s. ». Les modèles ont été comparés au AIC lorsqu'ils ont été ajustés à la même série chronologique. Le rendement de chaque modèle est évalué avec le R², la comparaison de l'écart expliqué avec l'auto-amorçage (* pour significativement supérieur à la distribution obtenue par auto-amorçage et « n.s. » sinon) et la corrélation de Pearson entre les valeurs prédites et observées pendant la méthode jackknife. Le poids est le poids Akaike.

Variables de réponse	Années	Prédicteurs	Effet	AIC	ΔAIC	Poids	R ²	auto-amorçage	Jackknife
K Juin	1984-2019	TSM Juin Retrait des glaces	-n.s. -	-100,9	0,0	0,57	0,18	n.s.	0,16
		Retrait des glaces	-	-99,4	1,5	0,27	0,10	n.s.	0,11
		TSM Juin	-n.s.	-96,1	4,8	0,05	0,01	n.s.	-0,12
	2001-2018	Retrait des glaces	-n.s.	-48,0	0,0	0,12	0,13	n.s.	-0,16
		TSM Juin Retrait des glaces	-n.s. -n.s.	-47,3	0,7	0,09	0,20	n.s.	-0,02
		TSM Juin Indice de dév. de <i>C. hyperboreus</i> (début été)	-n.s. +n.s.	-47,1	0,9	0,08	0,19	n.s.	0,12
		Indice de dév. de <i>C. hyperboreus</i> (début été)	+n.s.	-47,0	1,1	0,07	0,08	n.s.	0,05
		TSM Juin	-n.s.	-46,7	1,3	0,06	0,07	n.s.	0,01
		TSM Juin Abondance de <i>C. hyperboreus</i> (début été)	+n.s. -n.s.	-45,9	2,2	0,04	0,13	n.s.	0,10

Tableau A.4.2. Sommaire des GAM pour le Kn du capelan dans le **noGSL**. Les modèles sont triés par AIC et le haut du tableau est présenté. Les modèles sélectionnés présentés dans le tableau 4 sont surlignés en gris. Voir la légende du tableau A.4.1 pour obtenir plus de détails.

Variables de réponse	Années	Prédicteurs	Effet	AIC	Δ AIC	Poids	R ²	auto-amorçage	Jackknife	
K Juin	1987-2019	TSM Juin	-n.s.	-103,9	0,0	0,27	0,02	n.s.	-0,06	
		Début du printemps	+n.s.	-103,8	0,1	0,26	0,01	n.s.	-0,05	
		Retrait des glaces	n.s.	-102,5	1,4	0,14	-0,03	n.s.	-0,47	
		TSM Juin	-n.s.	-101,4	2,5	0,08	-0,01	n.s.	-0,11	
		2003-2018	Début du printemps	^	-60,3	0,0	0,27	0,74	*	0,50
	Abondance de <i>C. hyperboreus</i> (début été)		-							
	Indice de dév. de <i>C. hyperboreus</i> (début été)		∩							
		2003-2018	Début du printemps	^n.s.	-58,9	1,4	0,13	0,45	*	0,61
			Abondance de <i>C. hyperboreus</i> (début été)	-						
			Abondance de <i>C. hyperboreus</i> (début été)	-n.s.	-57,8	2,6	0,08	0,19	n.s.	0,33
K august (nGSL)	1995-2019	TSM Mai-Août	n.s.	-71,6	0	0,37	-0,01	n.s.	-0,32	
		Début du printemps	n.s.	-70,7	0,8	0,24	-0,05	n.s.	-0,51	
		Retrait des glaces	n.s.	-70,7	0,8	0,24	-0,05	n.s.	-0,78	
		1995-2019	TSM Mai-Août	n.s.	-68,6	3,0	0,08	-0,06	n.s.	-0,38
			Retrait des glaces	n.s.						
		1995-2019	Abondance de <i>C. hyperboreus</i> Juil-Sept	n.s.	-67,86	0	0,19	0,03	n.s.	-0,06
			TSM Mai-Août	n.s.	-67,1	0,8	0,13	-0,01	n.s.	-0,32
	Abondance de <i>C. finmarchicus</i> Juil-Sept		n.s.	-67,0	0,9	0,12	-0,02	n.s.	-0,19	

Variables de réponse	Années	Prédicteurs	Effet	AIC	Δ AIC	Poids	R ²	auto-amorçage	Jackknife
		Retrait des glaces	n.s.	-66,3	1,6	0,09	-0,05	n.s.	-0,78
		Début du printemps	n.s.	-66,2	1,6	0,08	-0,05	n.s.	-0,55
		<i>Indice de dév. de C. finmarchicus (début d'été)</i>	-	-65,6	0,0	0,40	0,50	*	0,56
	2001-2018	TSM Mai-Août	n.s.	-62,7	2,9	0,10	0,49	*	0,52
		<i>Indice de dév. de C. finmarchicus (début d'été)</i>	-						

Tableau A.4.3. Sommaire des GAM pour le Kn du capelan dans le sGSL. Les modèles sont triés par AIC et le haut du tableau est présenté. Les modèles sélectionnés présentés dans le tableau 5 sont surlignés en gris. Voir la légende du tableau A.4.1 pour obtenir plus de détails.

Variables de réponse	Années	Prédicteurs	Effet	AIC	Δ AIC	Poids	R ²	auto-amorçage	Jacknife
K Juin	1986-2019	Retrait des glaces	-	-43,8	0,0	0,48	0,23	n.s.	0,40
		TSM Juin	n.s.	-40,8	3,0	0,11	0,21	n.s.	0,1
	2006-2018	Retrait des glaces	-						
		Indice de dév. de <i>C. finmarchicus</i> (début d'été)	+	-35,3	0,0	0,98	0,97	*	0,97
		Indice de dév. de <i>C. hyperboreus</i> (début été)	+						
		Abondance de <i>C. hyperboreus</i> (début été)	+n.s.						
		Indice de dév. de <i>C. finmarchicus</i> (début d'été)	+	-25,8	9,5	0,01	0,97	*	0,95
Indice de dév. de <i>C. hyperboreus</i> (début été)	+								
Indice dév. de <i>C. hyperboreus</i> (début été)	+	-25,2	10,1	0,01	0,78	*	0,84		
K Septembre	1990-2019	TSM Mai-Août	-	-53,4	0	0,76	0,22	*	0,34
		TSM Mai-Août	-n.s.	-50,5	2,9	0,18	0,22	n.s.	0,29
	1999-2019	Retrait des glaces	n.s.						
		Abondance de <i>C. finmarchicus</i> Juil-Sept	+	-52,47	0,0	0,52	0,50	*	0,48
	2001-2018	TSM Mai-Août	n.s.	-49,5	3,0	0,12	0,48	*	0,43
		Abondance de <i>C. finmarchicus</i> Juil-Sept	+						
	2001-2018	Abondance de <i>C. finmarchicus</i> (début été)	^	-35,3	0,0	0,27	0,53	*	0,25
		Abondance de <i>C. finmarchicus</i> (début été)	^	-33,7	1,6	0,12	0,60	*	0,30
		Abondance de <i>C. hyperboreus</i> (début été)	+n.s.						
		Abondance de <i>C. finmarchicus</i> (début été)	^	-33,5	1,8	0,11	0,56	*	0,35
Indice de dév. de <i>C. hyperboreus</i> (début été)	+n.s.								
Abondance de <i>C. hyperboreus</i> (début été)	+	-32,8	2,5	0,08	0,44	*	0,57		

Tableau A.4.4. Sommaire des GAM pour l'abondance du capelan à l'âge de 3 ans (M3) pour le neGSL. Les modèles sont triés par AIC et le haut du tableau et les modèles clés sont présentés. Les modèles sélectionnés présentés dans le tableau 3 sont surlignés en gris. Voir la légende du tableau A.4.1 pour obtenir plus de détails.

Variables de réponse	Années	Prédicteurs	Effet	AIC	Δ AIC	Poids	R ²	auto-amorçage	Jackknife
M3	1997-2020	Indice larvaire t-3 Kn Juin t-1 Retrait des glaces t-2	- + ^	86,3	0,0	0,62	0,58	*	0,40
		Kn Juin t-1 Retrait des glaces t-2	+ ^	88,7	2,4	0,19	0,40	*	0,47
	2004-2020	Indice larvaire t-3	n.s.	75,6	0	0,32	0,26	n.s.	-0,18
		Kn Juin t-1	+n.s.	77,7	2,0	0,12	0,10	n.s.	0,11
		Indice larvaire t-3 Kn Juin t-1 Retrait des glaces t-2	n.s. +n.s. n.s.	77,9	2,3	0,1	0,52	*	0,19
		Indice larvaire t-3 Kn Juin t-1 Retrait des glaces t-2 Abondance de <i>Pseudocalanus</i> début de l'été t-3	- +n.s. ^ n.s.	80,7	5,1	0,03	0,60	*	0,37
		Kn Juin t-1		124,9	0	0,30	0,1	n.s.	0,15
		Kn Juin t-1 Retrait des glaces t-2	+n.s. n.s.	125,1	0,2	0,27	0,18	n.s.	0,24
	1992-2020 ¹								

Tableau A.4.5. Sommaire des GAM pour l'abondance du capelan à l'âge de 2 ans (M2) pour le **neGSL**. Les modèles sont triés par AIC et le haut du tableau et les modèles clés sont présentés. Les modèles sélectionnés présentés dans le tableau 3 sont surlignés en gris. Voir la légende du tableau A.4.1 pour obtenir plus de détails.

Variables de réponse	Années	Prédicteurs	Effet	AIC	Δ AIC	Poids	R ²	auto-amorçage	Jacknife
M2	1996-2019	Kn Juin Retrait des glaces t-1	+ -n.s.	87,2	0,0	0,57	0,37	*	0,55
		Kn Juin		88,7	1,5	0,27	0,26	*	0,43
		Indice larvaire t-2 Kn Juin Retrait des glaces t-1	n.s. + -n.s.	90,4	3,2	0,11	0,39	n.s.	0,36
	2003-2019	Kn Juin Retrait des glaces t-1	+ -	58,9	0	0,53	0,55	*	0,72
		Indice larvaire t-2 Kn Juin Retrait des glaces t-1	n.s. + -	62,3	3,3	0,1	0,61	*	0,45
		Indice larvaire t-2 Kn Juin Retrait des glaces t-1 Abondance de <i>Pseudocalanus</i> début de l'été t-2	n.s. + - n.s.	67,9	8,9	0,01	0,57	n.s.	0,31
		Kn_Juin Retrait des glaces t-1	+ -n.s.	125,0	0,0	0,36	0,24	*	0,40
		Kn_Juin	+	125,1	0,1	0,34	0,21	*	0,37
	1990-2019 ¹	Kn_Juin TSM Juin	+ n.s.	127	2,2	0,13	0,22	*	0,28

Tableau A.4.6. Sommaire des GAM pour l'abondance du capelan à l'âge de 3 ans (M3) pour le **noGSL**. Les modèles sont triés par AIC et le haut du tableau et les modèles clés sont présentés. Les modèles sélectionnés présentés dans le tableau 4 sont surlignés en gris. Voir la légende du tableau A.4.1 pour obtenir plus de détails.

Variables de réponse	Années	Prédicteurs	Effet	AIC	Δ AIC	Poids	R ²	auto-amorçage	Jackknife
M3	1997-2020	Kn Juin t-1	^	71,5	0,0	0,77	0,58	*	0,49
		Kn Juin t-1 Retrait des glaces t-2	^ n.s.	75,2	3,6	0,12	0,56	*	0,47
		Indice larvaire t-3 Kn Juin t-1 Retrait des glaces t-2	+n.s. ^ n.s.	76,8	5,2	0,06	0,60	*	0,61
	1995-2019	Indice larvaire t-3 Kn Juin t-1 Retrait des glaces t-2 Abondance de <i>Pseudocalanus</i> Juil-Nov t-3	n.s. ^ n.s. n.s.	93,5	0	0,84	0,44	n.s.	0,01
	1992-2020	Kn Juin t-1	^	98,9	0,0	0,64	0,46	*	0,49
		Kn Juin t-1 Retrait des glaces t-2	^ n.s.	101,8	2,9	0,15	0,44	*	0,47

Tableau A.4.7. Sommaire des GAM pour l'abondance du capelan à l'âge de 2 ans (M2) pour le **noGSL**. Les modèles sont triés par AIC et le haut du tableau et les modèles clés sont présentés. Les modèles sélectionnés présentés dans le tableau 4 sont surlignés en gris. Voir la légende du tableau A.4.1 pour obtenir plus de détails.

Variables de réponse	Années	Prédicteurs	Effet	AIC	Δ AIC	Poids	R ²	auto-amorçage	Jackknife	
M2	1996-2019	TSM Mai-Août	+n.s.	72,0	0,0	0,43	0,15	n.s.	0,23	
		Kn_Juin	+n.s.	73,3	1,3	0,22	0,09	n.s.	0,15	
		Indice larvaire t-2	-n.s.	74,9	3,0	0,10	0,00	n.s.	0,05	
		Indice larvaire t-2	n.s.							
		Kn_Juin	+n.s.	79,9	7,9	0,01	-0,01	n.s.	0,01	
		Retrait des glaces t-1	n.s.							
	2002-2018	Abondance de <i>C. finmarchicus</i> (début été) t-1	+							
		Retrait des glaces	-n.s.	67,3	0,1	0,33	0,33	n.s.	0,27	
		Indice larvaire t-2	n.s.							
			Kn_Juin	+	79,9	7,9	0,26	-0,01	n.s.	0,01
			Retrait des glaces t-1	n.s.						
	1994-2019	Abondance de <i>C. finmarchicus</i> Juil-Sept t-1	+							
		Retrait des glaces	-n.s.	83,4	0,0	0,92	0,32	*	0,49	
		Abondance de <i>C. hyperboreus</i> Juil-Sept t-1	n.s.							
		Retrait des glaces	-n.s.	89,6	6,2	0,04	0,02	n.s.	0,03	
		Indice larvaire t-2	n.s.							
		<i>C. finmarchicus</i> abundance Jul-Sep t-1	+							
		Retrait des glaces t-1	-n.s.	90,3	6,9	0,03	0,28	n.s.	0,11	
		Abondance de <i>Pseudocalanus</i> Juil-Nov t-2	n.s.							
		Indice larvaire t-2	n.s.							
		Kn Juin	+n.s.							
		Retrait des glaces t-1	-n.s.	94,6	11,2	0,00	0,02	n.s.	0,06	
		Abondance de <i>Pseudocalanus</i> Juil-Nov t-2	n.s.							

Variables de réponse	Années	Prédicteurs	Effet	AIC	Δ AIC	Poids	R ²	auto-amorçage	Jackknife
	1993-2019	Abondance de <i>C.finmarchicus</i> Juil-Sept t-1 Retrait des glaces	+ -n.s.	118,5	0,0	NA	0,25	*	0,44

Tableau A.4.8. Sommaire des GAM pour l'abondance du capelan à l'âge de 2 ans (M2) pour le **sGSL**. Les modèles sont triés par AIC et le haut du tableau et les modèles clés sont présentés. Les modèles sélectionnés présentés dans le tableau 5 sont surlignés en gris. Voir la légende du tableau A.4.1 pour obtenir plus de détails.

Variables de réponse	Années	Prédicteurs	Effet	AIC	Δ AIC	Poids	R ²	auto-amorçage	Jacknife
M2	1991-2019	Kn Septembre t-1 Retrait des glaces	- -	84,6	0,0	0,49	0,59	*	0,69
		TSM Mai-Août t-1 Retrait des glaces	+ -	86,3	1,6	0,22	0,57	*	0,67
		Indice larvaire t-2 Kn Septembre t-1 Retrait des glaces	-n.s. - -	87,7	3,1	0,11	0,61	*	0,67
		Indice larvaire t-2 TSM Mai-Août t-1 Retrait des glaces	n.s. + -	89,5	4,7	0,04	0,57	*	0,63
		Abondance de <i>C. finmarchicus</i> Juil-Nov t-1 Retrait des glaces	-n.s. -n.s.	60,3	0,0	0,7	0,29	n.s.	0,19
	2001-2019	Indice larvaire t-2 Kn Septembre t-1 Retrait des glaces Abondance de <i>Pseudocalanus</i> Juil-Nov t-2	n.s. - -n.s. n.s.	62,9	2,6	0,19	0,46	n.s.	0,28

Tableau A.4.9. Sommaire des GAM pour l'abondance du capelan à l'âge de 1 an (M1) pour le **sgsl**. Les modèles sont triés par AIC et le haut du tableau et les modèles clés sont présentés. Les modèles sélectionnés présentés dans le tableau 5 sont surlignés en gris. Voir la légende du tableau A.4.1 pour obtenir plus de détails.

Variables de réponse	Années	Prédicteurs	Effet	AIC	Δ AIC	Poids	R ²	auto-amorçage	Jackknife	
M1	1990-2019	Retrait des glaces	-	105,7	0,0	0,72	0,31	*	0,47	
		Indice larvaire t-1	+n.s.	107,6	1,9	0,27	0,31	*	0,45	
		Retrait des glaces	-							
			Indice larvaire t-1	+n.s.	116,1	10,4	0,00	0,00	n.s	0,01
	2000-2019	Indice larvaire t-1	n.s.							
		Retrait des glaces	-n.s.	68,3	5,2	NA	0,05	n.s.	0,03	
		Abondance de <i>Pseudocalanus</i> Juil-Nov t-1	+n.s.							