



Pêches et Océans
Canada

Fisheries and Oceans
Canada

Sciences des écosystèmes
et des océans

Ecosystems and
Oceans Science

Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS)

Document de recherche 2022/017

Région des Maritimes

**Cadre de modélisation de 2018 pour l'évaluation
du stock de morue des divisions 4X5Y**

Yanjun Wang et Fonya Irvine

Station biologique de St. Andrews
Pêches et Océans Canada
125, promenade Marine Science
St. Andrews (N.-B.) E5B 0E4

Avant-propos

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

Publié par :

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

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



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2022
ISSN 2292-4272
ISBN 978--0-660-43105-5 N° cat. Fs70-5/2022-017F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Wang, Y. et Irvine, F. 2022. Cadre de modélisation de 2018 pour l'évaluation du stock de morue des divisions 4X5Y. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2022/017. iv + 46 p.

Also available in English:

Wang, Y. and Irvine, F. 2022. 2018 Stock Assessment Modelling Framework for 4X5Y Cod. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2022/017. iv + 44 p.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ.....	iv
INTRODUCTION	1
STRUCTURE DU STOCK	1
PÊCHE COMMERCIALE.....	1
RELEVÉS PAR NAVIRE DE RECHERCHE.....	1
EXAMEN DU CADRE DE MODÉLISATION ET OBJECTIFS.....	2
HISTORIQUE DE L'ÉVALUATION DU STOCK	2
CARACTÉRISTIQUES DES DONNÉES QUE LES MODÈLES DOIVENT ADAPTER ET EXPLIQUER	3
QUALITÉ DES DONNÉES	3
INDICES D'ABONDANCE D'APRÈS LES RELEVÉS	3
PRISES SELON L'ÂGE DANS LE CADRE DE LA PÊCHE.....	3
CHANGEMENTS DANS LA SÉLECTIVITÉ DE LA PÊCHE	4
MORTALITÉ PAR PÊCHE RELATIVE ET MORTALITÉ TOTALE	4
MODÈLE D'APV DE BASE.....	5
MODÈLE SAM	5
MODÈLES D'APV AVEC MOUVEMENTS ALÉATOIRES DE M.....	6
MODÈLES FRATIO	7
MODÈLES FFIRST.....	8
POINTS DE RÉFÉRENCE	9
ANALYSE DE LA PROJECTION ET DES RISQUES.....	11
PROJECTION À MOYEN TERME SUR 10 ANS.....	11
ORIENTATION SUR LES ACTIVITÉS D'EXAMEN INTERCADRE.....	12
LACUNES EN MATIÈRE DE DONNÉES ET RECOMMANDATIONS DE RECHERCHE.....	12
REMERCIEMENTS	12
RÉFÉRENCES CITÉES	13
TABLEAUX	15
FIGURESFIGURES	21

RÉSUMÉ

La réunion d'examen du cadre de modélisation pour l'évaluation du stock de morue des divisions 4X5Y a eu lieu du 6 au 8 novembre 2018. Il s'agissait de la deuxième des deux réunions d'examen par les pairs de la région des Maritimes de Pêches et Océans Canada concernant la morue des divisions 4X5Y. La première réunion, intitulée Cadre d'évaluation pour la morue franche des divisions 4X5Y : Partie 1 – Examen de la saisie de données, s'est déroulée les 27 et 28 mars 2018. Le présent document de recherche résume les conclusions de l'examen portant sur la saisie de données et décrit les méthodes élaborées pour estimer l'état actuel du stock, les points de référence et les projections à court terme pour fournir des avis pluriannuels sur les prises. On a réalisé une projection à moyen terme sur 10 ans pour évaluer le potentiel de rétablissement. Et on a consigné des orientations sur les activités d'examen intercadre, les lacunes existantes en matière de données et les recommandations de recherche pour l'avenir.

On a utilisé un modèle d'analyse de population virtuelle (APV) et un modèle d'évaluation espace-état (SAM), avec une mortalité naturelle constante supposée (M), pour démontrer les problèmes d'ajustement causés par la mortalité élevée inexplicite observée dans les données issues des relevés et de la pêche. Afin de résoudre les problèmes observés lors des évaluations du stock de morue des divisions 4X5Y réalisées par le passé (problèmes avec la tendance rétrospective et l'intégration des autres modèles), on a examiné des modèles d'APV comportant un mouvement aléatoire de la valeur M (mortalité naturelle) en fonction de différents groupes d'âges. Un modèle d'APV (3MFfirst) a été recommandé comme nouveau cadre de modélisation pour l'évaluation du stock de morue des divisions 4X5Y. On a observé une nette tendance à l'augmentation de la valeur M avec le temps dans les groupes d'âges plus avancés (âge 5+) : alors qu'elle s'élevait à 0,37 en 1983, cette valeur a augmenté régulièrement pour atteindre environ 1,5 depuis 2011. La valeur M élevée estimée dans les modèles d'APV pourrait être due à une confusion liée aux poissons se déplaçant vers des zones adjacentes ou plus profondes, à des débarquements sous-déclarés et à des rejets non déclarés, ainsi qu'à la mortalité naturelle causée par des facteurs biotiques et abiotiques.

En ce qui concerne les points de référence limites de la biomasse, compte tenu de la mortalité naturelle non stationnaire des morues d'âge 5+, les points de référence basés sur le rendement maximal durable (RMD) à l'équilibre ont été considérés comme inadaptés. Une $Sb_{50/90}$ de 22 193 t a été recommandée comme point de référence limite de la biomasse pour la morue des divisions 4X5Y. Compte tenu du mauvais état estimé du stock, l'avis sur les prises de la pêche serait aussi faible que possible pour permettre la reconstitution de ce stock. Aucun point de référence pour la pêche n'a été élaboré. Une projection sur 10 ans a montré qu'il y aurait peu de chances de voir le stock se rétablir en cas de forte mortalité naturelle et de faible recrutement, même avec des prises nulles.

INTRODUCTION

En 2018, la région des Maritimes de Pêches et Océans Canada (MPO) a lancé un examen en deux parties du cadre d'évaluation pour la morue des divisions 4X5Y. La première partie portait sur la pêche commerciale et la saisie des données issues des relevés, qui ont été évaluées lors d'une réunion organisée à la Station biologique de St. Andrews les 27 et 28 mars 2018, et qui sont documentées dans Andrushchenko *et al.* (2022).

Les principales conclusions de l'examen de la saisie des données sont présentées ci-dessous. Pour plus de renseignements détaillés, se reporter à Andrushchenko *et al.* (2022).

STRUCTURE DU STOCK

Bien qu'ils soient évalués ensemble, le stock de morue franche de la baie de Fundy (sous-divisions 4Xqrs5Yb de l'OPANO) et le stock de morue franche du plateau néo-écossais (sous-divisions 4Xmno de l'OPANO) dans la zone de gestion présentent des taux de croissance très différents, les poissons de l'ouest (baie de Fundy) croissant plus rapidement que ceux de l'est (plateau néo-écossais). En général, une structure à deux stocks semble perdurer dans les divisions 4X5Y, avec une zone mixte dans la sous-division 4Xp et un certain déplacement ayant lieu entre les zones de gestion adjacentes.

PÊCHE COMMERCIALE

L'utilisation des données sur les prises antérieures à 1980 se limite aux quantités totales, car l'échantillonnage des prises antérieures à 1980 excluait la région de la baie de Fundy, rendant inexacte toute stratification en fonction de l'âge ou de la taille des prises dans les divisions 4X5Y effectuées avant 1980. L'évaluation distincte du stock de morue de la baie de Fundy et de celui du plateau néo-écossais nécessiterait un travail supplémentaire pour remédier aux fausses déclarations observées tout au long des années 1980, ou une série chronologique commençant après 1990.

La présence insuffisante d'observateurs et l'absence d'un échantillonnage systématique et impartial demeurent les principaux obstacles à la quantification de l'ampleur des prises accessoires et des rejets de morue dans les pêches autres que les pêches au poisson de fond.

RELEVÉS PAR NAVIRE DE RECHERCHE

Les relevés par navire de recherche ont été menés au moyen de plusieurs navires et engins différents depuis le début de la série chronologique en 1970, mais les problèmes observés lors de la pêche comparative entre le navire de recherche Lady Hammond et le navire de recherche Alfred Needler en 1983 ainsi que les incertitudes constatées quant à la capacité de pêche relative des deux navires ont donné lieu à des facteurs de conversion peu fiables pour la morue (Clark et Brown 1996, Mohn 1999). Sans facteurs de conversion fiables, les tendances relatives à l'abondance et à la biomasse antérieures à 1983 ne sont pas comparables aux années suivantes. Au vu du manque de données fiables sur les prises selon l'âge dans les années 1970 et de la faible fiabilité des facteurs de conversion pour les relevés antérieurs à 1983, il a été conclu que les données issues des relevés antérieurs à 1983 devaient être exclues des modèles de population de la morue des divisions 4X5Y.

Il a également été convenu que les relevés associés au quota individuel transférable (QIT) menés entre 1996 et 2011 seraient exclus des évaluations du stock des divisions 4X5Y d'après plusieurs évaluations approfondies des données issues de ces relevés (Clark et Emberley 2009, Claytor *et al.* 2014).

EXAMEN DU CADRE DE MODÉLISATION ET OBJECTIFS

Les objectifs de la réunion portant sur le cadre d'évaluation consistent à évaluer un ou plusieurs modèles pour surveiller l'état et la productivité du stock, c'est-à-dire :

1. Déterminer la méthodologie que l'on peut utiliser pour estimer avec exactitude l'abondance actuelle du stock et les niveaux de mortalité par pêche de la morue des divisions 4X5Y.
2. Définir le point de référence limite de la biomasse en vertu du cadre de l'approche de précaution du MPO et, le cas échéant, le point de référence de la mortalité par pêche.
3. Déterminer une méthodologie de prévision des trajectoires des populations dans les conditions de productivité actuelles et les niveaux de prises réalisables indiqués par les gestionnaires des pêches.
4. Étudier les méthodes à données limitées qui pourraient permettre de vérifier la robustesse de tous les avis sur les prises par rapport aux incertitudes de l'évaluation du stock.
5. Déterminer les variables à l'échelle de l'écosystème qui contribuent aux changements dans la répartition spatiale de la morue des divisions 4X5Y.
6. Fournir des recommandations sur le calendrier d'évaluation continue de la morue des divisions 4X5Y. Déterminer les indicateurs qui seraient utiles pour caractériser l'état du stock dans les années qui séparent les évaluations du stock et les événements qui pourraient déclencher une évaluation plus tôt que prévu.
7. Déterminer les incertitudes et les lacunes dans les connaissances.

Le présent document de travail traite des objectifs 1 à 3 et 6 et 7 ci-dessus.

HISTORIQUE DE L'ÉVALUATION DU STOCK

Les évaluations précédentes du stock de morue des divisions 4X5Y ont été modélisées à l'aide de l'analyse de population virtuelle calibrée à partir des relevés estivaux du MPO (ADAPT) dont l'historique est détaillé dans Andrushchenko *et al.* (2022). La dernière évaluation analytique du stock de morue des divisions 4X5Y a été réalisée en 2008. Au cours de cette évaluation, on a examiné plusieurs modèles pour étudier les changements dans la capturabilité lors des relevés, la mortalité naturelle et l'exclusion des relevés associés au QIT (Clark et Emberley 2009). Le modèle accepté n'a supposé aucun changement dans la capturabilité lors des relevés, a estimé une augmentation de M de 0,2 à 0,76 pour les morues plus âgées (âge 4+) depuis 1996, et a exclu les relevés associés au QIT de l'évaluation (Clark et Emberley 2008). Plus tard, les extraits de ce modèle ont été utilisés dans l'évaluation du potentiel de rétablissement (EPR) de 2011 concernant la morue des divisions 4X5Y. Compte tenu de l'état médiocre du stock et des avis constants du Secteur des sciences du MPO en vue de maintenir les prises de la pêche à leur niveau le plus faible possible, de multiples mises à jour de l'état du stock ont été fournies depuis lors. Les gestionnaires des pêches ont émis des avis sur les prises en se fondant sur la surveillance des tendances dérivées des relevés de recherche estivaux du MPO fournies dans les mises à jour de l'état du stock (MPO 2015, MPO 2017, MPO 2018).

CARACTÉRISTIQUES DES DONNÉES QUE LES MODÈLES DOIVENT ADAPTER ET EXPLIQUER

QUALITÉ DES DONNÉES

La qualité des données est mise à mal par le manque de facteurs de conversion entre les navires de recherche *Cameron* et *Needler*, les problèmes de détermination de l'âge pour les plus jeunes spécimens (âges 1 et 2), et les problèmes d'échantillonnage liés aux données sur les prises de la pêche antérieures aux années 1980. Restreindre les données à celles issues des relevés et de la pêche postérieures aux années 1980 dans l'évaluation pourrait entraîner une perte de renseignements sur la productivité du poisson et avoir un effet potentiel sur le calcul des points de référence.

D'autres problèmes majeurs concernant le stock ont été résumés lors de la réunion portant sur l'examen de la saisie des données, à savoir les débarquements sous-déclarés et mal déclarés ainsi que les rejets non quantifiés en raison du faible niveau de présence d'observateurs. L'année et l'ampleur des prises et des rejets mal déclarés étaient inconnues. En outre, la mortalité naturelle non stationnaire possible a rendu plus difficile la modélisation de la dynamique des populations de ce stock mixte.

INDICES D'ABONDANCE D'APRÈS LES RELEVÉS

Les indices d'abondance combinés tirés des relevés menés dans la baie de Fundy et l'ouest du plateau néo-écossais de 1983 à 2017 sont présentés au tableau 1. Les valeurs du coefficient de variation pour chaque âge sont présentées au tableau 2. Les coefficients de variation fluctuaient de 28 % à 44 % pour les spécimens d'âge 1 à 7, mais ces dernières années, les coefficients de variation des spécimens d'âge 8+ étaient plus élevés, et des prises nulles étaient plus constatées pour les spécimens d'âge 6+. Les indices d'abondance tirés des relevés affichent une nette tendance à la baisse et une troncature selon l'âge depuis le milieu des années 1990, même si une petite quantité de poissons plus âgés a été capturée en 2016 et en 2017 (figure 1). Compte tenu des coefficients de variation plus élevés associés aux prises effectuées lors des relevés et des nombreuses prises manquantes dans les groupes d'âges plus avancés, on a utilisé les prises de morues d'âge 1 à 6 enregistrées lors des relevés comme indices d'abondance pour l'analyse du modèle (tableau 1).

Pour suivre les renseignements sur la structure selon l'âge dans les indices d'abondance tirés des relevés, on a utilisé des proportions normalisées selon l'âge pour montrer des tendances de cohorte (figure 2). Les cohortes de 1992, 1998, 2001, 2003, 2007, 2010 et 2013 étaient supérieures à la moyenne, et il y a probablement eu un effet de l'année dans le relevé de 2017. Quelques groupes d'âges ont affiché des prises supérieures à la moyenne, ce qui n'était pas cohérent avec les signes de vigueur de la cohorte décrits au cours des autres années de prises des relevés.

PRISES SELON L'ÂGE DANS LE CADRE DE LA PÊCHE

Le tableau 3 présente les prises selon l'âge dans le cadre de la pêche dans la baie de Fundy et sur le plateau néo-écossais entre 1983 et 2017. Par rapport aux indices d'abondance dérivés des relevés, les prises selon l'âge dans le cadre de la pêche ont montré des tendances plus marquées à la baisse et une troncature selon l'âge au cours des dernières années (figure 3). Les proportions normalisées selon l'âge des prises selon l'âge dans le cadre de la pêche ont donné des renseignements similaires à ceux des relevés concernant la vigueur relative des cohortes (figure 4).

Compte tenu de la faible contribution des poissons d'âge plus avancé (âge 7+) aux prises totales de la pêche (de 0,2 % à 10 % en nombre, sauf pour 2016, où cette contribution a atteint jusqu'à 16 %), on a regroupé les individus d'âge 7+ dans le modèle (tableau 3).

CHANGEMENTS DANS LA SÉLECTIVITÉ DE LA PÊCHE

La répartition spatiale de la pêche à la morue des divisions 4X5Y a changé au fil du temps. Historiquement, la proportion des débarquements de morue en provenance du plateau néo-écossais a été plus importante que celle de la baie de Fundy, mais les proportions ont changé avec la redistribution de l'effort de pêche à partir de la fin des années 1990 et du début des années 2000. Plus récemment, les contributions des deux zones sont devenues équivalentes (tableau 4; figure 12 dans Andrushchenko *et al.* 2022). La contribution des débarquements de la sous-division 4Xp a été relativement faible (environ 10 %) pendant les années 1970 et 1980, mais elle a augmenté régulièrement pour représenter 30 % des débarquements de morue des divisions 4X5Y à la fin des années 2000.

La sélectivité de la pêche a vraisemblablement évolué au fil du temps en raison des changements dans la répartition spatiale et saisonnière de la pêche et de l'utilisation de types d'engins différents. Par exemple, les palangres et les chaluts à panneaux tendent à capturer des morues de taille similaire, avec des fréquences de longueur maximales de 50 à 60 cm pour les deux engins, dans toutes les zones de l'unité de gestion 4X5Y (dans Andrushchenko *et al.* 2022). En revanche, les filets maillants ont tendance à capturer des morues plus grosses, ce qui reflète la sélectivité du maillage de 5,5 pouces, avec des fréquences de longueur maximales comprises entre 65 et 70 cm.

Clark (2014) a proposé de mettre en œuvre une méthode de ratio pour calculer la sélectivité relative de la pêche à partir de la composition selon l'âge ou de la longueur obtenue à l'aide des données issues de la pêche et des relevés, en supposant qu'il n'y ait pas de changement temporel dans la sélectivité des relevés. Ainsi, ces valeurs de ratio pourraient être utilisées pour détecter les changements temporels de la sélectivité de la pêche, par rapport à celle des relevés. Les données issues de la pêche et des relevés de 1983 à 2017 indiquaient que l'âge des poissons entièrement sélectionnés par la pêche était passé de 3 à 4 dans la période postérieure à 1995, alors que l'âge des poissons entièrement sélectionnés par les relevés était de 3. Elles montraient également un recrutement partiel plafonné pour les poissons d'âge 4 à 6, dans les deux périodes (figure 5).

On a utilisé ces renseignements pour comprendre les changements possibles du recrutement partiel attribuables à la pêche (recrutement partiel en forme de dôme ou plafonné) et faciliter la détermination des prochaines étapes du développement du modèle.

MORTALITÉ PAR PÊCHE RELATIVE ET MORTALITÉ TOTALE

La mortalité par pêche relative (F relative) selon l'âge a été calculée comme le rapport entre les prises selon l'âge lors de la pêche et les prises selon l'âge lors des relevés (figure 6). La valeur de F relative a diminué pour les jeunes (âges 1 à 5) au milieu des années 1990, alors qu'elle a varié pour les plus âgés (âge 6+).

La mortalité totale (Z) selon l'âge a été calculée à partir des prises selon l'âge lors des relevés estivaux du MPO. La valeur de Z d'après ces relevés pour les poissons d'âge 4+ est plus élevée depuis les années 1990, malgré la baisse non négligeable de la valeur de F relative (figure 7).

En outre, des analyses de la courbe des prises s'appuyant sur les données d'abondance relative transformées logarithmiquement pour chaque cohorte au cours des années successives

ont été utilisées pour calculer Z d'après les relevés pour chaque cohorte. Ce calcul a le mérite d'éliminer les effets de confusion liés à l'importance différentielle des classes d'âge sur l'interprétation des résultats des analyses de la courbe des prises. En utilisant l'âge 3 comme l'âge pleinement recruté, la figure 8 montre une Z plus élevée pour les âges plus avancés (6+) dans toutes les cohortes au cours des dernières années, ce qui est cohérent avec les calculs de Z d'après les relevés ci-dessus.

Les signaux contradictoires concernant les tendances de F relative et de Z signifient que d'autres facteurs que les débarquements déclarés peuvent contribuer à la mortalité totale dans la dynamique des populations.

MODÈLE D'APV DE BASE

On a utilisé le modèle ADAPT, un modèle d'analyse de la population virtuelle (APV) de base, pour recenser les problèmes possibles en cas de signaux contradictoires dans les données. Dans ce modèle, la mortalité naturelle (M) a été fixée à 0,2 pour tous les âges et toutes les années, et il a été présumé que les prises selon l'âge lors de la pêche étaient connues sans erreur. Les données saisies dans ce modèle étaient les prises selon l'âge lors de la pêche pour les poissons d'âge 1 à 7+ (1983–2017) et les indices d'abondance selon l'âge des poissons d'âge 1 à 6 tirés des relevés estivaux du MPO (1983–2017). Les observations nulles dans les indices d'abondance étaient traitées comme des valeurs manquantes. Il a été déterminé que la capturabilité (q) de relevé était plafonnée aux âges 3 à 6 d'après l'analyse des données ci-dessus. On a déterminé que la sélectivité de la pêche sur la tranche d'âge 7+ était équivalente à celle de l'âge 6. La fonction objective représentait l'écart entre le logarithme des indices d'abondance selon l'âge observés et prévus, qui étaient censés suivre une distribution log-normale. La vérification des résidus a montré une tendance claire, le modèle surestimant les données de la population au cours des premières années et sous-estimant les données de la population au cours des dernières années (figure 9). Cette tendance était provoquée par les signaux contradictoires des tendances liées à F relative et à Z dans l'hypothèse que les prises selon l'âge lors de la pêche étaient exactes et que M était constante.

MODÈLE SAM

Le modèle d'évaluation espace-état (State-space Assessment Model – SAM) a été utilisé par le Conseil international pour l'exploration de la mer (CIEM) pour de nombreux stocks (CIEM 2017). Au lieu de partir du principe que les prises de la pêche sont exactes, comme c'est le cas dans le modèle d'APV de base, on présume que les prises selon l'âge lors de la pêche et des relevés suivent une erreur d'observation log-normale. En outre, une erreur de processus log-normale et multiplicative a été supposée dans les équations sur l'état du stock :

$$\log N_{a+1 y+1} = \log N_{a y} - F_{a y} - M_{a y} + \xi_{a y}, \text{ où } \xi_{a y} \sim N(0, \sigma_{\xi}^2)$$

Où a, y indiquent respectivement l'âge et l'année, et représente l'erreur de processus. L'erreur de processus signalait que la connaissance complète de F et M pouvait ne pas fournir une connaissance complète de la survie des cohortes d'une année à l'autre, et qu'elle pouvait aussi représenter les migrations. Une valeur élevée ou des écarts unilatéraux par rapport à l'équation sur le stock peuvent être utilisés pour diagnostiquer les problèmes d'ajustement du modèle.

Le recrutement peut être modélisé comme un processus stochastique par l'intermédiaire d'une relation stock-recrutement, ou comme un paramètre libre. Dans le modèle appliqué à la morue des divisions 4X5Y :

$$\log R_y = \log R_{y-1} + \varepsilon_y, \text{ où } \varepsilon_y \sim N(0, \sigma_R^2)$$

Où le logarithme du recrutement a suivi un mouvement aléatoire.

On a supposé que le vecteur de mortalité par pêche $F_y = (F_{1y} F_{2y} \dots F_{6y})$ suivait un mouvement aléatoire corrélé :

$$\log F_{y+1} = \log F_y + \psi_y, \text{ où } \psi_y \sim N(0, \Sigma)$$

Où ψ_y suivait une distribution normale multivariée. Dans le modèle appliqué à la morue des divisions 4X5Y, on a pris pour hypothèse une structure de corrélation AR(1). Pour toute combinaison d'âges ($a \neq \tilde{a}$)

$$\Sigma_{a \tilde{a}} = \rho^{|a-\tilde{a}|} \sqrt{\Sigma_{aa} \Sigma_{\tilde{a}\tilde{a}}}$$

On a estimé objectivement la capturabilité de relevé, les paramètres de corrélation, le processus et les variances liées à l'observation par la méthode du maximum de vraisemblance en intégrant les variables d'état non observées.

Pour plus de précisions sur le modèle SAM, voir Nielsen et Berg (2014). L'application du modèle SAM aux données relative à la morue des divisions 4X5Y a été mise en œuvre à l'aide de l'ensemble R « [stockassessment](#) ».

On a mené une exécution de base du modèle SAM en utilisant les données issues de la pêche et des relevés concernant la morue des divisions 4X5Y. Les intrants du modèle étaient les mêmes que ceux du modèle d'APV de base ci-dessus, avec une capturabilité de relevé plafonnée pour les âges 3 à 6, et une M constante de 0,2 pour tous les âges et toutes les années. On a déterminé que la sélectivité de la pêche sur la tranche d'âge 7+ était équivalente à celle de l'âge 6.

Le modèle a convergé et a montré une grande variance associée aux prises de la pêche et aux tendances fortes dans les résidus (figure 10). Il a indiqué qu'un changement systématique dans la déclaration des prises s'était produit au fil du temps, ce qui impliquait une surdéclaration importante des prises les premières années et une sous-déclaration des prises plus récemment. Jusqu'à présent, aucun élément probant ne permet d'étayer la possibilité que des quantités importantes de prises aient été surdéclarées au cours des premières années. L'analyse rétrospective des 7 dernières années a montré de fortes tendances rétrospectives; les valeurs rétrospectives avec correction rho étaient de 0,70 pour la BSR (biomasse des poissons d'âge 4+) et de -0,36 pour la valeur F4-7 (moyenne pondérée en fonction du nombre de la mortalité par pêche pour les âges 4 à 7), comme le montre la figure 11.

La principale différence entre le modèle d'APV de base et le modèle SAM consistait en l'hypothèse d'une erreur d'observation dans les prises selon l'âge lors de la pêche. Cependant, les deux modèles ont montré des problèmes de diagnostic avec l'hypothèse de M établie à 0,2.

MODÈLES D'APV AVEC MOUVEMENTS ALÉATOIRES DE M

On a adapté un modèle d'APV avec une mortalité naturelle (M) variable dans le temps aux données des morues des divisions 4X5Y pour traiter les signaux contradictoires trouvés dans les données issues des relevés et de la pêche. Au lieu de supposer une M constante, ce modèle permettait à la mortalité naturelle de varier dans le temps selon les groupes d'âge. Les tests de simulation de ces modèles d'APV pour la morue de l'est du banc Georges et la morue du sud du golfe du Saint-Laurent ont permis de tirer des conclusions fiables sur les changements de M (Swain 2013, Swain et Benoit 2015). Pour la morue des divisions 4X5Y, compte tenu du biais possible dans les prises déclarées, M pourrait confondre la mortalité naturelle, les prises sous-déclarées, les rejets ou l'émigration de poissons vers d'autres zones.

Dans ce modèle, les intrants étaient les mêmes que ceux du modèle d'APV de base ci-dessus. Au lieu de supposer que M était constante, on a modélisé M comme un mouvement aléatoire incrémentiel pour les différents groupes d'âge chaque année.

$$M_{j, 1983} = Minit_j$$

$$M_{j,y}M_{j,y} = M_{j,y-1}e^{Mdev_{j,y}} \text{ si } y > 1983$$

Où j représentait le groupe d'âge et y représentait l'année indiquée. La valeur de $Minit_j$ correspondait à la valeur de M pour le groupe d'âge j pour la première année (1983). Les valeurs de $Minit_j$, de $Mdev_{j,y}$ et d'autres paramètres du modèle (capturabilité de relevé selon l'âge et dernière année [2018] de l'abondance de la population selon l'âge) ont été estimés en réduisant la fonction objective avec les éléments suivants : 1) un élément pour l'écart entre les valeurs observées et prévues des indices d'abondance selon l'âge, qui était censé suivre une distribution log-normale; 2) une pénalité pour les écarts de la valeur de $Minit_j$ par rapport à sa valeur antérieure (les valeurs antérieures normales pour $Minit_j$ ont été établies à une moyenne de 0,2 et à un écart-type de 0,05 pour tous les groupes d'âge); 3) une pénalité pour les écarts de $Mdev_{j,y}$ par rapport à sa valeur antérieure. Une normale antérieure pour la valeur de $Mdev_{j,y}$ a été établie à une moyenne de 0 et à un écart-type Msd de 0,05. La valeur de Msd avait des répercussions sur le niveau de contrainte s'exerçant sur le mouvement aléatoire. Pour plus de renseignements détaillés sur le modèle, voir Swain (2013).

Dans ce modèle, on est parti de l'hypothèse selon laquelle la capturabilité de relevé ne changeait pas dans le temps et qu'elle était plafonnée pour les âges 3 à 6.

Pour le groupe d'âge 7+, deux méthodes de rechange différentes ont été utilisées pour le calcul de la mortalité par pêche :

1. Fratio : $F_{7+} = F_6$
2. Ffirst : $F_6 = \text{moyenne}(F_{3-5})$ pour la période antérieure à 1995 et $F_6 = \text{moyenne}(F_{4-5})$. Cela permettait de tenir compte des changements de sélectivité de la pêche au milieu des années 1990 dont il est question dans l'analyse des données ci-dessus.

Comme la valeur de M dans le mouvement aléatoire a été modélisée selon les groupes d'âge, les modèles suivants avec une valeur de M pour 2 ou 3 groupes d'âge ont été explorés et comparés.

- Modèles avec une valeur de M pour 2 groupes d'âge : âges 1 à 5 et âge 6+ (appelés modèles « 2MFratio » et « 2MFfirst »).
- Modèles avec une valeur de M pour 3 groupes d'âge : âges 1 et 2, âges 3 et 4, et âge 5+ (appelés modèles « 3MFratio » et « 3MFfirst »).

Pour chaque modèle, on a calculé les incertitudes des paramètres du modèle en utilisant l'algorithme de rééchantillonnage de la méthode de Monte Carlo par chaîne de Markov (MCCM). Une chaîne d'une longueur de 1 000 000 a été lancée, et des échantillons ont été prélevés systématiquement toutes les 500 itérations, ce qui a donné une taille de l'échantillon a posteriori de 2 000 échantillons. On a évalué l'ajustement des modèles en vérifiant les résidus et en effectuant des analyses rétrospectives.

MODÈLES FRATIO

Les modèles 2MFratio et 3MFratio présentaient des correspondances similaires avec les données issues des relevés et présentaient tous deux des profils résiduels (figure 12). Les modèles ont surestimé la biomasse pour les âges 3 et 4 par rapport à celle issue des relevés.

L'analyse rétrospective des 7 dernières années a montré des tendances rétrospectives (figures 13 et 14). Pour le modèle 2MFratio, la valeur rétrospective avec correction rho était de -0,28 pour la BSR et atteignait 0,65 pour le paramètre F4–7; pour le modèle 3MFratio, la valeur rétrospective avec correction rho était de -0,28 pour la BSR et de 0,62 pour le paramètre F4–7.

MODÈLES FFIRST

Le modèle 3MFfirst a montré une meilleure correspondance avec les données de relevé concernant la biomasse que le modèle 2MFfirst (figure 15). La BSR estimée, le paramètre F4–7, le paramètre q de relevé et le paramètre M sont présentés à la figure 17. La valeur rétrospective avec correction rho était de -0,13 pour la BSR et de -0,01 pour le paramètre F4–7, d'après l'analyse rétrospective des 7 dernières années. Les extrants et les résidus d'APV de ce modèle sont présentés aux figures 17 et 18, ainsi que dans le tableau 4. Les intervalles de crédibilité de 95 % associés à M, au recrutement à l'âge 1, à la BSR, aux paramètres F4–7 et q de relevé, de même que la répartition de la BSR pour la dernière année, sont présentés aux figures 19 et 20. On observe une nette tendance à l'augmentation de M avec le temps dans les groupes d'âges plus avancés (M5+), surtout après 1995, une valeur qui est passée au-dessus de 1 et qui a atteint environ 1,5 depuis 2011. En revanche, les changements dans les paramètres M1–2 et M3–4 s'avèrent faibles.

L'analyse rétrospective n'a permis de constater aucune convergence du modèle 2MFfirst sur une seule année. Lorsque l'on a modifié l'écart-type par rapport à la valeur de *Mdev* antérieure pour les âges 1 et 2 de 0,05 à 0,1, ce modèle a convergé pour toutes les exécutions rétrospectives, présentant une valeur rétrospective avec correction rho de -0,09 pour la BSR et de 0,005 pour le paramètre F4–7. Les estimations de ce modèle ont été comparées à celles du modèle 3MFfirst, et on n'a constaté que peu de différences dans la correspondance du modèle avec les données de relevé concernant la biomasse (figure 15). La BSR, la valeur de F4–7 et la valeur de M5+ ainsi que la tendance selon l'âge de la mortalité par pêche (figure 21) étaient semblables à celles du modèle 3MFfirst. Toutefois, contrairement à la tendance légèrement haussière des valeurs de M1–2 et de M3–4 du modèle 3MFfirst, l'estimation de la valeur de M1–4 du modèle 2MFfirst a montré une augmentation progressive, commençant autour de 0,2 de 1983 à 2006, puis augmentant rapidement pour atteindre environ 0,5 ces dernières années. Avec l'augmentation de la valeur de M1–4, les recrutements estimés par le modèle 2MFfirst étaient plus élevés que ceux du modèle 3MFfirst ces dernières années (figure 21).

Bien que des conclusions différentes aient pu être tirées sur la mortalité naturelle chez les poissons plus jeunes (âges 1 à 4) et le recrutement pour le stock de morue des divisions 4X5Y, les deux modèles ont montré que la valeur de M chez les poissons d'âge plus avancé (5+) avait augmenté d'environ 1,5 depuis 2010. Une comparaison entre les indices d'abondance tirés des relevés à l'âge 1 et les recrutements corrigés à l'aide du paramètre q de relevé estimés à partir des modèles 2MFfirst et 3MFfirst, a montré que le modèle 2MFfirst surestimait les recrutements des dernières années (figure 22), ce qui reflète une valeur de *Mdev* plus élevée pour les âges 1 et 2 dans la configuration du modèle 2MFfirst.

Cette comparaison a été présentée lors de la réunion d'examen par les pairs qui s'est déroulée du 6 au 8 novembre 2018, et il a été convenu que le modèle 3MFfirst devrait être utilisé comme nouveau cadre de modélisation pour l'évaluation du stock de morue des divisions 4X5Y. Les points de référence calculés, sur la base de ce modèle, sont décrits dans la section suivante.

Selon le modèle d'APV 3MFfirst, la biomasse du stock reproducteur (âge 4+) de la morue des divisions 4X5Y a diminué tout au long des années 1990 et 2000, et s'est stabilisée à un niveau très bas depuis 2010. Le recrutement a été faible depuis le milieu des années 1990 et est resté inférieur à 5 millions de poissons depuis 2015 (tableau 4). Le déclin précoce constaté

dans les années 1980 était très probablement dû à une forte mortalité par pêche et le déclin qui s'en est suivi est dû à l'augmentation de la mortalité naturelle des poissons plus âgés (5+) et à de faibles niveaux de recrutement (figure 19). Les résultats sous-entendent une mortalité dépensatoire des morues d'âge 5+ avec une période de faible biomasse associée à une mortalité naturelle élevée.

POINTS DE RÉFÉRENCE

Le mandat relatif au cadre de modélisation de 2018 pour l'évaluation du stock de morue des divisions 4X5Y exigeait la définition du point de référence limite (PRL) de la biomasse, en vertu du cadre de l'approche de précaution du MPO (MPO 2009), et, le cas échéant, du taux d'exploitation limite (TEL) pour la pêche. Une évaluation du potentiel de rétablissement (EPR) pour la morue des divisions 4X5Y a été réalisée en 2011. Celle-ci utilisait les résultats du modèle d'évaluation de 2008 pour fournir les renseignements et les avis scientifiques nécessaires en vue de répondre aux exigences de la *Loi sur les espèces en péril* (LEP). Il a été conclu que la morue des divisions 4X5Y se trouvait dans la zone critique (MPO 2011). Avec la mise à jour de l'état du stock et des données relatives à la productivité du nouveau cadre de modélisation, les points de référence ont été redéfinis.

Le cadre de l'approche de précaution du MPO (MPO 2009) définit le PRL comme l'état d'un stock en dessous duquel il risque de subir des dommages sérieux. Le terme « dommages sérieux » est interprété comme un « recrutement compromis » ou comme toute modification des propriétés biologiques ou de la productivité du stock qui en réduit la probabilité de reconstitution ou de rétablissement (MPO 2016). Il n'existe pas de méthode unique pour déterminer le PRL pour chaque stock (Myers *et al.* 1994). Au moment de définir des points de référence, les meilleures pratiques devraient consister à évaluer autant de mesures de diagnostic que possible. Lors de l'Atelier sur les points de référence concernant les gadidés (DFO 2002), cinq méthodes de calcul ont été envisagées pour définir des PRL concernant la BSR. Voici ces cinq méthodes (DFO 2002) :

1. *B_{rétablissement}* : la plus faible biomasse historique à partir de laquelle le stock s'est reconstitué facilement.
2. *Sb_{50/90}* : la BSR correspondant à l'intersection entre le 50^e percentile des observations de recrutement et la ligne de remplacement pour laquelle 10 % des points stock-recrutement (S-R) sont situés au-dessus de la ligne.
3. *BH₅₀* : la BSR où le recrutement moyen prévu correspond à la moitié du recrutement maximum prédit par la supposition d'une relation stock-recrutement Beverton-Holt (c.-à-d. le recrutement correspondant à 50 % de la valeur de l'asymptote).
4. *RK₅₀* : la BSR inférieure où le recrutement moyen prévu correspond à la moitié du recrutement maximum prédit par la supposition d'une relation stock-recrutement de type Ricker (c.-à-d. le recrutement équivalant à 50 % de la valeur du sommet du dôme).
5. *NP₅₀* : estimation de la plus faible BSR où le recrutement médian prévu correspond à la moitié du recrutement maximum calculé par une analyse non paramétrique (c.-à-d. le recrutement équivalant à 50 % du plus haut recrutement médian atteignable par toute BSR à l'intérieur de l'éventail des observations historiques).

Lors de l'atelier, un consensus s'est dégagé sur le fait qu'une comparaison entre les cinq PRL candidats permettait de se faire une idée de la certitude des avis formulés.

Le TEL est le taux d'exploitation maximum acceptable pour le stock dans la zone saine. Ce taux doit être inférieur ou égal à la valeur F_{RMD} (MPO 2009). La valeur F_{RMD} à l'équilibre pourrait être

calculée l'aide du modèle de production structuré selon l'âge de Sissenwine-Shepherd (Sissenwine et Shepherd 1987) qui intègre une relation stock-recrutement avec l'analyse par recrue, ou une approximation pour le paramètre F_{RMD} en utilisant les valeurs de $F_{0,1}$ et de $F_{40\%}$ tirées de l'analyse par recrutement. La différence constatée dans la valeur de F_{RMD} calculée à partir de ces modèles pourrait s'expliquer par l'utilisation de différentes hypothèses concernant la dynamique du recrutement. L'analyse par recrutement suppose que le recrutement est constant. Les calculs utilisant des points de référence estimés n'intégrant pas la variation du recrutement sont susceptibles de donner lieu à des déclin de population inattendus, voire à des effondrements, lorsque la productivité est faible (Morgan *et al.* 2014). Lorsqu'il existe une relation stock-recrutement positive, les analyses par recrue auront tendance à surestimer la valeur de F_{RMD} , car elles ne tiennent pas compte de la rétroaction entre la conservation de la biomasse dans l'eau et l'augmentation du recrutement et du rendement qui a lieu plus tard (Duplisea 2012).

On a utilisé les résultats du modèle 3MFfirst pour déterminer les points de référence pour la morue des divisions 4X5Y. Compte tenu des changements importants observés dans la mortalité naturelle depuis le milieu des années 1990, la moyenne récente (1995–2017) de M , on a utilisé le recrutement partiel, le poids selon l'âge lors de la pêche, le poids selon l'âge du stock reproducteur et la maturité selon l'âge pour l'analyse par recrue. Afin de disposer de suffisamment de données sur les stocks et le recrutement permettant d'adapter une relation stock-recrutement appropriée, avec l'hypothèse d'une absence de changements évolutifs dans le cycle de vie causés par de courtes périodes de changements dans la mortalité naturelle, les données sur la relation stock-recrutement de la série chronologique à long terme (1983–2016) ont été utilisées dans les calculs pour les deux modèles. On a modélisé le recrutement en utilisant les modèles « en bâton de hockey », Beverton-Holt et Ricker, séparément.

Le tableau 5 montre la valeur de F_{RMD} à l'équilibre calculée à partir de différents modèles de relation stock-recrutement (figure 23) ainsi que les approximations de F_{RMD} obtenues à partir de l'analyse par recrue (figure 24). La valeur de F_{RMD} à l'équilibre peut varier considérablement, en fonction de la dynamique de la relation stock-recrutement indiquée, et peut interagir avec la mortalité naturelle de manière opposée, avec l'analyse par recrue. Contrairement aux valeurs élevées de $F_{0,1}$ et de $F_{40\%RPF}$ dans l'analyse par recrue, la valeur de F_{RMD} à l'équilibre calculée à partir du modèle de production était extrêmement basse. Le modèle « en bâton de hockey » a montré que, même en l'absence de pêche, la cohorte n'était pas en mesure de se remplacer et que le stock s'effondrerait. Pour le modèle de Ricker, il n'y avait pas de points de référence associés au RMD. Pour le modèle B-H, la valeur de F_{RMD} estimée est de 0,01. La mortalité par pêche qui conduirait à l'effondrement du stock ($F_{\text{effondrement}}$) était très faible pour les modèles Ricker et B-H, se chiffrant respectivement à 0,018 et à 0,025. Cela peut s'expliquer par la production excédentaire positive négligeable de ce stock en raison de la mortalité naturelle extrêmement élevée.

Les modèles Ricker et B-H ont montré que le BSR à l'équilibre en l'absence de pêche se chiffrait à 15 000 t et à 17 197 t, respectivement. Pour $B_{\text{rétablissement}}$, on ne disposait d'aucune plus faible biomasse historique à partir de laquelle le stock s'est reconstitué facilement. Considérant que les points de référence basés sur le RMD peuvent ne pas s'avérer fiables pour ce stock en raison de l'instabilité de M , on a recommandé comme PRL pour la morue des divisions 4X5Y que $Sb_{50/90} = 22\,193$ tm (figure 25; tableau 5), à savoir la BSR correspondant à l'intersection entre le 50^e percentile des observations de recrutement et la ligne de remplacement pour laquelle 10 % des points S-R sont au-dessus de la ligne. Cette valeur a été jugée plus prudente, car elle est supérieure à la BSR à l'équilibre en l'absence de pêche, calculée à partir des modèles Ricker et B-H. Cela sous-entend que, dans le cadre du scénario

actuel de mortalité naturelle élevée, même avec des prises nulles, le stock restera dans la zone critique et ne pourra pas se reconstituer au-dessus du PRL.

Comme le TEL était la référence de prélèvement pour les stocks dans la zone saine, et compte tenu de l'état actuel du stock de morue des divisions 4X5Y, un nouveau TEL n'a pas été recommandé. L'avis scientifique sur les prises serait de maintenir les prises de la pêche au niveau le plus bas possible.

ANALYSE DE LA PROJECTION ET DES RISQUES

Le cadre de référence des présents travaux prévoyait l'élaboration d'une méthodologie de prévision des trajectoires des populations dans le contexte de la productivité actuelle et des niveaux de prélèvement possibles fournis par la Gestion des pêches. En raison de la faible productivité et du mauvais état du stock de morue des divisions 4X5Y, l'avis scientifique sur les prises serait de maintenir les prises de la pêche au niveau le plus bas possible pour reconstituer ce stock. Toutefois, compte tenu de la possibilité que les débarquements déclarés aujourd'hui ne soient pas le facteur déterminant de la dynamique des populations de ce stock et de l'utilisation d'autres ressources halieutiques commerciales, la méthode de prévision des trajectoires des populations dans un scénario de faibles prises constantes de 300 tm a été fournie ici à titre d'illustration uniquement.

La projection présentée ici devait illustrer la manière dont cette perspective peut être fournie en termes de conséquences par rapport aux divers quotas de prises en 2019 et en 2020 s'ils avaient été poursuivis au début de 2018. On a réalisé ces projections en supposant que les conditions actuelles de la productivité persisteraient pendant la période de projection. La moyenne quinquennale la plus récente de la mortalité naturelle et du recrutement, ainsi que la moyenne triennale récente du poids selon l'âge lors de la pêche, du poids selon l'âge de la population au début de l'année et du recrutement partiel de la pêche ont été utilisées comme données d'entrée pour la projection. On a également supposé que les prises en 2018 étaient égales au quota de 825 tm.

L'incertitude concernant la biomasse actuelle génère une incertitude par rapport aux résultats des prévisions, exprimée ici sous la forme d'intervalles de crédibilité pour la biomasse et la mortalité par pêche projetées pour les modèles d'APV (figure 26).

PROJECTION À MOYEN TERME SUR 10 ANS

Au cours de la réunion, on a demandé une projection sur 10 ans avec des prises nulles de la pêche et en supposant différents niveaux de M pour les spécimens d'âge 5+ pour estimer la trajectoire de la BSR et évaluer la probabilité que le stock se reconstitue. Dans cette projection, on a utilisé la moyenne triennale récente du poids selon l'âge, ainsi que la moyenne quinquennale récente du recrutement partiel, du recrutement et des valeurs de M pour les spécimens des âges 1 à 4.

Le tableau 6 et les figures 27 et 28 montrent les projections avec différents scénarios d'une valeur de M supposée réduite pour les spécimens d'âge 5+. On prévoyait que la BSR demeurerait pour l'essentiel stable au cours de la période de 10 années jusqu'à ce que M pour les spécimens d'âge 5+ soit réduite à moins de 0,63, soit 40 % du niveau actuel de mortalité naturelle (figure 28). Il serait peu probable que ce stock se rétablisse dans la zone de prudence au cours des 10 prochaines années, à moins que M pour les spécimens d'âge 5+ ne soit ramenée à 0,31, soit 20 % du niveau actuel de mortalité naturelle. Ces résultats étaient conformes à l'analyse au-dessus de l'équilibre.

ORIENTATION SUR LES ACTIVITÉS D'EXAMEN INTERCADRE

Compte tenu de la structure de gestion des quotas sur deux ans, il était prévu que l'évaluation de la morue des divisions 4X5Y suive un cycle de deux ans, avec une mise à jour des indicateurs de la pêche et des relevés les années où il n'y a pas d'évaluation. La mise à jour devrait suivre le même format que les mises à jour précédentes (MPO 2017), avec une section supplémentaire visant à déterminer si des circonstances exceptionnelles ont déclenché l'élaboration d'un cadre pour l'année suivante. Compte tenu de l'état actuel du stock, les mécanismes de déclenchement proposés étaient axés sur la détection d'un changement positif dans la dynamique actuelle de la productivité du stock et ont été définis comme suit :

1. l'abondance médiane sur 3 ans pour les spécimens d'âge 7 à 9 est supérieure à 0 pour les 3 groupes d'âges;
2. l'indice de la biomasse médian sur 3 ans dérivé des relevés et corrigé en fonction de la valeur q se situe en dehors de l'intervalle de crédibilité de 95 % de la projection;
3. l'abondance médiane sur 3 ans pour le groupe d'âge 7+ se situe en dehors de l'intervalle de crédibilité de 95 % de la projection.

Si au moins l'une des trois conditions ci-dessus est respectée, un examen du modèle sera déclenché.

LACUNES EN MATIÈRE DE DONNÉES ET RECOMMANDATIONS DE RECHERCHE

Bien que la morue des divisions 4X5Y soit considérée comme un stock riche en données avec des renseignements sur la pêche et les relevés structurés selon l'âge, certains problèmes rendent difficile la modélisation de la dynamique des stocks. La valeur de M élevée estimée dans les modèles d'APV pourrait être due à une confusion liée aux poissons se déplaçant vers des zones adjacentes ou plus profondes (où ils ne peuvent pas être prélevés lors de la pêche ou des relevés), à des débarquements sous-déclarés et à des rejets non déclarés, ainsi qu'à la mortalité naturelle non stationnaire causée par des facteurs biotiques et abiotiques.

L'augmentation de la présence d'observateurs pour les prises accessoires de morue lors de la pêche améliorerait la fiabilité des estimations des rejets de morue. Un nouveau modèle d'évaluation du stock de phoque selon le sexe et plus de recherches sur la répartition saisonnière et spatiale des phoques ainsi que sur la composition de leur régime alimentaire faciliteraient la caractérisation des répercussions possibles de la prédation du phoque gris sur la morue des divisions 4X5Y. Des recherches sur d'autres facteurs biotiques et abiotiques, qui pourraient éventuellement être liés à une M élevée, permettraient de mieux comprendre la dynamique des populations de morue des divisions 4X5Y.

Compte tenu des effets de la M non stationnaire qui prêterent à confusion, des prises manquantes et de la nature mixte du stock, le taux de mixité des deux composantes de reproducteurs de la morue des divisions 4X5Y n'a pas été quantifié à ce stade. En raison de l'absence de facteurs de conversion et de données sur les prises selon l'âge fiables concernant les pêches au cours de la période précédente (1970–1982), la productivité au cours de cette période ainsi que son effet sur les points de référence sont inconnus.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Doug Swain de nous avoir fourni le code source ADMB pour exécuter les modèles d'analyse de population virtuelle avec mouvements aléatoires de M .

RÉFÉRENCES CITÉES

- Andrushchenko, I., Clark, D., Irvine, F., MacEachern, E., Martin, R. et Wang, Y. 2022. [Données d'entrée du cadre de 2018 pour la morue franche des divisions 4X5Y](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2022/006. v + 89 p.
- Clark, W.G. 2014. Direct calculation of relative fishery and survey catchibilities. *Fisheries Research*. 158: 135–137.
- Clark, D.S. and Brown, L. 1996. [Assessment of Cod in Division 4X in 1996](#). DFO Atl. Fish. Res. Doc. 96/101.
- Clark, D. and Emberley, J. 2010. [Assessment of Cod in Division 4X in 2008](#). Can. Sci. Advis. Sec. Res. 2009/018. vi + 101 p.
- Clayton, R, D. Clark, T. McIntyre, H. Stone, A. Cook, L. Harris, J. Simon, P. Emery, and P. Hurley. 2014. [Review of Surveys Contributing to Groundfish Assessments with Recommendations for an Ecosystem Survey Program in the Maritimes Region](#). Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 3083: x + 82 p.
- DFO. 2002. [National Workshop on Reference Points for Gadoids; 5–8 November, 2002](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Proceed. Ser. 2002/033. v + 16 p.
- Duplisea, D.E. 2013. [Equilibrium estimates of Fmsy and Bmsy for 3Pn4RS Cod](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2012/171: iv + 20 p.
- ICES. 2017. Report of the Arctic Fisheries Working Group (AFWG), 19–25 April 2017, Copenhagen, Denmark. ICES CM 2017/ACOM:06. 493 pp.
- Mohn, R.K. 1999. The retrospective problem in sequential population analysis: An analysis using Cod fishery and simulated data. *ICES J. Mar. Sci.* 56: 473–488.
- Morgan, M.J., Shelton, P.A., and Rideout, R.M. 2014. An evaluation of fishing mortality reference points under varying levels of population productivity in three Atlantic Cod (*Gadus morhus*) stocks. *ICES J. of Mar. Sci.* 71(6), 1407–1416.
- MPO 2009. [Un cadre décisionnel pour les pêches intégrant l'approche de précaution](#). Dernière modification : 2009-03-23.
- MPO. 2011. [Évaluation du potentiel de rétablissement \(EPR\) de la morue franche \(*Gadus morhua*\) de l'unité désignable du Sud \(divisions 4X5Yb et 5Zjm de l'OPANO\)](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2011/034.
- MPO. 2015. [Mise à jour de 2014 sur l'état du stock de la morue franche des divisions 4X5Yb](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Rép. des Sci. 2015/010.
- MPO. 2016. [Compte rendu de l'examen national par les pairs sur l'Élaboration des directives techniques pour la prestation d'un avis scientifique portant sur les divers éléments du cadre de l'approche de précaution de Pêches et Océans Canada; du 28 février au 1er mars 2012](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Compte rendu 2015/005.
- MPO. 2017. [Mise à jour de 2016 sur l'état du stock de morue franche \(*Gadus morhua*\) des divisions 4X5Yb](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Rép. des Sci. 2017/024.
- MPO. 2018. [Mise à jour sur l'état du stock de morues franches \(*Gadus morhua*\) dans les divisions 4X et 5Yb de l'OPANO](#). Secr. can. de consult. sci. Rép. des sci. 2018/020.
- Myers, R.A., Rosenberg, A.A., Mace, P.M., Barrowman, N.J., and Restrepo, V.R. 1994. In search of thresholds for recruitment overfishing. *ICES J. Mar. Sci.* 51: 191–205.

-
- Nielsen, A.N. and Berg, C.W. 2014. Estimation of time-varying selectivity in stock assessments using state-space models. *Fisheries Research* 158: 96–101.
- Sissenwine M.P. and J.G.. Shepherd. 1987. An alternative perspective on recruitment overfishing and biological reference points. *Can. J. Aquat. Sci.* 44:913–918.
- Swain, D. P. 2013. A population model for Eastern Georges Bank Atlantic Cod incorporating estimated time trends in natural mortality. *TRAC Res. Doc.* 2013/06, v + 18 p.
- Swain, D. P and Benoît, H. P. 2015 Extreme increases in natural mortality prevent recovery of collapsed fish populations in a Northwest Atlantic ecosystem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* Vol. 2015/519: 165–182.

TABLEAUX

Tableau 1. Indices d'abondance (en milliers) d'après les relevés estivaux du MPO pour la morue des divisions 4X5Y depuis 1983.

Année/âge	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1983	141	1 085	4 226	2 369	1 480	946	389	0	77
1984	820	5 746	3 390	2 362	1 820	688	482	63	58
1985	495	8 760	4 331	1 527	1 451	766	483	267	165
1986	768	1 333	2 920	1 226	314	549	448	217	97
1987	392	2 348	618	1 180	528	260	245	304	75
1988	2 630	3 926	9 246	1 496	1 548	496	210	244	91
1989	794	6 089	3 420	2 549	420	489	108	27	82
1990	515	873	5 523	2 463	2 321	240	414	80	42
1991	614	1 727	1 131	3 086	1 094	751	128	116	19
1992	252	2 731	1 569	681	1 710	471	460	124	85
1993	369	955	2 518	925	129	265	52	61	0
1994	1 258	3 313	2 739	1 605	449	36	195	88	70
1995	122	847	4 779	1 477	598	274	94	91	34
1996	339	839	2 048	5 527	880	753	148	0	56
1997	349	569	1 189	1 444	2 462	321	194	100	0
1998	211	1 929	1 808	1 418	1 022	1 371	225	116	6
1999	382	787	1 291	882	850	194	297	46	0
2000	432	1 497	830	999	409	325	157	148	0
2001	150	1 053	2 891	951	646	44	60	0	31
2002	4 329	1 990	2 573	2 501	520	324	122	19	98
2003	43	3 014	546	1 082	752	191	78	20	19
2004	31	272	2 977	319	325	113	27	8	0
2005	246	1 750	384	1 870	224	223	39	0	29
2006	102	813	1 844	398	354	162	20	0	0
2007	300	1 307	707	1 028	113	410	25	0	0
2008	277	1 086	346	309	277	27	0	0	0
2009	545	3 133	4 817	877	356	420	0	0	0
2010	206	408	424	648	99	10	89	0	0
2011	245	682	343	614	282	17	0	18	0
2012	292	1 567	456	202	99	24	0	0	11
2013	94	351	589	272	65	0	0	0	0
2014	100	456	565	393	21	0	0	0	0
2015	135	1 186	446	524	195	27	0	0	0
2016	250	648	1 916	179	143	22	7	0	0
2017	50	178	331	438	426	18	52	62	7

Tableau 2. Coefficients de variation des indices d'abondance d'après les relevés estivaux du MPO pour la morue des divisions 4X5Y depuis 1983. Un tiret (-) indique une absence de données.

ANNÉE/ÂGE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1983	0,58	0,28	0,21	0,14	0,30	0,29	0,27	-	0,45
1984	0,37	0,31	0,32	0,25	0,25	0,21	0,27	0,71	0,68
1985	0,38	0,42	0,33	0,25	0,19	0,21	0,27	0,31	0,45
1986	0,66	0,27	0,24	0,22	0,26	0,19	0,26	0,29	0,67
1987	0,51	0,18	0,19	0,21	0,21	0,36	0,29	0,29	0,41
1988	0,34	0,57	0,46	0,57	0,29	0,29	0,40	0,46	0,71
1989	0,25	0,26	0,20	0,19	0,20	0,33	0,37	1,00	0,51
1990	0,36	0,31	0,19	0,17	0,22	0,26	0,24	0,49	0,61
1991	0,32	0,21	0,18	0,16	0,18	0,20	0,27	0,49	0,84
1992	0,26	0,26	0,12	0,14	0,18	0,23	0,26	0,35	0,71
1993	0,48	0,24	0,14	0,16	0,45	0,34	0,47	0,51	-
1994	0,30	0,18	0,30	0,16	0,18	0,34	0,45	0,41	0,51
1995	0,46	0,29	0,21	0,21	0,18	0,30	0,46	0,49	1,00
1996	0,25	0,58	0,32	0,43	0,50	0,40	0,25	-	0,81
1997	0,28	0,24	0,26	0,22	0,17	0,38	0,21	0,65	-
1998	0,42	0,22	0,20	0,19	0,19	0,17	0,30	0,41	1,00
1999	0,27	0,17	0,19	0,22	0,20	0,27	0,29	0,73	-
2000	0,31	0,19	0,28	0,26	0,24	0,25	0,41	0,52	-
2001	0,60	0,24	0,25	0,22	0,22	0,51	0,43	-	1,00
2002	0,93	0,72	0,42	0,24	0,24	0,29	0,38	1,00	0,50
2003	0,72	0,76	0,37	0,32	0,26	0,26	0,45	0,61	1,00
2004	-	0,37	0,44	0,31	0,42	0,52	1,00	1,00	-
2005	0,55	0,33	0,54	0,24	0,51	0,42	0,72	-	1,00
2006	0,51	0,31	0,16	0,35	0,20	0,36	0,53	-	-
2007	0,37	0,42	0,23	0,35	0,45	0,42	0,56	-	-
2008	0,40	0,21	0,28	0,23	0,27	0,39	-	-	-
2009	0,07	0,61	0,45	0,42	0,33	0,42	-	-	-
2010	0,24	0,28	0,25	0,24	0,63	1,00	0,51	-	-
2011	0,35	0,34	0,20	0,21	0,26	0,48	-	0,65	-
2012	0,34	0,76	0,28	0,32	0,39	0,53	-	-	1,00
2013	1,03	0,49	0,50	1,91	-	-	-	-	-
2014	0,68	0,26	0,32	0,32	0,80	-	-	-	-
2015	0,39	0,21	0,37	0,32	0,36	0,60	-	-	-
2016	0,41	0,28	0,30	0,35	0,35	0,76	0,71	-	-
2017	0,54	0,29	0,24	0,22	0,37	1,00	0,58	0,83	1,00
Moyenne	0,44	0,34	0,28	0,31	0,31	0,39	0,41	0,58	0,74

Tableau 3. Prises selon l'âge dans le cadre de la pêche pour la morue dans les divisions 4X5Y depuis 1983.

Année/âge	1	2	3	4	5	6	7+
1983	9	1 031	3 689	2 433	2 057	1 205	915
1984	33	917	2 393	3 081	1 930	965	805
1985	0	711	1 674	1 569	2 324	1 284	863
1986	0	251	2 789	1 941	994	1 008	806
1987	0	861	902	2 053	1 087	523	1 001
1988	0	403	3 517	1 659	1 553	656	549
1989	17	655	2 560	3 656	632	562	343
1990	0	144	2 863	2 805	2 462	497	464
1991	2	391	1 535	5 092	1 777	1 364	467
1992	0	751	3 391	1 878	3 276	878	654
1993	0	881	3 490	2 045	660	672	309
1994	0	475	2 280	2 233	887	195	242
1995	0	135	2 146	1 081	582	130	84
1996	0	50	883	2 594	441	212	57
1997	0	59	1 126	1 556	1 193	199	110
1998	0	234	886	1 021	615	441	87
1999	0	72	834	543	347	264	149
2000	0	218	575	905	247	189	103
2001	0	114	1 187	595	378	75	71
2002	0	22	365	1 099	221	138	64
2003	0	73	249	557	519	96	121
2004	0	33	1 029	367	291	153	46
2005	0	66	148	830	173	89	60
2006	0	42	760	215	491	103	37
2007	0	214	341	927	122	175	29
2008	0	427	492	401	594	75	76
2009	7	192	878	272	98	114	18
2010	0	39	185	88	8	6	2
2011	0	37	124	187	162	46	13
2012	0	65	246	116	66	49	24
2013	0	61	297	158	22	13	5
2014	0	31	213	195	38	5	1
2015	0	29	60	126	67	7	0
2016	0	0	7	113	47	51	41
2017	0	4	35	117	85	23	19

Tableau 4. Résultats de l'APV réalisée à l'aide du modèle 3MFfirst.

Année	M1-2	M3-4	M5+	F4-7	BSR	Recrutement
1983	0,20	0,22	0,37	0,28	84 995	21 247
1984	0,20	0,22	0,39	0,28	76 487	25 359
1985	0,20	0,22	0,41	0,31	75 716	16 565
1986	0,20	0,22	0,43	0,27	68 244	45 670
1987	0,20	0,22	0,45	0,26	73 735	30 297
1988	0,20	0,22	0,47	0,28	61 731	39 675
1989	0,20	0,22	0,50	0,20	70 549	13 457
1990	0,20	0,22	0,52	0,25	93 843	19 502
1991	0,20	0,22	0,55	0,33	104 394	26 362
1992	0,20	0,22	0,59	0,46	74 285	20 283
1993	0,20	0,22	0,63	0,32	48 610	43 544
1994	0,20	0,22	0,67	0,27	55 309	16 801
1995	0,20	0,22	0,73	0,14	53 554	14 090
1996	0,20	0,22	0,81	0,14	77 893	8 686
1997	0,21	0,22	0,90	0,17	81 252	16 675
1998	0,21	0,23	1,00	0,19	56 493	11 622
1999	0,21	0,23	1,11	0,15	37 220	22 639
2000	0,21	0,23	1,21	0,15	35 159	12 707
2001	0,21	0,24	1,29	0,13	38 487	10 429
2002	0,21	0,24	1,33	0,13	45 692	18 935
2003	0,21	0,24	1,37	0,14	49 760	5 289
2004	0,21	0,25	1,37	0,11	40 398	16 811
2005	0,21	0,25	1,34	0,11	40 256	6 110
2006	0,21	0,25	1,31	0,14	30 299	7 174
2007	0,22	0,26	1,30	0,14	25 776	10 234
2008	0,22	0,26	1,29	0,21	20 512	4 649
2009	0,22	0,27	1,32	0,11	14 881	2 449
2010	0,22	0,27	1,38	0,15	16 957	3 975
2011	0,22	0,28	1,47	0,14	12 402	12 670
2012	0,22	0,28	1,58	0,15	8 133	5 980
2013	0,22	0,28	1,65	0,10	6 237	2 540
2014	0,22	0,28	1,64	0,05	8 567	7 341
2015	0,22	0,28	1,56	0,04	19 374	4 102
2016	0,22	0,28	1,50	0,05	13 161	2 773
2017	0,22	0,28	1,48	0,09	10 297	1 925

Tableau 5. Points de référence estimés au moyen des résultats du modèle 3MFfirst.

Modèle 3MFfirst	Points de référence estimés
Approximations de F_{RMD} <ul style="list-style-type: none"> • $F_{0,1}$ • $F_{40\%RPF}$ • F_{RMD} (« bâton de hockey ») • F_{RMD} (Ricker) • F_{RMD} (B-H) 	<p>0,62</p> <p>0,56</p> <p>Pas d'équilibre</p> <p>Pas de maximum</p> <p>0,01</p>
$F_{\text{effondrement}}$ <ul style="list-style-type: none"> • « Bâton de hockey » • Ricker • B-H $BSR_{F=0}$ (tm) <ul style="list-style-type: none"> • Ricker • B-H • « Bâton de hockey » 	<p>Pas d'équilibre</p> <p>0,018</p> <p>0,025</p> <p>15 000</p> <p>17 197</p> <p>Pas d'équilibre</p>
PRL (tm) <ul style="list-style-type: none"> • $Sb_{50/90}$ 	<p>22 193</p>

Tableau 6. Biomasse reproductrice (en tm) projetée sur 10 ans pour la morue des divisions 4X5Y en fonction des différentes hypothèses de M pour les poissons d'âge 5+.

Mortalité naturelle (M)	Année									
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
M = 1,57	8 246	6 401	6 525	8 073	8 494	8 597	8 625	8 627	8 628	8 628
M = 1,41	8 617	6 827	6 878	8 316	8 798	8 947	8 981	8 989	8 989	8 990
M = 1,26	9 057	7 330	7 327	8 626	9 195	9 398	9 443	9 461	9 462	9 463
M = 1,1	9 573	8 005	7 926	9 113	9 734	9 989	10 058	10 092	10 100	10 100
M = 0,94	10 127	8 920	8 750	9 833	10 468	10 789	10 918	10 960	10 981	10 987
M = 0,79	10 820	10 013	9 910	10 851	11 512	11 943	12 135	12 211	12 250	12 271
M = 0,63	11 647	11 442	11 559	12 397	13 095	13 688	13 968	14 124	14 199	14 243
M = 0,47	12 596	13 295	13 877	14 807	15 653	16 465	16 933	17 234	17 429	17 550
M = 0,31	13 724	15 789	17 208	18 662	20 016	21 276	22 255	22 946	23 460	23 797

FIGURES

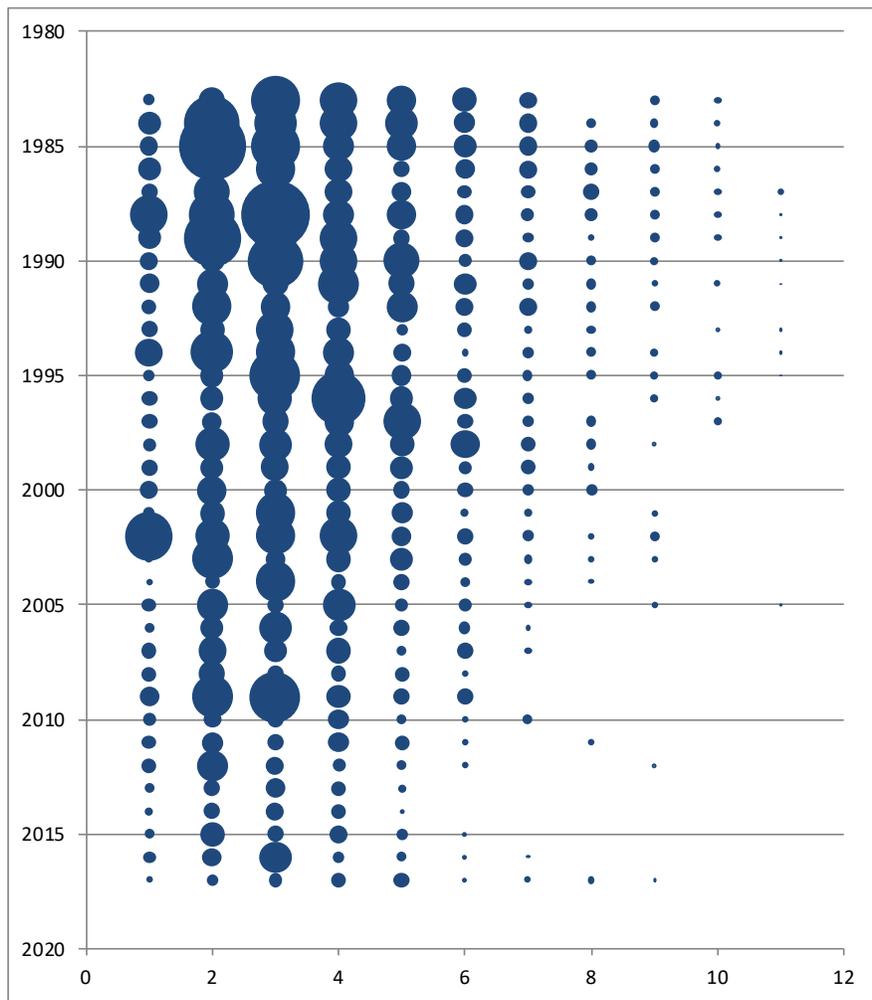


Figure 1. Indices d'abondance de la morue des divisions 4X5Y d'après les relevés estivaux du MPO (de 1983 à 2017).

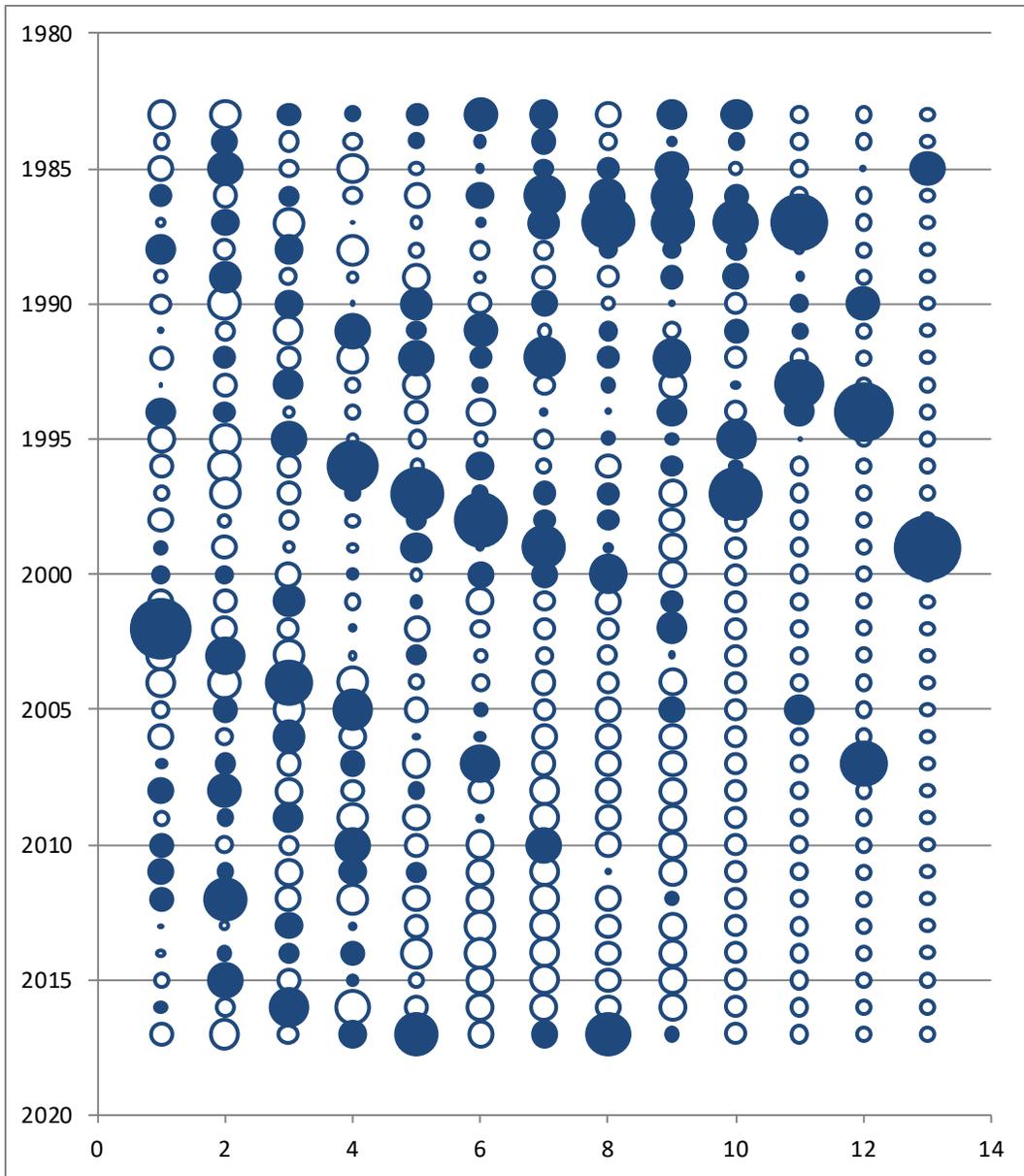


Figure 2. Proportion normalisée selon l'âge des indices d'abondance de la morue des divisions 4X5Y d'après les relevés. Les bulles vides représentent des valeurs inférieures à la moyenne et les bulles pleines, des valeurs supérieures à la moyenne.

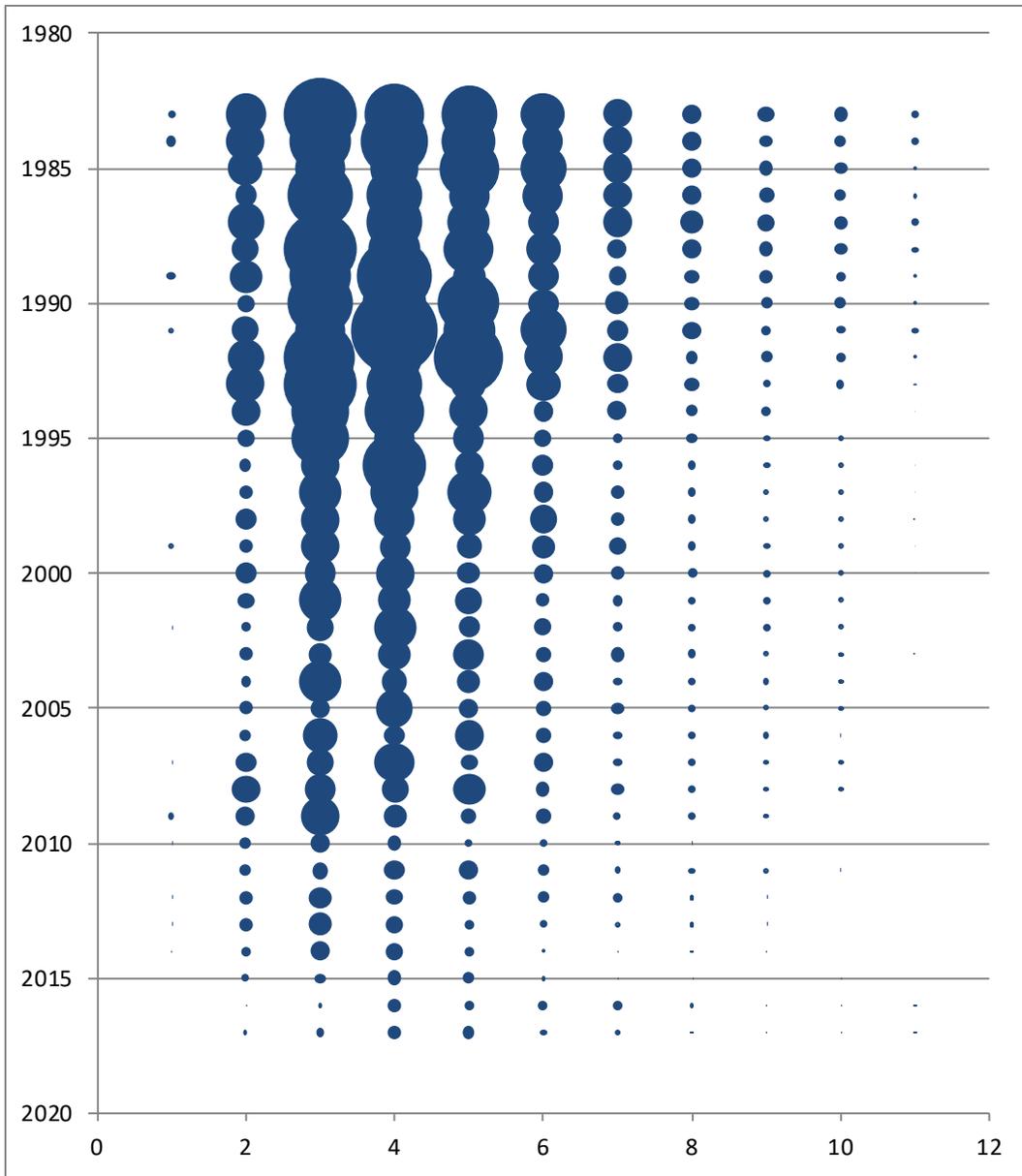


Figure 3. Prises selon l'âge dans le cadre de la pêche pour la morue des divisions 4X5Y de 1983 à 2017.

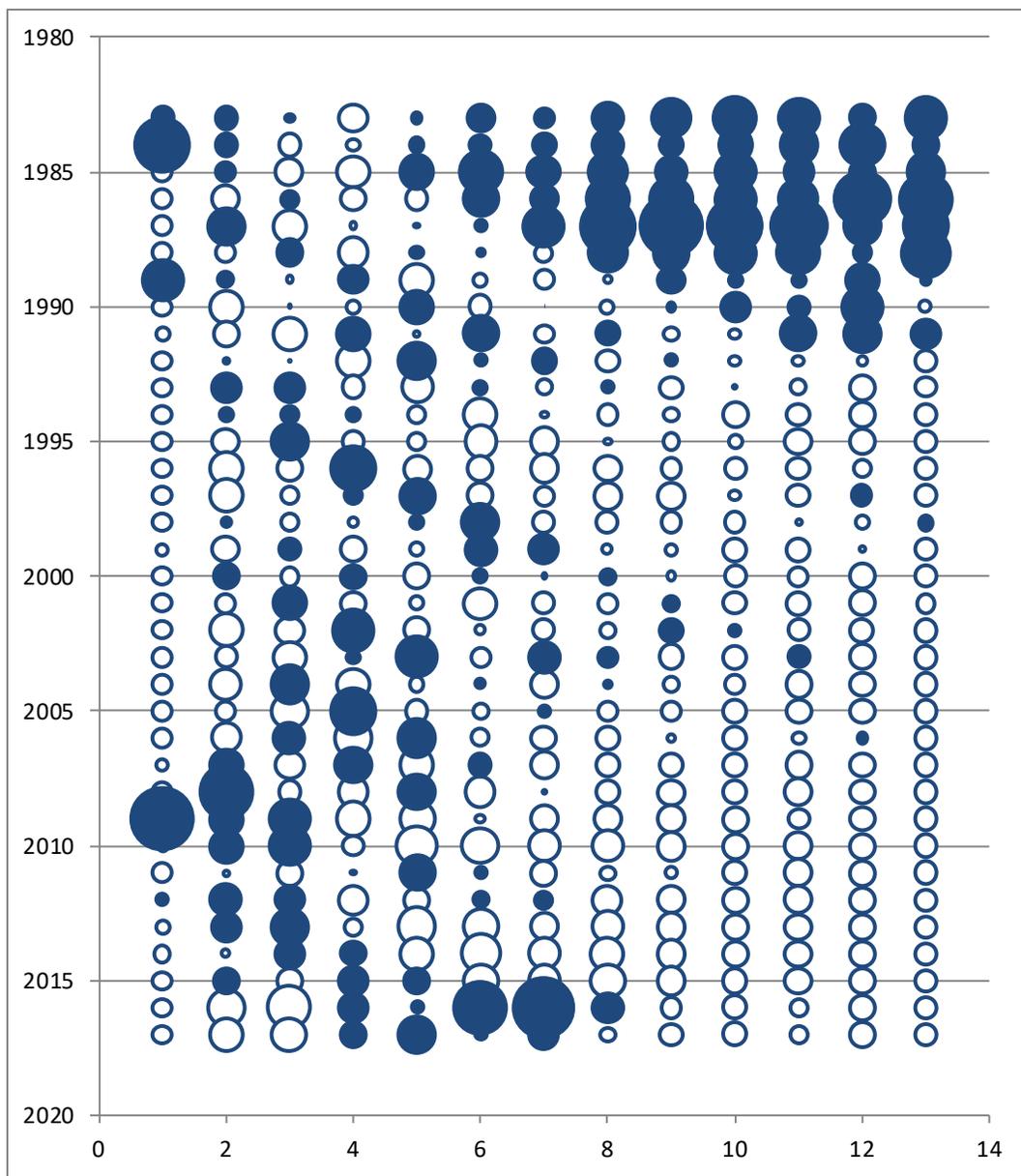


Figure 4. Proportion normalisée selon l'âge des prises selon l'âge dans le cadre de la pêche pour la morue des divisions 4X5Y. Les bulles vides représentent des valeurs inférieures à la moyenne et les bulles pleines, des valeurs supérieures à la moyenne.

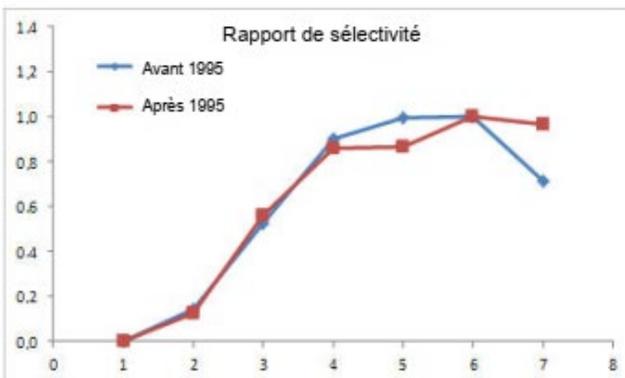
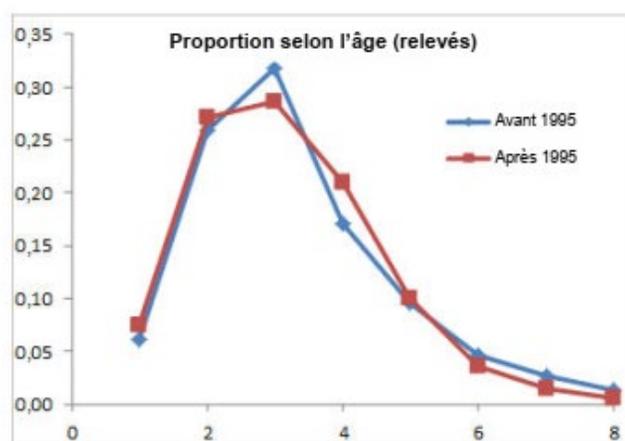
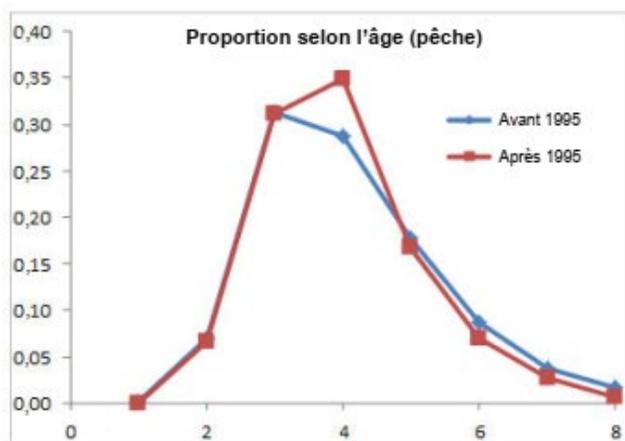


Figure 5. Proportion selon l'âge dans le cadre de la pêche (panneau supérieur) et des relevés (panneau intermédiaire) et sélectivité relative de la pêche (panneau inférieur) pour deux périodes (avant 1995 et après 1995).

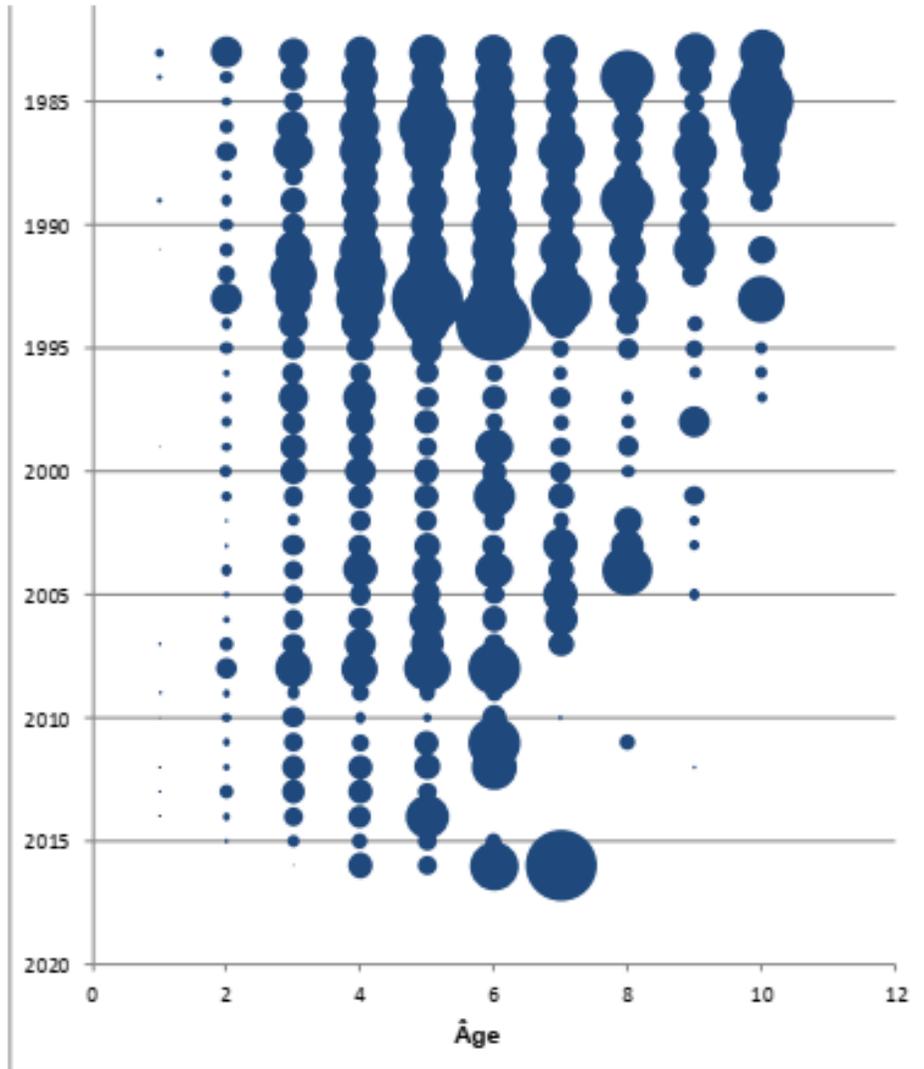


Figure 6. Mortalité par pêche relative pour la morue des divisions 4X5Y de 1983 à 2017.

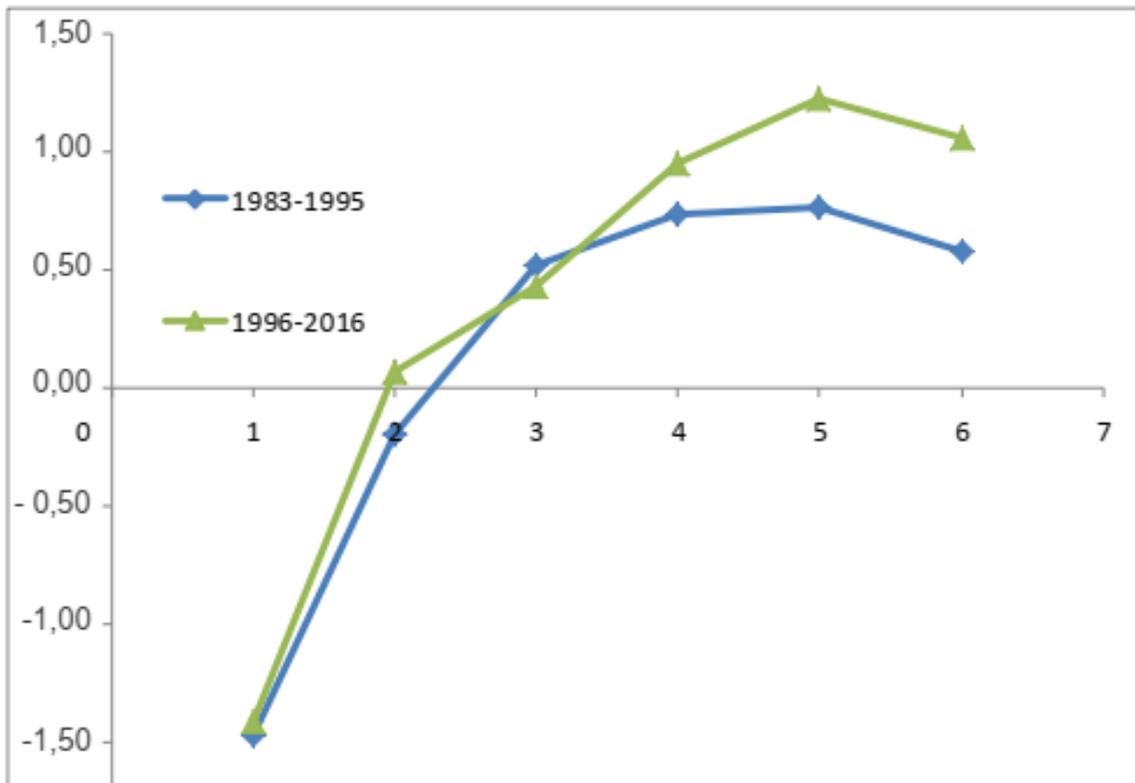


Figure 7. Valeur de Z pendant deux périodes (1983–1995 et 1996–2016) calculée à l'aide des données issues des relevés par navire de recherche.

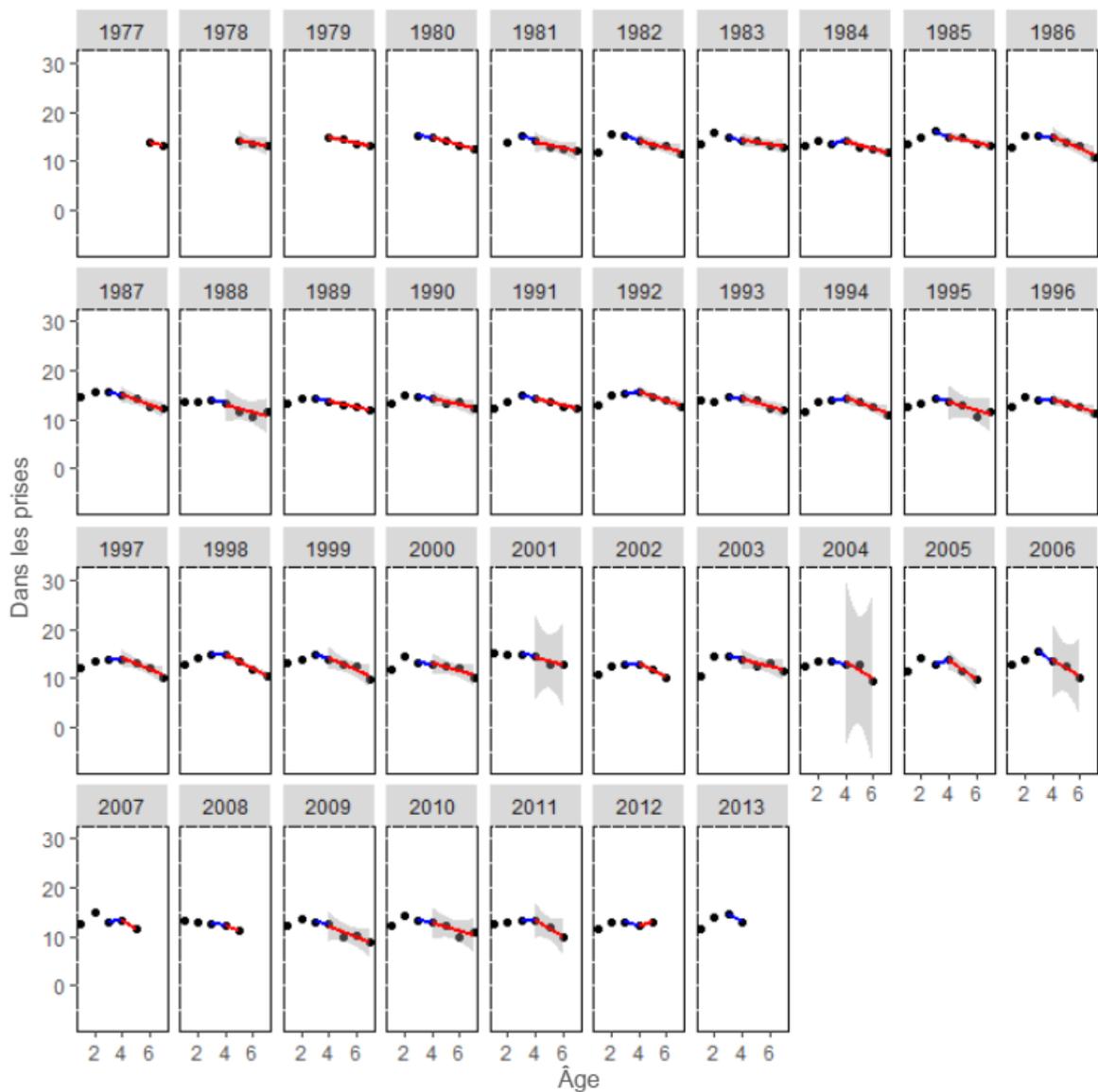


Figure 8. Analyse de la courbe des prises de chaque cohorte à l'aide des indices d'abondance d'après les relevés estivaux par navire de recherche du MPO. Les lignes bleues représentent les âges 3 et 4 et les lignes rouges représentent les âges plus avancés.

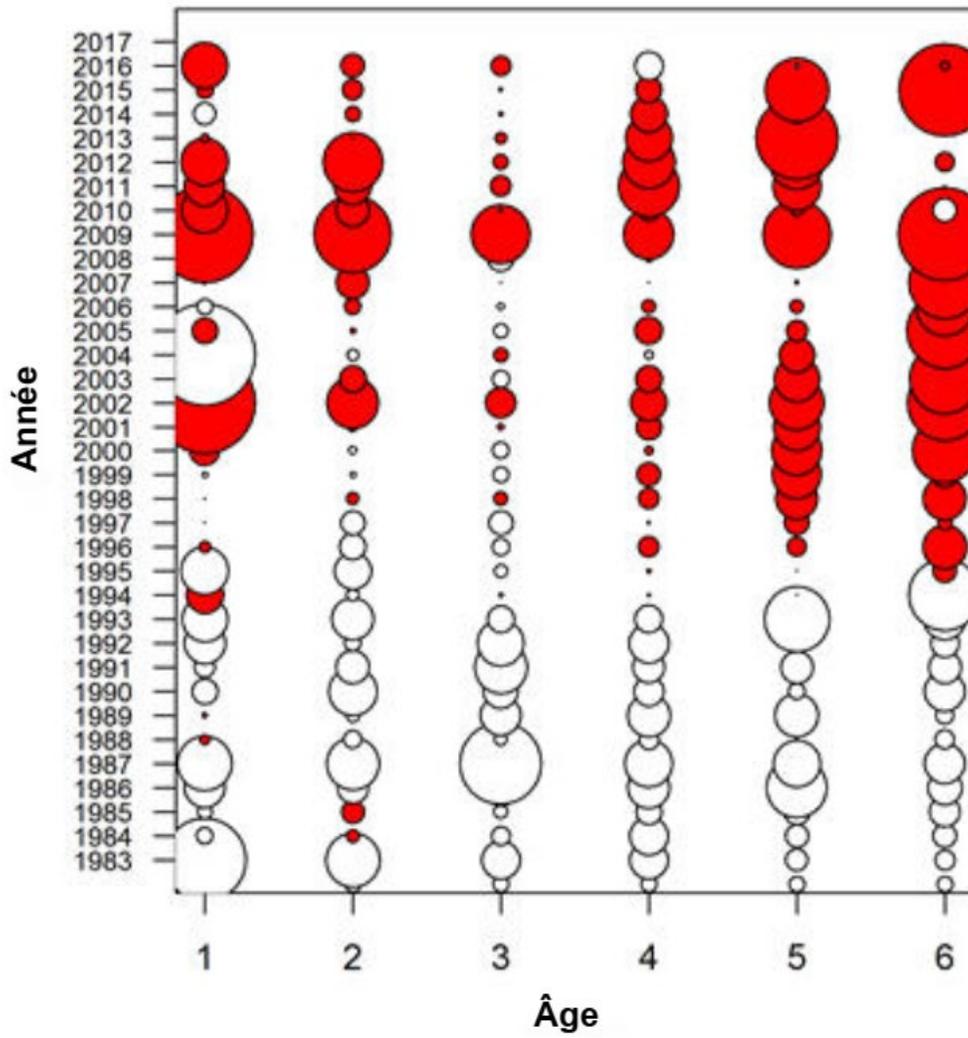


Figure 9. Résidus de l'exécution de base du modèle d'APV à partir des données de 1983 à 2017.

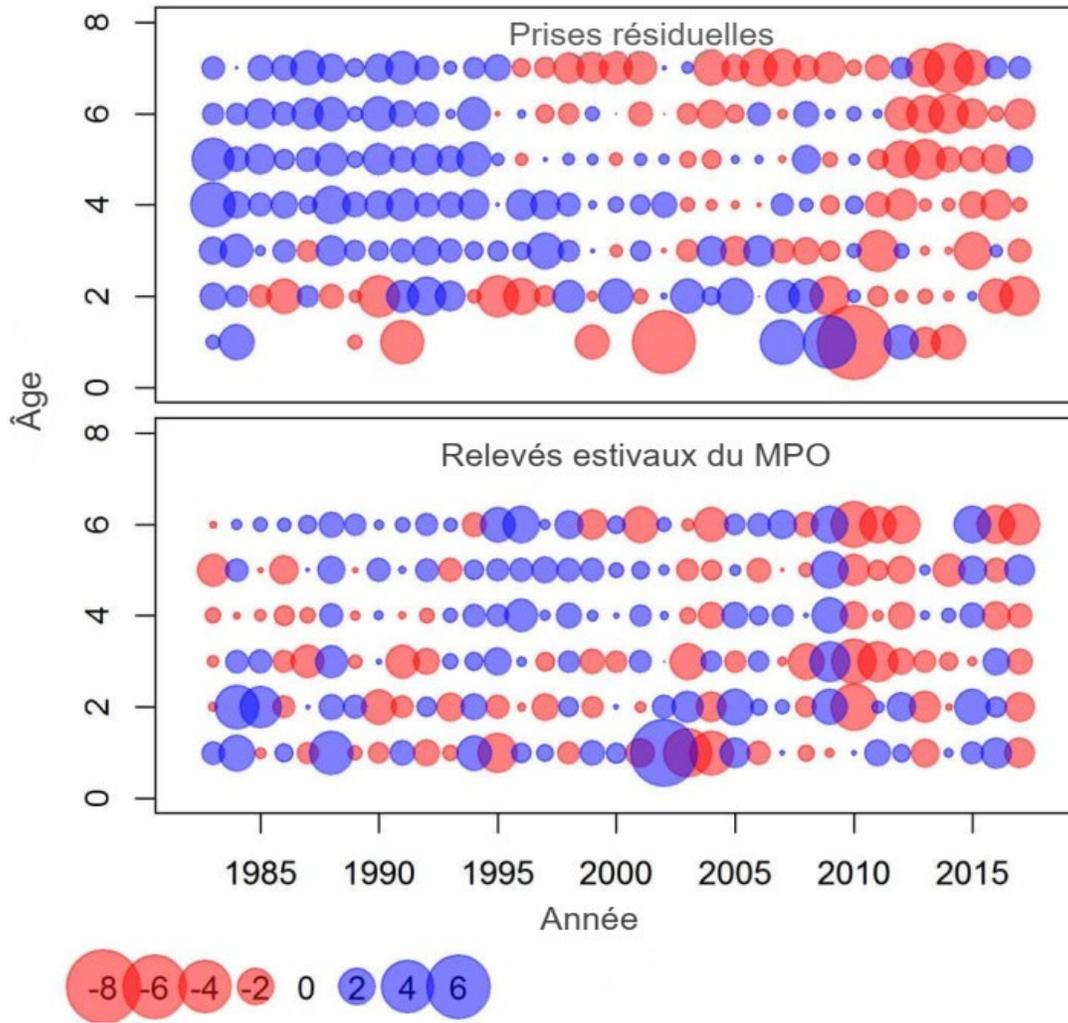


Figure 10. Résidus normalisés de l'exécution de base du modèle SAM.

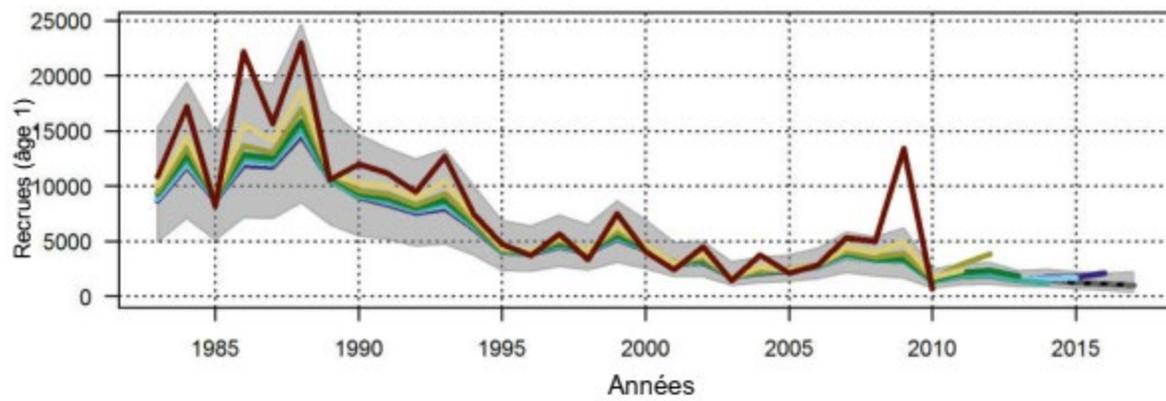
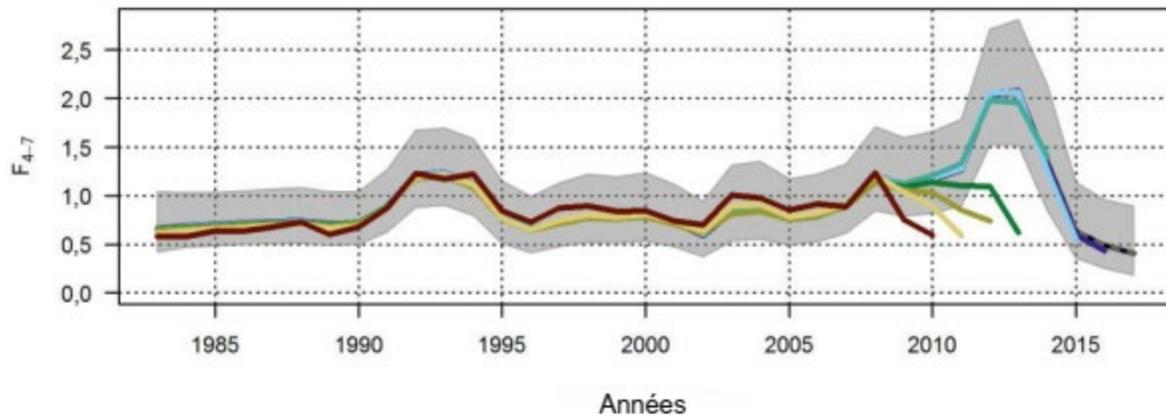
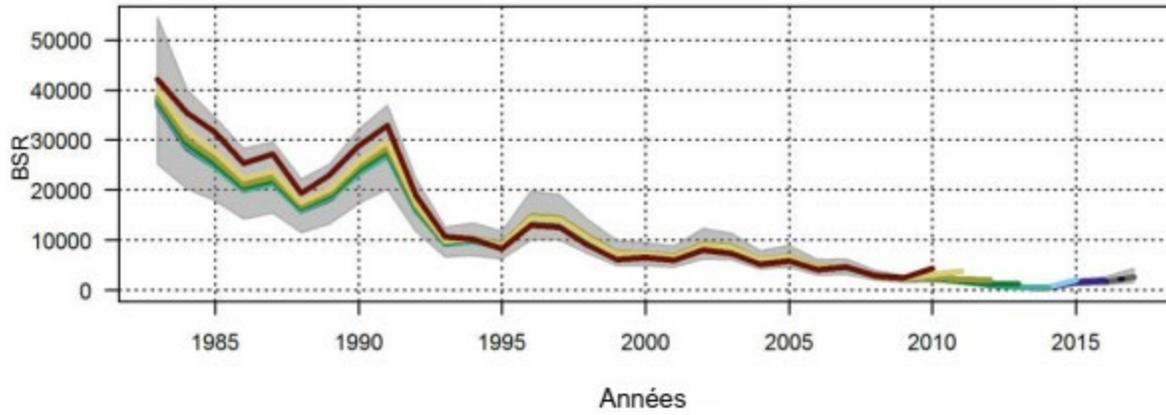


Figure 11. Analyse rétrospective à partir de l'exécution de base du modèle SAM.

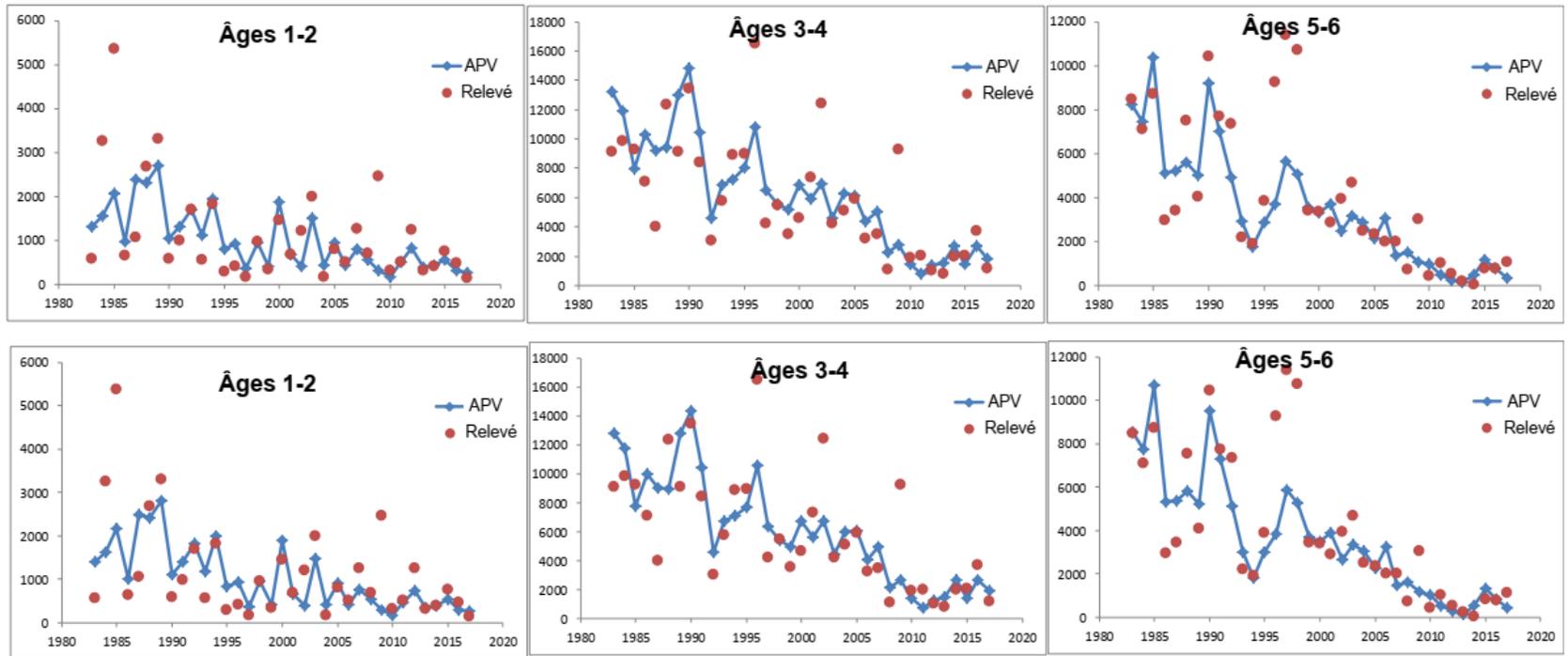


Figure 12. Ajustement du modèle par rapport à la biomasse de relevé pour les modèles 2MFratio (panneau supérieur) et 3MFratio (panneau inférieur).

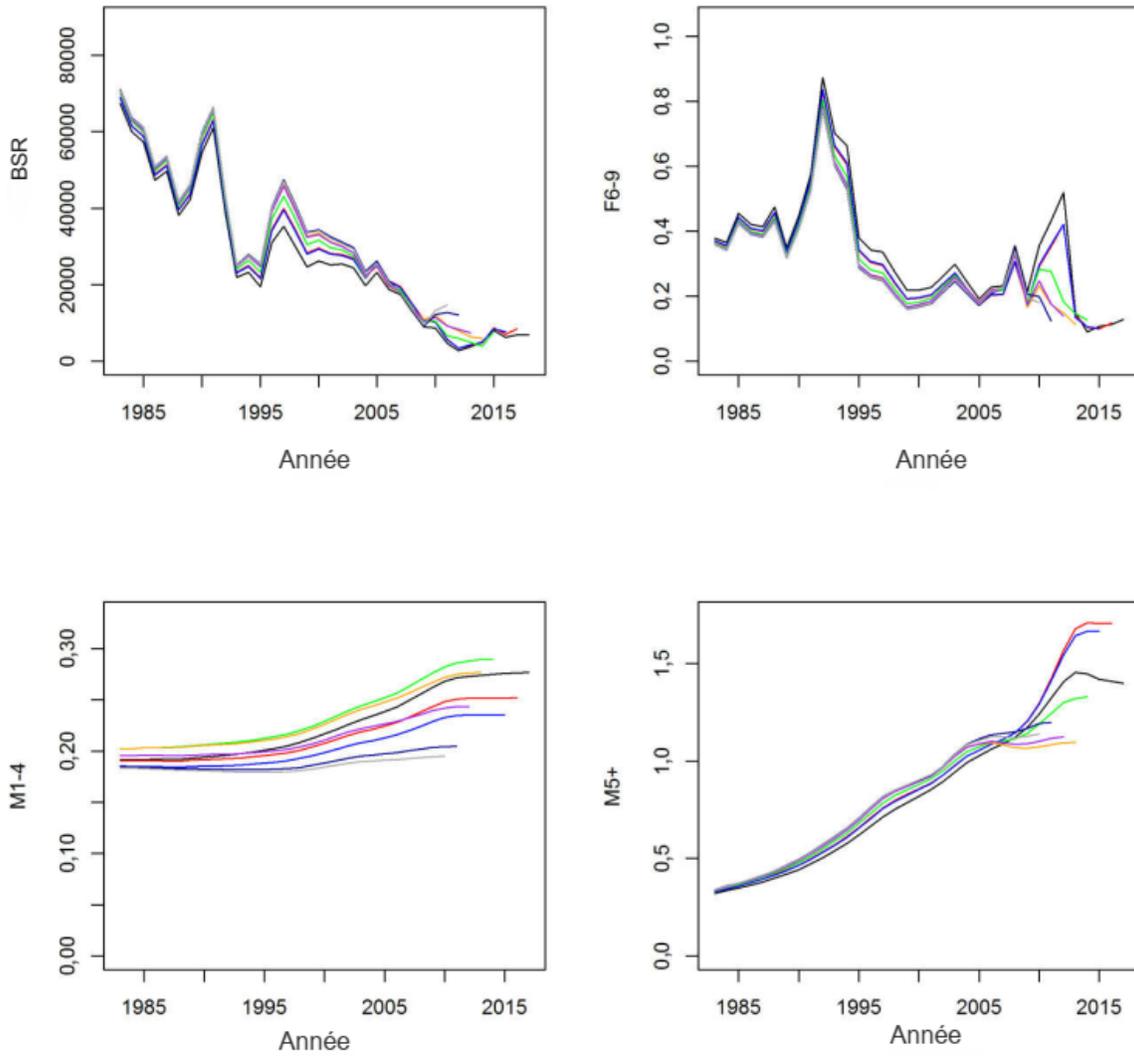


Figure 13. Analyse rétrospective pour le modèle 2MFratio.

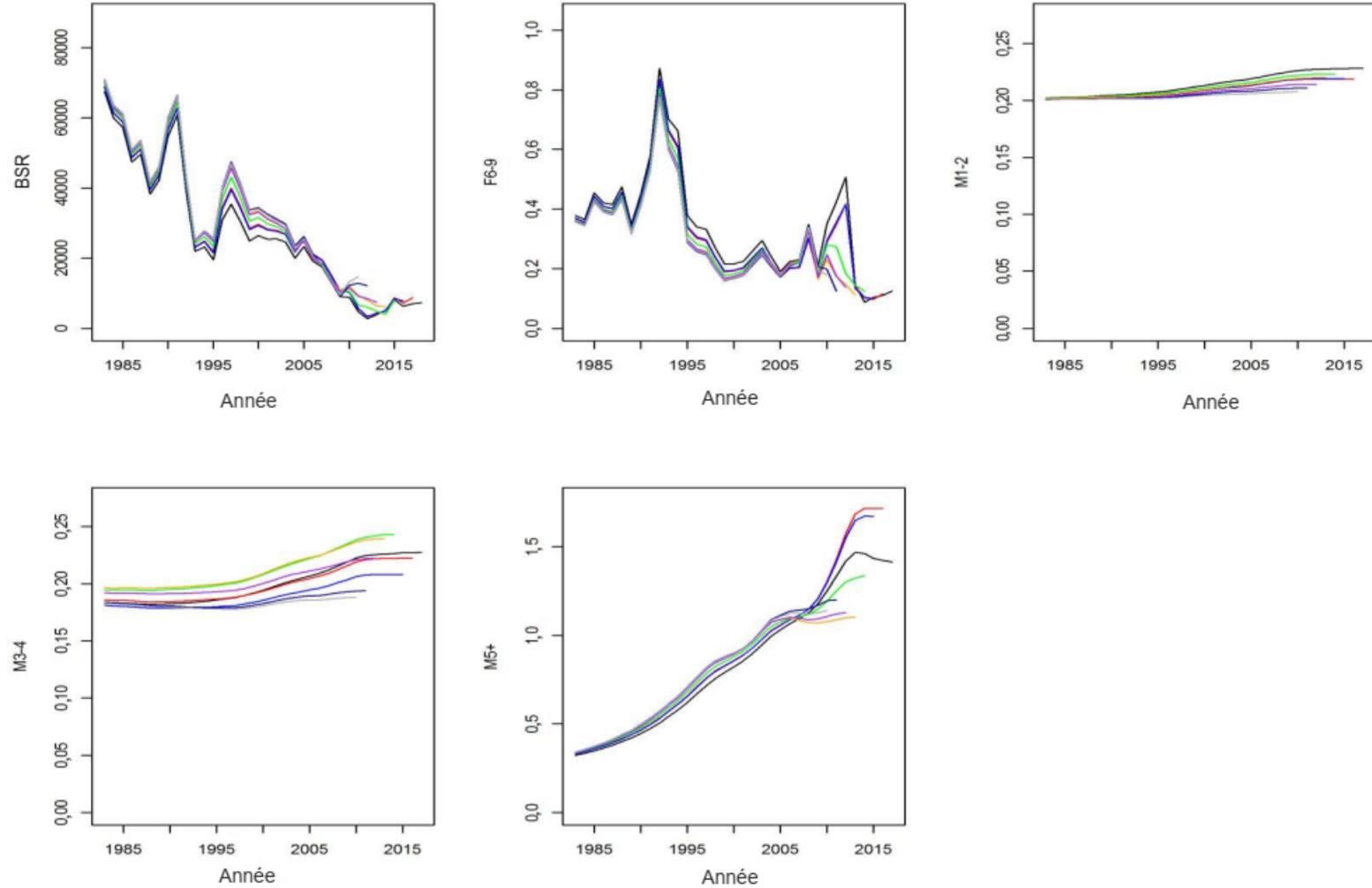


Figure 14. Analyse rétrospective pour le modèle 3MFratio.

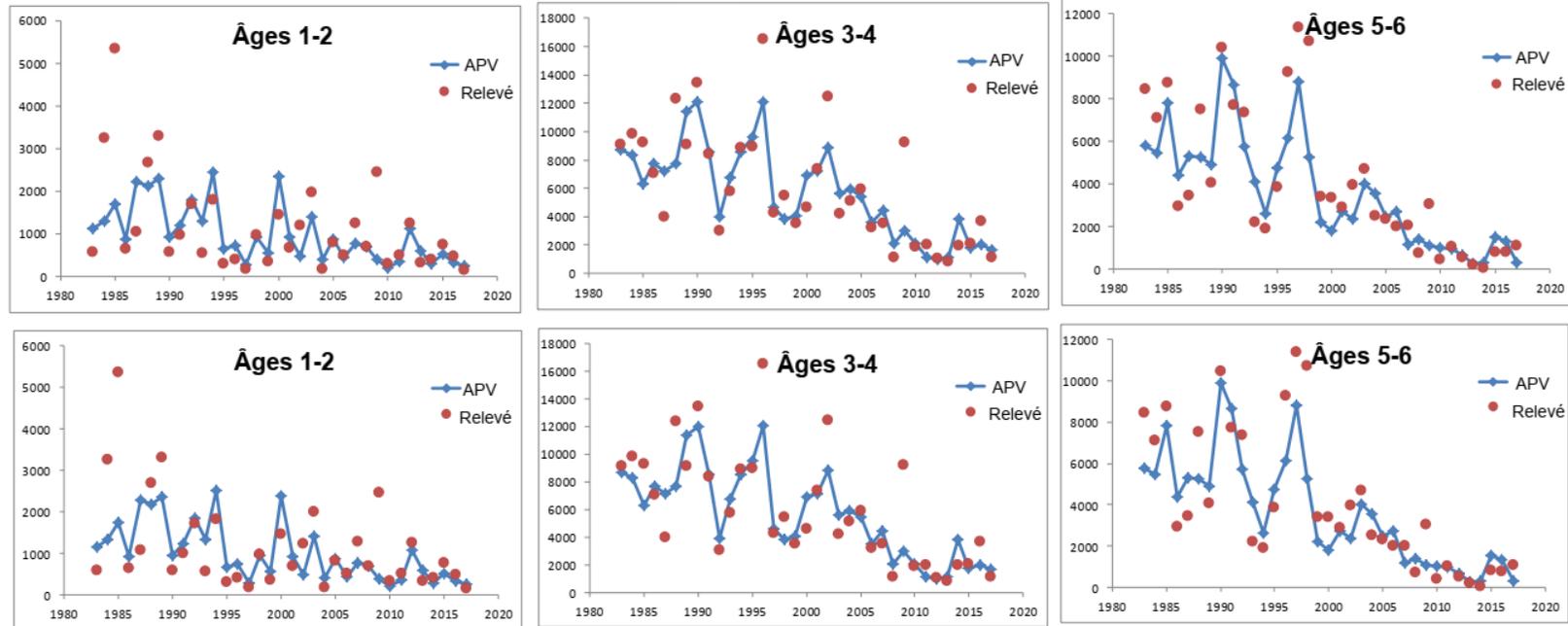


Figure 15. Ajustement du modèle par rapport à la biomasse de relevé pour les modèles 2MFfirst ($Mstd1 = 0, 1$; panneau supérieur) et 3MFfirst (panneau inférieur).

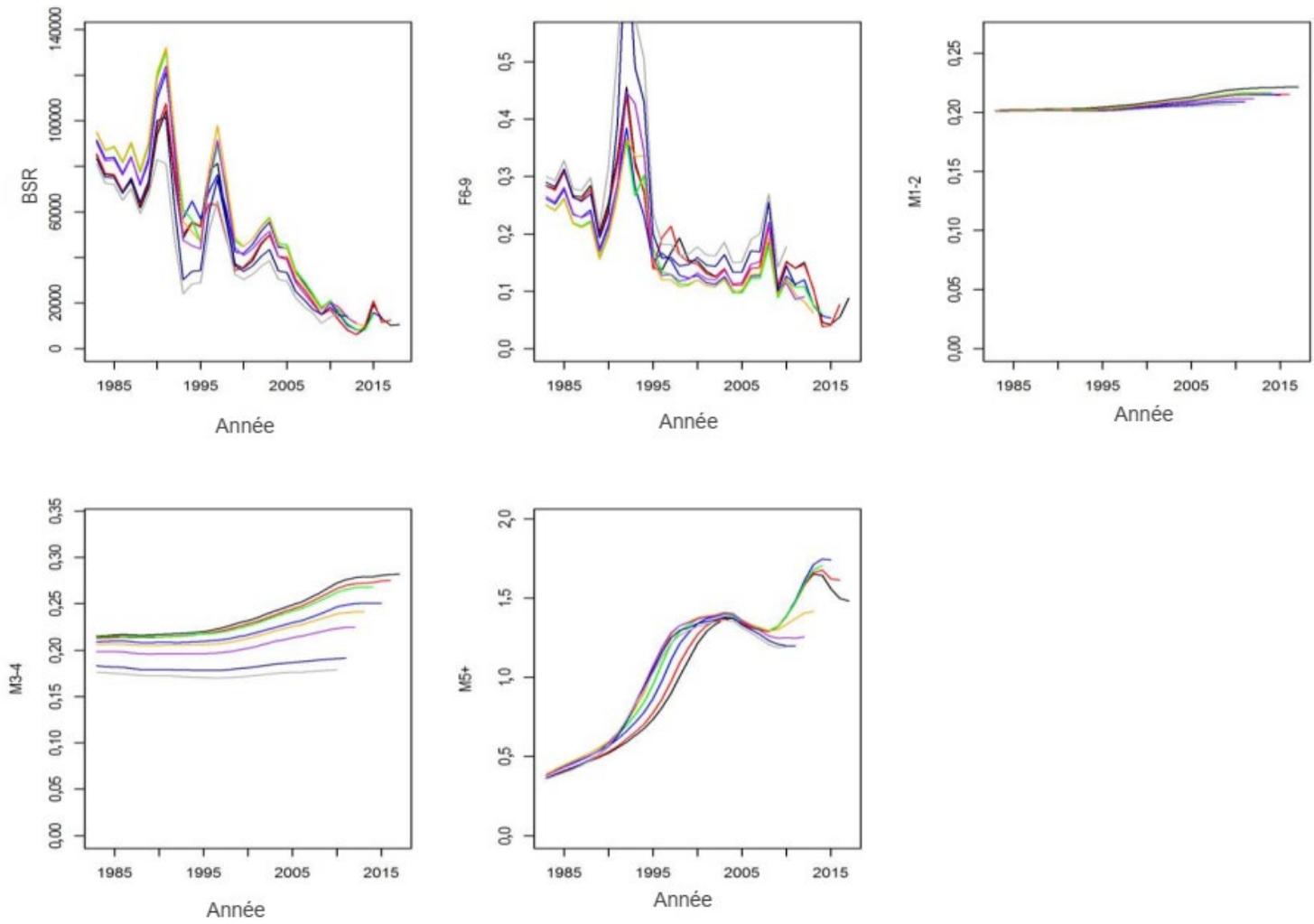


Figure 16. Analyse rétrospective pour le modèle 3MFfirst.

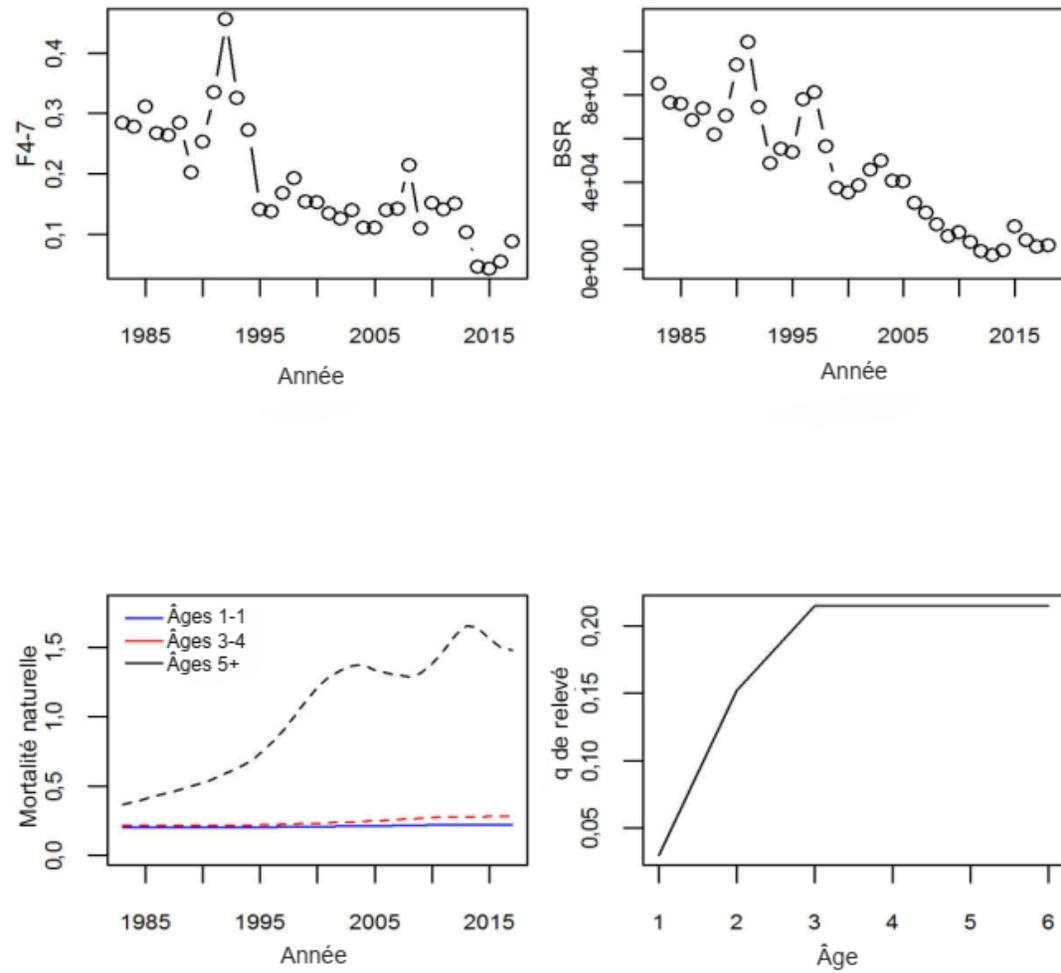


Figure 17. Extrants du modèle 3MFfirst.

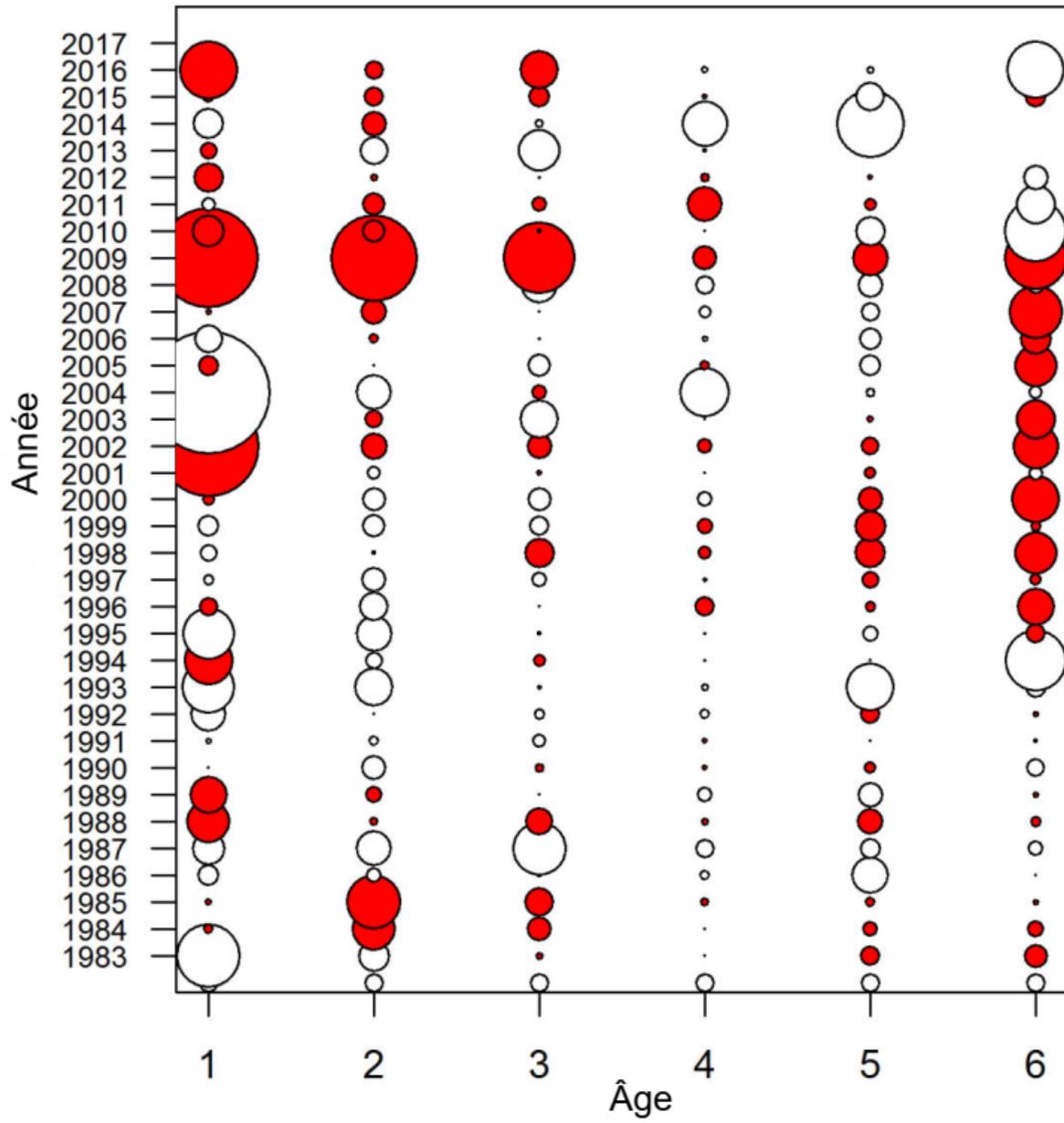


Figure 18. Résidus du modèle 3MFratio.

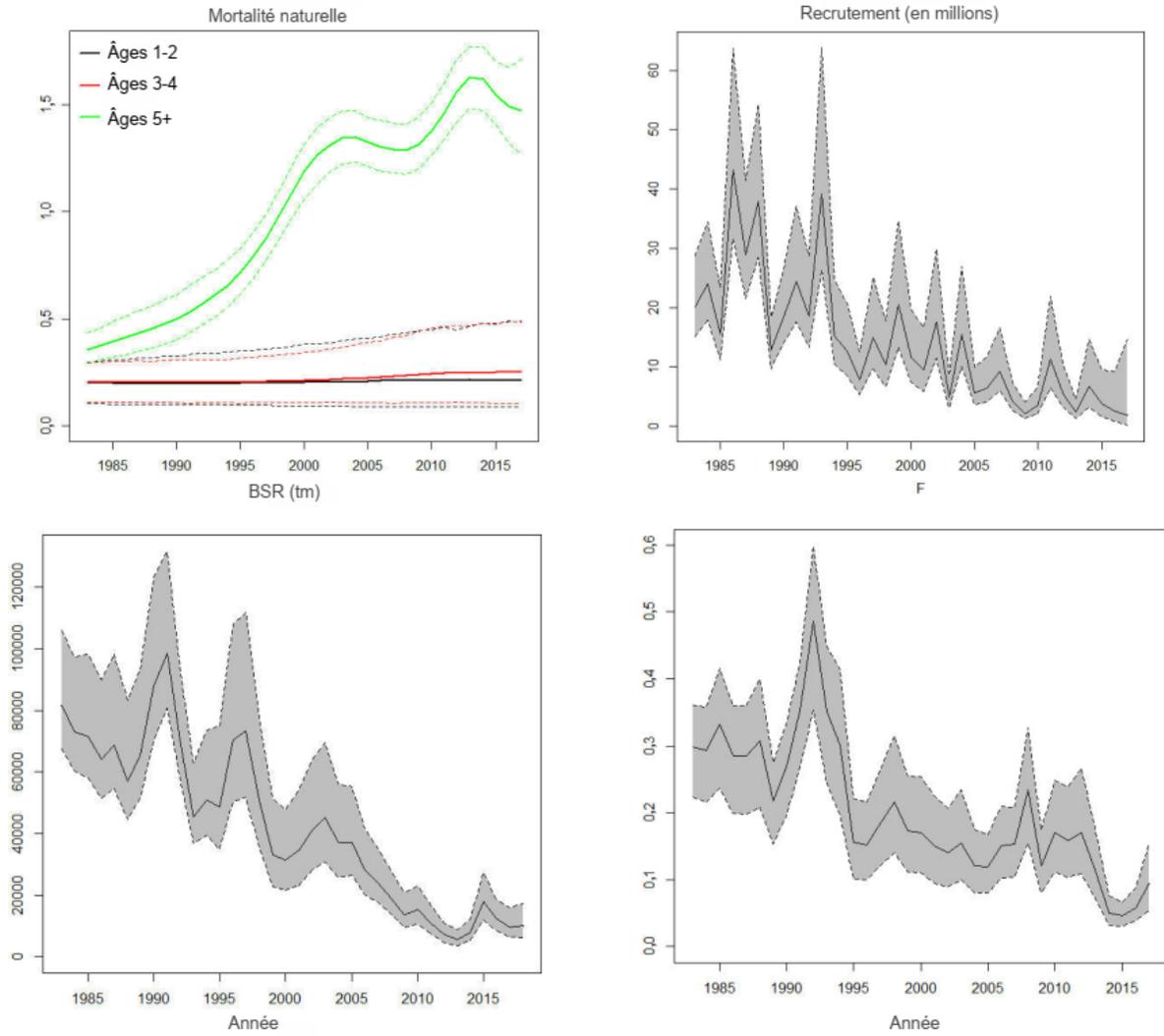


Figure 19. Intervalles de crédibilité de 95 % pour les paramètres M , recrutement, BSR et $F4-7$ selon le modèle 3MFfirst.

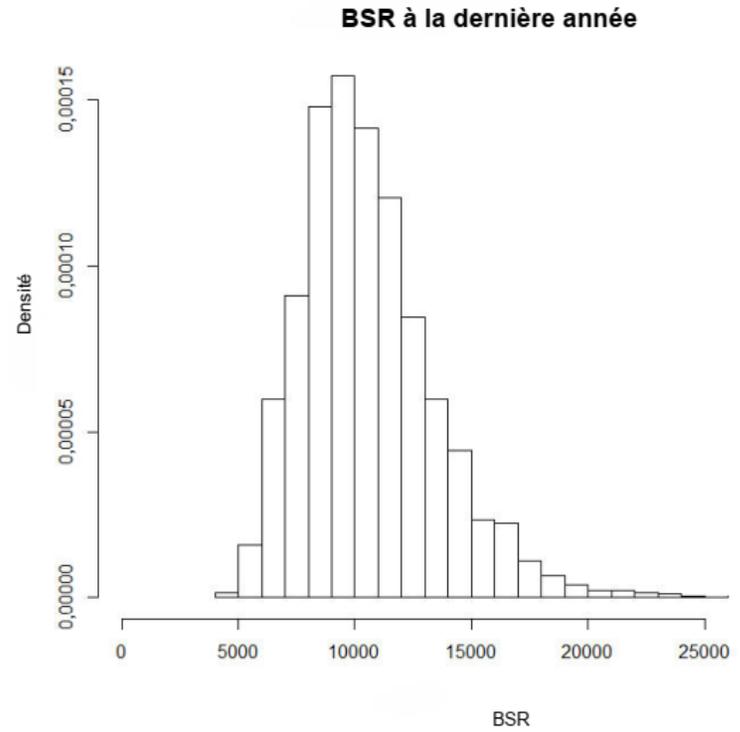
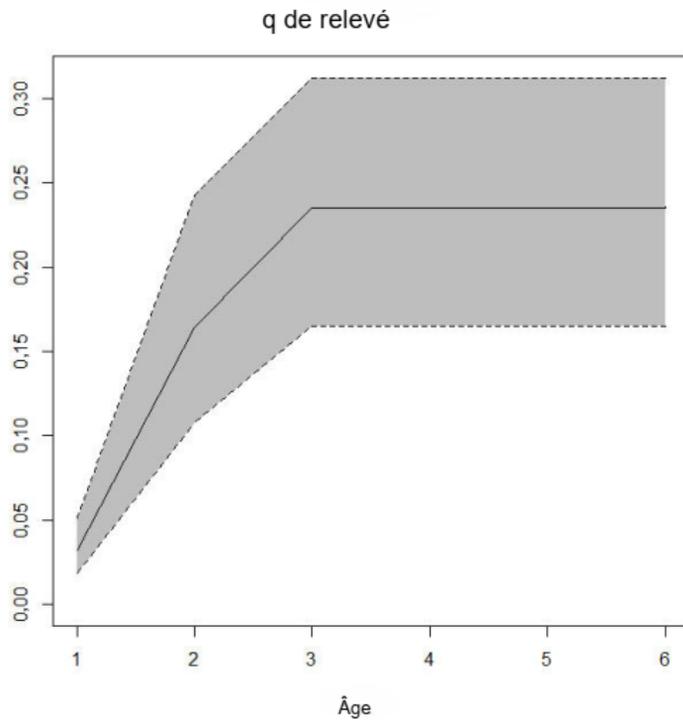


Figure 20. Estimation de q de relevé avec intervalle de crédibilité de 95 % et distribution de la BSR à la dernière année (2018) selon le modèle 3MFfirst.

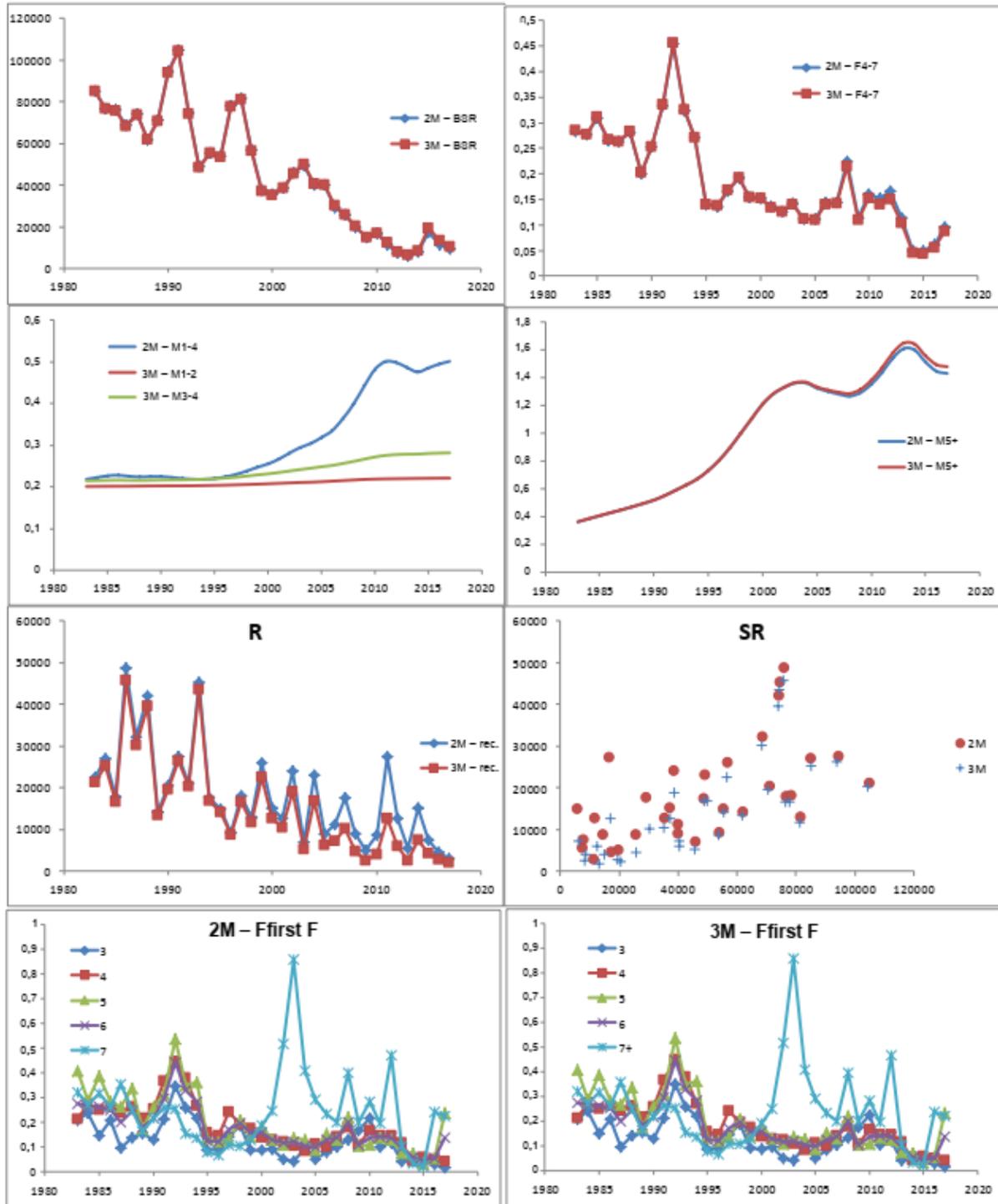


Figure 21. Comparaison des extrants des modèles 2Mfirst et 3Mfirst.

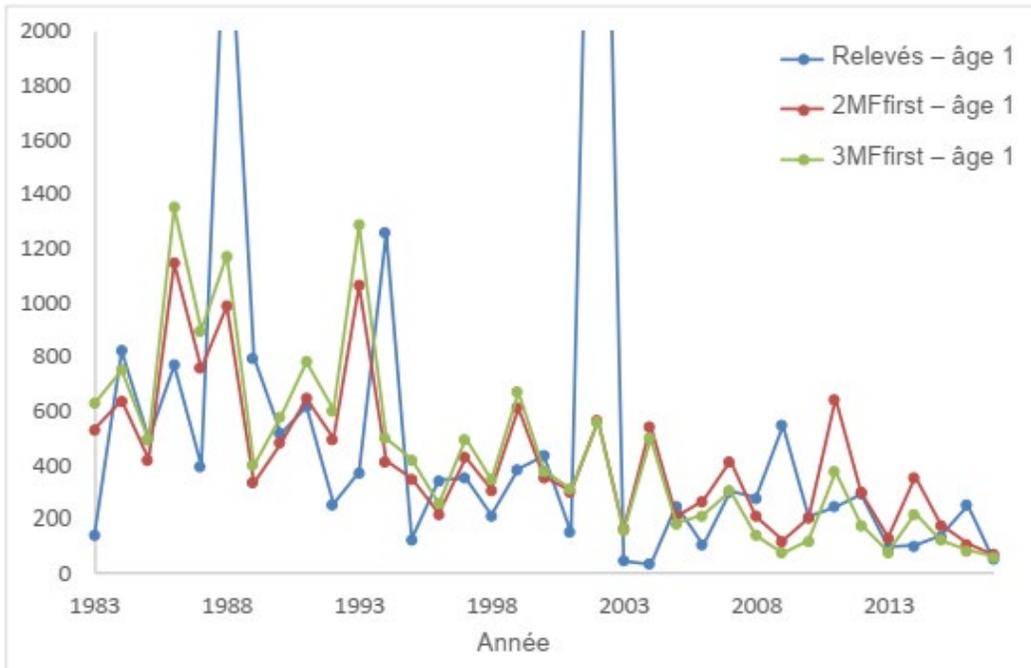


Figure 22. Indices d'abondance d'après les relevés des poissons d'âge 1 comparativement au q de relevé ajusté estimé à l'aide des modèles 2MFfirst et 3MFfirst.

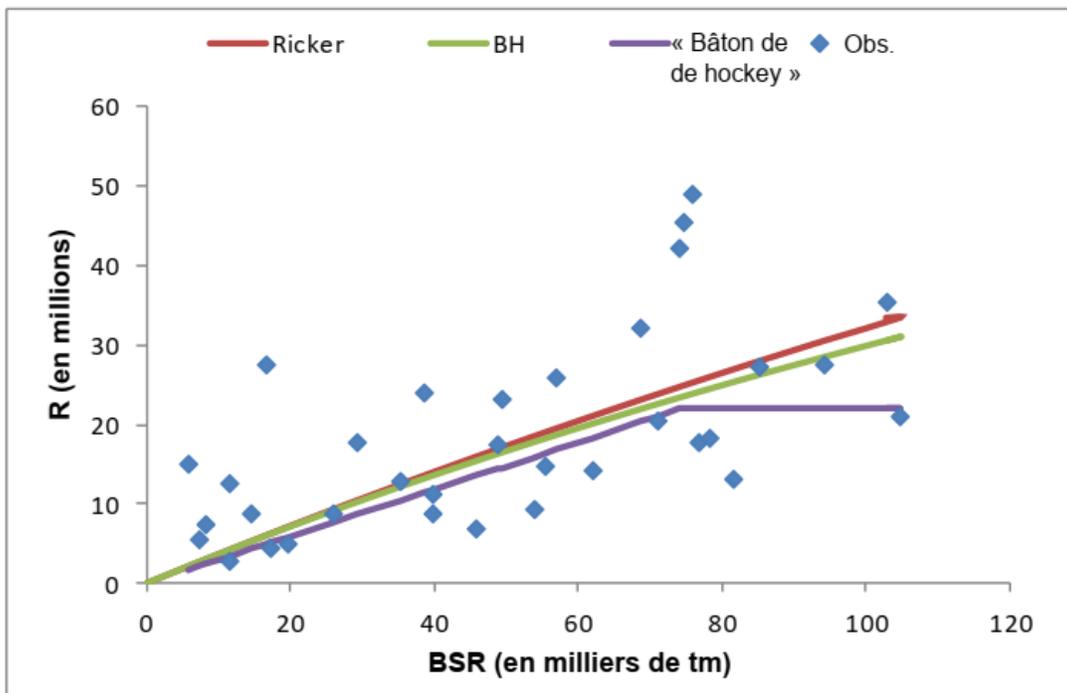


Figure 23. Relation stock-recrutement de la morue des divisions 4X5Y.

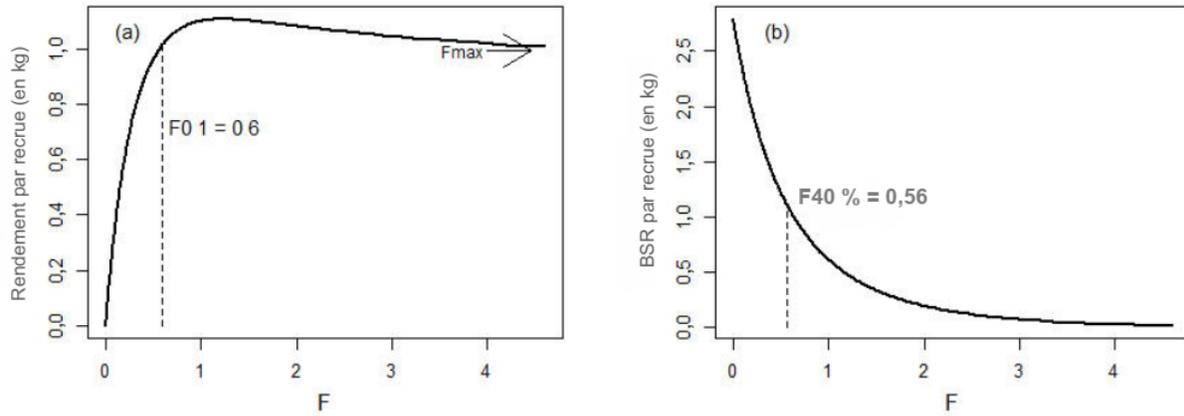


Figure 24. Analyse par recrue effectuée à l'aide des extrants du modèle 3MFfirst.

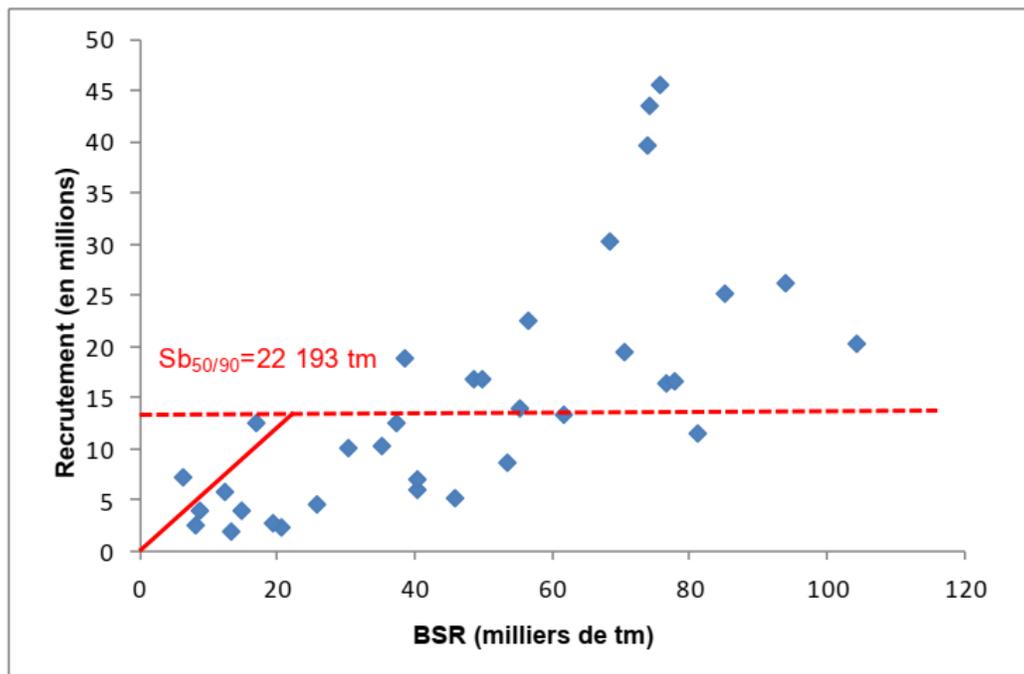


Figure 25. $Sb_{50/90}$ d'après les extrants du modèle 3MFfirst.

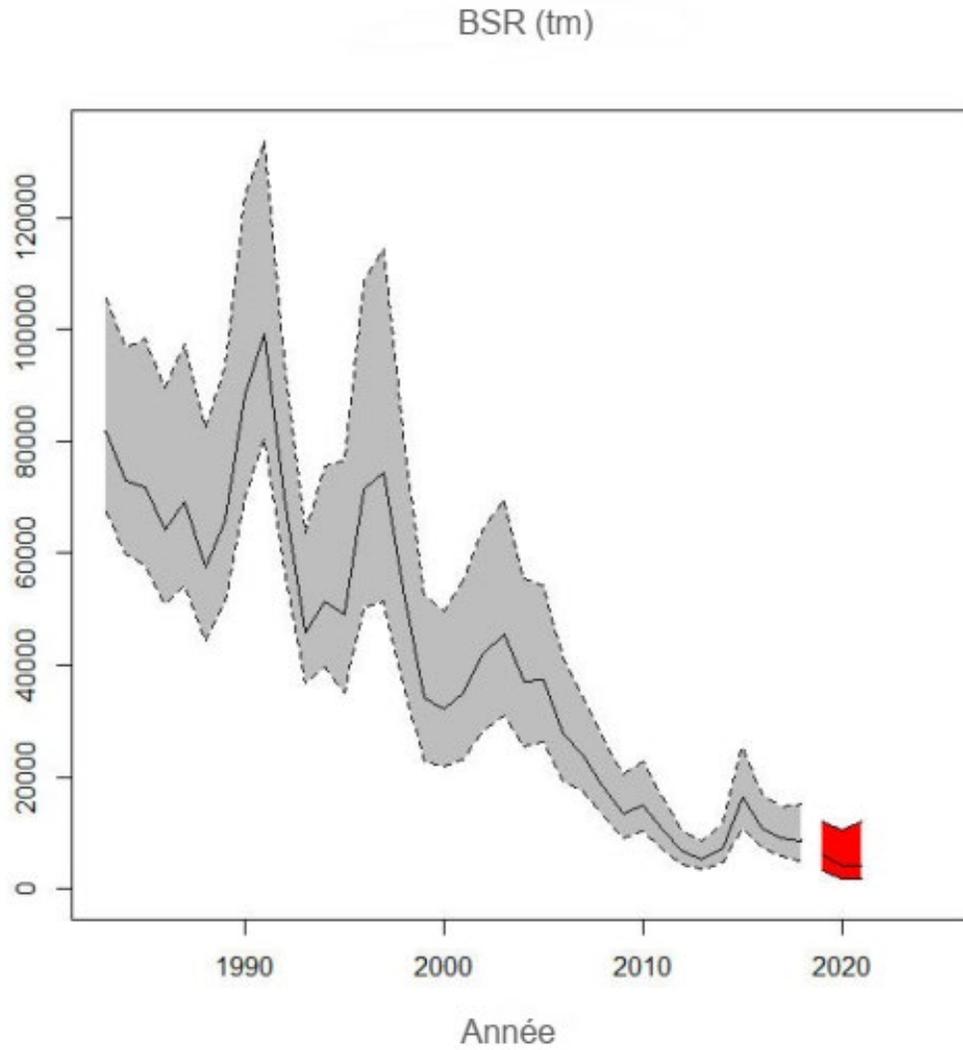


Figure 26. Projection à des fins d'illustration réalisée à l'aide du modèle d'APV 3MFfirst. La bande rouge représente l'intervalle de crédibilité de 95 % d'après les 2 000 échantillons a posteriori.

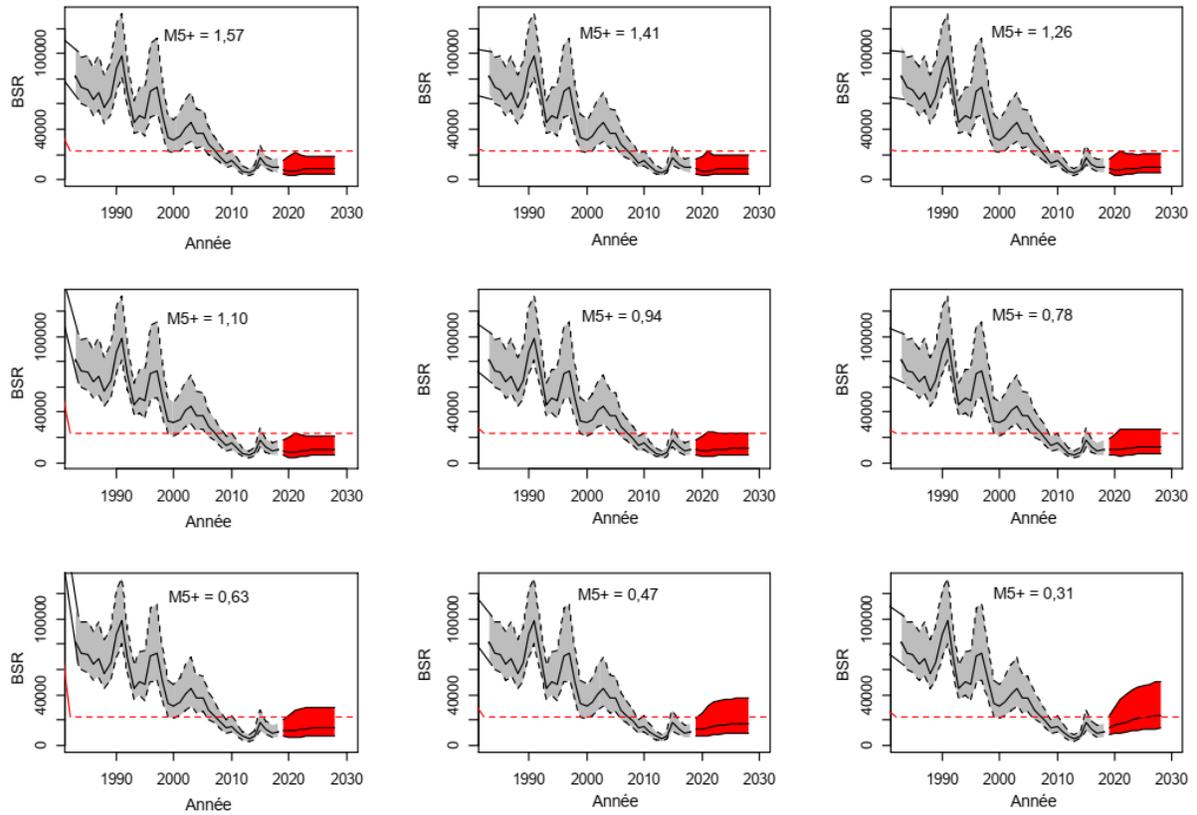


Figure 27. Trajectoire projetée sur 10 ans de la biomasse du stock reproducteur selon différentes valeurs présumées de M pour les poissons d'âge 5+.

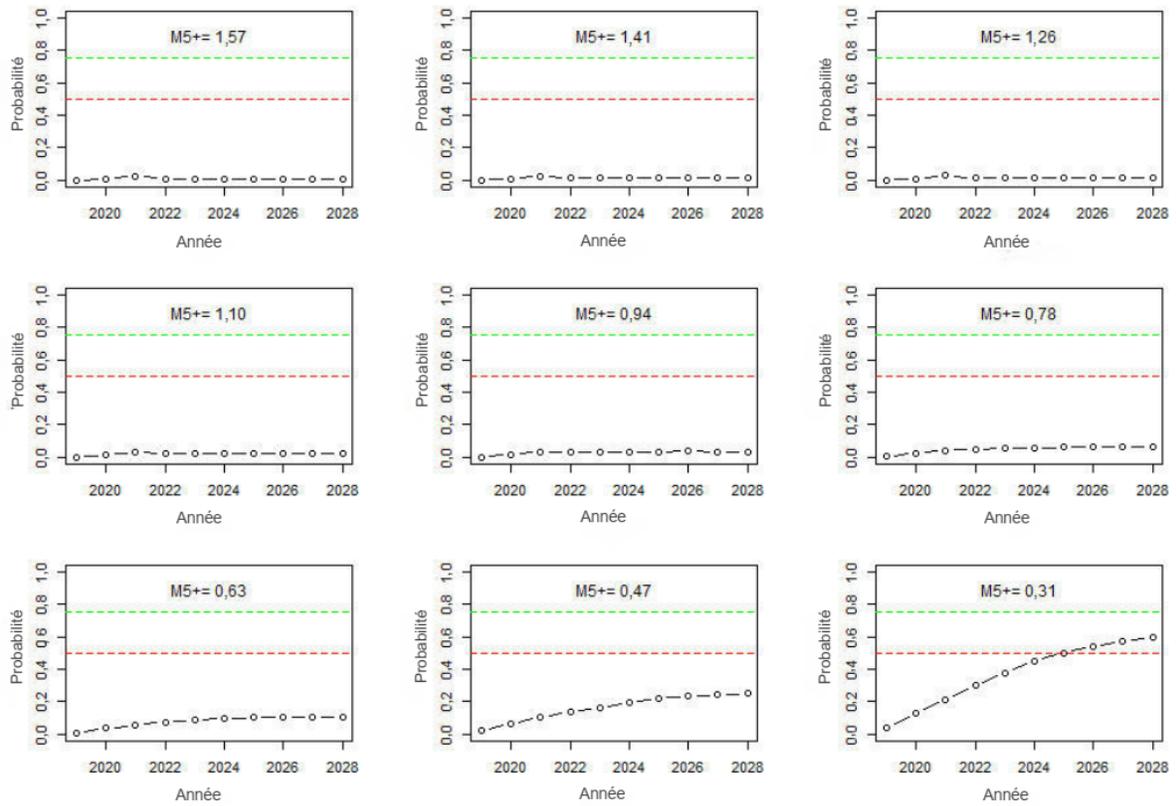


Figure 28. Probabilité que la biomasse du stock reproducteur dépasse les points de référence limites au cours des 10 prochaines années selon différentes valeurs présumées de M pour les poissons d'âge 5+. Les lignes rouge et verte représentent respectivement les probabilités de 50 % et de 75 %.