



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 2025/068

Région de Terre-Neuve-et-Labrador

Examen et évaluation des points de référence limites possibles pour le capelan (*Mallotus villosus*) des divisions 2J3KL

Keith P. Lewis, Paul. M. Regular, Mariano Koen-Alonso, Fran Mowbray, Hannah M. Murphy,
Aaron T. Adamack, Christina Bourne

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

Avant-propos

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

Publié par :

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

<http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/>
DFO.CSAS-SCAS.MPO@dfo-mpo.gc.ca



© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre du ministère des Pêches et des Océans, 2025

Ce rapport est publié sous la [Licence du gouvernement ouvert – Canada](#)

ISSN 2292-4272
ISBN 978-0-660-79086-2 N° cat. Fs70-5/2025-068F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Lewis, K.P., Regular, P.M., Koen-Alonso, M., Mowbray, F., Murphy, H.M., Adamack, A.T. et Bourne, C. 2025. Examen et évaluation des points de référence limites possibles pour le capelan (*Mallotus villosus*) des divisions 2J3KL. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2025/068. iv + 38 p.

Also available in English :

Lewis, K.P., Regular, P.M., Koen-Alonso, M., Mowbray, F., Murphy, H.M., Adamack, A.T., and Bourne, C. 2025. Review and Evaluation of Potential Limit Reference Points for 2J3KL Capelin (Mallotus villosus). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2025/068. iv + 35 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iv
INTRODUCTION	1
RENSEIGNEMENTS DE BASE – PRL.....	2
LOIS ET POLITIQUES	2
APPROCHES ET CRITÈRES DU PRL.....	3
CONSIDÉRATIONS/PROBLÉMATIQUES DU PRL	5
Dynamique des populations et cycle biologique	5
Rôle écosystémique.....	6
Longueur de la série chronologique.....	6
APPROCHES DU PRL	10
PROPORTION DE B_{RMD} OU B_0	11
VALEURS DE SUBSTITUTION THÉORIQUES POUR B_{RMD}	11
RECRUTEMENT	11
MÉTHODES HISTORIQUES	12
PRL HISTORIQUES ET EMPIRIQUES, Y COMPRIS LES VALEURS DE SUBSTITUTION POUR B_{RMD} OU B_0	12
ÉCOSYSTÈME	13
DISCUSSION.....	14
COMPARAISON DES APPROCHES VALIDES DU PRL.....	14
COMPARAISON AVEC D'AUTRES INSTANCES	15
SOMMAIRE.....	16
REMERCIEMENTS	16
RÉFÉRENCES CITÉES	17
TABLEAUX	23
FIGURES	28
ANNEXE 1 : APPROCHES NON VALIDES	32
PROPORTION DE B_{RMD} OU B_0	32
Modèles de production excédentaire	32
MÉTHODES HISTORIQUES	33
ANNEXE 2 : APPROCHES QUI N'ONT PAS ÉTÉ APPLIQUÉES	35
PRISES SEULEMENT	35
MODÈLE STRUCTURÉ PAR ÂGE	35
MÉTHODE À INDICATEURS MULTIPLES.....	36
APPROCHES FONDÉES SUR LA LONGUEUR.....	36
ANNEXE 3 : PÉRIODES ET MODÈLES UTILISÉS POUR LES PRL DE LA MORUE ET DU CAPELAN	38

RÉSUMÉ

Les points de référence limites (PRL) sont un outil important pour la gestion des pêches. Au Canada, les PRL sont déterminés pour les stocks de poissons commerciaux conformément aux dispositions relatives aux stocks de poissons (DSP) la *Loi sur les pêches* révisée (L.R.C. (1985), ch. F-14). La détermination d'un PRL solide est particulièrement essentielle pour les espèces de poissons-fourrages en raison de leur valeur commerciale, de la position critique qu'elles occupent dans les réseaux trophiques marins en transmettant l'énergie produite par le plancton aux niveaux trophiques supérieurs et de leur vulnérabilité à la surpêche. L'objectif principal de ce document de recherche est de détailler le processus d'évaluation et de détermination d'un PRL pour le capelan (*Mallotus villosus*) dans les divisions 2J3KL de l'Organisation des pêches de l'Atlantique Nord-Ouest (OPANO; le « capelan des divisions 2J3KL » dans le reste du document), un petit poisson-fourrage à courte durée de vie présent dans l'Atlantique Nord-Ouest. Plus précisément, nous passons en revue les lois et les politiques pertinentes concernant les PRL au Canada, les pratiques exemplaires pour l'établissement et l'évaluation des PRL, les considérations et les problématiques propres au capelan des divisions 2J3KL et à l'écosystème de l'Atlantique Nord-Ouest, ainsi que les ensembles de données disponibles pour ce stock.

Nous avons envisagé une série de PRL potentiels pour le capelan des divisions 2J3KL, notamment des approches plus conventionnelles fondées sur des valeurs de substitution théoriques ou historiques pour la biomasse au rendement maximal durable (B_{RMD}) et la biomasse non exploitée (B_0), le recrutement et les tendances historiques, ainsi que des méthodes plus récentes telles que des approches à indicateurs multiples, des approches basées sur la longueur et des approches écosystémiques. Trois approches répondaient aux critères de faisabilité, de fiabilité et de plausibilité et ont donc été considérées comme valides : $B_{rétablissement}$ d'après le relevé de 1982; une valeur de substitution historique de B_0 fondée sur la valeur médiane de la biomasse du capelan la plus élevée de la série chronologique de relevés (de 1985 à 1990); et une approche écosystémique fondée sur le modèle Capcod (« Capcod » dans le reste du document). En bref, Capcod prédit la biomasse de la morue du Nord (*Gadus morhua*; « morue » dans le reste du document) en fonction de l'indice de la biomasse du capelan des divisions 2J3KL l'année précédente à l'aide d'une approche bioénergétique-allométrique. Capcod a correctement expliqué ces dynamiques ($r^2 = 0,92$) et les diagnostics permettent de penser que les hypothèses du modèle sont valides. Le modèle Capcod a été utilisé pour déterminer un PRL pour le capelan des divisions 2J3KL en fonction de la biomasse du capelan des divisions 2J3KL nécessaire pour que la morue atteigne son propre PRL. Des trois approches valides, le PRL fondé sur le modèle Capcod était clairement le plus solide du fait de son approche mécaniste, de la force de sa relation et de ses diagnostics, ainsi que du fait que le PRL ainsi obtenu est basé sur une approche écosystémique liant la morue à sa proie la plus importante, le capelan. Le PRL du capelan des divisions 2J3KL a été déterminé à 640 kilotonnes (kt) et est cohérent, sur le plan conceptuel, avec les autres principaux stocks de capelan dans la mer de Barents et dans les eaux qui entourent l'Islande.

INTRODUCTION

Les pays et les organismes intergouvernementaux (p. ex. OPANO, Conseil international pour l'exploration de la mer [CIEM]) du monde entier utilisent des points de référence limites (PRL) pour aider à gérer les pêches. Au Canada, les PRL sont déterminés pour les stocks de poissons commerciaux conformément aux dispositions relatives aux stocks de poissons (DSP) de la *Loi sur les pêches* révisée (L.R.C. (1985), ch. F-14). Les dispositions relatives aux stocks de poissons exigent de définir un PRL unique par stock et de déterminer l'état du stock par rapport à ce PRL.

Les PRL sont généralement déterminés pour un seul stock (Barrett *et al.* 2024 Chagaris *et al.* 2020), mais des approches écosystémiques de la gestion des pêches peuvent être envisagées (DFO 2023), surtout si le stock joue un rôle essentiel dans l'écosystème. Les poissons-fourrages peuvent être eux-mêmes importants sur le plan commercial (Alder *et al.* 2008; Cury *et al.* 2000; Pikitch *et al.* 2012), mais ils occupent également une position cruciale dans les réseaux trophiques marins, reliant l'énergie produite par le plancton aux niveaux tropicaux supérieurs (Bakun 2006; Cury *et al.* 2000; Guénette *et al.* 2014). De plus, l'abondance des poissons-fourrages a été liée à la productivité à long terme des oiseaux de mer (Cury *et al.* 2011), et ce sont des proies importantes pour les mammifères marins (Kaschner *et al.* 2006; Pikitch *et al.* 2014) et les espèces de poissons de plus grande taille qui constituent d'importantes pêches commerciales (Guénette *et al.* 2014; Pikitch *et al.* 2014), ce qui donne à penser que les poissons-fourrages sont plus précieux comme proies que comme espèces commerciales (Pikitch *et al.* 2012; Pikitch *et al.* 2014).

Qu'il s'agisse d'un poisson-fourrage ou que l'on prenne en compte des considérations écosystémiques, il peut s'avérer difficile d'élaborer un PRL solide et défendable en raison des variations du cycle biologique, de l'historique du stock et des données disponibles pour un stock. On a donc préparé un vaste éventail d'approches pour déterminer les PRL (Sainsbury 2008; Smith *et al.* 1993). Il est particulièrement important de choisir un PRL solide pour les poissons-fourrages parmi les nombreuses possibilités car en plus de leur valeur commerciale et de leur rôle dans l'écosystème, ils sont vulnérables à la surpêche pour un certain nombre de raisons. Premièrement, la densité des bancs de poissons-fourrages demeure élevée dans une gamme d'effectifs de la population, ce qui peut donner des taux de prise hyperstables (Pikitch *et al.* 2012). Deuxièmement, certaines espèces de poissons-fourrages ont une courte durée de vie et, par conséquent, sont moins résistantes à la troncature de l'âge induite par la pêche (Guénette *et al.* 2014; Pikitch *et al.* 2012). Enfin, les poissons-fourrages ont également tendance à présenter une dynamique stochastique des populations qui est en grande partie déterminée par des processus ascendants (Chavez *et al.* 2003; Peck *et al.* 2021), c'est-à-dire que le recrutement ne dépend pas nécessairement de la densité, ce qui complique la prévision des populations et limite les options de gestion (Guénette *et al.* 2014).

Le capelan (*Mallotus villosus*) est une petite espèce de poisson-fourrage à courte durée de vie (entre 3 et 6 ans) qui présente une dynamique des populations en dents de scie et qui se caractérise par une sémelperité facultative, c'est-à-dire qu'une grande proportion d'adultes vides meurent après la fraie (Shackell *et al.* 1994; Templeman 1948). Le stock de capelan des divisions 2J3KL de l'OPANO (« capelan des divisions 2J3KL » dans le reste du document) s'est effondré en 1991 et ne s'est pas rétabli (Buren *et al.* 2019). Le capelan des divisions 2J3KL est l'espèce de poisson-fourrage la plus abondante sur le plateau continental de Terre-Neuve-et-Labrador (T.-N.-L.) (Buren *et al.* 2014b) et est fait l'objet d'une pêche commerciale (IFMP 2022).

L'objectif principal de ce document est de détailler le processus d'évaluation et de détermination d'un PRL pour le capelan des divisions 2J3KL. Le corps de ce document de recherche est

divisé en deux grandes sections : Renseignements de base et Approches du PRL. La section Renseignements de base commence par un aperçu des lois et des politiques pertinentes. Ensuite, dans la section Approches et critères du PRL, nous passons en revue les pratiques exemplaires pour l'établissement d'un PRL qui ont été élaborées lors d'un processus consultatif national (PCN; DFO 2023) tenu en juin 2022 pour donner suite aux dispositions relatives aux stocks de poissons de la *Loi sur les pêches* révisée (L.R.C. (1985), ch. F-14) et à l'élaboration connexe de PRL pour d'importants stocks de poissons commerciaux. Plus précisément, nous examinons les pratiques exemplaires d'évaluation des PRL à l'aide de trois critères : la faisabilité, la fiabilité et la plausibilité. Enfin, nous étudions les considérations et les problématiques propres au capelan des divisions 2J3KL et à l'écosystème de l'Atlantique Nord-Ouest, ainsi que les avantages et les limites des ensembles de données disponibles pour ce stock. La section Approches du PRL présente les PRL réels qui seraient obtenus à l'aide des diverses approches suivant la même séquence que dans DFO (2023). Les forces et les faiblesses des approches valides du PRL seront discutées.

RENSEIGNEMENTS DE BASE – PRL

LOIS ET POLITIQUES

Le gouvernement du Canada a mis en place un certain nombre de politiques pour assurer la santé des stocks de poissons et la durabilité des pêches. Le Cadre pour la pêche durable (DFO 2022a) est un ensemble de politiques connexes visant à faire en sorte que les pêches canadiennes soutiennent la conservation et utilisent la ressource de manière durable, c'est-à-dire en maintenant des stocks de poissons sains et productifs tout en protégeant la biodiversité et les habitats des ressources halieutiques. L'un des principaux éléments de ce cadre est d'établir une approche de précaution (AP) pour la gestion des pêches (DFO 2009a). Le Cadre de l'AP reconnaît que même lorsqu'elle est adéquate, l'information portant sur les sciences halieutiques est intrinsèquement incertaine et qu'il faut faire preuve de prudence lors de la mise en œuvre de stratégies de pêche afin d'éviter de causer des dommages graves à un stock donné. À cette fin, les points de référence et les zones d'état des stocks sont l'une des principales composantes du Cadre de l'AP. L'état des stocks est divisé entre les zones saine, de prudence et critique, délimitées par des points de référence. Le PRL définit la limite entre les zones de prudence et critique. Plus précisément : « Le PRL correspond à l'état d'un stock au-dessous duquel il risque de subir de graves dommages. À ce niveau de l'état du stock, il pourrait aussi y avoir des répercussions pour l'écosystème et pour des espèces connexes, ainsi qu'une diminution à long terme des possibilités de pêche. » (DFO 2009a).

L'AP a été adoptée en 2009, mais des PRL n'ont pas été élaborés pour tous les principaux stocks commerciaux pour diverses raisons. L'une de ces raisons est simplement le manque de ressources humaines et les demandes concurrentes de temps de personnel, ainsi que le manque de données. Une autre est que de nombreuses méthodes limitées en données, qui sont nécessaires pour un certain nombre de grands stocks, n'ont été mises au point que récemment (Boudreau et Duplisea 2022) et que certaines sont complexes sur le plan analytique (Pons *et al.* 2020). Un PRL pour le capelan des divisions 2J3KL a été proposé lors de la réunion d'évaluation de 2013, mais il n'a pas été accepté parce qu'il n'y avait pas d'estimation de la biomasse du stock reproducteur (BSR; voir plus de détails dans la section Données) et qu'on n'était pas certain de pouvoir utiliser l'indice de la biomasse dans le relevé acoustique printanier (« l'indice de la biomasse » dans le reste du document) pour représenter l'ensemble du stock (DFO 2015). De plus, à ce moment-là, l'évaluation ne comprenait pas de modèle pour projeter les tendances du stock (DFO 2015). En 2019, un modèle de prévision a été intégré à l'évaluation du stock de capelan des divisions 2J3KL pour projeter l'indice de la biomasse dans

le relevé acoustique printanier (Lewis *et al.* 2019). Cette situation, combinée à une meilleure compréhension du rôle du capelan dans l'écosystème et de l'impact de la taille du stock de capelan des divisions 2J3KL sur la communauté de poissons, a permis de renouveler les efforts actuels en vue d'élaborer un PRL pour ce stock (Koen-Alonso *et al.* 2021; OPANO 2021; Regular *et al.* 2022).

S'appuyant sur l'approche de précaution, les révisions apportées à la *Loi sur les pêches* (L.R.C. (1985), ch. F-14) le 21 juin 2019 ont entraîné de nouveaux facteurs à prendre en considération dans la prise des décisions ministérielles et les dispositions relatives aux stocks de poissons. Interprétées dans l'optique du Cadre pour la pêche durable et de la Politique sur l'approche de précaution, les dispositions relatives aux stocks de poissons définissent des objectifs pour l'utilisation durable des stocks, y compris la détermination d'un PRL unique par stock et de l'état du stock par rapport à ce PRL. Un plan de rétablissement doit être rédigé pour les stocks inférieurs à leur PRL. La mise en œuvre des dispositions relatives aux stocks de poissons a donc permis de mettre davantage l'accent sur l'élaboration du PRL, et des ressources ont été allouées afin d'accomplir le travail requis pour atteindre cet objectif pour divers grands stocks (DFO 2021c).

Les PRL pour les 180 stocks déterminés dans l'Enquête sur la durabilité des pêches couvertes par les dispositions relatives aux stocks de poissons ont été élaborés par lots. Le capelan des divisions 2J3KL a été placé dans le deuxième lot (lot 2) de stocks pour lesquels il faut déterminer l'élaboration d'un PRL (DFO 2022d) et est l'un des 10 stocks parmi les 62 stocks du lot 2 qui n'avaient pas de PRL (DFO 2022e). L'inclusion dans le lot 2 était fondée, en partie, sur les commentaires des intervenants indiquant que les poissons-fourrages étaient une priorité. Les autres critères d'inclusion dans le lot 2 étaient que le stock figurait dans l'Enquête annuelle sur la durabilité des pêches (DFO 2022b), qu'il pouvait être décrit géographiquement, qu'il n'était pas géré par l'OPANO et qu'il n'était pas inscrit à l'annexe 1 de la *Loi sur les espèces en péril* (LEP) comme étant en voie de disparition ou menacée.

APPROCHES ET CRITÈRES DU PRL

La vaste gamme d'approches qui ont été élaborées pour déterminer les PRL est attribuable, en partie, aux différences dans les données disponibles pour un stock donné, y compris les indicateurs (une unité de mesure qui renseigne sur un attribut ou une caractéristique du stock, comme la biomasse reproductrice ou simplement la biomasse), la longueur de la série chronologique, le cycle biologique propre à l'espèce, la trajectoire du stock, la variété des modèles de pêche qui ont été élaborés pour tenir compte des variations des facteurs susmentionnés et la mesure dans laquelle un PRL potentiel répond à divers critères (voir le paragraphe suivant). Compte tenu de ces complexités et de l'importance des points de référence pour la gestion des pêches, en particulier des PRL, un certain nombre de guides et d'examens ont été élaborés par des organisations internationales et nationales (Caddy et Mahon 1995; DFO 2023; Sainsbury 2008; Smith *et al.* 1993). Cependant, « il n'existe pas d'indicateur ou de point de référence unique pour évaluer les objectifs relatifs à un dommage grave pour tous les stocks, ni une seule façon d'établir un PRL » [traduction] (Marentette *et al.* en préparation¹).

Compte tenu des complexités et changements législatifs susmentionnés, le MPO a proposé (DFO 2023) six principes de pratiques exemplaires (les « principes » dans le reste du

¹ Marentette, J.R., Barrett, T.J., Cogliati, K.M., Ings, D.W., Ladell, J. et Thiess, M.E. En préparation. Operationalizing Thresholds to Serious Harm: Existing Guidance and Contemporary Canadian Practices. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech.

document, ou Pn° s'il s'agit d'un principe précis) afin d'assurer une élaboration uniforme des PRL. Ces principes proposent, en partie, certains critères qui devraient être pris en considération lors de l'élaboration d'un PRL : les PRL doivent être faisables (P3) et les PRL doivent tenir compte de la fiabilité, de la plausibilité et de l'incertitude (P4). Nous aborderons brièvement les autres principes à la fin de la présente section dans un souci d'exhaustivité, mais ils sont moins pertinents pour le choix d'un PRL pour le capelan des divisions 2J3KL.

Faisable signifie simplement que les données sont disponibles et de qualité suffisante pour que l'on puisse calculer un PRL à l'aide d'une approche donnée. Par exemple, les modèles structurés selon l'âge ne peuvent être appliqués qu'aux stocks pour lesquels on dispose de données sur l'âge et on ne peut utiliser des PRL basés sur les relations stock-recrutement (RSR) que pour les stocks pour lesquels il existe des estimations de la biomasse et du recrutement.

Fiable signifie que « les estimations doivent être d'une fiabilité acceptable (compte tenu de la cohérence, de la variance et du biais) par rapport aux principales incertitudes et hypothèses du cadre de l'avis », c'est-à-dire que le fait qu'il soit possible de calculer un PRL à l'aide d'une approche donnée ne signifie pas qu'il faut le faire si la variance d'une estimation est inacceptable. L'exactitude ou la précision des estimations peut aider à distinguer les approches fiables des approches non fiables.

Plausible signifie que les estimations, les suppositions ou les hypothèses sont cohérentes avec les données empiriques et la théorie de la dynamique des écosystèmes et des populations. Les valeurs du PRL doivent définir le point en dessous duquel le stock subit de graves dommages. Des valeurs trop faibles du PRL signifieront que le stock subit déjà de graves dommages et qu'il pourrait y avoir surpêche. À l'inverse, une valeur trop élevée du PRL signifiera que le stock ne subit pas de dommages graves, mais elle pourrait limiter la pêche et déclencher inutilement un plan de rétablissement en vertu de la nouvelle loi.

Incertitude – La Politique sur l'AP stipule explicitement que « L'incertitude scientifique et l'incertitude liée à la mise en œuvre de l'approche de gestion doivent toutes deux être prises en considération, et les décisions de gestion doivent être pondérées au besoin pour garantir l'application de l'approche de précaution ». Lorsque les principales incertitudes sont déterminées, la fiabilité peut être évaluée. L'incertitude scientifique comprend l'erreur d'observation, l'imprécision ou le biais dans les paramètres du modèle, ainsi que les hypothèses du modèle (Barrett *et al.* 2024; DFO 2023). Par exemple, tous les indices comportent des erreurs d'observation, y compris l'indice de la biomasse du capelan des divisions 2J3KL dans le relevé acoustique printanier (voir la section Données). Pour les paramètres, l'incertitude peut prendre la forme d'estimations de r (taux de croissance intrinsèque) ou de K (capacité de charge) dans un modèle de production excédentaire ou simplement de la variance d'une approximation historique. Pour les hypothèses du modèle, les incertitudes pourraient être la forme de la relation stock-recrutement ou de la courbe de réponse fonctionnelle (voir Approches du PRL). Compte tenu des incertitudes inhérentes à toutes les données sur les pêches, « Le risque approprié dont on doit tenir compte avec ce cadre est la probabilité et la gravité des répercussions des mesures de gestion sur la productivité du stock. » (DFO 2009a).

Les trois premiers critères ci-dessus serviront à classer les différentes approches du PRL comme valides, c'est-à-dire que tous les critères sont remplis. Ces trois critères seront examinés séquentiellement dans l'ordre ci-dessus. Si un critère n'est pas respecté, l'approche sera considérée comme non valide et les critères suivants ne seront pas évalués. L'évaluation

des approches valides sera approfondie en fonction des incertitudes dans les observations, les estimations des paramètres et les hypothèses du modèle, le cas échéant.

En plus des critères précédents, certains aspects des six principes s'appliqueront à tous les PRL proposés dans le cas du capelan des divisions 2J3KL : on utilisera la meilleure information disponible, c'est-à-dire le relevé acoustique printanier, dans tous les cas (P1), l'objectif est de prévenir des dommages graves au stock (P2), la justification du choix du PRL peut changer au fil du temps (P5) et la justification du PRL sera communiquée aussi clairement que possible (P6). En outre, le relevé acoustique printanier est l'indicateur pertinent pour la gestion (P3) et l'erreur d'observation du relevé acoustique printanier s'appliquera à toutes les approches (voir une discussion complète des principes dans DFO 2023).

CONSIDÉRATIONS/PROBLÉMATIQUES DU PRL

Compte tenu de la diversité des approches disponibles pour l'élaboration d'un PRL, ainsi que de certains des aspects uniques du stock de capelan des divisions 2J3KL, de ses programmes de surveillance et de l'écosystème de Terre-Neuve-et-Labrador, le reste de la section Renseignements de base donnera un aperçu des considérations et des problématiques propres à la détermination d'un PRL pour le capelan des divisions 2J3KL, notamment :

1. dynamique des populations, cycle biologique et historique du stock;
2. rôle du capelan dans l'écosystème de l'Atlantique Nord-Ouest;
3. longueur appropriée de la série chronologique à prendre en considération pour le PRL, compte tenu du changement de régime qui s'est produit au début des années 1990;
4. ensembles de données disponibles pour ce stock et leurs limites.

Dynamique des populations et cycle biologique

La dynamique des populations du capelan, et des espèces pélagiques en général, est difficile à modéliser en raison de leur cycle biologique et de la rareté des données à des moments critiques de leur cycle biologique; ces éléments ont une incidence sur les types d'approches du PRL qui peuvent être envisagées. Le capelan a une courte durée de vie et un taux de croissance intrinsèque élevé. Ainsi, les populations peuvent fluctuer considérablement en raison de facteurs ascendants tout au long de leur cycle biologique, comme l'influence de la stratification de la colonne d'eau sur la prolifération printanière et les facteurs qui influent sur la survie des larves (p. ex. le vent), bien que la primauté de ces facteurs puisse changer avec le temps (Buren *et al.* 2014b; Leggett *et al.* 1984; Lewis *et al.* 2019; Murphy *et al.* 2018; Mowbray *et al.* 2023) et soit difficile à prévoir. Il faut également tenir compte du cycle biologique du capelan car, bien que presque tous les capelans d'âge 4 ou + soient matures, la proportion de poissons de trois ans qui atteignaient la maturité avant l'effondrement et la proportion de poissons de deux ans qui l'atteignent après l'effondrement varient considérablement. Cette variation du nombre de reproducteurs matures selon l'âge influence la structure par âge de la population reproductrice qui, toutes choses égales par ailleurs, se répercute sur le nombre et la qualité des œufs produits, les femelles plus grosses produisant davantage d'œufs de plus grande taille (Penton et Davoren 2013; Templeman 1948) et de meilleure qualité (Chambers et Leggett 1996). En général, les œufs plus gros produisent des larves plus grosses avec de plus grandes réserves de sac vitellin, ce qui leur procure habituellement un avantage sur le plan de la survie (Bailey et Houde 1989; Cowan Jr. *et al.* 1996; Dower *et al.* 2009), et la survie du capelan dans les premières semaines de sa vie a été liée au recrutement de l'âge 2 (Murphy *et al.* 2018). La modélisation est encore compliquée par le fait que, même si l'on peut estimer la mortalité naturelle (M) d'une année à l'autre (bien que cela soit difficile dans la pratique, voir

Valeurs de substitution théoriques pour B_{RMD}), il n'existe pas d'estimations de M pendant la migration de fraie. Ainsi, même si la taille du stock reproducteur était connue (voir la section Données), on ignore le nombre de capelans qui migrent et se reproduisent réellement. De plus, la mortalité après la fraie est généralement considérée comme totale pour les stocks de capelan de l'Islande, du Groenland, de l'île Jan Mayen et de la mer de Barents, mais certaines femelles du stock des divisions 2J3KL survivent (Flynn *et al.* 2001). Enfin, on ignore aussi l'impact de la mortalité par pêche (F) sur ce stock, en grande partie parce que la proportion du stock qui fraie est inconnue. Ce que l'on sait, c'est que les pêcheurs capturent une faible proportion de la biomasse totale du capelan par rapport à la consommation estimée des poissons, des phoques et des baleines (OPANO 2021), et que la pêche aux œufs cible non seulement la partie du stock qui est prête à frayer, mais en particulier les poissons les plus féconds, c'est-à-dire les individus plus âgés, plus gros et qui frayent plus tôt (Davoren et Montevecchi 2003).

En bref, la dynamique des populations de capelan des divisions 2J3KL est en grande partie déterminée par des forces ascendantes, la maturité selon l'âge varie avec l'effectif de la population, les phases importantes du cycle biologique ne sont pas échantillonnées et F et M sont inconnues. Tous ces facteurs peuvent limiter la faisabilité ou réduire la fiabilité des résultats des modèles, et restreindre les types d'approches du PRL qui répondent aux critères susmentionnés.

Rôle écosystémique

En tant que poisson-fourrage dominant sur le plateau continental de Terre-Neuve-et-Labrador, le capelan joue un rôle écosystémique qu'il est important de prendre en considération dans la détermination d'un PRL (DFO 2023). La biomasse du capelan est un facteur clé de la dynamique des populations de morues franches (*Gadus morhua*; dans le reste du document, « morue » désignera le stock de morue du Nord, c'est-à-dire les divisions 2J3KL de l'OPANO, mais « morue franche » désignera l'espèce) (Buren *et al.* 2014b; Koen-Alonso *et al.* 2021; Regular *et al.* 2022.). En outre, la biomasse du capelan a été associée à des variations de la fécondité des phoques du Groenland de l'Atlantique Nord-Ouest (*Pagophilus groenlandicus*; Stenson *et al.* 2016), et l'espèce est une proie importante du flétan du Groenland (*Reinhardtius hippoglossoides*; Dwyer *et al.* 2010), des baleines (Gulka *et al.* 2017) et des oiseaux de mer (Buren *et al.* 2012; Montevecchi 2007; Montevecchi *et al.* 2019). Pris ensemble, ces facteurs permettent de penser que le capelan est extrêmement important pour la communauté marine, y compris pour des espèces de poissons commerciaux, et qu'il est donc essentiel de tenir compte du rôle du capelan dans le fonctionnement global de l'écosystème lorsqu'on élabore un PRL pour ce stock. En effet, la proportion d'un paramètre du stock utilisée pour certaines approches du PRL a été augmentée pour les poissons-fourrages afin de prendre en compte leur rôle écosystémique (Sainsbury 2008).

Longueur de la série chronologique

Il est essentiel de choisir la période appropriée, c'est-à-dire la longueur de la série chronologique, pour déterminer un PRL. Une valeur donnée du PRL est appropriée dans le cadre de gestion parce qu'elle est liée à la productivité du stock. Cependant, si la productivité du stock change au-delà des fluctuations prévues autour d'un niveau stable à long terme, il peut être inapproprié d'utiliser la série chronologique complète pour définir un PRL. Par exemple, si un écosystème a d'autres états, c'est-à-dire « deux états ou plus auxquels un écosystème peut persister, dans la même gamme de variables déterminantes » (Ratajczak *et al.* 2018), il est alors possible qu'un PRL valide pour un de ces états ne soit pas valide pour un autre. Les PRL dérivés de données correspondant à un autre état dans lequel un stock est très productif peuvent placer de manière déraisonnable ce même stock dans la zone critique si le système est

passé à un autre état dans lequel le stock est naturellement moins productif, ce qui pourrait limiter inutilement la pêche. À l'inverse, le fait de supposer à tort un autre état de productivité plus faible peut entraîner des réductions inappropriées du niveau du PRL et autoriser la pêche alors qu'un stock subit des dommages graves. C'est pour cette raison que l'AP exige un niveau élevé de preuve de l'existence d'un autre état afin d'éviter un abaissement continu des PRL à mesure que les stocks diminuent (DFO 2009a).

Il existe un consensus général sur le fait que l'Atlantique Nord-Ouest a connu un changement de régime, un changement important observé dans un écosystème qui peut ou non faire passer le système dans un autre état (Ratajczak *et al.* 2018)² et qui a commencé dans les années 1980, mais durant lequel de nombreux stocks de poissons se sont effondrés soudainement et de manière spectaculaire au début des années 1990. Le résultat le plus connu de ce changement de régime est l'effondrement des stocks de poissons de fond (Myers *et al.* 1997; Pedersen *et al.* 2017). L'effondrement de la population de capelans un an plus tôt est moins connu (Buren *et al.* 2019). Sous l'effet de ce changement de régime, la communauté marine est passée d'une biomasse dominée par les poissons de fond dans les années 1980 à une biomasse de mollusques et crustacés (c.-à-d. crabes et crevettes) dans les années 1990 (Koen-Alonso et Cuff 2018; OPANO 2021).

Ce qui est moins clair, c'est si le changement de régime dans l'Atlantique Nord-Ouest a entraîné un passage à un autre état. Pour passer d'un autre état à l'autre, il faut généralement que les perturbations soient, au moins temporairement, suffisamment extrêmes pour pousser le système d'une configuration stable à une autre. Un système dans un autre état reviendra à son état initial/précédent si les conditions s'inversent suffisamment pour induire un retour à l'état initial/précédent. Inversement, l'état d'un système donné ou un système qui ne possède pas d'autres états peut également subir une perturbation grave qui modifiera radicalement sa structure mais, contrairement à un passage à un autre état, le système devrait se rétablir avec le temps. Il est donc possible qu'un changement de régime se produise et entraîne un autre état ou reste dans le même état, bien que celui-ci soit très perturbé (Ratajczak *et al.* 2018).

Étant donné que la longueur de la série chronologique a une incidence importante sur l'établissement d'un PRL et que l'Atlantique Nord-Ouest a connu un changement de régime, il est nécessaire d'évaluer les données probantes pour déterminer, à l'aide d'indicateurs environnementaux, à l'échelle de la communauté et du stock, si le système est dans un autre état ou demeure dans le même état (tableau 1). En général, les tendances disponibles concordent avec les prévisions d'un système à état unique qui se rétablit, bien que certains indicateurs soient ambigus. En bref, certaines tendances environnementales, en particulier celles associées à la température, comme la couverture de glace de mer et les températures de la surface de la mer, ont révélé des changements directionnels distincts dans les 50 dernières années, mais ces tendances ne semblent pas liées à l'effondrement du stock de capelan et de la communauté des poissons de fond (Cyr et Galbraith 2021). Les événements d'eaux froides, comme ceux qui se sont produits au début des années 1990 lorsque la couche intermédiaire froide (CIF) s'étendait presque du fond marin à la surface, étaient des anomalies extrêmes. Une perturbation comme la CIF du début des années 1990 pourrait déclencher un changement de régime, mais en soi, elle ne renseignerait pas sur le type de changement de configuration qu'elle pourrait causer. À l'inverse, des indicateurs environnementaux plus synoptiques, comme l'indice climatique de Terre-Neuve-et-Labrador, qui combine les tendances de dix variables et

² Nous soulignons que le changement de régime, tel qu'il est utilisé dans le cadre de l'AP et d'autres documents, est employé comme synonyme des « autres états ». Nous reprenons les définitions données dans Ratajczak *et al.* (2018) car elles correspondent mieux à la documentation plus générale et diffèrent la transition du système de l'état du système.

commence en 1950, font apparaître des fluctuations distinctes à l'échelle décennale (Cyr et Galbraith 2021) qui correspondent mieux à un seul état. De même, la communauté biologique était dominée par les mollusques et crustacés après le changement de régime intervenu dans les années 1990, jusqu'en 2007 environ. Cette tendance s'est inversée ces dernières années et, bien que les stocks de poissons de fond n'aient pas encore retrouvé leurs niveaux d'avant le changement de régime (Koen-Alonso et Cuff 2018; OPANO 2021), cela correspond également à un seul état. Enfin, à l'échelle du stock, la population de capelans est demeurée à un niveau faible (médiane de l'indice de la biomasse acoustique = 156 kilotonnes [kt]) depuis 1991, bien que le stock ait légèrement augmenté de 2013 à 2015. Cette tendance pourrait confirmer un seul état ou d'autres états. Cependant, les classes d'âge plus jeunes ont augmenté plus rapidement, ce qui s'est traduit par une maturation précoce et une troncature de l'âge, qui est une caractéristique courante des stocks effondrés et laisse entendre une situation à un seul état (Gjøsæter 1998; Mowbray *et al.* 2023).

Le Cadre de l'AP précise « qu'il n'y a aucune attente à retrouver des conditions de haute productivité qui seraient occasionnées naturellement ou par des mesures de gestion ». De plus, on affirme dans DFO (2013b) que « Le fardeau de la preuve devrait reposer sur la démonstration d'une justification selon laquelle un changement de régime s'est produit (autre état), au lieu de mettre l'accent sur le fait que les conditions sont restées constantes ». Bien que l'abondance et la biomasse du stock de capelan soient restées faibles depuis 30 ans, les preuves disponibles sont ambiguës ou confirment l'hypothèse selon laquelle le système est resté dans un seul état et se rétablit lentement. Conformément à l'approche de précaution, un degré élevé de certitude est requis pour utiliser une série chronologique tronquée en vue de déterminer un PRL. C'est pourquoi nous avons utilisé l'ensemble de la série chronologique pour les approches du PRL ci-après.

Données

Un dernier facteur à prendre en considération pour choisir les PRL est la richesse des données ou des séries chronologiques disponibles. La richesse des données est un mélange de la qualité des données, c'est-à-dire de leur exactitude et de leur précision, du nombre de séries chronologiques et de leur durée respective, c'est-à-dire de leur portée. Le chevauchement entre les séries chronologiques déterminera également le type d'approche du PRL qui peut être adopté, par exemple les covariables qui peuvent être utilisées dans un modèle (p. ex. le modèle de prévision du capelan était limité par la série chronologique de l'abondance larvaire; Lewis *et al.* 2019), ou le chevauchement entre ces séries chronologiques et le début de la récolte pour les approches de B_0 (voir ci-après).

Pour les stocks pauvres en données, il n'y a souvent que quelques façons d'établir un PRL et, par conséquent, les options sont alors simples sur le plan analytique (Boudreau et Duplisea 2022; OPANO 2021), mais voir l'examen des points de référence fondés sur la longueur dans Pons *et al.* (2020). Pour les stocks riches en données, bien qu'il puisse y avoir de nombreuses approches possibles, le choix peut également être simple pour peu que l'expertise analytique requise soit disponible, comme une relation stock-recrutement (RSR) dérivée d'un modèle structuré par âge de type état-espace. Pour les stocks qui se situent au milieu du continuum de la richesse des données, parfois appelés « riches en données, pauvres en information », le choix d'une approche pour déterminer les PRL peut être un processus difficile, car de nombreuses options peuvent sembler possibles au départ, mais ne répondent finalement pas aux critères de faisabilité, de fiabilité et de plausibilité. En bref, l'utilité des séries chronologiques pour l'évaluation du stock et la détermination d'un PRL dépendra des limites à l'intérieur des séries chronologiques et entre elles.

Le stock de capelan des divisions 2J3KL est étudié depuis de nombreuses décennies (Buren *et al.* 2014a; Buren *et al.* 2019; Carscadden *et al.* 2001; Davoren et Montevercchi 2003; Gulka *et al.* 2017; Mowbray 2014; Murphy *et al.* 2018; Nakashima 1996; Regular *et al.* 2022; Templeman 1948; Winters 1970) et des séries chronologiques sont donc disponibles pour une diversité de paramètres, notamment l'abondance relative du capelan, la densité larvaire et l'état du capelan. Cependant, bien qu'il existe un certain nombre de séries chronologiques, notamment quatre relevés acoustiques différents, la qualité et la cohérence de ces données et leur applicabilité à la production d'un PRL varient.

Relevé acoustique printanier

Le relevé acoustique printanier de Terre-Neuve-et-Labrador (le « relevé acoustique » dans le reste du document) est le relevé phare des évaluations du stock de capelan des divisions 2J3KL et le principal paramètre pour évaluer ce stock (DFO 2021a). Il est effectué depuis 1982, mais il y a eu quelques années sans relevé ou avec un relevé incomplet. Le relevé acoustique est un relevé hauturier réalisé principalement dans la division 3L de l'OPANO, avec une couverture limitée dans le sud de la division 3K. On suppose que tous les individus matures observés dans le relevé migreront vers les eaux côtières pour frayer au cours des mois suivants.

Cependant, le relevé acoustique présente plusieurs limites. Premièrement, il ne s'agit pas d'une mesure de la biomasse qui survit jusqu'à la fraie, mais plutôt de la biomasse avant la fraie. Deuxièmement, comme pour de nombreux relevés indépendants de la pêche, il existe un décalage d'échelle entre le relevé et l'aire de répartition du stock (Ings *et al.* en préparation³), c'est-à-dire que le relevé acoustique ne permet pas de recenser l'ensemble de la population puisque, historiquement, les relevés au nord de la division 3L de l'OPANO étaient difficiles en raison de la glace de mer printanière. De plus, les variations interannuelles de la répartition spatiale du stock de capelan peuvent influencer la proportion du stock qui chevauche la zone du relevé acoustique (mais voir le paragraphe suivant). Troisièmement, le relevé acoustique était initialement un relevé de la partie essentiellement non migratrice du stock, composée surtout de poissons immatures d'âge 2 et d'un nombre variable de poissons immatures et d'âge 3 arrivant à maturité, ainsi que de certains poissons matures d'âge 4 ou 5; la capturabilité des poissons d'âge 1 dans le relevé est généralement faible en raison de la sélectivité des engins. En outre, avec l'effondrement de la population en 1991, la structure par âge du stock a évolué vers des poissons plus jeunes, c'est-à-dire que les poissons d'âge 6, puis d'âge 5 ont largement disparu au fil du temps. Le relevé est maintenant composé en grande partie d'un nombre variable de poissons immatures et d'âge 2 arrivant à maturité, ainsi que de poissons matures d'âge 3 et de rares poissons d'âge 4 ou +. C'est pourquoi le relevé acoustique est considéré comme un indice du stock et non comme une estimation de la biomasse totale du stock (Mowbray 2014).

Cependant, certains signes montrent que le relevé acoustique est un indicateur utile de l'état du stock. La biomasse du capelan dans les divisions 2J3KL, la zone complète du stock, tirée du relevé plurispécifique d'automne du MPO (le « relevé plurispécifique » dans le reste du document), est corrélée à l'indice de la biomasse de l'année suivante (ρ de Spearman = 0,46; valeur p = 0,04; période évaluée : de 1995 à 2020). Même si le relevé plurispécifique est loin d'être idéal pour estimer les poissons pélagiques comme le capelan, les relevés au chalut de fond étant connus pour sous-estimer la biomasse des espèces pélagiques, il peut tout de même permettre de suivre les changements majeurs de la biomasse au fil du temps. La cohérence

³ Ings, D.W., Marentette, J.R., Thiess, M.E. et Barrett, T.J. En préparation. Considerations for Stock Structure and Management Scale Under the Fish Stocks Provisions. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech.

générale du signal temporel entre ces deux relevés donne du crédit à l'idée que le relevé acoustique, malgré sa portée spatiale plus limitée, peut effectivement permettre de suivre les variations du stock. De plus, le relevé acoustique, en supposant qu'il représente raisonnablement l'ordre de grandeur du stock, s'est avéré une représentation efficace du capelan comme facteur d'un modèle bioénergétique-allométrique de la biomasse de la morue du Nord (Koen-Alonso *et al.* 2021). Enfin, dans la plupart des années du relevé acoustique, on constate une corrélation raisonnable entre les poissons d'âge 2 et les poissons d'âge 3 l'année suivante, ce qui laisse entendre que les cohortes se suivent dans le temps et, en conjonction avec ce qui précède, que le relevé reflète certains aspects de la dynamique des populations de capelans des divisions 2J3KL (mais voir le paragraphe suivant).

Deux problèmes de données ont été cernés dans les valeurs du relevé acoustique. Tout d'abord, les estimations de la biomasse du relevé acoustique ont été recalculées à l'aide d'une méthodologie standard. Bien que ces corrections concernent principalement 2014 et 2015 (Mowbray *et al.* 2023), les estimations de la biomasse ont légèrement varié d'autres années, mais elles se situaient largement dans l'incertitude des estimations de l'indice de la biomasse. L'autre problème des données est que certaines cohortes ne se suivent pas bien, c'est-à-dire qu'il y a trop de poissons d'âge 3 l'année $t+1$ compte tenu du nombre de poissons d'âge 2 l'année t . Ce problème est particulièrement marqué entre 2010 et 2011, lorsqu'on a observé beaucoup plus de poissons d'âge 3 en 2011 que de poissons d'âge 2 en 2010 (DFO 2013a). Cette observation, prise avec plusieurs autres relevés qui ont trouvé très peu de capelan, donne à penser que l'estimation de la biomasse acoustique en 2010 était faible par rapport à la taille du stock.

Autres ensembles de données et analyses

Trois autres séries chronologiques de relevés acoustiques sont disponibles pour le capelan des divisions 2J3KL : un relevé d'automne canadien, ainsi qu'un relevé de printemps et d'automne mené par l'ancienne Union des républiques socialistes soviétiques (URSS). De même, d'autres séries chronologiques sont disponibles pour d'autres aspects du cycle biologique du capelan, comme la densité larvaire. Cependant, aucune de ces séries chronologiques n'a été incluse dans l'élaboration d'un PRL pour le capelan en raison de préoccupations entourant leur capacité à suivre la dynamique des populations de capelans, leur applicabilité au stock ou des redondances avec le modèle de prévision du capelan (voir les annexes 1 et 2 pour obtenir plus de détails sur les séries chronologiques et les raisons pour lesquelles elles n'ont pas été incluses).

Nous avons effectué toutes les analyses dans la version 4.2.2 du programme R (R Core Team 2022) à l'aide de RStudio (version 2022.07.2). Toutes les données et le code des analyses de ce document sont disponibles sur [Github](#), à l'exception des analyses de la section Écosystème, qui ont été réalisées indépendamment de la plupart des travaux décrits dans le présent document et avant le début de ceux-ci. Deux tableaux de bord entièrement interactifs explorant la série chronologique du capelan des divisions 2J3KL et les approches du PRL sont disponibles sur le site Github (Regular *et al.* 2020).

APPROCHES DU PRL

Les catégories de PRL sont brièvement décrites ici, y compris si elles répondent aux critères établis dans DFO (2023) – voir les définitions, les méthodes d'estimation, les liens avec les dommages graves et les avantages et inconvénients de chaque approche dans Barrett *et al.* 2024. Les approches n'ont été considérées comme valides que si elles répondaient à tous les critères (Table 2). Les approches qui ne répondaient pas aux critères sont indiquées dans la présente section et décrites plus en détail à l'annexe 1. Les approches qui ont été envisagées,

mais qui n'ont pas été utilisées, ou qui n'ont pas été explorées en détail, sont décrites à l'annexe 2. Toutes les approches ci-après supposent que l'indice de la biomasse est une approximation raisonnable de la biomasse du stock pour les raisons présentées dans la section Relevé acoustique printanier précédente.

PROPORTION DE B_{RMD} OU B_0

Pour les stocks riches en données, les points de référence sont souvent définis en fonction de la proportion de B_{RMD} , la biomasse qui produit le rendement maximal durable, ou de B_0 , la biomasse moyenne à l'équilibre à long terme du stock en l'absence de pêche qui peut être considérée comme une valeur de substitution de (K). Ces valeurs peuvent être obtenues à l'aide d'un modèle statistique de population tel qu'un modèle structuré par âge, un modèle de type différence-délai ou un modèle de production excédentaire.

Deux tentatives majeures ont été faites pour modéliser la dynamique des populations de capelans. La première était un modèle structuré par âge qui incorporait des covariables environnementales connues pour être utiles pour prédire la biomasse du capelan (c.-à-d. le modèle de prévision, Lewis *et al.* 2019), mais il n'a pas été terminé à temps pour l'évaluation de 2023 (voir les détails à l'annexe 2). En second lieu, nous avons ajusté les divers relevés acoustiques et les données sur les débarquements avec un modèle bayésien de production excédentaire de type état-espace à l'aide du progiciel JABBA (Winker *et al.* 2018). Bien que faisable, cette approche a été jugée peu fiable, car l'erreur de processus expliquait la majeure partie de la variation des données (voir tous les détails à l'annexe 1).

VALEURS DE SUBSTITUTION THÉORIQUES POUR B_{RMD}

$F_{X\%RPF}$ est le taux de mortalité par pêche qui donne un ratio de potentiel de frai (RPF) de X % (c.-à-d. X % de la BSR par recrue non exploitée, où X est souvent 40 %). Bien que l'on utilise souvent $F_{X\%RPF}$ comme valeur de substitution pour F_{RMD} , la biomasse à l'équilibre à $F_{X\%RPF}$ peut servir de valeur de substitution pour B_{RMD} si l'on suppose la biomasse à l'équilibre à une valeur constante de F . Cependant, il faut disposer d'estimations de M et de la sélectivité pour pouvoir estimer $F_{X\%RPF}$. Bien qu'inconnue, la sélectivité peut être tirée de l'avis d'experts. De plus, on peut obtenir une estimation brute de M en estimant Z (mortalité totale) à l'aide d'approches bien établies (Hilborn et Walters 1992) et en soustrayant une quantité constante en supposant que F est faible, p. ex. de 0,1. Cependant, la variabilité de ces estimations était très élevée (ET = 0,64) pour les classes d'âge plus jeunes et il y a de nombreuses années sans estimations pour les classes d'âge plus âgées en raison de la troncature de la structure par âge de ce stock. Cette approche n'était donc pas faisable.

RECRUTEMENT

Un PRL peut être établi à partir des seuils où la surpêche du potentiel reproducteur peut être déterminée (X % R_{max}), c'est-à-dire lorsque la biomasse est suffisamment faible pour que le recrutement soit altéré, par exemple la morue du Nord et la morue de la sous-division 3Ps (DFO 2011, 2020).

Nous avons exploré la relation stock-recrutement à l'aide des courbes standard de Beverton-Holt (BH) et de Ricker (figure 1). Ces relations stock-recrutement ont été ajustées à une valeur de substitution de la BSR, c'est-à-dire les poissons matures dans le relevé acoustique.

Cependant, la variance des courbes de BH et de Ricker était très grande pour tous les ensembles de données et les différences dans un PRL potentiel (50 % R_{max}) utilisant ces approches étaient également importantes (BH = 660 kt; Ricker = 387 kt). En conclusion, ces approches sont faisables, mais pas fiables.

MÉTHODES HISTORIQUES

Les méthodes historiques utilisées pour déterminer un PRL sont simples sur le plan conceptuel et abordent directement les problèmes d'anticompensation. Il existe trois méthodes historiques : B_{perte} est la plus faible taille du stock observée dans la série chronologique de la biomasse, $B_{rétablissement}$ est la biomasse la plus faible observée qui a produit un recrutement qui a mené au rétablissement du stock et B_{min} est la biomasse la plus faible observée à partir de laquelle on a constaté un rétablissement jusqu'à la moyenne ou une autre biomasse minimale qui a produit un « bon » recrutement. Ces méthodes supposent des paramètres de productivité stationnaires dans le temps.

Ces méthodes peuvent reposer sur un indice de la biomasse ou sur des valeurs dérivées du modèle et sont utiles lorsque la dynamique du stock est inconnue. Pour le présent document, nous n'examinerons que les valeurs fondées sur l'indice de la biomasse, car nous n'avons pas de modèle qui couvre toute l'aire de répartition historique de ce stock.

B_{perte} et B_{min} n'ont pas été considérées comme des approches valides en raison de problèmes de fiabilité (voir l'annexe 1). $B_{rétablissement}$ était basé sur le relevé acoustique de 1982, qui avait un indice de la biomasse de 446 kt (figure 2) et a mené à la biomasse observée la plus élevée de la série chronologique de 1985 à 1990 (maximum de 5 783 kt et médiane de 3 705 kt). La valeur de l'indice de la biomasse de 1982 n'était pas traditionnellement utilisée dans les évaluations des stocks de capelan parce que ce relevé a été effectué environ un mois plus tôt que le reste de la série chronologique et qu'il n'a pas été possible de calculer les intervalles de confiance en raison de problèmes de disponibilité des données. Cependant, la valeur du relevé de 1982 a été examinée et jugée acceptable en raison de sa couverture spatiale, qui était semblable à celle du relevé acoustique printanier habituel effectué en mai, et parce que le poids des poissons en avril 1982 était comparable ou supérieur à celui des poissons échantillonnés lors des relevés acoustiques suivants en mai. De ce fait, même si la valeur de la biomasse de 1982 est probablement sous-estimée en raison de la période, le relevé a été jugé acceptable pour la série chronologique. Les valeurs pour 1983 et 1984 n'ont pas été acceptées en raison de la période plus précoce du relevé (également en avril) et de la couverture spatiale considérablement réduite par rapport au relevé acoustique printanier habituel de mai. $B_{rétablissement}$ est faisable, fiable et plausible.

PRL HISTORIQUES ET EMPIRIQUES, Y COMPRIS LES VALEURS DE SUBSTITUTION POUR B_{RMD} OU B_0

Lorsque la dynamique des populations est inconnue, les indicateurs historiques ou empiriques peuvent inclure une certaine mesure de la tendance centrale de la biomasse ou de l'abondance au cours d'une période productive de la série chronologique. Selon la situation, cette période productive peut être considérée comme B_{RMD} ou B_0 . Pour le capelan des divisions 2J3KL, la période de 1985 à 1990 peut être une valeur de substitution raisonnable de B_0 pour deux raisons. Tout d'abord, il y avait historiquement une pêche côtière du capelan comme aliment, appât et engrais, mais elle aurait eu peu d'impact sur la taille du stock parce que très peu de poissons étaient débarqués. Ensuite, il y a une pêche commerciale depuis 1972 (Mowbray *et al.* 2023), mais le stock affichait un indice de la biomasse élevé à la fin des années 1980 après des niveaux de pêche relativement importants dans les années 1970. Compte tenu de sa variabilité de 1985 à 1990, il est possible que ce stock ait atteint ou dépassé sa capacité de charge et une médiane de ces valeurs pourrait donc représenter une estimation raisonnable de B_0 . Cela semble plus probable, plutôt que cette période soit une valeur de substitution de B_{RMD} , ce qui suggérerait une capacité de charge encore plus élevée et que les niveaux de pêche relativement faibles durant cette période ont eu une incidence importante sur ce stock (DFO 2021a). Par conséquent, en utilisant la biomasse médiane de 1985 à 1990 comme valeur de

substitution de B_0 , la formule $0,2^* B_0 = 741$ kt est une méthode courante pour déterminer un PRL; on utilise parfois $0,3^* B_0 = 1\,110$ kt pour les poissons-fourrages ou les stocks pour lesquels une approche plus préventive est justifiée (DFO 2017, Sainsbury 2008; figure 2). Cette approche est faisable et raisonnablement fiable (moyenne = $3\,913 \pm 1\,072$ kt). L'utilisation de B_0 comme valeur de substitution a été jugée plausible compte tenu de nos hypothèses sur l'état du stock et sera explorée plus en détail dans la section Discussion, tout comme le multiplicateur, c'est-à-dire 0,2 ou 0,3.

ÉCOSYSTÈME

L'approche écosystémique de la gestion des pêches est de plus en plus utilisée et promue comme un moyen de parvenir à des pêches durables (Koen-Alonso *et al.* 2019). Le document Koen-Alonso *et al.* (2021) ont montré que les prises dans la pêche et la disponibilité du capelan étaient de bons prédicteurs de la biomasse de la morue franche à l'aide d'une approche bioénergétique et allométrique (le modèle Capcod, « Capcod » dans le reste du document). En bref, Capcod prédit la biomasse de la morue franche de l'année suivante à partir de la biomasse de l'année en cours, de l'estimation des pertes de biomasse dues à la respiration, aux débarquements et à la mortalité dépendante de la densité, et des gains de biomasse dus à la consommation de nourriture, qui est modélisée à l'aide d'une réponse fonctionnelle de type III et déterminée par la biomasse du capelan ainsi qu'une autre source de nourriture (voir plus de détails dans Koen-Alonso *et al.* 2021). Ce modèle a expliqué efficacement la dynamique de la morue du Nord et de la morue de la mer de Barents ($r^2 = 0,92$ pour les deux stocks) malgré la dynamique différente des populations de ces stocks, soulignant la solidité et la généralité des principes et des processus de base exprimés dans l'architecture du modèle. En plus d'une valeur élevée de r^2 , l'évaluation des résidus normalisés (assez homogènes et largement à l'intérieur de ± 2 écarts-types) et l'absence de tendances rétrospectives (ρ de Mohn = 0,013) indiquent que Capcod ajuste bien les données et n'est pas indûment influencé par les variations de la longueur des valeurs des séries chronologiques.

Capcod permet de calculer la production nette par tête de morue pour toutes les combinaisons de biomasse de la morue et du capelan (figure 3), qui peut être utilisée pour déterminer la biomasse du capelan nécessaire pour maintenir la biomasse de la morue à un niveau donné. Avec cette approche, et dans l'hypothèse où il n'y a pas de pêche de la morue, l'indice de la biomasse dans le relevé acoustique printanier requis pour ramener la morue à son PRL, c'est-à-dire la BSR moyenne de la morue de 1983 à 1989 d'après les résultats du modèle Capcod, est de 640 kt (voir plus de détails à l'annexe 3). La biomasse de la morue représente actuellement 52 % de son PRL (DFO 2022c). Toutefois, si le PRL de la morue change après un examen ultérieur, il faudra recalculer le PRL du capelan.

Un autre avantage de l'approche Capcod est que la biomasse de la morue a une corrélation positive et importante avec la biomasse de divers groupes fonctionnels de poissons dans le relevé plurispecifique, donnant à penser que la morue peut servir d'indicateur de l'état de l'écosystème (figure 4; corrélations de Spearman entre la morue et les groupes fonctionnels : plancto-piscivores, $\rho = 0,72$; grands benthivores, $\rho = 0,96$; benthivores moyens, $\rho = 0,48$; piscivores autres que la morue, $\rho = 0,58$). On peut en déduire qu'un indice de la biomasse de 640 kt permettrait au stock de morue de se rétablir, ce qui, à son tour, suggère que les processus écosystémiques et la productivité globale pourraient revenir à un état d'avant l'effondrement. L'approche Capcod est donc faisable, fiable, plausible et remplit l'objectif plus général de passer d'une évaluation d'un seul stock à une approche écosystémique de la gestion des pêches, qui est un objectif ministériel.

DISCUSSION

Nous avons envisagé une grande série de PRL potentiels pour le capelan des divisions 2J3KL, notamment des approches plus conventionnelles fondées sur des valeurs de substitution théoriques ou historiques pour la biomasse au rendement maximal durable (B_{RMD}) et la biomasse non exploitée (B_0), le recrutement et les tendances historiques, ainsi que des méthodes plus récentes telles que des approches à indicateurs multiples, des approches basées sur la longueur et des approches écosystémiques. Trois approches répondaient aux critères de faisabilité, de fiabilité et de plausibilité, et ont été considérées comme valides : $B_{rétablissement}$, une valeur de substitution historique de B_0 , et l'approche Capcod (Table 2).

COMPARAISON DES APPROCHES VALIDES DU PRL

Bien que l'une ou l'autre des trois approches ait pu être considérée comme valide en l'absence des autres, elles n'ont pas été considérées comme égales lorsque les forces et les faiblesses (c.-à-d. les incertitudes) de chacune ont été évaluées (Table 3). En résumé, l'approche de $B_{rétablissement}$ a été rejetée en raison des préoccupations considérables concernant l'estimation ponctuelle, c'est-à-dire qu'il n'y avait pas de réplication au début des années 1980 (aucune valeur antérieure à 1982 et les valeurs de 1983-1984 ne sont pas considérées comme valides), que l'indice de la biomasse de 1982 avait probablement été sous-estimé en raison de la période du relevé et que le rétablissement futur possible du stock dépend des conditions actuelles par rapport à 1982. La valeur de substitution de B_0 n'a pas été entièrement rejetée, mais la justification de l'utilisation de la valeur de 1985 à 1990 comme valeur de substitution de B_0 soulevait des préoccupations, et le choix du multiplicateur était quelque peu arbitraire (Table 3). En outre, un multiplicateur de 0,3 est souvent utilisé pour les poissons-fourrages et donnerait un PRL de 1 110 kt, un chiffre bien supérieur à la biomasse maximale pendant la période suivant l'effondrement (780 kt en 2014). Un PRL de cet ordre de grandeur est problématique parce qu'il n'existe actuellement aucun caractère à l'échelle du stock permettant de déterminer si le stock subit des dommages graves entre 780 et 1 110 kt. La force de ces approches est qu'elles reposent sur des bases empiriques et qu'elles posent moins d'hypothèses que les approches fondées sur des modèles.

Les points forts du modèle Capcod sont qu'il favorise une approche écosystémique de la gestion des pêches et qu'il possède une base théorique et analytique solide. Le capelan est le poisson-fourrage dominant dans l'Atlantique Nord-Ouest. La biomasse de la morue dépend en grande partie de celle du capelan (Buren *et al.* 2014a; Koen-Alonso *et al.* 2021), et est à son tour un bon indicateur de la biomasse des poissons à nageoires dans le relevé plurispecifique (figure 4). À l'appui de l'approche Capcod, on constate dans Regular *et al.* (2022) une relation entre l'état et la mortalité naturelle de la morue, et on note que l'état de la morue est lié, en partie, à la disponibilité du capelan. Ces études mènent à penser que lorsqu'il y a plus de capelans, l'état de la morue a tendance à être meilleur, sa mortalité diminue et la biomasse de la morue augmente par la suite, tout comme la biomasse des autres poissons à nageoires (Koen-Alonso et Cuff 2018; OPANO 2021).

Deux faiblesses de l'approche Capcod ont été relevées. Premièrement, le paramètre du modèle représentant la quantité d'autres proies (le paramètre de remplacement du capelan en tant que proie) est supposé constant sur toute la période; il s'agit d'une recommandation de recherche, mais elle ne devrait pas entraîner des changements à grande échelle dans les résultats du modèle (Koen-Alonso *et al.* 2021). Deuxièmement, le modèle Capcod ne démontre pas directement les dommages graves causés au capelan. Cependant, depuis l'effondrement du stock de capelan, de nombreux indicateurs du stock ont affiché des tendances conformes à celles d'autres stocks de capelan lorsqu'ils sont dans un état d'effondrement (Gjøsæter 1998), notamment une croissance plus rapide des poissons immatures entraînant une maturation

précoce; une troncature de l'âge (DFO 2021b; Engelhard et Heino 2004; Wheeler *et al.* 2009); des poissons plus petits qui frayent plus tard dans l'année, ce qui produit généralement des classes d'âge plus faibles (Murphy *et al.*.. 2021); et un recrutement généralement faible du capelan (Mowbray *et al.* 2023). Le 95^e centile des estimations de l'indice de la biomasse pour toutes les années depuis 1991, à l'exception de 2013 et 2014, était inférieur à la valeur du PRL de 640 kt obtenue à l'aide de l'approche Capcod, ce dont on déduit que le stock est dans un état « d'effondrement » presque continu depuis 1991, c'est-à-dire un état de dommages graves. Une autre source de données soutenant le PRL selon l'approche Capcod est que les caractères du stock de capelan, comme la longueur selon l'âge et la maturité selon l'âge, varient avec la taille du stock d'une manière compatible avec la dépendance à la densité. De 2013 à 2015, les années suivant l'effondrement où l'indice de la biomasse était le plus élevé, ces caractères étaient plus similaires à la période précédant l'effondrement que toutes les autres de la période d'après l'effondrement (Mowbray *et al.* 2023), c'est-à-dire que ce n'est que lorsque le stock est au-dessus du PRL selon l'approche Capcod que les caractères du stock ressemblent à ceux d'avant l'effondrement. Collectivement, ces sources de données indiquent que le stock est probablement dans un état de dommages graves lorsque l'indice de la biomasse est inférieur à 640 kt, mais il faudra recalculer cette valeur si le PRL de la morue est réexaminé à l'avenir.

En résumé, les points forts de l'approche Capcod étaient considérables par rapport aux autres approches valides envisagées pour un PRL du capelan. L'approche Capcod a donné un PRL qui concorde avec d'autres preuves biologiques indiquant un état de dommages graves pour le stock de capelan. Le modèle Capcod est une étape importante vers une approche écosystémique de la gestion des pêches (AEGP), car il établit un lien explicite entre les PRL du capelan et de la morue et, indirectement, commence à considérer le rôle du capelan en tant qu'espèce fourragère à l'échelle de la communauté de poissons. C'est pourquoi l'approche Capcod a été acceptée comme base d'un PRL pour le capelan (figure 5).

COMPARAISON AVEC D'AUTRES INSTANCES

Il n'y a pas de manière unique de déterminer un PRL et le choix de l'approche est souvent fortement influencé par les données disponibles, le cycle biologique de l'espèce et l'historique du stock. Cependant, l'approche Capcod pour un PRL est similaire, sur le plan conceptuel, à celle utilisée pour les PRL d'autres stocks de capelan et de poissons-fourrages. Les deux plus grands stocks de capelan, les stocks de la mer de Barents et de l'Islande-est du Groenland – île Jan Mayen (IEGJM), sont gérés à l'aide d'une stratégie d'échappées, c'est-à-dire la biomasse des poissons qui échappent à la pêche et frayent; une telle stratégie autorise des prises lorsque le stock est en sain tout en protégeant le stock dans le cas contraire. Pour ces deux stocks, la stratégie d'échappées est fondée sur la valeur de $B_{rétablissement}$ (ou B_{lim}) dérivée d'une estimation de la BSR à partir des relevés acoustiques qui couvrent l'ensemble des zones des stocks, mais intégrant également les pertes dues à la prédatation par les poissons de fond. La principale différence entre les points de référence pour les stocks de capelan de la mer de Barents et de l'Islande-est du Groenland – île Jan Mayen et pour le capelan des divisions 2J3KL est que les PRL pour les stocks évalués par le CIEM sont estimés à l'aide d'approches conventionnelles (B_{lim}), mais n'intègrent pas le rôle écosystémique du capelan dans la valeur du PRL. Les besoins de l'écosystème sont plutôt intégrés comme une règle prudente de contrôle des prises, c'est-à-dire la stratégie d'échappées. Étant donné que la BSR n'est pas disponible pour le capelan des divisions 2J3KL, le rôle écosystémique du capelan est intégré directement dans la valeur du PRL par l'utilisation du modèle Capcod, dans lequel il est exprimé en termes de résultat moyen à long terme.

L'utilisation d'une approche écosystémique de la gestion des pêches n'est pas propre aux stocks de capelan. La plus grande pêche de l'est des États-Unis, la pêche de l'aloise tyran

(*Brevoortia tyrannus*), applique également une approche écosystémique fondée sur un modèle de complexité intermédiaire qui tient compte du rôle de ce poisson-fourrage (Drew *et al.* 2021). En effet, les objectifs de gestion de ce stock comprennent le maintien de l’aloise tyran pour les pêches dirigées, les besoins alimentaires des prédateurs, la stabilité des pêches et la prise en compte de l’évolution de l’environnement (Chagaris *et al.* 2020).

Cependant, la plupart des PRL pour les poissons-fourrages et les stocks de poissons en général, ne tiennent pas explicitement compte des considérations écosystémiques, même s’il y a plus de vingt ans qu’on a commencé à préconiser le passage de l’approche conventionnelle et unispecifique à une approche écosystémique de la gestion des pêches (voir Guénette *et al.* 2014 et les références qui s’y trouvent) et que cette approche a été proposée par la suite pour les poissons-fourrages (Pikitch *et al.* 2012). De fait, on utilise généralement les approches conventionnelles pour l’établissement des PRL, telles que $B_{rétablissement}$, B_{min} , les modèles de production excédentaire et $F_{X\%RPF}$, pour les poissons fourrages (voir un examen dans Guénette *et al.* 2014). Nous avons exploré ces approches et elles n’étaient pas valides ou ont été considérées comme plus faibles que l’approche Capcod (tableaux 2 et 3). Même si on n’applique pas normalement une approche écosystémique de la gestion des pêches pour établir les PRL, la *Loi sur les pêches* révisée prévoit une « approche écosystémique » dans ses considérations pour la prise de décisions, en plus des conditions environnementales touchant le stock dont la ministre doit déjà tenir compte. Une approche écosystémique de la gestion des pêches est également conforme à la Politique sur les nouvelles pêches d’espèces fourragères du MPO (DFO 2009b), qui considère que le seuil de dommages graves doit s’appliquer à la fois aux espèces ciblées et aux espèces dépendantes sur le plan écologique. L’approche écosystémique de la gestion des pêches a également été mise de l’avant par des organismes nationaux (NOAA Fisheries. 2016) et internationaux (Möllmann *et al.* 2014). L’approche Capcod, en plus d’être conforme à la méthode utilisée pour la gestion des stocks de capelan de la mer de Barents et de l’Islande-est du Groenland – île Jan Mayen, ainsi que pour d’autres grands stocks de poissons-fourrages, est conforme aux politiques et aux approches recommandées qui reconnaissent l’importance des poissons-fourrages dans l’écosystème et en tant que principale proie des stocks de pêches commerciales plus vastes.

SOMMAIRE

Une série d’approches liées au PRL a été envisagée pour le capelan des divisions 2J3KL, mais la plupart ne répondraient pas aux critères de faisabilité, de fiabilité et de plausibilité et, par conséquent, n’ont pas été considérées comme valides. Les trois approches qui satisfaisaient à ces trois critères (c.-à-d. valides) ont été évaluées en fonction de leurs forces et de leurs faiblesses. Parmi elles, le PRL fondé sur le modèle Capcod était clairement l’approche la plus solide et a été accepté par consensus lors du processus d’évaluation régional du SCAS (DFO 2024). Le PRL pour le capelan des divisions 2J3KL est de 640 kt et est cohérent, sur le plan conceptuel, avec les PRL pour d’autres grands stocks de capelan. Le stock de capelan des divisions 2J3KL a été estimé à 262 kt et se trouve donc actuellement dans la zone critique (figure 5).

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le personnel des sections des Poissons pélagiques, des Poissons de fond et de la Recherche écologique marine, d’hier et d’aujourd’hui, qui a rendu ce travail possible. Nous remercions également les personnes suivantes pour des discussions très utiles : K. Baker, R. Belley, M. Boudreau, F. Cyr, E. Dunne, K. Dwyer, D. Kumar, R. Mullowney, D. Osbourne, R. Rideout, A. Smith, D. Varkey et L. Wheeland. Nous remercions les auteurs qui ont contribué aux documents de travail et aux avis scientifiques sur les PRL et le processus

consultatif national connexe, en particulier Julie Marentette et Danny Ings. Merci à Nathan Heber et à Brian Healey, qui ont révisé le manuscrit. Enfin, un merci spécial à Tim Barrett qui a été un personnage clé du processus consultatif national susmentionné, mais qui a également fourni des conseils précieux sur les nombreuses approches du PRL.

RÉFÉRENCES CITÉES

- Alder, J., Campbell, B., Karpouzi, V., Kaschner, K., and Pauly, D. 2008. [Forage fish: from ecosystems to markets](#). Annu. Rev. Environ. Resour. 33: 153–166.
- Bailey, K., and Houde, E. 1989. [Predation on eggs and larvae of marine fishes and the recruitment problem](#). Adv. Mar. Biol. 1–83.
- Bakun, A. 2006. [Wasp-waist populations and marine ecosystem dynamics: navigating the “predator pit” topographies](#). Prog. Oceanogr. 68(2–4): 271–288.
- Barrett, T.J., Marentette, J.R., Forrest, R.E., Anderson, S.C., Holt, C.A., Ings, D.W., et Thiess, M.E. 2024. [Considérations techniques relatives à l'état des stocks et aux points de référence limites dans le cadre des dispositions relatives aux stocks de poissons](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc de rech. 2024/029. v + 66 p.
- Boudreau, M., and Duplisea, D. 2022. [A decision tool for the selection of methods to obtain indicators and reference points for data-limited stocks](#). Can. Manusc. Rep. Fish. Aquat. Sci.. 3237: vi + 61 p.
- Buren, A.D., Koen-Alonso, M., and Montevecchi, W.A. 2012. [Linking predator diet and prey availability: common murres and capelin in the Northwest Atlantic](#). Mar. Ecol. Prog. Ser. 445: 25–35.
- Buren, A.D., Koen-Alonso, M., and Stenson, G.B. 2014a. [The role of harp seals, fisheries and food availability in driving the dynamics of northern cod](#). Mar. Ecol. Prog. Ser. 511: 265–284.
- Buren, A.D., Koen-Alonso, M., Pepin, P., Mowbray, F., Nakashima, B., Stenson, G., Ollerhead, N., and Montevecchi, W.A. 2014b. [Bottom-up regulation of capelin, a keystone forage species](#). PLoS One. 9(2): e87589.
- Buren, A.D., Murphy, H.M., Adamack, A.T., Davoren, G.K., Koen-Alonso, M., Montevecchi, W.A., Mowbray, F.K., Pepin, P., Regular, P.M., Robert, D., Rose, G.A., Stenson, G., and Varkey, D. 2019. [The collapse and continued low productivity of a keystone forage fish](#). Mar. Ecol. Prog. Ser. 616: 115–170.
- Caddy, J.F., and Mahon, R. 1995. Reference points for fisheries management. FAO Fisheries Technical Paper. No. 347. Rome, FAO. 1995. 83 p.
- Cadigan, N.G. 2015. [A state-space stock assessment model for northern cod, including under-reported catches and variable natural mortality rates](#). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 73(2): 296–308.
- Carscadden, J., Frank, K., and Leggett, W. 2001. [Ecosystem changes and the effects on capelin \(*Mallotus villosus*\), a major forage species](#). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 58: 73–85.
- Chagaris, D., Drew, K., Schueller, A., Cieri, M., Brito, J., and Buchheister, A. 2020. [Ecological reference points for Atlantic menhaden established using an ecosystem model of intermediate complexity](#). Front. Mar. Sci. 7: 606417.
- Chambers, R.C., and Leggett, W.C. 1996. [Maternal influences on variation in egg sizes in temperate marine fishes](#). Am. Zool. 36(2): 180–196.

-
- Chavez, F.P., Ryan, J., Lluch-Cota, S.E., and Niñuen C, M. 2003. [From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific Ocean](#). Science. 299(5604): 217–221.
- Costello, C., Ovando, D., Hilborn, R., Gaines, S.D., Deschenes, O., and Lester, S.E. 2012. [Status and solutions for the world's unassessed fisheries](#). Science. 338(6106): 517–520.
- Cowan Jr., J.H., Houde, E.D., and Rose, K.A. 1996. [Size-dependent vulnerability of marine fish larvae to predation: an individual-based numerical experiment](#). ICES J. Mar. Sci. 53(1): 23–37.
- Cury, P., Bakun, A., Crawford, R.J., Jarre, A., Quinones, R.A., Shannon, L.J., and Verheyen, H.M. 2000. [Small pelagics in upwelling systems: patterns of interaction and structural changes in “wasp-waist” ecosystems](#). ICES J. Mar. Sci. 57(3): 603–618.
- Cury, P.M., Boyd, I.L., Bonhommeau, S., Anker-Nilssen, T., Crawford, R.J., Furness, R.W., Mills, J.A., Murphy, E.J., Österblom, H., and Paleczny, M. 2011. [Global seabird response to forage fish depletion—one-third for the birds](#). Science. 334(6063): 17031706.
- Cyr, F., and Galbraith, P.S. 2021. [A climate index for the Newfoundland and Labrador shelf](#). Earth Syst. Sci. Data. 13(5): 1807–1828.
- Davoren, G.K., and Montevecchi, W.A. 2003. [Signals from seabirds indicate changing biology of capelin stocks](#). Mar. Ecol. Prog. Ser. 258: 253–261.
- DFO. 2009a. [A fishery decision-making framework incorporating the precautionary approach](#).
- DFO. 2009b. [Policy on New Fisheries for Forage Species](#).
- DFO. 2011. [Proceedings of the Newfoundland and Labrador Regional Atlantic cod framework meeting: reference points and projection methods for Newfoundland cod stocks; November 22-26, 2010](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Proceed. Ser. 2010/053.
- DFO. 2013a. [Assessment of Capelin in SA2 + Div. 3KL in 2013](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2013/011.
- DFO. 2013b. [Proceedings of the national workshop for Technical Expertise in Stock Assessment \(TESA\): maximum sustainable yield \(MSY\) reference points and the precautionary approach when productivity varies; December 13-15, 2011](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Proceed. Ser. 2012/055.
- DFO. 2015. [Proceedings of the regional peer review meeting of the framework for Atlantic herring \(*Clupea harengus*\) and reference points for Capelin \(*Mallotus villosus*\) in the Newfoundland and Labrador Region; November 19-21, 2013](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Proceed. Ser. 2014/049.
- DFO. 2017. [The selection and role of limit reference points for Pacific Herring \(*Clupea pallasii*\) in British Columbia, Canada](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2017/030.
- DFO. 2020. [Stock Assessment of NAFO Subdivision 3Ps Cod](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2020/2018.
- DFO. 2021a. [Assessment of 2J3KL capelin in 2019](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2021/045.
- DFO. 2021b. [Assessment of the northern contingent of Atlantic Mackerel \(*Scomber scombrus*\) in 2020](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2021/029.
- DFO. 2021c. [Science advice for precautionary approach harvest strategies under the Fish Stocks Provisions](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2021/004.

-
- DFO. 2022a. [Sustainable fisheries framework](#).
- DFO. 2022b. [Sustainability survey for fisheries](#).
- DFO. 2022c. [Stock assessment of Northern cod \(NAFO Divisions 2J3KL\) in 2021](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2022/041.
- DFO. 2022d. [Sustainable fisheries framework work plan for fiscal 2022-2023](#).
- DFO. 2022e. [Consultation on a regulatory proposal to prescribe stocks to the Fish Stocks Provisions in the Fisheries Act](#).
- DFO. 2023. [Science advice on guidance for limit reference points under the Fish Stocks Provisions](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2023/009.
- DFO. 2024. [Assessemnt of Divisions 2J + 3KL capelin in 2022 and evaluation of proposed limit reference points](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2024/004.
- Dower, J.F., Pepin, P., and Kim, G.-C. 2009. [Covariation in feeding success, size-at-age and growth in larval radiated shanny \(*Ulvaria subbifurcata*\): insights based on individuals](#). J. Plankton Res. 31(3): 235–247.
- Drew, K., Cieri, M., Schueller, A.M., Buchheister, A., Chagaris, D., Nesslage, G., McNamee, J.E., and Uphoff Jr, J.H. 2021. [Balancing model complexity, data requirements, and management objectives in developing ecological reference points for Atlantic menhaden](#). Front. Mar. Sci. 8: 608059.
- Dwyer, K., Buren, A., and Koen-Alonso, M. 2010. [Greenland halibut diet in the Northwest Atlantic from 1978 to 2003 as an indicator of ecosystem change](#). J. Sea Res. 64(4): 436–445.
- Engelhard, G.H., and Heino, M. 2004. Maturity changes in Norwegian spring-spawning herring *Clupea harengus*: compensatory or evolutionary responses? Mar. Ecol. Prog. Ser. 272: 245–256.
- Flynn, S., Nakashima, B., and Burton, M. 2001. [Direct assessment of post-spawning survival of female capelin, *Mallotus villosus*](#). J. Mar. Biol. Assoc. U.K. 81(2): 307–312.
- Free, C.M., Jensen, O.P., Anderson, S.C., Gutierrez, N.L., Kleisner, K.M., Longo, C., Minto, C., Osio, G.C., and Walsh, J.C. 2020. [Blood from a stone: performance of catch-only methods in estimating stock biomass status](#). Fish. Res. 223: 105452.
- Froese, R., and Pauly, D. Editors. 2022. FishBase. [accessed 08/2022].
- Froese, R., Coro, G., Kleisner, K., and Demirel, N. 2016. [Revisiting safe biological limits in fisheries](#). Fish. Fish. 17(1): 193–209.
- Froese, R., Demirel, N., Coro, G., Kleisner, K.M., and Winker, H. 2017. [Estimating fisheries reference points from catch and resilience](#). Fish. Fish. 18(3): 506–526.
- Gjøsæter, H. 1998. [The population biology and exploitation of capelin \(*Mallotus villosus*\) in the Barents Sea](#). Sarsia. 83(6): 453–496.
- Guénette, S., Melvin, G., and Bundy, A. 2014. [A review of the ecological role of forage fish and management strategies](#). Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 3065.
- Gulka, J., Carvalho, P.C., Jenkins, E., Johnson, K., Maynard, L., and Davoren, G.K. 2017. [Dietary niche shifts of multiple marine predators under varying prey availability on the northeast Newfoundland coast](#). Front. Mar. Sci. 4: 324.

-
- Hilborn, R., and Walters, C.J. 1992. [Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty](#). Chapman and Hall, New York.
- IFMP. 2022. [Capelin \(*Mallotus villosus*\) Newfoundland & Labrador Region Divisions 2+3 \(Capelin Fishing Areas 1-11\)](#).
- Jubinville, I., Schijns, R., and Rangeley, R. 2022. Capelin in crisis: urgent action needed to rebuild abundance. Oceana Canada, Oceana.
- Kaschner, K., Karpouzi, V., Watson, R., and Pauly, D. 2006. Forage fish consumption by marine mammals and seabirds. Fish. Cent. Res. Rep. 14(3): 33–46.
- Kleisner, K., and Pauly, D. 2011. Stock-catch status plots of fisheries for Regional Seas. Fish. Cent. Res. Rep. 19(3): 37–40.
- Koen-Alonso, M., and Cuff, A. 2018. Status and trends of the fish community in the Newfoundland Shelf (NAFO Div. 2J3K), Grand Bank (NAFO Div. 3LNO) and Southern Newfoundland Shelf (NAFO Div. 3Ps) Ecosystem Production Units. NAFO SCR Doc. 18/070.
- Koen-Alonso, M., Lindstrøm, U., and Cuff, A. 2021. [Comparative modeling of cod-capelin dynamics in the Newfoundland-Labrador shelves and Barents Sea ecosystems](#). Front. Mar. Sci. 8: 579946.
- Koen-Alonso, M., Pepin, P., Fogarty, M.J., Kenny, A., and Kenchington, E. 2019. [The Northwest Atlantic Fisheries Organization Roadmap for the development and implementation of an Ecosystem Approach to Fisheries: structure, state of development, and challenges](#). Mar. Policy. 100: 342–352.
- Leggett, W., Frank, K., and Carscadden, J. 1984. Meteorological and hydrographic regulation of year-class strength in capelin (*Mallotus villosus*). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 41(8): 1193–1201.
- Lewis, K.P., Buren, A.D., Regular, P.M., Mowbray, F.K., and Murphy, H.M. 2019. [Forecasting capelin *Mallotus villosus* biomass on the Newfoundland shelf](#). Mar. Ecol. Prog. Ser. 616: 171–183.
- Möllmann, C., Lindegren, M., Blenckner, T., Bergström, L., Casini, M., Diekmann, R., Flinkman, J., Müller-Karulis, B., Neuenfeldt, S., and Schmidt, J.O. 2014. [Implementing ecosystem-based fisheries management: from single-species to integrated ecosystem assessment and advice for Baltic Sea fish stocks](#). ICES J. Mar. Sci. 71(5): 1187–1197.
- Montevecchi, W.A. 2007. [Binary dietary responses of northern gannets *Sula bassana* indicate changing food web and oceanographic conditions](#). Mar. Ecol. Prog. Ser. 352: 213–220.
- Montevecchi, W.A., Gerrow, K., Buren, A.D., Davoren, G.K., Lewis, K.P., Montevecchi, M.W., and Regular, P.M. 2019. [Pursuit-diving seabird endures regime shift involving a three-decade decline in forage fish mass and abundance](#). Mar. Ecol. Prog. Ser. 627: 171–178.
- Mowbray, F. 2014. [Recent spring offshore acoustic survey results for capelin, *Mallotus villosus*, in NAFO Division 3L](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2013/040. v + 25 p.
- Mowbray, F.K., Adamack, A.T., Murphy, H.M., Lewis, K., and Koen-Alonso, M. 2023. [Assessment of Capelin \(*Mallotus villosus*\) in 2J3KL to 2019](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2023/076. iv + 39 p.
- Mullowney, D., Baker, K., Pedersen, E., and Osbourne, D. 2018. [Basis for a precautionary approach and decision making framework for the Newfoundland and Labrador snow crab \(*Chionoecetes opilio*\) fishery](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2018/054: iv + 66 p.

-
- Mullowney, D.R., and Baker, K.D. 2023. [Multi-indicator precautionary approach frameworks for crustacean fisheries](#). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 80(7): 1207–1220.
- Murphy, H.M., Pepin, P., and Robert, D. 2018. [Re-visiting the drivers of capelin recruitment in Newfoundland since 1991](#). Fish. Res. 200: 1–10.
- Murphy, H.M., Adamack, A.T., and Cyr, F. 2021. [Identifying possible drivers of the abrupt and persistent delay in capelin spawning timing following the 1991 stock collapse in Newfoundland, Canada](#). ICES J. Mar. Sci. 78(8): 2709–2723.
- Myers, R.A., Hutchings, J.A., and Barrowman, N.J. 1997. [Why do fish stocks collapse? The example of cod in Atlantic Canada](#). Ecol. Appl. 7(1): 91–106.
- NAFO. 2021. Report of the Scientific Council Working Group on ecosystem science and assessment, 16–25 November 2021, Dartmouth, Nova Scotia, Canada. NAFO SCS Doc. 21/21.
- Nakashima, B.S. 1996. The relationship between oceanographic conditions in the 1990s and changes in spawning behaviour, growth and early life history of capelin (*Mallotus villosus*). NAFO Sci. Coun. Studies. 24: 55–68.
- NOAA. Fisheries. 2016. NOAA Fisheries Ecosystem-based Fisheries Management Road Map. National Oceanic and Atmospheric Administration. *In* NOAA Fisheries Service Instruction 01-120-01. Silver Spring, MD: NOAA. pp. 1–120.
- Ovando, D., Free, C.M., Jensen, O.P., and Hilborn, R. 2022. [A history and evaluation of catch-only stock assessment models](#). Fish. Fish. 23(3): 616–630.
- Palomares, M., Froese, R., Derrick, B., Meeuwig, J., Nöel, S.-L., Tsui, G., Woroniak, J., Zeller, D., and Pauly, D. 2020. [Fishery biomass trends of exploited fish populations in marine ecoregions, climatic zones and ocean basins](#). Estuar. Coast. Shelf Sci. 243: 106896.
- Peck, M.A., Alheit, J., Bertrand, A., Catalán, I.A., Garrido, S., Moyano, M., Rykaczewski, R.R., Takasuka, A., and van Der Lingen, C.D. 2021. [Small pelagic fish in the new millennium: a bottom-up view of global research effort](#). Prog. Oceanogr. 191: 102494.
- Pedersen, E.J., Thompson, P.L., Ball, R.A., Fortin, M.-J., Gouhier, T.C., Link, H., Moritz, C., Nenzen, H., Stanley, R.R., and Taranu, Z.E. 2017. [Signatures of the collapse and incipient recovery of an overexploited marine ecosystem](#). R. Soc. Open Sci. 4(7): 170215.
- Penton, P.M., and Davoren, G.K. 2013. [Capelin \(*Mallotus villosus*\) fecundity in post-1990s coastal Newfoundland](#). Mar. Biol. 160: 1625–1632.
- Pikitch, E., Boersma, P.D., Boyd, I., Conover, D., Cury, P., Essington, T., Heppell, S., Houde, E., Mangel, M., and Pauly, D. 2012. Little fish, big impact: managing a crucial link in ocean food webs. Lenfest Ocean Program, L.O. Program, Washington, DC.
- Pikitch, E.K., Rountos, K.J., Essington, T.E., Santora, C., Pauly, D., Watson, R., Sumaila, U.R., Boersma, P.D., Boyd, I.L., and Conover, D.O. 2014. [The global contribution of forage fish to marine fisheries and ecosystems](#). Fish. Fish. 15(1): 43–64.
- Plummer, M. JAGS: A program for analysis of Bayesian graphical models using Gibbs sampling. *In* Proceedings of the 3rd international workshop on distributed statistical computing. 2003. Vienna, Austria.
- Pons, M., Cope, J.M., and Kell, L.T. 2020. [Comparing performance of catch-based and length-based stock assessment methods in data-limited fisheries](#). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 77(6): 1026–1037.

-
- R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2016.
- Ratajczak, Z., Carpenter, S.R., Ives, A.R., Kucharik, C.J., Ramiadantsoa, T., Stegner, M.A., Williams, J.W., Zhang, J., and Turner, M.G. 2018. [Abrupt change in ecological systems: inference and diagnosis](#). Trends Ecol. Evol. 33(7): 513–526.
- Regular, P.M., Robertson, G.J., Rogers, R., and Lewis, K.P. 2020. [Improving the communication and accessibility of stock assessment using interactive visualization tools](#). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 77(9): 1592–1600.
- Regular, P.M., Buren, A.D., Dwyer, K.S., Cadigan, N.G., Gregory, R.S., Koen-Alonso, M., Rideout, R.M., Robertson, G.J., Robertson, M.D., and Stenson, G.B. 2022. [Indexing starvation mortality to assess its role in the population regulation of Northern cod](#). Fish. Res. 247: 106180.
- Sainsbury, K. 2008. Best practice reference points for Australian fisheries. Australian Fisheries Management Authority Canberra.
- Schnute, J.T., and Richards, L.J. 2002. Surplus production models. In *Handbook of Fish Biology and Fisheries*, Vol 2: Fisheries. Edited by: P.J.B. Hart and J.D. Reynolds. Chichester: Wiley. pp. 105–126.
- Shackell, N.L., Shelton, P.A., Hoenig, J.M., and Carscadden, J.E. 1994. [Age-and sex-specific survival of northern Grand Bank capelin \(*Mallotus villosus*\)](#). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 51(3): 642–649.
- Sharma, R., Winker, H., Levontin, P., Kell, L., Ovando, D., Palomares, M.L., Pinto, C., and Ye, Y. 2021. [Assessing the potential of catch-only models to inform on the state of global fisheries and the UN's SDGs](#). Sustainability. 13(11): 6101.
- Smith, S.J., Hunt, J.J., and Rivard, D. 1993. [Risk evaluation and biological reference points for fisheries management](#). Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. p. viii + 442 p.
- Stenson, G.B., Buren, A.D., and Koen-Alonso, M. 2016. [The impact of changing climate and abundance on reproduction in an ice-dependent species, the Northwest Atlantic harp seal, *Pagophilus groenlandicus*](#). ICES J. Mar. Sci. 73(2): 250–262.
- Templeman, W. 1948. The life history of the capelin (*Mallotus villosus* O. F. Müller) in Newfoundland waters. Res. Bull. Nfld. Gov. Lab. 17: 1–151.
- Wheeler, J., Purchase, C., Macdonald, P., Fill, R., Jacks, L., Wang, H., and Ye, C. 2009. [Temporal changes in maturation, mean length-at-age, and condition of spring-spawning Atlantic herring \(*Clupea harengus*\) in Newfoundland waters](#). ICES J. Mar. Sci. 66(8): 1800–1807.
- Winker, H., Carvalho, F., and Kapur, M. 2018. [JABBA: just another Bayesian biomass assessment](#). Fish. Res. 204: 275–288.
- Winters, G. 1970. [Biological changes in coastal capelin from the over-wintering to the spawning condition](#). J. Fish. Res. Board Can. 27(12): 2215–2224.

TABLEAUX

Tableau 1. *Prédictions des tendances des variables environnementales, à l'échelle des communautés et du stock si les hypothèses d'un système unique mais perturbé revenant à son état d'origine (état unique) ou d'un autre état, nouveau (autre état) sont vraies.*

État	Environnement	Communauté	Niveau du stock
Unique	L'indicateur variera sans tendance avant et après le changement par rapport à la période précédent le changement de régime.	L'indicateur revient à des tendances conformes à l'état précédent en termes de variabilité et de composition de la communauté.	La population peut demeurer dans une phase faible prolongée, mais les caractères du stock devraient correspondre à une population perturbée ou stressée (p. ex. structure par âge tronquée, augmentation de la longueur selon l'âge des jeunes poissons suivie d'une maturation précoce).
Autre	Dans le cas d'un nouvel état <u>environnemental</u> , l'indicateur environnemental sera différent de celui d'avant le changement de régime. Dans le cas d'un nouvel état de la communauté, l'indicateur environnemental sera similaire à l'état précédent à moyen et à long termes (hystérétique – voir la colonne suivante).	Une nouvelle tendance de la composition des communautés apparaîtra pour un indicateur donné.	On s'attend à ce qu'un niveau de population plus faible associé à un autre état stable (p. ex. capacité de charge réduite) présente des caractères du stock plus conformes au changement par rapport à avant le régime (pas ou peu de troncature de la structure par âge, aucune variation de la longueur ou de la maturation selon l'âge).

Tableau 2. Résumé des approches du PRL envisagées pour le capelan des divisions 2J3KL, avec la méthode générale d'estimation et la méthode précise de calcul, si les critères (faisabilité, fiabilité, plausibilité et incertitudes connexes) sont respectés, et le PRL proposé (kt = kilotonnes), le cas échéant. Les incertitudes dans les données, les paramètres (params) et la structure du modèle (str) sont utilisées pour évaluer la fiabilité. Voir le texte pour les acronymes et les citations. Si un critère n'est pas respecté, les critères suivants ne sont pas évalués (S.O.).

Approche du PRL	Estimation	Méthode	Faisable	Fiiable	Plausible	Incertitudes (paramètres, structure) ¹	PRL (kt)
Proportion de B_{RMD} / B_0	Structure par âge ou taille, dépendance à la densité	Modèle intégré de population	Oui, mais incomplète	S. O.	S. O.	S. O.	-
	Modèle statistique des prises	JABBA	Oui	Non	S. O.	Params – La valeur a priori r influence le modèle (voir l'annexe 2) Structure – l'erreur de processus explique la majeure partie de la variation totale	-
	Prise uniquement; CLS	CRMD	Oui	Non	S. O.	Voir Modèle statistique des prises	-
Valeur de substitution de $B_{RMD} - F_{X\%RPF}$	Estimer F et RPF	Calculer	Non	S. O.	S. O.	S. O.	-
X % R_{max}	RSR	Beverton-Holt, Ricker	Oui	Non	S. O.	Params – S. O. Structure – grandes différences entre les courbes SR	-
Données historiques –	B_{perte} ,	Valeur la plus faible	Oui	Oui	Non	S. O.	-

Approche du PRL	Estimation	Méthode	Faisable	Fiable	Plausible	Incertitudes (paramètres, structure) ¹	PRL (kt)
Séries chronologiques²	$B_{rétablissement}$	Avis d'experts	Oui	Oui	Oui	Données – préoccupations concernant la valeur de 1982 Params et Structure – S. O.	446
	B_{min}	Centiles	Oui	Non	S. O.	Les valeurs du PRL varient considérablement en fonction des valeurs des centiles	-
B_{RMD} / B_0 – valeurs de substitution historiques	Estimation de la grande taille du stock ou de la taille du stock avant l'exploitation	Moyenne ou médiane multipliée par une fraction	Oui	Oui	Oui	Params – Incertitude en années utilisées pour lorsque l'indicateur est élevé Structure – S. O.	741
Approche écosystémique	Bioénergétique-allométrique	Capcod	Oui	Oui	Oui	Params – acceptable Structure – acceptable	640

¹ Toutes les approches dépendent du relevé acoustique printanier et de son erreur d'observation, c'est-à-dire que cette incertitude sous-tend toutes les approches du PRL pour ce stock. Par conséquent, seuls les paramètres et les incertitudes structurelles sont examinés, à l'exception de $B_{rétablissement}$.

² Les valeurs historiques peuvent être fondées sur les valeurs observées ou les valeurs modélisées, mais ces dernières n'étaient pas disponibles en raison de l'absence de modèle.

Tableau 3. Sommaire des forces et des faiblesses des trois approches valides du PRL avec la décision correspondante et la valeur du PRL (kt = kilotonnes).

APPROCHE VALIDE DU PRL	FORCES	FAIBLESSES	DÉCISION	VALEUR DU PRL (KT)
BRÉTABLISSEMENT	<p>Valeur non influencée par les hypothèses du modèle (fondée sur des données empiriques).</p> <p>Recommandée pour les stocks comportant occasionnellement de fortes classes d'âge, c'est-à-dire les stocks dont le recrutement est spasmodique.</p> <p>Le point de relevé de 1982 concorde avec les données des contenus stomachaux des prédateurs au début des années 1980.</p>	<p>Fondée sur un point – 1982 (risque associé – pas de réplication, pas de mesure des variations).</p> <p>Préoccupations concernant le relevé de 1982 (la période en particulier).</p> <p>Incertitude entourant les niveaux de prise pendant cette période.</p> <p>L'hypothèse d'un rétablissement possible à l'avenir dépend des conditions qui prévalent par rapport à 1982.</p> <p>Les données sur les régimes alimentaires ne fournissent pas d'indice du stock.</p> <p>Approche faible par rapport aux autres options.</p>	Rejetée	446 kt
Valeur de substitution de B_0	Les PRL dérivés d'indicateurs empiriques sont fondés sur des quantités observables (multiples) qui ne reposent	<p>Le multiplicateur est quelque peu arbitraire.</p> <p>Pratique de sélection des périodes historiques très variable, et donc variation</p>	Rejetée	741 kt (multiplicateur de 0,2)

APPROCHE VALIDE DU PRL	FORCES	FAIBLESSES	DÉCISION	VALEUR DU PRL (KT)
	<p>pas sur des hypothèses du modèle d'évaluation.</p> <p>Indication claire que la période choisie est productive.</p>	<p>possible de la pertinence pour estimer approximativement B_{RMD} ou B_0.</p> <p>Il est difficile de justifier ce que nous choisissons comme valeur de substitution, c'est-à-dire B_{RMD} ou B_0.</p>		1 100 kt (multiplicateur de 0,3)
Capcod	<p>Solide base théorique et analytique.</p> <p>Appliquée dans un autre système et les valeurs des paramètres sont pratiquement identiques (réplication).</p> <p>Uniformité des paramètres du PRL entre le capelan et la morue.</p> <p>Approche écosystémique fondée sur une base solide de travail analytique.</p>	<p>L'approche ne tient pas explicitement compte de l'affaiblissement démographique du stock de capelan lui-même.</p> <p>Hypothèses du modèle (p. ex. le paramètre de remplacement du capelan comme proie est constant).</p>	Acceptée	640 kt (de 1983 à 1989)

FIGURES

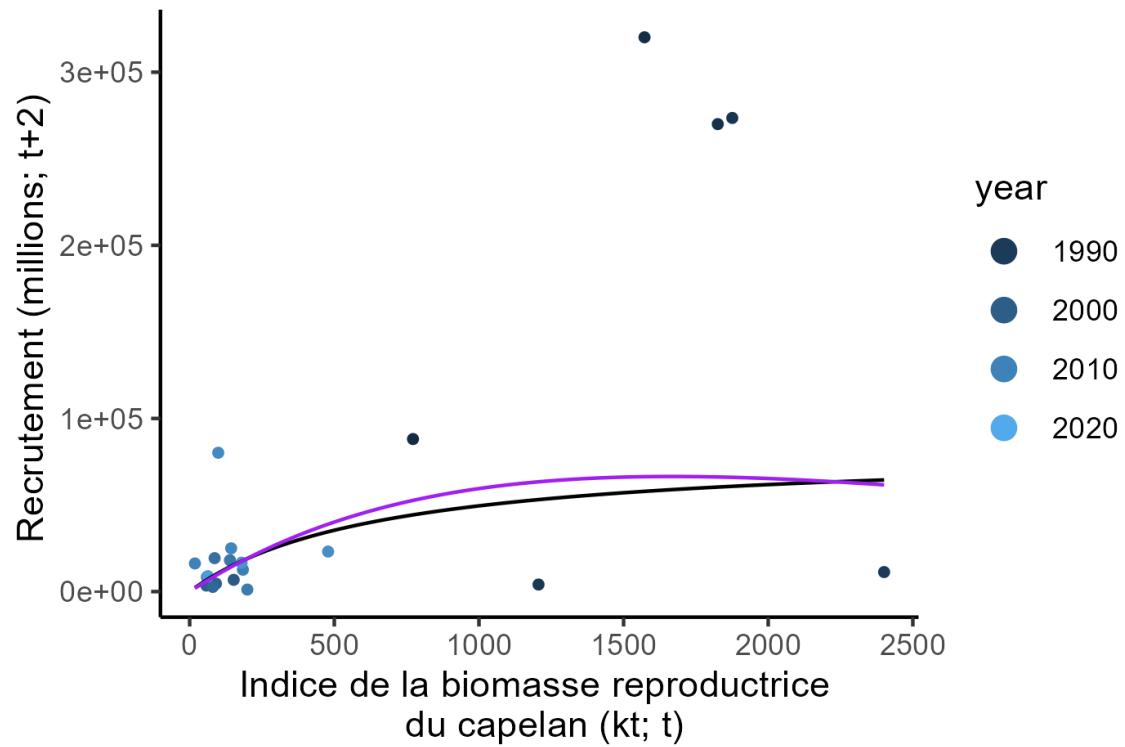


Figure 1. Relations stock-recrutement pour le capelan des divisions 2J3KL de l'OPANO (de 1985 à 2022) à l'aide des approches de Beverton-Holt (en noir) et de Ricker (en violet). Kt = kilotonnes; t = temps (année).

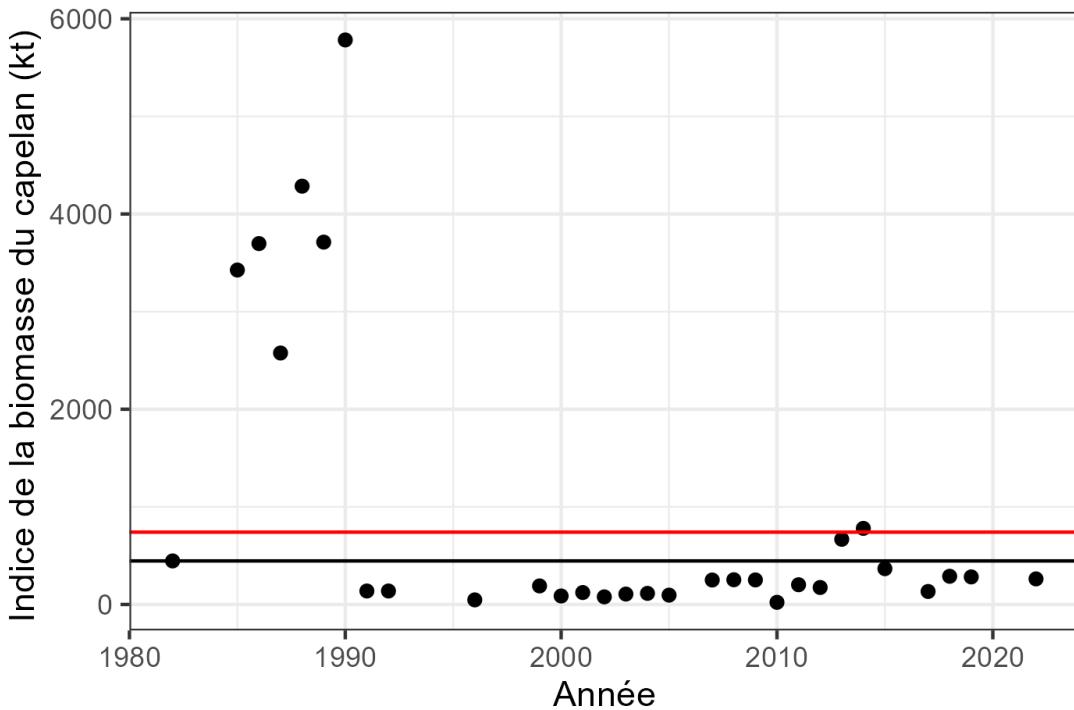


Figure 2. Indice de la biomasse du capelan des divisions 2J3KL de l'OPANO en kilotonnes (kt) provenant du relevé acoustique printanier. La valeur en 1982 (ligne noire continue) est la valeur la plus faible qui a produit un recrutement menant au rétablissement du stock, c'est-à-dire $B_{rétablissement}$ (446 kt). La valeur de substitution de B_0 est de 741 kt (ligne rouge continue).

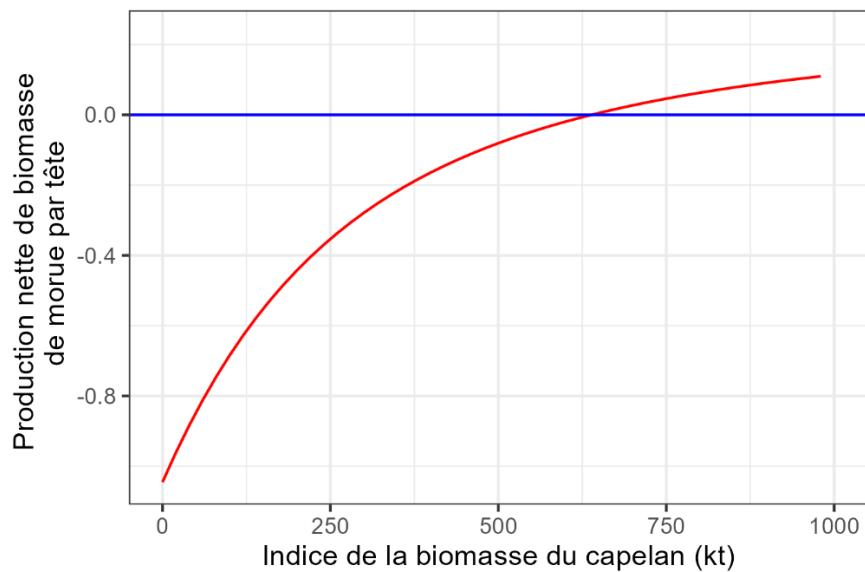


Figure 3. Production nette de morue par tête (ligne rouge) pour un niveau de biomasse de la morue (1 500 kt = kilotonnes) conforme au point de référence limite de la morue (BSR moyenne de 1983 à 1989) en fonction de la biomasse du capelan mesurée dans le relevé acoustique printanier du capelan (indice de la biomasse) estimé par le modèle Capcod (Koen-Alonso et al. 2021). Une valeur de zéro (ligne bleue) correspond à aucun changement prévu dans la biomasse de la morue, dénotant une population stable de morues. L'indice moyen de la biomasse requis pour que le stock de morue atteigne son PRL et s'y stabilise est de 640 kt (la ligne rouge coupe la ligne bleue).

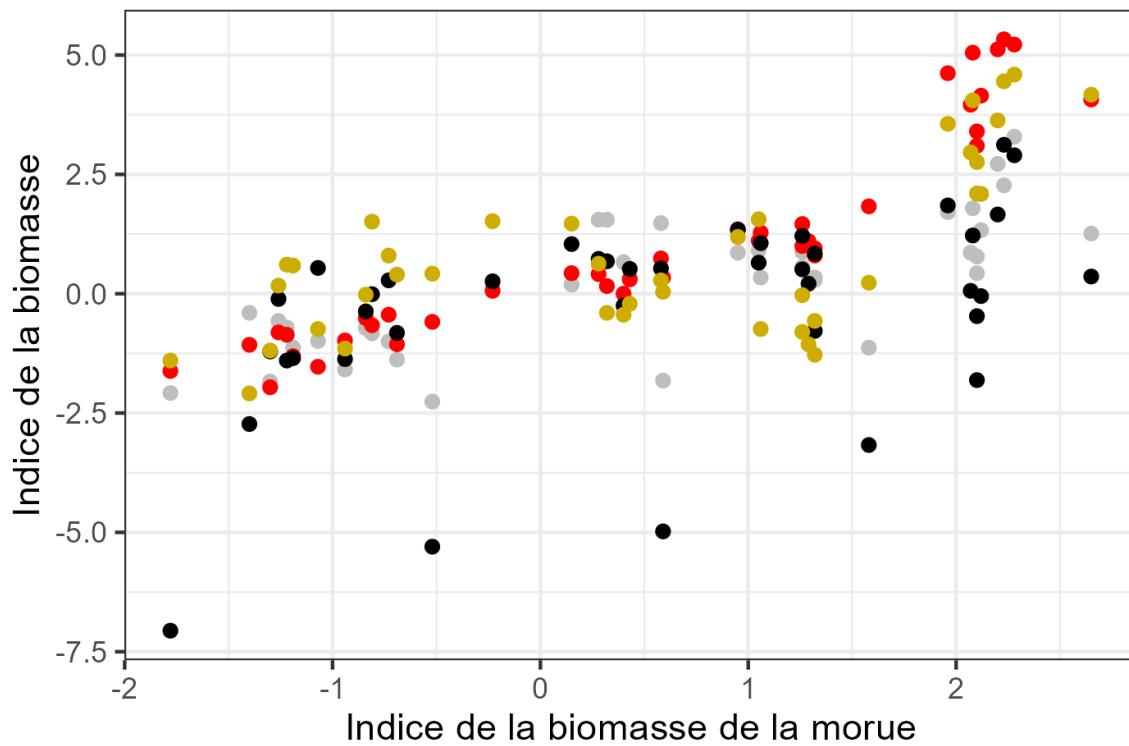


Figure 4. Relation entre la biomasse de la morue et plusieurs groupes fonctionnels de poissons à nageoires (Koen-Alonso et Cuff 2018, OPANO 2021) d'après le relevé annuel plurispécifique d'automne du MPO dans les divisions 2J3KL de l'Organisation des pêches de l'Atlantique Nord. Les valeurs ont été transformées (logarithme naturel) pour faciliter l'affichage des relations avec de grandes différences de portée et d'amplitude (normalisation), mais ces transformations n'influencent pas les corrélations de rang. Rouge = plancto-piscivores; jaune = grands benthivores; noir = benthivores moyens; gris = piscivores autres que la morue.

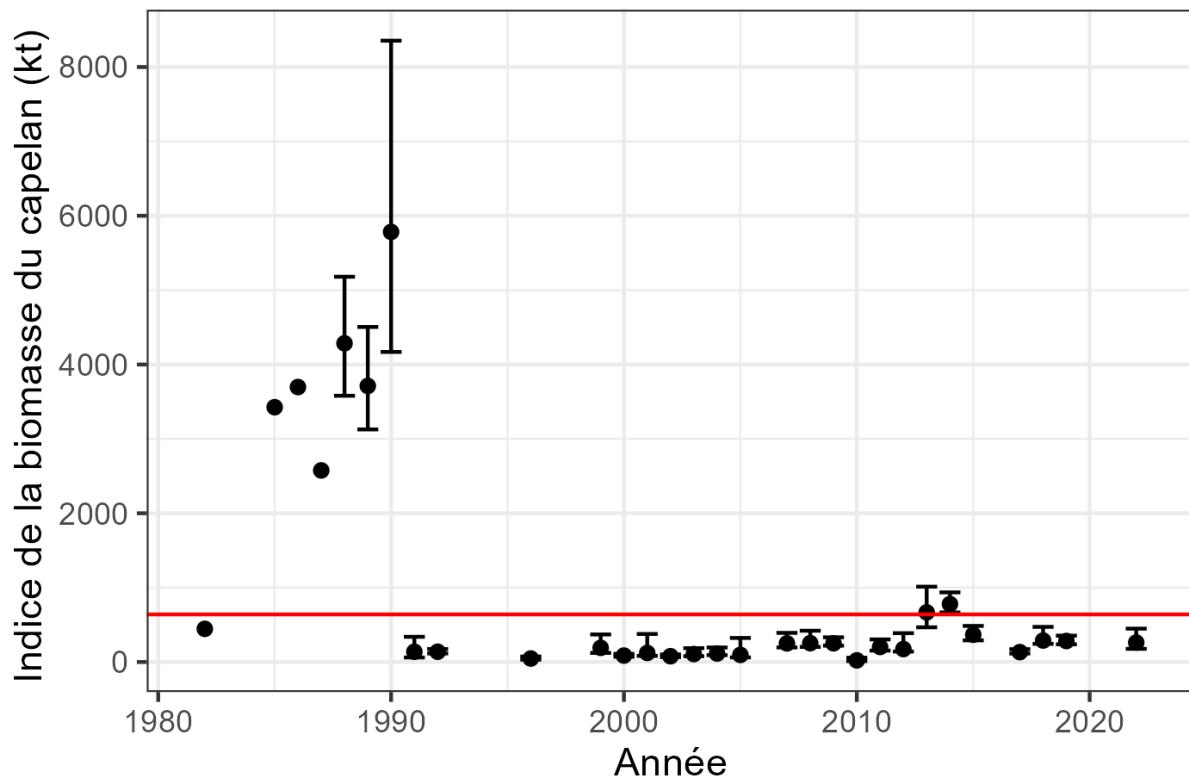


Figure 5. Indice de la biomasse du capelan avec des intervalles de confiance à 95 % de 1982 à 2022 avec le point de référence limite (ligne rouge horizontale; 640 kt).

ANNEXE 1 : APPROCHES NON VALIDES

PROPORTION DE B_{RMD} OU B_0

Modèles de production excédentaire

Les modèles de production excédentaire (MPE, également appelés « modèles dynamiques de la biomasse ») ont été largement utilisés pour les évaluations des stocks malgré leurs limites bien connues (Hilborn et Walters 1992). Dans les formulations antérieures des MPE, les modèles ne tenaient pas compte de l'anticompensation, c'est-à-dire des réductions du taux de recrutement lorsque la biomasse est faible, ce qui a mené à l'hypothèse d'une augmentation du taux de croissance de la biomasse à mesure que la biomasse approchait de zéro (Froese et al. 2017; Schnute et Richards 2002). Ces problèmes ont été quelque peu améliorés par un modèle simple en forme de bâton de hockey qui suppose un recrutement constant du stock au-dessus d'un seuil et un déclin linéaire en dessous de celui-ci (Froese et al. 2016). Cependant, les MPE ne tiennent pas compte de la structure par âge des stocks, ce qui peut être problématique lors de la modélisation de stocks ayant un recrutement variable, une durée de vie courte, une mortalité après la fraie ou qui sont déterminés par des processus ascendants. Enfin, tous les MPE supposent que le paramètre r reflète la croissance, la mortalité naturelle, la maturité et le recrutement.

Malgré ces limitations, nous avons utilisé le progiciel JABBA (Winker et al. 2018), qui a été développé pour rendre les MPE bayésiens de type état-espace relativement faciles à exécuter en utilisant une interface R (R Core Team 2022) vers JAGS (Plummer 2003). Le progiciel JABBA est relativement facile à exécuter, peut exécuter des versions Schaefer, Fox et Pella-Tomlinson des modèles de production excédentaire et génère un certain nombre de résultats normalisés et utiles (p. ex. diagrammes de Kobe et estimations de B_{RMD}).

Le progiciel JABBA peut utiliser plusieurs indices. Ainsi, en plus du relevé acoustique printanier, nous avons également inclus des relevés acoustiques effectués par l'ex-URSS au printemps et à l'automne dans les divisions 2J3KL. Les relevés d'automne de l'URSS ont été réalisés de 1982 à 1992, généralement en novembre et surtout dans les divisions 2J3K. Le relevé acoustique printanier de l'URSS a été mené dans les divisions 3LNO de 1975 à 1994, mais la couverture était très variable (Buren et al. 2019). Le Canada a réalisé un relevé acoustique d'automne de 1981 à 1991, mais les cohortes ne se suivent pas bien d'une année à l'autre et, par conséquent, ce relevé ne sera pas pris en compte dans la présente analyse. Il convient de noter que les relevés acoustiques soviétiques du printemps et de l'automne n'ont pas été comparés quantitativement à l'indice de Terre-Neuve-et-Labrador et que leur relation entre eux est inconnue. De plus, les relevés soviétiques confondent les populations de capelans des divisions 2J3KL et 3NO (MPO 2021a). Des recherches plus approfondies sont nécessaires pour utiliser les relevés soviétiques dans les analyses futures. Nous avons également utilisé les débarquements de capelan qui ont été déclarés depuis 1972. La pêche était dominée par une pêche hauturière qui capturait des poissons matures et immatures dans les années 1970. En 1978, une pêche côtière ciblant les femelles roguées a débuté. Après l'effondrement du stock de capelan des divisions 2J3KL en 1991, la pêche hauturière a pris fin. La pêche côtière a atteint en moyenne 25 kt avec les diminutions du total autorisé des captures au cours des dernières années (MPO 2021a). Les débarquements des pêches ne reflètent pas nécessairement la mortalité totale causée par la pêche dans la pêche côtière, car les prises peuvent être rejetées en raison de la teneur en aliments rouges, d'un pourcentage insuffisant d'œufs et de la petite taille des capelans. Ces problèmes étaient les plus prédominants avant le début des années 1990, lorsqu'une pêche expérimentale a été mise en place pour vérifier la

valeur marchande des prises avant l'ouverture de la pêche et, par conséquent, les rejets ont été réduits.

Les modèles ont été exécutés avec les données sur les prises et le relevé acoustique seulement, ainsi qu'avec les relevés de l'URSS. Pour K , nous avons utilisé à la fois la biomasse maximale (5 783 kt) observée et la biomasse médiane (3 704 kt) de 1985 à 1990 comme point de départ pour les valeurs a priori. Étant donné que JABBA a une option permettant d'entrer K sous forme de fourchette, nous avons ensuite testé des valeurs a priori diffuses et plus informatives autour de ces valeurs. Pour l'estimation ponctuelle de r , nous avons utilisé les valeurs de Fishbase (Froese et Pauly 2022) et le maximum observé de r dans la série chronologique, sans compter le changement de 2010 à 2011 (voir la section Données – Relevé acoustique printanier). Pour la variabilité de r , nous avons utilisé l'écart-type observé de la série chronologique ainsi que des valeurs plus diffuses. Plutôt que d'utiliser les valeurs par défaut de JABBA pour la variable ψ , qui sert à estimer le rapport entre la biomasse reproductrice la première année et K , c'est-à-dire un rapport de l'épuisement de la biomasse initiale, nous avons utilisé une moyenne log-normale de 0,5 et un CV de la même valeur pour deux raisons : premièrement, étant donné que ce stock est pêché depuis les années 1970 et que le relevé acoustique a commencé en 1985, il est peu probable que le stock soit à K . Deuxièmement, nous avons pensé qu'il était prudent de créer une valeur a priori moins non informative étant donné notre mauvaise compréhension de la valeur que K pourrait prendre pour cette espèce. Pour l'erreur de processus (σ), nous avons utilisé une valeur a priori non informative et une distribution gamma inverse (forme = 0,01, taux = 0,01). Dans JABBA, la capturabilité (q) peut normalement varier. Cependant, nous obtenions constamment des valeurs supérieures à 1, difficiles à expliquer pour un relevé acoustique. Nous avons donc modifié le code JABBA pour que la valeur de q soit uniformément répartie entre ~0 et 1.

Cependant, dans toutes les formulations du modèle et malgré l'utilisation de diverses valeurs a priori, l'erreur de processus expliquait une grande partie de la variabilité des données, tandis que le modèle de processus sous-jacent expliquait relativement peu la dynamique des populations dans le temps. De plus, tous les modèles estimaient r près de zéro. Enfin, même lorsque nous avons utilisé une valeur a priori informative pour r , K a diminué et F/F_{RMD} a augmenté, indiquant que la valeur de l'a priori a un effet indu sur le modèle.

Cette approche est donc faisable, mais pas fiable.

MÉTHODES HISTORIQUES

B_{perte} est la biomasse correspondant à la taille de stock la plus faible observée. La valeur la plus basse observée dans le relevé acoustique remonte à 2010; en utilisant cette approche, le PRL est donc de 23 kt. Cependant, 2010 a probablement été une très mauvaise année pour le capelan et le relevé acoustique printanier a clairement manqué une partie du stock (voir la section Données – Relevé acoustique printanier). Si on élimine la valeur de l'indice de la biomasse de 2010, la valeur la plus basse est celle de 1996 et le PRL est de 47 kt. Ce PRL est faisable et, dans le contexte d'une erreur d'observation, il est fiable. Mais étant donné que 4 kt est ~ 1 % de la médiane de la période la plus productive et ~ 6 % de la valeur la plus élevée de la période après l'effondrement, et que le stock est considéré comme étant dans un état d'effondrement depuis 1991, cette valeur a été considérée comme une limite non plausible pour un stock subissant des dommages graves.

B_{min} est la biomasse la plus faible observée à partir de laquelle un rétablissement à la valeur moyenne a été observé ou une autre biomasse minimale qui a produit un « bon » recrutement. Cette approche est similaire à l'approche appliquée au stock de la mer de Barents et à une approche reconnue du CIEM (voir la section Discussion). Bien que faisable, B_{min} n'est pas fiable

dans ce cas parce que les 80^e et 90^e centiles pour le recrutement sont produits par 174 kt (2012) et 3,7 Mt (1987) respectivement, c'est-à-dire que de légères variations des centiles produisent des biomasses et des PRL très différents. En outre, il n'y a pas de valeurs entre les phases de productivité élevée et faible, ce qui suggère également que B_{min} n'est pas une approche fiable.

ANNEXE 2 : APPROCHES QUI N'ONT PAS ÉTÉ APPLIQUÉES

PRISES SEULEMENT

Froese *et al.* (2017) ont présenté la méthode CMSY, qui a corrigé certaines des lacunes de la précédente, Catch-MSY. CMSY est similaire au progiciel JABBA à bien des égards. CMSY est une implémentation bayésienne de type état-espace du modèle de production excédentaire de Schaefer. Comme le progiciel JABBA, CMSY est ajustée aux données sur les prises et la biomasse ou de capture par unité d'effort. La différence réside dans le fait que CMSY utilise les prises et la productivité pour estimer la biomasse et applique une approche de Monte Carlo pour détecter les paires *r*-*K*. Ces paires sont considérées comme viables si la biomasse calculée est compatible avec les prises observées.

Les méthodes fondées uniquement sur les prises ont été développées principalement pour évaluer l'état global des stocks non évalués (p. ex. Costello *et al.* 2012; Kleisner *et al.* 2013; Palomares *et al.* 2020). Ces modèles supposent que les prises sont proportionnelles à l'abondance, ce qui n'est pas le cas pour le capelan des divisions 2J3KL pendant la majeure partie de la série chronologique, car l'effort de pêche est déterminé par les forces du marché, non par l'abondance, et les rejets non déclarés étaient probablement importants avant le début des années 1990. De plus, des examens récents ont évalué le rendement des méthodes fondées uniquement sur les prises pour estimer l'état des stocks (Free *et al.* 2020; Ovando *et al.* 2022; Sharma *et al.* 2021) et ont constaté qu'elles produisaient des estimations biaisées et imprécises de l'état du stock. Un bref examen de ces méthodes est présenté à l'annexe A de Barrett *et al.* 2024.

Enfin, un effort pour produire un PRL à l'aide de cette approche a donné des résultats similaires à ceux du progiciel JABBA, ce qui n'est pas surprenant compte tenu de la similitude de la méthodologie (Jubinville *et al.* 2022). Les mêmes problèmes et limites que ceux du progiciel JABBA devraient s'appliquer à cette méthode et les diagnostics ne sont pas fournis. Cette approche est donc faisable, mais pas fiable.

MODÈLE STRUCTURÉ PAR ÂGE

Des efforts considérables ont été consacrés à l'élaboration d'un modèle bayésien de type état-espace structuré par âge qui intégrait les aspects environnementaux du modèle de prévision du capelan (Lewis *et al.* 2019). Des progrès importants ont été réalisés, mais au moins un à deux mois de travail étaient encore nécessaires avant d'obtenir un modèle fonctionnel avec tous les diagnostics connexes au moment de l'évaluation du capelan. Les progrès ont été entravés par des problèmes structurels dans les données, notamment un certain nombre d'années où l'abondance des poissons immatures d'âge 2 à l'instant *t* était approximativement égale ou inférieure au nombre de poissons d'âge 3 à l'instant *t*+1, le fait que les données soviétiques n'étaient pas directement comparables aux données canadiennes et les préoccupations concernant le taux de survie après la fraie (Flynn 2001). Les problèmes structurels liés aux données et à la survie après la fraie sont en train d'être résolus, mais des efforts considérables seront nécessaires pour pouvoir comparer les données acoustiques soviétiques et canadiennes et ces comparaisons ne seront peut-être pas possibles. On espère pouvoir produire un modèle utile structuré par âge, et il s'agit d'ailleurs d'une recommandation de recherche, mais comme ce travail n'a pas été réalisé, ce point ne sera pas examiné plus en détail dans le présent document.

MÉTHODE À INDICATEURS MULTIPLES

L'approche des « feux de circulation » ou à indicateurs multiples peut être utilisée lorsqu'un seuil de dommages graves est connu pour plusieurs indices. Le PRL du crabe des neiges (*Chionoecetes opilio*) à Terre-Neuve-et-Labrador est un exemple de l'approche à indicateurs multiples (Mullowney *et al.* 2018; Mullowney et Baker 2023), dans laquelle trois paramètres de la santé du stock visent à la fois la protection biologique et l'efficacité de la pêche.

L'avantage de l'approche à indicateurs multiples est que le recours à un seul indicateur pour un PRL peut être trompeur. Par exemple, il est bien connu que le potentiel de reproduction d'une BSR composée de petits poissons est beaucoup plus faible que celui d'une BSR composée de gros poissons, c'est-à-dire que la relation est allométrique; par conséquent, un PRL fondé sur la BSR peut être trompeur si la structure par taille est tronquée. L'approche à indicateurs multiples pourrait également être utile si certains indices sont pertinents pour prédire la taille future des stocks. Par exemple, la densité larvaire du capelan à l'instant t s'est avérée un prédicteur raisonnable du recrutement à l'instant $t+2$ (Murphy *et al.* 2018). Elle pourrait donner un avertissement avancé de l'état du stock.

Cependant, l'approche à indicateurs multiples n'a pas été jugée appropriée pour le capelan. Bien que l'on utilise plusieurs indices (la glace, l'état et les larves) pour projeter l'indice à partir du relevé acoustique, ces valeurs sont déjà intégrées aux prévisions de cet indice (Lewis *et al.* 2019), ce qui rend cette approche redondante en tant que PRL possible. De plus, certaines des relations du modèle de prévision ne sont pas aussi solides que les années précédentes, ce qui les rend moins fiables en tant que base d'un PRL (MPO 2023).

APPROCHES FONDÉES SUR LA LONGUEUR

Étant donné que de nombreux stocks sont pauvres en données et que la longueur des poissons est couramment mesurée, un certain nombre d'approches fondées sur la longueur ont été élaborées pour évaluer des PRL à partir de F (Barrett *et al.* 2024). Ces approches comprennent le ratio de potentiel de frai basé sur la longueur, les effets mixtes intégrés basés sur la longueur et l'approche bayésienne fondée sur la longueur. Ces approches ont été examinées et comparées aux méthodes fondées sur les prises dans Pons *et al.* (2020). Les hypothèses sous-jacentes à bon nombre de ces méthodes sont que le stock est à l'équilibre et que la longueur moyenne des prises diminue en raison d'une mortalité par pêche élevée ou d'une mortalité par pêche sélective en fonction de la taille lorsque les plus gros poissons sont retirés de la population.

Cependant, ces hypothèses ne sont pas valides pour le capelan des divisions 2J3KL pour au moins trois raisons : premièrement, la troncature de la répartition par âge dans la période après l'effondrement a éliminé les poissons plus âgés et plus gros, mais rien n'indique que ces classes d'âge plus âgées aient été perdues en raison de la pêche. Deuxièmement, le capelan des divisions 2J3KL présente une relation négative entre la longueur des poissons d'âge 2 et la force de la cohorte d'âge, ce qui suggère une réponse dépendante de la densité et indépendante de la pêche. Troisièmement, on croit généralement que la pêche prélève une proportion relativement faible de ce stock la plupart des années parce que les débarquements ne constituent qu'une fraction de l'indice du relevé acoustique, qui est lui-même une fraction inconnue du stock total. Étant donné que la pêche cible les poissons reproducteurs qui mourraient probablement dans les semaines suivant la fraie, il est peu probable qu'une pêche sélective en fonction de la taille ait lieu (Murphy *et al.* 2023). Cette affirmation est appuyée par le fait que la longueur des poissons d'âge 3 et d'âge 4 est demeurée essentiellement la même depuis l'effondrement de la population en 1991 et que la longueur des poissons d'âge 3 reste semblable à celle de la période précédant l'effondrement.

Nous avons également choisi de ne pas utiliser d'approches fondées sur la longueur parce que ces méthodes ont été mises au point pour les stocks pauvres en données et pour lesquels on manque de données sur la structure par âge. Les données sur le stock de capelan des divisions 2J3KL présentent certainement des limites (voir la section Données), mais le stock n'est pas pauvre ou limité en données.

ANNEXE 3 : PÉRIODES ET MODÈLES UTILISÉS POUR LES PRL DE LA MORUE ET DU CAPELAN

Le PRL de la morue repose sur la BSR moyenne des années 1980, la dernière période à produire des niveaux moyens de recrutement (MPO 2011). Cependant, avec l'élaboration du modèle d'évaluation de la morue du Nord (NCAM, Cadigan 2015), c'est la BSR moyenne de 1983 à 1989 qui a été utilisée comme base du PRL de la morue; en effet, le relevé plurispecifique a commencé à couvrir toutes les divisions 2J3KL de l'OPANO en 1983 et le NCAM n'a pas été conçu pour utiliser les données sur les prises et de marquage recueillies avant cette date.

Contrairement au NCAM, la méthode Capcod ne calcule pas la BSR. Capcod visait à modéliser l'ensemble du stock de morue et, ainsi, à prédire la biomasse de la morue. Cependant, la biomasse peut être considérée comme une valeur de substitution de la BSR et les deux indicateurs affichent des tendances similaires dans les extrants du NCAM. De ce fait, pour le PRL du capelan, le PRL de la morue était la biomasse moyenne de la morue de 1983 à 1989 calculée par Capcod (1 500 kt), et non calculée dans le NCAM.

Il convient de noter que le PRL de la morue devrait être révisé à l'automne 2023 et qu'un changement nécessitera de recalculer le PRL du capelan.

Soulignons aussi que l'on a également tenu compte d'une biomasse moyenne de la morue fondée sur Capcod de 1987 à 1990 afin de caractériser l'état immédiat « avant l'effondrement » des deux stocks. Le PRL du capelan ainsi obtenu était de 480 kt, mais l'examen de cette option n'a pas été approfondi parce qu'elle ne correspondait pas à la période utilisée pour le PRL actuel de la morue.