



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 2024/2024/063

Région du Pacifique

Estimation des points de référence de l'approche de précaution et évaluation des conséquences des règles de contrôle des prises pour le saumon rose (*Oncorhynchus gorbuscha*) du Fraser

Dylan M. Glaser¹ Brendan M. Connors² Kaitlyn Dionne³ and Ann-Marie Huang⁴

¹Station biologique du Pacifique

Pêches et Océans Canada, 3190 Hammond Bay Road
Nanaimo, Colombie-Britannique, V9T 6N7, Canada

²Institut des Sciences de la Mer

Pêches et Océans Canada, 9860 W Saanich Road
Sidney, Colombie-Britannique, V8L 5T5, Canada

³Bureau Kamloops

Pêches et Océans Canada, 985 McGill Pl
Kamloops, Colombie-Britannique, V2C 6X6, Canada

⁴Siège Régional (Pacific)

Pêches et Océans Canada, 200-401 Burrard Street
Vancouver, Colombie-Britannique, V6C 3S4, Canada

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 ON K1A 0E6

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



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représenté par le ministre
du ministère des Pêches et des Océans, 2024

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-38322-4 N° cat. Fs70-6/2021-012E-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Glaser, D.M., Connors, B.M., Dionne, K., and Huang, A.M. 2024. Estimation des points de référence de l'approche de précaution et évaluation des conséquences des règles de contrôle des prises pour le saumon rose (*Oncorhynchus gorbuscha*) du Fraser. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2024/2024/063. iv + 34 p.

Also available in English:

Glaser, D.M., Connors, B.M., Dionne, K., et Huang, A.M. Estimation des points de référence de l'approche de précaution et évaluation des conséquences des règles de contrôle des prises pour le saumon rose (*Oncorhynchus gorbuscha*) du Fraser. DFO Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech 2024/nnn. iv + 13 p.

TABLEAU DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iv
1 INTRODUCTION	1
1.1 CONTEXTE	1
1.2 OBJECTIFS	3
2 STRUCTURE ET RÉPARTITION DES STOCKS	4
3 FACTEURS ÉCOSYSTÉMIQUES ET CLIMATIQUES AYANT UNE INCIDENCE SUR LE STOCK	4
4 MÉTHODES	6
4.1 SOURCES DES DONNÉES	6
4.2 MODÈLE GÉNITEURS-RECRUES	7
4.3 POINTS DE RÉFÉRENCE BIOLOGIQUES	8
4.4 CADRE DE SIMULATION EN BOUCLE FERMÉE	9
5 RÉSULTATS	11
5.1 AJUSTEMENT ET DIAGNOSTICS DU MODÈLE	11
5.2 POINTS DE RÉFÉRENCE BIOLOGIQUES, ÉTAT ET TENDANCES DES STOCKS	11
5.3 RENDEMENT DE LA RÈGLE DE CONTRÔLE DES PRISES	12
6 DISCUSSION	13
6.1 SOMMAIRE DES PRINCIPALES CONSTATATIONS	13
6.2 MISES EN GARDE ET HYPOTHÈSES	14
6.3 CIRCONSTANCES EXCEPTIONNELLES OU DÉCLENCHEURS D'ÉVALUATION POUR LE STOCK	15
6.4 DOMAINES DE TRAVAIL FUTURS POSSIBLES	15
7 ACKNOWLEDGEMENTS	16
8 FIGURES	17
9 TABLEAUX	26
10 RÉFÉRENCES CITÉES	30
ANNEXE A. COMPUTING ENVIRONMENT	34

RÉSUMÉ

Le saumon rose du Fraser fraye dans tout le bassin du Fraser les années impaires, et la zone de gestion des stocks est composée d'une seule unité de conservation. Des glissements de terrain ont causé des obstacles à la montaison des adultes à différentes périodes, le plus notable étant celui de Hells Gate en 1914 et, plus récemment, le glissement de terrain de Big Bar découvert en 2019. La survie en mer du saumon rose du Fraser est influencée par la température de la surface de la mer au début de la vie marine, par le moment de l'efflorescence printanière et par le courant du Pacifique Nord, qui devraient tous changer à mesure que le Pacifique Nord se réchauffe sous l'effet des changements climatiques. La taille des adultes a diminué au fil du temps, ce qui coïncide avec l'augmentation de l'abondance des saumons dans le Pacifique Nord, qui pourrait avoir une incidence sur le taux de reproduction puisque la fécondité est proportionnelle à la taille des femelles. Nous avons ajusté un modèle géniteurs recrutement de type état-espace aux données disponibles afin de caractériser la dynamique des stocks et d'estimer des points de référence biologiques pour évaluer l'état des stocks. Nous avons ensuite élaboré un modèle simple de simulation en boucle fermée fondé sur des estimations récentes de la productivité afin de quantifier le rendement biologique et halieutique futur prévu de la règle actuelle de contrôle des prises (RCP), d'une autre RCP à titre indicatif et d'un scénario sans pêche. Nous avons estimé que le point de référence supérieur (PRS) du stock proposé de 80 % de S_{RMD} était de 4,6 millions (M) de poissons (de 3,64 à 6,11 M; médiane et 80e centiles), que le point de référence limite (PRL), $S_{gén}$, était de 1,72 M (de 1,10 à 2,70 M) et que le taux d'exploitation de référence maximal (TE), U_{RMD} , était de 0,56 (de 0,47 à 0,63). L'estimation la plus récente (2023) de l'abondance des géniteurs pour le saumon rose du Fraser est de 9,58 M et nous en concluons que la zone de gestion des stocks est dans un état « sain ». La RCP existante pour le saumon rose du Fraser présente une très faible probabilité (< 5 %) que le stock tombe sous son PRL et une probabilité relativement élevée (87,5 %) que l'abondance des géniteurs soit supérieure au PRS dans les 10 prochaines années. En supposant que les pêches utilisent pleinement la prise permise, la prise annuelle médiane devrait être de 10,3 M au cours de la même période. L'évaluation d'une autre RCP à titre indicatif, qui est strictement conforme au Cadre de l'approche de précaution de Pêches et Océans Canada (MPO), a donné un rendement biologique semblable et un rendement halieutique légèrement inférieur. Les résultats d'un test de robustesse, dans lequel la productivité a été réduite à 10 % de son estimation récente, ont montré que la probabilité que le stock tombe en dessous de ses PRL dans les 10 prochaines années était de 9 % pour la RCP actuelle et de 20 % pour la RCP de rechange. Nous terminons en formulant des recommandations sur les déclencheurs de réévaluation et les domaines possibles où concentrer les travaux futurs.

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE

1.1.1. Saumon rose du Fraser

Le Fraser est un grand fleuve à écoulement libre de 1 375 kilomètres de long qui draine 233 000 kilomètres carrés. Le bassin compte une grande diversité d'habitats qui ont été divisés en plusieurs régions distinctes, dont deux sur le cours principal du Fraser, une à Lillooet et trois dans le bassin hydrographique de la rivière Thompson (« Conservation Units for Pacific Salmon under the Wild Salmon Policy » Sous presse). Le Fraser abrite les cinq espèces de saumons du Pacifique et la plupart des variantes de leur cycle biologique. La complexité environnementale du Fraser et la diversité des populations de saumons qui s'y trouvent ont soutenu la sécurité alimentaire des Autochtones pendant des millénaires (Nesbitt et Moore 2016) et ont probablement contribué à la résilience des populations de saumons aux perturbations environnementales au fil du temps.

Le saumon rose du Fraser (*Oncorhynchus gorbuscha*) fraye en abondance les années impaires dans le Fraser. À l'heure actuelle, le plus grand groupe de saumons roses fraye dans le bassin hydrographique du bas Fraser. Cependant, avant le glissement à Hells Gate, le saumon rose du Fraser frayait en plus grande abondance dans le bassin hydrographique du haut Fraser, avec des populations importantes dans les réseaux des rivières Thompson et Seton (Pess *et al.* 2012). Les alevins de saumon rose dévalent dans l'océan au printemps ; les adultes passent environ 18 mois en mer, puis reviennent dans le Fraser de la mi-août au début octobre pour frayer (DFO 2023). Ce cycle biologique obligatoire de deux ans du saumon rose se traduit par des cohortes d'années paires et impaires qui sont reproductivement isolées les unes des autres et par des interactions dépendantes de la densité entre les lignées impaires et paires qui contribuent souvent à ce qu'une lignée de cycle soit numériquement dominante par rapport à l'autre (Krkošek *et al.* 2011). La remonte du saumon rose dans le Fraser est négligeable les années paires, n'est pas évaluée et ne fait pas partie de cette unité de conservation.

Le saumon rose du Fraser dévale dans l'estuaire du fleuve peu après son émergence et se nourrit pendant plusieurs mois dans le détroit de Georgia avant de migrer vers le nord jusqu'au golfe d'Alaska, où il réside pendant environ un an (DFO 1998). Lorsque les saumons roses du Fraser reviennent dans le Fraser depuis le Pacifique Nord, une partie de la remonte contourne l'extrémité nord de l'île de Vancouver en passant par le détroit de Johnstone, tandis que le reste migre autour de l'extrémité sud par le détroit de Juan de Fuca ; ce ratio de la migration nord-sud est connu sous le nom de taux de déviation (Folkes *et al.* 2018). Ce taux de déviation est de plus en plus dominé par les saumons roses qui empruntent la voie migratoire du nord, ce qui a une incidence sur l'exactitude des estimations de la remonte en raison des rencontres différentielles avec les pêches d'essai (Hague *et al.* 2021). Les variations du taux de déviation pourraient également avoir des répercussions sur la survie en raison des rencontres de proies, de prédateurs, d'agents pathogènes et d'espèces cooccurrentes du fait des densités différentes des fermes d'élevage de chaque côté de l'île de Vancouver (Grant *et al.* 2018).

1.1.2. Géniteurs et prise

Les données sur les prises et l'abondance des géniteurs (c.-à-d. l'échappée) sont recueillies depuis plus d'un siècle et les indices de l'abondance remontent à 1901 (Ricker 1989). Cependant, des données cohérentes et fiables sur les géniteurs et les prises ne sont disponibles que depuis

1959. De plus amples renseignements sur les données sur les prises et les géniteurs utilisées dans ce rapport sont fournis dans la section Sources des données.

1.1.3. Mise en valeur

La mise en valeur du saumon rose du Fraser est limitée et a principalement eu lieu au moyen des chenaux de fraie afin de créer un habitat de fraie supplémentaire de grande qualité. Les registres remontant à l'année d'éclosion 1955 montrent des estimations de plusieurs millions d'alevins de saumon rose dévalant des chenaux de fraie (voir les données dans le référentiel dans le supplément A). La précision des estimations de la dévalaison était variable, les programmes de surveillance étant principalement conçus pour d'autres espèces. On a utilisé l'échantillonnage dans des pièges rotatifs ou les estimations de la survie de l'œuf à l'alevin pour générer les nombres des remises à l'eau. Avant la mise en place du Programme de mise en valeur des salmonidés (PMVS), les installations de mise en valeur des salmonidés du Fraser étaient gérées par la Commission internationale des pêches du saumon du Pacifique (CIPSP) et la production se limitait à l'empoissonnement accessoire dans les chenaux de fraie (Seaton, Jones et Weaver). Après la création du PMVS en 1977, la mise en valeur du saumon rose du Fraser a commencé dans des éclosiers où les poissons étaient incubés et élevés dans une installation afin de maximiser les chances de survie de l'incubation, des œufs et des alevins. En raison du temps limité qu'ils passent en eau douce, la mise en valeur des saumons roses nécessite moins de ressources que celle des autres saumons du Pacifique, une caractéristique qui en a fait un poisson populaire à élever pour la pêche en mer. Le PMVS réévalue actuellement les pratiques d'empoissonnement et a réduit le nombre d'alevins non vésiculés produits depuis la fin des années 2000 (Figure 1), en partie en raison des possibilités limitées de prises et de l'évolution des priorités.

1.1.4. Gestion actuelle et tendances

La règle de contrôle des prises (RCP) actuelle pour le saumon rose du Fraser a été mise en œuvre pour la première fois en 1987. Elle est composée de trois zones de gestion : 1) à des remontes inférieures à 7,059 millions (M) de saumons roses, le taux d'exploitation maximal admissible augmente de 0 % lorsqu'il n'y a pas de saumon rose à 15 % pour 7,059 M de saumons roses ; 2) à des remontes entre 7,059 et 20 M de saumons roses, l'objectif fixe d'abondance des géniteurs est de 6 M ; et 3) à des remontes de plus de 20 M de saumons roses, le taux d'exploitation maximum est de 70 %. La documentation de la justification de la RCP actuelle a été difficile à trouver, mais une note de service manuscrite de la Commission internationale des pêches de saumon du Pacifique de 1983 semble calculer une cible de ponte de 5 milliards d'œufs qui produirait la production désirée et la cible de géniteurs adultes correspondante, en supposant un poids moyen, qui atteindrait la cible de ponte (S. Latham, Commission du saumon du Pacifique [CSP], Vancouver [Colombie-Britannique], comm. pers.). Ricker (1989) estime également U_{MSY} à 70 %, qui a pu étayer le taux d'exploitation de référence cible (TE) actuel (figure 2).

Des mesures de gestion supplémentaires sont souvent prises pendant les pêches ciblant le saumon rose du Fraser afin d'éviter les stocks préoccupants, dans la mesure du possible, et de réduire les répercussions sur les stocks préoccupants qui migrent en même temps que les stocks ciblés, lorsqu'il n'est pas possible de les éviter. Différentes mesures sont prises pour réduire les prises accessoires de saumon rouge : les fermetures temporelles et spatiales (p. ex. fermeture des périodes de pêche du saumon coho du Fraser de l'intérieur), les exigences relatives

aux engins (p. ex. l'utilisation de sennes de rivage ou de sennes peu profondes plutôt que de filets maillants dérivants, l'interdiction des appâts pour les pêches récréatives) et les changements opérationnels (p. ex. exigences relatives à l'utilisation d'épuisettes et tailles maximales des filets recommandées pour les sennes coulissantes).

Dans les 14 remontes de saumon rose du Fraser qui ont eu lieu avant la mise en œuvre de la RCP de 1987 (c.-à-d. de 1959 à 1985), la remonte moyenne était de 9,3 M, l'abondance moyenne des géniteurs était de 2,5 M et le taux d'exploitation moyen était de 69 %. Dans les 19 années de montaison de saumon rose du Fraser depuis la mise en œuvre de cette RCP (de 1987 à 2023), la limite du taux d'exploitation fixé par la RCP a été dépassée deux années (en 1987 et 1997), la remonte moyenne était de 12,9 M, l'abondance moyenne des géniteurs était de 9,4 M et le taux d'exploitation moyen était de 25 %. Dans l'ensemble, les remontes de saumon rose du Fraser peuvent être qualifiées de « variables, mais stables ». Au cours des cinq dernières générations (10 ans, 5 montaisons), la remonte et l'abondance des géniteurs ont légèrement augmenté avec une faible variabilité interannuelle, avec une remonte moyenne de 7,38 M, une abondance moyenne des géniteurs de 6,89 M et un taux d'exploitation moyen de 6 % (Figure 3).

1.1.5. Les pêches du saumon rose du Fraser et les dispositions relatives aux stocks de poissons

La *Loi sur les pêches* du Canada a été modifiée en juin 2019. Les dispositions relatives aux stocks de poissons (DSP) prévoient de nouvelles exigences qui stipulent que « *le ministre met en œuvre des mesures pour maintenir les grands stocks de poissons au moins au niveau nécessaire pour favoriser la durabilité des stocks, en tenant compte de la biologie du poisson et des conditions du milieu qui touchent les stocks* » (DFO 1985). Le saumon rose du Fraser a été désigné comme un grand stock de poissons et, pour faciliter la mise en œuvre des DSP, les auteurs, en collaboration avec la Direction de la gestion des pêches du MPO, ont déterminé des valeurs possibles pour la composante agrégée du point de référence limite (PRL), du point de référence supérieur du stock (PRS) et du point d'exploitation de référence maximal (TE). Tant les préoccupations croissantes entourant les impacts potentiels des changements climatiques (p. ex. réchauffement de la température des océans, inondations d'eau douce ; MacDonald et Grant (2023)) que le risque d'intensification de la concurrence inter- et intraspécifique dans l'océan (Ruggerone et Irvine 2018 ; Ruggerone *et al.* 2023) et les preuves de l'évolution démographique (Pacific Salmon Commission 2023) soulignent la nécessité d'actualiser notre compréhension de la dynamique et de l'état des stocks. La relation entre la dynamique et la gestion des populations de saumons roses du Fraser n'a pas été évaluée depuis plus de 30 ans (dernière évaluation du MPO : Ricker (1989)), en partie en raison de préoccupations au sujet de l'étalonnage des méthodes d'évaluation des géniteurs (Grant *et al.* 2014). Les nouvelles exigences des DSP exigent un réexamen attentif de la dynamique des populations et de la viabilité de l'actuelle RCP.

1.2. OBJECTIFS

Étant donné que la zone de gestion des stocks de saumon rose du Fraser est composée d'une seule unité de conservation, nous utilisons les points de référence de la Politique concernant le saumon sauvage du MPO, qui doivent être fondés sur la biologie et tenir compte explicitement de l'incertitude (DFO 2005, 2009) afin de déterminer les points de référence possibles selon les DSP.

Les objectifs sont les suivants :

-
1. décrire la compréhension actuelle des éléments suivants : a) la structure et la répartition des stocks ; b) l'état et les tendances des stocks ; c) les facteurs écosystémiques et climatiques qui influent sur les stocks ;
 2. fournir des estimations des éléments suivants : a) les points de référence possibles et b) le rendement biologique et halieutique prévu des règles de contrôle des prises, actuelles et de rechange ;
 3. proposer des circonstances exceptionnelles ou des déclencheurs d'évaluation pour le stock ;
 4. déterminer les secteurs qui nécessitent des travaux futurs.

2. STRUCTURE ET RÉPARTITION DES STOCKS

Le saumon rose du Fraser fraye principalement dans la partie inférieure du bassin du Fraser, en aval du canyon du Fraser et de Hells Gate (Figure 4). Cependant, une grande composante du stock remonte dans la rivière Thompson et le complexe Seton-Anderson. Avant le glissement de terrain à Hells Gate en 1914, la majeure partie de la remonte du saumon rose du Fraser revenait et frayait dans le haut Fraser (Pess *et al.* 2012). Bien que l'on manque de données sur l'abondance au niveau des affluents dans les dernières décennies pour le saumon rose du Fraser, les observations d'évaluation d'autres espèces ont constamment mentionné des saumons roses dans les rivières Quesnel, Chilcotin et Nechako. En 2019, le MPO a été avisé d'un glissement de terrain dans le moyen Fraser, près de Big Bar. Le saumon rose faisait partie des espèces dont la montaison était retardée par ce glissement de terrain. Les efforts d'atténuation du glissement ont été largement couronnés de succès et des saumons roses se trouvaient dans la rivière Nechako en amont du glissement en 2023 (R. Martin, MPO, Kamloops, Colombie-Britannique, comm. pers.).

On suppose que les saumons roses du Fraser composent une seule unité de conservation (« Conservation Units for Pacific Salmon under the Wild Salmon Policy » Sous presse). Cependant, il existe des preuves de différences dans le cycle biologique des saumons roses qui frayent en amont et en aval de Hells Gate. Par exemple, les saumons roses provenant de l'amont de Hells Gate ont des vitesses de nage maximales plus élevées, qui leur permettent de franchir les rapides de Hells Gate (Williams *et al.* 1986 ; Ricker 1989) et pourraient s'expliquer par des différences génétiques (Beacham *et al.* 1988). De plus, la montaison des saumons roses remontant dans les zones en amont et en aval de Hells Gate est légèrement différente, comme l'a démontré un échantillonnage récent d'identification génétique des stocks dans les pêches d'essai du bas Fraser (S. Latham, CSP, Vancouver, Colombie-Britannique, comm. pers.). Ces différences permettent de penser qu'il pourrait y avoir plus de différences génétiques et de cycle biologique entre les populations reproductrices en amont et en aval de Hells Gate qu'on ne le pensait auparavant. Le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) examine actuellement la structure des populations de saumons roses au Canada, notamment dans le Fraser (B. Leaman, COSEPAC, Duncan, Colombie-Britannique, comm. pers.).

3. FACTEURS ÉCOSYSTÉMIQUES ET CLIMATIQUES AYANT UNE INCIDENCE SUR LE STOCK

En raison de leurs vastes migrations dans les milieux marins et d'eau douce, les saumons roses du Fraser interagissent avec un large éventail de conditions écosystémiques et climatiques tout au long de leur cycle biologique. Les habitats d'eau douce que le saumon rose du fleuve Fraser

utilise pour la fraie et l'incubation sont largement répartis dans le bassin du fleuve (Figure 4). La plus grande partie de la production de saumon rose a lieu dans le bas Fraser, du canyon du Fraser vers l'aval, et les habitats de cette région sont relativement fortement touchés par les activités anthropiques.

Le saumon rose a un profil aérobique et un rendement cardiovasculaire exceptionnels qui, selon les hypothèses, contribuent à sa résilience au réchauffement des eaux douces (Clark *et al.* 2011). Cependant, en raison de sa taille relativement petite, il est particulièrement vulnérable aux répercussions liées au débit pendant les montaisons en eau douce. Les impacts du début de la construction du chemin de fer à Hells Gate dans les années 1880 (c.-à-d. l'immersion de roches dans la rivière), de la construction du nouveau chemin de fer en 1913 et du glissement rocheux subséquent en 1914, ont créé des obstacles hydrologiques qui ont considérablement limité la montaison du saumon rose vers ses lieux de fraie dans le haut Fraser. Après l'observation d'une population nombreuse de saumons rouges apparemment coincée en aval du glissement en 1941, des installations de passage du poisson ont été construites en 1944 et ont restauré la montaison et rétabli des populations reproductrices dans le haut Fraser (Roos 1991). Le glissement rocheux de 2018-2019 à Big Bar dans le canyon du Fraser, plus en amont de Hells Gate, a créé un autre obstacle partiel à la montaison, pendant les périodes de débit élevé, vers les lieux de fraie des eaux d'amont.

En plus des répercussions liées au débit sur la migration des adultes, les débits extrêmes (p. ex. à la suite de pluies automnales) peuvent causer une mortalité élevée au stade de l'œuf à l'alevin du saumon du Pacifique résultant de l'affouillement des nids où les œufs incubent (Montgomery *et al.* 1996). Malgré les débits extrêmes et les inondations qui se sont produits dans le bas Fraser ces dernières années (p. ex. à l'automne 2021), peu d'études ont porté sur les impacts de ces débits extrêmes sur le succès de l'incubation du saumon rose du Fraser.

Dans le milieu marin, la survie du saumon rose du Fraser est associée négativement à des températures de la surface de la mer supérieures à la moyenne au début de la vie en mer (Mueter *et al.* 2002), à une efflorescence printanière plus précoce (Malick *et al.* 2017), à une salinité plus élevée (DFO 2021) et à un courant du Pacifique Nord faible (Malick *et al.* 2017) ; toutes ces caractéristiques indiquent des conditions océanographiques physiques et biologiques qui ont probablement des effets sur la production, le transport et la disponibilité des proies au début de la vie en mer. De plus, l'abondance croissante des saumons du Pacifique dans l'ensemble du Pacifique Nord (dominée par le saumon rose, le saumon kéta et le saumon rouge) est associée à des déclin de la taille des saumons roses du Fraser adultes (Figure 5), qui peuvent découler de la concurrence interspécifique et intraspécifique entre les saumons pour des ressources en proies limitées en mer (Ruggerone *et al.* 2023). Ces baisses de la taille des géniteurs se répercutent probablement à leur tour sur le taux de reproduction puisque la fécondité est proportionnelle à la taille des femelles (Beacham et Murray 1993).

Les conditions océanographiques physiques et biologiques qui influent sur la production de proies et la survie du saumon rose continueront probablement de varier à mesure que le Pacifique Nord se réchauffera sous l'effet des changements climatiques (Litzow *et al.* 2024). Ces variations peuvent comprendre une réduction de la production et de la disponibilité du zooplancton riche en lipides au début de la vie en mer ou un décalage accru entre le moment de l'entrée dans l'océan et la période de la productivité marine (p. ex. l'efflorescence printanière ; Wilson *et al.* (2023)).

4. MÉTHODES

Nous avons compilé les données disponibles sur l'abondance des géniteurs et les prises de saumon rose du Fraser, puis nous avons élaboré et ajusté un modèle géniteurs-recrutement de type état-espace à ces données afin de décrire la dynamique des stocks et les caractéristiques des populations. Nous avons ensuite dérivé des estimations des points de référence biologiques pour évaluer l'état des stocks. Enfin, nous avons mis au point un modèle de simulation en boucle fermée conditionné par les estimations récentes de la productivité afin de quantifier le rendement biologique et halieutique futur prévu de la RCP actuelle, d'une autre RCP et d'un scénario sans pêche pour le stock. Chacune de ces étapes est décrite en détail ci après.

4.1. SOURCES DES DONNÉES

La CSP a fourni les données sur les géniteurs et les prises de 1959 à aujourd'hui (Pacific Salmon Commission 2024). Durant cette période, on a utilisé diverses approches, allant des méthodes de marquage-recapture dans les affluents de fraie ou le cours principal du Fraser au dénombrement par sonar dans le bas Fraser ces dernières années, pour estimer l'abondance des géniteurs (Tableau 1). Il convient de noter qu'aucun étalonnage n'a été effectué lorsqu'on a changé de méthode d'estimation de l'abondance des géniteurs, mais que des corrections ont été apportées aux méthodes antérieures à l'examen approfondi des données mené par Andrew et Webb (1987) et que les méthodes d'estimation plus récentes ont bénéficié des leçons tirées de cet examen et des progrès méthodologiques. La précision de ces approches était variable mais, d'après des conversations avec le personnel du secteur et d'autres analystes qui connaissent bien les données, on a supposé qu'elles représentaient la grande majorité de la population reproductrice d'une année donnée et qu'elles n'étaient pas systématiquement biaisées.

Pour estimer les prises commerciales, en général, on multipliait le total des prises côtières de saumon rose (Canada et États-Unis) par la contribution estimée des stocks du Fraser aux prises côtières, la contribution des stocks du Fraser étant estimée en fonction de reconstitutions des remontes (de 1959 à 1985) et de méthodes d'identification génétique des stocks (depuis 1987). Les méthodes utilisées pour estimer les prises varient selon le type de pêche (commerciale, récréative, des Premières Nations) et le pays. Les prises commerciales canadiennes sont estimées au moyen d'un programme de bordereaux de vente qui a commencé en 1951, et les prises américaines au moyen d'une déclaration obligatoire des prises aux ministères des Pêches des États de Washington et de l'Oregon. Les données antérieures à 1959 n'étaient pas disponibles parce que les débarquements commerciaux ne répartissaient pas les prises entre les stocks ; c'est pourquoi notre série chronologique commence en 1959. Les prises dans les pêches récréatives sont estimées au moyen de relevés par interrogation de pêcheurs (p. ex. les relevés sur les captures par unité d'effort jumelées à des vols ou à d'autres dénombrements) dans les deux pays. Les prises des possibilités économiques des Premières Nations sont déclarées selon des méthodes semblables d'estimation des prises commerciales, et les prises à des fins alimentaires, sociales et rituelles selon des méthodes qui diffèrent selon la pêche et l'emplacement. On a supposé que la remonte totale (ou le recrutement) une année donnée était la somme des prises et de l'abondance des géniteurs.

Voir dans Grant *et al.* (2014) un aperçu détaillé du paysage des données sur le saumon rose du Fraser, y compris les méthodologies utilisées pour recueillir les données sur l'abondance des géniteurs, les prises et les données biologiques.

4.2. MODÈLE GÉNITEURS-RECRUES

Nous avons modélisé les données géniteurs-recrutement dans un cadre d'espace d'état, en suivant l'approche décrite dans Fleischman *et al.* (2013). Les modèles de type état-espace permettent de séparer l'erreur d'observation (p. ex. d'échantillonnage) et la variation réelle du processus sous-jacent et sont devenus de plus en plus courants dans la modélisation écologique (Auger-Méthé *et al.* 2021). Les modèles géniteurs-recrutement de type état-espace ont tendance à produire des estimations moins biaisées des paramètres principaux (p. ex. la productivité intrinsèque et la dépendance à la densité) que les approches traditionnelles fondées sur la régression, qui ne séparent pas l'erreur d'observation et la variation du processus et peuvent donc être vulnérables à des erreurs sur les variables et à des biais dans les séries chronologiques (Su et Peterman 2012 ; Staton *et al.* 2020 ; Adkison 2021).

4.2.1. Process model

Le modèle de processus vise à représenter la dynamique réelle des populations (c.-à-d. sans erreur de mesure). Cette composante de notre modèle géniteurs-recrutement de type état-espace précise la productivité et la dépendance à la densité. Les abondances du recrutement des saumons roses adultes (R_y) l'année impaire y ont été traitées comme des états non observés et modélisées comme une fonction de l'abondance des géniteurs l'année (S_{y-1}) en supposant une relation géniteurs-recrutement de Ricker (1954) avec une variation du processus log-normale autocorrélée en série :

$$\ln(R_y) = \ln(S_{y-2}) + \ln(\alpha) - \beta S_{y-2} + v_y \quad (1)$$

où α est la productivité (taux de croissance intrinsèque), β est l'ampleur des effets dépendants de la densité dans l'année d'éclosion et v_y reflète la variation interannuelle de la survie de l'œuf à l'âge adulte, que nous appelons les « anomalies de recrutement ». Cette variation est présumée suivre un processus autorégressif avec un décalage de 1 (AR1) dans le temps :

$$\begin{aligned} v_y &= \phi v_{y-2} + \varepsilon_y \\ \varepsilon_y &\sim \mathcal{N}(0, \sigma_R) \end{aligned} \quad (2)$$

où ϕ est le coefficient de corrélation et ε_y reflète la partie de l'anomalie de recrutement v_y qui est temporellement indépendante (c.-à-d. le bruit blanc). La première année de recrutement n'a pas été liée aux observations de l'abondance des géniteurs dans la relation géniteurs-recrutement (équation 1) et ont été modélisées comme des tirages aléatoires à partir d'une distribution log-normale avec la moyenne $\ln(R_0)$ et l'écart-type σ_R^2 . Plutôt que d'estimer $\ln(R_0)$ comme un paramètre libre comme dans Fleischman *et al.* (2013), nous avons choisi de suivre Staton *et al.* (2020) et de fonder sa valeur sur le recrutement prévu dans des conditions d'équilibre sans exploitation $\ln(\alpha)/\beta$.

La prise une année impaire donnée (C_y) a été modélisée comme le produit de la remonte totale et du taux de prise (U_y) de l'année en question :

$$C_y = R_y U_y \quad (3)$$

et l'abondance des géniteurs (S_y) a été modélisée comme la portion du reste R_y après la prise C_y :

$$S_y = R_y(1 - U_y) \quad (4)$$

4.2.2. Modèle d'observation

Nous avons supposé que l'erreur d'observation dans l'abondance des géniteurs variait d'un régime d'évaluation à l'autre, r (tableau 1) :

$$S_y = S_{obs_y} + \sigma_{r,y}^2 \quad (5)$$

puis nous en avons tenu compte directement en supposant que l'abondance observée des géniteurs avait une distribution log-normale et que le coefficient de variation (CV) était converti en variance log-normale conformément à (Forbes *et al.* 2011) :

$$\sigma_{r,y}^2 = \ln(CV_{r,y}^2 + 1) \quad (6)$$

Nous avons supposé un CV de 5 % pour la prise et que les observations de la prise avaient donc également une distribution log-normale, le CV étant converti en variance log-normale selon l'équation 6, puis nous avons remplacé la prise, C , par les géniteurs, S , dans l'équation 5 et abandonné le script, r .

4.2.3. Ajustement et diagnostics du modèle

Nous avons intégré le modèle géniteurs-recrutement dans un cadre d'estimation bayésien avec Stan (Carpenter *et al.* 2017 ; Stan Development Team 2023) qui met en œuvre l'algorithme hamiltonien de demi-tour interdit de la méthode de Monte Carlo par chaînes de Markov (MCCM ; Hoffman et Gelman (2014)) pour l'inférence statistique bayésienne afin de générer la distribution de probabilité a posteriori conjointe de toutes les inconnues du modèle. Nous avons échantillonné 4 chaînes avec 2 000 itérations chacune et éliminé la première moitié comme rodage. Nous avons évalué la convergence des chaînes visuellement au moyen de tracés et en nous assurant que \hat{R} (facteur de réduction d'échelle potentiel ; Vehtari *et al.* (2021)) était inférieur à 1,01 et que la taille effective de l'échantillon était supérieure à 200, ou 10 %, des itérations. Nous avons utilisé des contrôles prédictifs a posteriori pour nous assurer que le modèle renvoyait des données similaires aux données utilisées pour ajuster les paramètres.

Les valeurs a priori étaient généralement non informatives ou peu informatives et sont résumées dans le tableau 3. La valeur a priori β était modérément informative avec une moyenne et une variance de 75 % du nombre maximal de géniteurs observés, ce qui empêche le modèle d'explorer des espaces de paramètres irréalistes de la capacité de charge pour le saumon du Pacifique (D. Greenberg, MPO, Nanaimo, Colombie-Britannique, comm. pers.).

4.3. POINTS DE RÉFÉRENCE BIOLOGIQUES

Nous avons calculé des points de référence biologiques pour chaque échantillon MCCM afin de propager l'incertitude. L'abondance des géniteurs prévue pour maximiser le rendement durable à long terme dans des conditions d'équilibre, S_{RMD} , a été calculée comme suit :

$$S_{RMD} = 1 - W(e^{1-\ln(\alpha)})/\beta \quad (7)$$

où W est la fonction Lambert (Scheuerell 2016) et α et β sont la productivité intrinsèque et l'ampleur de la dépendance à la densité dans les stocks, respectivement. Nous avons choisi d'appliquer cette solution exacte pour S_{RMD} au lieu de l'approximation couramment appliquée de Hilborn (1985) parce que l'approximation ne vaut que pour $0 < \ln(\alpha) \leq 3$, de sorte que des échantillons a posteriori peu fréquents, mais importants, de α peuvent donner des estimations

biaisées de la distribution a posteriori de S_{RMD} . Nous avons utilisé 80 % de S_{RMD} comme PRS, conformément à Holt (2009) et à DFO (2022).

Nous avons utilisé le taux de prise prévu pour atteindre le rendement maximal durable, U_{RMD} , comme TE et l'avons calculé selon la solution proposée par Scheuerell (2016) comme suit :

$$U_{MSY} = 1 - W(e^{1-\ln(\alpha)}) \quad (8)$$

et avons résolu numériquement S_{gn} , l'abondance des géniteurs qui devrait permettre le rétablissement des stocks à S_{RMD} en une génération en l'absence de pêche (Holt 2009), que nous avons considérée comme le PRL, selon la formule suivante :

$$S_{RMD} = S_{gn}\alpha e^{-\beta S_{gn}} \quad (9)$$

Nous avons estimé l'abondance des géniteurs à l'équilibre (S_{qu}), où le recrutement remplace exactement les géniteurs, comme suit :

$$S_{qu} = \ln(\alpha)/\beta \quad (10)$$

4.4. CADRE DE SIMULATION EN BOUCLE FERMÉE

Nous avons mis au point une simulation prospective simple en boucle fermée, conditionnée par nos estimations de l'abondance historique des géniteurs et les points de référence biologiques illustrés à la Figure 6. Nous avons utilisé cette simulation pour projeter le stock dans le temps et évaluer le rendement biologique et halieutique de la RCP actuelle et d'une autre RCP à titre indicatif. Des détails sur les composantes du modèle et le calcul du rendement sont présentés ci-après.

4.4.1. Sous-modèle biologique

Étant donné que les résidus du recrutement avaient tendance à être négatifs au cours des dernières générations ((Figure 7) et que le potentiel de reproduction a probablement diminué au fil du temps en raison de la diminution des tailles ((Figure 5), nous avons choisi de réajuster une version du modèle décrite dans l'équation 2 avec une productivité intrinsèque variable dans le temps qui pourrait ensuite être utilisée pour conditionner le sous-modèle biologique pour la simulation prospective. Plus précisément, nous avons laissé le paramètre α évoluer dans le temps comme une marche aléatoire, ce qui a donné des estimations annuelles de la productivité :

$$\begin{aligned} \alpha_y &= \alpha_{y-2} + \varepsilon_y \\ \varepsilon_y &\sim \mathcal{N}(0, \sigma_\alpha) \end{aligned} \quad (11)$$

et dans lesquelles les anomalies du recrutement n'ont plus été modélisées comme autocorrélées, mais où tous les autres paramètres de l'équation 2 sont autrement demeurés les mêmes. Nous avons simulé les trajectoires futures des stocks en commençant par l'estimation la plus récente (c.-à-d. l'état latent) des géniteurs et l'estimation médiane de la productivité sur les trois dernières générations, puis en reproduisant le modèle de processus dans le temps pour cinq générations de saumon rose (10 ans). Nous l'avons fait 1 000 fois pour nous assurer que l'incertitude dans les relations géniteurs-recrutement était propagée en traçant les distributions a posteriori conjointes des paramètres estimés dans chaque itération de la simulation.

4.4.2. Sous-modèle halieutique

Pour chaque année impaire de la simulation, nous avons supposé que les remontes totales prévues de saumon rose étaient estimées avec une erreur. Cette erreur était présumée avoir une distribution log-normale avec une moyenne égale à la remonte réelle et un CV de 64 % d'après une évaluation rétrospective des prévisions d'avant-saison fournies par la CSP pour les années 1987 à 2021. Nous avons ensuite utilisé les remontes prévues comme intrant dans la RCP qui définissait le taux d'exploitation cible compte tenu de la remonte prévue. L'incertitude des résultats (c.-à-d. les écarts par rapport à la prise ciblée) a ensuite été appliquée pour calculer la prise réalisée et l'abondance des géniteurs. Nous avons supposé que cette incertitude des résultats avait une distribution log-normale autour de la prise cible avec un CV de 10 %.

En plus d'évaluer la RCP actuelle, nous en avons également envisagé une autre à titre informatif, ainsi qu'un scénario sans pêche. L'autre RCP est conforme au Cadre de l'approche de précaution (AP) de Pêches et Océans Canada (DFO (2009) ; Figure 2). Pour cette autre RCP (« RCP de rechange conforme à l'AP »), le point de contrôle opérationnel (PCO) inférieur est fixé à notre estimation médiane de S_{gn} en dessous de laquelle le taux d'exploitation cible est de zéro, et un PCO supérieur est réglé à la remonte associée à notre estimation médiane de 80 % de S_{RMD} , où le taux d'exploitation cible maximum est fixé à notre estimation médiane du TE ou U_{RMD} . Le taux d'exploitation cible était interpolé de façon linéaire pour les remontes situées entre le PCO inférieur et le PCO supérieur. Une conséquence imprévue de cette solution de rechange est que l'abondance cible des géniteurs correspondante diminue légèrement à mesure que la remonte se rapproche du PCO supérieur, ce qui n'est pas souhaitable et pose problème sur le plan de la mise en œuvre pratique de la gestion. Pour l'éviter, de légères variations de ce type de RCP ont été utilisées pour le saumon rouge du Fraser (Pestal *et al.* 2012).

4.4.3. Mesures du rendement

Nous avons quantifié le rendement attendu des RCP par rapport aux objectifs biologiques et halieutiques et aux mesures quantitatives du rendement connexes (Tableau 2). Les objectifs biologiques étaient la réduction de la probabilité que l'abondance des géniteurs tombe en dessous du PRL (S_{gn}) et la maximisation de la probabilité que le stock maintienne une abondance de géniteurs supérieure au PRS (80 % de S_{RMD}) et qu'il soit donc dans un état « sain » ou souhaitable. Les valeurs utilisées pour ces points de référence biologiques reposaient sur les distributions a posteriori conjointes des paramètres estimés dans chaque itération de la simulation, ce qui a permis de tenir compte explicitement de l'incertitude entourant ces points de référence dans les calculs des mesures du rendement. Les pourcentages indiqués sont simplement le pourcentage d'années de simulation qui se situent au-dessus ou en dessous d'un point de référence (p. ex. si une seule année de géniteurs dans une simulation est au-dessus ou en dessous du point de référence, elle est comptée).

Les objectifs halieutiques étaient la maximisation de la prise moyenne et de la stabilité interannuelle de la prise, et la maximisation de la probabilité que la prise annuelle se situe au-dessus d'un niveau minimal de l'indice des prises qui, à des fins d'illustration, a été choisi comme la prise moyenne des trois prises les plus élevées depuis 2001 (c.-à-d. un indicateur d'une « bonne » année de pêche).

4.4.4. Test de robustesse

Nous avons utilisé un test de robustesse pour évaluer la sensibilité du rendement de la RCP à une situation potentielle où la productivité intrinsèque future du stock de saumon rose du Fraser

diminuait beaucoup plus en raison, par exemple, d'importants changements dans la survie en mer ou en eau douce. À cette fin, nous avons simplement conditionné notre sous-modèle biologique à l'aide de tirages de la distribution a posteriori conjointe des paramètres de Ricker (c.-à-d. α , β , σ) associés au dixième centile inférieur de la distribution a posteriori médiane des trois dernières générations du paramètre de productivité (α), les tirages de l'état de départ (c.-à-d. les géniteurs en 2023) et les points de référence étant échantillonnés à partir de la distribution a posteriori complète.

5. RÉSULTATS

5.1. AJUSTEMENT ET DIAGNOSTICS DU MODÈLE

L'inspection visuelle des tracés a révélé que toutes les chaînes étaient bien mélangées pour les paramètres principaux, que tous les paramètres avaient un $\hat{R} < 1,01$ (maximum de 1,003), que la taille effective des échantillons était > 10 % des tirages (minimum de 39 % dans un modèle variable dans le temps), dénotant une convergence raisonnable du modèle, et que des contrôles prédictifs a posteriori qui ressemblaient aux données avaient été utilisés pour ajuster le modèle. (Voir à l'annexe A des détails sur l'environnement informatique et sur la reproduction de l'analyse, ainsi qu'un lien vers un supplément décrivant les ajustements du modèle.)

5.2. POINTS DE RÉFÉRENCE BIOLOGIQUES, ÉTAT ET TENDANCES DES STOCKS

Les moyennes a posteriori, les médianes et les intervalles crédibles à 80 % pour les principaux paramètres géniteurs-recrutement et les points de référence biologiques sont résumés dans le Tableau 4. Nous avons constaté que le stock de saumon rose du Fraser est moyennement productif, la productivité intrinsèque (α) étant estimée à 3,94 (de 3,02 à 5,02 recrues par géniteur ; intervalle médian et crédible à 80 %) et la taille du stock à l'équilibre S_q , qui est une fonction de la productivité intrinsèque (α) et de la force de la dépendance à la densité dans le stock (β), étant estimée à 14,1 M (de 11,41 à 18,48 M). Nous avons estimé que les anomalies du recrutement étaient faiblement corrélées positivement dans le temps, avec la valeur de ϕ estimée à 0,06 (de -0,09 à 0,31) sans forte tendance temporelle, bien que les quatre dernières années d'éclosion aient toutes été négatives (Figure 7). Les estimations de la productivité variable selon le temps indiquent une baisse à partir des années 1980 (8), avec la productivité médiane des trois dernières générations estimée à 2,27 (de 1,44 à 3,62).

En raison de la faible dépendance à la densité, le rendement prévu (c.-à-d. la production « excédentaire » au-dessus du remplacement) et le recrutement étaient relativement stables avec un large éventail d'abondances des géniteurs (Figure 9). L'abondance des géniteurs qui devrait maximiser le rendement durable à long terme (S_{RMD}) a néanmoins été estimée à 5,75 M, ce qui donne un PRS de 80 % de S_{RMD} de 4,6 M (de 3,64 à 6,11 M). Le TE, U_{RMD} (équation 8), a été estimé à 0,56 (de 0,47 à 0,63) et, enfin, le PRL, $S_{g\acute{e}n}$, à 1,72 M (de 1,1 à 2,7 M).

L'historique de l'état du stock de saumon rose du Fraser peut être visualisé comme une « courbe de Kobe », une façon courante de visualiser l'état du stock dans le temps par rapport aux points de référence fondés sur la biomasse (ou l'abondance) et le taux d'exploitation. La courbe de Kobe pour le saumon rose du Fraser (Figure 10) montre que le stock avait été surexploité et l'était encore (c.-à-d. prises supérieures à U_{RMD} , avec des géniteurs en dessous de S_{RMD}) au début de la série chronologique en 1959 et que cette situation s'est généralement poursuivie

jusqu'à l'adoption du régime de gestion actuel en 1987. La surpêche était peut-être due, du moins en partie, à la pêche à la traîne qui apprenait à capturer des saumons roses dans les eaux extérieures, et cette surexploitation a été reconnue en 1957 lorsque la Commission internationale des pêches du saumon du Pacifique a été chargée de gérer les pêches du saumon rose du Fraser partagées par les États-Unis et le Canada (Ricker 1989). Depuis, les prises ont diminué et le stock est remonté à des niveaux plus élevés d'abondance des géniteurs (Figure 3), avec certaines années intermédiaires où le stock a été surexploité lorsque l'abondance était forte (quadrant supérieur droit, Figure 10) et sous-pêché lorsqu'elle était faible (quadrant inférieur gauche, Figure 10). Dans l'ensemble, la courbe de Kobe permet de penser que le stock est actuellement sous-exploité, mais il peut être difficile d'atteindre l'objectif de prise défini dans la RCP en raison d'autres considérations de gestion.

L'observation la plus récente (2023) de l'abondance des géniteurs pour le saumon rose du Fraser est de 9,58 M, un chiffre bien au-dessus du PRS de 80 % de S_{RMD} , indiquant que le stock est dans un état « sain » (Figure 11). Cet état sain du stock est conforme à l'outil d'évaluation rapide de la situation de la Politique concernant le saumon sauvage qui tient compte de la qualité des données et de différents paramètres (Pestal *et al.* 2023) et qui a évalué le stock comme étant dans le vert avec un niveau de confiance élevé ([Supplement A](#)).

t

5.3. RENDEMENT DE LA RÈGLE DE CONTRÔLE DES PRISES

Nous avons constaté que la RCP existante pour le saumon rose du Fraser présente une très faible probabilité (S_{gn} , 4,28 %) que le stock tombe sous son PRL et une probabilité relativement élevée (80 % de S_{RMD} , 87,54 %) que l'abondance des géniteurs soit supérieure au PRS dans les 10 prochaines années (Tableau 5 ; Figure 12). En supposant que les pêches utilisent pleinement la prise permise, ce qui pourrait ne pas être le cas si la pêche du saumon rose est restreinte afin de limiter les répercussions sur les espèces non ciblées, la prise annuelle médiane devrait être de 10,3 millions de poissons. On prévoit que les prises seront supérieures à l'indice des « bonnes prises » (6,31 millions ; un indicateur semi-arbitraire d'une « bonne année » fondé sur la moyenne des trois prises les plus importantes depuis l'an 2000) environ 64,3 % des années. En revanche, la RCP de rechange, à titre informatif, conforme à l'approche de précaution, présentait une probabilité légèrement plus élevée que le stock tombe sous le PRL (5,16 % contre 4,28 %) et donnait des résultats semblables pour l'abondance de géniteurs supérieure au PRS (87,46 % contre 87,54 % ; tableau 5 ; Figure 12). Ces risques biologiques légèrement plus grands correspondaient à 1,5 million de poissons de moins capturés selon la RCP de rechange. Comparativement à la RCP actuelle, le scénario sans pêche augmentait la probabilité d'être au-dessus du PRL et du PRS de 0,32 et de 5,6 %, respectivement (Tableau 5 ; Figure 12).

Le rendement dans le scénario de faible productivité, où la productivité récente était ramenée à son 10^e centile inférieur, a montré que les différentes RCP ont un rendement relativement semblable, mais avec un risque biologique accru et moins de prises. Le pourcentage de simulations inférieures à S_{gn} ou supérieures à 80 % de S_{RMD} a passé à environ 15 % de plus de zones plus risquées, avec des prises inférieures à la moitié de ce qu'elles étaient dans le scénario de base (Tableau 5). La RCP de rechange avait un rendement relativement pire que la RCP actuelle dans le scénario de faible productivité. Avec la RCP de rechange, le nombre de simulations avec une abondance de géniteurs inférieure à S_{gn} a quadruplé et le nombre de simulations avec une abondance de géniteurs supérieure à 80 % de S_{RMD} a été réduit à 72 % du nombre dans le

scénario de base, alors qu'avec la RCP actuelle, le nombre en dessous de S_{gn} est doublé et le nombre de simulations au-dessus de S_{RMD} est réduit de 84 %.

6. DISCUSSION

6.1. SOMMAIRE DES PRINCIPALES CONSTATATIONS

Dans ce document de recherche, nous examinons brièvement notre compréhension actuelle de la structure et de la répartition des stocks de saumon rose du fleuve Fraser, l'historique de l'évaluation et les facteurs écosystémiques et climatiques qui ont une incidence sur les stocks. Nous avons ensuite ajusté un modèle géniteurs-recrutement de type état-espace aux données disponibles afin de caractériser la dynamique des stocks et d'estimer des points de référence biologiques pour évaluer l'état des stocks. Nous avons enfin élaboré un modèle simple de simulation en boucle fermée fondé sur des estimations récentes de la productivité afin de quantifier le rendement biologique et halieutique futur prévu de la règle actuelle de contrôle des prises (RCP), d'une autre RCP à titre indicatif et d'un scénario sans pêche.

Les saumons roses du Fraser des années impaires frayent dans tout le bassin du Fraser et constituent une seule unité de conservation, bien qu'il y ait des preuves de différences dans le cycle biologique entre les populations qui frayent dans le haut Fraser et le bas Fraser (en amont et en aval de Hells Gate). Des glissements de terrain se sont produits dans tout le Fraser et ont causé des obstacles à la montaison des adultes à différentes périodes, le plus notable étant celui de Hells Gate en 1914 et, plus récemment, le glissement de terrain de Big Bar en 2018-2019. La survie en mer du saumon rose du Fraser est associée à la température de la surface de la mer au début de la vie marine, au moment de l'efflorescence printanière et au courant du Pacifique Nord, qui sont tous des indices de conditions océanographiques physiques et biologiques qui ont probablement des effets sur la production, le transport et la disponibilité des proies au début de la vie en mer. La taille des adultes a diminué au fil du temps, ce qui coïncide avec l'augmentation de l'abondance des saumons dans le Pacifique Nord, qui pourrait avoir une incidence sur le taux de reproduction puisque la fécondité est proportionnelle à la taille des femelles.

Nous avons constaté que le stock de saumon rose du Fraser est modérément productif, avec une productivité intrinsèque (α) estimée à 3,94 (de 3,02 à 5,02 recrues par géniteur) et un stock à l'équilibre S_q égal à 14,1 M (de 11,41 à 18,48 M). Nous avons estimé que le PRS de 80 % de S_{RMD} s'établit à 4,6 M (de 3,64 à 6,11 M) et que le point de référence limite $S_{gén}$ est de 1,72 M (de 1,1 à 2,7 M). L'observation la plus récente (2023) de l'abondance des géniteurs pour le saumon rose du Fraser est de 9,58 M, un chiffre bien au-dessus du 90e centile de l'estimation du PRS ; on en déduit que le stock est « sain », ce qui est conforme à l'outil d'évaluation rapide de la situation de la Politique concernant le saumon sauvage, qui a évalué le stock comme étant dans la zone d'état « verte » de cette Politique avec un degré de confiance élevé.

Un modèle de productivité variable dans le temps utilisé pour conditionner la simulation prospective a montré que la productivité des saumons roses du Fraser diminue depuis les années 1980, ce qui coïncide à peu près avec le début du déclin de la taille moyenne des adultes en montaison. La productivité des dernières années est proche de la moitié de ce qu'elle était à son pic dans les années 1980.

Nous avons constaté que la RCP existante pour le saumon rose du Fraser présente une très faible probabilité (< 4,28 %) que le stock tombe sous son point de référence limite et une probabilité

relativement élevée (87,5 %) que l'abondance des géniteurs soit supérieure au PRS dans les 10 prochaines années. En supposant que les pêches utilisent pleinement la prise permise, ce qui pourrait ne pas être le cas si la pêche du saumon rose est restreinte afin de, par exemple, limiter les répercussions sur les espèces non ciblées, la prise annuelle moyenne devrait être de 10,3 M sur la même période. L'évaluation d'une autre RCP à titre indicatif, qui est strictement conforme au Cadre de l'approche de précaution du MPO, a donné un rendement biologique semblable pour une prise légèrement inférieure. Comparativement à la RCP existante, un scénario sans pêche indiquait que 0,3 % et 5,6 % des simulations étaient supérieures au PRL et au PRS, respectivement.

D'après le test de robustesse de l'actuelle RCP, si la productivité des stocks devait chuter fortement ou être déprimée pendant une période prolongée, la RCP actuelle aurait une probabilité d'environ 5 % plus élevée de tomber en dessous du PRL, une probabilité d'environ 14 % plus grande de tomber en dessous du PRS dans la zone « ambre » et environ 7 M de poissons de moins capturés que dans le scénario de référence. La RCP de rechange, strictement conforme à l'AP, donnait des résultats relativement pires que la RCP actuelle dans le test de robustesse, peut-être en raison des taux d'exploitation plus élevés autorisés pour des remontes intermédiaires. Pour atténuer ces risques, une option à explorer à l'avenir pourrait être d'utiliser une version dynamique de notre RCP de rechange, dans laquelle le taux d'exploitation de référence U_{RMD} varie en fonction des estimations actuelles de la productivité variable dans le temps.

In this research document we briefly review our current understanding of Fraser River Pink Salmon stock structure and distribution, assessment history, and ecosystem and climate factors affecting the stock. We then fit a state-space spawner-recruitment model to available data to characterize stock dynamics, and derive estimates of biological benchmarks to assess stock status. Lastly, we developed a simple closed-loop simulation model based on recent productivity estimates to quantify future expected biological and fishery performance of the current, an illustrative alternative HCR, and a no fishing scenario.

Odd year Fraser Pinks spawn throughout the Fraser Basin and comprise a single Conservation Unit though there is evidence of life history differences between populations that spawn in the upper and lower Fraser River (above and below Hells Gate). Landslides have occurred throughout the Fraser causing migratory impediments that have impacted returning adult salmon at different periods with the most notable being Hells Gate in 1914 and more recently the Big Bar Landslide in 2018/19. Fraser Pink Salmon marine survival is associated with sea-surface temperatures during early marine life, spring bloom timing and the North Pacific Current, all of which index physical and biological oceanographic conditions that likely affect prey production, transport, and availability during early marine life. Adult body size has declined over time, coincident with increasing abundances of salmon in the North Pacific, which has the potential to impact reproductive output as fecundity scales with female size.

6.2. MISES EN GARDE ET HYPOTHÈSES

Les mesures du rendement des simulations prospectives doivent être interprétées avec prudence pour plusieurs raisons. Premièrement, nos mesures de rendement sont calculées pour l'ensemble des cinq générations de simulations et ne reflètent donc pas un rendement à court terme plus précis, comme le montrent les figures des trajectoires (p. ex. la prise médiane relativement plus élevée avec la RCP actuelle pourrait être attribuable à un gain à court terme dans les prises en 2025). Deuxièmement, nous avons posé l'hypothèse simplificatrice selon laquelle l'erreur de prévision et l'incertitude des résultats avaient une distribution log-normale et normale entre

les remontes, respectivement. Lorsque l'on prévoit des remontes faibles, il se peut qu'il n'y ait pas de données supplémentaires sur la pêche commerciale pour étayer les ajustements en cours de saison (Hague *et al.* 2022). La petite taille des échantillons dans les prises de saumon rose pourrait également transmettre l'incertitude par les diverses méthodes d'estimation de la taille des stocks : pêches d'essai, analyses de la CPUE, identification génétique des stocks et programme hydroacoustique (Hague *et al.* 2021). La petite taille de l'échantillon et le faible effort de pêche peuvent exacerber l'erreur de prévision lorsque la remonte est peu nombreuse, risquant de contredire notre hypothèse selon laquelle l'erreur de prévision est constante entre les remontes. Troisièmement, l'incertitude des résultats (c.-à-d. la mesure dans laquelle vous vous rapprochez du taux d'exploitation cible) peut être inférieure à celle prévue pour des raisons de gestion pratique (p. ex. réduction de l'effort de pêche du saumon rose pour protéger les populations de saumons rouges en péril). De plus, le prix du saumon rose est si bas ces dernières années que cette exploitation n'est peut-être pas économiquement viable pour les pêcheurs commerciaux. Ensemble, ces raisons pour réduire l'effort de pêche peuvent fausser vers la droite la forme de l'incertitude réelle des résultats, étant donné que les pêches ne capturent généralement pas leur total autorisé des captures. Il est donc important de considérer les valeurs du Tableau 5 comme des mesures du rendement relatives et non absolues ; les prises pourraient ne pas être réalisées en raison de divers facteurs de gestion.

6.3. CIRCONSTANCES EXCEPTIONNELLES OU DÉCLENCHEURS D'ÉVALUATION POUR LE STOCK

Les circonstances exceptionnelles sont des déclencheurs d'évaluation visant à déterminer de façon proactive les conditions ou les circonstances qui peuvent représenter un écart important par rapport à celles en vertu desquelles l'avis présenté dans la présente évaluation a été élaboré (c.-à-d. réévaluer les hypothèses du modèle). En plus d'une réévaluation de routine toutes les deux générations pour actualiser l'état des stocks et tenir compte des processus halieutiques et biologiques contemporains, nous recommandons de déclencher une réévaluation si l'un des événements suivants se produit :

- La productivité des stocks change radicalement, l'estimation médiane de la productivité variable dans le temps (α annuel de Ricker) se situe à l'extérieur du 50^e centile (de 1,8 à 2,93) de la productivité médiane sur trois générations utilisée pour conditionner notre simulation prospective ;
- De nouveaux renseignements disponibles entraînent des variations dans les séries chronologiques historiques de l'abondance des géniteurs et des prises utilisées dans le présent document de recherche ;
- De nouveaux renseignements disponibles modifient notre compréhension de la structure des stocks (p. ex. l'unité de conservation actuelle est divisée en deux) ou des facteurs importants de la dynamique des stocks. Enfin, si la Direction de la gestion des pêches envisage de modifier la RCP existante ou de réviser les objectifs de pêche par rapport auxquels elle doit être évaluée, il faudra revoir le modèle d'évaluation et le cadre de simulation en boucle fermée que nous décrivons pour vérifier qu'ils reflètent adéquatement les attributs clés nécessaires pour étayer la prise de décisions.

6.4. DOMAINES DE TRAVAIL FUTURS POSSIBLES

- *Élaborer un modèle de cycle biologique du saumon rose du Fraser.* Depuis 1984, l'abondance des alevins roses du Fraser est dénombrée près de Mission et des méthodes grossières

ont été utilisées pour estimer la migration annuelle. L'élaboration d'un modèle du cycle biologique qui répartit la dynamique dans l'eau douce et en mer et tient compte explicitement de l'évolution du potentiel de reproduction (en raison de la diminution de la taille, de la modification de la survie en mer ou de la survie de l'œuf à l'alevin) permettrait une prise en compte plus explicite des facteurs écosystémiques et climatiques de la dynamique des stocks et leur intégration dans l'estimation des points de référence et l'évaluation de l'état des stocks. Lorsqu'ils sont utilisés pour conditionner le sous-modèle biologique dans les simulations en boucle fermée, ces facteurs de la dynamique propre à chaque stade biologique peuvent ensuite être pris en compte explicitement dans l'évaluation du rendement de la RCP. L'ajout d'une productivité variable dans le temps ou des tendances de la survie en mer, puis l'association de ces éléments avec des données environnementales, nous permettra d'explorer les processus qui influent sur la survie à certains stades.

- *Améliorer la compréhension des changements dans la répartition spatiale des géniteurs adultes.* La dernière évaluation détaillée des changements dans la répartition spatiale du saumon rose du Fraser a été effectuée par Pess *et al.* (2012) avec les données au niveau des affluents de 1947 à 1987. Depuis, il n'y a pas eu d'évaluation officielle de l'abondance des géniteurs au niveau des affluents, mais on dispose de preuves anecdotiques de changements continus de la répartition spatiale des saumons roses reproducteurs. Cette information pourrait être compilée, avec les observations de projets d'évaluation axés sur d'autres espèces, afin de réexaminer de façon critique notre compréhension de la dynamique spatiale du saumon rose du Fraser et de ses répercussions sur l'état des stocks et les attentes en matière de production future.
- *Adapter le modèle de simulation en boucle fermée pour mieux refléter la dynamique contemporaine de la pêche.* Le sous-modèle halieutique que nous avons élaboré est extrêmement simple et ne reflète pas un certain nombre de processus potentiellement importants qui pourraient avoir une incidence sur les résultats des pêches, notamment l'influence d'autres espèces non ciblées, comme le saumon rouge du Fraser, dont l'abondance réduite ces dernières années a entraîné des restrictions sur les pêches ciblant le saumon rose du Fraser qui migre en même temps. Ces restrictions des pêches de stocks faibles signifient que notre caractérisation du rendement biologique et halieutique de la RCP actuelle peut être pessimiste en ce qui concerne le risque de conservation et optimiste en ce qui concerne le rendement des pêches. Un modèle opérationnel plurispécifique dans nos simulations en boucle fermée, qui intègre explicitement ou implicitement la dynamique contemporaine du saumon rouge du Fraser, et un sous-modèle halieutique révisé qui tient compte des facteurs du saumon rouge en péril, pourrait être mis au point pour permettre une évaluation plus réaliste du rendement de la RCP.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

Nous sommes reconnaissants envers les nombreux techniciens et biologistes qui recueillent des données sur les saumons roses du Fraser depuis plus de 60 ans. Nous remercions Dan Greenberg pour ses conseils analytiques, Angus Straight qui nous a fourni le contexte des écloséries, Maxime Veilleux et Colin Schwindt qui ont décrit l'allocation de prises actuelle. Matt Townsend, Sue Grant, Steve Latham, Catherine Michielsens, Adam Keizer, Mike Hawkshaw, Merran Hague et Luke Rogers ont fourni un contexte et des commentaires utiles sur une version antérieure du présent document. Nous remercions Teri Tarita de son aide pour accéder à la

documentation historique sur la justification des objectifs actuels en matière d'abondance des géniteurs et nous lui souhaitons une heureuse retraite.

8. FIGURES

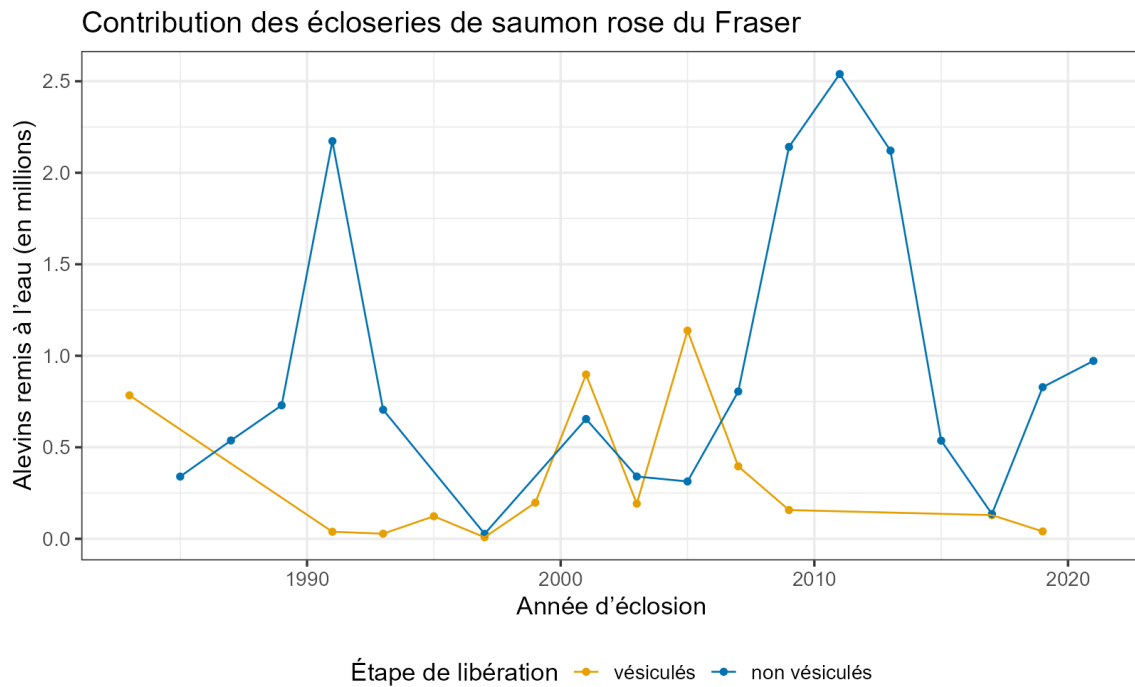


Figure 1. Nombre d'alevins de saumon rose du Fraser remis à l'eau. Les données ne comprennent que les remises à l'eau de poissons sur lesquels les œufs ont été retirés manuellement et les œufs placés dans des boîtes de rétention (c.-à-d. qu'elles ne comprennent pas la descendance des poissons qui ont frayé naturellement dans des chenaux de fraie construits près des écloséries).

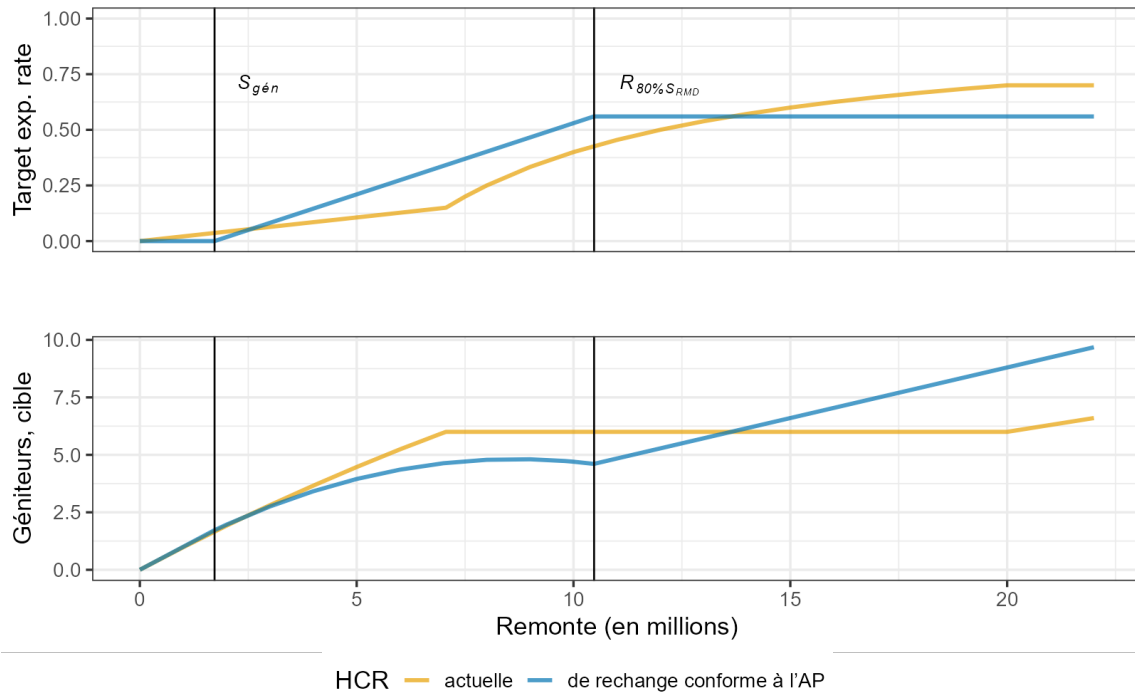


Figure 2. Règles de contrôle des prises (RCP) actuelle et de rechange (RCP de rechange conforme à l'AP). Le panneau du haut est la RCP qui établit un lien entre la prise cible et la remonte, et le panneau du bas illustre l'échappée cible en fonction de la remonte. Les lignes verticales désignent le point de référence de limite (S_{gn}) et le point de référence supérieur du stock (80 % de S_{RMD}), en unités de remonte.

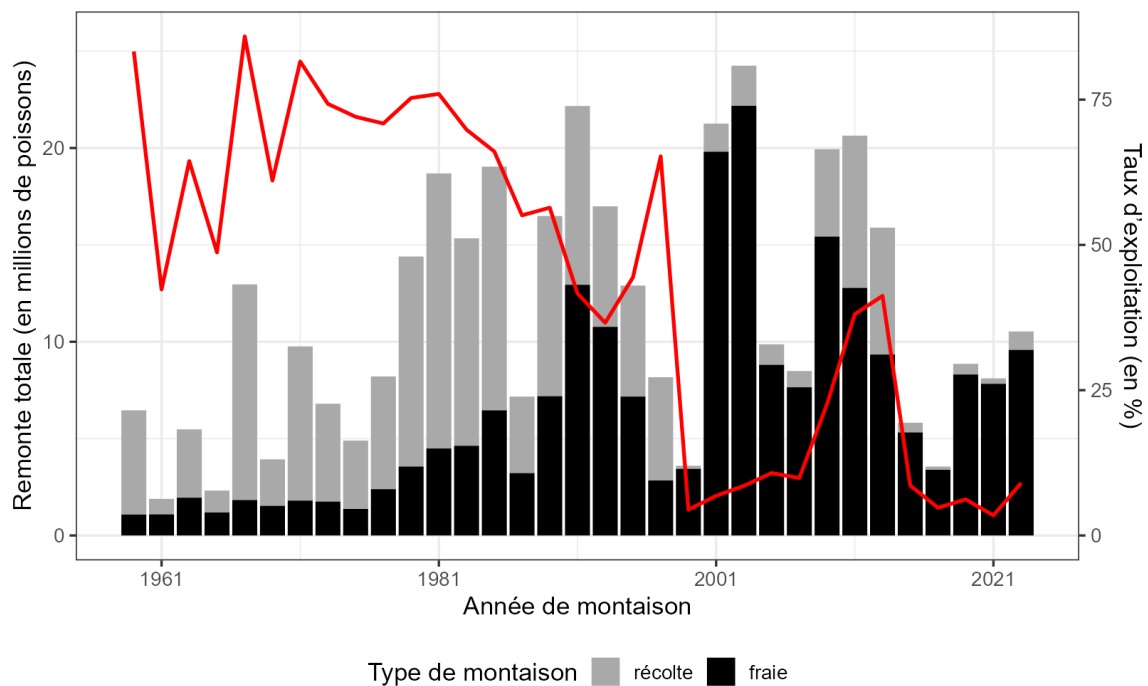


Figure 3. Échappée de géniteurs et prises de 1959 à aujourd'hui. Le taux d'exploitation obtenu est indiqué en rouge sur l'axe des y secondaire.



Figure 4. Bassin du Fraser, étendue de la répartition de la fraie du saumon rose (en rouge) et emplacements approximatifs du site hydroacoustique de Mission, de Hells Gate et de Big Bar. Carte adaptée de (Grant et al. 2014).

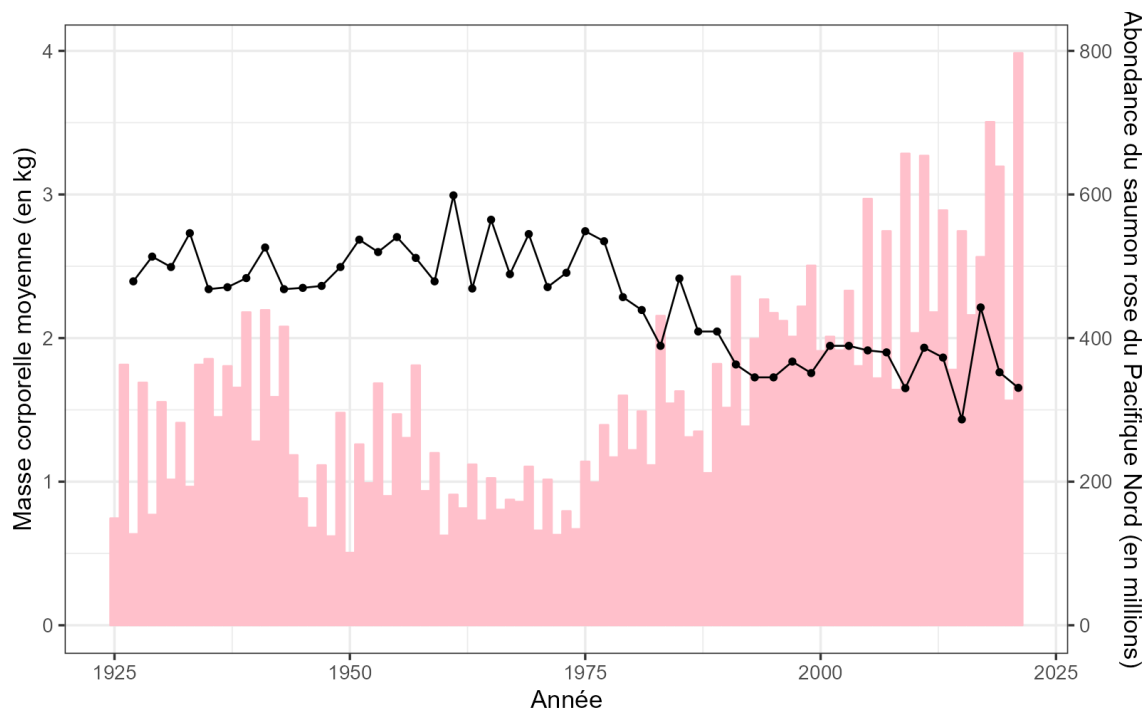


Figure 5. Masse corporelle moyenne (en kg) du saumon rose du Fraser dans le temps et remontes totales de saumon rose dans le Pacifique Nord, de 1925 à ce jour. Les données sur la masse corporelle proviennent de la Pacific Salmon Commission (2023) et les séries chronologiques sur l'abondance du saumon rose dans le Pacifique Nord sont tirées de (Ruggerone et Irvine 2018) et actualisées jusqu'à présent.

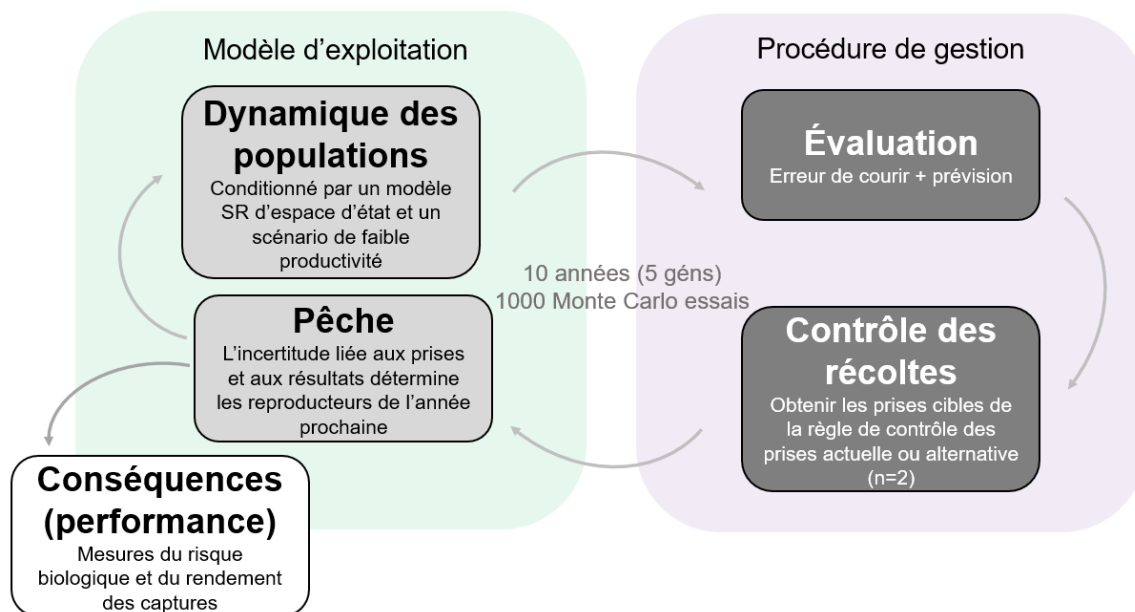


Figure 6. Illustration des étapes de la simulation prospective mettant en évidence d'autres scénarios de la dynamique des populations et des règles de contrôle des prises.

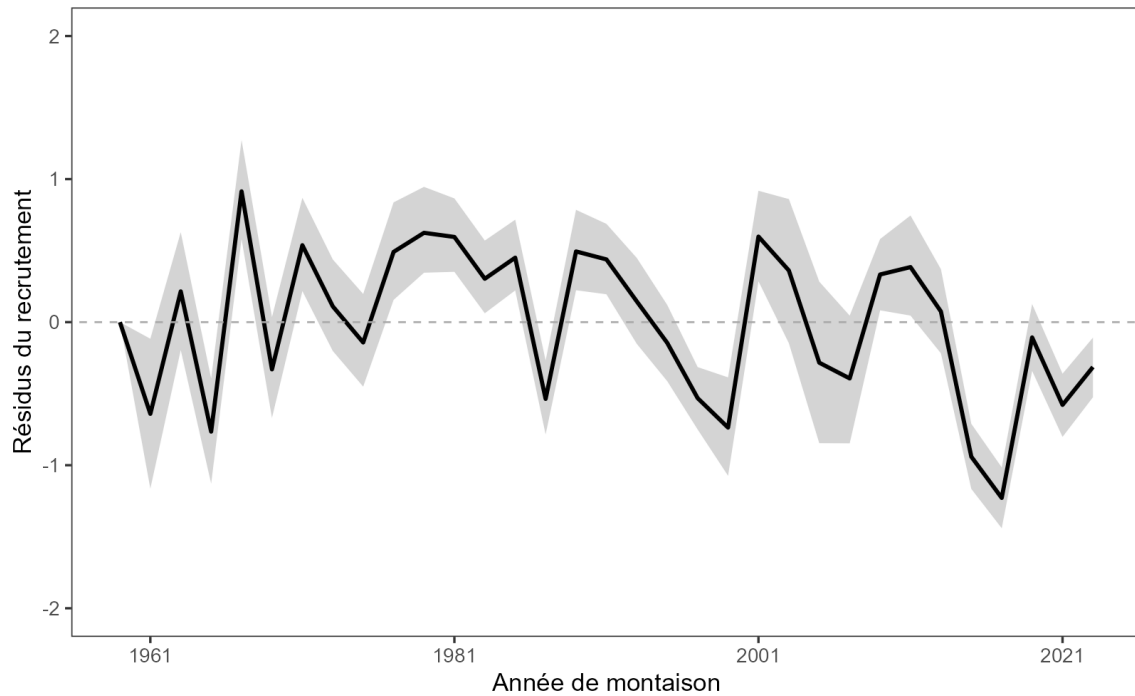


Figure 7. Résidus du recrutement de la relation géniteurs-recrutement pour le saumon rose du Fraser dans le temps. La ligne noire épaisse représente les estimations médianes et la bande ombrée, le 80e centile.

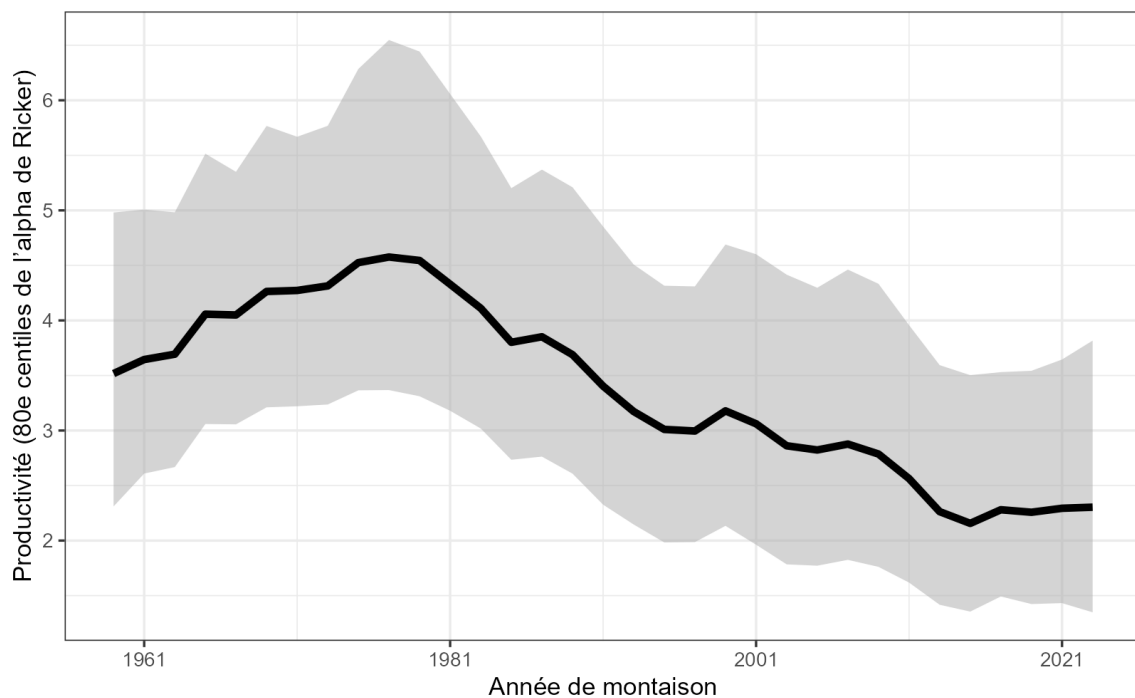


Figure 8. Ajustement de la productivité variable dans le temps (paramètre α de Ricker) au modèle utilisé pour projeter la dynamique de la population dans l'avenir dans la simulation en boucle fermée.

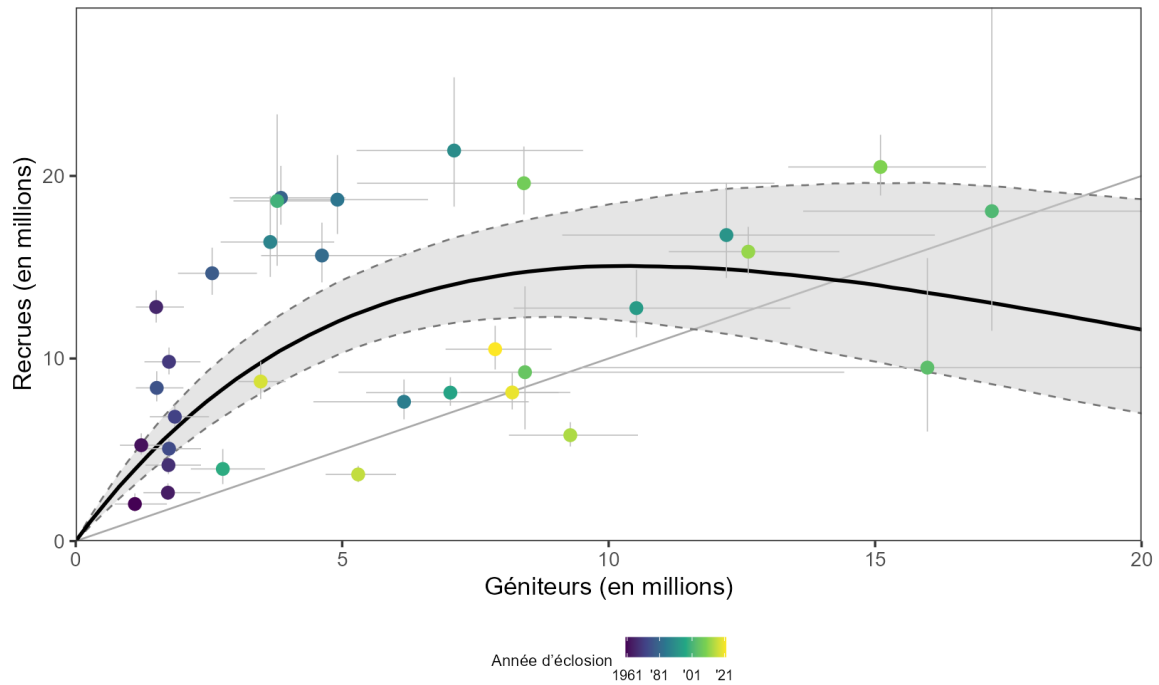


Figure 9. Relation géniteurs-recrutement pour le saumon rose du Fraser. Les barres d'erreur autour des points, qui sont codés par couleur par année d'éclosion, et la relation sont les intervalles crédibles à 80 %, tandis que la ligne noire épaisse est la relation prévue.

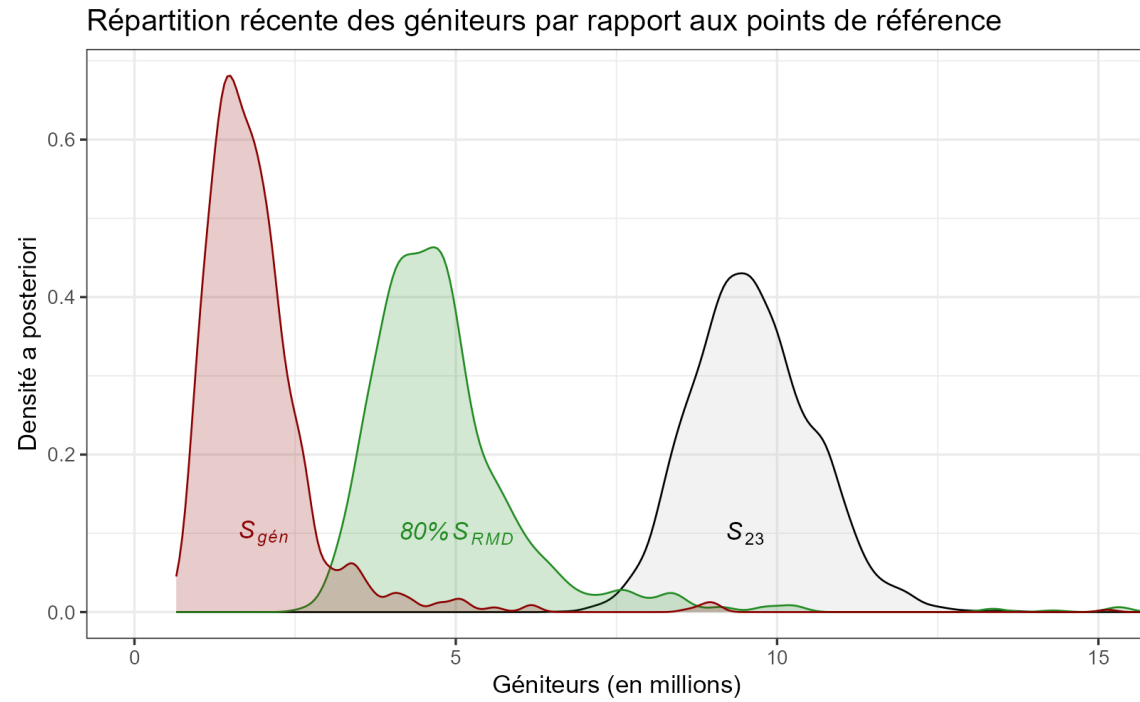


Figure 11. Distributions a posteriori des points de référence possibles S_{gn} , du PRL (en rouge), S_{RMD} , du PRS (en vert) et de l'état latent des géniteurs de la génération la plus récente (2023, en noir).

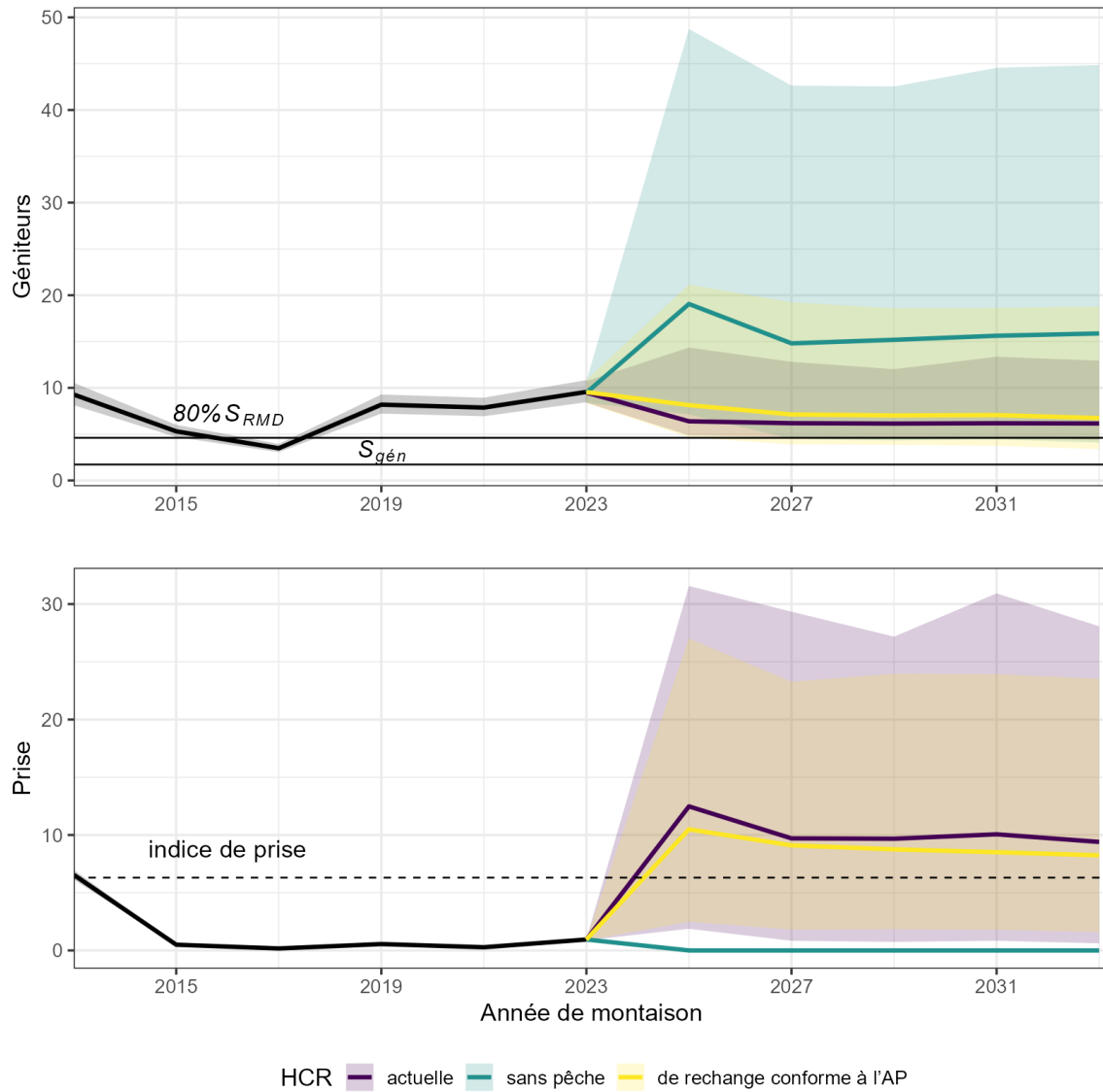


Figure 12. Nombre projeté de géniteurs et prises de saumon rose du Fraser (tous les deux en millions de poissons, avec des lignes ombrées et colorées) dans les 10 prochaines années, lorsque la RCP actuelle ou de rechange est appliquée. Les données historiques sur les échappées et les prises (en noir) sont incluses à titre de référence. Les polygones ombrés sont les intervalles crédibles à 80 % et les lignes continues sont les médianes. L'indice des prises dans le panneau de droite est défini comme la moyenne des trois principales années de prises de 2001 à aujourd'hui.

9. TABLEAUX

Tableau 1. Récapitulatif des changements dans les méthodes utilisées pour évaluer l'échappée de géniteurs dans le temps et coefficients de variation (CV) présumés pour chaque période qui ont été utilisés pour définir l'ampleur de l'erreur d'observation dans le modèle géniteurs-recrutement de type état-espace.

Années	Méthode d'évaluation	CV
De 1957 à 1961	Début du marquage-recapture propre au réseau par la Commission internationale des pêches du saumon du Pacifique (CIPSP, actuellement connue sous le nom de Commission du saumon du Pacifique, CSP) : faible effort de marquage	35 %
De 1963 à 1991	Évaluation par marquage-recapture dans le cours principal par le MPO en aval des principales frayères	25 %
De 1993 à 2001	Évaluation par marquage-recapture dans le cours principal par le MPO en aval des principales frayères	20 %
De 2003 à 2007	Pêche d'essai par la CSP : échappée dérivée des senneurs dans les données maritimes et sur les prises	50 %
De 2009 à maintenant	Sonar de la CSP à Mission	10 %

Tableau 2. Mesures du rendement biologique et halieutique utilisées dans les simulations en boucle fermée pour évaluer le rendement de la RCP.

Paramètre	Description	Équation
% simulations répétées < PRL	Probabilité que l'abondance des géniteurs du stock soit inférieure au point de référence limite dans les simulations répétées et les années, où n_{rep} est le nombre de simulations répétées et t_1 et t_2 sont les première et dernière années sur lesquelles le paramètre est calculé	$\frac{\sum_{s=1}^{n_{rep}} \sum_{t_1}^{t_2} S_t < S_{gen}}{t_2 - t_1 + 1}$
% simulations répétées > PRS	Probabilité que l'abondance des géniteurs du stock se situe au-dessus du point de référence supérieur du stock dans les simulations répétées et les années	$\frac{\sum_{s=1}^{n_{rep}} \sum_{t_1}^{t_2} S_t > 0.8 S_{MSY}}{t_2 - t_1 + 1}$
moyenne annuelle des prises	Prises moyennes dans les simulations répétées et les années	$\frac{\sum_{s=1}^{n_{rep}} \sum_{t_1}^{t_2} S_t C_t}{t_2 - t_1 + 1}$
stabilité de la prise (1/CV)	Stabilité de la prise moyenne dans les simulations répétées et les années (μ_C), où σ_C est l'écart-type de la prise	$\frac{1}{\frac{\sigma_C}{\mu_C}}$
rparamètre de la prise relative	Probabilité que la prise annuelle soit supérieure à la moyenne des trois principales années de prises depuis 2000 (C_{top}), un indicateur semi-arbitraire d'une « bonne année »	$\frac{\sum_{s=1}^{n_{rep}} \sum_{t_1}^{t_2} C_t > C_{top}}{t_2 - t_1 + 1}$

Tableau 3. Distributions des probabilités a priori des paramètres.

Parameter	Prior	Limites	Description
$\ln(\alpha)$	$\sim N(1, 2)$	$[0, \text{inf}]$	Log naturel du taux de croissance intrinsèque.
$\ln(\beta)$	$\sim N\left(\ln(1/S_{MAX}) - 0.5\sigma_{S_{MAX}}^2, \sqrt{\ln\left(1 + \frac{(\frac{1}{\sigma_{S_{MAX}}})^2}{(\frac{1}{S_{MAX}})^2}\right)}\right)$		Ampleur de la dépendance à la densité dans l'année d'éclosion, où S_{MAX} est l'abondance maximale des géniteurs multipliée par 0,75.
ϕ	$\sim U(-1, 1)$	$[-1, 1]$	Corrélation avec décalage de 1 dans la variation interannuelle de la survie.
σ_R	$\sim N(1, 2)$	$[0, \text{inf}]$	Écart-type du processus de bruit blanc dans la survie.
$\ln(R_0)$	$\sim N(0, 20)$	$[0, \text{inf}]$	Log naturel du recrutement non observé dans la première année du modèle de processus.
σ_{R_0}	$\sim \text{Inv} - \text{Gamma}(2, 1)$	$[0, \text{inf}]$	Écart-type dans le recrutement non observé dans la première année du modèle de processus.

Tableau 4. Moyennes a posteriori, médianes et intervalles crédibles pour les principaux paramètres géniteurs-recrutement et les points de référence biologiques connexes. Sont également présentées les estimations de la taille effective de l'échantillon (N_{eff}) et du facteur de réduction d'échelle potentiel (\hat{R}) pour les paramètres estimés par le modèle.

	Médiane	10 ^e centile	90 ^e centile	Moyenne	N_{eff}	\hat{R}
S_{gen}	1,72	1,10	2,70	1,91	NA	NA
80% S_{RMD}	4,60	3,64	6,11	4,86	NA	NA
U_{RMD}	0,56	0,47	0,63	0,56	NA	NA
S_q	14,10	11,41	18,48	14,90	NA	NA
α	3,94	3,02	5,02	1,36	2 891	1
β	0,59	0,49	0,73	0,10	2 769	1
ϕ	0,10	0,06	0,13	0,09	1 574	1
σ_R	0,06	-0,09	0,31	1,09	3 278	1

Tableau 5. Rendement biologique et halieutique de la RCP actuelle et de l'autre RCP à titre indicatif pour les scénarios de référence et le test de robustesse du modèle opérationnel.

RCP	Scénario	% en dessous de S_{gn}	au-dessus de S_{RMD}	Prise annuelle médiane	Stabilité de la prise	% au-dessus de l'indice de prise
de base	actuelle	4.28	87.54	10.3 (2.47-22.16)	1.21 (0.35-2.38)	64.3
de base	autre, AP	5.16	87.46	8.84 (2.62-18.38)	1.38 (0.48-2.8)	66.62
de base	Pas de peche	3.96	93.14	0 (0-0)	S. O.	0
faible prod	actuelle	9.4	73.48	3.44 (0.49-11.69)	0.73 (0.14-1.78)	35.8
faible prod	autre, AP	20.18	63.7	2.82 (1.14-10.73)	1.1 (0.36-2.57)	37.32
faible prod	Pas de peche	5.82	89.42	0 (0-0)	S. O.	0

10. RÉFÉRENCES CITÉES

- Adkison, M.D. 2021. [A Review of Salmon Spawner-Recruitment Analysis: The Central Role of the Data and Its Impact on Management Strategy](#). Reviews in Fisheries Science & Aquaculture : 1-37.
- Andrew, J.H., et Webb, T.M. 1987. [Review & Assessment of Adult Pink Salmon Enumeration Programs on the Fraser River](#). ESSA Ltd., Vancouver, BC.
- Auger-Méthè, M., Newman, K., Cole, D., Empacher, F., Gryba, R., King, A.A., Leos-Barajas, V., Mills Flemming, J., Nielsen, A., Petris, G., et Thoma, L. 2021. [A Guide to State-Space Modeling of Ecological Time Series](#). Ecol Monogr 91(4).
- Beacham, T.D., et Murray, C.B. 1993. [Fecundity and Egg Size Variation in North American Pacific Salmon \(*Oncorhynchus*\)](#). Journal of Fish Biology 42(4) : 485-508.
- Beacham, T.D., Withler, R.E., Murray, C.B., et Barner, L.W. 1988. [Variation in Body Size, Morphology, Egg Size, and Biochemical Genetics of Pink Salmon in British Columbia](#). Transactions of the American Fisheries Society 117(2) : 109-126.
- Carpenter, B., Gelman, A., Hoffman, M.D., Lee, D., Goodrich, B., Betancourt, M., Brubaker, M., Guo, J., Li, P., et Riddell, A. 2017. [Stan: A Probabilistic Programming Language](#). J. Stat. Soft. 76(1).
- Clark, T.D., Jeffries, K.M., Hinch, S.G., et Farrell, A.P. 2011. [Exceptional Aerobic Scope and Cardiovascular Performance of Pink Salmon \(*Oncorhynchus Gorbuscha* \) May Underlie Resilience in a Warming Climate](#). Journal of Experimental Biology 214(18) : 3074-3081.
- Conservation Units for Pacific Salmon under the Wild Salmon Policy. (Sous presse).
- DFO. 1985. [Canada's Fisheries Act, Revised Statutes of Canada \(1985, c. F-14\)](#).
- DFO. 1998. [Fraser River Salmon Summary](#). Vancouver, BC.
- DFO. 2005. [Canada's Policy for Conservation of Wild Pacific Salmon](#). Fisheries and Oceans Canada, Vancouver, British Columbia.
- DFO. 2009. [A Fishery Decision-Making Framework Incorporating the Precautionary Approach](#).
- DFO. 2021. [Pre-Season Run Size Forecasts for Fraser River Sockeye \(*Oncorhynchus Nerka*\) and Pink \(*Oncorhynchus Gorbuscha*\) Salmon in 2021](#).
- DFO. 2022. [Sustainable Fisheries Framework](#).
- DFO. 2023. [Southern Salmon Integrated Fisheries Management Plan 2023/2024](#). Fisheries and Oceans Canada = Pêches et océans Canada, Vancouver.
- Fleischman, S.J., Catalano, M.J., Clark, R.A., et Bernard, D.R. 2013. [An Age-Structured State-Space Stock-Recruit Model for Pacific Salmon \(*Oncorhynchus Spp.*\)](#). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 70(3) : 401-414.
- Folkes, M.J.P., Thomson, R.E., et Hourston, R.A.S. 2018. [Evaluating Models to Forecast Return Timing and Diversion Rate of Fraser Sockeye Salmon](#).

-
- Forbes, C., Evans, M., Hastings, N., et Peacock, B. 2011. [Statistical Distributions](#). John Wiley & Sons.
- Grant, S.C.H., Holt, C., Wade, J., Mimeault, C., Burgetz, I.J., Johnson, S., et Trudel, M. 2018. [Summary of Fraser River Sockeye Salmon \(*Oncorhynchus Nerka*\) Ecology to Inform Pathogen Transfer Risk Assessments in the Discovery Islands, BC](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc.
- Grant, S.C.H., Townsend, M., White, B., et Lapointe, M. 2014. [Fraser River Pink Salmon \(*Oncorhynchus Gorbuscha*\) Data Review: Inputs for Biological Status and Escapement Goals](#).
- Hague, M.J., Hornsby, R.L., Gill, J.A., Michielsens, C.G.J., Jenkins, E.J., et Wong, S. 2021. [Moving Targets: Assessing Fraser River Pink Salmon Run Size during a Period of Change and Uncertainty](#). North Pacific Anadromous Fish Commission.
- Hague, M., Michielsens, C., Gill, J., Hornsby, R., et Phung, A. 2022. Improvements to Fraser River Pink Salmon Run Reconstruction Models and In-Season Assessments. Southern Boundary Restoration and Enhancement Fund : Final Report, Pacific Salmon Commission.
- Hilborn, R. 1985. [Simplified Calculation of Optimum Spawning Stock Size from Ricker's Stock Recruitment Curve](#). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 42(11) : 1833-1834. NRC Research Press Ottawa, Canada.
- Hoffman, M.D., et Gelman, A. 2014. [The No-U-Turn Sampler: adaptively setting path lengths in Hamiltonian Monte Carlo](#). Journal of Machine Learning Research 15 : 1593-1623.
- Holt, C.A. 2009. [Evaluation of Benchmarks for Conservation Units in Canada's Wild Salmon Policy: Technical Documentation](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2009/059. x + 50.
- Krkošek, M., Hilborn, R., Peterman, R.M., et Quinn, T.P. 2011. [Cycles, stochasticity and density dependence in pink salmon population dynamics](#). Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences 278(1714) : 2060-2068. The Royal Society.
- Litzow, M.A., Malick, M.J., Kristiansen, T., Connors, B.M., et Ruggerone, G.T. 2024. [Climate Attribution Time Series Track the Evolution of Human Influence on North Pacific Sea Surface Temperature](#). Environ. Res. Lett. 19(1) : 014014.
- MacDonald, B., et Grant, S.C.H. 2023. [State of Canadian Pacific Salmon : Considerations for Pacific Salmon Management in a Changing Climate](#). Department of Fisheries Canada.
- Malick, M.J., Cox, S.P., Mueter, F.J., Dorner, B., et Peterman, R.M. 2017. [Effects of the North Pacific Current on the Productivity of 163 Pacific Salmon Stocks](#). Fisheries Oceanography 26(3) : 268-281.
- Montgomery, D.R., Buffington, J.M., Peterson, N.P., Schuett-Hames, D., et Quinn, T.P. 1996. [Stream-Bed Scour, Egg Burial Depths, and the Influence of Salmonid Spawning on Bed Surface Mobility and Embryo Survival](#). 53.
- Mueter, F.J., Peterman, R.M., et Pyper, B.J. 2002. [Opposite Effects of Ocean Temperature on Survival Rates of 120 Stocks of Pacific Salmon \(*Oncorhynchus* Spp.\) in Northern and Southern Areas](#). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 59(3) : 456-463.
-

-
- Nesbitt, H.K., et Moore, J.W. 2016. [Species and Population Diversity in Pacific Salmon Fisheries Underpin Indigenous Food Security](#). *Journal of Applied Ecology* 53(5) : 1489-1499.
- Pacific Salmon Commission. 2023. [PSC Biological Data App](#). Shiny App.
- Pacific Salmon Commission. 2024. [Fraser River Panel Annual Report Data](#). Shiny app, Fraser River Panel Annual Report Data.
- Pess, G.R., Hilborn, R., Kloehn, K., et Quinn, T.P. 2012. [The Influence of Population Dynamics and Environmental Conditions on Pink Salmon \(*Oncorhynchus Gorbuscha* \) Recolonization after Barrier Removal in the Fraser River, British Columbia, Canada](#). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 69(5) : 970-982.
- Pestal, G., Huang, A.-M., Cass, A., et the FRSSI Working Group. 2012. [Updated Methods For Assessing Harvest Rules For Fraser River Sockeye Salmon \(*Oncorhynchus Nerka* \)](#).
- Pestal, G., MacDonald, B.L., Grant, S.C.H., et Holt, C.A. 2023. [State of the Salmon: Rapid Status Assessment Approach for Pacific Salmon under Canada's Wild Salmon Policy](#). *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.*
- Ricker, W.E. 1954. [Stock and Recruitment](#). *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 11(5) : 559-623.
- Ricker, W.E. 1989. [History and Present State of the Odd-Year Pink Salmon Runs of the Fraser River Region](#). *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.*
- Roos, J.F. 1991. [Restoring Fraser River Salmon](#). Pacific Salmon Commission, Vancouver, BC.
- Ruggerone, G., Springer, A., Van Vliet, G., Connors, B., Irvine, J., Shaul, L., Sloat, M., et Atlas, W. 2023. [From Diatoms to Killer Whales: Impacts of Pink Salmon on North Pacific Ecosystems](#). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 719 : 1-40.
- Ruggerone, G.T., et Irvine, J.R. 2018. [Numbers and Biomass of Natural- and Hatchery-Origin Pink Salmon, Chum Salmon, and Sockeye Salmon in the North Pacific Ocean, 1925–2015](#). *Mar Coast Fish* 10(2) : 152-168.
- Scheuerell, M.D. 2016. [An Explicit Solution for Calculating Optimum Spawning Stock Size from Ricker's Stock Recruitment Model](#). *PeerJ* 4 : e1623.
- Stan Development Team. 2023. [Rstan: The R Interface to Stan](#).
- Staton, B.A., Catalano, M.J., Connors, B.M., Coggins, L.G., Jones, M.L., Walters, C.J., Fleischman, S.J., et Gwinn, D.C. 2020. [Evaluation of Methods for Spawner–Recruit Analysis in Mixed-Stock Pacific Salmon Fisheries](#). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 77(7) : 1149-1162.
- Su, Z., et Peterman, R.M. 2012. [Performance of a Bayesian State-Space Model of Semelparous Species for Stock-Recruitment Data Subject to Measurement Error](#). *Ecological Modelling* 224(1) : 76-89.
- Vehtari, A., Gelman, A., Simpson, D., Carpenter, B., et Burkner, P.-C. 2021. [Rank-Normalization, Folding, and Localization: An Improved R-hat for Assessing Convergence of MCMC \(with Discussion\)](#). *Bayesian analysis* 16(2) : 667-718. International Society for Bayesian Analysis.
-

-
- Williams, I.V., Brett, J.R., Bell, G.R., Traxler, G.S., Bagshaw, J., McBride, J.R., Fagerlund, U.H.M., Dye, H.M., Sumpter, J.P., Donaldson, E.M., Bilinski, E., Tsuyuki, H., Peters, M.D., Choromanski, E.M., Cheng, J.H.Y., et Coleridge, W.L. 1986. [The 1983 Early Run Thompson River Pink Salmon; Morphology, Energetics and Fish Health](#). Bulletin, International Pacific Salmon Fisheries Commission.
- Wilson, S.M., Moore, J.W., Ward, E.J., Kinsel, C.W., Anderson, J.H., Buehrens, T.W., Carr-Harris, C.N., Cochran, P.C., Davies, T.D., Downen, M.R., Godbout, L., Lisi, P.J., Litz, M.N.C., Patterson, D.A., Selbie, D.T., Sloat, M.R., Suring, E.J., Tattam, I.A., et Wyatt, G.J. 2023. [Phenological Shifts and Mismatch with Marine Productivity Vary among Pacific Salmon Species and Populations](#). Nat Ecol Evol.

ANNEXE A. COMPUTING ENVIRONMENT

Ce document se veut transparent et reproductible. Toutes les données et tous les codes permettant de reproduire l'analyse présentée dans le rapport et de la générer sont disponibles dans ce référentiel GitHub hébergé par [Zenodo](#). This document aims to be transparent and reproducible. Le document décrivant les diagnostics du modèle et quelques figures supplémentaires se trouvent dans le référentiel dans `Supplement-model-check.html`.

Pour reproduire ce rapport, clonez le référentiel à partir de GitHub, vérifiez que le logiciel requis est installé, exécutez `fit-sr-stan.R` pour ajuster les modèles, puis `index.Rmd` pour créer le document. Consultez la documentation sur README à la page principale du référentiel pour obtenir plus de détails. Les progiciels en R (et leurs dépendances) nécessaires pour recréer cette analyse sont les suivants :

Package	Version	Date
cowplot	1.1.3	2024-01-22
csasdown	0.1.3	2024-02-23
gsl	2.1-8	2023-01-24
here	1.0.1	2020-12-13
kableExtra	1.4.0	2024-01-24
rosettafish	0.0.0.9000	2024-02-23
rstan	2.32.3	2023-10-15
scales	1.3.0	2023-11-28
tidyverse	2.0.0	2023-02-22