



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 2026/031

Région de Terre-Neuve-et-Labrador

**Fondement scientifique pour l'élaboration d'un plan de rétablissement du stock
de morue franche (*Gadus morhua*) dans la sous-division 3Ps de l'OPANO en 2022
à l'aide de l'approche de simulation de l'ESG allégée**

Varkey, D.A., Gullage, N., Kumar, R., Regular, P., Perreault, A., Wheeland, L.J.

Pêches et Océans Canada
Direction des sciences
C.P. 5667 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](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, 2026

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

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-99137-5 N° au cat. Fs70-5/2026-031F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Varkey, D.A., Gullage, N., Kumar, R., Regular, P., Perreault, A. et Wheeland, L.J. 2026.
Fondement scientifique pour l'élaboration d'un plan de rétablissement du stock de morue
franche (*Gadus morhua*) dans la sous-division 3Ps de l'OPANO, en 2022, au moyen de
l'approche de simulation d'ESG allégée. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech.
2026/031. v + 50 p.

Also available in English :

Varkey, D.A., N. Gullage, R. Kumar, P. Regular, A. Perreault et L.J. Wheeland. 2026. *Scientific Basis for Developing a Rebuilding Plan for Atlantic Cod (*Gadus morhua*) Stock in NAFO Subdivision 3Ps in 2022 Using MSE-Lite Simulation Approach*. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2026/031. iv + 46 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	v
INTRODUCTION	1
PLAN DE RÉTABLISSEMENT.....	1
ESG ALLÉGÉE	1
MODÈLES OPÉRATIONNELS EN ESG ALLÉGÉE	2
SIMULATIONS DE SCÉNARIOS DE MORTALITÉ NATURELLE À L'AIDE DE MODÈLES OPÉRATIONNELS.....	3
SIMULATIONS DE SCÉNARIOS DE RECRUTEMENT À L'AIDE DE MODÈLES OPÉRATIONNELS.....	5
Taux de recrutement faible	5
Relation stock-recrutement de Beverton-Holt sigmoïdale (sigBH).....	6
Relation stock-recrutement de Beverton-Holt partiel	7
DÉFINITION DE « PRÉVALENT ».....	8
DESCRIPTION DU MODÈLE OPÉRATIONNEL HYBRID : PROJECTIONS	9
Configuration de la première année du modèle	9
Dynamique de la population.....	9
Mortalité par la pêche.....	10
OBJECTIFS DU PLAN DE RÉTABLISSEMENT ET MESURES DE RENDEMENT	11
MESURES DE RENDEMENT FONDÉES SUR LA BIOMASSE.....	12
Jalon.....	12
Objectif à court terme.....	12
Cible de rétablissement.....	13
Mesures de rendement fondées sur les prises	13
PROCÉDURES DE GESTION	13
CRITIQUE SANS PÊCHE DIRIGÉE	14
COUDE	15
COUDE RELEVÉ	15
TRANCHE DE F	16
RÉSULTATS DE LA SIMULATION	16
MESURES DE RENDEMENT	23
SOURCES D'INCERTITUDE.....	29
MORTALITÉ NATURELLE.....	30
RECRUTEMENT.....	31
AUTRES FACTEURS	31
CONCLUSIONS.....	31
REMERCIEMENTS	32
RÉFÉRENCES CITÉES	32

ANNEXE A : PARAMÉTRAGE DE LA MORTALITÉ NATURELLE (M) DANS LE MODÈLE HYBRID	35
ANNEXE B : TABLEAUX ET FIGURES SUPPLÉMENTAIRES	36
TABLEAUX	36
FIGURES	40
ANNEXE C : PROJECTIONS À LONG TERME DE LA SÉRIE HISTORIQUE DE LA BSR (1959 – 2022) POUR TOUTES LES COMBINAISONS DE M ET DE R SELON TOUTES LES PG.....	46
ANNEXE D : TEMPS NÉCESSAIRE POUR ATTEINDRE LA CIBLE DE RÉTABLISSEMENT .	49
ANNEXE E : FONCTION POUR CALCULER F À PARTIR DES PRISES	50

RÉSUMÉ

Un cadre simplifié d'évaluation de la stratégie de gestion (ESG allégée) a été élaboré pour effectuer des simulations en boucle fermée afin d'étudier divers plans de rétablissement du stock de morue de l'Atlantique dans la sous-division 3Ps de l'Organisation des pêches de l'Atlantique Nord-Ouest (OPANO). Les procédures de gestion (c.-à-d. les autres approches pour reconstituer le stock) sont appliquées dans les projections des modèles opérationnels conditionnés sur des données anciennes. Le modèle opérationnel de base pour l'ESG allégée repose sur le modèle intégré état-espace d'évaluation en usage pour ce stock appelé Hybrid (Varkey et coll., 2022). La croissance du stock est actuellement freinée par les récentes augmentations des taux de mortalité naturelle et le faible recrutement. Par conséquent, les simulations à long terme des plans de rétablissement présentés tiennent compte d'un éventail d'hypothèses sur les taux de mortalité futurs et les tendances en matière de recrutement pour le stock. Les résultats de la simulation concernant les autres procédures de gestion sont évalués dans différents scénarios de taux de recrutement et de mortalité, et le rendement des procédures de gestion est évalué en fonction de leur efficacité à atteindre les divers objectifs des plans de rétablissement.

INTRODUCTION

PLAN DE RÉTABLISSEMENT

En avril 2022, les nouvelles dispositions relatives aux stocks de poissons sont entrées en vigueur. Les 30 premiers grands stocks prescrits par règlement comprenaient celui de la sous-division de l'Organisation des pêches de l'Atlantique Nord-Ouest (OPANO). Stock de morue franche (*Gadus morhua*) dans la 3Ps. Selon la plus récente évaluation des stocks (MPO, 2022), le stock de morue de la sous-division 3Ps se trouvait dans la zone critique (48 % du point de référence limite [PRL]). Par conséquent, l'élaboration d'un plan de rétablissement pour ce stock était une exigence juridique. Un groupe de travail sur le plan de rétablissement (GT PR) a été mis sur pied pour élaborer ce plan. Le GT PR était un groupe diversifié, comprenant des participants de groupes d'intervenants du secteur des pêches, de Gestion des ressources, de Sciences, de Politiques et économie, ainsi que d'organisations non gouvernementales. Le GT PR s'est réuni à plusieurs reprises pour définir la cible de rétablissement, discuter des conditions actuelles et les préciser, ce qui est nécessaire pour effectuer des projections et établir des objectifs mesurables pour le plan de rétablissement. Lors des réunions du GT PR, l'approche de simulation d'évaluation de la stratégie de gestion (ESG allégée), élaborée pour simuler différents plans de rétablissement, a été présentée, et plusieurs extraits de la simulation de différentes stratégies relatives au plan de rétablissement ont fait l'objet d'une discussion. Les suggestions du GT PR ont été prises en compte dans le cadre de simulation. En novembre 2022, une réunion régionale d'examen par les pairs du Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS) a été tenue pour examiner les données scientifiques à l'appui de l'élaboration du plan de rétablissement. Ce document, préparé en vue de la réunion du SCAS, décrit la cible du rétablissement, les conditions actuelles et les objectifs mesurables déterminés par le GT PR, ainsi que l'approche détaillée de simulation de l'ESG allégée et son application pour l'élaboration d'un plan de rétablissement pour le stock de morue de la sous-division 3Ps.

ESG ALLÉGÉE

À l'heure actuelle, la meilleure approche pour mettre en œuvre un plan de gestion consiste à utiliser une ESG qui simule la dynamique des stocks et les projections dans un éventail de plans de gestion, ainsi que d'autres hypothèses (p. ex., recrutement [R]) (Punt et coll., 2016). L'ESG (Figure 1a) comprend un modèle opérationnel, une procédure de gestion (y compris une procédure d'évaluation des stocks et une règle de contrôle des prises [aussi appelée règle de décision en matière d'exploitation]) et des paramètres de rendement. Les modèles opérationnels décrivent la véritable dynamique de la population et sont conditionnés sur des données anciennes sur le stock. Cependant, il arrive souvent d'examiner de nombreuses formules de modèles opérationnels pour mieux saisir les incertitudes dans le système des pêches (p. ex., divers scénarios de mortalité naturelle ou de recrutement). Dans l'ESG, l'estimation de l'état des stocks fondée sur les données produites par le modèle opérationnel (c.-à-d. le processus d'évaluation) fournit l'état apparent du stock grâce à un modèle d'évaluation des stocks ou aux tendances dégagées dans les données de relevé. Dans une ESG, il y a une rétroaction entre l'état réel décrit dans le modèle opérationnel et la procédure de gestion appliquée dans l'évaluation. Les règles de contrôle des prises fixent l'abondance des prises (c.-à-d. le total des prélèvements) pour l'année suivante en fonction de la taille du stock (définie comme la biomasse du stock reproducteur) et de l'état (biomasse du stock reproducteur/point de référence limite) déterminés au cours du processus d'évaluation, puis appliquent le taux de prise estimé pour la population simulée. Ces éléments décrivent le modèle de base, qui est répété sur un nombre prédéterminé d'années pour faire des projections sur le stock et modéliser la dynamique du stock dans le futur.

L'ESG allégée est une version simplifiée de l'ESG (figure 1b) qui contient tous les principaux éléments d'une ESG (modèles opérationnels, procédures de gestion et paramètres de rendement), mais sans les étapes du processus de production et d'évaluation des données. L'ESG allégée ne permet pas de modéliser séparément l'état réel et l'état apparent du stock; il s'agit essentiellement de projections en boucle fermée du modèle opérationnel. Comme le modèle opérationnel fournit des renseignements sur la biomasse du stock à la procédure de gestion, la rétroaction entre le modèle opérationnel et la procédure de gestion est directe et immédiate. Le principal coût de la simplicité de l'ESG allégée est que, dans le processus de gestion réel, l'information complète sur le stock ne sera jamais connue. Cependant, sur le plan de la planification, il est peu probable que les stratégies de rétablissement n'ayant pas fonctionné dans un scénario d'information parfait présentant une rétroaction parfaite (c.-à-d. ESG allégée) soient fructueuses si elles sont étudiées avec une ESG comportant plus d'incertitudes.

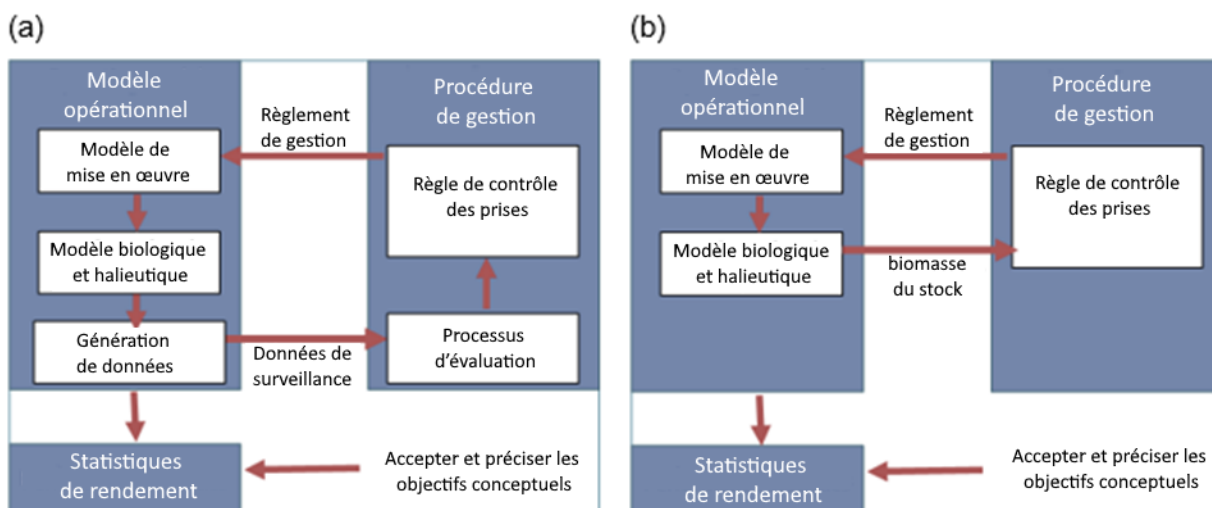


Figure 1 : a) Organigramme de l'ESG modifiée d'après Punt et coll., 2016 (à gauche). b) Organigramme de l'ESG allégée mise en œuvre ici (à droite).

MODÈLES OPÉRATIONNELS EN ESG ALLÉGÉE

Les modèles opérationnels paramétrés dans l'ESG allégée sont fondés sur le modèle Hybrid (voir Varkey et coll., 2022, pour les détails du modèle) et un modèle d'évaluation état-espace (MEEE; Champagnat et coll., 2024; Nielsen et Berg, 2014) pour les modèles d'évaluation du stock de morue dans la sous-division 3Ps. Le modèle Hybrid est un modèle état-espace adapté, rédigé dans l'outil Template Model Builder (TMB) qui est utilisé pour évaluer le stock depuis 2019. Un MEEE complémentaire, élaboré pour le stock de morue de la sous-division 3Ps (Champagnat et coll., 2024), est présenté aux réunions d'évaluation depuis 2019 aux fins de la validation des prévisions du modèle Hybrid. Les deux modèles tiennent compte des données scientifiques provenant des relevés au chalut de fond (Canada, 1983 – 2021; France, 1978 – 92; Groundfish Enterprise Allocation Council [GEAC], 1998 – 2005), des relevés par pêche sentinelle au filet maillant et à la palangre (1995 – 2020) et des données sur les débarquements. Bien qu'il y ait quelques différences dans les structures sous-jacentes du modèle, la principale différence entre le scénario de référence (Hybrid) et le MEEE est la formule du modèle relativement à la mortalité naturelle. Les estimations de la mortalité naturelle du modèle Hybrid ont été alimentées par un indice de mortalité fondé sur l'état des morues; dans le MEEE, la mortalité naturelle était fixée à 0,3 pour tous les âges et toutes les années.

Ce document présente uniquement les détails du modèle opérationnel fondé sur le modèle Hybrid. Bien qu'un modèle opérationnel hybride maintenant la mortalité naturelle constante ait été ajouté à la liste originale des modèles opérationnels, il est admis que le MEEE est suffisant pour représenter un scénario dans lequel la mortalité naturelle est invariable, quels que soient l'âge et la période. Des simulations de MEEE ont été présentées lors de deux réunions précédentes du GT (des 7 et 8 novembre 2022 et du 14 novembre 2022) afin de vérifier la cohérence entre les simulations des deux principaux modèles opérationnels. Comme le comportement des deux modèles a été jugé cohérent, le GT PR a convenu de se concentrer sur les simulations fondées sur le modèle opérationnel Hybrid.

Le modèle opérationnel Hybrid comprend ce qui suit :

1. tous les relevés obtenus (les relevés canadiens par navire de recherche, les relevés français d'évaluation des ressources halieutiques de la région 3Ps, les relevés au chalut de l'industrie et les relevés par pêche sentinelle au filet maillant et à la palangre);
2. des données commerciales (les prises selon l'âge, pour lesquelles la composition selon l'âge est ajustée à l'aide des logits du rapport de continuité, et les débarquements de pêche, qui sont ajustés à l'aide d'un test du rapport des vraisemblances censuré;
3. la mortalité par la pêche (P) est décrite au moyen d'une marche aléatoire à distribution normale multivariée qui présente une pause pendant la période de moratoire. De plus, l'âge 2 est découplé de la corrélation selon une distribution normale multivariée;
4. où M varie dans le temps, en fonction de l'indice de mortalité fondé sur l'état;
5. le modèle commence en 1959, soit la première année à laquelle des données sur les débarquements ont été recueillies.

L'âge dans le modèle s'étend de 2 à 14 ans et plus. Pour d'autres précisions et descriptions relatives au modèle, veuillez consulter Varkey et coll., 2022.

Il est important de saisir l'incertitude inhérente au système des pêches. La mortalité naturelle et le recrutement stimulent la productivité de la population et sont des sources bien connues d'incertitudes dans les projections sur le stock. Par conséquent, l'ESG allégée, dans le cadre de l'étude de l'incidence d'éventuels scénarios, comprenait plusieurs hypothèses sur l'état au sujet des taux de mortalité M et des tendances en matière de recrutement R à venir pour le stock. Il est à noter que les scénarios de mortalité M et de recrutement R correspondaient tous à un état réel du stock, mais, dans un climat océanique en changement, l'état pourrait ne pas refléter avec exactitude l'état futur. Cette question est abordée plus en profondeur ci-dessous dans la section **SOURCES OF UNCERTAINTY**.

SIMULATIONS DE SCÉNARIOS DE MORTALITÉ NATURELLE À L'AIDE DE MODÈLES OPÉRATIONNELS

Trois autres scénarios de mortalité ont été appliqués selon les taux faibles, de dernière année et élevés recensés dans la tendance des taux de mortalité naturelle anciens provenant de l'évaluation (Figure 2).

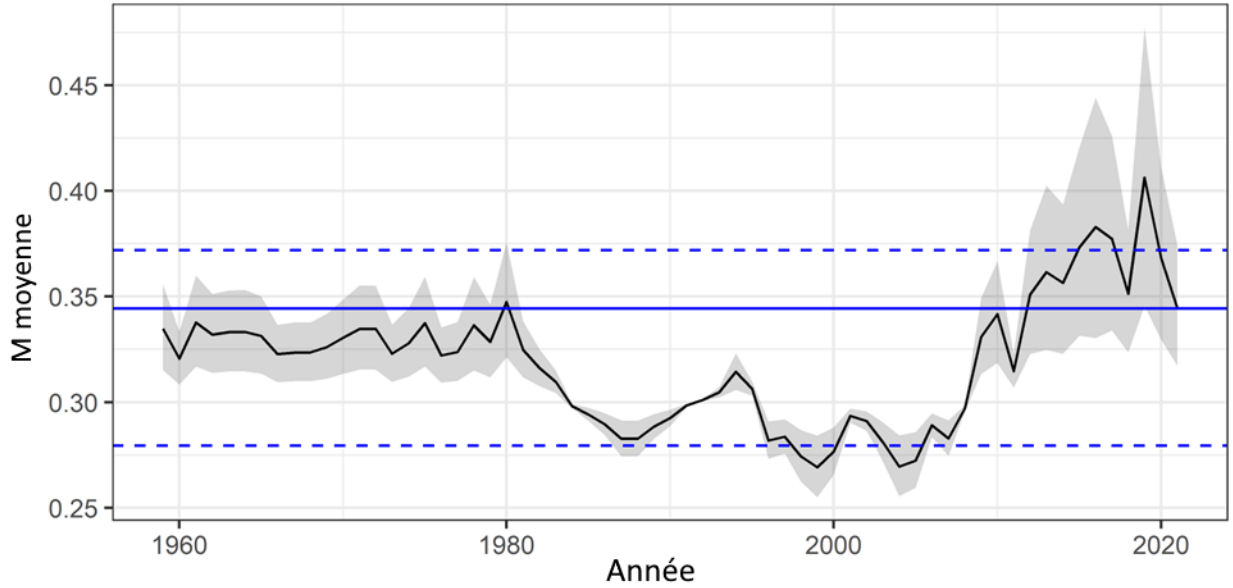


Figure 2 : Tendence de la mortalité naturelle selon la plus récente évaluation (MPO, 2022). Les lignes horizontales bleues montrent les taux des scénarios de mortalité naturelle superposés à la tendance des données anciennes (ligne pleine = valeurs les plus élevées; lignes pointillées = valeurs faibles et élevées).

Le taux de mortalité naturelle a été faible de 1996 – 2005 et élevé de 2015 – 21. Le taux de mortalité naturelle en 2021 a été estimé à 0,34. Le taux de mortalité naturelle du modèle opérationnel Hybrid variait en fonction du temps ($M_{a,y}$), dans lequel la tendance était fondée sur un indice de mortalité attribuable à l'état médiocre des poissons (Regular, 2022; Regular et coll., 2022; M_c ; tableau AB 1). Le paramètre $mpar_a$ a été appliqué à l'indice normalisé et estimé selon deux groupes d'âge (2 à 5 et 6 et plus, ce qui correspond approximativement aux individus immatures et matures) pour prendre en considération que les deux groupes d'âge se comportent différemment des tendances de l'état des poissons. Pour de plus amples renseignements sur le paramétrage, veuillez consulter l'annexe A. Dans la simulation des projections, on a appliqué l'équation (Éq.) 1 à l'indice de l'état moyen aux périodes respectives afin de définir les scénarios de taux de mortalité naturelle faible, de dernière année et élevé :

- Faible : normalisé M_c = moyenne normalisée M_c de 1996 – 2005
- Dernière année : normalisé M_c = moyenne normalisée $M_c, 2021$
- Élevé : normalisé M_c = moyenne normalisée M_c de 2015 – 21

L'incertitude dans M a été simulée en fonction de la variance dans l'estimation du $mpar_a$, où σ_{mpar} était l'erreur-type du paramètre estimé $mpar_a$.

$$mpar_{a,y} = mpar_a + e_{2:A,y}; e_{2:A,y} \sim N(0, \sigma_{mpar,a}) \quad \text{Éq. 1}$$

$$\log M_{a,y} = \log(0,3) + mpar_a * \left(\frac{M_{c,y} - \mu_{M_c}}{\sigma_{M_c}} \right); \quad \text{Éq. 2}$$

Dans l'application aux projections, M_c (l'indice de l'état) a varié d'un scénario à l'autre. Comme il est décrit à l'annexe A, la moyenne (μ_{M_c}) et l'écart-type (σ_{M_c}) ont été calculés pour les 35 premières années de données sur l'état des poissons; c'est pourquoi la normalisation de M_c

a été fondée sur la période de référence (1978 – 2012). Ces valeurs sont demeurées constantes d'un scénario à l'autre.

La valeur estimative *mpar* pour les âges 2 à 5 était proche de « 0 » (voir Varkey et coll., 2022) et la tendance du taux de mortalité naturelle pour ces âges était essentiellement stable, à 0,3. La valeur estimative *mpar* pour les âges 6 et plus (0,127) a permis au taux de mortalité naturelle de varier à ces âges. Par conséquent, dans les simulations de tous les autres scénarios de taux de mortalité naturelle, chez les âges 2 à 5, ce taux était très proche de la valeur de référence de 0,3; le taux de mortalité naturelle n'a varié que chez les âges 6 et plus.

SIMULATIONS DE SCÉNARIOS DE RECRUTEMENT À L'AIDE DE MODÈLES OPÉRATIONNELS

Le succès du recrutement a varié dans l'ensemble des séries chronologiques examinées et prévoir le taux de recrutement à venir comportait beaucoup d'incertitudes. Le taux de recrutement de ce stock était élevé dans les années 1960, mais il a diminué dans les années 1970 (Figure 3). Dans les années 1980, le taux de recrutement était très variable. Depuis 1993, ce taux est bien inférieur à la moyenne à long terme. Dans la série chronologique, les taux ont été les plus faibles dans la période 2016 – 17. Les scénarios de recrutement examinés ici ont été caractérisés comme faibles, Beverton-Holt sigmoïdaux (sigBH) et Beverton-Holt partiels (BH). Le nombre de recrues de l'âge 2 dans chaque simulation et à chaque année de la simulation a été déterminé à l'aide de la valeur de recrutement moyenne et de l'écart-type estimatif, qui variaient tous deux en fonction du scénario de recrutement.

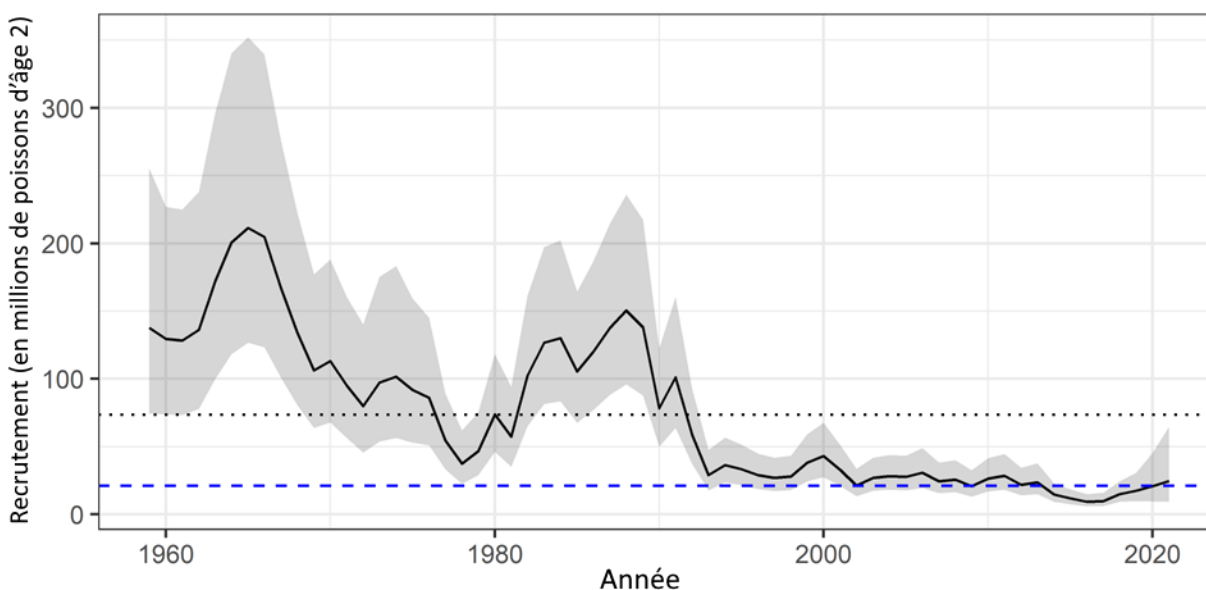


Figure 3 : Tendence du recrutement (*R*) tirée de la plus récente évaluation (MPO, 2022). La ligne pointillée noire représente la moyenne à long terme du recrutement. La ligne horizontale pointillée de couleur bleue indique le taux utilisé pour le scénario de recrutement « faible », soit le taux moyen du recrutement pour 2019 – 21.

Taux de recrutement faible

Le scénario de recrutement faible a été défini comme la moyenne du taux de recrutement faible de la récente période, de 2019 – 21. Dans ce scénario, le taux de recrutement a été maintenu constant (avec incertitude) jusque dans le futur. Ce scénario a été considéré comme faible, en

raison de l'hypothèse que le taux de recrutement demeurerait aux taux faibles récemment observés. Un relevé des recrues des âges 2 a été échantillonné à partir d'une distribution normale avec la moyenne $\log \mu_R$, où μ_R était le taux de recrutement moyen des trois dernières années et l'écart-type σ_R , qui a été estimé pendant le conditionnement du modèle opérationnel.

$$\log N_{2,y} = \log \mu_R + \eta_{2,y}; \eta_{2,y} \sim N(0, \sigma_R) \quad \text{Éq. 3}$$

Relation stock-recrutement de Beverton-Holt sigmoïdale (sigBH)

Perälä et ses collaborateurs (2022) ont montré des signes probants d'effets dépendants chez la morue de la sous-division 3Ps en adaptant les données sur le stock-recrutement à un modèle sigBH (Éq. 4), une méthode conçue pour représenter l'effet d'Allee dans le recrutement. L'effet d'Allee est un phénomène observable dans les petites populations où le taux de croissance diminue en raison de leur faible densité (Drake et Kramer, 2011; Kramer et coll., 2009) ou de l'augmentation de la pression de prédation dans les populations à faible densité (Myers et coll., 1995; Walters et Kitchell, 2001). Perälä et ses collaborateurs (2022) ont appliqué deux modèles différents pour déterminer les effets dépendants probants chez la morue de la sous-division 3Ps et constaté que, de tous les modèles mis à l'essai, le sigBH convient le mieux. Le modèle sigBH a été adapté de nouveau aux tendances les plus récentes en matière de stock-recrutement. On a ajouté une limite supérieure du recrutement, qui désigne le taux de recrutement pour la série chronologique de biomasse du stock reproducteur élevée, afin d'éviter que le R n'atteigne des valeurs élevées irréalistes dans la simulation lorsque la biomasse du stock reproducteur est élevée.

La valeur moyenne du recrutement a été calculée à l'aide de la fonction sigBH; R_∞ est la valeur de l'asymptote du recrutement (R), S_{50} est la valeur de la biomasse du stock reproducteur pour laquelle R est $0,5R_\infty$, et c est le paramètre de l'effet dépendant. La figure AB 1 montre les distributions à posteriori des paramètres.

$$R = \frac{R_\infty}{1 + \left(\frac{S_{50}}{S}\right)^c} \quad \text{Éq. 4}$$

Pendant l'ajustement du modèle, R a été modélisé à l'aide d'une fonction de vraisemblance log-normale.

$$R|S, \theta, \sigma^2 \sim \text{Lognormal}(\mu, \sigma^2) \quad \text{Éq. 5}$$

où le paramètre lieu μ a été défini comme suit :

$$\mu = \log(E(R|S, \theta)) - \frac{1}{2}\sigma^2 \quad \text{Éq. 6}$$

et le nombre de recrues attendu (E), compte tenu de la biomasse du stock reproducteur S et des paramètres du modèle stock-recrutement. $\theta = (R_\infty, S_{50}, c)$

$$E(R|S, \theta) = \frac{R_\infty}{1 + \left(\frac{S_{50}}{S}\right)^c} \quad \text{Éq. 7}$$

Lorsque le taux de recrutement R a été modélisé à l'aide d'une fonction de vraisemblance log-normale, la médiane s'est révélée inférieure aux attentes et il a fallu corriger le biais. Lors de

l'échantillonnage des données sur le recrutement, pour les simulations, le taux de recrutement moyen nécessaire devait être corrigé par un facteur égal à $-\frac{1}{2}\sigma^2$. Cette correction a été appliquée à la moyenne obtenue par simulation (voir l'éq. 8, après l'application originale Éq. 9).

$$\log N_{2,y} = \log \left(\frac{R_\infty}{1 + \left(\frac{S_{50}}{S}\right)^c} \right) - \frac{1}{2}\sigma^2 + \eta_{2,y}; \eta_{2,y} \sim N(0, \sigma_{RSBH}) \quad \text{Éq. 8}$$

$$N_{2,y} \sim \text{Lognormal} \left(\log \left(\frac{R_\infty}{1 + \left(\frac{S_{50}}{S}\right)^c} \right) - \frac{1}{2}\sigma_{RSBH}^2, \sigma_{RSBH}^2 \right) \quad \text{Éq. 9}$$

Les courbes résiduelles présentées à la figure AB 2 ne montraient aucune tendance majeure, sauf une phase, à la fin des années 1990 et au début des années 2000, où les valeurs prédites du modèle étaient invariablement plus élevées et ce, pendant plusieurs années. Cela correspondait aux valeurs de la biomasse du stock reproducteur dans la plage approximative de 50 000 à 70 000 tonnes (t). Dans la simulation de R, l'incertitude des paramètres a été intégrée en dessinant les paramètres pour chaque simulation à partir des échantillons, à l'aide de la méthode de Monte Carlo par chaîne de Markov (MCMC) (figure AB 3), du modèle adapté à l'Éq. 4. Nous avons utilisé la médiane à posteriori du paramètre sigma du modèle d'observation pour simuler l'incertitude des prédictions.

Relation stock-recrutement de Beverton-Holt partiel

La tendance du R estimé du modèle d'évaluation a montré que, depuis 1993, le R est inférieur à la moyenne à long terme de sa série chronologique. Une relation stock-recrutement de BH (BH-partiel) a été ajustée aux données à partir de 1993 afin de générer une relation stock-recrutement qui représente les données d'une période plus récente. Les graphiques des résidus fournis à la figure AB 4 ne montraient aucune tendance majeure, à l'exception d'une dépendance temporelle depuis 2010. Dans la mise en œuvre des simulations (Éq. 11), l'incertitude des paramètres a été intégrée au moyen d'un échantillonnage des paramètres α et β à partir de la matrice de covariance des paramètres ajustés à l'éq. 10 (figure AB 5). L'incertitude des prévisions a été simulée d'après l'écart-type de l'erreur d'observation par rapport à l'ajustement au modèle stock-recrutement de BH-partiel.

$$R = \frac{\alpha S}{1 + \beta S} \quad \text{Éq. 10}$$

$$\log N_{2,y} = \log \left(\frac{\alpha S}{1 + \beta S} \right) + \eta_{2,y}; \eta_{2,y} \sim N(0, \sigma_{RBH}) \quad \text{Éq. 11}$$

La comparaison des courbes sigBH et BH-partiel (figure AB 6) a révélé d'importantes différences d'amplitude, avec une déviation importante du R prévu pour des niveaux de BSR supérieurs à environ 50 000 t (plus élevés lorsque la série chronologique complète était utilisée, c'est-à-dire avec la courbe sigBH). Au point de divergence des deux fonctions, le niveau de la BSR (environ 50 000 t) était à un point critique juste en dessous du PRL (66 000 t); il était important de tenir compte de cette déviation entre les deux fonctions du R lors de l'évaluation des projections à moyen et à long terme.

DÉFINITION DE « PRÉVALENT »

Le processus d'élaboration d'un plan de rétablissement exige une définition des conditions prévalentes. À des fins d'harmonisation avec les directives données à la Direction des sciences à cet égard, l'« échancier pour l'atteinte de la cible de rétablissement du stock doit se situer entre le T_{\min} et un maximum de deux à trois fois le T_{\min} . À noter que le T_{\min} est le temps minimum requis pour atteindre la cible de rétablissement du stock en l'absence de toute pêche ($F = 0$) selon les conditions de productivité qui prévalent ». Cependant, il n'existe pas de définition officielle de la productivité prévalente.

Le GT PR a recommandé d'utiliser une relation stock-recrutement ajustée à l'ensemble de la série chronologique disponible pour la BSR et le R (depuis 1959) afin de déterminer le R prévalent dans le contexte du plan de rétablissement et du PRL défini pour le stock. Des préoccupations ont été soulevées au sujet de l'ajustement du modèle sigBH aux données d'entrée sur le stock et le recrutement des trois dernières décennies, et aux niveaux de la BSR juste sous le PRL. De plus, il a été noté que les futures trajectoires du R du stock étaient accompagnées d'une grande incertitude. Toutefois, si les conditions prévalentes avaient été définies en ne tenant pas compte de l'historique complet des séries du stock et du recrutement, cette approche aurait pu donner à croire qu'un changement irréversible de la productivité était survenu au sein de ce stock, changement qui n'était pas étayé par les analyses publiées (Perälä et coll., 2022), et était incompatible avec la définition actuelle du PRL pour ce stock.

Le GT PR a recommandé que la mortalité naturelle (M) prévalente soit définie comme la M terminale de la dernière évaluation (2021), car il s'agit du niveau le plus représentatif du taux actuel de mortalité naturelle pour le stock.

En application des directives pour l'élaboration de plans de rétablissement conformément aux Dispositions relatives aux stocks de poissons, un échancier estimatif de rétablissement a été calculé à partir de $F = 0$ selon les conditions prévalentes (figure 4). Dans les conditions prévalentes pour la M et le R recommandées par le GT PR, la cible de rétablissement (valeur supérieure au PRL avec une probabilité de 75 %) serait atteinte en 2036, donc $T_{\min} = 14$ ans. Pour être conforme aux directives sur l'élaboration de plans de rétablissement, la cible de rétablissement doit donc se situer entre 14 ans et un maximum de 28 à 42 ans. L'objectif actuel défini de la cible de rétablissement était d'atteindre un niveau de BSR supérieur au PRL avec une probabilité de 75 % d'ici 25 ans.

Le temps nécessaire pour atteindre cette cible de rétablissement selon chaque combinaison de procédure de gestion (PG) x R x M est indiqué à l'annexe D.

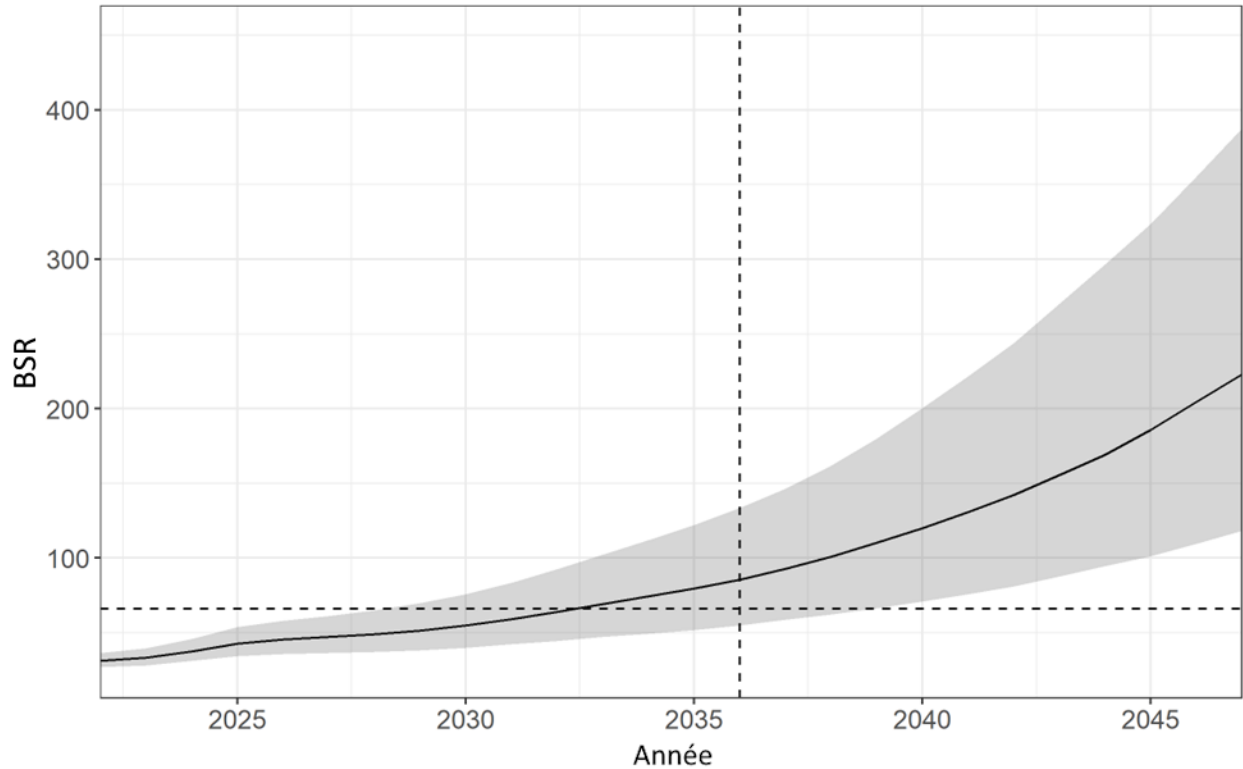


Figure 4 : Prévision de la biomasse du stock reproducteur (BSR, en kt) sans pêche ($F = 0$) selon les conditions prévalentes de M et de R . La ligne pointillée horizontale indique le PRL à 66 kt, tandis que la ligne pointillée verticale montre l'année où le stock se rétablit à un niveau supérieur au PRL avec une probabilité de 75 % (2036).

DESCRIPTION DU MODÈLE OPÉRATIONNEL HYBRID : PROJECTIONS

Configuration de la première année du modèle

Dix mille fils d'exécution de projections du modèle en boucle fermée ont été simulés dans l'ESG allégée. La première année des projections était 2021, et elle reposait sur les estimations de l'abondance (tableau AB 2) de l'année terminale (2021; tableaux AB 2–3) du modèle d'évaluation Hybrid.

$$\log N_{a,1} = \log N_{a,2021} + \eta_{a,1}; \quad \eta_{a,1} \sim N(0, \sigma_p) \quad \text{Éq. 12}$$

où σ_p était l'écart-type de l'erreur de processus. Pour la première année (2021), les valeurs de mortalité par la pêche (F) et de M ont été tirées des valeurs de l'année terminale du modèle d'évaluation.

Dynamique de la population

À partir de la deuxième année, les abondances pour l'âge 3 et plus ont été calculées à l'aide des équations normalisées de la cohorte :

$$\log N_{a,y} = \log N_{a-1,y-1} - F_{a-1,y-1} - M_{a-1,y-1} + \eta_{a,y}; \quad 3 \leq a < A - 1; \quad \eta_{3:A-1,y} \sim N(0, \sigma_p) \quad \text{Éq. 13}$$

$$\log N_{A,y} = \log \left(\frac{N_{A,y-1} * \exp(-F_{A,y-1} - M_{A,y-1}) +}{N_{A-1,y-1} * \exp(-F_{A-1,y-1} - M_{A-1,y-1})} \right) + \eta_{A,y}; A = 14 + \quad \text{Éq. 14}$$

La BSR a été calculée comme la somme des produits de l'abondance, du poids selon l'âge du stock et de la maturité selon l'âge.

$$BSR_y = \sum_{2:A} N_{a,y}, Sw_a, mat_a \quad \text{Éq. 15}$$

Mortalité par la pêche

En plus de l'erreur de processus et de l'erreur dans le R, l'erreur de sélectivité et de M a également été simulée. La sélectivité dans les projections était fondée sur la F moyenne pour 2019 – 21 tirée de l'évaluation; afin de simuler l'erreur de sélectivité dans les projections, un échantillon MVN [normal multivarié] a été tiré de la marche aléatoire MVN de la F (éq. 15).

$$Fsel_{a,y} = \exp(\log(F_{a,2019:2021}) + e_{2:A,y}); e_{2:A,y} \sim MVN_{2:A}(0, \Sigma) \quad \text{Éq. 16}$$

La sélectivité a été calculée comme la mise à l'échelle de la mortalité par la pêche moyenne $Fsel_{a,y}$ par la $Fsel_{a,y}$ maximale (éq. 16, figure AB 7) :

$$sel_{a,y} = \frac{Fsel_{a,y}}{\max_a(Fsel_{a,y})} \quad \text{Éq. 17}$$

Le poids des prises selon l'âge était la moyenne du poids des prises des trois dernières années (obtenue à partir de l'échantillonnage commercial).

Pour 2021, les valeurs de la F étaient disponibles dans l'évaluation. Pour 2022, la F correspondant aux prélèvements indiqués (1 346 t) a été calculée à l'aide d'une approximation de Newton (« solveF »; voir l'annexe E), qui utilisait des renseignements sur la sélectivité, les nombres selon l'âge, la M selon l'âge et les poids des prises. Cette méthode d'approximation est en fait l'inverse de l'équation des prises de Baranov; à partir de données d'entrée sur les prises totales, elle fournit une valeur de F.

À partir de 2023, les trajectoires de la biomasse, de la F et des rendements ont été déterminées par la PG appliquée. Plusieurs PG étaient disponibles dans l'ESG allégée; elles pouvaient être fondées sur les prises ou sur la F. Les PG fondées sur la mortalité par la pêche ont défini une valeur de F qui a été appliquée au stock (éq. 18). Cette valeur a été désignée comme F_{bar} . Dans une simulation donnée et pour une année donnée, la F_{bar} a été calculée selon la fonction de la PG et la BSR au début de l'année. Dans le cas d'une PG fondée sur les prises, les prélèvements totaux (PT) pour une simulation et une année données ont été calculés selon la fonction de la PG et la BSR au début de l'année (éq. 19). La F_{bar} correspondante aux PT a été calculée à l'aide d'une fonction solveF (annexe E); il s'agit de la valeur de la F moyenne qui donnerait les PT selon ces conditions. La F selon l'âge a été calculée comme le produit de la F_{bar} et de la sélectivité.

$$\text{PG fondée sur la F : } F_{bar_y} = f(PG, BSR_y) \quad \text{Éq. 18}$$

$$\text{PG fondée sur les prises : } PT_y = f(PG, BSR_y); F_{bar_y} = solveF(PT_y) \quad \text{Éq. 19}$$

$$F_{a,y} = F_{bar,y} * sel_{a,y} \quad \text{Éq. 20}$$

En ce qui a trait à la première année pour laquelle des prélèvements étaient précisés, le nombre de prises selon l'âge a été calculé en fonction de la F selon l'âge :

$$C_{a,y} = N_{a,y} (1 - \exp(-Z_{a,y}))^{F_{a,y}} / Z_{a,y} \quad \text{Éq. 21}$$

Le rendement a été calculé comme la somme sur les âges des prises en poids selon l'âge.

$$Y_y = \sum_{a=2}^A C_{a,y} * Cw_a \quad \text{Éq. 22}$$

$$moyF_y = \frac{\sum_{a=5}^8 F_{a,y} * N_{a,y}}{\sum_{a=5}^8 N_{a,y}} \quad \text{Éq. 23}$$

Les PG ont été appliquées au stock chaque année de la projection, et la population a réagi aux niveaux de la F nouvellement mis en œuvre. Cela a entraîné une augmentation, un maintien ou une diminution de la population l'année suivante. Cette rétroaction entre les niveaux de population et la PG s'est poursuivie jusqu'à la fin de la simulation. À la fin de la simulation, toute l'information provenant de la biomasse, du rendement, de F_{bar} et de la moyenne de la F pondérée en fonction de la population ($moyF$; éq. 23) a été regroupée à des fins d'évaluation du rendement des PG. La F pondérée en fonction de la population était la F selon l'âge, pondérée par les nombres selon l'âge pour les âges 5 à 8.

OBJECTIFS DU PLAN DE RÉTABLISSEMENT ET MESURES DE RENDEMENT

Les objectifs du plan de rétablissement ont été conçus par le GT PR; ils comprenaient un jalon qui suit la trajectoire de la population au cours des cinq prochaines années, un objectif à court terme (15 ans) et la cible de rétablissement (25 ans). Les mesures de rendement (MR) ont été élaborées en fonction des objectifs du GT PR (tableau 1). Elles ont tenu compte à la fois de la trajectoire et de l'état du stock, ainsi que du rendement de la pêche et de la variation des prélèvements.

Un objectif à long terme a été envisagé par le GT PR (augmenter la BSR à 35 % au-dessus du PRL [B_{lim}] d'ici 35 ans [durée de 3,5 générations], avec une probabilité de 75 %). Cependant, il y avait beaucoup d'incertitude dans les projections à long terme, surtout en ce qui concerne l'inclusion de différentes conditions futures de la M et du R, et nous n'avons pas été capables de mesurer de façon fiable le rendement par rapport à cet objectif. Le GT PR a convenu de retirer cet objectif du processus d'élaboration du plan de rétablissement, mais il a été noté que ce serait quelque chose à considérer dans un futur processus du Plan de gestion intégrée des pêches (PGIP) lorsque le stock sera au-dessus du PRL.

Tableau 1 : Résumé des objectifs du plan de rétablissement, des statistiques de rendement et des mesures. « Prop » est la proportion et « méd » est la médiane.

–	Objectif du plan de rétablissement	Statistique de rendement	Mesure
Jalon	Parvenir à une trajectoire de croissance positive du stock avec une probabilité de 75 % sur une période de cinq ans	$BSR_{2027} > BSR_{2022}$	Prop $\geq 0,75$
Objectif à court terme	Augmenter la BSR à une valeur supérieure à 75 % du PRL d'ici 15 ans, avec une probabilité de 75 %	$BSR_{2037} > 0,75PRL$	Prop $\geq 0,75$
Cible de rétablissement	Augmenter la BSR à une valeur supérieure au PRL d'ici 25 ans (durée de 2,5 générations) avec une probabilité de 75 %	$BSR_{2047} > PRL$	Prop $\geq 0,75$
Mesures du rendement fondées sur les prises	Accroître le rendement au maximum à court terme	Prises moyennes : 2023 – 27	Méd(IC à 80 %)
	Accroître le rendement au maximum à long terme	Prises moyennes : 2023 – 47	Méd(IC à 80 %)
	Maintenir la variation interannuelle des prélèvements totaux admissibles sous un seuil établi	Variation annuelle moyenne : 2023 – 2047	Prop $\leq 0,20$

MESURES DE RENDEMENT FONDÉES SUR LA BIOMASSE

Jalon

La première mesure de rendement (MR) visait à assurer que les PG conduisent à une trajectoire positive du stock à court terme. Elle a été calculée comme la proportion de simulations dans lesquelles la BSR de 2027 était supérieure à la BSR de 2022. Elle était considérée comme satisfaisante si la proportion était supérieure ou égale à 0,75.

$$BSR_{2027} > BSR_{2022}; \text{ Prop } \geq 0,75 \quad \text{Éq. 24}$$

Objectif à court terme

La deuxième MR visait à assurer que les PG permettaient au stock d'atteindre des niveaux de BSR supérieurs à 75 % du PRL d'ici 15 ans. Elle a été calculée comme la proportion de simulations dans lesquelles la BSR de 2037 était supérieure à $0,75 * PRL$. Elle était considérée comme satisfaisante si la proportion était supérieure ou égale à 0,75.

$$BSR_{2037} > 0,75 PRL; \text{ Prop } \geq 0,75 \quad \text{Éq. 25}$$

Cible de rétablissement

La troisième MR devait assurer que les PG permettaient au stock d'atteindre des niveaux de BSR supérieurs au PRL d'ici 25 ans. Elle a été calculée comme la proportion de simulations dans lesquelles la BSR de 2047 était supérieure à la BSR de 2022. Elle était considérée comme satisfaisante si la proportion était supérieure ou égale à 0,75.

$$BSR_{2047} > PRL; \text{ Prop} \geq 0,75 \quad \text{Éq. 26}$$

Mesures de rendement fondées sur les prises

Accroître le rendement au maximum à court terme

Cette mesure a été calculée comme le rendement moyen au cours des cinq premières années d'application de la PG.

$$C_{court} = \bar{Y}_{2023:2027} \quad \text{Éq. 27}$$

Accroître le rendement au maximum à long terme

Cette mesure a été calculée comme le rendement moyen au cours des 25 premières années d'application de la PG.

$$C_{long} = \bar{Y}_{2023:2047} \quad \text{Éq. 28}$$

Variabilité annuelle moyenne du rendement

Cette MR correspond à un indice de la variabilité des recommandations de prises au cours de la simulation de la PG sur 25 ans (Forrest et coll., 2018).

$$VAM = \frac{\sum_{2023}^{2047} |Y_y - Y_{y-1}|}{\sum_{2023}^{2047} Y_y} \quad \text{Éq. 29}$$

PROCÉDURES DE GESTION

Plusieurs PG fondées sur les prises et la F ont été étudiées dans le modèle de simulation de l'ESG allégée en suivant les principes fondamentaux de l'approche de précaution (MPO, 2006). Les PG présentées ici sont de type « fondées sur la F », et ont été appliquées au stock simulé qui a défini la F (F_{bar} est utilisée de façon interchangeable avec la F dans cette section) pour chaque année de la simulation. Elles ont été retenues par le GT PR et constituent un sous-ensemble des PG présentées lors de réunions précédentes du GT PR. Un scénario sans pêche (défini ici comme prises = 0,001 pour toutes les années) était exigé pour la simulation aux fins du plan de rétablissement et a été utilisé pour appuyer la prise de décisions sur les échéanciers de rétablissement. Quatre structures de PG et le scénario sans pêche ont été mis en œuvre (figure 5). Des définitions détaillées de ces PG sont fournies ci-dessous.

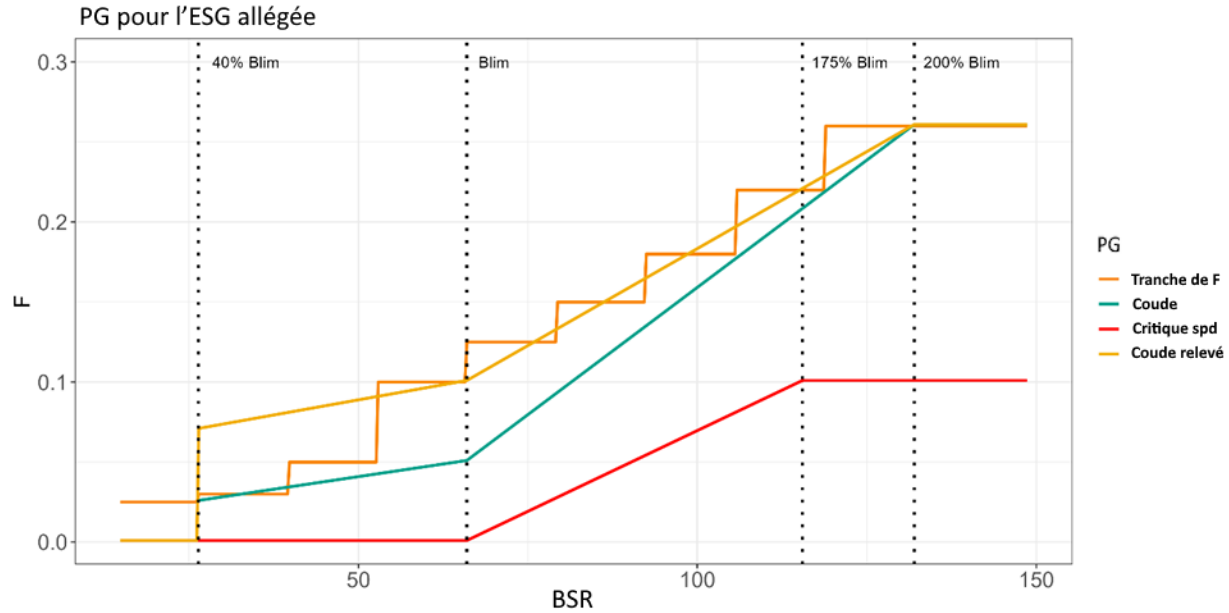


Figure 5 : Tendances de la F par rapport à la BSR pour chaque PG proposée. Les lignes pointillées verticales indiquent les valeurs de la BSR à partir desquelles des changements dans les tendances de la F se produisent selon les PG « critique sans pêche dirigée (spd) », « coude » et « coude relevé ».

Pour toutes les PG de la simulation, les prélèvements totaux ont été fixés à un minimum de 100 t pour tenir compte des prélèvements non dus à la pêche dirigée, notamment les prises accessoires et les prises des relevés. Si une F obtenue conduisait à moins que le minimum prédéfini de 100 t, les prélèvements pour cette année-là étaient plutôt fixés à 100 t, et la F, à la valeur requise pour atteindre ce chiffre. Cette méthode n'a pas été appliquée au scénario sans pêche. Dans les équations ci-dessous, l'application de la méthode est indiquée par le terme $F|_{C=100t}$, qui se lit comme la F évaluée à des niveaux de prises de 100 t.

CRITIQUE SANS PÊCHE DIRIGÉE

Il n'y a pas de pêche dirigée lorsque le stock est inférieur à B_{lim} .

Au-dessus de B_{lim} , la F augmente de façon linéaire jusqu'à un niveau supérieur associé à une BSR plus élevée,

$$F_y(BSR_y) = \begin{cases} F|_{C=100t}, & BSR_y < B_{lim} \\ \text{lin}(BSR_y), & B_{lim} \leq BSR_y \leq 1,75 * B_{lim} \\ F_{sup}, & BSR_y > 1,75 * B_{lim} \end{cases} \quad \text{Éq. 30}$$

Dans la zone critique, où la $BSR < B_{lim}$, la F est fixée au niveau minimal des prélèvements.

Au-dessus de B_{lim} , mais en dessous de $1,75 * B_{lim}$, la F est définie par une fonction linéaire, allant de $F = 0$ à $BSR = B_{lim}$ jusqu'à $F = F_{sup} = 0,1$ à $1,75 * B_{lim}$,

$$\text{lin}(BSR_y) = \frac{0,1}{0,75} \left(\frac{BSR_y}{B_{lim}} - 1 \right) \quad \text{Éq. 31}$$

où $B_{lim} = PRL = 66$ kt. À un niveau égal ou supérieur à $1,75 * B_{lim}$, la F est fixée à $F_{sup} = 0,1$.

COUDE

La mortalité par la pêche augmente de façon linéaire entre $0,4 * B_{lim}$ et B_{lim} . Au-dessus de B_{lim} la F augmente à un rythme plus rapide, et atteint le seuil de F supérieur à $2 * B_{lim}$,

$$F_y(BSR_y) = \begin{cases} F|_{C=100t}, & BSR_y \leq 0,4 * B_{lim} \\ \text{lin}_1(BSR_y), & 0,4 * B_{lim} < BSR_y \leq B_{lim} \\ \text{lin}_2(BSR_y), & B_{lim} < BSR_y \leq 2 * B_{lim} \\ 0,26, & BSR_y > 2 * B_{lim} \end{cases} \quad \text{Éq. 32}$$

Lorsque la BSR est inférieure à 40 % de B_{lim} , les prises = 100 t.

Si $0,4 * B_{lim} \leq BSR < B_{lim}$, des taux de F faible sont autorisés et augmentent de manière linéaire avec la BSR, allant de $F = 0,025$ à $BSR = 0,4 * B_{lim}$ jusqu'à $F = 0,05$ à $BSR = B_{lim}$,

$$\text{lin}_1(BSR_y) = \frac{0,025}{0,6 * B_{lim}} BSR_y + \left(0,05 - \frac{0,025}{0,6}\right) \quad \text{Éq. 33}$$

où $B_{lim} = PRL = 66$ kt. À partir de B_{lim} , la F augmente de façon linéaire avec la BSR jusqu'à ce que la BSR atteigne $2 * B_{lim}$, allant de $F = 0,05$ à $BSR = B_{lim}$ jusqu'à $F = 0,26$ à $BSR = 2 * B_{lim}$,

$$\text{lin}_2(BSR_y) = \frac{0,21}{B_{lim}} BSR_y - 0,16 \quad \text{Éq. 34}$$

Lorsque la $BSR \geq 2 * B_{lim} = 132$ kt, la F est fixée à 0,26.

COUDE RELEVÉ

Cette structure est identique à celle du « coude », mais les valeurs de F entre $0,4 * B_{lim}$ et B_{lim} sont augmentées. La mortalité par la pêche à $0,4 * B_{lim}$ est fixée à 0,07, ce qui permet aux prélèvements de 2023 d'être près du statu quo.

$$F_y(BSR_y) = \begin{cases} F|_{C=100t}, & BSR_y \leq 0,4 * B_{lim} \\ \text{lin}_1(BSR_y), & 0,4 * B_{lim} < BSR_y \leq B_{lim} \\ \text{lin}_2(BSR_y), & B_{lim} < BSR_y \leq 2 * B_{lim} \\ 0,26, & BSR_y > 2 * B_{lim} \end{cases} \quad \text{Éq. 35}$$

Lorsque la $BSR < 0,4 * B_{lim}$, les prises = 100 t. Si $0,4 * B_{lim} \leq BSR < B_{lim}$, les taux de la F suivent une augmentation linéaire avec la BSR, allant de $F = 0,07$ à $0,4 * B_{lim}$ jusqu'à $F = 0,1$ à B_{lim} ,

$$\text{lin}_1(BSR_y) = \frac{0,03}{0,6 * B_{lim}} BSR_y + 0,05 \quad \text{Éq. 36}$$

où $B_{lim} = PRL = 66$ kt. À partir de B_{lim} , la F augmente de façon linéaire avec la BSR jusqu'à ce que la BSR atteigne $2 * B_{lim}$, allant de $F = 0,1$ à B_{lim} jusqu'à $F = 0,26$ à $2 * B_{lim}$,

$$\text{lin}_2(BSR_y) = \frac{0,16}{B_{lim}} BSR_y - 0,06 \quad \text{Éq. 37}$$

Lorsque la $BSR \geq 2 * B_{lim} = 132$ kt, la F est fixée à 0,26.

TRANCHE DE F

La mortalité par la pêche change selon une liste prédéfinie de valeurs de BSR (tableau 2). Lorsque la BSR relative (BSR/B_{lim}) se trouve dans une certaine plage de valeurs, la F est fixée à la valeur associée à cette plage.

Tableau 2 : Liste (tranche) des valeurs de la F et des valeurs de la BSR relative utilisées pour la PG « tranche de F ».

BSR/B_{lim}	F
< 0,4	0,025
0,4 à 0,6	0,03
0,6 à 0,8	0,03
0,8 à 1,0	0,05
1,0 à 1,2	0,1
1,2 à 1,4	0,125
1,4 à 1,6	0,15
1,6 à 1,8	0,18
1,8 à 2	0,22
> 2	0,26

RÉSULTATS DE LA SIMULATION

Les projections ont été réalisées jusqu'en 2047 pour chaque combinaison de R et de M, et chaque PG. Elles ont été effectuées pour 10 000 fils d'exécution (chacun représentant une simulation), et les résultats sont résumés dans le présent document. Les valeurs du stock (p. ex. BSR, F pondérée en fonction de la population [nombre selon l'âge pour les âges 5 à 8]) et les MR ont été calculées à la fin de chaque ensemble de simulation et stockées. À la fin d'un ensemble de simulations, les MR de l'ESG allégée ont été calculées; celles-ci ont été décrites comme des seuils de probabilité (p. ex. quantiles) des MR.

Compte tenu de l'incertitude considérable des projections à long terme, le seul résultat de simulation présenté ici est pour 25 ans (2023 – 47), ce qui coïncide avec l'échéancier de rétablissement prévu dans les objectifs. Toutes les projections à long terme sont associées à une incertitude considérable, et nous mettons le lecteur en garde contre une interprétation excessive des estimations médianes.

Selon les résultats, toutes les PG devraient atteindre l'objectif du jalon (BSR de 2027 supérieure aux niveaux de 2022), peu importe les hypothèses formulées au sujet du R et de la M. Cependant, les trajectoires du stock variaient grandement entre les scénarios du modèle opérationnel, et la capacité du stock d'atteindre les objectifs restants dépendait largement de nos hypothèses au sujet du R et de la M, ainsi que de notre choix de PG.

À long terme, le R de sigBH a permis à la projection du stock d'atteindre ou de dépasser les sommets historiques observés pour ce stock au début de la série chronologique (1959 – 60) lorsque la M était égale ou inférieure aux niveaux actuels. En revanche, le stock s'est stabilisé après 2030 – 35 selon le scénario à faible R modélisé d'après les estimations récentes du R (moyenne de 2019 – 21). De plus, lorsque le faible R a été jumelé à une M élevée, le stock n'a pas pu atteindre le PRL.

Dans l'objectif de montrer l'éventail des résultats, les projections de la biomasse du stock reproducteur sont présentées ici par rapport à la série chronologique historique pour les conditions du R le plus faible x M la plus élevée (R = moy3ans, M = élevée), les conditions prévalentes définies par le GT (R = sigBH, M = terminale) et les conditions du R le plus élevé x

M la plus faible (R = sigBH, M = faible) (figure 6). Des figures semblables montrant les projections de la BSR selon d'autres combinaisons de M et de R sont présentées à l'annexe C.

Les projections de la BSR, de la F, de la F pondérée en fonction de la population et du rendement estimé sont présentées pour l'ensemble des PG dans les figures 7 à 10, accompagnées des intervalles de confiance (IC) à 80 % de toutes les estimations.

La PG « coude relevé » a été la seule PG mise à l'essai qui a permis que les prélèvements totaux de la pêche atteignent les niveaux actuels ou s'en rapprochent; dans tous les autres cas, la F et le rendement à court terme (cinq ans) ont diminué par rapport aux niveaux de 2022.

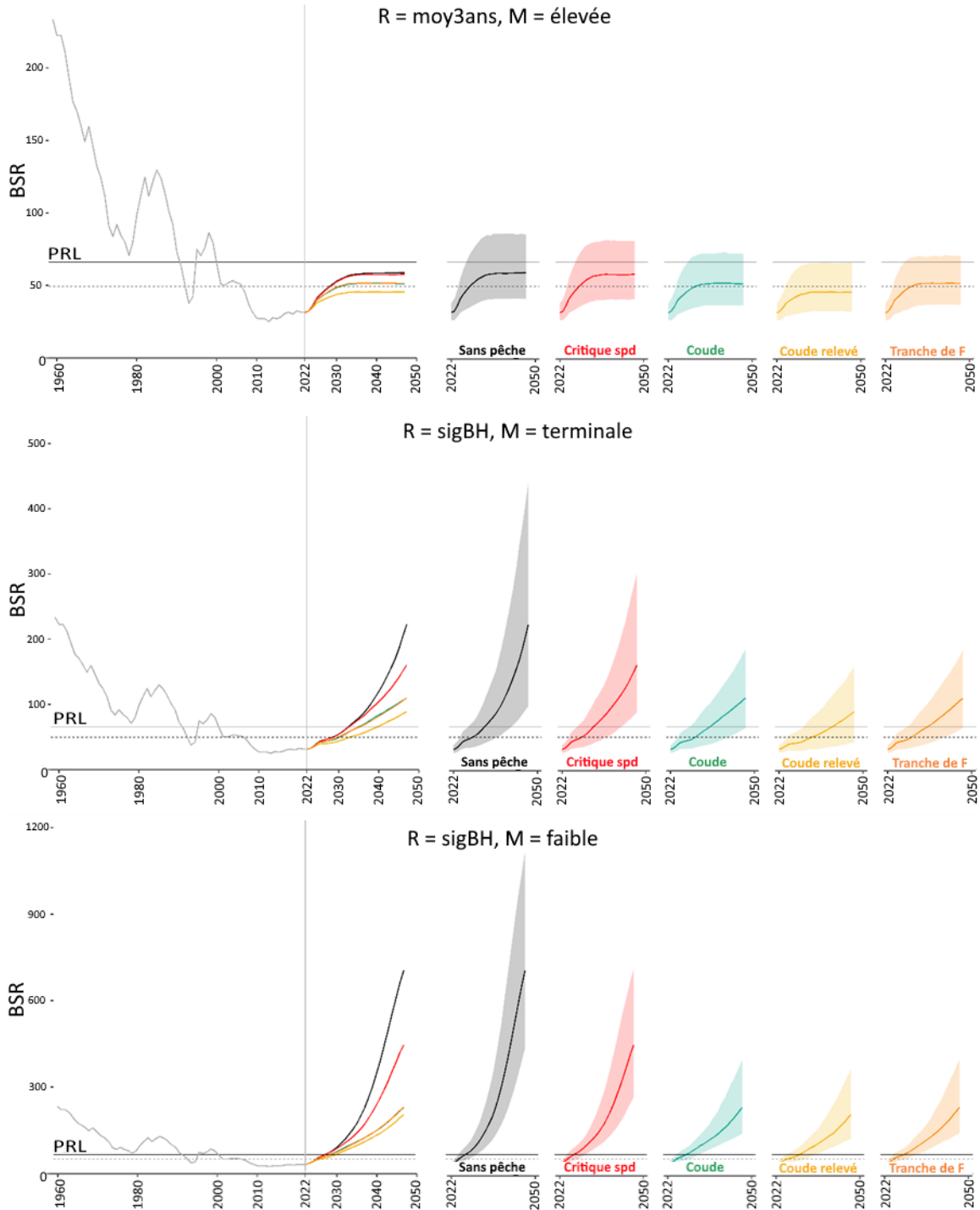


Figure 6 : Projections de la taille du stock (BSR) par rapport aux estimations historiques de la taille du stock (1959 – 2022). Les graphiques de gauche montrent les estimations médianes pour 1959 – 2022, tandis qu'à droite, on montre les projections selon chaque PG accompagnées de leur IC à 80 %. Une ligne horizontale pleine se trouve au niveau où la $BSR = B_{lim}$; la ligne horizontale pointillée se trouve au niveau où la $BSR = 0.75B_{lim}$. Les graphiques montrent trois combinaisons différentes du recrutement (R; moy3ans – moyenne de 2019 – 21; sigBH – relation de Beverton-Holt sigmoïdale) et de la mortalité naturelle (M; élevée – moyenne de 2015 – 21, valeur terminale de 2021, faible – moyenne de 1996 – 2005).

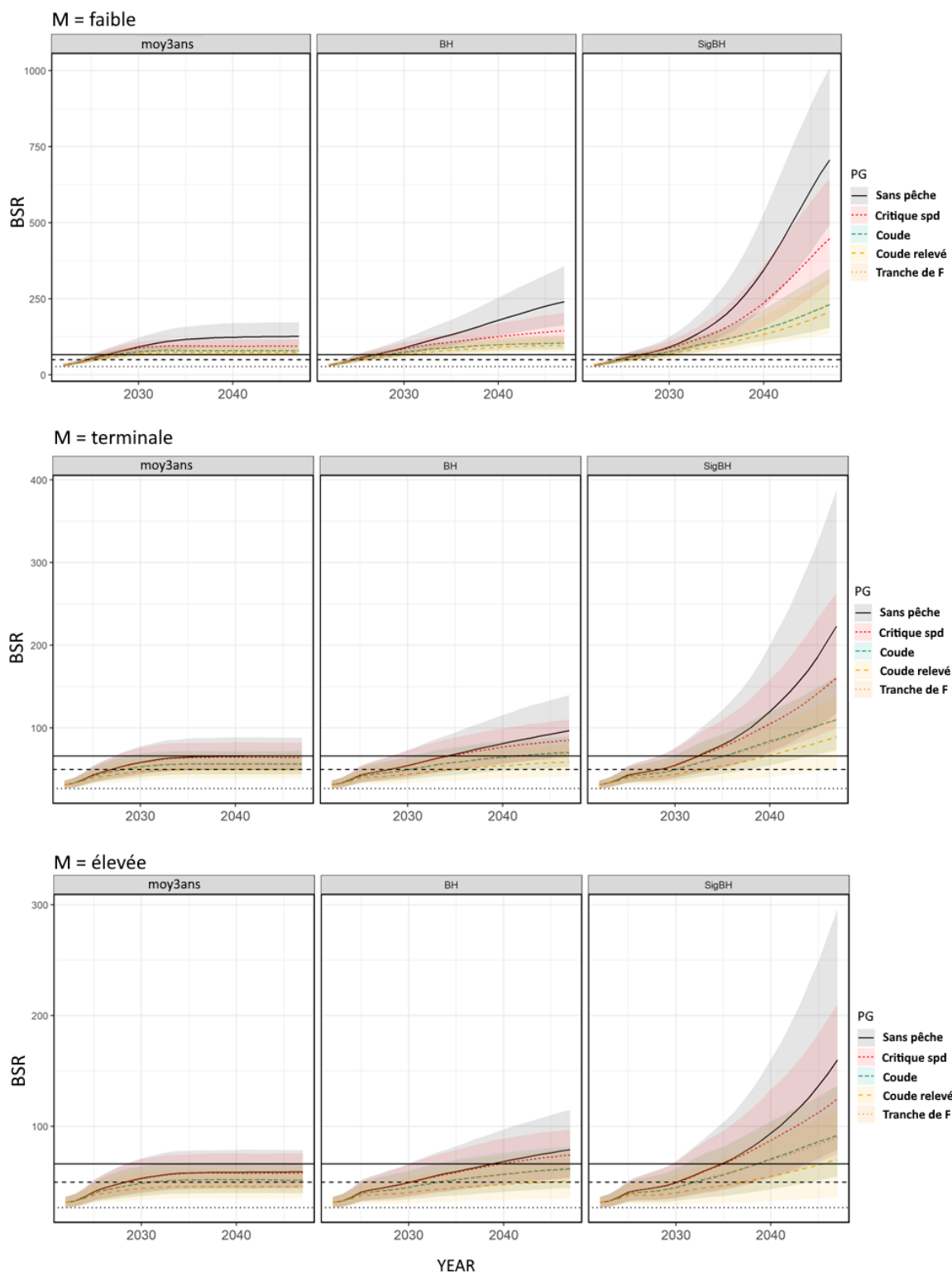


Figure 7 : Projections de la taille du stock (BSR) pour chacune des PG possibles, accompagnées des IC à 80 % connexes, selon les conditions du R (moy3ans – moyenne de 2019 – 21, BH, sigBH) et de la M (faible, terminale, élevée) pour le modèle opérationnel d'évaluation Hybrid. La ligne horizontale pleine se trouve au niveau où la $BSR = B_{lim}$, et la ligne horizontale pointillée se trouve au niveau où la $BSR = 0,75B_{lim}$,

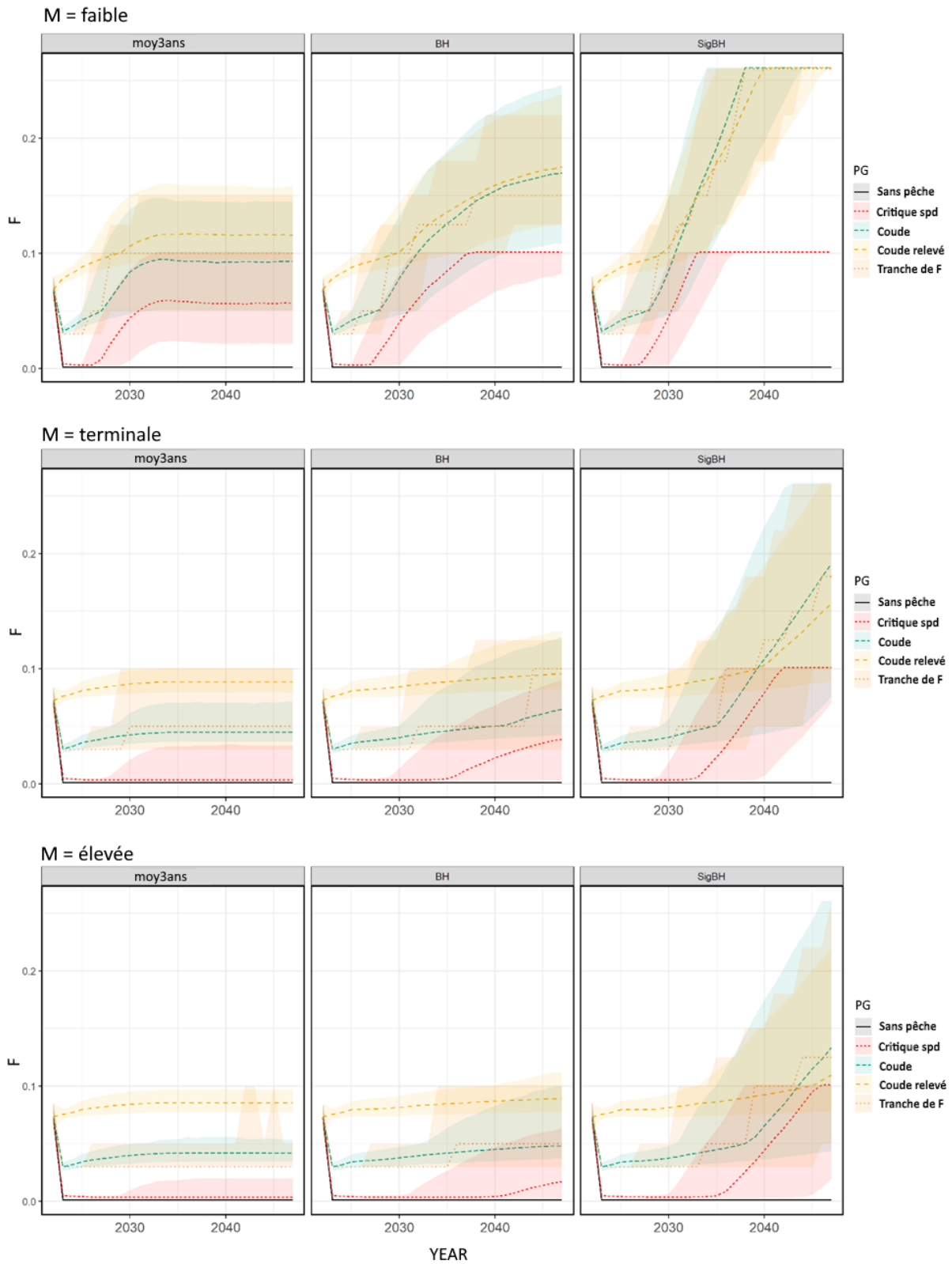


Figure 8 : Projections de F_{bar} pour chacune des PG possibles, accompagnées des IC à 80 % connexes, selon les conditions du R (moy3ans – moyenne de 2019 – 21, BH, sigBH) et de la M (faible, terminale, élevée) pour le modèle opérationnel d'évaluation Hybrid.

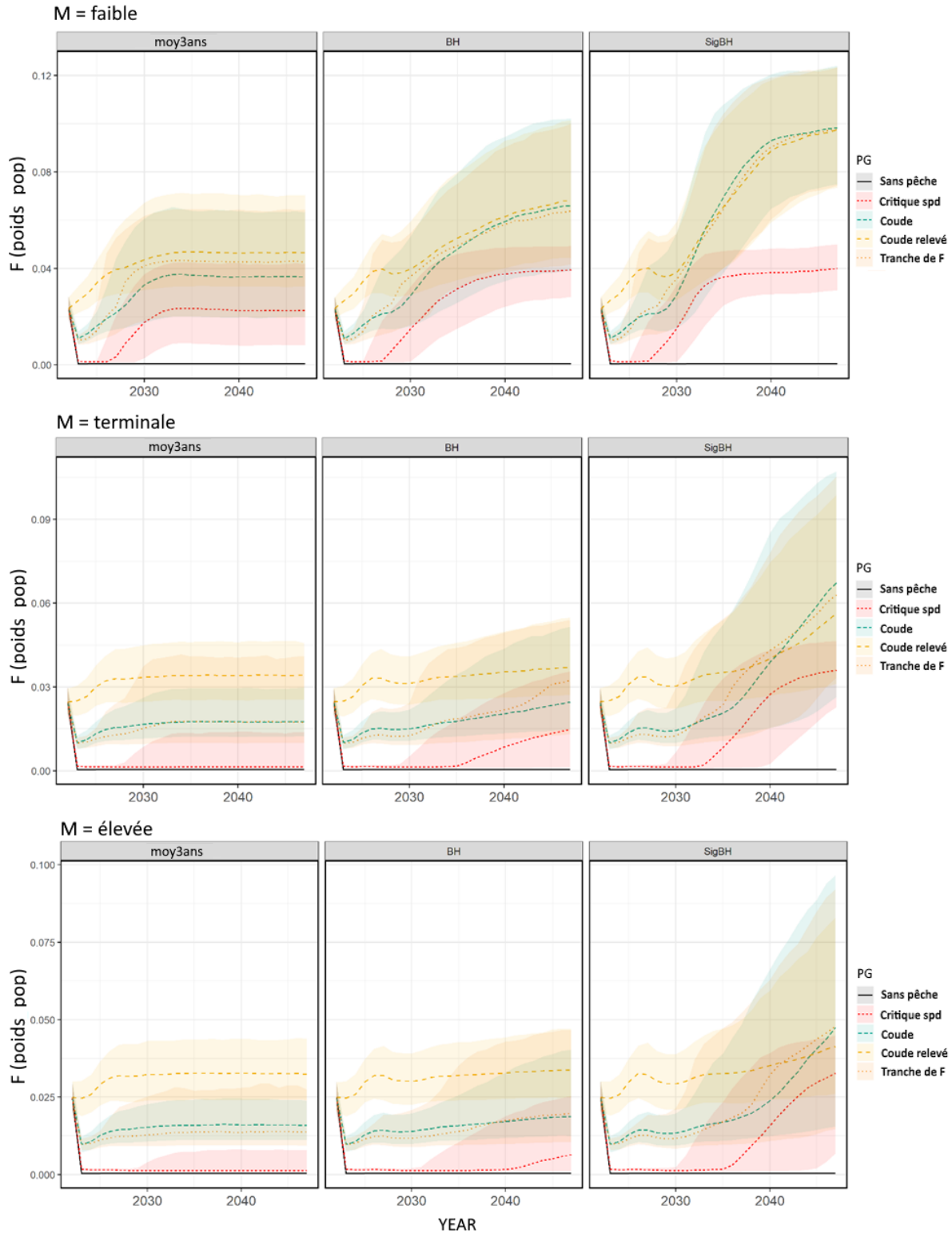


Figure 9 : Projections de la F pondérée en fonction de la population pour chacune des PG possibles, accompagnées des IC à 80 % connexes, selon les conditions du R (moy3ans – moyenne de 2019 – 21, BH, sigBH) et de la M (faible, terminale, élevée) pour le modèle opérationnel d'évaluation Hybrid. La F pondérée en fonction de la population est la moyenne pondérée de la F selon l'âge, pondérée par les nombres selon l'âge pour les mêmes âges.

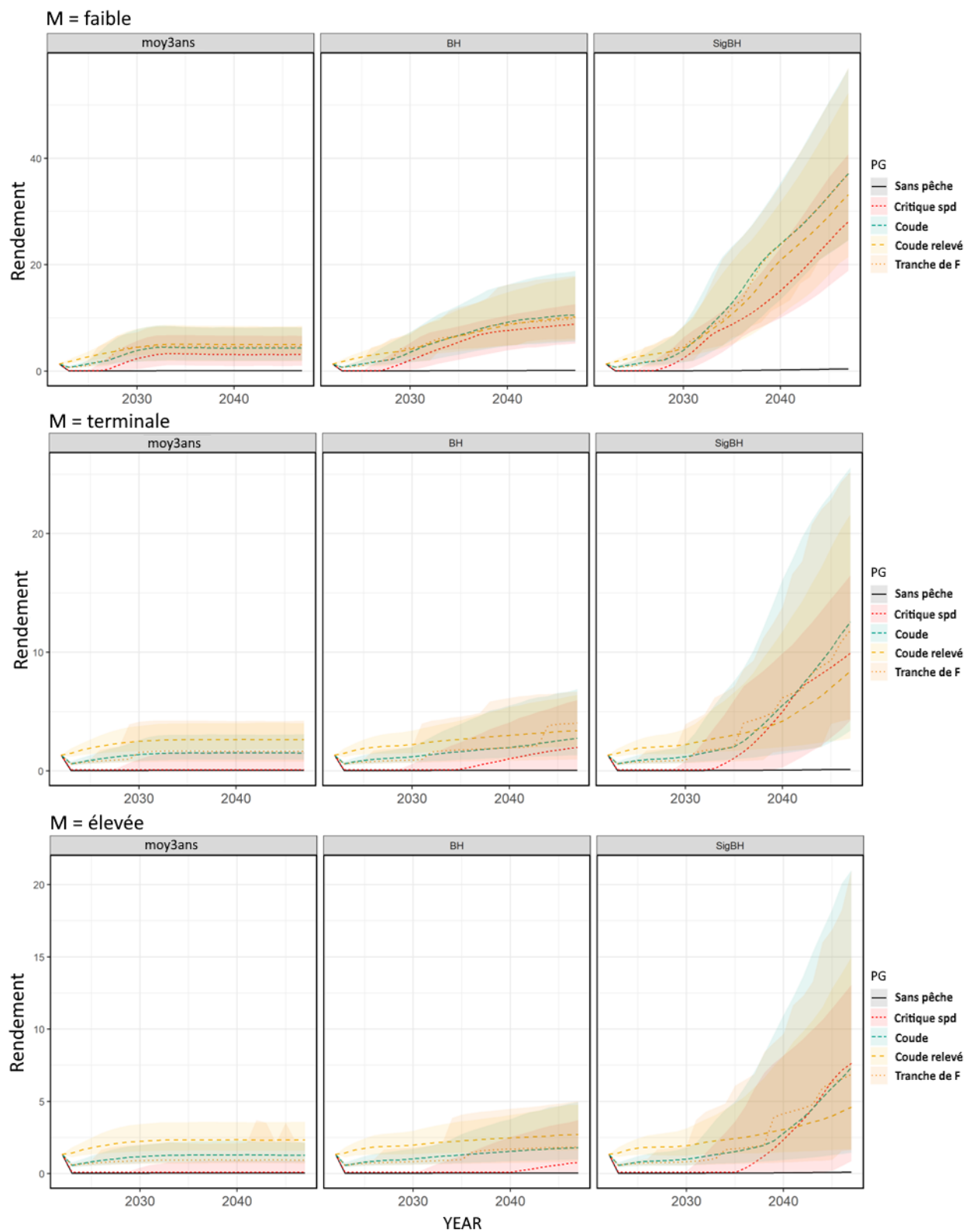


Figure 10 : Projections du rendement pour chacune des PG possibles, accompagnées des IC à 80 % connexes, selon les conditions du R (moy3ans – moyenne de 2019 – 21, BH, sigBH) et de la M (faible, terminale, élevée) pour le modèle opérationnel d'évaluation Hybrid.

MESURES DE RENDEMENT

Le rendement des PG a été évalué en fonction de l'atteinte de trois mesures fondées sur la biomasse (croissance sur 5 ans, 75 % du PRL dans 15 ans, supérieure au PRL dans 25 ans; voir les figures 11 à 14) et de trois mesures fondées sur les prises (rendement à court et à long terme, variation annuelle moyenne des prises [VAM]; voir les figures 15 à 17). Pour chaque PG, la mesure est montrée pour tous les scénarios de R et de M afin de donner une idée de la robustesse de la PG par rapport aux futures conditions de productivité possibles. Le scénario « sans pêche » est inclus, dans l'objectif de fournir un contexte quant à la capacité du stock d'atteindre ces objectifs en l'absence de tout prélèvement par la pêche.

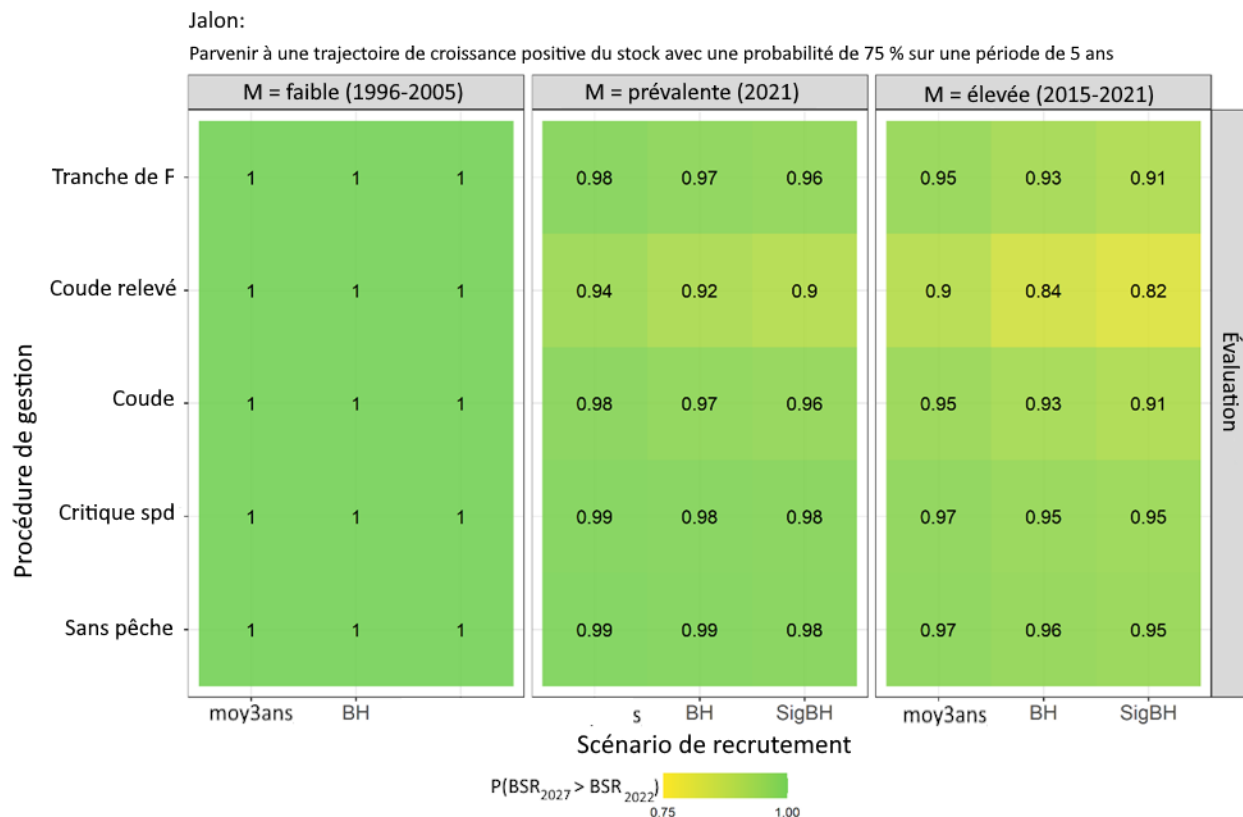


Figure 11 : Résumé du rendement des PG par rapport au jalon de rétablissement. Chaque cellule affiche la probabilité que la $BSR_{2027} > BSR_{2022}$ pour une combinaison de $M \times R \times PG$. Cet objectif est considéré comme atteint si $P > 0,75$.

Dans toutes les fiches de résultats des MR présentées ici, la cellule ($M \times R \times PG$) est grise si l'objectif n'a pas été atteint. Les nombres inscrits dans les cellules indiquent la probabilité d'atteindre l'objectif, dans le cas des mesures fondées sur la biomasse, ou l'estimation médiane de la VAM, dans le cas des mesures fondées sur les prises (figure 17).

Pour toutes les PG et dans tous les scénarios de M et de R mis à l'essai, l'objectif du jalon consistant en une croissance du stock d'ici cinq ans ($BSR_{2027} > BSR_{2022}$) a été atteint avec une probabilité d'au moins 82 %. Aucune ampleur d'augmentation du stock n'avait été quantifiée pour cet objectif.

L'objectif à court terme et la cible de rétablissement exigeaient respectivement une augmentation de la BSR à une valeur supérieure à $0,75 * PRL$ avec une probabilité de 75 % en

2037 et une augmentation de la BSR à une valeur supérieure au PRL avec une probabilité de 75 % en 2047.



Figure 12 : Résumé du rendement des PG par rapport à l'objectif à court terme. Chaque cellule affiche la probabilité que la $BSR_{2037} > 0,75PRL$ pour une combinaison de $M \times R \times PG$. Cet objectif est considéré comme atteint si $P > 0,75$. Les cellules grises indiquent que l'objectif n'a pas été atteint.

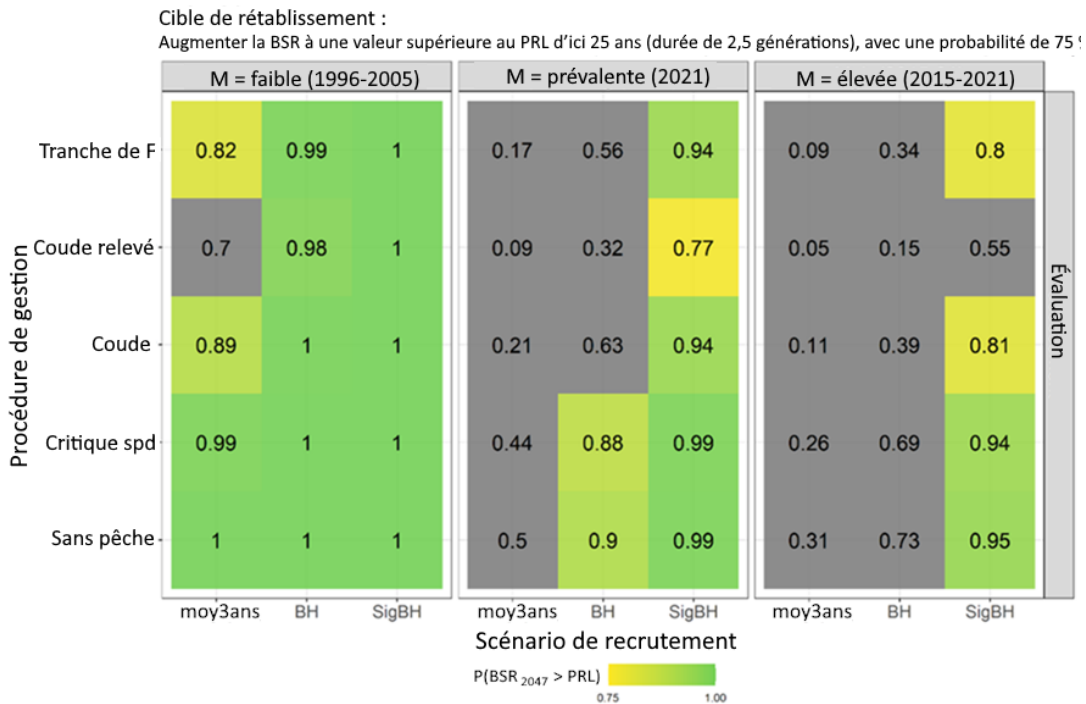


Figure 13 : Résumé du rendement des PG par rapport à la cible de rétablissement. Chaque cellule affiche la probabilité que la $BSR_{2047} > PRL$ pour une combinaison de $M \times R \times PG$. Cet objectif est considéré comme atteint si $P > 0,75$. Les cellules grises indiquent que l'objectif n'a pas été atteint.

L'objectif à court terme a été atteint dans tous les scénarios de M et de R en l'absence de pêche. Cependant, même à $F = 0$, il n'a pas été possible d'atteindre la cible de rétablissement du stock si le R était maintenu au niveau faible des trois dernières années, à moins d'abaisser la M au niveau des creux historiques, ou si la M était élevée et que le R ne suivait pas la relation stock-recrutement de sigBH. La PG « critique spd » avait des prélèvements minimaux inférieurs au PRL et a donc montré un rendement semblable à celui du scénario de référence sans pêche pour l'objectif à court terme et la cible de rétablissement.

Les résultats obtenus quant à l'objectif à court terme et à la cible de rétablissement se ressemblaient pour les PG « coude » et « tranche de F ». Pour ces PG, les scénarios de tous les R combinés à une M faible ont atteint tous les objectifs, mais il a fallu un R de BH ou de sigBH à la M prévalente. Aucune des PG mises à l'essai qui permettaient plus que des prélèvements de pêche minimaux dans la zone critique n'a conduit à l'atteinte de l'objectif à court terme lorsqu'on appliquait le scénario de M élevée, quel que soit le scénario de R appliqué.

La PG « coude relevé » n'a pas permis d'atteindre l'objectif à court terme ni la cible de rétablissement lorsque la M était élevée, et a permis d'atteindre la cible de rétablissement seulement dans le scénario de la M prévalente combinée au R de sigBH. Même en cas de M faible, la cible de rétablissement n'a pas été atteinte pour cette PG si l'on maintenait le R aux faibles niveaux de 2019 – 21.

Pour faciliter l'examen du rendement combiné de chaque PG, une note de 1 (objectif atteint) ou de 0 (objectif non atteint) a été attribuée à chaque scénario de M et de R, et les notes attribuées pour les trois objectifs fondés sur la BSR ont été additionnées afin de donner à chaque PG une note sur 3 pour chaque scénario de productivité. Toutes les PG et les scénarios de R ont permis d'atteindre les trois objectifs lorsque la M était faible, à l'exception de la PG « coude relevé » avec un R faible. Les PG « coude » et « tranche de F » ont reçu les mêmes notes globales, et les deux ont permis d'atteindre moins d'objectifs dans les scénarios de M prévalente et élevée que la PG « critique spd ».



Figure 14 : Résumé du rendement des PG pour les MR 1 à 3. Chaque cellule affiche le nombre de MR jugées satisfaisantes (probabilité de 0,75); le chiffre 0 (rouge) signifie qu'aucune MR n'est satisfaisante, et le chiffre 3 (vert) signifie que toutes les MR étaient satisfaisantes pour une combinaison donnée de $M \times R \times PG$.

Les MR fondées sur les prises sont présentées comme la médiane + IC à 80 % des prises à court et à long terme dans chaque scénario de M et de R pour chaque PG, ainsi que comme fiche des résultats pour la VAM.

Dans tous les scénarios de la PG « critique spd », les prises à court terme étaient égales au niveau minimal des prises (défini comme 100 t dans les simulations) ou près de celui-ci, car le stock est demeuré en deçà du PRL pendant la période, sauf dans certaines simulations où la M était faible. En général, les prises à court terme prévues étaient les plus élevées pour la PG « coude relevé ». Les niveaux de prises à court terme pour les PG « coude » et « tranche de F » se ressemblaient (figure 15).

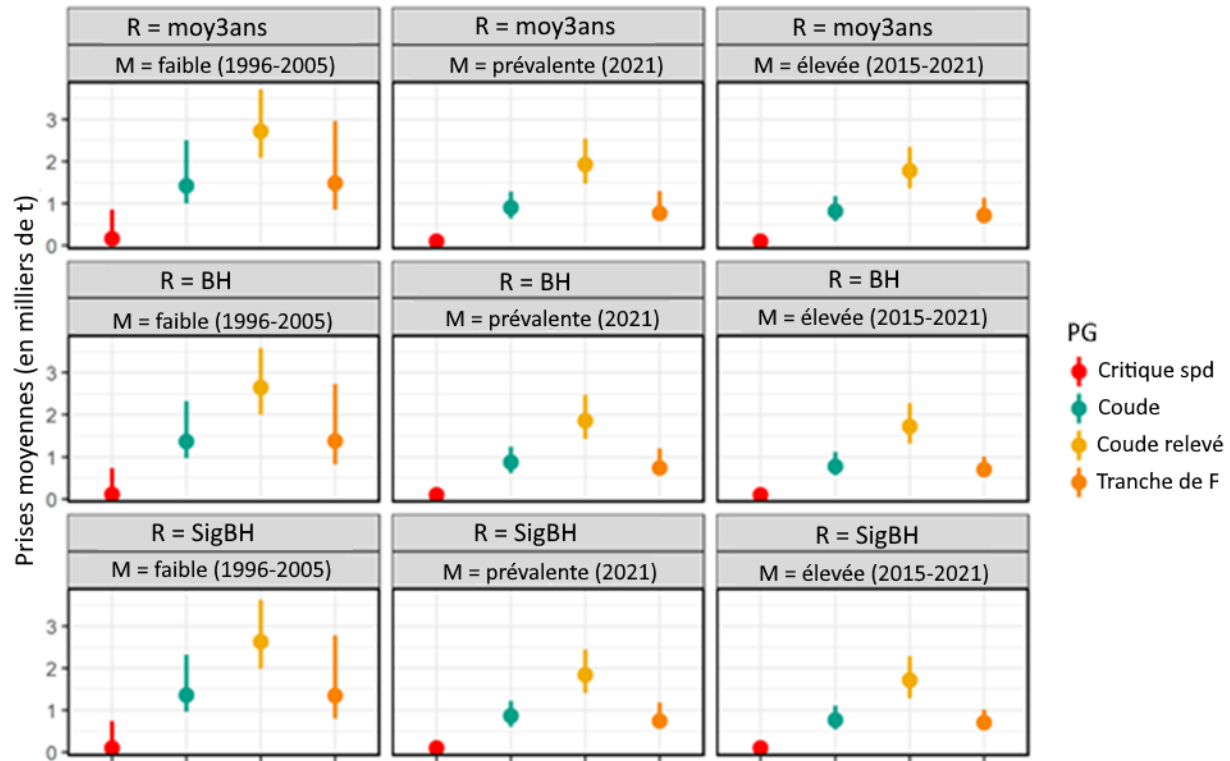


Figure 15 : Résumé des résultats des PG pour la MR 4, prises moyennes à court terme (2023 – 27) selon trois scénarios de R (moy3ans – moyenne de 2019 – 21, BH, sigBH) et de M (faible, prévalente, élevée). Le point indique l'estimation médiane et la ligne montre l'IC à 80 %.

La quantité de prises à long terme (moyenne sur 25 ans) et les différences entre les PG dépendaient en grande partie du scénario de la mortalité et du R (figure 16). Les résultats prévoient que les prises seraient les plus faibles dans le scénario de faible R et de M élevée, et qu'elles augmenteraient avec une diminution de la M et une augmentation du R, ce qui reflète la différence des trajectoires du stock associée à ces scénarios de M et de R. On observe un chevauchement des IC à 80 % calculés pour plusieurs PG, sauf la PG « critique spd », pour les combinaisons des scénarios de M au R de sigBH. On constate aussi un degré élevé de chevauchement pour les scénarios du R de BH, bien que l'estimation médiane la plus faible soit toujours celle établie pour la PG « critique spd ».

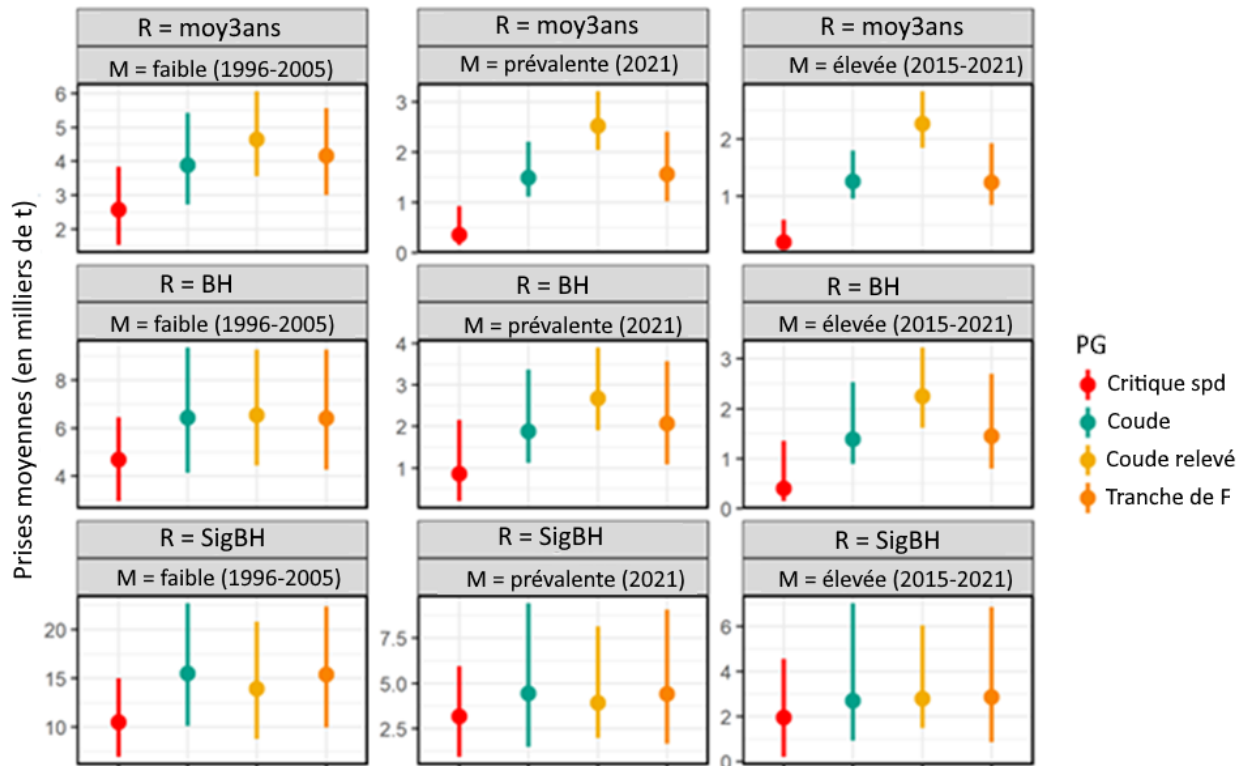


Figure 16 : Résumé des résultats des PG pour la MR 5, prises moyennes à long terme (2023 – 47) selon trois scénarios de R (moy3ans – moyenne de 2019 – 21, BH, sigBH) et de M (faible, prévalente, élevée). Le point indique l'estimation médiane et la ligne montre l'IC à 80 %.

Une VAM faible indique des variations globales moindres des prélèvements totaux d'une année à l'autre et, en général, des variations faibles dans les recommandations de prises annuelles (figure 17). On s'attendait à ce que les PG qui comportaient des points de rupture, c'est-à-dire un changement important des recommandations de prises par suite d'un petit changement de la BSR (p. ex. chaque changement de tranche dans la PG « tranche de F », au niveau du PRL dans la PG « critique spd »), soient associés à une variation moyenne supérieure due à ces changements soudains. La PG « coude relevé » a été la seule PG à respecter le seuil d'une VAM < 0,2 dans tous les scénarios.

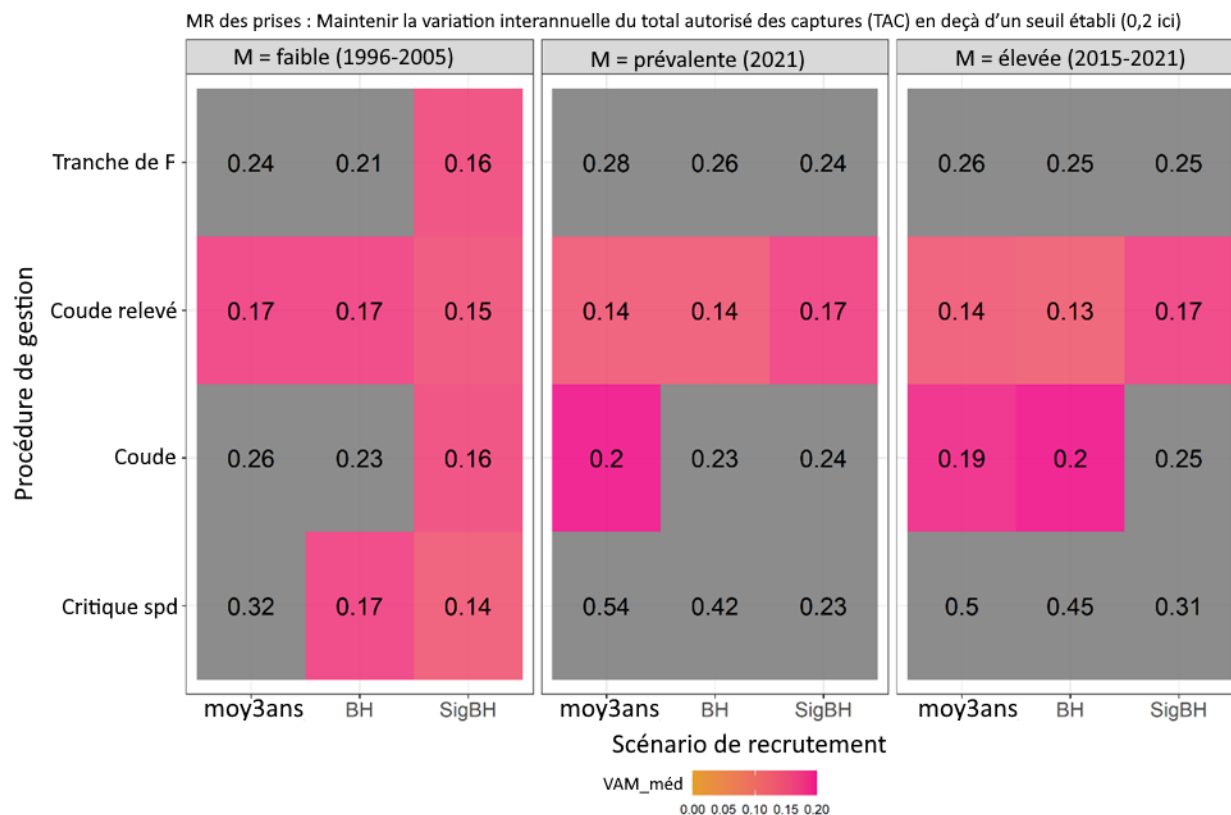


Figure 17 : Résumé des résultats des PG pour la MR 6, variation annuelle moyenne (VAM) des prises. Chaque cellule affiche la VAM. Les cellules grises indiquent une variabilité supérieure à 0,2.

SOURCES D'INCERTITUDE

Il y avait beaucoup d'incertitude associée aux projections à long terme du stock. Elle était due, dans une large mesure, à l'incertitude entourant les conditions futures de l'écosystème et la productivité du stock – y compris la M et le R –, pour lesquels nous avons mis à l'essai divers scénarios. Nous n'avons pas pris en compte les autres changements susceptibles de survenir au sein du stock, y compris, notamment, les changements liés à la croissance, à la répartition, aux déplacements et au mélange. Il convient de noter que les scénarios de R et de M correspondaient tous à des conditions que le stock a déjà connues. Dans un climat océanique changeant, il est possible que ces conditions ne reflètent pas précisément les conditions futures.

Depuis 1990 dans la sous-division 3Ps, les températures près du fond présentent une tendance générale de réchauffement, 2021 étant l'année la plus chaude jamais enregistrée (données disponibles de 1982 – 84 et depuis 1993; Cyr et coll., 2022). On prévoit que les eaux de la

sous-division 3Ps continueront de se réchauffer et que les températures moyennes à la surface de la mer de 2046 – 65 seront de 2 à 4 degrés plus élevées que celles observées entre 1986 – 2005 (voir la figure 7.8 de Bush et Lemmen, 2019). Historiquement, la morue franche était l'espèce dominante parmi les poissons prédateurs de cette unité écosystémique, mais sa prédominance a été considérablement réduite depuis 2010 en raison de l'augmentation des espèces d'eau chaude, comme le merlu argenté (*Merluccius bilinearis*) (Koen-Alonso et Cuff, 2018; OPANO, 2021). Des changements ont également été observés en ce qui concerne les niveaux d'éléments nutritifs, le phytoplancton (y compris le moment et la durée de l'efflorescence) et le zooplancton (y compris l'abondance et la composition des espèces) dans tout l'Atlantique Nord-Ouest, y compris dans la sous-division 3Ps (Bélangier et coll., 2021). La répartition, l'abondance et la saisonnalité des prédateurs, des proies et des concurrents peuvent toutes avoir une incidence sur la croissance, la survie et l'état de la morue. L'interaction entre ces facteurs et d'autres facteurs dans l'environnement en évolution de la sous-division 3Ps n'est pas bien comprise.

MORTALITÉ NATURELLE

Les tendances constantes au réchauffement, ainsi que l'augmentation plus récente de la prédominance des poissons d'eau chaude, indiquent que l'écosystème de la sous-division 3Ps continue de subir des changements structuraux. Dans ce contexte, les effets ascendants contribuent au mauvais état des poissons et à la mortalité naturelle élevée de la morue de ce stock (MPO, 2022). L'estimation terminale de la M pour la morue de la sous-division 3Ps (et la condition de M prévalente établie dans ce processus d'élaboration de plan de rétablissement) est de 0,34 (2021, âges 5 à 8). Cette valeur est bien en deçà des niveaux de M indiqués pour un stock de morue adjacent, soit 0,39 pour la morue du Nord d'âge 5 et plus (divisions 2J3KL; MPO, 2019a), et pour les stocks de morue du sud qui vivent dans des environnements plus chauds, soit 1,57 dans les divisions 4X5Y (Scotia-Fundy, âge 5 et plus; MPO, 2019b), 0,81 à 0,85 dans les divisions 4TVn (sud du golfe, âge 5 et plus; MPO, 2019c) et 0,7 dans les divisions 3Pn4RS (nord du golfe; MPO, 2019d). Cependant, nous n'avons pas été en mesure de prévoir quantitativement les niveaux futurs de M pour la morue de la sous-division 3Ps, et les liens avec les changements de température et des communautés n'ont pas été bien compris. On peut raisonnablement supposer que la M future pourrait dépasser les niveaux actuels et historiques, auquel cas les scénarios examinés dans le cadre de l'ESG allégée seraient des sous-estimations de la mortalité, car ils surestimeraient la croissance et la taille future du stock et sous-estimeraient l'incidence relative de la F.

Les analyses préliminaires examinées lors de l'évaluation de 2021 de la morue de la sous-division 3Ps donnaient à penser qu'il existait une corrélation entre, d'une part, l'augmentation de la température au fond dans la sous-division 3Ps et l'évolution de l'abondance des proies, et d'autre part, des niveaux récents plus élevés de M dans ce stock. Il a été recommandé que les travaux se poursuivent pour étudier ces liens afin de mieux comprendre et quantifier les scénarios de mortalité futurs probables pour ce stock.

Une très faible proportion de la population de phoque gris (*Halichoerus grypus*) au Canada atlantique utilise la sous-division 3Ps. Des données satellites de marquage (Hammill et coll., 2017) ont indiqué que les phoques gris qui s'étaient rendus dans cette région y étaient surtout présents pendant les mois d'été. Des phoques communs (*Phoca vitulina*) se trouvent dans la sous-division 3Ps tout au long de l'année. Un relevé aérien des phoques communs a été effectué le long de la côte de Terre-Neuve au cours de l'été 2021, et une analyse des données était en cours au moment de l'évaluation. Les données disponibles sur le régime alimentaire recueillies sur la côte sud de Terre-Neuve (en particulier dans la baie Placentia et la péninsule de Burin) et à Miquelon, en France, indiquent que la morue franche était rarement

présente dans le régime alimentaire des phoques gris ou communs dans la sous-division 3Ps (Stenson et Hamilton, données inédites). Cependant, des changements futurs dans la répartition du phoque et l'utilisation de la sous-division 3Ps pourraient modifier l'incidence relative des phoques sur ce stock de morue.

RECRUTEMENT

Le succès du recrutement était variable dans toute la série chronologique disponible, et la prévision du R futur est très incertaine. Une relation stock-recrutement ajustée à l'ensemble de la série chronologique disponible sur la BSN et le R (depuis 1959) a été utilisée afin de déterminer le R prévalent dans le contexte du plan de rétablissement et du PRL défini pour le stock. Une relation stock-recrutement de sigBH (Perälä et coll., 2022) a été modélisée à cette fin. Des préoccupations ont été soulevées au sujet de l'ajustement de ce modèle aux données d'entrée sur le stock et le recrutement des trois dernières décennies, et aux niveaux de BSR tout juste en deçà du PRL. Toutefois, ce modèle était bien ajusté aux niveaux historiques élevés du R au-dessus du PRL, et nous n'avons aucun élément de preuve d'un changement irréversible de la productivité de ce stock. Cependant, les projections selon le modèle sigBH seraient beaucoup trop optimistes si la productivité future du stock n'atteint pas les niveaux passés. De plus, des éléments de preuve montraient des effets d'Allee démographiques chez la morue de la sous-division 3Ps (Perälä et coll., 2022), lesquels seraient exacerbés si les taux de M augmentaient et limitaient davantage la croissance du stock reproducteur.

AUTRES FACTEURS

Les poissons appartenant à la classe d'âge 2011 qui étaient âgés de 11 ans en 2022 sont demeurés dominants dans la population. La taille de cette classe d'âge n'était pas exceptionnelle, mais elle constituait la majeure partie de la population, car peu de jeunes poissons sont nés chaque année depuis. Cette composition s'est reflétée dans les prises de pêche, qui étaient principalement composées de cette classe d'âge au cours des quatre dernières années. Cette classe d'âge comptait pour 45 % des prises commerciales en 2020 et, lors de l'évaluation de 2021, représentait environ 29 % de la BSR₂₀₂₁ (MPO, 2022). Dans nos simulations, la F a été appliquée également en fonction de la sélectivité actuelle (moyenne de 2019 – 21, voir la figure AG 7), avec une F égale pour les âges 9 et plus. Le rendement des projections des PG évaluées ici pourrait changer si la forme de la F selon l'âge change à mesure que la dominance de cette classe d'âge diminue au sein du stock et de la pêche. Comparativement à une ESG complète qui tente de tenir compte de la majeure partie de l'incertitude de relevé, l'ESG allégée suppose une rétroaction parfaite à la PG (c.-à-d. que la PG reçoit des renseignements parfaits sur l'état du stock). Par conséquent, les incertitudes associées à la collecte de données réelles ne sont pas prises en compte ici.

CONCLUSIONS

Le cadre de l'ESG allégée a utilisé des simulations en boucle fermée pour évaluer les projections de la trajectoire du stock pour différents scénarios de R et de M, ainsi que l'application d'une variété de PG. Lors du processus d'examen par les pairs du SCAS, ce cadre a été jugé scientifiquement fiable et approprié pour l'évaluation du potentiel de rétablissement de la morue franche dans la sous-division 3Ps, à l'appui de la création d'un plan de rétablissement pour ce stock. Cependant, les scénarios de R et de M mis à l'essai dans l'ESG allégée ne reflétaient que les conditions passées du stock. Dans un contexte de climat océanique changeant, ces conditions peuvent ne pas refléter avec précision les conditions futures. Néanmoins, les participants à la réunion ont conclu que les conditions prévalentes

actuelles du R et de la M étaient appropriées pour calculer le temps minimum requis pour rétablir le stock jusqu'à la cible proposée en l'absence de pêche.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Tommi Perälä pour son aide à l'application du modèle sigBH du R du stock dans les simulations.

RÉFÉRENCES CITÉES

- Bélangier, D., Pepin, P. et Maillet, G. 2021. Biogeochemical oceanographic conditions in the Northwest Atlantic (NAFO subareas 2-3-4) during 2020. Numéro de série N7177. NAFO SCR Doc. 21/010.
- Bush, E. et D.S. Lemmen (dir.). 2019. Rapport sur le climat changeant du Canada. Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario. 446 p.
- Cadigan, N.G. 2016. [A state-space stock assessment model for northern cod, including under-reported catches and variable natural mortality rates](#). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 73, n° 2, p. 296-308.
- Champagnat, J., Vigneau, J., Varkey, D.A., Regular, P., Ings, D.W., Babyn, J., et Morgan, J. 2024. [Élaboration d'un modèle à espace d'état pour l'évaluation du stock de morue \(*Gadus morhua*\) dans la sous-division 3Ps de l'OPANO](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2024/015. iv + 106 p.
- Cyr, F., Snook, S., Bishop, C., Galbraith, P.S., Chen, N., et Han, G. 2022. [Conditions océanographiques physiques sur le plateau continental de Terre-Neuve-et-Labrador en 2021](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2022/040. iv + 51 p.
- Drake, J.M., et Kramer, A.M. 2011. Allee Effects. *Nature Education Knowledge*, vol. 3, n° 10, p. 2.
- Forrest, R.E., Holt, K.R., et Kronlund, A.R. 2018. [Performance of alternative harvest control rules for two Pacific groundfish stocks with uncertain natural mortality: Bias, robustness and trade-offs](#). *Fish. Res.*, vol. 206, p. 259-286.
- Hammill, M.O., den Heyer, C.E., Bowen, W.D., et Lang, S.L.C. 2017. [Tendances de la population de phoques gris dans les eaux canadiennes de 1960 à 2016 et avis sur la récolte](#) [en anglais, sauf le résumé]. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2017/052. v + 30 p.
- Hilborn, R. et Liermann, M. 1998. [Standing on the shoulders of giants: learning from experience in fisheries](#). *Rev. Fish Biol. Fish.*, vol. 8, n° 3, p. 273-283.
- Ings, D.W., Rideout, R.M., Wheeland, L., Healey, B.P., Morgan, M.J., Regular, P., et Vigneau, J. 2019a. [Évaluation de l'état du stock de morue \(*Gadus morhua*\) de la sous-division 3Ps de l'OPANO en 2017](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2019/024. iv + 86 p.
- Ings, D.W., Rideout, R.M., Rogers, R., Healey, B.P., Morgan, M.J., Robertson, G.J. et Vigneau, J. 2019b. [Évaluation de l'état du stock de morue \(*Gadus morhua*\) de la sous-division 3Ps de l'OPANO en 2018](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2019/069. iv + 79 p.
- Koen-Alonso, M., et 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. Numéro de série N7023. NAFO SCR Doc. 18/070.

-
- Kramer, A.M., Dennis, B., Liebhold, A.M., et Drake, J.M. 2009. [The evidence for Allee effects](#). *Popul. Ecol.*, vol. 51, p. 341-354.
- Kumar, R., Martell, S.M., Pitcher, T.J., et Varkey, D.A. 2013. [Temperature-driven decline of a cisco population in Mille Lacs Lake, Minnesota](#). *North Am. J. Fish. Manage.*, vol. 33, p. 669-681.
- Kurota, H., McAllister, M.K., Parkinson, E.A., et Johnston, N.T. 2016. [Evaluating the influence of predator-prey interactions on stock assessment and management reference points for a large lake ecosystem](#). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 73, n° 9, p. 1372-1388.
- MPO. 2006. [Stratégie de pêche en conformité avec l'approche de précaution](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Avis sci. 2006/023.
- MPO. 2019a. [Évaluation du stock de morue du nord \(Divisions 2J3KL de l'OPANO\) en 2019](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Avis sci. 2019/050.
- MPO. 2019b. [Évaluation du stock de morue franche \(*Gadus morhua*\) dans les divisions 4X5Y de l'OPANO](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Avis sci. 2019/015.
- MPO. 2019c. [Évaluation de la morue franche \(*Gadus morhua*\) du sud du golfe du Saint-Laurent \(Div. de l'OPANO 4T-4Vn \(nov. – avril\)\) jusqu'en 2018](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Avis sci. 2019/021.
- MPO. 2019d. [Évaluation du stock de morue franche du nord du golfe du Saint-Laurent \(3Pn, 4RS\) en 2018](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Avis sci. 2019/032.
- MPO. 2022. [Évaluation du stock de morue dans la sous-division 3Ps de l'OPANO](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Avis sci. 2022/022.
- Myers, R.A., Barrowman, N.J., Hutchings, J.A. et Rosenberg, A.A. 1995. [Population dynamics of exploited fish stocks at low population levels](#). *Science*, vol. 269, n° 5227, p. 1106-1108.
- OPANO. 2021. Report of the Scientific Council Working Group on Ecosystem Science and Assessment, 16-25 novembre 2021. Dartmouth, Nouvelle-Écosse, Canada. Numéro de série N7256. NAFO SCS Doc. 21/21.
- Nielsen, A., et Berg, C.W. 2014. [Estimation of time-varying selectivity in stock assessments using state-space models](#). *Fish. Res.*, vol. 158, p. 96-101.
- Perälä, T., Hutchings, J.A., et Kuparinen, A. 2022. [Allee effects and the Allee-effect zone in northwest Atlantic Cod](#). *Biol. Lett.*, vol. 18, n° 2, 20210439.
- Punt, A.E., Butterworth, D.S., de Moor, C.L., De Oliveira, J.A.A., et Haddon, M. 2016. [Management strategy evaluation: best practices](#). *Fish Fish.*, vol. 17, n° 2, p. 303-334.
- Regular, P. 2022. Mortalité naturelle fondée sur la condition des poissons. Annexe C dans Varkey, D.A., Babyn, J., Regular, P., Ings, D.W., Kumar, R., Rogers, B., Champagnat, J., et Morgan, M.J. 2022. [Un modèle état-espace pour l'évaluation du stock de morue \(*Gadus morhua*\) dans la sous-division 3Ps de l'OPANO](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2022/022. vi + 81 p.
- 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., Stenson, G.B., Wheeland, L.J., et Zang, F. 2022. [Indexing starvation mortality to assess its role in the population regulation of Northern cod](#). *Fish. Res.*, vol. 247, 106180.
-

-
- Robertson, G. 2022. Analyse de la mortalité naturelle fondée sur le marquage. Annexe B dans Varkey, D.A., Babyn, J., Regular, P., Ings, D.W., Kumar, R., Rogers, B., Champagnat, J., et Morgan, M.J. 2022. [Un modèle état-espace pour l'évaluation du stock de morue \(*Gadus morhua*\) dans la sous-division 3Ps de l'OPANO](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2022/022. vi + 81 p.
- Varkey, D.A., Babyn, J., Regular, P., Ings, D.W., Kumar, R., Rogers, B., Champagnat, J., et Morgan, M.J. 2022. [Un modèle état-espace pour l'évaluation du stock de morue \(*Gadus morhua*\) dans la sous-division 3Ps de l'OPANO](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2022/022. vi + 81 p.
- Walters, C., et Kitchell, J.F. 2001. [Cultivation/depensation effects on juvenile survival and recruitment: implications for the theory of fishing](#). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 58, n° 1, p. 39-50.

ANNEXE A : PARAMÉTRAGE DE LA MORTALITÉ NATURELLE (M) DANS LE MODÈLE HYBRID

Lorsqu'on ne dispose pas d'information sur la mortalité naturelle, l'hypothèse de base de l'évaluation de stocks halieutiques veut que la mortalité naturelle soit invariable selon l'âge et l'année et qu'on lui attribue souvent une valeur $M = 0,2$ (Hilborn et Liermann, 1998). Pour les stocks de morue avoisinants (morue du Nord des divisions 2J3KL et du bonnet flamand, division 3M), il est estimé que la M est supérieure à 0,2 (Cadigan, 2016; les deux évaluations les plus récentes de la morue des divisions 2J3KL et 3M), et pour cette raison, on a choisi $M = 0,3$ comme niveau de base. L'analyse des données de marquage de la morue dans la sous-division 3Ps suggère également des niveaux de M supérieurs à 0,2; cependant, ces données sont limitées à la période suivant le moratoire (Robertson, 2022). Les évaluations précédentes ont également indiqué une augmentation de la mortalité totale (Ings et coll., 2019a; Ings et coll., 2019b).

Le modèle applique une $M_{a,y}$ variable dans le temps, qui consiste en l'application d'une tendance fondée sur l'état du poisson à un niveau de base de la M ($M_{base} = 0,3$).

$$M_{a,y} = M_{base} \exp(\delta_{a,y}) \quad \text{Éq. A.1}$$

Le terme $\delta_{a,y}$ est l'estimation associée à la covariable, de sorte que la valeur de M qui en résulte suit la tendance de la covariable X_y .

$$\delta_{a,y} = mpar_a * X_y \quad \text{Éq. A.2}$$

Des estimations de $mpar$ proches de zéro suggèrent une influence nulle/légère de la covariable sur M, une valeur positive de $mpar$ indique que la M suit la tendance de la covariable et une valeur négative de $mpar$ indique une tendance de M opposée à celle de la covariable. Ici, la covariable X_y est un indice normalisé de M_c , un indice de la M fondé sur l'état.

$$X_y = \frac{M_{c_y} - \mu_{M_c}}{\sigma_{M_c}} \quad \text{Éq. A.3}$$

Cette mise à l'échelle permet de traiter la covariable comme une anomalie produisant des estimations supérieures ou inférieures à la valeur de référence de M_{base} fournie, de la même manière que la mise à l'échelle de l'anomalie de la température pour la capacité de charge variable dans le temps (Kumar et coll., 2013). La moyenne (μ_{M_c}) et l'écart-type (σ_{M_c}) sont calculés pour les 35 premières années de données; la normalisation de M_c est ainsi fondée sur une période de référence allant de 1978 – 2012. Le paramètre $mpar$ a été estimé à partir de deux groupes d'âge (2 à 5 et 6+, ce qui correspond approximativement aux individus immatures et matures) pour laisser les différents groupes d'âge réagir différemment aux tendances de l'état des poissons. Dans Kurota et coll. (2016), on réalise une mise en œuvre similaire de la M variable dans le temps pour la population de saumon rouge du lac Kootenay. L'équation finale pour la M est la suivante :

$$M_{a,y} = M_{base} \exp\left(mpar_a * \left(\frac{M_{c_y} - \mu_{M_c}}{\sigma_{M_c}}\right)\right) \quad \text{Éq. A.4}$$

ANNEXE B : TABLEAUX ET FIGURES SUPPLÉMENTAIRES

TABLEAUX

Tableau AB 1 : Indice de mortalité naturelle (M) fondé sur l'état utilisé pour mettre la M à l'échelle dans le modèle Hybrid.

Année	Indice de M fondé sur l'état (M _c)
1978	0,444
1979	0,431
1980	0,422
1981	0,352
1982	0,341
1983	0,341
1984	0,277
1985	0,258
1986	0,239
1987	0,211
1988	0,228
1989	0,231
1990	0,244
1991	0,275
1992	0,291
1993	0,302
1994	0,384
1995	0,308
1996	0,230
1997	0,205
1998	0,186
1999	0,165
2000	0,200
2001	0,258
2002	0,236
2003	0,202
2004	0,171
2005	0,187
2006	0,237
2007	0,210
2008	0,273
2009	0,413
2010	0,425
2011	0,347
2012	0,429
2013	0,518
2014	0,508
2015	0,494
2016	0,611
2017	0,482
2018	0,415
2019	0,537
2020	0,476

Tableau AB 2 : Nombre de poissons selon l'âge (en millions) estimé par le modèle, de 1959 à 1990.

Année	Âge2	Âge3	Âge4	Âge5	Âge6	Âge7	Âge8	Âge9	Âge10	Âge11	Âge12	Âge13	Âge14+
1959	137,77	108,45	188,22	50,90	45,45	33,30	6,71	9,04	6,91	6,96	3,73	0,59	0,01
1960	129,41	104,73	77,87	128,90	33,84	23,55	18,56	4,40	4,97	3,61	4,23	1,90	0,37
1961	128,28	94,47	82,12	51,50	74,81	17,25	16,26	9,25	2,79	2,67	1,96	2,82	1,18
1962	136,13	93,28	72,95	59,37	31,20	39,58	10,02	7,15	4,70	1,47	1,40	1,07	2,41
1963	171,93	95,36	63,57	50,20	35,37	17,95	20,81	6,60	3,46	2,51	0,81	0,80	2,06
1964	200,64	132,10	63,82	39,27	30,53	17,97	10,46	10,28	4,63	1,80	1,52	0,45	1,62
1965	211,32	156,12	95,02	38,02	23,55	15,32	10,19	5,83	4,54	3,03	0,85	0,81	1,09
1966	204,65	154,35	114,70	61,26	20,54	15,65	6,18	5,25	3,20	1,83	2,07	0,42	0,93
1967	166,78	164,14	118,52	72,94	34,59	11,50	7,34	2,97	2,42	1,57	0,67	1,31	0,71
1968	134,02	126,28	122,40	82,10	37,01	17,06	6,19	3,89	1,54	1,27	0,76	0,26	1,66
1969	106,30	94,35	94,52	78,97	42,91	19,51	7,56	2,95	2,11	0,71	0,64	0,36	0,97
1970	113,07	71,85	65,65	62,96	45,20	22,22	9,15	3,32	1,21	0,92	0,33	0,29	0,56
1971	95,01	92,34	48,17	39,46	31,38	24,23	9,83	4,02	1,70	0,57	0,45	0,17	0,36
1972	79,95	71,32	68,13	28,47	19,95	16,54	10,86	4,16	1,77	0,83	0,28	0,21	0,24
1973	97,24	52,56	52,10	45,81	14,84	10,66	6,57	4,94	1,87	0,76	0,40	0,13	0,21
1974	101,60	77,35	32,95	34,64	22,66	7,17	4,88	2,84	2,00	0,80	0,32	0,17	0,17
1975	91,95	75,32	55,03	17,10	18,61	13,84	2,88	2,00	1,15	0,82	0,33	0,14	0,16
1976	86,01	68,57	55,46	36,12	11,62	7,75	4,52	1,21	0,82	0,50	0,35	0,15	0,15
1977	54,53	74,64	52,45	37,26	19,94	5,23	2,53	2,59	0,67	0,46	0,30	0,21	0,18
1978	37,54	40,08	66,25	34,34	17,62	7,96	2,65	1,61	1,53	0,36	0,28	0,17	0,26
1979	46,75	24,09	31,86	57,97	22,63	9,33	4,34	1,49	0,91	0,74	0,20	0,16	0,30
1980	73,75	36,05	17,97	24,81	36,75	13,58	5,23	2,30	0,92	0,60	0,38	0,13	0,34
1981	57,51	67,00	30,51	13,83	17,60	21,77	7,10	3,16	1,36	0,58	0,40	0,20	0,29
1982	102,48	41,91	57,84	22,12	8,68	11,17	15,32	3,91	1,85	0,82	0,36	0,24	0,30
1983	126,65	79,45	33,85	44,93	14,08	5,87	5,57	7,88	2,44	1,09	0,50	0,23	0,33
1984	129,96	88,73	60,38	28,02	26,91	9,11	3,56	3,43	4,12	1,47	0,65	0,30	0,38
1985	105,37	98,29	70,60	43,57	19,60	16,28	5,87	2,37	2,37	2,31	1,11	0,43	0,50
1986	120,02	68,24	74,84	49,42	34,18	12,85	9,07	3,60	1,59	1,42	1,26	0,66	0,63
1987	137,62	81,63	40,26	47,87	32,47	19,85	6,71	4,65	2,10	0,98	0,84	0,72	0,81

Année	Âge2	Âge3	Âge4	Âge5	Âge6	Âge7	Âge8	Âge9	Âge10	Âge11	Âge12	Âge13	Âge14+
1988	150,58	91,58	52,72	22,04	29,44	18,22	7,80	3,34	2,36	1,13	0,60	0,46	0,79
1989	138,26	108,08	60,86	30,88	11,22	11,85	7,57	4,16	1,73	1,24	0,54	0,33	0,61
1990	78,32	106,15	75,39	36,30	14,24	6,08	6,17	3,79	2,07	0,83	0,62	0,25	0,50

Tableau AB 3 : Nombre de poissons selon l'âge (en millions) estimé par le modèle, de 1991 à 2021.

Année	Âge2	Âge3	Âge4	Âge5	Âge6	Âge7	Âge8	Âge9	Âge10	Âge11	Âge12	Âge13	Âge14+
1991	101,20	49,01	69,95	39,71	16,29	5,49	2,68	3,15	1,76	0,89	0,39	0,30	0,37
1992	58,55	74,63	27,38	34,86	15,55	4,65	1,38	0,93	0,85	0,42	0,23	0,09	0,21
1993	29,01	46,36	50,08	13,27	13,25	4,68	1,37	0,35	0,14	0,13	0,06	0,04	0,04
1994	36,51	19,35	39,43	36,60	7,85	5,91	1,80	0,60	0,16	0,06	0,05	0,02	0,03
1995	33,30	30,74	12,85	30,12	30,87	7,28	4,59	1,30	0,28	0,12	0,03	0,03	0,03
1996	29,05	29,54	31,51	10,42	15,86	16,32	3,96	2,18	0,76	0,19	0,10	0,02	0,03
1997	26,81	21,02	22,09	26,14	7,76	8,64	8,18	2,28	1,18	0,52	0,12	0,07	0,03
1998	27,83	19,91	16,32	15,12	13,73	5,25	6,17	5,68	1,39	0,67	0,31	0,09	0,05
1999	38,10	20,69	12,92	12,56	9,77	8,35	3,27	2,80	2,93	0,71	0,32	0,14	0,07
2000	42,98	31,24	15,36	9,18	7,74	5,31	4,51	1,61	1,36	2,00	0,35	0,13	0,10
2001	32,91	35,28	25,40	10,68	6,42	4,45	2,57	1,99	0,70	0,72	0,96	0,15	0,11
2002	21,26	26,35	22,93	16,86	6,88	3,66	2,18	1,13	0,91	0,32	0,36	0,44	0,09
2003	26,96	13,13	17,68	14,49	11,25	4,33	1,81	0,95	0,55	0,43	0,14	0,17	0,24
2004	28,17	21,52	9,63	10,23	10,06	6,96	2,32	0,90	0,46	0,31	0,19	0,07	0,20
2005	27,80	22,21	15,63	7,42	6,08	6,19	3,71	1,46	0,47	0,29	0,16	0,09	0,14
2006	30,82	21,81	15,55	11,40	5,71	3,72	3,83	2,13	0,85	0,26	0,15	0,08	0,11
2007	24,40	25,62	14,78	10,55	6,86	3,59	1,92	2,09	1,17	0,47	0,14	0,08	0,10
2008	25,60	16,50	18,69	9,47	7,27	4,03	2,05	1,01	1,01	0,57	0,25	0,07	0,09
2009	20,70	20,84	11,72	12,91	6,59	3,82	1,80	0,86	0,44	0,42	0,26	0,12	0,08
2010	26,54	13,16	16,56	8,57	7,94	3,24	1,44	0,59	0,32	0,15	0,16	0,10	0,07
2011	28,47	21,52	8,51	11,94	6,20	4,17	1,47	0,63	0,22	0,12	0,06	0,06	0,07
2012	21,93	23,23	15,18	5,67	7,20	4,16	2,02	0,66	0,28	0,09	0,06	0,02	0,06
2013	23,72	14,33	17,63	11,04	4,38	4,01	2,23	0,92	0,27	0,13	0,05	0,02	0,04
2014	14,54	19,38	9,09	13,02	6,86	2,36	2,55	1,06	0,41	0,10	0,06	0,02	0,03

Année	Âge2	Âge3	Âge4	Âge5	Âge6	Âge7	Âge8	Âge9	Âge10	Âge11	Âge12	Âge13	Âge14+
2015	11,78	9,27	17,61	6,78	8,17	3,93	1,33	1,25	0,39	0,15	0,04	0,02	0,02
2016	9,40	8,34	7,16	16,55	5,83	4,97	2,16	0,72	0,56	0,13	0,07	0,02	0,02
2017	9,88	6,14	6,63	6,77	14,02	3,67	2,46	1,05	0,34	0,18	0,04	0,03	0,01
2018	14,94	6,20	5,10	4,57	5,75	9,49	2,57	1,07	0,50	0,15	0,07	0,02	0,02
2019	17,43	11,59	5,18	4,08	3,64	3,87	6,05	1,77	0,68	0,27	0,07	0,04	0,02
2020	20,78	12,24	8,39	3,97	3,56	2,61	2,34	4,35	1,07	0,38	0,14	0,04	0,03
2021	24,54	15,38	9,00	6,03	2,93	2,23	1,67	1,41	2,41	0,63	0,22	0,08	0,04

FIGURES

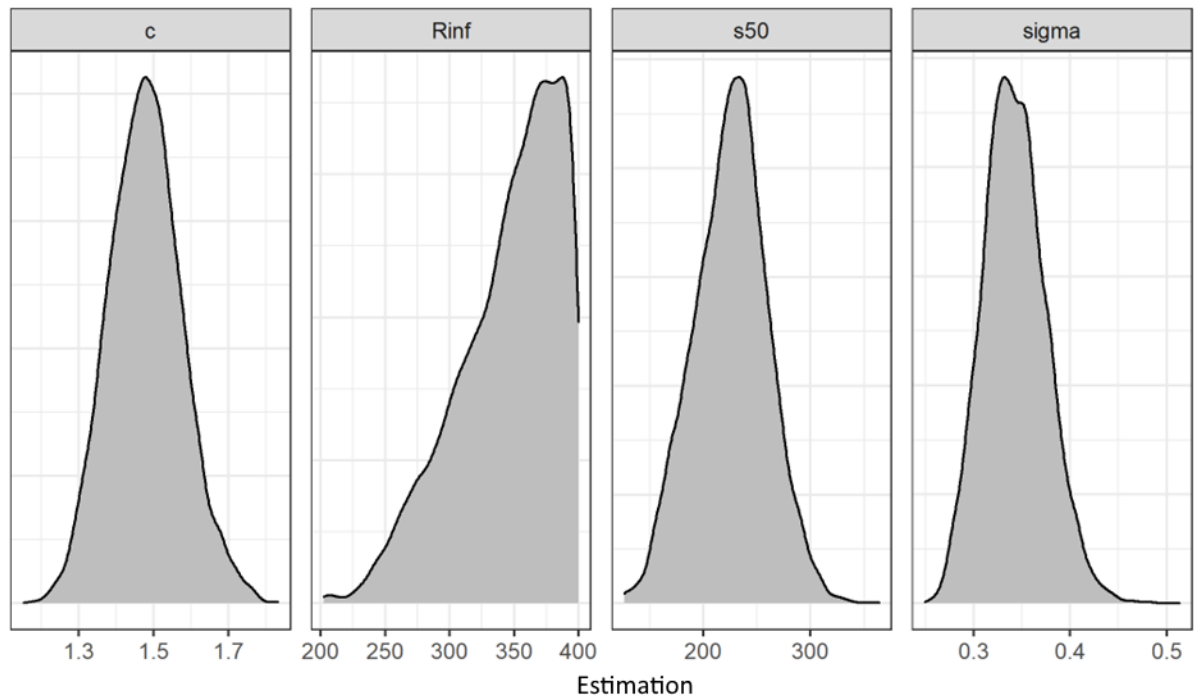


Figure AB 1 : Distribution a posteriori des paramètres pour la courbe stock-recrutement du modèle Beverton-Holt sigmoïdal.

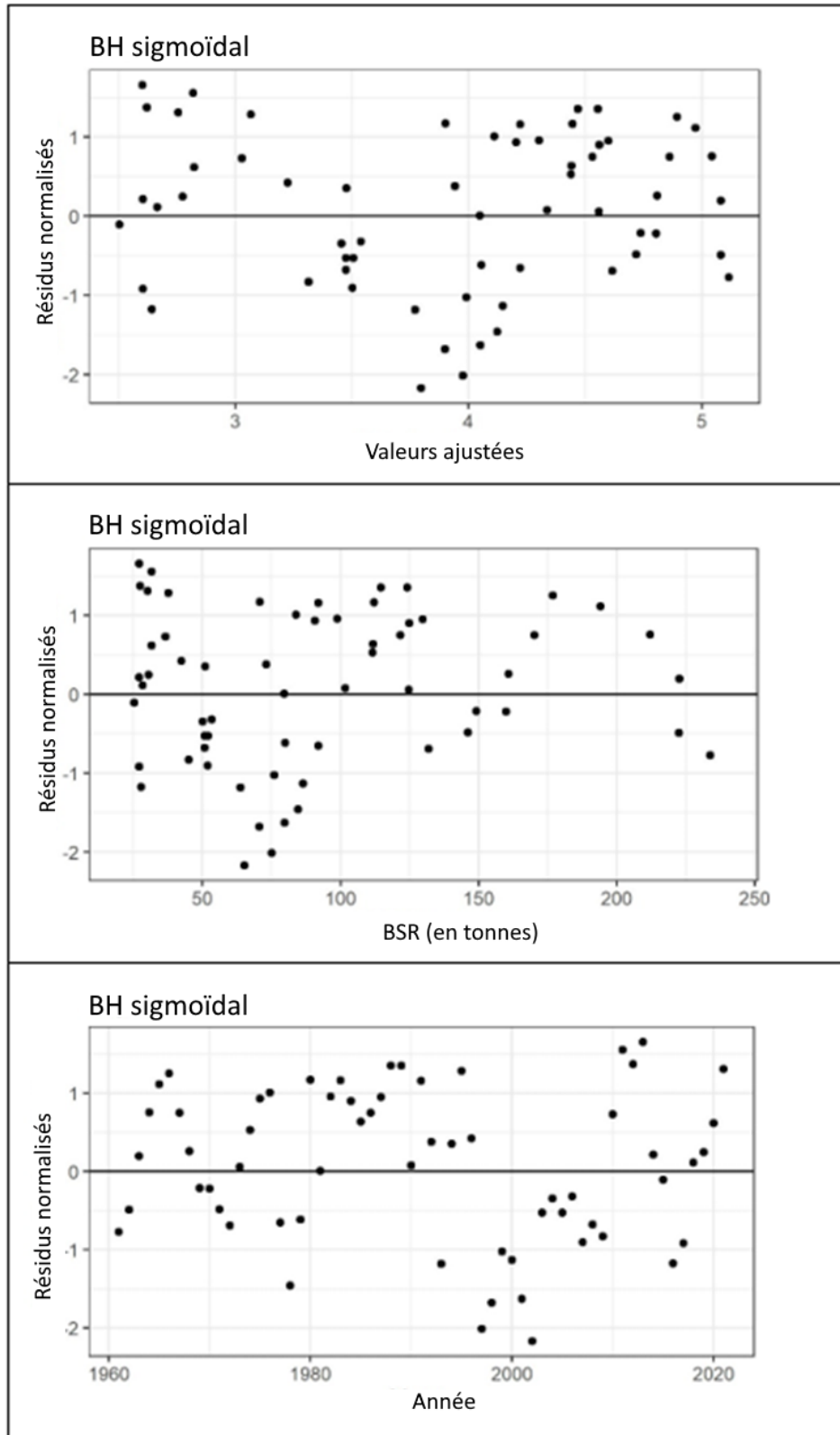


Figure AB 2 : Graphiques des résidus pour la courbe du modèle Beverton-Holt sigmoïdal par rapport aux valeurs ajustées (graphique du haut), à la BSR (graphique du milieu) et aux années (graphique du bas).

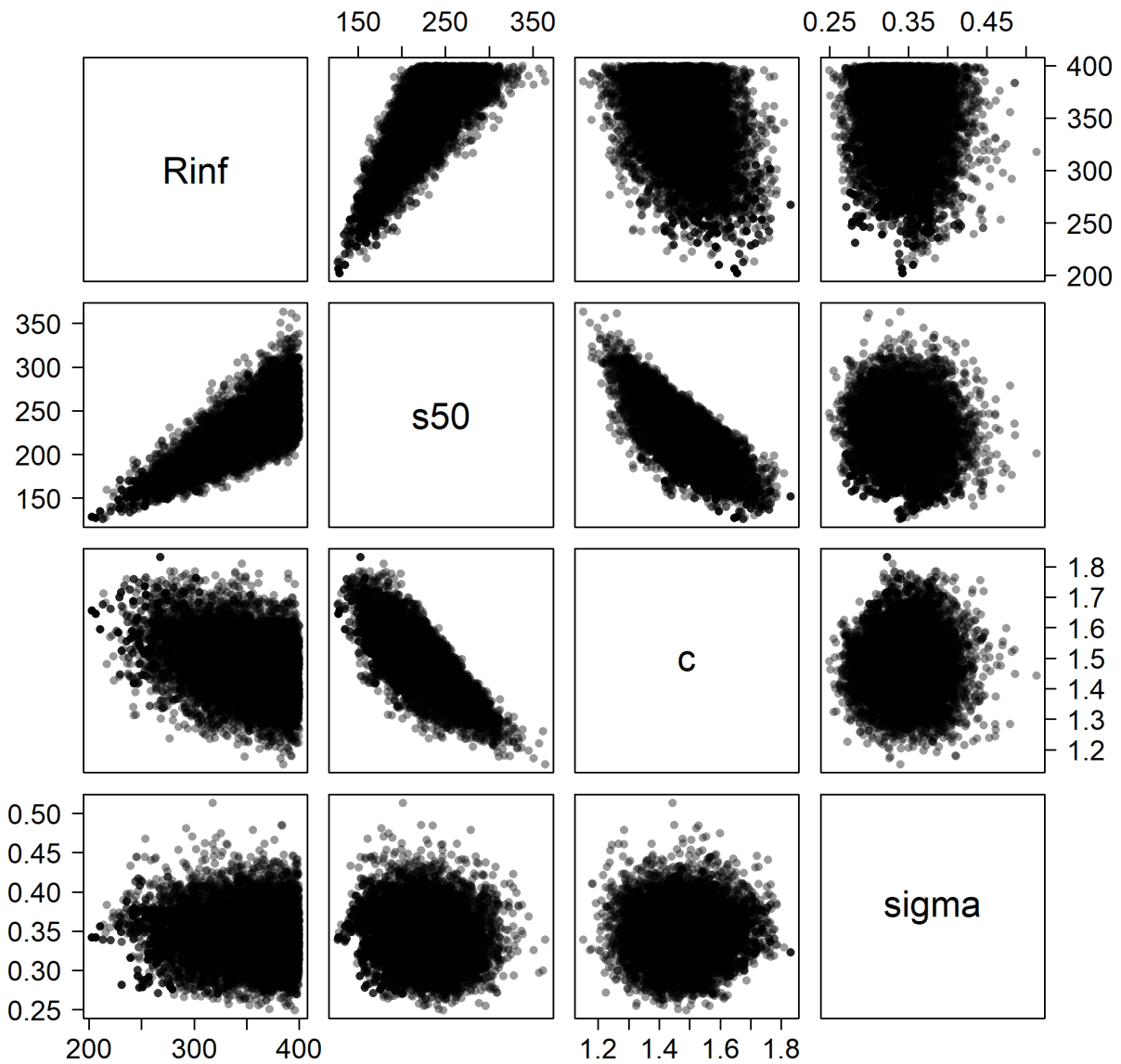


Figure AB 3 : Graphiques de corrélation des paramètres pour la courbe stock-recrutement (R) du modèle Beverton-Holt sigmoïdal. L'incertitude des paramètres a été intégrée aux simulations du R par un échantillonnage des paramètres à partir de cet ensemble d'échantillons MCMC.

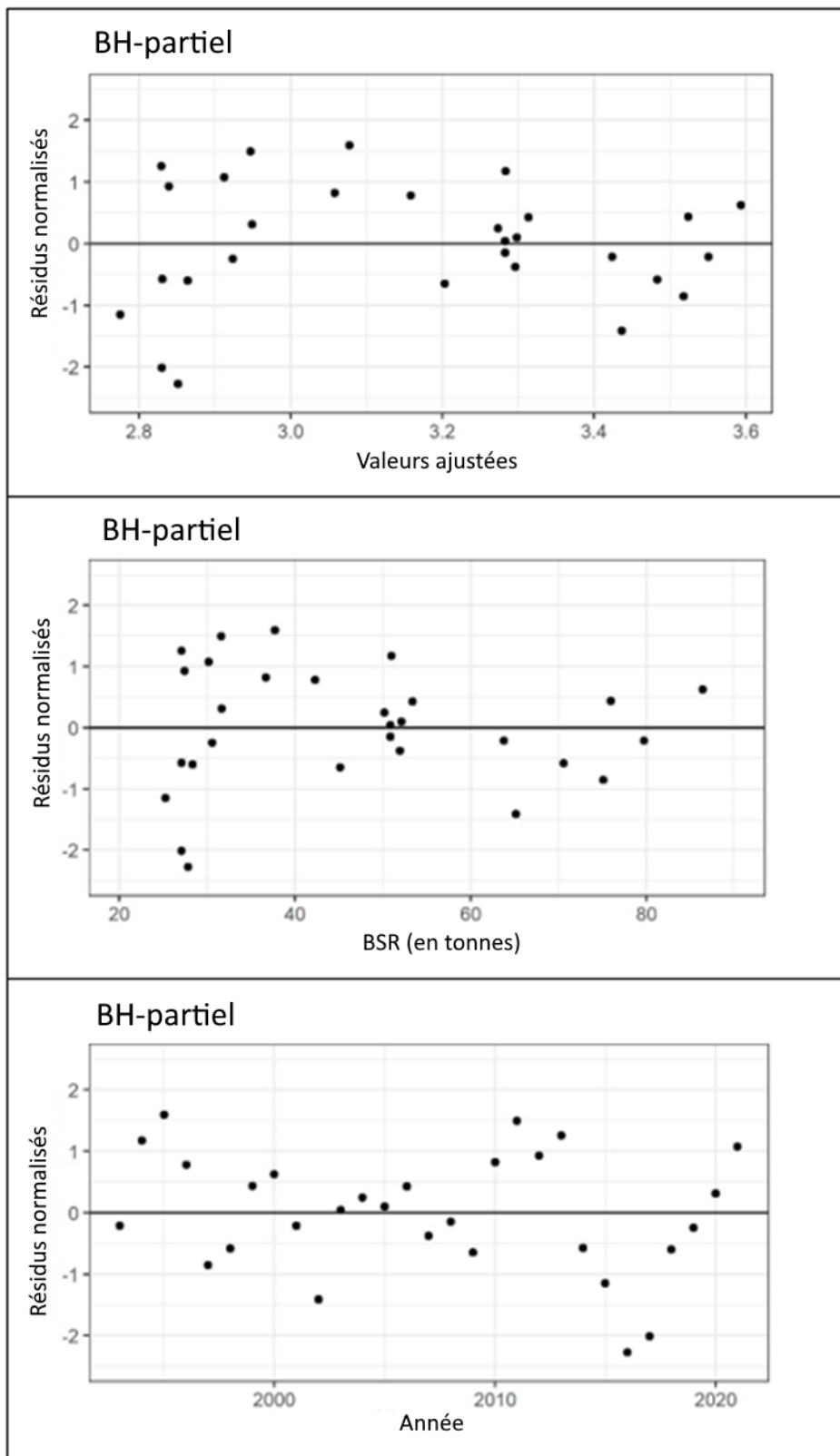


Figure AB 4 : Graphiques des résidus pour la courbe du modèle Beverton-Holt partiel par rapport aux valeurs ajustées (graphique du haut), à la BSR (graphique du milieu) et aux années (graphique du bas).

Covariance des paramètres de Beverton-Holt

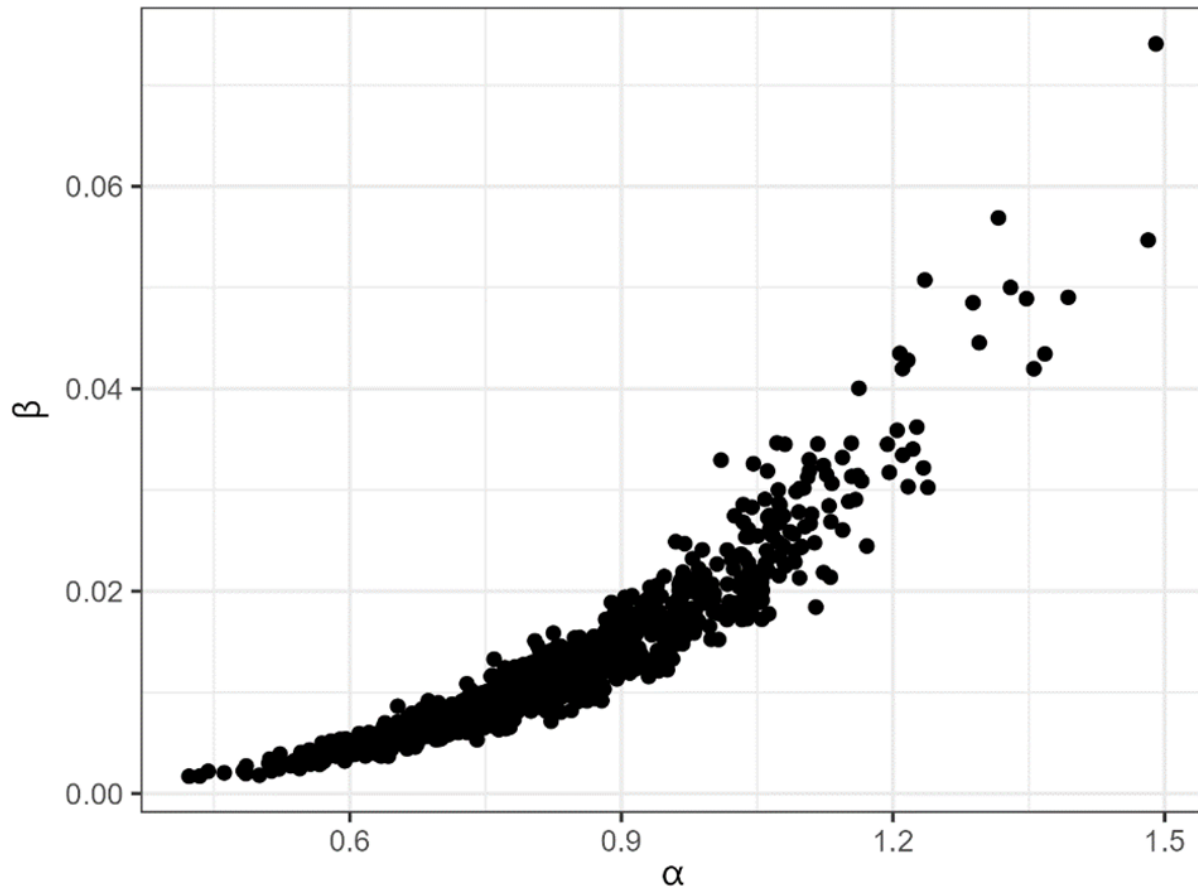


Figure AB 5 : Graphique de corrélation des paramètres pour la courbe stock-recrutement du modèle Beverton-Holt partiel.

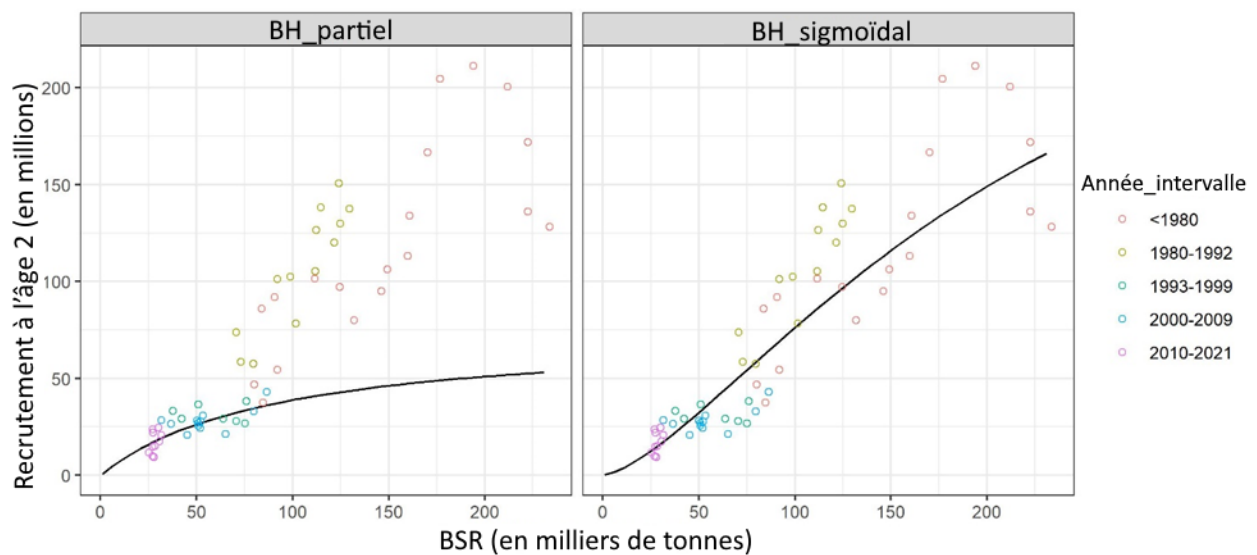


Figure AB 6 : Ajustements des courbes stock-recrutement des modèles Beverton-Holt partiel (ajustement aux données depuis 1993 seulement) et sigmoïdal (ajustement à la série chronologique complète).

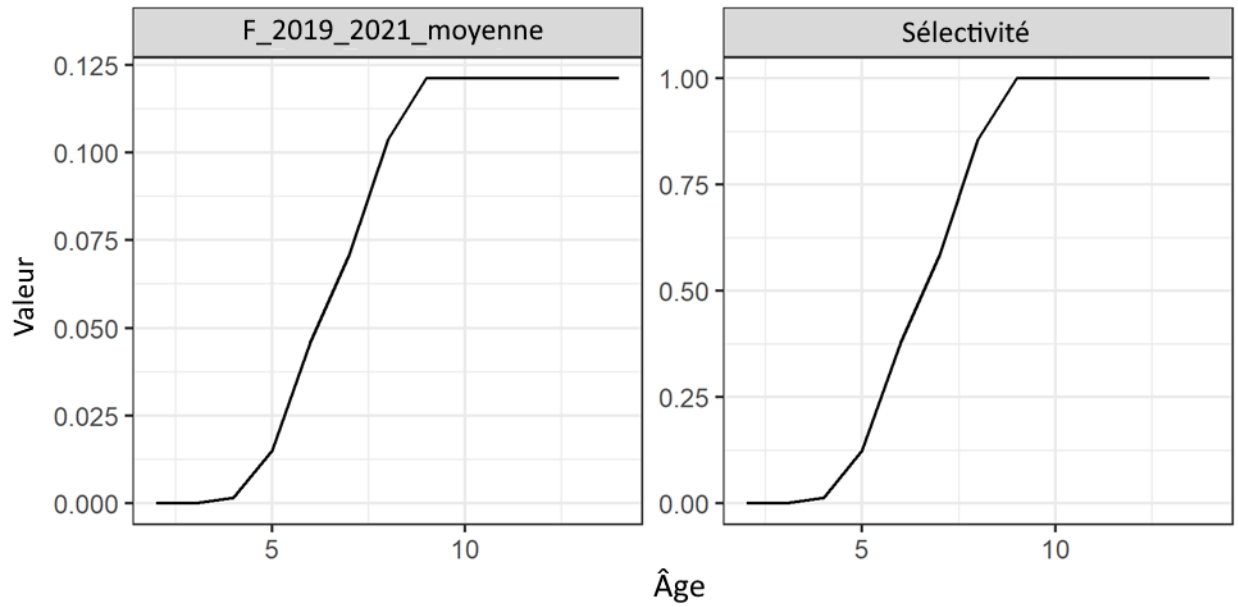


Figure AB 7 : F moyennes des années 2019 – 21 (graphique de gauche) mises à l'échelle par la valeur maximale aux fins du calcul de la sélectivité (graphique de droite).

ANNEXE C : PROJECTIONS À LONG TERME DE LA SÉRIE HISTORIQUE DE LA BSR (1959 – 2022) POUR TOUTES LES COMBINAISONS DE M ET DE R SELON TOUTES LES PG

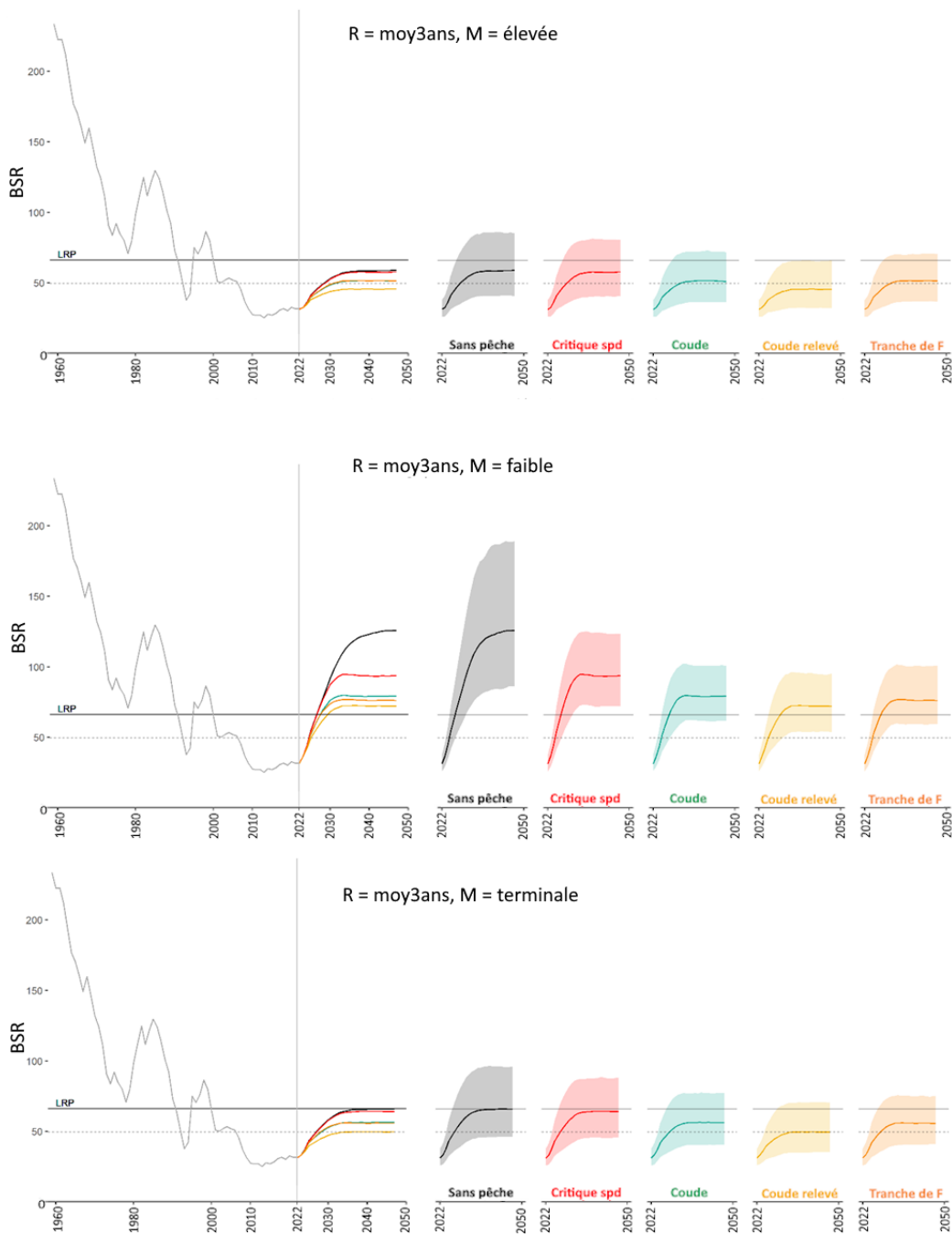


Figure AC 1 : Projections de la taille du stock (BSR) par rapport aux estimations historiques de la taille du stock (1959 – 2022) pour le scénario de recrutement (R) « moy3an » (2019 – 21). Le graphique de gauche montre les estimations médianes, tandis qu'à droite, les projections sont indiquées selon chaque PG avec les IC à 80 % associés. La ligne horizontale pleine se trouve à la $BSR = B_{lim}$, et la ligne horizontale pointillée se trouve à la $BSR = 0,75B_{lim}$. Les titres des graphiques indiquent le scénario de R et de mortalité naturelle (M).

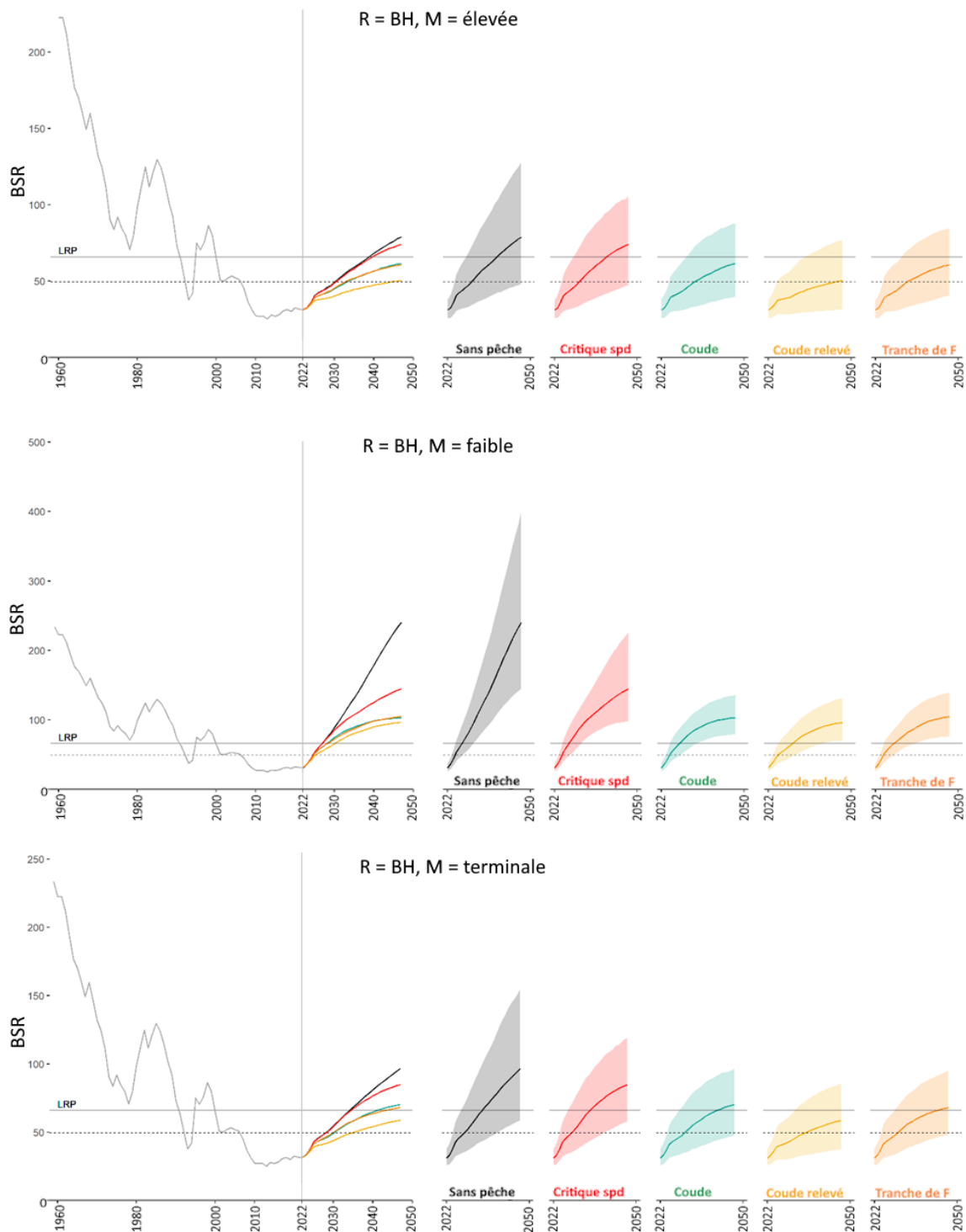


Figure AC 2 : Projections de la taille du stock (BSR) par rapport aux estimations historiques de la taille du stock (1959 – 2022) pour le scénario de recrutement (R) modélisé selon la relation de Beverton-Holt. Le graphique de gauche montre les estimations médianes, tandis qu'à droite, les projections sont indiquées selon chaque PG avec les IC à 80 % associés. La ligne horizontale pleine se trouve à la $BSR = B_{lim}$, et la ligne horizontale pointillée se trouve à la $BSR = 0,75B_{lim}$. Les titres des graphiques indiquent le scénario de R et de mortalité naturelle (M).

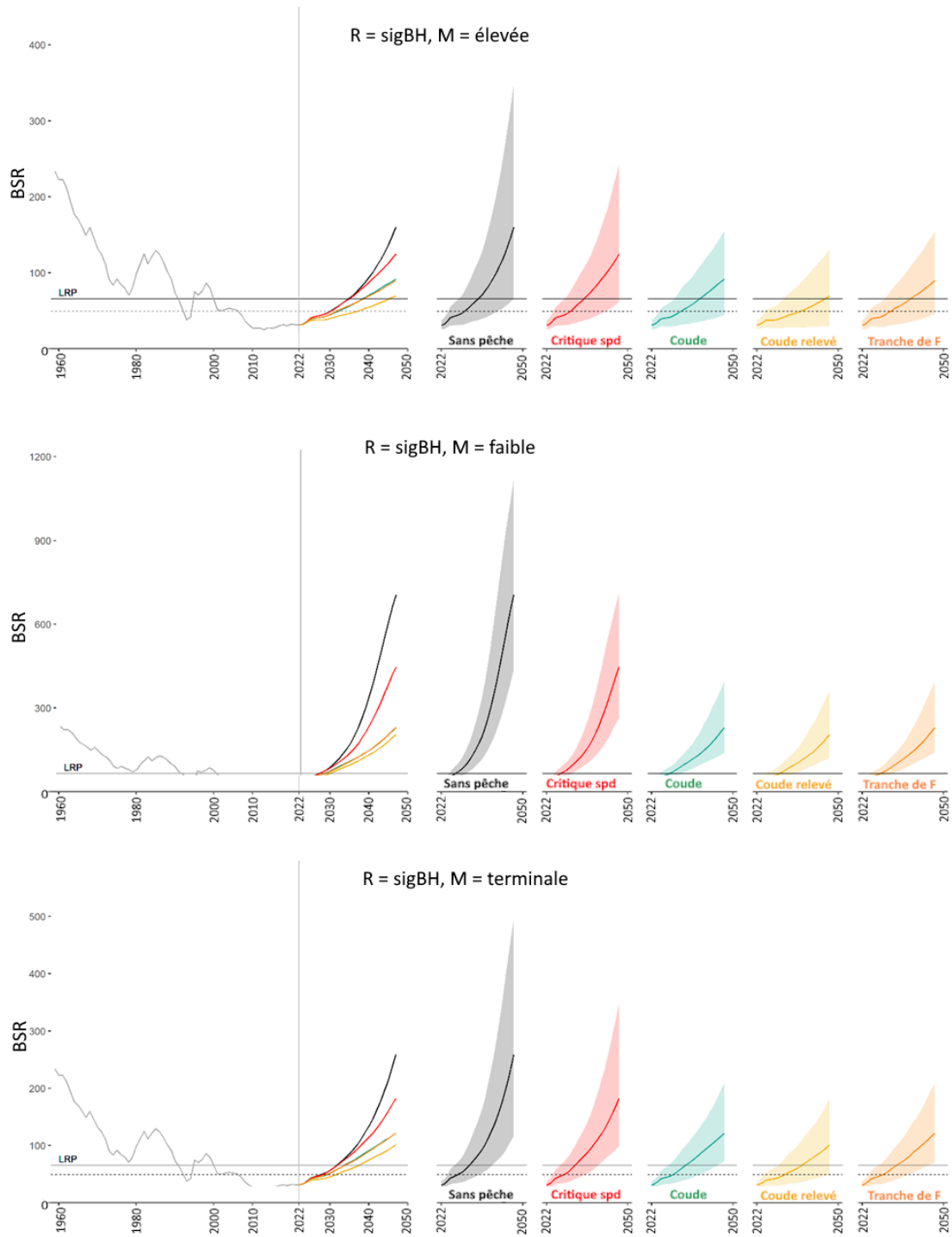


Figure AC 3 : Projections de la taille du stock (BSR) par rapport aux estimations historiques de la taille du stock (1959 – 22) pour le scénario de recrutement (R) modélisé selon la relation de Beverton-Holt sigmoïdale. Le graphique de gauche montre les estimations médianes, tandis qu'à droite, les projections sont indiquées selon chaque PG avec les IC à 80 % associés. La ligne horizontale pleine se trouve à la $BSR = B_{lim}$, et la ligne horizontale pointillée se trouve à la $BSR = 0,75B_{lim}$. Les titres des graphiques indiquent le scénario de R et de mortalité naturelle (M).

ANNEXE D : TEMPS NÉCESSAIRE POUR ATTEINDRE LA CIBLE DE RÉTABLISSMENT

Des projections sont effectuées pour chaque scénario de M et de R ainsi que pour le scénario sans pêche afin de calculer le temps nécessaire pour atteindre la cible de rétablissement, atteinte définie comme le moment où 75 % des simulations sont supérieures au PRL. L'année d'atteinte de la cible varie considérablement d'un scénario à l'autre. Lorsque la M est faible et que le R est élevé, la cible est atteinte plus rapidement, tandis qu'elle n'est pas atteinte dans certains des scénarios à M élevée et à R faible.

Tableau AD 1 : Temps nécessaire pour atteindre la cible de rétablissement (valeur supérieure au PRL avec une probabilité de 75 %) dans chaque scénario de M et de R pour chaque PG et le scénario sans pêche. Les cellules grises avec la mention « s.o. » indiquent que le stock n'atteint pas la cible de rétablissement. La cellule jaune indique le temps nécessaire pour un rétablissement du stock sans pêche dans les conditions qui prévalent.

	Recrutement	Mortalité naturelle		
		Élevée	Année terminale	Faible
Sans pêche	moy3ans	s.o.	s.o.	2028
	BH	2049	2040	2029
	sigBH	2039	2036	2029
Critique spd	moy3ans	s.o.	s.o.	2028
	BH	2053	2041	2029
	sigBH	2040	2036	2029
Tranche de F	moy3ans	s.o.	s.o.	2030
	BH	s.o.	s.o.	2031
	sigBH	2045	2040	2030
Coude	moy3ans	s.o.	s.o.	2030
	BH	s.o.	2069	2030
	sigBH	2045	2040	2030
Coude relevé	moy3ans	s.o.	s.o.	s.o.
	BH	s.o.	s.o.	2033
	sigBH	2057	2047	2032

ANNEXE E : FONCTION POUR CALCULER F À PARTIR DES PRISES

La fonction suivante appelée « *solveF* » prend comme arguments le total autorisé des captures (TAC) prévu (*projC*), une estimation initiale de la F (*Finit*), un vecteur de sélectivité selon l'âge (*S*), un vecteur des valeurs de mortalité naturelle selon l'âge (*M*), un vecteur d'abondance selon l'âge (*N*) et le vecteur du poids des prises selon l'âge (*Cw*). Cette fonction effectue une approximation de Newton de la valeur F compte tenu de l'estimation initiale (*Finit*) et résout le problème pour la racine (c.-à-d. le zéro) de la fonction objectif. On a constaté que sept itérations de cet algorithme (*niter* = 7) étaient suffisantes pour résoudre *f* avec la précision requise. Des problèmes de convergence sont survenus lorsque *projC* = 0 ou lorsque le rendement estimé était proche de la biomasse totale; la F a donc été maintenue entre 10^{-3} et 1. Cette méthode a été tirée du code de projection présenté pour le modèle d'évaluation de la morue du Nord qui a été utilisé pour évaluer ce stock (Paul Regular, communication personnelle); nous avons légèrement modifié la fonction parce que les poids des prises sont différents des poids du stock.

```
solveF <- function(projC, Finit, S, M, N, Cw)
{
  niter = 7
  F = Finit
  for(i in 1:niter){
    Z = F * S + M;
    eZ = exp((-1,0) * Z);
    Mort = 1,0 - eZ;
    Y = F * sum(N * Mort * S * Cw/Z);
    derY = sum(N * S * Cw * (Mort * M/Z + eZ * F * S)/Z);
    F = F + ((projC - Y)/derY);
  }
  return(F) }
```