



Pêches et Océans
Canada

Fisheries and Oceans
Canada

Sciences des écosystèmes
et des océans

Ecosystems and
Oceans Science

Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS)

Document de recherche 2022/051

Région du Pacifique

Évaluation du potentiel de rétablissement du saumon rouge (*Oncorhynchus nerka*) du lac Cultus, une espèce en voie de disparition (2019)

Daniel T. Selbie¹, Josh Korman², Lucas B. Pon¹, Michael J. Bradford³

¹ Pêches et Océans Canada
Laboratoire de recherche sur le saumon du lac Cultus
4222, route Columbia Valley
Cultus Lake (Colombie-Britannique) V2R 5B6

² Ecometric Research Inc.
3560 West 22nd Avenue
Vancouver (Colombie-Britannique) V6S 1J3

³ Pêches et Océans Canada
Centre d'entreprise scientifique du Pacifique
4160, promenade Marine
West Vancouver (Colombie-Britannique) V7V 1N6

Avant-propos

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

Publié par :

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

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



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2022

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-44429-1 N° de cat. Fs70-5/2022-051F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Selbie, D.T., Korman, J., Pon, L.B., Bradford, M.J. 2022. Évaluation du potentiel de rétablissement du saumon rouge (*Oncorhynchus nerka*) du lac Cultus, une espèce en voie de disparition (2019). Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2022/051. viii + 111 p.

Also available in English :

Selbie, D.T., Korman, J., Pon, L.B., Bradford, M.J. 2022. Recovery Potential Assessment for the Endangered Cultus Lake Sockeye Salmon (*Oncorhynchus Nerka*) (2019). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2022/051. vii + 99 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	viii
1. INTRODUCTION	1
1.1. JUSTIFICATION DE L'ÉVALUATION DU POTENTIEL DE RÉTABLISSEMENT	1
1.2. LAC CULTUS (COLOMBIE-BRITANNIQUE).....	2
1.3. LES SAUMONS SAUVAGES DANS LE CONTEXTE DES ESPÈCES SAUVAGES AU SENS DE LA LEP	4
2. PARAMÈTRES DE LA BIOLOGIE, DE L'ABONDANCE, DE LA RÉPARTITION ET DU CYCLE BIOLOGIQUE	6
2.1. ÉLÉMENT 1 : SOMMAIRE DE LA BIOLOGIE DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS	6
2.2. ÉLÉMENT 2 : ÉVALUATION DE LA TRAJECTOIRE RÉCENTE DE L'ESPÈCE CONCERNANT L'ABONDANCE, LA RÉPARTITION ET LE NOMBRE DE POPULATIONS	10
2.3. ÉLÉMENT 3 : ESTIMATIONS DES PARAMÈTRES ACTUELS OU RÉCENTS DU CYCLE BIOLOGIQUE DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS	10
3. BESOINS EN MATIÈRE D'HABITAT ET DE RÉSIDENCE	13
3.1. ÉLÉMENT 4 : PROPRIÉTÉS DE L'HABITAT NÉCESSAIRES AU BON DÉROULEMENT DE TOUS LES STADES DU CYCLE BIOLOGIQUE DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS	13
3.2. ÉLÉMENT 5 : INFORMATION SUR L'ÉTENDUE SPATIALE DES ZONES DE L'AIRE DE RÉPARTITION DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS SUSCEPTIBLES DE PRÉSENTER CES PROPRIÉTÉS DE L'HABITAT.....	17
3.3. ÉLÉMENT 6 : PRÉSENCE ET ÉTENDUE DES CONTRAINTES ASSOCIÉES À LA CONFIGURATION SPATIALE.....	18
3.4. ÉLÉMENT 7 : ÉVALUATION DU CONCEPT DE RÉSIDENCE ET DESCRIPTION DE LA RÉSIDENCE DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS	18
4. MENACES ET FACTEURS LIMITATIFS POUR LA SURVIE ET LE RÉTABLISSEMENT DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS	19
4.1. ÉLÉMENT 8 : MENACES POUR LA SURVIE ET LE RÉTABLISSEMENT DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS	19
4.2. ÉLÉMENT 9 : ACTIVITÉS LES PLUS SUSCEPTIBLES DE MENACER (ENDOMMAGER OU DÉTRUIRE) LES PROPRIÉTÉS DE L'HABITAT INDIQUÉES DANS LES ÉLÉMENTS 4 ET 5.....	43
4.3. ÉLÉMENT 10 : FACTEURS NATURELS QUI LIMITERONT LA SURVIE ET LE RÉTABLISSEMENT DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS	43
4.4. ÉLÉMENT 11 : RÉPERCUSSIONS ÉCOLOGIQUES POTENTIELLES DES MENACES ÉVALUÉES DANS L'ÉLÉMENT 8 SUR L'ESPÈCE CIBLÉE ET LES ESPÈCES CONCOMITANTES. EFFORTS DE SURVEILLANCE EXISTANTS ET LACUNES DANS LES CONNAISSANCES.....	49
4.5. SURVEILLANCE.....	49
4.6. LACUNES DANS LES CONNAISSANCES	50
5. OBJECTIFS DE RÉTABLISSEMENT	50
5.1. ÉLÉMENT 12 : OBJECTIFS D'ABONDANCE ET DE RÉPARTITION POSSIBLES ET PROPOSÉS POUR LE RÉTABLISSEMENT.....	50

5.2. ÉLÉMENT 13 : TRAJECTOIRES PRÉVUES DE LA POPULATION COMPTE TENU DES PARAMÈTRES ACTUELS DE LA DYNAMIQUE DE LA POPULATION DE SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS.....	55
5.3. ÉLÉMENT 14 : AVIS SUR LA MESURE DANS LAQUELLE L'HABITAT CONVENABLE DISPONIBLE RÉPOND AUX BESOINS DE LA POPULATION, TANT ACTUELLEMENT QUE LORSQUE LES OBJECTIFS DE RÉTABLISSEMENT POTENTIELS SERONT ATTEINTS.	58
5.4. ÉLÉMENT 15 : PROBABILITÉ QUE L'OBJECTIF DE RÉTABLISSEMENT PROPOSÉ PUISSE ÊTRE ATTEINT SELON LES PARAMÈTRES ACTUELS DE LA DYNAMIQUE DE LA POPULATION ET COMMENT CETTE PROBABILITÉ POURRAIT VARIER SELON DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DE MORTALITÉ ET DE PRODUCTIVITÉ.....	59
6. SCÉNARIOS D'ATTÉNUATION DES MENACES ET ACTIVITÉS DE RECHANGE	59
6.1. ÉLÉMENT 16 : MESURES D'ATTÉNUATION RÉALISABLES ET ACTIVITÉS DE RECHANGE RAISONNABLES AUX ACTIVITÉS QUI POSENT DES MENACES POUR L'ESPÈCE ET SON HABITAT	59
6.2. ÉLÉMENT 17 : ACTIVITÉS SUSCEPTIBLES D'ACCROÎTRE LA PRODUCTIVITÉ OU LES PARAMÈTRES DE SURVIE	64
6.3. ÉLÉMENT 18 : SI LA DISPONIBILITÉ ACTUELLE DE L'HABITAT EST INSUFFISANTE POUR L'ATTEINTE DES OBJECTIFS DE RÉTABLISSEMENT (VOIR L'ÉLÉMENT 14), PRÉSENTER UN AVIS SUR LA FAISABILITÉ DE RESTAURER L'HABITAT SELON DES VALEURS PLUS ÉLEVÉES. L'AVIS DOIT ÊTRE PRÉSENTÉ DANS LE CONTEXTE DE TOUTES LES OPTIONS POSSIBLES POUR ATTEINDRE LES OBJECTIFS EN MATIÈRE D'ABONDANCE ET DE RÉPARTITION.	66
6.4. ÉLÉMENT 19 : ESTIMER LA DIMINUTION ATTENDUE DU TAUX DE MORTALITÉ DÉCOULANT DES MESURES D'ATTÉNUATION ET ACTIVITÉS DE RECHANGE ÉNUMÉRÉES DANS L'ÉLÉMENT 16, AINSI QUE L'AUGMENTATION DE LA PRODUCTIVITÉ OU DE LA SURVIE ASSOCIÉE aux MESURES indiquées dans L'ÉLÉMENT 17.	66
6.5. ÉLÉMENT 20 : PROJETER LA TRAJECTOIRE ATTENDUE DE LA POPULATION (ET LES INCERTITUDES) SUR UNE PÉRIODE RAISONNABLE DU POINT DE VUE SCIENTIFIQUE ET JUSQU'À L'ATTEINTE DES OBJECTIFS DE RÉTABLISSEMENT, EN FONCTION DES TAUX DE MORTALITÉ ET DES TAUX DE PRODUCTIVITÉ EN RAPPORT AVEC LES MESURES PARTICULIÈRES AUX FINS D'EXAMEN ÉNONCÉES DANS L'ÉLÉMENT 19.	67
6.6. ÉLÉMENT 21 : RECOMMANDATIONS DE VALEURS DES PARAMÈTRES POUR LA PRODUCTIVITÉ DE LA POPULATION ET LES TAUX DE MORTALITÉ DE DÉPART, ET DE CARACTÉRISTIQUES PARTICULIÈRES DU MODÈLE DE POPULATION	71
7. ÉVALUATION DES DOMMAGES ADMISSIBLES	71
7.1. ÉLÉMENT 22 : ÉVALUATION DU TAUX MAXIMAL DE MORTALITÉ ET DE DESTRUCTION DE L'HABITAT D'ORIGINE ANTHROPIQUE QUE L'ESPÈCE PEUT SOUTENIR SANS RISQUE POUR SA SURVIE OU SON RÉTABLISSEMENT	71
8. REMERCIEMENTS	72
9. RÉFÉRENCES CITÉES	72
ANNEXE A. DESCRIPTION DU MODÈLE DE DYNAMIQUE DE LA POPULATION DE SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS	86
A.1. CODE SOURCE POUR LE MODÈLE DE DYNAMIQUE DE LA POPULATION DE SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS.....	90

ANNEXE B. GLOSSAIRE	100
---------------------------	-----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Paramètres du cycle biologique du saumon rouge du lac Cultus	11
Tableau 2. Menaces pour la survie et le rétablissement du saumon rouge du lac Cultus, classées en fonction de leur cote de risque biologique actuelle.	40
Tableau 3. Facteurs limitatifs pour la survie et le rétablissement du saumon rouge du lac Cultus, classés en fonction de leur cote de risque biologique actuelle.	47
Tableau 4. Prévisions du modèle de simulation pour les mesures du rendement du stock selon l'ensemble de paramètres de référence	56
Tableau 5. Comparaison au moyen du modèle de simulation de trois scénarios de mortalité par pêche avec deux niveaux d'apport de poissons d'écloserie en ce qui concerne les mesures du rendement décrites à l'élément 12	59
Tableau 6. Les quatre stratégies de lâcher de poissons d'écloserie évaluées au moyen du modèle de simulation	65
Tableau 7. Comparaison des résultats du modèle de simulation pour la mise en œuvre des quatre scénarios de lâcher de poissons d'écloserie décrits dans le tableau 6	68
Tableau 8. Résultats probabilistes du modèle de simulation pour l'atteinte des objectifs de survie et de rétablissement en trois générations, en fonction de trois mesures d'atténuation possibles : les apports de poissons d'écloserie, la restauration de l'habitat et la gestion du taux d'exploitation	69
Tableau 9. Résultats probabilistes du modèle de simulation pour l'atteinte des objectifs de survie et de rétablissement en trois générations, en fonction de trois mesures d'atténuation possibles : les apports de poissons d'écloserie, la restauration de l'habitat et la gestion du taux d'exploitation	69

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Emplacement du lac Cultus et voie de migration en eau douce empruntée par le saumon rouge du lac Cultus. Figure modifiée tirée de Bradford et al. (2010).	3
Figure 2. Carte bathymétrique du lac Cultus montrant les frayères historiques et plus récemment confirmées du saumon rouge du lac Cultus (<i>Oncorhynchus nerka</i>).	8
Figure 3. Nombre de géniteurs adultes entrés dans le lac Cultus par la barrière de dénombrement.	10
Figure 4. Série chronologique des taux de production de smolts pour le saumon rouge du lac Cultus.	12
Figure 5. Séries chronologiques des taux d'exploitation estimés pour le saumon rouge du fleuve Fraser et du rendement des pêches par rapport aux limites de pêche établies	21
Figure 6. Série chronologique de 2009 à 2019 des concentrations d'oxygène dissous (OD) dans la zone profonde (près des sédiments) au site d'échantillonnage limnologique à long terme du MPO dans le lac Cultus (Colombie-Britannique)	26
Figure 7. Exemples d'échogrammes hydroacoustiques de nuit (A) et de jour (B) recueillis dans le cadre du Programme de recherche sur les lacs du MPO en août 2009	27
Figure 8. Séries chronologiques de 2014 sur les éléments nutritifs sensibles à l'oxydoréduction : A) nitrate (NO_3^- -N); B) ammonium (NH_4^+ -N); et C) phosphore dissous total (PDT) dans la colonne d'eau du lac Cultus.	30
Figure 9. Couplage physique entre l'atmosphère et la couche supérieure de la colonne d'eau (0 à 5 m) dans le lac Cultus.	34
Figure 10. Exemples de profils A) de la formation du maximum de la chlorophylle profonde à la fin de l'été 2016 dans le lac Cultus et B) des concentrations d'oxygène maximales résultant du maximum de la chlorophylle profonde à la fin de l'été 2016 par rapport aux mesures prises dans les années 1930 par Ricker (1937)	36
Figure 11. Résultats des simulations de référence, fondées sur la stratégie mixte de lâchers de poissons d'écloserie et un taux de mortalité par pêche fixe	57
Figure 12. Résultats du modèle BATHTUB pour les conditions actuelles et futures de la qualité de l'eau dans le lac Cultus à l'état stable, avec et sans atténuation locale (dans le bassin versant) des éléments nutritifs	62
Figure 13. Entrées du modèle du ratio smolts/géniteur minimum dans le lac pour simuler les futures mesures d'atténuation liée à la production en eau douce.	66
Figure 14. Projections du modèle de simulation sur six générations avec les scénarios de l'apport de poissons d'écloserie, de l'atténuation réussie de la dégradation de l'habitat et du taux d'exploitation de 0,1/0,25.	70

RÉSUMÉ

Le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) a évalué la situation du saumon rouge (*Oncorhynchus nerka*) du lac Cultus pour la première fois en 2002 dans le cadre d'une évaluation d'urgence et déterminé qu'il s'agissait d'une espèce en voie de disparition, statut qu'il a confirmé en 2003. Le saumon rouge du lac Cultus n'a pas été inscrit à l'annexe 1 de la *Loi sur les espèces en péril* à l'époque principalement pour des considérations socio-économiques. En 2017, lors d'une évaluation de 24 unités désignables de saumon rouge du fleuve Fraser, le COSEPAC a de nouveau évalué le saumon rouge du lac Cultus comme étant en voie de disparition.

La présente évaluation du potentiel de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus donne un aperçu de la biologie, des besoins en matière d'habitat, des menaces et des facteurs limitatifs dans les éléments 1 à 11, et indique les objectifs de rétablissement, les projections de la population, les évaluations des mesures d'atténuation et les recommandations sur les dommages admissibles dans les éléments 12 à 22.

Les menaces à la persistance qui posent les risques les plus élevés pour la population sont la dégradation des habitats d'eau douce essentiels causée par les forçages d'origine anthropique et les pertes directes de la population attribuables aux récoltes dans les pêches ciblant des stocks mixtes. Depuis la dernière évaluation, on a acquis des connaissances sur l'eutrophisation du lac, en particulier, et ses réactions aux changements climatiques et on les a quantifiées. Ce sont des mécanismes très influents de la diminution de la population. Des options réalisables pour l'atténuation des charges en éléments nutritifs dans le lac Cultus et des diverses voies connexes ont été élaborées dans la littérature et dans la présente évaluation du potentiel de rétablissement, et sont considérées comme essentielles au rétablissement de la population et nécessitant des mesures ciblées, interdisciplinaires et intergouvernementales.

Reconnaissant la distinction entre le rétablissement et la survie d'une population ou d'une espèce, on propose un objectif d'abondance de 7 000 géniteurs (moyenne sur quatre ans) pour le rétablissement de l'unité désignable du saumon rouge du lac Cultus et une moyenne sur une génération de 2 500 géniteurs comme objectif de survie. D'après les résultats du modèle, sans des apports de poissons d'écloserie, la population ne sera pas en mesure de se maintenir compte tenu des menaces et facteurs limitatifs actuels, et on prévoit qu'elle continuera de diminuer au cours des trois prochaines générations (12 ans). Avec des apports continus, la disparition est évitée, mais il est peu probable que la population atteigne les objectifs de survie ou de rétablissement dans ce délai, sans atténuation active des menaces. La prise en compte de la mortalité par pêche et l'atténuation des menaces pesant sur l'habitat d'eau douce (c.-à-d. l'eutrophisation du lac), en particulier, devraient améliorer les tendances de la population et sont fortement recommandées.

1. INTRODUCTION

1.1. JUSTIFICATION DE L'ÉVALUATION DU POTENTIEL DE RÉTABLISSEMENT

Le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) est chargé d'évaluer et de classer les espèces aquatiques en péril au Canada. À la suite de leur évaluation par le COSEPAC, le ministre compétent envisage d'inscrire les espèces comme étant non en péril, préoccupantes, menacées, en voie de disparition ou disparues du pays en vertu de la *Loi sur les espèces en péril* (L.C. 2002, ch. 29; LEP). Pêches et Océans Canada (MPO) est le ministère responsable des espèces aquatiques en vertu de la LEP et prend un certain nombre de mesures pour appuyer la mise en œuvre de la Loi. Bon nombre de ces mesures nécessitent la collecte d'information scientifique sur la situation actuelle de l'espèce en question, sur les menaces qui pèsent sur sa survie et son rétablissement, et sur son potentiel de rétablissement. Un avis scientifique est alors habituellement formulé dans le cadre d'une évaluation du potentiel de rétablissement effectuée peu de temps après l'évaluation du COSEPAC. Cette façon de procéder permet de tenir compte des analyses scientifiques examinées par les pairs dans le cadre des processus de la LEP, comme la décision d'inscrire ou non l'espèce à l'annexe 1 de la LEP, et pendant la phase d'élaboration du programme de rétablissement qui suit l'inscription de l'espèce, le cas échéant.

Le saumon rouge (*Oncorhynchus nerka*) du lac Cultus est l'unité désignable (UD) qui correspond à la population de saumon rouge anadrome endémique au lac Cultus, en Colombie-Britannique, au Canada, et qui fait partie du complexe de saumon rouge du fleuve Fraser. Cette UD est génétiquement distincte et isolée sur le plan reproductif des autres populations au Canada et ailleurs dans l'aire de répartition de l'espèce (Schubert *et al.* 2002; COSEPAC 2017). Le saumon rouge du lac Cultus est un poisson anadrome et sémelpare qui utilise le lac Cultus, en Colombie-Britannique, comme seul habitat d'eau douce pour la fraie, l'incubation et la croissance, avant la dévalaison et la maturation dans l'habitat de migration et d'alimentation de l'océan Pacifique Nord. Le saumon rouge du lac Cultus fait partie du groupe à montaison tardive, effectuant sa montaison en même temps que d'autres stocks abondants à montaison tardive (p. ex., saumon rouge de la rivière Shuswap à montaison tardive; Grant *et al.* 2011).

Le COSEPAC a évalué la situation du saumon rouge du lac Cultus pour la première fois en 2002 dans le cadre d'une évaluation d'urgence et a recommandé son inscription en tant qu'espèce en voie de disparition (COSEPAC 2003; Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). Il a réexaminé le statut d'inscription d'urgence et confirmé que l'espèce était en voie de disparition en mai 2003 (COSEPAC 2003). En 2005, le gouverneur général en conseil, sur la recommandation du ministre de l'Environnement, a décidé de ne pas inscrire le saumon rouge du lac Cultus à l'annexe 1 de la LEP (2002), invoquant les répercussions socio-économiques associées aux pêches commerciales, récréatives et autochtones (Gouverneur général 2005). En 2017, lors d'une évaluation globale portant sur 24 UD de saumon rouge du fleuve Fraser, le COSEPAC a de nouveau examiné le saumon rouge du lac Cultus et a reconfirmé que l'espèce était en voie de disparition (COSEPAC 2017), pour les raisons suivantes :

« Le lac Cultus, un des lacs les plus fortement exploités en Colombie-Britannique, est aménagé à des fins récréatives, résidentielles et agricoles. La qualité de l'eau du lac se détériore en raison des fuites provenant d'installations septiques, du ruissellement agricole, de l'utilisation domestique d'engrais et d'une espèce introduite, le myriophylle en épis (*Myriophyllum* sp.) La population reproductrice a diminué régulièrement depuis 1950, et la taille actuelle de la population demeure très petite. Cette petite population continue de faire face à des taux d'exploitation élevés en tant que prises accessoires dans des pêches visant d'autres populations de saumons. »

Le ministre de l'Environnement a répondu (Ministre de l'Environnement et du Changement climatique du Canada 2019) en indiquant qu'une décision sur la modification de l'inscription de cette espèce sur la liste des espèces en péril (annexe 1, LEP 2002) serait demandée au gouverneur en conseil.

1.2. LAC CULTUS (COLOMBIE-BRITANNIQUE)

Le lac Cultus est l'habitat de naissance et de croissance en eau douce d'une population génétiquement distincte de saumon rouge (*Oncorhynchus nerka*). Il s'agit d'un lac relativement petit (superficie de 6,3 km²), à faible altitude (46 m au-dessus du niveau de la mer) et adjacent à la vallée du Fraser, dans le sud-ouest de la Colombie-Britannique, au Canada (figure 1). Il est délimité par un bassin versant international (69 km²; 82 % au Canada, 18 % aux États-Unis; Putt *et al.* 2019), composé de la crête du mont Vedder à l'ouest, de l'International Ridge à l'est et de la vallée du Columbia au sud. Le lac et son bassin versant sont situés dans la sous-zone marine sèche de la zone biogéoclimatique côtière à pruche de l'Ouest (Meidinger et Pojar 1991) et se déversent dans l'océan Pacifique (118 km) par le ruisseau Sweltzer, les rivières Vedder et Sumas et le fleuve Fraser. Le climat local est caractérisé comme tempéré maritime (Classification de Köppen; Kottek *et al.* 2006), avec des étés chauds et secs et des hivers frais et humides (Shortreed 2007). La température quotidienne moyenne sur une année est de 10,8 °C ± 2,0 °C (1 ET), allant d'un minimum quotidien moyen en décembre et janvier (3,3 °C ± 1,9 °C [1 ET]) à un maximum quotidien moyen en juillet (18,8 °C ± 0,9 °C [1 ET]; normales climatiques canadiennes de 1981 à 2010 – norme 1101530; Environnement et Changement climatique Canada 2019). Les précipitations tombent principalement sous forme de pluie d'octobre à avril, avec une moyenne annuelle de 1,67 m (95 % de pluie; normales climatiques canadiennes de 1981 à 2010 – norme 1101530; Environnement et Changement climatique Canada 2019).

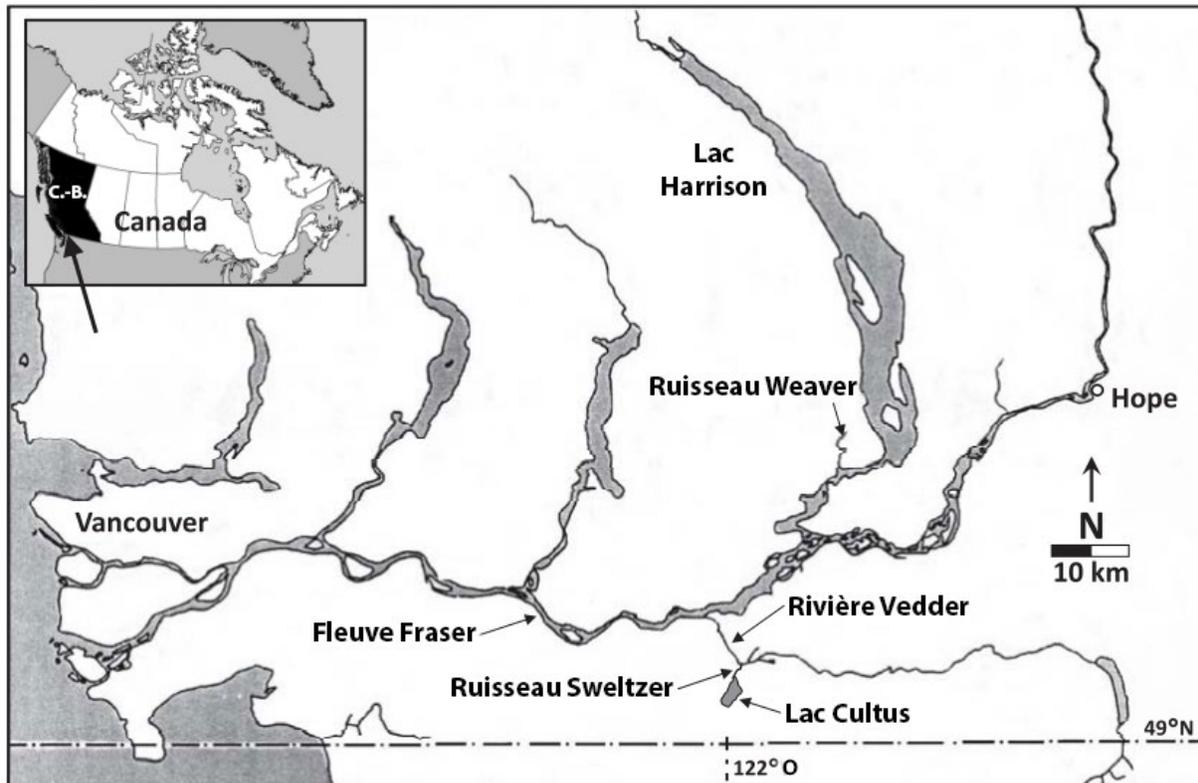


Figure 1. Emplacement du lac Cultus et voie de migration en eau douce empruntée par le saumon rouge du lac Cultus. Figure modifiée tirée de Bradford et al. (2010).

Le lac Cultus est un plan d'eau monomictique chaud qui présente un mélange de la colonne d'eau de l'automne au printemps et une forte stratification thermique du printemps à l'automne (Shortreed 2007; Sumka 2017). Le bassin est d'une profondeur modérée ($z_{\min} = 31$ m; $z_{\max} = 44$ m) et se caractérise par une morphométrie simple à parois escarpées, avec un habitat littoral limité (14 % de la superficie) et une zone profonde plate et relativement large (Shortreed 2007; figure 2). Le temps de résidence annuel estimé dans le lac est relativement court (1,8 année en moyenne) en raison d'un renouvellement prononcé pendant les automnes et les hivers pluvieux, au moment du pic de l'hydrogramme du bassin versant (Shortreed 2007; Putt et al. 2019). Le lac Cultus est alimenté par un réseau de 11 ruisseaux et rivières primaires, et la majeure partie de l'équilibre hydrologique (80 % du ruissellement du bassin versant) provient des ruisseaux Frosst et Spring, qui appartiennent au sous-bassin versant de la vallée du Columbia (Putt et al. 2019).

Le saumon rouge du lac Cultus, une espèce endémique et en voie de disparition, fraie dans lac Cultus, puis les juvéniles y croissent avant leur dévalaison vers l'océan Pacifique (COSEPAC 2003). La communauté de poissons du lac Cultus comprend 19 espèces indigènes, y compris le saumon rouge. Les autres espèces de salmonidés sont le saumon chinook (*O. tshawytscha*), le saumon coho (*O. kisutch*), le saumon kéta (*O. Keta*), le saumon rose (*O. gorbuscha*), la truite fardée (*O. clarki clarki*), la truite arc-en-ciel (*O. mykiss*) et le Dolly Varden (*Salvelinus malma*). Les cyprinidés présents dans le lac Cultus sont la sauvagesse du Nord (*Ptychocheilus oregonensis*), le méné rose (*Richardsonius balteatus*), le naseux des rapides (*Rhinichthys cataractae*) et le méné deux-barres (*Mylocheilus caurinus*). Le meunier à grandes écailles (*Catostomus macrocheilus*) est également présent, tout comme l'épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus*). Le lac Cultus abrite trois taxons de chabots : le chabot piquant

(*Cottus Asper*), le chabot côtier (*C. aleuticus*) et le chabot pygmée du lac Cultus (*C. aleuticus*; chabot côtier, population du lac Cultus). Le chabot pygmée du lac Cultus est inscrit à l'annexe 1 de la LEP comme espèce menacée en raison de son aire de répartition limitée et des menaces pour l'habitat local d'eau douce, et le ministre envisage actuellement de l'inscrire à la liste des espèces en voie de disparition du fait de la dégradation d'origine anthropique connue de cet habitat (Ministre de l'Environnement et du Changement climatique du Canada 2020). Deux espèces de lamproies, la lamproie de l'ouest (*Lampetra richardsoni*) et la lamproie à queue noire (*L. ayresi*) se trouvent également dans le lac. Un esturgeon blanc (*Acipenser Transmontanus*) a été capturé dans le lac, mais on ne pense pas que l'espèce habite naturellement le réseau de façon continue.

Le lac Cultus a une histoire de développement relativement longue qui remonte au milieu des années 1800, lorsque des sentiers et des camps miniers ont été établis dans le bassin versant, suivis par l'exploitation forestière au début des années 1900 (culminant dans les années 1920; Cramer 2005; Gauthier *et al.* 2021). Le développement agricole dans la vallée du Columbia a suivi de près la foresterie (1930), tout comme la présence croissante de logements permanents (Soutar 2005; Gauthier *et al.* 2021). Les valeurs récréatives sont depuis longtemps importantes dans le lac Cultus, comme en témoigne la création du parc Cultus en 1924 et du conseil d'administration du parc en 1932, ainsi que la construction de chalets d'été et d'autres installations (notamment un terrain de golf) à mesure que le nombre de résidents permanents dans la région a continué d'augmenter dans les années 1940 et 1950 (Soutar 2005; Gauthier *et al.* 2021). Au milieu des années 1950, le lac accueillait plus de 167 000 visiteurs par année (Chilliwack Progress 1957). Le développement et les loisirs dans le bassin versant se sont poursuivis depuis, avec des estimations contemporaines de 2 à 3 millions de visiteurs au lac Cultus chaque année (Delcan 2012). Dans ce contexte moderne, le lac Cultus est considéré comme périurbain (Putt *et al.* 2019), c'est-à-dire que bien que le développement local soit encore quelque peu diffus, le lac subit des stress anthropiques induits en raison de l'expansion des populations avoisinantes et de leurs activités.

Étant donné sa valeur récréative et sa forte fréquentation, le lac Cultus a également été colonisé par plusieurs espèces envahissantes. On sait que le myriophylle en épi (*Myriophyllum spicatum*) a envahi le lac Cultus à la fin des années 1970, probablement en raison de propagules se trouvant sur des embarcations, et qu'il est devenu le macrophyte aquatique dominant de la zone littorale, déplaçant une grande partie de la guildes macrophyte indigène des milieux littoraux, qui comprend *Chara* spp., des potamots (*Potamogeton* spp.), la cornifle nageante (*Ceratophyllum demersum*), le myriophylle de Sibérie (*Myriophyllum sibiricum*) et la renoncule aquatique (*Ranunculus aquatilis* var. *capillaceus*) [Ricker 1952; Shortreed 2007]. On estime que le myriophylle en épi occupe plus de 60 % des habitats littoraux du lac (en superficie), à une profondeur de 1 à 8 m (Stables 2004; MPO 2014). On a également observé la présence du potamot crépu (*Potamogeton Crispus*; espèce envahissante) dans le lac. Au printemps 2018, des achigans à petite bouche (*Micropterus Dolomieu*; espèce envahissante) ont été signalés dans le lac Cultus; cependant, compte tenu de l'éventail des classes d'âge observées, les individus étaient probablement présents depuis plusieurs années. Il a été confirmé que l'espèce se reproduit et qu'elle est probablement abondante dans le lac Cultus.

1.3. LES SAUMONS SAUVAGES DANS LE CONTEXTE DES ESPÈCES SAUVAGES AU SENS DE LA LEP

En vertu de la Politique du Canada pour la conservation du saumon sauvage du Pacifique (ou Politique concernant le saumon sauvage; PSS), un saumon du Pacifique est considéré « sauvage » s'il a passé son cycle biologique entier en milieu naturel et qu'il est la progéniture de parents eux-mêmes nés d'une fraie naturelle et qui ont toujours vécu dans un milieu naturel

(MPO 2005). Les saumons sauvages du Pacifique sont officiellement représentés taxonomiquement par cinq espèces existantes : saumon chinook, saumon coho, saumon rouge, saumon rose et saumon kéta (Groot et Margolis 1991). Cependant, en raison de l'adaptation locale de n'importe quelle espèce donnée à la diversité des habitats marins et dulcicoles colonisés et utilisés (Groot et Margolis 1991; Quinn 2005) et de l'évolution rapide attribuable à un cycle biologique sémelpare (Hendry *et al.* 2000), les saumons sauvages du Pacifique présentent une diversité génétique et phénotypique extrême à l'intérieur des espèces et entre elles (Quinn 2005). Cette diversité mène à une structure complexe et hiérarchique des populations, des frayères locales aux espèces taxonomiques, produisant un réseau géographique de dèmes, le niveau de base de l'organisation génétique des saumons du Pacifique (MPO 2005). Malgré l'errance et les variations génétiques qui en découlent, la séparation distale entre les frayères donne des groupes fonctionnant de manière indépendante, gérés comme des unités de conservation (UC) au Canada (MPO 2005). Les UC sont des groupes de saumons sauvages suffisamment isolés des autres groupes qui, s'ils disparaissent du pays, ne se rétabliront probablement pas naturellement dans un délai acceptable (MPO 2005).

Dans l'évaluation du potentiel de rétablissement en vertu de la LEP, il est important de s'assurer de l'homologie terminologique pour définir le niveau d'organisation sur lequel l'évaluation est axée. En vertu de la LEP, « espèce sauvage » est le niveau focal de l'identité taxonomique et est définie comme suit :

« Espèce, sous-espèce, variété ou population géographiquement ou génétiquement distincte d'animaux, de végétaux ou d'autres organismes d'origine sauvage, sauf une bactérie ou un virus, qui, selon le cas : est indigène du Canada; s'est propagée au Canada sans intervention humaine et y est présente depuis au moins cinquante ans. »

En vertu de la PSS, les UC de saumons du Pacifique sont homologues de la définition d'une « espèce sauvage » donnée dans la LEP (MPO 2005). Cependant, la LEP reconnaît que la conservation de la diversité biologique passe par la protection des entités taxonomiques inférieures à l'espèce (c.-à-d. les UD) et donne au COSEPAC le mandat de les évaluer lorsqu'il est justifié de le faire. Les UD doivent être distinctes et importantes dans l'évolution de l'espèce. Par « importante », on entend une UD qui est significative pour le patrimoine évolutif de l'espèce dans son ensemble et dont la perte ne pourrait probablement pas être compensée par une dispersion naturelle (LEP 2002). Bien que les UD et les UC ne soient peut-être pas les mêmes pour toutes les populations de saumons du Pacifique d'une même espèce, le saumon rouge du lac Cultus est génétiquement distinct des autres populations de saumons rouges du Canada (Beacham et Withler 2017) et les limites de l'UC définie dans la PSS et de l'UD définie par le COSEPAC sont les mêmes. Par conséquent, les termes sont considérés comme homologues et, dans ce cas, comme synonymes.

Dans le but de conserver le saumon rouge du lac Cultus, des mesures concertées de mise en valeur au moyen de poissons d'écloserie en vue d'assurer la conservation sont prises à l'égard de la population depuis 2002, y compris la mise en valeur du stock de géniteurs et l'élevage de géniteurs en captivité; ces interventions se sont traduites par des proportions importantes de poissons d'écloserie dans toutes les années d'éclosion contemporaines (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). Dans la LEP (2002), la définition d'une « espèce sauvage » utilise l'expression « d'origine sauvage », qui, selon des interprétations juridiques récentes, peut englober les individus élevés en captivité dont les ancêtres récents étaient sauvages (COSEPAC 2010). Bien que le COSEPAC n'ait pas inclus les poissons d'élevage dans son évaluation du saumon rouge du lac Cultus (COSEPAC 2017), conformément aux Lignes directrices du COSEPAC concernant les espèces sauvages manipulées, une « espèce sauvage » comprend toutes les réintroductions intralimites (c.-à-d. à

l'intérieur de l'aire de répartition naturelle) lorsqu'elle est évaluée (COSEPAC 2010). Par conséquent, les individus d'écloserie (c.-à-d. mis en valeur et élevés en captivité) relâchés dans le lac Cultus sont inclus dans la définition d'une « espèce sauvage » en vertu de la LEP et donc dans la présente évaluation du potentiel de rétablissement.

2. PARAMÈTRES DE LA BIOLOGIE, DE L'ABONDANCE, DE LA RÉPARTITION ET DU CYCLE BIOLOGIQUE

2.1. ÉLÉMENT 1 : SOMMAIRE DE LA BIOLOGIE DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS

2.1.1. Biologie

Le saumon rouge est l'une des cinq espèces de saumons du Pacifique très migratoires, anadromes et sémelpares qui accomplissent leur cycle biologique sur des milliers de kilomètres, depuis leurs habitats d'eau douce natal jusqu'aux vastes étendues de l'océan Pacifique Nord. Contrairement aux autres espèces de saumons, le saumon rouge utilise principalement les écosystèmes de lacs d'eau douce pour leur croissance avant la dévalaison vers le milieu marin (Burgner 1991).

Le saumon rouge du lac Cultus est une UC existante et génétiquement distincte du complexe de saumon rouge du fleuve Fraser (24 UC). Il appartient au groupe à montaison tardive (gestion des stocks), soit un ensemble de stocks de saumon rouge du Fraser qui migrent en même temps et qui pénètrent habituellement dans le Fraser entre la fin juillet et la mi-octobre (Grant *et al.* 2011). Comme la plupart des saumons rouges du Fraser, le saumon rouge du lac Cultus présente un cycle de lignées de quatre ans et remonte généralement les cours d'eau jusqu'à sa frayère natale sur les rives du lac Cultus à l'âge 4, bien que l'on observe certaines variations de classe d'âge (c.-à-d. des géniteurs d'âge 3 à 5) dans l'UC.

2.1.1.1. Migration de reproduction

La migration de reproduction du saumon rouge du lac Cultus commence habituellement au début du mois d'août et se poursuit jusqu'à la fin du mois de novembre. La montaison de cette population n'est pas particulièrement difficile, les adultes géniteurs remontant sur 118 km de l'embouchure du Fraser jusqu'au lac Cultus, qui se trouve à une altitude de 46 m, en empruntant le fleuve Fraser, les rivières Sumas et Vedder et le ruisseau Sweltzer (Shortreed 2007). Le saumon rouge affiche un fort comportement de retour à sa frayère natale (Burgner 1991; Quinn 2005), largement facilité en eau douce par l'imprégnation olfactive chez les juvéniles des odeurs associées à l'environnement (Dittman et Quinn 1996). Lorsqu'il passe de l'eau de mer à l'eau douce, le saumon rouge cesse en grande partie de se nourrir et dépend exclusivement de l'énergie emmagasinée pour la montaison, la maturation sexuelle et les activités de fraie (Burgner 1991).

2.1.1.2. Reproduction

Le saumon rouge du lac Cultus est l'un des derniers stocks du Fraser à frayer chaque année, la fraie ayant lieu de la fin du mois de novembre au mois de décembre (Schubert 1998). Il fraye exclusivement dans le lac Cultus. L'habitat de prédilection pour les nids est caractérisé par un substrat de taille suffisante pour créer un espace interstitiel dans lequel les œufs pourront se développer. Les œufs ont besoin d'un débit adéquat d'eau oxygénée pour survivre. Dans le lac Cultus, le saumon rouge a toujours frayé dans les baies Spring, Salmon et Snag (baie Honeymoon), à la plage Lindell et sur les rives est et sud du lac (figure 2). Toutefois, ces dernières années, les relevés par véhicule sous-marin téléguidé (VTG) n'ont permis d'observer

la fraie que dans la baie Spring. Compte tenu de la grande profondeur à laquelle la fraie se produit maintenant et de l'absence de recherche systématique, on ne sait pas si d'autres zones du lac sont utilisées régulièrement ou non pour la fraie. D'autres relevés par VTG sont nécessaires pour comprendre les frayères existantes et les changements d'emplacement au fil du temps. Les femelles pondent environ 3 500 œufs en moyenne.

L'émergence se produit habituellement aux mois d'avril et de mai (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009), mais comme pour tous les salmonidés, elle est dictée par les températures ambiantes pendant la période d'incubation (les unités thermiques accumulées; Burgner 1991; McPhail 2007). Historiquement, l'émergence du saumon rouge du lac Cultus se produit sur une plus longue période, reflétant la période de fraie prolongée (Burgner 1991), mais on ne sait pas si c'est encore le cas avec le réchauffement des températures de l'eau dans le lac Cultus (Shortreed 2007; Sumka 2017). Les œufs et les alevins nouvellement éclos peuvent être la proie des meuniers et chabots (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009).



Figure 2. Carte bathymétrique du lac Cultus montrant les frayères historiques et plus récemment confirmées du saumon rouge du lac Cultus (*Oncorhynchus nerka*).

2.1.1.3. Croissance en eau douce

L'émergence des alevins à partir du substrat de gravier et leur déplacement éventuel vers les eaux plus profondes commencent habituellement en avril et se poursuivent pendant environ les deux mois suivants (Mueller et Enzenhofer 1991). Une fois qu'ils ont quitté les rives, les alevins affichent un fort comportement de migration verticale diurne; ils restent dans la zone profonde (près des sédiments du lac) pendant les heures de clarté, probablement pour éviter la prédation, et montent dans la colonne d'eau la nuit pour se nourrir (Clark et Levy 1988; Scheuerell et Schindler 2003). La plupart des alevins restent dans le lac pendant un an, mais une petite proportion d'entre eux y demeure pendant deux ans. Durant ce stade biologique, les alevins se nourrissent de zooplancton, comme *Daphnia* spp., et de copépodes (Shortreed 2007). On a constaté que l'épinoche à trois épines, le saumon kokani juvénile et le chabot pygmée du lac Cultus ont tous un régime alimentaire qui chevauche celui du saumon rouge du lac Cultus au stade d'alevin, mais la concurrence avec d'autres espèces ne semble pas être un facteur limitatif pour le moment. Les prédateurs indigènes du saumon rouge juvénile sont la sauvagesse du Nord, le Dolly Varden, le saumon coho, la truite fardée et la truite arc-en-ciel (Ricker 1941). En 2018, l'achigan à petite bouche, espèce envahissante et prédateur connu des saumons juvéniles dans d'autres réseaux hydrographiques, a été observé dans le lac Cultus (Carey *et al.* 2011), où on a démontré sa prédation sur les saumons rouges juvéniles (Wendy Margetts, Université Thompson Rivers, Colombie-Britannique, comm. pers.).

2.1.1.4. Dévalaison

Au printemps suivant la croissance dans le lac, les saumons rouges juvéniles du lac Cultus effectuent généralement leur dévalaison en tant que smolts d'âge 1. En prévision du passage d'un milieu dulcicole à un milieu marin, les alevins subissent d'importants changements physiologiques et morphologiques lors d'un processus appelé smoltification (Burgner 1991). Cette transformation comprend des changements de forme, de couleur et d'osmorégulation, et on pense qu'elle est déclenchée par des changements de photopériode pour les poissons qui ont atteint une taille donnée (Burgner 1991). La migration des smolts hors du lac Cultus est l'une des premières parmi les populations du Fraser (Hartman *et al.* 1967), se produisant généralement de la mi-mars jusqu'à la fin mai. La dévalaison se fait par le ruisseau Sweltzer et la rivière Vedder, puis par le Fraser, jusque dans l'estuaire et la mer des Salish (déroit de Georgie). De là, le saumon rouge du lac Cultus migre habituellement vers le nord le long du plateau continental avant d'entrer dans l'océan Pacifique Nord en hiver (Tucker *et al.* 2009).

2.1.1.5. Croissance en mer

Le saumon rouge peut demeurer d'un à quatre ans dans l'océan Pacifique, mais la plupart des individus y restent deux ou trois ans avant de retourner dans leur milieu d'eau douce natal pour frayer et mourir (Burgner 1991). Pendant leur séjour en mer, les saumons rouges du Fraser sont répartis dans tout le golfe d'Alaska et vers le sud jusqu'à une latitude d'environ 46 °N (Forrester 1987). Le saumon rouge croît considérablement en mer, plus de 98 % de sa biomasse finale provenant de ressources marines (Quinn 2005). La croissance se produit principalement en été, lorsque les proies sont facilement disponibles et que les températures chaudes font augmenter les taux métaboliques (Quinn 2005). Le saumon rouge se nourrit de zooplancton, de petits poissons et de calmars (Manzer 1968), mais il s'adapte très facilement aux changements dans la disponibilité des proies marines (Kaeriyama *et al.* 2004; Farley *et al.* 2018).

2.2. ÉLÉMENT 2 : ÉVALUATION DE LA TRAJECTOIRE RÉCENTE DE L'ESPÈCE CONCERNANT L'ABONDANCE, LA RÉPARTITION ET LE NOMBRE DE POPULATIONS

L'évaluation du saumon rouge du lac Cultus est fondée sur le dénombrement des géniteurs qui entrent dans le lac en franchissant une barrière de dénombrement exploitée continuellement depuis les années 1920. On a utilisé les dénombrements des adultes à la barrière pour évaluer l'abondance totale et les tendances récentes. Les données sont présentées à la figure 3, qui comprend des années supplémentaires de données depuis l'évaluation du COSEPAC.

L'évaluation du COSEPAC reposait sur les géniteurs d'origine naturelle (les poissons d'écloserie avaient été retirés des dénombrements); la contribution des géniteurs provenant d'une écloserie est également indiquée sur la figure (barres rouges). Les moyennes sur une génération les plus récentes (quatre ans, de 2015 à 2018) sont de 254 géniteurs d'origine naturelle et de 941 géniteurs d'écloserie. La persistance de la petite abondance annuelle de la population, particulièrement par rapport à la production historique, donne à penser qu'une réévaluation du statut actuel d'espèce **en voie de disparition** n'est pas justifiée pour le moment.

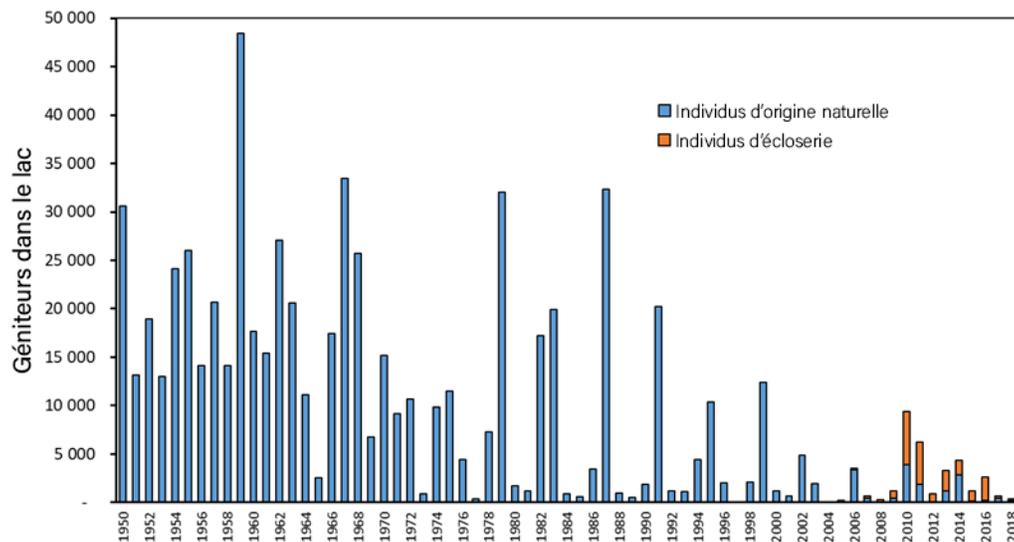


Figure 3. Nombre de géniteurs adultes entrés dans le lac Cultus par la barrière de dénombrement.

2.3. ÉLÉMENT 3 : ESTIMATIONS DES PARAMÈTRES ACTUELS OU RÉCENTS DU CYCLE BIOLOGIQUE DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS

On dispose d'un ensemble détaillé d'estimations des paramètres du cycle biologique de la population de saumon rouge du lac Cultus, qui remonte à 1920. Le tableau 1 présente des statistiques sommaires pour les estimations utilisées dans les projections de la population. La plupart sont fondées sur des données recueillies depuis 1999. Le cas échéant, des comparaisons ont été établies avec la période antérieure (1920 à 1990). La plupart des paramètres reposent sur des données recueillies à partir du déversoir situé sur le ruisseau Sweltzer, en aval de la sortie du lac, qui fournissent des estimations exactes des adultes qui pénètrent dans le lac et des smolts qui en sortent, ainsi que des données sur les caractéristiques biologiques des poissons.

La **survie du stade de smolt à celui de recrue** est la survie des smolts à partir de la barrière de dénombrement jusqu'au recrutement, définie comme la somme du nombre de poissons

matures qui atteignent le lac et de ceux qui sont capturés dans les pêches. Pour calculer la survie du stade de smolt à celui de recrue, il faut estimer la mortalité par pêche (taux d'exploitation) à partir des reconstitutions des pêches. Les taux d'exploitation sont sujets à des niveaux d'incertitude inconnus, en particulier dans la période récente où la rareté des poissons du lac Cultus dans les prises oblige à utiliser des estimations d'après des populations voisines plus abondantes comme substituts.

La **survie du stade de smolt à celui de géniteur** est la survie des poissons entre le moment où ils quittent le lac en tant que smolts et le moment où ils y reviennent en tant qu'adultes. Les estimations connexes sont considérées comme très exactes, car elles sont fondées uniquement sur les dénombrements au déversoir. Le taux de survie du stade de smolt à celui de géniteur est inférieur à celui du stade de smolt à celui de recrue, car ce dernier exclut la mortalité par pêche.

Il est important de noter la diminution de la production de smolts (présentée sous la forme du rapport smolts/géniteur) et de la survie du stade de smolt à celui de recrue, par rapport aux moyennes historiques. La réduction de la mortalité par pêche a compensé la réduction de la survie du stade de smolt à celui de recrue, expliquant la faible différence entre les taux de survie du stade de smolt à celui de géniteur entre la période historique et la période récente.

Récemment, les années de très faibles taux de production de smolts ont été de plus en plus fréquentes (figure 4). Les taux de production de smolts sont bien inférieurs à ceux nécessaires à la survie ou au rétablissement de la population (figure 4A; ligne tiretée).

Tableau 1. Paramètres du cycle biologique du saumon rouge du lac Cultus. Les moyennes et les plages pour la période récente décrivent les données utilisées dans les projections prospectives. Les données historiques sont fournies aux fins de comparaison.

Paramètre	Moyenne	Plage	Années	Moyenne historique	Source et commentaire
Fécondité	3 563	3 088 à 3 998	2002 à 2018	4 094	Données récentes : registres des stocks de géniteurs de l'écloserie. Données historiques : Foerster 1968.
Smolts/géniteur	31,6	1 à 107	1999 à 2016	76,2	Données historiques de 1925 à 1990, années intermittentes.
Survie smolt-recrue	0,026	0,009 à 0,055	1999 à 2016	0,081	Le nombre de recrues est l'abondance avant la pêche. Données historiques de 1950 à 1990.
Survie smolt-géniteur	0,017	0,010 à 0,040	1999 à 2016	0,020	Survie du smolt revenant à la barrière en tant que géniteur, données historiques de 1925 à 1990.
Taux d'exploitation	0,26	0,03 à 0,71	1999 à 2018	0,67	MPO (2018a, tableau 1 : colonne « TE d'après saison [direct] du saumon rouge du lac Cultus »), comprend une valeur provisoire de 0,50 pour 2018. Données historiques de 1954 à 1998.

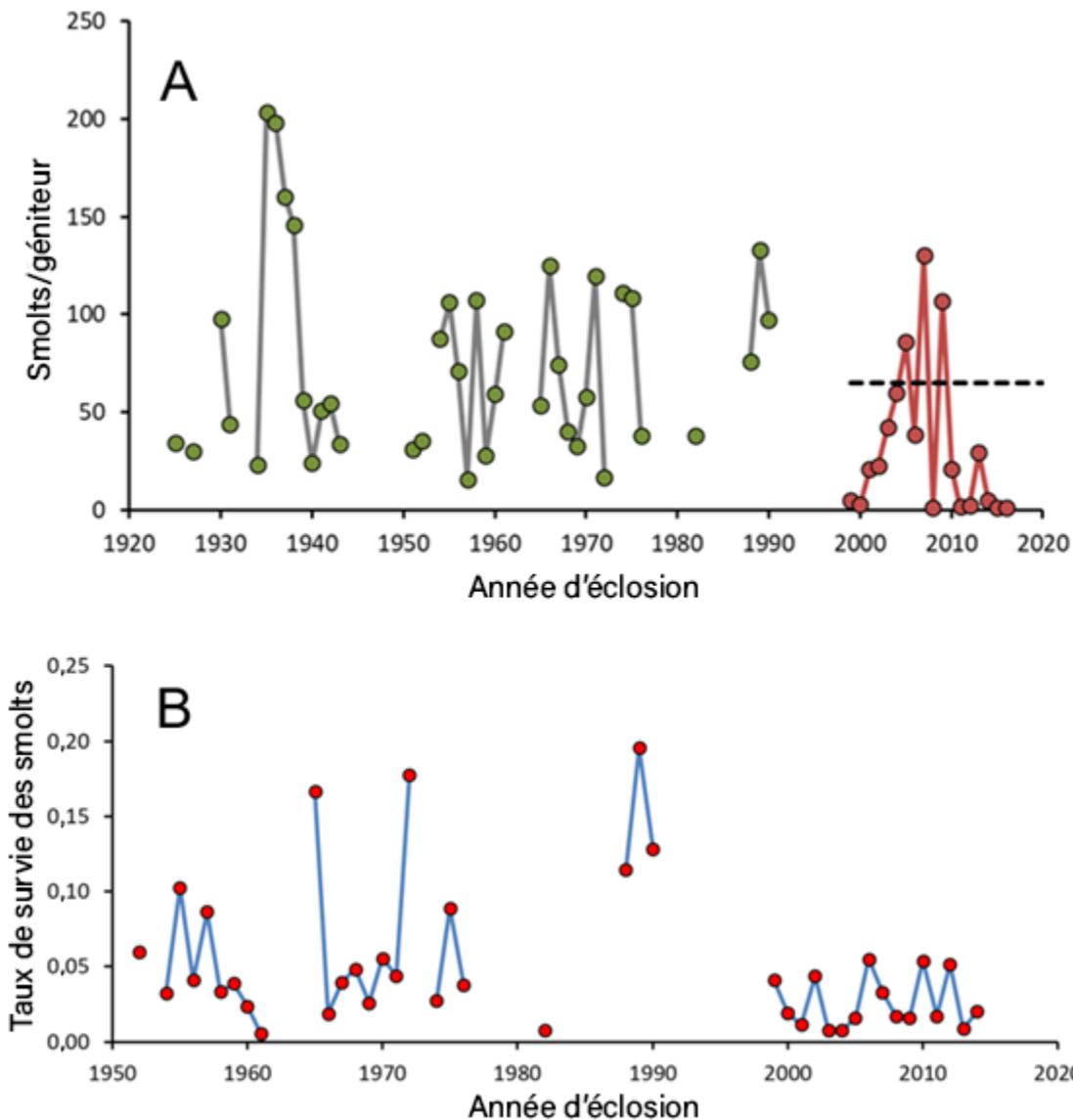


Figure 4. Série chronologique des taux de production de smolts pour le saumon rouge du lac Cultus. Les périodes historique (en vert) et récente (en rouge) sont délimitées. A) Smolts/géniteur est le rapport des smolts d'origine naturelle produits par parent (y compris les géniteurs d'écloserie ces dernières années) ayant entré dans le lac deux ans plus tôt. La ligne pointillée indique le niveau approximatif de production de smolts requis pour assurer la survie de la population (c.-à-d. le niveau de remplacement) pour les niveaux actuels d'exploitation et les récents taux de survie en mer. B) Taux de survie du stade de smolt à celui d'adulte pour les individus d'origine naturelle. Les taux de survie des smolts sont calculés à partir des nombres de smolts non marqués et de géniteurs à la barrière du lac Cultus, ainsi que des taux d'exploitation estimés. Pour les années d'éclosion 2000 à 2014, on a utilisé la moyenne des séries chronologiques des taux d'exploitation après la saison directs et dérivés d'une approximation (MPO 2018a).

3. BESOINS EN MATIÈRE D'HABITAT ET DE RÉSIDENCE

3.1. ÉLÉMENT 4 : PROPRIÉTÉS DE L'HABITAT NÉCESSAIRES AU BON DÉROULEMENT DE TOUS LES STADES DU CYCLE BIOLOGIQUE DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS

3.1.1. Habitat de fraie et d'incubation des œufs

La reproduction (c.-à-d. la fraie) est une fonction vitale de toutes les espèces de poissons. C'est principalement dans des écosystèmes d'eau douce reliés hydrologiquement à l'océan Pacifique que le saumon rouge fraie et que se passe l'incubation des œufs, ce qui révèle une grande diversité dans le choix des sites et des périodes. L'habitat de fraie et d'incubation est choisi en fonction de la composition du substrat (taille médiane des particules d'environ 25 mm; Quinn 2005) et de sa perméabilité, de la qualité de l'eau interstitielle et du débit parmi le substrat, ainsi que de la température (Burgner 1991). Les frayères se trouvent dans différents habitats, y compris des rivières, des lacs et leurs affluents. Le saumon rouge du lac Cultus se reproduit uniquement dans le lac (Ricker 1966) et semble sélectionner des sites (caractéristiques), dans le lac Cultus, associés à une remontée des eaux souterraines oxiques ou à des attributs de la circulation de l'eau du lac (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009).

Le saumon rouge du lac Cultus fraie relativement profondément (profondeur moyenne de la fraie en décembre d'environ 13,5 m; 2009 à 2018) et tard dans l'année, à des températures basses et dans des conditions isothermes typiques dans le lac Cultus ($7,48\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,07\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1 ET], mesuré à partir du bassin central; 2009 à 2018). On pense que ce comportement nécessite de sélectionner une remontée des eaux souterraines chaudes (environ $8\text{ }^{\circ}\text{C}$), qui pourrait accélérer le développement des embryons pour permettre l'émergence printanière en avril et en mai (Ricker 1937; Brannon 1987; Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). Les conditions plus tranquilles dans les milieux de fraie des rives profondes choisies par le saumon rouge du lac Cultus réduisent probablement certains agents de stress lors des premiers stades biologiques auxquels sont confrontées les populations qui se reproduisent dans les cours d'eau et les rivières, comme l'affouillement du substrat, l'érosion et la formation de frasil, limitant ainsi les dommages physiques causés aux œufs. Cependant, contrairement aux environnements des cours d'eau, où les débits oxygènent les embryons pendant l'incubation, dans les frayères lacustres, la circulation de l'eau oxygénée doit venir de sources souterraines ou de mélanges hivernaux sous une colonne d'eau isotherme (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009).

Les frayères du lac Cultus choisies par le saumon rouge ont beaucoup changé au cours de la période de données. Les sites historiques comprenaient la plage Lindell, la pointe Snag, la baie Spring, la baie Mallard, la baie Salmon et la baie Snag (baie Honeymoon; Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). Cependant, les relevés par VTG effectués de 2002 à 2004 ont confirmé la fraie dans la moitié environ des frayères historiques connues, y compris la baie Spring, la plage Lindell, la baie Salmon et la baie Honeymoon (figure 2; Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). Après 2004, des adultes matures n'ont été observés en train de se reproduire que lors de relevés par VTG effectués sporadiquement par le MPO dans la baie Spring (Paul Welch, MPO, Kamloops, Colombie-Britannique, comm. pers.). Compte tenu de la surveillance limitée assurée par VTG et de la grande profondeur des frayères contemporaines dans le lac Cultus, l'utilisation d'autres frayères profondes ne peut être exclue.

Le saumon rouge du lac Cultus semble également choisir des frayères dans un plus large éventail de profondeurs, y compris des sites plus profonds (moins de 2 m à 17 m; Pon *et al.*

2010) que par le passé (0,5 à 6 m; Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). Bien que les mécanismes qui sous-tendent ce changement de comportement soient en grande partie inconnus, l'approfondissement apparent des frayères pourrait être compensatoire, par rapport à la colonisation et à la vaste couverture des substrats littoraux (62 %; profondeurs de 1 à 8 m) par le myriophylle en épi, une espèce envahissante (Stables 2004; données inédites du MPO 2014). D'autres facteurs pourraient contribuer à l'approfondissement apparent des frayères, notamment la hausse des températures des eaux de surface ou les changements spatiotemporels de l'apport d'eaux souterraines associés aux changements climatiques (Sumka 2017), la dégradation de la qualité de l'eau et la qualité du substrat (demande biologique en oxygène plus élevée dans les eaux interstitielles en raison du dépôt de matières organiques et de la décomposition découlant de l'eutrophisation continue du lac; Shortreed 2007; Putt *et al.* 2019), les modifications de l'habitat littoral (artificialisation des rives, végétation riveraine et élimination de l'ombre) ou les changements dans la guildes des prédateurs des zones littorales (augmentation des populations de piscivores, achigan à petite bouche [espèce envahissante]). Les substrats lacustres situés entre 1 et 20 m de profondeur ont déjà été désignés comme un important habitat de reproduction pour le saumon rouge du lac Cultus, en particulier à la plage Lindell, dans la baie Mallard, sur les rives sud et ouest du lac, respectivement, et à la pointe Snag, dans la baie Spring, la baie Salmon et la baie Snag (baie Honeymoon), le long de la base d'International Ridge (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). Ces environnements sont caractérisés par des substrats composés d'une plateforme de schiste fracturée en profondeur (sites d'International Ridge) et de galets (plage Lindell, baie Mallard). Les individus au stade biologique de l'alevin vésiculé (avec sac vitellin) utilisent les eaux interstitielles parmi les substrats comme couvert pendant la maturation, avant l'émergence.

Compte tenu de la sensibilité disproportionnée des premiers stades biologiques à la mortalité, ainsi que de l'importante utilisation de substrats lacustres de qualité pour la fraie, l'incubation des œufs et la maturation des alevins vésiculés, tous les graviers, les cailloux et le schiste du lac de qualité propice à la reproduction sont considérés comme des caractéristiques clés pour l'accomplissement des fonctions vitales critiques de la fraie et de l'incubation pour le saumon rouge du lac Cultus. De plus, compte tenu de la nature stricte de la fraie littorale dans le lac Cultus, l'importance de la qualité de l'eau interstitielle, des niveaux d'oxygène et du renouvellement de l'eau pour la réussite de l'incubation des œufs, les zones d'eaux souterraines hyporhéiques et leurs aquifères sont considérés comme des caractéristiques essentielles à la persistance de l'espèce, comme l'a souligné l'Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009).

3.1.2. Habitat de croissance des juvéniles

Les saumons rouges juvéniles nageant librement sont d'abord étroitement associés aux substrats littoraux (alevins littoraux; Burgner 1991). Pendant la maturation, les alevins littoraux utilisent les ressources littorales, habituellement du début de juin à la mi-juillet, pour se nourrir de larves d'insectes aquatiques et de crustacés zooplanctoniques (Quinn 2005). Les données contemporaines sur le moment de l'émergence des juvéniles nageant librement et les résidences littorales dans le lac Cultus sont largement insuffisantes. Historiquement, à la fin du mois de juillet, la majorité des alevins du lac Cultus ont passé dans les eaux profondes pour exploiter le zooplancton dans les réseaux trophiques pélagiques, qui sont largement limités à la zone euphotique (Shortreed 2007). Comme pour la plupart des alevins des autres populations de saumon rouge, une fois dans les eaux profondes, les alevins du lac Cultus entreprennent des migrations verticales diurnes, se nourrissant dans la colonne d'eau pendant les périodes crépusculaires et occupant des environnements profonds et sombres du lac pendant les heures de clarté, probablement pour éviter la prédation (Clark et Levy 1988; Scheuerell et Schindler 2003). Les observations comparatives tirées de relevés hydroacoustiques et au chalut indiquent

qu'au cours des heures de clarté, les alevins du lac Cultus sont étroitement associés aux sédiments lacustres en profondeur (Levy 1989; Garrett Lidin, MPO, Cultus Lake, Colombie-Britannique, comm. pers.). Des observations semblables pendant la nuit indiquent que l'utilisation moderne de l'épilimnion du lac pendant la période avec stratification est limitée (Garrett Lidin, MPO, Cultus Lake, Colombie-Britannique, comm. pers.). Les mécanismes en sont inconnus, mais les températures épilimniques estivales maximales dans le lac Cultus (plus de 24,5 °C) dépassent maintenant les seuils de fortes réductions de la croissance (de 20 à 24 °C; Brett et Higgs 1970) et atteignent ou dépassent les tolérances thermiques pour l'exposition prolongée des saumons rouges juvéniles (Brett 1952), ce qui peut limiter le volume de croissance disponible dans le lac de façon proportionnelle pendant une grande partie de la période avec stratification. Durant la période sans stratification (habituellement de décembre à avril), cependant, les alevins du lac Cultus peuvent utiliser toute la colonne d'eau de la zone pélagique.

Pour satisfaire à la fonction vitale critique de la croissance dans le lac, ainsi que pour assurer une croissance et une survie suffisantes pour la dévalaison, l'intégrité écologique de l'écosystème de croissance est essentielle. En particulier, la structure et les fonctions du réseau trophique pélagique, de même que la qualité de l'eau, sont des caractéristiques essentielles à la persistance du saumon rouge du lac Cultus. Les paramètres importants de l'habitat comprennent le maintien de proies zooplanctoniques (y compris *Daphnia* spp.) abondantes, durables et comestibles qui sont soutenues par une eau très limpide, des niveaux modérés d'éléments nutritifs et des assemblages d'algues comestibles, diversifiés et moyennement productifs. Étant donné l'importance de l'utilisation prolongée de l'habitat profond pendant la phase de clarté du cycle de migration verticale diurne, l'eau oxique (plus de 5 mg/L d'oxygène dissous) dans toute la colonne d'eau, et en particulier dans les eaux profondes, est un paramètre essentiel à la persistance de l'espèce. De plus, en cas d'abondance réduite, les influences et les interactions associées aux prédateurs ainsi qu'aux agents pathogènes, parasites et maladies sur les saumons rouges juvéniles dans le lac peuvent être des facteurs clés. Par conséquent, des densités modérées de prédateurs et la présence minimale d'agents pathogènes, de parasites ou de maladies sont considérées comme des caractéristiques et paramètres clés.

3.1.3. Habitat de dévalaison en eau douce

La plupart des saumons rouges du lac Cultus quittent le lac au printemps (de la fin mars à la fin mai) à l'âge 1. Les smolts passent par la sortie située à l'extrémité nord du lac Cultus et se déplacent vers l'aval en empruntant le ruisseau Sweltzer sur environ 3 km, la rivière Vedder sur environ 13 km et la rivière Sumas sur environ 3 km, avant d'entrer dans le Fraser. La connectivité de l'habitat par cette voie migratoire est en grande partie ininterrompue, à l'exception de la barrière de dénombrement des smolts installée juste en aval de la sortie du lac. La température de l'eau dans le ruisseau Sweltzer est d'environ 7 °C à la fin du mois de mars, lorsque les smolts commencent leur dévalaison, et se réchauffe jusqu'à 15 °C approximativement à la fin du mois de mai (MPO, données inédites). Les smolts descendent le Fraser sur encore 93 km avant de pénétrer dans la mer des Salish (déroit de Georgie). Les saumons rouges passent généralement peu de temps dans l'estuaire (Healey 1982), mais peuvent prendre de 43 à 54 jours, en moyenne, pour franchir le déroit (Preikshot *et al.* 2012). Les caractéristiques et les paramètres clés de l'habitat sont un passage vers l'aval non entravé, un débit d'eau suffisant et le maintien de températures de l'eau tolérables (moins de 18 °C).

3.1.4. Habitat de croissance en mer

Le saumon rouge, un poisson anadrome, accomplit environ la moitié de son cycle biologique dans l'océan Pacifique, y poursuivant sa croissance et sa maturation jusqu'à ce qu'il atteigne une biomasse suffisante pour revenir frayer dans son milieu d'eau douce natal (Burgner 1991). Comme on manque de renseignements définitifs sur l'aire de répartition du saumon rouge du lac Cultus dans l'océan Pacifique, on suppose que ses besoins en matière d'habitat marin sont semblables à ceux d'autres saumons rouges de type lacustre. Bien que la maturation en mer se fasse sur une zone géographique beaucoup plus vaste (le nord-est du Pacifique), les habitats de croissance dans l'océan ont des caractéristiques généralement analogues à ceux en eau douce. En particulier, les réseaux trophiques productifs pour toutes les classes de taille du saumon rouge du lac Cultus, y compris les proies principales comme les euphasiacés, les amphipodes, les poissons, les crevettes juvéniles et les larves de décapodes, sont une caractéristique clé de l'augmentation de la biomasse, de la performance nataoire et de la survie, les proies dominantes variant selon le domaine océanique et le temps (Brodeur *et al.* 2003; Farley *et al.* 2018). Les principales caractéristiques du réseau trophique océanique sont une biomasse abondante de proies et des correspondances phénologiques et spatiales entre les proies et le saumon rouge pendant sa maturation le long de la marge continentale et en haute mer.

Comme lorsqu'ils sont en eau douce, les saumons du Pacifique juvéniles dans l'océan sont assujettis à la prédation. Les poissons piscivores, les mammifères marins, les oiseaux et les cétacés se nourrissent tous activement de saumon rouge dans les habitats de l'estuaire, du plateau continental et de l'océan. Par conséquent, les guildes de prédateurs marins peu ou moyennement abondantes, qui produisent des taux de prédation faibles ou modérés, sont probablement la clé de la persistance, particulièrement à la faible densité de la population de saumon rouge du lac Cultus. Les pêches en mer sont également une source majeure de mortalité pour le saumon rouge du lac Cultus (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009), et un forçage sélectif sur les caractéristiques clés des habitats océaniques (guildes de poissons, relations trophiques) et, par conséquent, leur minimisation limite les transformations écosystémiques qui peuvent influencer la persistance (Jennings et Kaiser 1998; Coleman et Williams 2002). De même, la production à grande échelle en écloserie de saumons roses et kétas a eu une incidence sur la capacité de charge de l'océan Pacifique Nord pour le saumon rouge, par la concurrence directe, comme le démontrent les corrélations négatives importantes entre la biomasse des saumons d'écloserie et celle des saumons rouges sauvages dans l'océan (Ruggerone *et al.* 2010; Ruggerone et Irvine 2018). Ainsi, une biomasse modérée des concurrents est probablement une caractéristique et un paramètre écologiques océaniques clés qui sont importants pour la persistance.

3.1.5. Habitat de montaison en eau douce

Le saumon rouge du lac Cultus retourne dans le lac Cultus avec le groupe de saumons rouges du Fraser à montaison tardive, habituellement du mois de septembre à la fin du mois de novembre. Les premiers individus à arriver poursuivent leur maturation dans le lac avant de la fraie, qui se produit maintenant du mois de novembre au début du mois de janvier (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). Les adultes en montaison empruntent la même voie en eau douce que les smolts en dévalaison. Après être entrés dans le Fraser, ils nagent vers l'amont sur 93 km avant de passer par les rivières Sumas et Vedder et le ruisseau Sweltzer pour entrer dans le lac Cultus. À leur arrivée dans le lac Cultus, les saumons rouges adultes se déplacent rapidement vers les eaux fraîches dans les profondeurs du lac. D'après les travaux de marquage acoustique effectués en 2006 et 2007, ils restent généralement à des

profondeurs inférieures à la thermocline à des températures de l'eau de 6 à 8 °C (Pon *et al.* 2010).

Les caractéristiques clés de l'habitat de montaison des adultes sont donc semblables à celles de l'habitat de dévalaison des smolts. Les caractéristiques et les attributs clés de l'habitat sont un passage vers l'amont non entravé, un débit d'eau suffisant pour permettre le passage des adultes et le maintien de températures de l'eau tolérables (inférieures à 19 à 21 °C), car il a été démontré que des températures plus élevées gênent ou interrompent la montaison des géniteurs (Hodgson et Quinn 2002; Hyatt *et al.* 2003). Les maladies, parasites et agents pathogènes endémiques et transmis (p. ex., maladie bactérienne du rein, virus de la nécrose hématopoïétique infectieuse, *Parvicapsula* spp.) influencent également la survie du saumon rouge du lac Cultus (Bradford *et al.* 2010; Ackerman *et al.* 2014) et de faibles taux d'infection et charges parasitaires sont des caractéristiques et des paramètres clés de la persistance.

3.2. ÉLÉMENT 5 : INFORMATION SUR L'ÉTENDUE SPATIALE DES ZONES DE L'AIRE DE RÉPARTITION DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS SUSCEPTIBLES DE PRÉSENTER CES PROPRIÉTÉS DE L'HABITAT

3.2.1. Aire de répartition en eau douce

L'habitat de fraie et de croissance des juvéniles est confiné aux limites humides du lac Cultus. En partie en raison de la profondeur à laquelle l'espèce fraie, il existe peu d'information sur l'emplacement actuel de l'habitat de fraie viable dans le lac, mais son étendue s'est rétrécie au fil du temps (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). Récemment, la fraie a été confirmée visuellement par VTG dans la baie Spring (figure 2; Brian Leaf, MPO, Kamloops, Colombie-Britannique, comm. pers.), mais on ignore encore la quantité totale d'habitat de fraie convenable.

On pense que les saumons rouges juvéniles récemment éclos et nageant librement utilisent dans un premier temps les habitats littoraux avant de se déplacer vers les eaux profondes en juillet. Cependant, il n'y a pas eu de relevé complet de tous les habitats littoraux du lac Cultus pour déterminer l'étendue de l'habitat des saumons juvéniles à ce stade biologique. Les habitats en eaux profondes utilisés par les juvéniles de juillet jusqu'au moment de la dévalaison en tant que smolts, comprennent toutes les zones du lac. Comme on l'a déjà mentionné, les juvéniles du lac Cultus ne se trouvent généralement pas dans la première tranche d'eau de 0 à 4 m de la surface pendant la période avec stratification.

Les habitats de migration en eau douce des adultes et des smolts entre le lac Cultus et l'océan Pacifique sont le ruisseau Sweltzer (environ 3 km), la rivière Vedder (environ 13 km), la rivière Sumas (3 km), le Fraser (environ 93 km) et les eaux saumâtres de l'estuaire du Fraser.

3.2.2. Aire de répartition en mer

On dispose de renseignements relativement limités pour quantifier les habitats marins utilisés par le saumon rouge du lac Cultus. D'après des études par marquage, les juvéniles passent de 25,6 à 34,1 jours dans la mer des Salish (déroit de Georgie), où ils se déplacent généralement vers le nord en longeant la côte continentale et en traversant le détroit de Johnstone (Welch *et al.* 2009). Bien que l'on sache que les stratégies de migration des juvéniles varient considérablement entre les espèces et les populations de saumons, la majorité des saumons rouges du lac Cultus a toujours suivi cette voie de migration vers le nord, plutôt que de contourner la pointe sud de l'île de Vancouver (Melnichuk *et al.* 2010). L'aire de répartition et la période de la migration de cette population devraient coïncider avec celles des autres

populations de saumons rouges du Fraser, qui sont présentes dans le golfe d'Alaska et vers le sud jusqu'à une latitude approximative de 46 °N (Forrester 1987).

3.3. ÉLÉMENT 6 : PRÉSENCE ET ÉTENDUE DES CONTRAINTES ASSOCIÉES À LA CONFIGURATION SPATIALE

À l'heure actuelle, il n'y a pas de contraintes spatiales ou de barrières persistantes à l'accès à l'habitat pour tous les stades biologiques du saumon rouge du lac Cultus, à l'exception d'une barrière de dénombrement installée depuis longtemps sur le ruisseau Sweltzer. Cette dernière est exploitée par le MPO et sert à compter les smolts en dévalaison au printemps et les adultes en montaison entre la fin de l'été et la fin de l'automne. Pendant qu'elle est en exploitation, la barrière est vérifiée régulièrement; les juvéniles peuvent être maintenus dans le piège pendant huit heures avant le dénombrement et des adultes sont récoltés pour le programme d'apports de poissons d'écloserie. En période de forte abondance de saumons en migration, la barrière est vérifiée plus fréquemment et les temps de rétention sont réduits. Pour les smolts, en particulier, les retards à la barrière peuvent accroître le risque de prédation. Des achigans à petite bouche sont entrés dans le piège de dénombrement des smolts et ont été observés dans le ruisseau Sweltzer, directement en amont de la barrière, pendant la dévalaison des smolts. D'autres prédateurs comme les harles (*Mergus Merganser*), les visons (*Neogale vison*), les ratons laveurs (*Procyon Lotor*) et les loutres de rivière (*Lontra canadensis*) ont été observés à proximité de la barrière de dénombrement (Dennis Klassen, MPO, Kamloops, Colombie-Britannique, comm. pers.) et peuvent contribuer à la mortalité globale.

3.4. ÉLÉMENT 7 : ÉVALUATION DU CONCEPT DE RÉSIDENCE ET DESCRIPTION DE LA RÉSIDENCE DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS

La LEP définit comme suit la résidence d'une espèce :

« Gîte — terrier, nid ou autre aire ou lieu semblable — occupé ou habituellement occupé par un ou plusieurs individus pendant tout ou partie de leur vie, notamment pendant la reproduction, l'élevage, les haltes migratoires, l'hivernage, l'alimentation ou l'hibernation. »

L'application de l'article 33 (qui concerne la résidence) de la LEP aux espèces aquatiques en péril exige que les quatre conditions suivantes soient remplies pour que le concept de résidence soit mis en œuvre :

1. l'espèce utilise un gîte discret dont la forme structurelle et la fonction sont semblables à celles d'un terrier ou d'un nid;
2. un individu de l'espèce a fait un investissement dans la création ou la modification du gîte;
3. le gîte permet l'accomplissement réussi de fonctions essentielles du cycle biologique, comme la fraie et la croissance;
4. le gîte est occupé par un ou plusieurs individus pendant une ou plusieurs parties de leur cycle biologique.

Les nids construits pendant la période de fraie des salmonidés correspondent très étroitement aux critères de « résidence », tels que définis à l'article 33 de la LEP. En tant que lieu utilisé pour la fraie, la ponte et l'incubation des œufs ainsi que la croissance des alevins vésiculés qui restent dans les eaux interstitielles avant leur émergence, les nids répondent aux critères de forme structurelle et de fonction d'une résidence. De plus, chaque femelle investit de l'énergie dans la création d'un nid, qui est essentiel à l'incubation et à l'éclosion de ses milliers d'œufs (environ 2 000 à 5 000 pour le saumon rouge; Burgner 1991). Le saumon rouge du lac Cultus se reproduit uniquement dans des zones littorale et sur des plateformes submergées du lac

(COSEPAC 2003; Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). Ces secteurs du lac Cultus sont donc considérés comme des résidences en vertu de la LEP.

4. MENACES ET FACTEURS LIMITATIFS POUR LA SURVIE ET LE RÉTABLISSMENT DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS

4.1. ÉLÉMENT 8 : MENACES POUR LA SURVIE ET LE RÉTABLISSMENT DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS

Le MPO (2014) a établi une approche normalisée en deux étapes pour évaluer les menaces, qui comprend une évaluation des menaces au niveau de la population, suivie d'une évaluation au niveau de l'espèce. Comme les saumons du Pacifique présentent une adaptation très localisée aux habitats natals et des cycles biologiques comprimés (3 à 5 ans; Groot et Margolis 1991), ce qui entraîne une divergence évolutive rapide (Hendry *et al.* 2000), les différentes populations sont souvent définies et gérées comme des UC (MPO 2005; Holtby et Ciruna 2007) ou des UD (LEP 2002) au Canada, et de la même façon que les unités significatives pour l'évolution aux États-Unis (Waples 1991). Compte tenu des différences importantes entre les populations, les populations individuelles sont effectivement traitées comme des espèces aux fins de la conservation. Par conséquent, on a suivi le processus en deux étapes, en tenant compte uniquement de l'UD du saumon rouge du lac Cultus.

Une menace est définie ici comme suit : « Activité ou processus humain qui a causé, cause ou peut causer des dommages à une espèce sauvage en péril, sa mort ou des modifications de son comportement, ou la destruction, la détérioration ou la perturbation de son habitat jusqu'au point où des effets sur la population se produisent » (MPO 2014). Une activité humaine peut exacerber un processus naturel (MPO 2014). Les facteurs limitatifs sont définis comme des facteurs non anthropiques qui, dans une plage de variation naturelle, limitent l'abondance et la répartition d'un ou de plusieurs individus d'une espèce sauvage ou d'une population (p. ex., âge à la première reproduction, fécondité, âge à la sénescence, abondance des proies, taux de mortalité; MPO 2014). Les menaces et les facteurs limitatifs pour le saumon rouge du lac Cultus ont été évalués et classés par ordre de priorité dans un tableau en fonction des exigences établies par le MPO (MPO 2014) [tableaux 2 et 3]. Le risque associé à la menace ou au facteur limitatif au niveau de l'UD est calculé à l'aide du classement du niveau des répercussions et de la probabilité de réalisation, ainsi que de leur représentation dans la matrice des menaces et des risques, afin d'obtenir un risque global de la menace ou du facteur limitatif selon les indications données dans MPO 2014.

4.1.1. Interceptions dans les pêches (adultes)

Le saumon rouge du lac Cultus fait partie du groupe à montaison tardive, effectuant sa montaison en même temps que d'autres stocks abondants à montaison tardive (p. ex., saumon rouge de la rivière Shuswap à montaison tardive; Grant *et al.* 2011). Ainsi, les géniteurs sont interceptés en tant que *prises accessoires* dans le cadre de pêches ciblant des stocks mixtes de saumon rouge du Fraser, à des taux de prise accessoire estimés variables liés à la cooccurrence de pêches ciblant des stocks plus abondants (2004 à 2018 : 3 à 71 %; MPO 2018a, 2019a; figure 5). Des évaluations antérieures ont souligné que les pêches ciblant des stocks mixtes sont un facteur clé de la baisse de l'abondance de la population (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009; Cohen 2012). De plus, le saumon rouge canadien est récolté dans des pêches internationales pratiquées le long de ses routes migratoires (en Alaska; Rosenberger *et al.* 2022), ce qui représente des pertes incertaines, mais potentiellement influentes pour la population, en particulier à ses faibles abondances récentes. Les pertes d'adultes en montaison en raison des pêches limitent la diversité

génétique de la population, qui est déjà faible sur certaines lignées (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009) et peut à son tour influencer sur les réactions de la valeur adaptative aux agents de stress actuels et futurs (Allendorf *et al.* 2008; Allendorf et Hard 2009).

Le Plan de gestion intégrée des pêches (PGIP) du saumon sur la côte sud de la Colombie-Britannique définit l'exploitation autorisée du saumon rouge du lac Cultus comme la plus élevée des valeurs suivantes : 1) le taux d'exploitation pour une abondance faible établi pour le saumon rouge à montaison tardive ou 2) le taux d'exploitation qui correspond au rétablissement continu de la population, fondé sur les données en cours de saison sur l'abondance des remontes et le nombre potentiel de géniteurs ayant frayé (MPO 2019a). La récolte du saumon rouge du lac Cultus en tant que prises accessoires en mer a été mise en évidence comme un mécanisme causal principal responsable de la mise en péril de la population, en raison des taux d'exploitation élevés dans les années 1990, et un facteur continu de suppression du rétablissement de la population (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009; MPO 2019a), la gestion de la récolte étant une stratégie clé pour aider à stabiliser et à rétablir la population (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009).

Malgré l'intention de la limite d'avant-saison établie dans le PGIP d'équilibrer la conservation du stock et son exploitation par les pêches, et compte tenu des incertitudes importantes entourant l'estimation des taux d'exploitation pour le saumon rouge du lac Cultus à de faibles abondances, les estimations publiées, à qualité garantie, du taux d'exploitation après la saison dérivées d'une approximation ($TE-AS_{approx}$) et de valeurs directes ($TE-AS_{direct}$) montrent que de grands nombres de saumons rouges du lac Cultus sont récoltés en tant que prises accessoires certaines années (MPO 2018a; 2019a). Les taux d'exploitation du stock ont dépassé les limites maximales permises par le PGIP de 47 à 50 % environ par an (les plages de rendement du taux d'exploitation et de l'abondance de la population reflètent les statistiques des deux séries chronologiques sur les taux d'exploitation) au cours des 15 années de données (période depuis le dernier examen en vue de l'inscription sur la liste de la LEP) et de 75 à 100 % par an les années coïncidant avec la montaison de la lignée dominante du saumon rouge de la rivière Adams pendant cette même période (figure 5; MPO 2018a, 2019a). On estime que les récoltes durant les années où les limites du PGIP sont dépassées expliquent les pertes annuelles de 22 à 71 % (moyenne = 41 à 44 %) des saumons rouges du lac Cultus en montaison, quelle que soit la lignée. Compte tenu des effets connus de la pêche en mer sur les saumons rouges du lac Cultus (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009), les pêches en cours sont considérées comme un risque élevé pour la population, avec une très grande certitude, faisant de la récolte en tant que prise accessoire un facteur principal limitant le potentiel de rétablissement (tableau 2).

Bien qu'elles aient probablement un effet moindre, les erreurs d'identification des poissons lors de la pêche récréative dans le Fraser et la rivière Vedder, et peut-être les prises non déclarées, peuvent entraîner d'autres pertes annuelles qui ne peuvent être limitées de façon fiable par les données existantes.

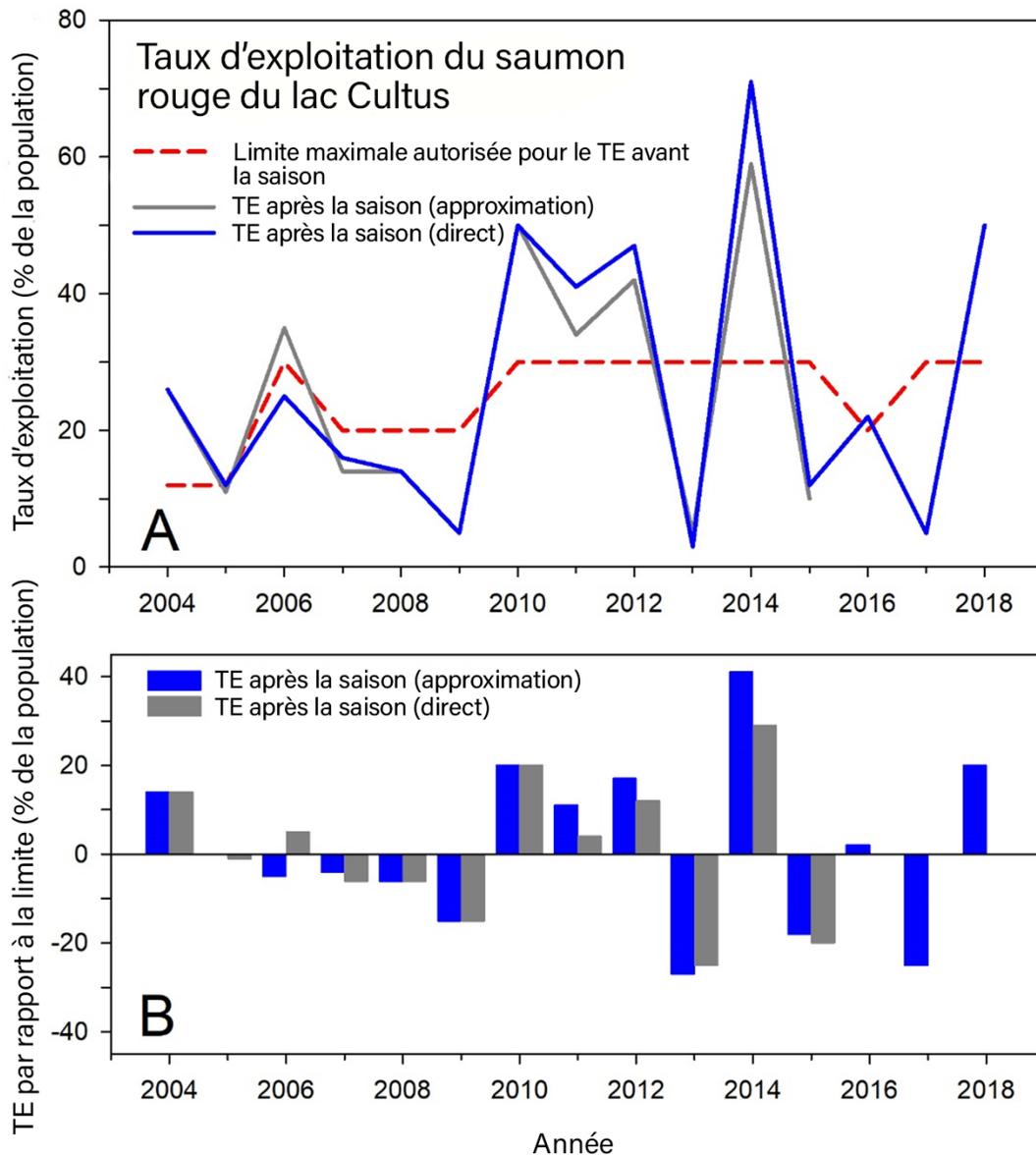


Figure 5. Séries chronologiques des taux d'exploitation estimés pour le saumon rouge du fleuve Fraser et du rendement des pêches par rapport aux limites de pêche établies. Le graphique A représente les estimations de la mortalité par pêche accessoire après la saison du saumon rouge du lac Cultus dans les pêches ciblant des stocks mixtes du Fraser d'après le taux d'exploitation après la saison dérivé d'une approximation ($TE-AS_{approx}$; ligne grise) et de valeurs directes ($TE-AS_{direct}$; ligne bleue) [MPO 2018a], par rapport à la limite autorisée avant la saison indiquée dans le Plan de gestion intégrée des pêches (PGIP) [ligne rouge pointillée; MPO 2019a]. Le graphique B met en évidence le rendement des pêches pour les taux d'exploitation estimés dérivés d'une approximation (barres grises) et de valeurs directes (barres bleues), par rapport à la limite autorisée avant la saison indiquée dans le PGIP (MPO 2019a). Il convient de noter que l'estimation du $TE-AS_{direct}$ pour 2018 est provisoire et qu'il provient du PGIP (MPO 2019a), et que des estimations du $TE-AS_{approx}$ n'étaient pas disponibles pour la période 2016-2018 (MPO 2018a).

4.1.2. Production de saumons du Pacifique en éclosion et interactions avec ces poissons (tous les stades biologiques)

Dans certaines circonstances, la production en éclosion peut avoir des répercussions négatives sur la valeur adaptative et la productivité des populations sauvages (Gardner *et al.* 2004; Naish *et al.* 2007). Les risques génétiques comprennent la propagation de certaines caractéristiques qui peuvent être avantageuses en captivité, mais pas dans la nature (Ford 2002). Il a été démontré que l'élevage en éclosion, par exemple, a des effets délétères sur des caractéristiques de la valeur adaptative, comme la survie, l'endurance à la nage et l'évitement des prédateurs (Chittenden *et al.* 2010), et des comparaisons génétiques de saumons cohos (*O. kisutch*) d'éclosion et sauvages ont démontré que l'élevage en captivité peut mener à une reprogrammation épigénétique liée à une diminution de la valeur adaptative (Le Luyer *et al.* 2017). Les lâchers de salmonidés produits en éclosion peuvent également entraîner des interactions écologiques négatives entre eux et les poissons sauvages dans les milieux naturels, en raison de la concurrence et des menaces directes et indirectes de prédation (Gardner *et al.* 2004, MPO 2013). De plus, les préoccupations concernant la transmission potentielle de maladies des poissons d'élevage aux poissons sauvages sont pertinentes, mais il y a relativement peu de cas bien documentés (Naish *et al.* 2007; Nekouei *et al.* 2019). Les risques de transmission de maladies liées aux éclosions peuvent être atténués en partie par l'utilisation de pratiques d'élevage responsables et le respect de protocoles de biosécurité (MPO 2013).

Du fait de sa faible production naturelle de smolts, la population de saumon rouge du lac Cultus est fortement complétée par des poissons d'éclosion, un scénario qui devrait se poursuivre pendant au moins la prochaine génération. Des taux élevés de production en éclosion sont nécessaires pour permettre à la population de persister face à d'autres menaces, mais ils peuvent accroître le risque de réduire la valeur adaptative des géniteurs d'origine naturelle. À l'heure actuelle, il n'y a aucune preuve directe que le programme d'apport en poissons d'éclosion a une incidence sur la valeur adaptative des géniteurs d'origine naturelle, mais il convient de noter les récentes baisses de la survie des alevins d'éclosion lâchés dans le lac et des smolts lâchés dans le ruisseau Sweltzer. Bien que la mise en valeur du saumon rouge du lac Cultus soit en cours depuis 2000, des études ont montré que les apports de poissons d'éclosion peuvent être fructueux à long terme lorsque les programmes sont conçus pour minimiser les effets négatifs potentiels sur la valeur adaptative (Janowitz-Koch *et al.* 2019). Il pourrait être bénéfique de mieux comprendre l'épigénétique en ce qui a trait à l'élevage en éclosion de juvéniles du lac Cultus, car elle a des applications importantes pour les programmes d'apports en poissons d'éclosion (Gavery et Roberts 2017). Les effets de la production en éclosion sur la génétique et la valeur adaptative sont considérés comme une menace de niveau moyen pour la population, avec un niveau moyen de certitude (tableau 2).

Les saumons d'éclosion peuvent induire une dépendance à la densité dans la croissance et la survie des populations sauvages concomitantes tout au long de leur cycle biologique. La dépendance à la densité chez les populations de saumons rouges pendant la croissance en lac se produit à des densités élevées (Foerster 1944; Burgner 1991; Schindler *et al.* 2005; Freshwater *et al.* 2017). Compte tenu de l'état trophique enrichi du lac Cultus (p. ex., forçage ascendant important du réseau trophique), des densités relativement faibles d'alevins dans le lac et de la grande taille des smolts qui quittent le réseau du lac, la concurrence pour les ressources du réseau trophique découlant de l'apport de poissons d'éclosion, aux densités actuelles dans le lac, est probablement négligeable.

La production en éclosion de saumons du Pacifique (saumons keta, rose, rouge) dans plusieurs pays bordant le Pacifique Nord a augmenté considérablement au cours du dernier siècle, et ces poissons constituent des composantes importantes des biomasses marines

modernes de saumons (Ruggerone et Irvine 2018). Les salmonidés d'écloserie peuvent provoquer une concurrence dépendante de la densité avec les saumons sauvages du Pacifique dans l'environnement de croissance en mer, qui se répercute sur la productivité des stocks (Tatara et Berejikian 2012; Ruggerone et Irvine 2018; Connors *et al.* 2020). La nature et l'ampleur de ces influences sont complexes et, dans l'océan Pacifique, elles peuvent être induites spatialement et par des effets interactifs avec les conditions environnementales (les températures de la surface de la mer; Connors *et al.* 2020).

Les déclinés observés dans la série chronologique sur les géniteurs du lac Cultus ne suivent pas les augmentations établies sur le plan temporel par les empoissonnements de plusieurs espèces de saumons du Pacifique provenant d'écloseries au cours du dernier siècle (Ruggerone et Irvine 2018), ce qui donne à penser qu'ils ne constituent probablement pas une force principale des déclinés des stocks. Cependant, la forte concurrence interspécifique et intraspécifique en mer par les saumons du Pacifique d'écloserie peut entraîner des influences cumulatives sur la croissance et la survie en milieu marin qui peuvent contribuer aux stress cumulatifs vécus par le saumon rouge du lac Cultus qui mature dans l'océan Pacifique. Compte tenu de l'absence générale d'études et de preuves d'une influence dépendante de la densité en mer sur le saumon rouge du lac Cultus en particulier, la concurrence des poissons d'écloserie dans le milieu marin est considérée comme un risque largement inconnu pour la population, avec une certitude faible (tableau 2).

4.1.3. Pollution (tous les stades biologiques)

La mortalité élevée ou les effets sublétaux causés par les polluants dans les habitats marins et dulcicoles occupés par le saumon rouge du lac Cultus ont été jugés comme un risque de niveau moyen pour la population avec une certitude faible, le manque de certitude résultant principalement de l'absence d'information qualifiée propre au stock pour ce qui est des risques d'exposition et des effets à divers stades biologiques (tableau 2). Comme il est mentionné dans l'évaluation du potentiel de rétablissement du saumon rouge du lac Sakinaw (MPO 2018b), les activités industrielles pratiquées dans le bassin de Georgie, comme la navigation, l'agriculture et l'industrie, polluent le milieu marin à la suite de collisions, de déversements, de pertes de navire en mer, de ruissellement côtier et de rejets d'eau directs et pourraient imposer un fardeau cumulatif de contaminants aux saumons en migration (juvéniles et adultes). En particulier, le transport d'hydrocarbures et de gaz risque de s'intensifier dans les eaux côtières de la région de Vancouver à l'avenir, ce qui augmentera la probabilité d'un déversement. Bien que ces menaces de pollution ne se limitent pas aux zones estuariennes et marines traversées par les poissons au début de la période en mer, leurs effets seront les plus forts si les déversements ou les rejets chevauchent les routes migratoires et les zones de croissance des poissons dans l'espace et dans le temps.

Dans le lac Cultus, les sources de contaminants provenant de la circulation d'embarcations de plaisance (p. ex., les hydrocarbures aromatiques polycycliques [HAP]), du lixiviat septique (p. ex., les œstrogènes environnementaux, les contaminants), du guano d'oiseaux, du bassin atmosphérique ou versant (p. ex., le mercure, les biphényles polychlorés, les polybromodiphényléthers, les HAP, les pesticides organochlorés, les métaux) peuvent causer un stress chez les stades biologiques juvéniles du saumon rouge du lac Cultus. Tovey et ses collaborateurs (2008) ont décrit des concentrations élevées de chrome, de nickel, de fer, de baryum, de cadmium, de manganèse, de sélénium, de cuivre et de zinc, ainsi que de plusieurs HAP dans le lac Cultus, qui dépassaient les seuils indiqués dans les lignes directrices sur la qualité des sédiments pour la protection de la vie aquatique. Dans certaines circonstances limnologiques, comme la réduction des conditions à l'interface sédiments-eau, des éléments nutritifs et des contaminants sensibles à l'oxydoréduction peuvent être libérés dans la colonne

d'eau sus-jacente (Pettersson 1998; Wetzel 2001), risquant de stimuler (éléments nutritifs) ou de contaminer (substances toxiques) les réseaux trophiques importants pour la croissance des saumons juvéniles, ou d'être transmis dans les réseaux trophiques des salmonidés par des processus conjonctifs, comme le couplage benthique-pélagique (Vander Zanden et Vadeboncoeur 2002). La surveillance des niveaux d'éléments nutritifs près des sédiments dans l'hypolimnion indique une charge interne démontrable dans le lac Cultus (voir la section suivante). Cependant, les sources de contaminants et la mobilité dans le lac Cultus sont en grande partie inconnues, ce qui limite la certitude quant aux effets létaux à sublétaux sur le saumon rouge du lac Cultus. Une exception existe à notre connaissance, soit l'effet de la charge excessive d'éléments nutritifs dans le lac Cultus, qui a été défini (Putt *et al.* 2019) et est abordé dans la prochaine section.

4.1.4. Eutrophisation du lac (géniteurs, œufs, alevins vésiculés, alevins, tacons, smolts)

L'eutrophisation culturelle, c'est-à-dire la charge excessive d'éléments nutritifs (phosphore et azote) dans les milieux aquatiques qui provient de sources anthropiques, est l'un des effets les plus omniprésents associés à la population sur la qualité de l'eau douce au Canada et partout dans le monde, mais un problème qui est facilement réversible si les charges en éléments nutritifs sont rapidement repérées et atténuées (Chambers *et al.* 2001; Schindler 2012; Putt *et al.* 2019). Le lac Cultus subit une eutrophisation qui est provoquée principalement par des éléments nutritifs d'origine anthropique et qui dégrade les habitats de l'écosystème de croissance pour le saumon rouge et d'autres espèces en péril (Shortreed 2007; Putt *et al.* 2019; Gauthier *et al.* 2021).

La modélisation de l'équilibre hydrologique et de la masse des éléments nutritifs du bassin versant montre que la charge en éléments nutritifs du lac Cultus provient de plusieurs sources (Putt *et al.* 2019). Les eaux de ruissellement du bassin versant constituent la majorité des charges totales en phosphore (53 %) et en azote (73 %) du lac Cultus, avec des apports locaux importants d'azote provenant de l'agriculture dans la vallée du Columbia (41 % de la charge totale en azote). D'autres charges locales importantes en phosphore viennent des installations septiques (19 %) et du guano déposé par les goélands migrateurs, qui migrent le jour entre la vallée du Fraser et le lac Cultus de l'automne au printemps (22 %). Cependant, jusqu'à 66 % de l'azote et 70 % du phosphate déversés dans le lac Cultus avec le ruissellement du bassin versant trouvent en fait leur source dans les dépôts atmosphériques provenant du bassin atmosphérique régional contaminé par les éléments nutritifs, les dépôts atmosphériques directs sur la surface du lac représentant un autre 17 % de l'azote et un autre 5 % du phosphore. Les dépôts atmosphériques sont ainsi la source la plus importante de la charge annuelle en éléments nutritifs du lac Cultus, étant ensemble responsables de 63 % et 42 % des charges totales en azote et en phosphore, respectivement (Putt *et al.* 2019). Les sources primaires d'azote et de phosphore dans l'atmosphère régionale proviennent de l'intensification des activités agricoles et, dans une certaine mesure, des activités urbaines et de transport dans la vallée du Fraser adjacente (Environnement Canada et U.S. Environmental Protection Agency 2014; Metro Vancouver 2018).

Les lacs réagissent généralement à l'eutrophisation culturelle en stimulant des biomasses excessives d'algues ou de macrophytes, ce qui entraîne des charges élevées en matières organiques (Wetzel 2001). La décomposition microbienne aérobie des matières organiques dans divers milieux récepteurs lacustres (eaux profondes, sédiments, eaux interstitielles) se répand proportionnellement, faisant augmenter les demandes biologique et chimique en oxygène et provoquant l'appauvrissement en oxygène dissous des zones profondes (Wetzel 2001; Smith et Schindler 2009; Moss *et al.* 2011; Müller *et al.* 2012).

Bien qu'il soit fortement exacerbé par l'augmentation des charges en matières organiques dans les lacs, l'appauvrissement en oxygène forcé par l'eutrophisation est modulé par les changements saisonniers de la physique des lacs. Le réchauffement printanier et l'absorption de la chaleur à la surface dans les lacs tempérés induisent une séparation de la densité physique des eaux de surface chaudes (épilimnion) et des eaux profondes fraîches (hypolimnion), qu'on appelle la stratification thermique, qui isole efficacement l'épilimnion de l'hypolimnion du lac jusqu'à ce que le refroidissement de la température de l'air et le refroidissement correspondant de l'eau soient suffisants pour permettre aux vents de renverser et de réoxygéner la colonne d'eau (Wetzel 2001; Sumka 2017). Ce processus annuel influe fortement sur la recharge de l'oxygène dissous dans les milieux profonds des lacs (p. ex., hypolimnion, zone profonde, zone benthique) et, dans ceux qui subissent une eutrophisation, peut favoriser un appauvrissement accru en oxygène de l'hypolimnion (Müller *et al.* 2012). Un faible niveau d'oxygène dissous à l'interface sédiments-eau peut faciliter les réactions d'oxydoréduction qui libèrent des éléments nutritifs et d'autres substances toxiques dans la colonne d'eau sus-jacente (p. ex., réaction positive de l'eutrophisation), dans un processus appelé charge interne, inversant de fait la fonction des sédiments dans la séquestration des éléments nutritifs, dans les sources (Pettersson 1998; Wetzel 2001).

L'eutrophisation du lac Cultus est l'un des principaux facteurs de la dégradation de l'habitat essentiel en eau douce et de la modification de la population qui n'ont pas été pris en compte dans les évaluations antérieures de l'espèce en péril. Les sections suivantes présentent les principales séquences des effets pour le saumon rouge du lac Cultus.

4.1.4.1. Eutrophisation du lac : appauvrissement en oxygène de l'hypolimnion et survie du saumon rouge dans le lac Cultus

L'appauvrissement en oxygène de l'hypolimnion se produit dans le lac Cultus en réaction à son eutrophisation, les concentrations d'oxygène dissous mi-hypolimnique (30 m) vers la fin de la période avec stratification ayant diminué de moitié environ entre les années 1920 et le début des années 2000 (Shortreed 2007). Les concentrations d'oxygène dissous près des sédiments (zone profonde) atteignent actuellement des niveaux hypoxiques à anoxiques pendant la période d'automne précédant le renversement du lac (figure 6), qui sont plus prononcés dans les parties les plus profondes du lac Cultus.

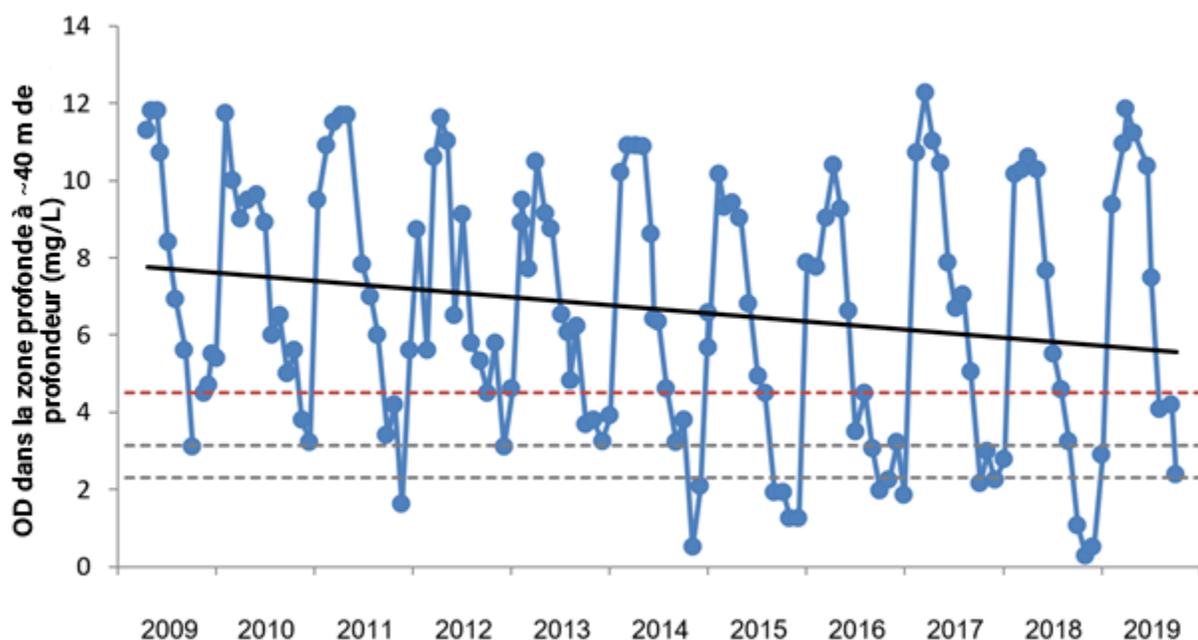


Figure 6. Série chronologique de 2009 à 2019 des concentrations d'oxygène dissous (OD) dans la zone profonde (près des sédiments) au site d'échantillonnage limnologique à long terme du MPO dans le lac Cultus (Colombie-Britannique). La ligne noire pleine indique la tendance à long terme des concentrations d'oxygène dissous. La ligne rouge tiretée indique le seuil d'hypoxie pour les effets sur la survie des saumons rouges juvéniles (4,5 mg/L; Ruggerone 2000). Les lignes grises tiretées indiquent les seuils de survie du saumon rouge sur 24 heures pour un taux de survie de 45 % (seuil supérieur; 3,15 mg/L) et de 0 % (seuil inférieur; 2,3 mg/L), d'après Ruggerone (2000).

Comme les alevins de nombreuses autres populations de saumon rouge, les alevins du lac Cultus entreprennent des migrations verticales diurnes (Levy 1989; données inédites du MPO), se nourrissant plus haut dans la colonne d'eau (hypolimnion supérieur, métalimnion) pendant les périodes crépusculaires et résidant dans les eaux profondes (zone profonde) pendant les heures de clarté, probablement pour éviter la prédation (Clark et Levy 1988; Scheuerell et Schindler 2003). La comparaison des profils hydroacoustiques jumelés jour-nuit recueillis dans le cadre du Programme de recherche sur les lacs du MPO permet de penser que les alevins du lac Cultus sont étroitement associés de manière répétée aux sédiments du lac pendant la phase profonde de leur migration verticale diurne (les juvéniles sont impossibles à distinguer des substrats à l'aide de systèmes hydroacoustiques de recherche), ce qui les expose à des conditions pauvres en oxygène et peut-être à des substances toxiques rejetées par les sédiments dans la colonne d'eau sus-jacente sous l'effet de la charge interne (figure 7). L'appauvrissement en oxygène dissous est considéré comme un forçage négatif primaire et une menace pour la survie en eau douce et la persistance du saumon rouge du lac Cultus. Comme on le verra dans les sections suivantes, l'appauvrissement en oxygène de l'hypolimnion est également responsable d'autres menaces (charge interne) ou très interactif avec celles-ci (changements climatiques).

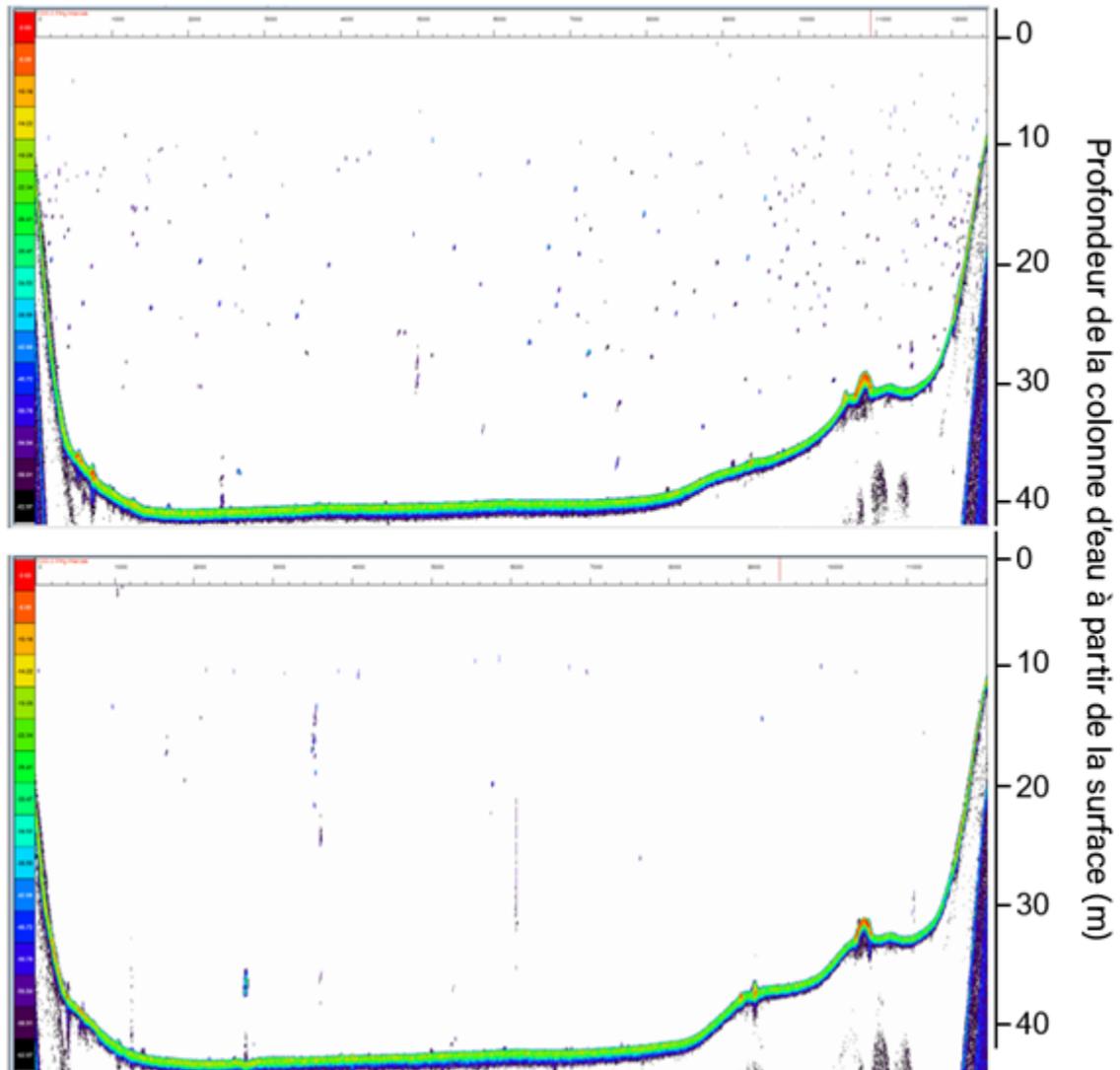


Figure 7. Exemples d'échogrammes hydroacoustiques de nuit (A) et de jour (B) recueillis dans le cadre du Programme de recherche sur les lacs du MPO en août 2009. Les points indiquent les cibles pélagiques hydroacoustiques (principalement le saumon rouge; vérification au moyen d'un chalut pélagique). Les lignes verticales évidentes dans les échogrammes sont des artefacts de colonnes de bulles d'air émanant des sédiments lacustres.

Du fait de la productivité primaire induite par l'eutrophisation accrue, la trajectoire de l'appauvrissement en oxygène dissous des eaux profondes pendant la période avec stratification dans le lac Cultus est maintenant fortement influencée par la production primaire dans la colonne d'eau sus-jacente, à partir de la prolifération printanière (mars, avril et mai [MAM]). La prolifération printanière (telle qu'elle est reflétée par les taux mensuels de photosynthèse), qui se produit au début de la stratification thermique, établit la disponibilité de l'oxygène dissous en profondeur dans le lac Cultus au début de la période avec stratification, avec un taux de photosynthèse plus faible en MAM associé à une concentration d'oxygène dissous en profondeur plus élevée pendant les mêmes mois (taux de photosynthèse euphotique en MAM par rapport à la concentration d'oxygène dissous en profondeur en MAM de 2009 à

2017; $r^2 = 0,60$, $p = 0,037$, $n = 8$). L'épuisement en oxygène dissous en profondeur se poursuit tout au long de l'été (juin, juillet et août [JJA]), forcé par la production primaire euphotique (par la décomposition aérobie connexe de la matière organique envoyée dans l'hypolimnion) pendant la période de croissance (taux moyen de photosynthèse euphotique de MAM à JJA par rapport à la concentration d'oxygène dissous en profondeur en JJA de 2009 à 2017; $r^2 = 0,61$, $p = 0,01$, $n = 8$). Les minimums de l'oxygène dissous en profondeur en automne (septembre, octobre et novembre [SON]) sont de même établis par la production primaire de la saison de croissance précédente (taux moyen de photosynthèse de MAM à JJA par rapport à la concentration d'oxygène dissous en profondeur en SON de 2009 à 2017; $r^2 = 0,69$, $p = 0,01$, $n = 8$) et les concentrations correspondantes en oxygène dissous en profondeur (concentration moyenne en oxygène dissous en profondeur de MAM à JJA par rapport à la concentration d'oxygène dissous en profondeur en SON de 2009 à 2017; $r^2 = 0,74$, $p = 0,01$, $n = 7$), mais peuvent être modifiés par la recharge résultant des débits plongeants en provenance de la topographie à parois abruptes pendant les périodes de fortes précipitations automnales et par la rupture plus précoce de la stratification thermique les années plus froides.

Chez le saumon rouge du lac Cultus, la survie du stade d'alevin à celui de smolt pendant l'automne (poissons marqués et non marqués) affiche une relation négative avec l'intensité de la prolifération printanière (SURVIE ALEVIN-SMOLT EN AUTOMNE par rapport au taux de photosynthèse profonde en MAM de 2009 à 2017; $r^2 = 0,57$, $p = 0,05$, $n = 7$) et conforme à une relation plus directe, et l'effet bénéfique de l'oxygène dissous en profondeur sur la survie du stade d'alevin à celui de smolt pendant l'automne, présente une relation positive plus forte avec l'oxygène dissous en profondeur pendant la période de stratification maximale (SURVIE ALEVIN-SMOLT EN AUTOMNE par rapport à l'oxygène dissous en profondeur en MAM de 2009 à 2017; $r^2 = ,79$, $p = 0,008$, $n = 7$). Le décalage temporel entre les facteurs lacustres et la survie du stade d'alevin à celui de smolt pendant l'automne chez le saumon rouge du lac Cultus reflète fort probablement l'importance de la période printanière dans l'établissement des conditions de l'oxygène dissous en profondeur lors de la période de stratification maximale au début de la stratification, ainsi que l'influence de la dynamique dans la zone limnologique de la saison de croissance, qui culmine pour produire les exportations importantes de matières organiques euphotiques et leur décomposition dans les eaux profondes à la sénescence du lac (c.-à-d. l'automne). Ces exportations de matières organiques imposent des conditions hypoxiques à anoxiques dans la zone profonde. Compte tenu de la force des relations entre la productivité primaire, l'oxygène en profondeur et la survie du stade d'alevin à celui de smolt pendant l'automne, l'appauvrissement en oxygène de l'hypolimnion du lac Cultus est considéré comme l'un des principaux facteurs de la survie en eau douce du saumon rouge du lac Cultus, par le stress direct dû aux faibles concentrations d'oxygène ou indirectement par un mécanisme stressant médié par l'oxygène, comme la charge interne en substances toxiques sensibles à l'oxydoréduction provenant des sédiments lacustres. On considère donc l'appauvrissement en oxygène de l'hypolimnion forcé par l'eutrophisation comme une menace de niveau élevé pour la population, avec une certitude très élevée (tableau 2).

4.1.4.2. Eutrophisation du lac : charge interne en éléments nutritifs limitatifs provenant des sédiments

La charge interne est une caractéristique du cycle annuel des éléments nutritifs dans la plupart des écosystèmes lacustres, dans une certaine mesure, mais elle est plus prononcée dans les réseaux stratifiés à état trophique élevé, comme ceux qui connaissent une eutrophisation culturelle (Pettersson 1998; Wetzel 2001). Bien que de nombreux facteurs soient importants (fer, activité microbienne anaérobie, pH, oxygène), la charge interne est largement tributaire de l'oxygène dans les lacs, où la perte d'oxygène en profondeur induit des changements de l'oxydoréduction à l'interface sédiments-eau qui, par de multiples voies chimiques, physiques et

biologiques, facilitent le rejet d'éléments nutritifs (phosphore, azote) et de substances toxiques (métaux, sulfure d'hydrogène, méthane) sensibles à l'oxydoréduction dans la colonne d'eau sus-jacente (Pettersson 1998; Shaw *et al.* 2004).

Si elle n'est pas atténuée, la charge interne peut entraîner des augmentations non linéaires de l'état trophique des lacs et dominer les cycles des éléments nutritifs dans les écosystèmes eutrophisés, renforçant et améliorant la trajectoire de l'enrichissement en éléments nutritifs et posant des risques pour l'intégrité écologique (Wetzel 2001; Nürnberg 2009). La surveillance effectuée en 2014 par le Programme de recherche sur les lacs du MPO a démontré que plusieurs éléments nutritifs clés associés à l'eutrophisation (phosphore, nitrate, ammonium) sont rejetés des sédiments dans la colonne d'eau sus-jacente du lac Cultus pendant la prolifération printanière et la période automnale de sénescence du lac (figure 8). Le rejet de phosphore, principal élément nutritif limitant la productivité algale dans le lac Cultus, est particulièrement préoccupant en raison de l'eutrophisation en cours (Shortreed 2007; Gauthier *et al.* 2021), compte tenu de son potentiel d'induire un emballement de l'eutrophisation et d'intensifier l'appauvrissement en oxygène de l'hypolimnion.

Tovey et ses collaborateurs (2008) ont relevé un certain nombre de contaminants (p. ex., fer, baryum, nickel, manganèse, chrome, cadmium, sélénium, mercure) qui sont présents en concentrations élevées dans les sédiments du lac Cultus et qui sont sensibles à l'oxydoréduction ou qui ont une mobilité aquatique liée à des réactions chimiques ou à une activité microbienne qui se produisent dans des conditions de faible concentration d'oxygène et peuvent être toxiques pour les poissons d'eau douce s'ils sont rejetés dans la colonne d'eau sus-jacente. De plus, au cours de l'échantillonnage en profondeur de l'eau réalisé d'août à décembre 2017, une « odeur d'œufs pourris » a été décelée dans les eaux profondes du lac Cultus, une indication classique de concentrations élevées de sulfates dans l'eau; à mesure que le potentiel d'oxydoréduction passe en dessous de 100 mV environ sous l'effet de la décomposition bactérienne, tel qu'il a été enregistré lors de l'échantillonnage à la fin de la saison 2017, le sulfate est réduit en sulfure d'hydrogène (H₂S; Wetzel 2001), très fortement toxique pour le poisson, même à de faibles concentrations, particulièrement dans des conditions de faible concentration d'oxygène (Smith et Oseid 1972; Wetzel 2001; Luther *et al.* 2004). Le rejet de substances toxiques dans la zone profonde du lac Cultus peut donc être un résultat nuisible clé de la décomposition des matières organiques provoquée par l'eutrophisation et de l'appauvrissement en oxygène hypolimnique.

Compte tenu de l'occurrence et de l'intensité connues de la charge interne (éléments nutritifs) dans le lac Cultus, du renforcement de l'eutrophisation du lac et de l'appauvrissement en oxygène de l'hypolimnion qui résultent de la charge interne et du fort potentiel de rejet de substances toxiques sensibles à l'oxydoréduction, en particulier pendant la sénescence saisonnière du lac, la charge interne en éléments nutritifs limitatifs et les contaminants pouvant être rejetés des sédiments dans la colonne d'eau du lac sont considérés comme une menace de niveau élevé pour la population, avec une certitude très élevée (tableau 2).

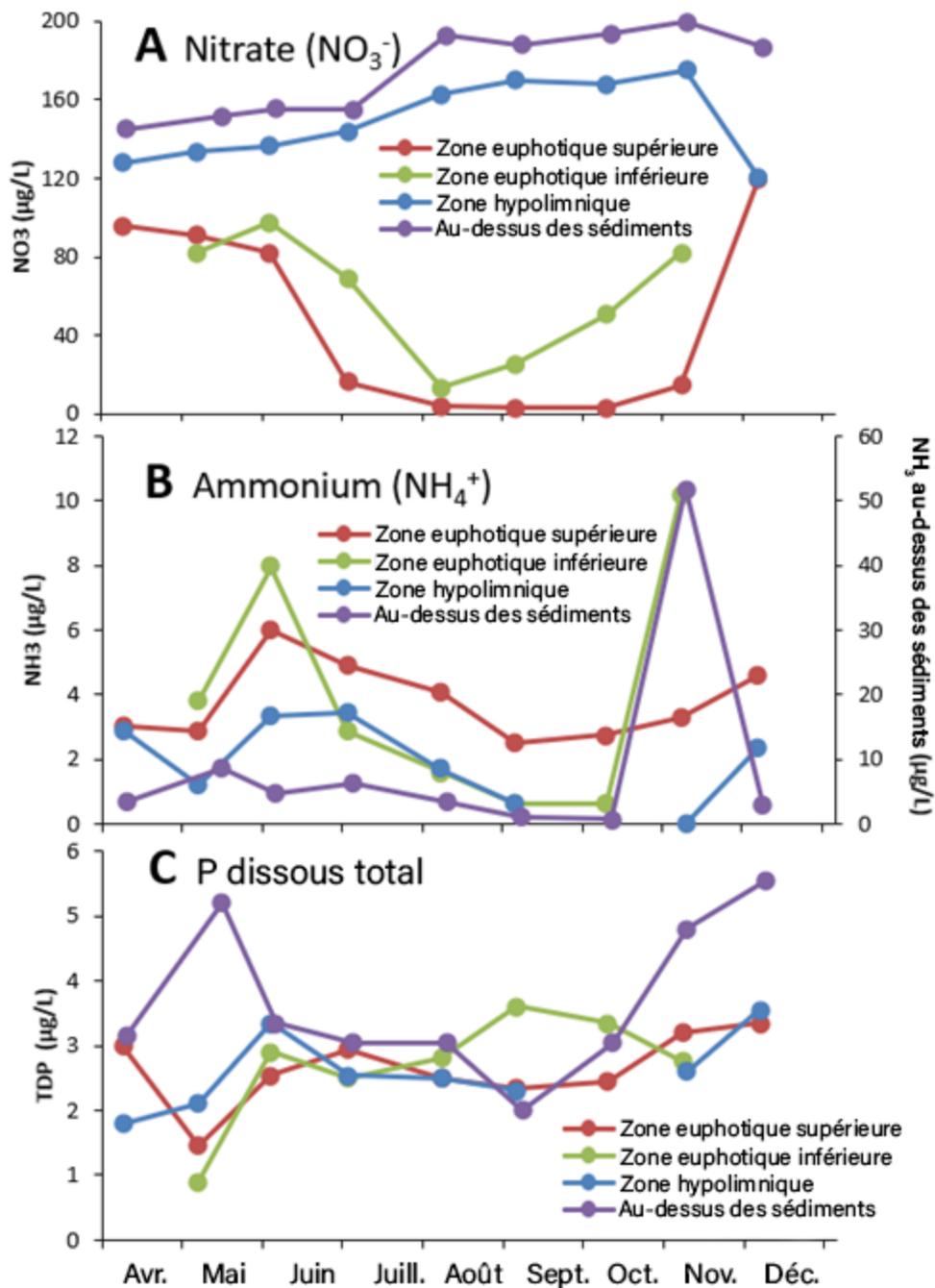


Figure 8. Séries chronologiques de 2014 sur les éléments nutritifs sensibles à l'oxydoréduction : A) nitrate (NO_3^- -N); B) ammonium (NH_4^+ -N); et C) phosphore dissous total (PDT) dans la colonne d'eau du lac Cultus. Il convient de noter l'accumulation de nitrate dans la zone hypolimnique pendant la période avec stratification (avril à novembre) dans le graphique A et les pics d'ammonium et de phosphore provenant des sédiments pendant la prolifération printanière (avril et mai) et la sénescence du lac (octobre et novembre) dans les graphiques B et C par rapport aux concentrations dans la colonne d'eau sus-jacente.

4.1.4.3. Eutrophisation du lac : sédimentation des matières organiques et effets sur les habitats de fraie et d'incubation

Bien que difficile à quantifier en raison de la gamme des profondeurs où se déroule maintenant la fraie du saumon rouge du lac Cultus (moins de 2 m à 17 m; Pon *et al.* 2010), l'augmentation de la productivité du lac forcée par l'eutrophisation peut avoir des effets négatifs sur l'abondance de frayères convenables et sur le succès de l'incubation en eaux profondes dans le lac Cultus. Les observations visuelles des zones littorales révèlent une augmentation du floc organique et de la couverture d'algues périphytiques, et les charges en matières organiques enrichies présentes dans les substrats des frayères ont sans aucun doute augmenté avec l'eutrophisation, comme probablement les demandes biologiques en oxygène dans les eaux interstitielles pendant l'incubation dans les zones non rechargées par l'échange d'eaux souterraines oxiques (Colby *et al.* 1972).

Les besoins en oxygène dissous pour le développement et la survie des œufs varient selon le stade de développement de l'organisme et la température de l'eau (Sigma 1983). À des températures des eaux interstitielles de 4 à 7 °C, indicatrices de la période de fraie et des emplacements des frayères dans le lac Cultus, des concentrations d'oxygène de 4 mg/L ou moins entraîneront des effets néfastes graves, tandis que des concentrations de 8 mg/L sont jugées appropriées pour le développement au stade de l'œuf œillé (Sigma 1983, Kondolf 2000). Les besoins en oxygène dissous augmentent à au moins 10 mg/L après le stade de l'œuf œillé (Sigma 1983).

Des données quantitatives limitées sont disponibles sur les concentrations d'oxygène des eaux interstitielles des frayères du lac Cultus; cependant, les mesures prises à la plage Lindell et dans les baies Snag (Honeymoon) et Spring pendant l'hiver 2003-2004 n'ont révélé des concentrations limitatives en oxygène dans les eaux interstitielles comprises entre 5,2 et 7,3 mg/L que dans la zone de la plage Lindell, qui reçoit de l'eau appauvrie en oxygène de l'aquifère de la vallée du Columbia, contaminé par les nitrates (Zubel 2000), à une période où le saumon rouge du lac Cultus utilisait encore la zone pour la fraie (Jeremy Hume, Vancouver Nord, Colombie-Britannique, comm. pers.). Les estimations modernes, après plus d'une décennie d'eutrophisation prononcée, font défaut et devraient faire partie des évaluations en cours. Les frayères contemporaines, vérifiées par VTG, semblent avoir été restreintes à des sites profonds le long de la rive est du lac (figure 2), caractérisés par un transit rapide des eaux souterraines à travers les plateformes de schiste fracturées à la base des cours d'eau à forte pente drainant l'International Ridge (Putt *et al.* 2019), et représentent probablement les quelques sites du lac Cultus qui reçoivent encore une importante remontée d'eaux souterraines oxiques. En plus de l'expansion de l'invasion du myriophylle en épi, une espèce envahissante, qui couvre maintenant environ 62 % de la zone littorale (Programme de recherche sur les lacs du MPO, données inédites), la dégradation des frayères historiques peut imposer une contrainte spatiale sur l'étendue des frayères convenables et le succès de la survie des œufs et des alevins vésiculés, et peut-être accroître la mortalité des œufs, si les niveaux d'éléments nutritifs dans le lac ne sont pas réduits. Bien qu'il existe peu de données contemporaines sur les concentrations d'oxygène dans les eaux interstitielles du lac Cultus, compte tenu de la nature spatiale contractée de la fraie existante dans le lac Cultus, ainsi que des effets connus de l'eutrophisation sur la demande biologique en oxygène dans les eaux interstitielles d'autres réseaux, la sédimentation forcée par l'eutrophisation des substrats des frayères est considérée comme une menace de niveau élevé pour la population, avec une certitude moyenne (tableau 2).

4.1.5. Myriophylle en épi, une espèce envahissante

Le myriophylle en épi (*Myriophyllum spicatum*) est un macrophyte aquatique envahissant en Amérique du Nord et présent dans la zone littorale du lac Cultus depuis au moins les années 1970. Le myriophylle en épi se trouve entre une profondeur d'environ 1 m et une profondeur maximale de 8 m. Lors du relevé acoustique le plus récent (2014) de la couverture par le myriophylle en épi, on a observé une couverture moyenne de 62,4 % près du littoral (jusqu'à 8 m de profondeur) sur l'ensemble du périmètre du lac, mais elle atteignait 89,5 % dans certaines zones et 39,3 % dans d'autres (Garrett Lidin, MPO, Cultus Lake, Colombie-Britannique, comm. pers.). Les estimations antérieures de la couverture littorale variaient de 17 % en 1977 à 29 % en 1991 (Mossop et Bradford 2004), et de 64 à 68 % en 2004 (Stables 2004).

On ignore les effets directs du myriophylle en épi sur le saumon rouge du lac Cultus, mais on a déjà déterminé qu'il constituait une menace pour l'espèce en offrant un refuge et un habitat de croissance aux juvéniles d'espèces prédatrices (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). Le myriophylle en épi pourrait également avoir des répercussions sur le saumon rouge du lac Cultus en empiétant sur ses frayères historiques. Bien qu'il n'en existe aucune preuve mécaniste directe, le nombre de frayères activement utilisées a diminué au cours des dernières décennies, alors que parallèlement, le myriophylle en épi s'est répandu dans une grande partie de l'habitat littoral du lac. Par le passé, des frayères ont été signalées à des profondeurs variant de 0,5 à 6 m dans de nombreuses baies et plages du lac Cultus, mais des observations plus récentes donnent à penser que la fraie se produit maintenant à moins d'emplacements et à de plus grandes profondeurs (moins de 2 m à 17 m; Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009; Pon *et al.* 2010), un changement qui place les frayères à une profondeur supérieure à la profondeur maximale connue, limitée par la lumière, de croissance du myriophylle dans le lac Cultus. Les lits denses de myriophylle en épi peuvent avoir des effets sur la température des eaux littorales et la concentration d'oxygène dissous (Unmuth *et al.* 2000), et la sénescence et la décomposition annuelles d'importantes biomasses de matières organiques de la canopée produites par le myriophylle en épi peuvent réduire considérablement les concentrations d'oxygène dans l'hypolimnion des lacs stratifiés (Wetzel 2001); ce dernier processus peut être particulièrement grave à l'automne et coïncider avec la période d'incubation des œufs du saumon rouge et la période de croissance de la cohorte précédente. De plus, comme le myriophylle en épi tire la majorité des éléments nutritifs dont il a besoin (p. ex., azote et phosphore) des substrats, la sénescence annuelle des peuplements de myriophylle en épi peut être un vecteur clé de la mobilisation du phosphore des sédiments du lac Cultus dans la colonne d'eau : il est libéré lors de la décomposition (Smith et Adams 1986), ce qui contribue à l'eutrophisation du lac. En raison de l'absence générale de preuves d'un effet causal sur la survie du saumon rouge du lac Cultus, le myriophylle en épi est considéré comme une menace de niveau faible pour la population, avec une faible certitude causale (tableau 2).

4.1.6. Changements climatiques et variabilité régionale du climat

4.1.6.1. Effets du climat sur l'habitat dulcicole et les saumons rouges juvéniles

Les changements climatiques sont un forçage mondial majeur sur les écosystèmes lacustres (O'Reilly *et al.* 2015) et fortement interactifs avec d'autres agents de stress lacustres, y compris l'eutrophisation (Moss *et al.* 2011). Ils peuvent induire des effets interactifs en cascade et souvent complexes sur les paramètres physiques et chimiques des lacs, ainsi que sur la structure et les fonctions du biote aquatique (Adrian *et al.* 2009). De nombreuses études soulignent la hausse des températures de la surface des lacs au cours des dernières décennies (p. ex., O'Reilly *et al.* 2015) en réaction au réchauffement des températures de l'air et de la

surface des océans (GIEC 2013). Plus particulièrement, la force et la durée annuelles de la stratification thermique ont augmenté avec le réchauffement, les hausses de température les plus prononcées ayant été observées dans les lacs chauds et profonds (Kraemer *et al.* 2015).

Shortreed (2007) a été la première personne à émettre l'hypothèse que le réchauffement climatique pourrait avoir des répercussions sur le lac Cultus, en comparant les températures à la surface du lac de 2001 à 2003 aux données recueillies dans les années 1920 et 1930. Les conditions météorologiques synoptiques dans l'ouest de l'Amérique du Nord sont fortement influencées par des processus océaniques-atmosphériques couplés quasi périodiques, comme l'oscillation décennale du Pacifique et l'oscillation australe El Niño, qui entraînent d'importants changements dans les températures de l'air et les précipitations sur le continent (Stahl *et al.* 2006), rendant problématiques les conclusions de forçage des changements climatiques fondées sur des comparaisons de périodes disjointes (Ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique 2016). Sumka (2017), cependant, a élaboré un modèle hydrodynamique unidimensionnel pour caractériser la dynamique thermique saisonnière du lac Cultus, passée et présente, confirmant que le lac Cultus a connu un réchauffement prononcé au cours du dernier siècle (augmentation du contenu thermique total de 1923 à 2016 de 0,80 MJ/m²/an), allongeant la période avec stratification d'environ 0,18 jour/an et avançant le début de la stratification annuelle d'environ deux semaines sur la même période.

Les températures mensuelles de la couche supérieure de la colonne d'eau (0 à 5 m) du lac Cultus sont fortement couplées aux températures mensuelles moyennes de l'air enregistrées à proximité, à la station climatique d'Agassiz d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC; ID : 1100120), avec un décalage thermique d'environ un mois dans le réchauffement de l'eau (température de l'eau entre 0 et 5 m de 2001 à 2017 par rapport à la température mensuelle moyenne de l'air [avance d'un mois]; $r^2 = 0,89$, $p < 0,0001$, $n = 126$; figure 9A; Gauthier *et al.* 2021). L'application de cette relation aux données climatiques quotidiennes ajustées et homogénéisées archivées pour l'observation aux instruments d'Agassiz (Environnement et Changement climatique Canada 2017) démontre que les températures de la couche supérieure de la colonne d'eau du lac Cultus ont probablement fluctué pendant un certain temps, en fonction de la variabilité climatique régionale (figures 9B et 9C). Cependant, notre reconstitution indique des hausses prononcées des températures estivales de la couche supérieure de la colonne d'eau après les années 1970 (figure 9B), une période connue de réchauffement régional qui coïncide avec le passage à une phase chaude de l'oscillation décennale du Pacifique (Mantua *et al.* 1997) et un changement à des températures automnales supérieures à la moyenne qui pourraient favoriser la prolongation saisonnière de la stratification du lac (figure 9C).

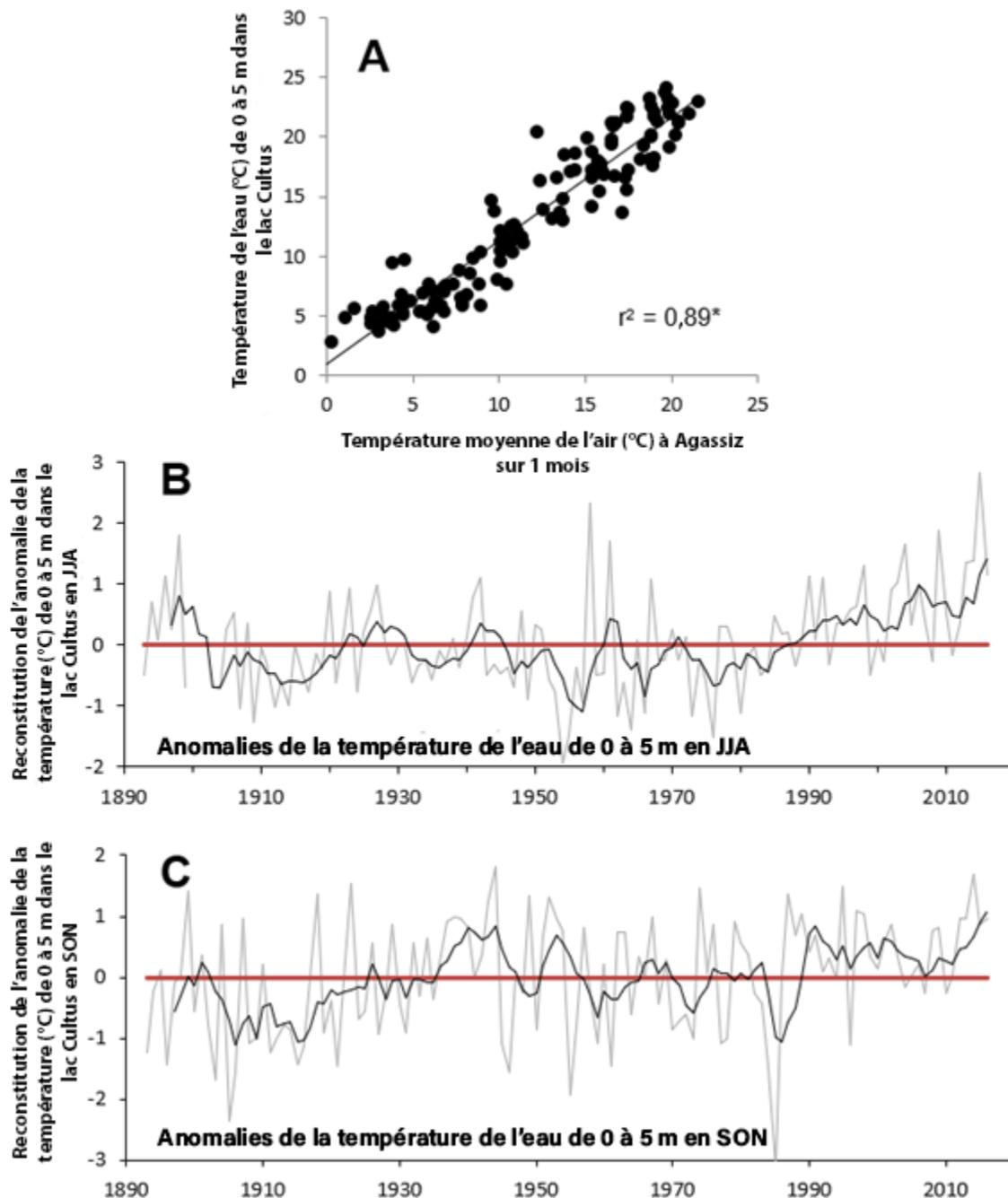


Figure 9. Couplage physique entre l'atmosphère et la couche supérieure de la colonne d'eau (0 à 5 m) dans le lac Cultus. A) Relation entre les températures moyennes mensuelles de l'air (station climatique d'Agassiz d'Environnement et Changement climatique Canada; ID : 1100120) et les températures moyennes mensuelles de 0 à 5 m dans le lac Cultus (2001 à 2017), et reconstitutions sur 100 ans des anomalies de la température de 0 à 5 m dans le lac Cultus B) en juin, juillet et août (JJA; période de stratification maximale) et C) en septembre, octobre et novembre (SON) par rapport à la moyenne à long terme (lignes rouges horizontales). Les valeurs directes (lignes grises) et moyennes sur cinq ans (lignes noires) sont indiquées dans les graphiques B et C.

Tout comme le réchauffement de surface causé par le climat est lié à l'intensification et la prolongation de la stratification thermique du lac, et comme l'indiquent les résultats de la modélisation de Sumka (2017), la stabilité du lac pendant la période avec stratification (avril à novembre), c'est-à-dire la résistance relative au renversement du lac dénotée par l'indice de stabilité de Schmidt (ISS; Schmidt 1928; Costella *et al.* 1983), est fortement liée aux températures moyennes mensuelles de l'air enregistrées à la station climatique d'Agassiz d'ECCC (ID : 1100120), avec un décalage thermique d'un mois dans les données lacustres (ISS par rapport à la température mensuelle moyenne de l'air [avance d'un mois] de 2001 à 2017; $r^2 = 0,85$, $p < 0,001$, $n = 89$).

La hausse des températures de la couche supérieure de la colonne d'eau dans le lac Cultus, qui dépassent maintenant 24,5 °C dans l'épilimnion certaines années, peut imposer des stress thermiques sur la croissance et la survie des alevins de saumon rouge du lac Cultus pendant la quête de nourriture près de la couche supérieure de la colonne d'eau ou à l'intérieur de celle-ci, en particulier pendant les mois d'été (Brett 1952; Brett et Higgs 1970; Akbarzadeh *et al.* 2021). Les relevés hydroacoustiques et au chalut contemporains indiquent une utilisation limitée de l'épilimnion du lac pendant l'été et l'automne, lorsque la colonne d'eau est stratifiée (Programme de recherche sur les lacs du MPO, données inédites). Des preuves génomiques révèlent des stress thermiques chez le saumon rouge du lac Cultus, qui sont additifs et potentiellement interactifs avec les stress hypoxiques (Akbarzadeh *et al.* 2021). Alors que les saumons rouges juvéniles semblent presque uniquement présents dans le métalimnion (thermocline) et l'hypolimnion hypoxique du lac Cultus à la fin de leur période de croissance (figure 7; Shortreed 2007), les agents de stress thermique et liés à la faible concentration d'oxygène ont des répercussions sur eux pendant leur séjour en eau douce (Akbarzadeh *et al.* 2021).

La survie dans le lac Cultus des saumons rouges juvéniles est fortement liée aux températures de la couche supérieure de la colonne d'eau forcées par le climat et aux forçages correspondants sur les propriétés physiques du lac. En particulier, les températures de la couche supérieure de la colonne d'eau en automne sont fortement et négativement liées à la survie du stade d'alevin à celui de smolt pendant l'automne pour le saumon rouge du lac Cultus (température en SON par rapport à la survie alevin-smolt en automne de 2009 à 2017; $r^2 = 0,70$, $p = 0,005$, $n = 9$), tout comme la stabilité globale du lac pendant la période de croissance (ISS d'avril à novembre par rapport à la survie alevin-smolt en automne de 2009 à 2017; $r^2 = 0,69$, $p = 0,005$, $n = 9$). Les liens entre les propriétés physiques du lac et la survie des juvéniles, ainsi que le décalage temporel saisonnier (automne à l'hiver), avec les liens limnologiques précédant les goulots d'étranglement de la survie dans le lac, donnent à penser que la relation n'est probablement pas entièrement un effet direct de la température (bien que l'on ne puisse pas exclure des effets sublétaux à létaux, directs et différés, forcés par la température), mais plutôt l'effet de forçages du climat et de la température sur les propriétés physiques du lac, avec des effets en cascade sur les mécanismes liés à la survie (appauvrissement en oxygène de l'hypolimnion, charge interne). Les répercussions directes des températures sublétales et létales dans la zone épilimnique sont considérées comme un risque moyen pour la population, avec une certitude causale moyenne (tableau 2).

En fait, les changements (et la variabilité) climatiques interagissent fortement avec d'autres agents de stress du lac et ne font qu'exacerber les « symptômes » de l'eutrophisation (Moss *et al.* 2011). Aux concentrations contemporaines en éléments nutritifs eutrophisés, la production primaire mensuelle dans le lac Cultus est couplée aux températures moyennes mensuelles de l'air (avance climatique d'un mois) tout au long de la saison de croissance (température mensuelle moyenne de l'air [avance d'un mois] par rapport au log[TP] mensuel moyen de 2009 à 2017; $r^2 = 0,57$, $p < 0,001$, $n = 106$), et la production primaire se poursuit tout au long de l'année, même si, comme dans la plupart des lacs tempérés, elle est relativement réduite de

l'automne au printemps. La production primaire élevée pendant la prolifération printanière est forcée par les concentrations initiales abondantes en éléments nutritifs (principalement d'origine anthropique; Putt *et al.* 2019) et le début plus précoce de la stratification (Sumka 2017). Pendant toute la prolifération printanière, l'absorption autotrophe épuise rapidement l'azote facilement biodisponible (NO_3^-) dans l'épilimnion, un phénomène médié par la température (température mensuelle moyenne de l'air [avance d'un mois] par rapport au nitrate [NO_3^-] de 2009 à 2017; $r^2 = 0,71$, $p < 0,001$, $n = 106$), et du fait de la pénétration relativement importante de la lumière et des réserves abondantes d'éléments nutritifs dans l'hypolimnion, la production primaire se concentre dans le métalimnion et l'hypolimnion supérieur, formant un maximum de la chlorophylle profonde (figure 10A) qui persiste pendant la période avec stratification.

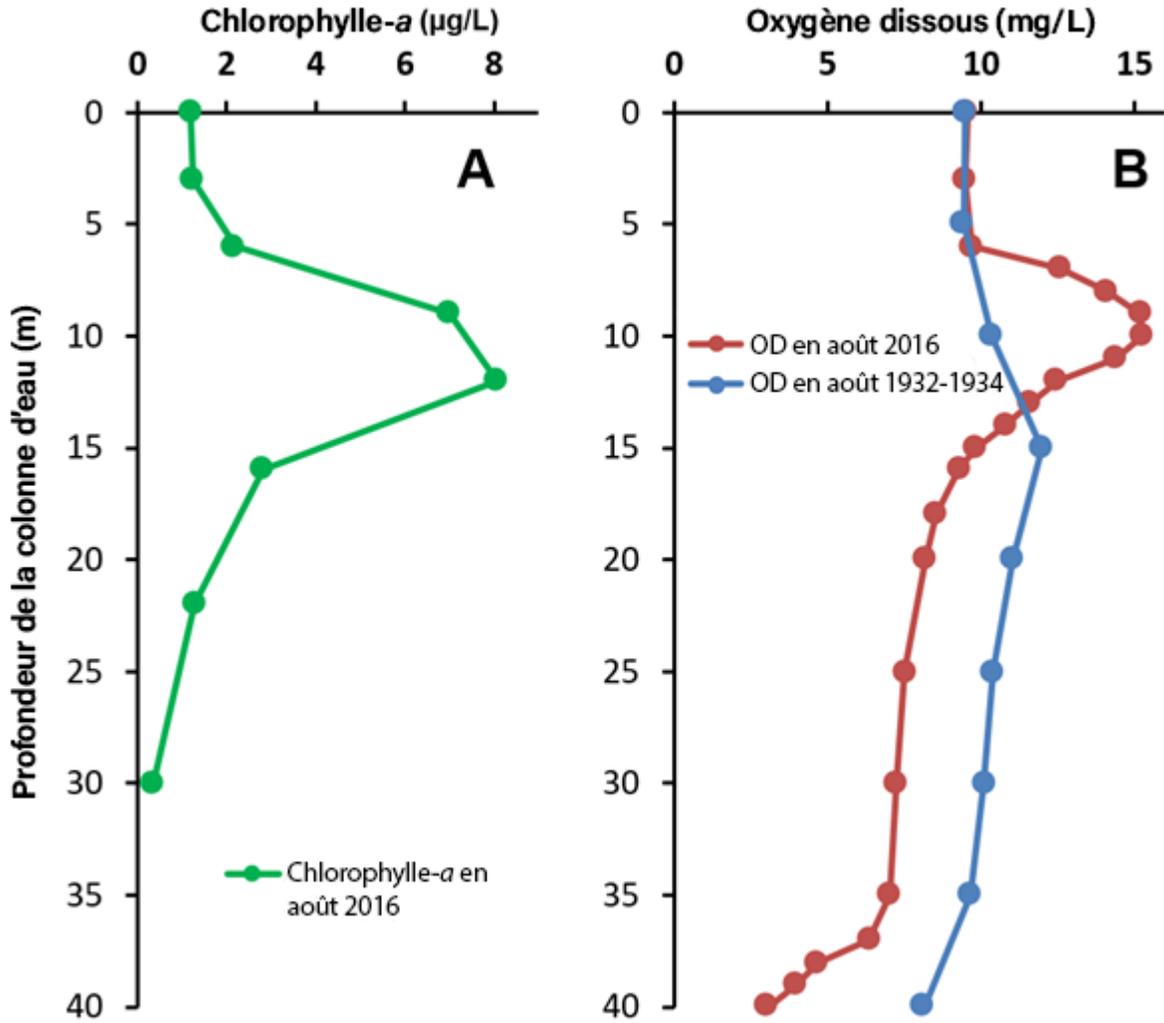


Figure 10. Exemples de profils A) de la formation du maximum de la chlorophylle profonde à la fin de l'été 2016 dans le lac Cultus et B) des concentrations d'oxygène maximales résultant du maximum de la chlorophylle profonde à la fin de l'été 2016 par rapport aux mesures prises dans les années 1930 par Ricker (1937). Il convient de noter les déficits récents en oxygène dissous (OD) dans les derniers 5 m environ de la colonne d'eau.

Les données contrastantes des années 1930 indiquent que le maximum de la chlorophylle profonde (tel que déduit des concentrations d'oxygène dissous, le sous-produit de la

photosynthèse; Shortreed 2007; figure 10B) est une caractéristique de la production saisonnière qui existait historiquement dans une capacité réduite, mais qui est beaucoup plus prononcée sous l'effet de l'eutrophisation du lac et des changements climatiques (Ricker 1937; Shortreed 2007). De plus, l'appauvrissement en oxygène dans la zone hypolimnionique était négligeable par rapport à l'état post-eutrophisation (Shortreed 2007; figure 10B).

Compte tenu de la profondeur des maximums de la production primaire dans la colonne d'eau, à la profondeur de la couche mixte ou en dessous de celle-ci pendant une grande partie de la période avec stratification, le maximum de la chlorophylle profonde peut accroître l'exportation des matières organiques vers l'hypolimnion du lac, par rapport à la production primaire dans la zone épilimnionique, dans laquelle les matières organiques peuvent être recyclées et rester dans la zone euphotique (Skjoldal et Wassmann 1986). Ainsi, la prolongation et le renforcement de la production du maximum de la chlorophylle profonde dans le lac Cultus offrent probablement une voie d'exportation plus efficace des matières organiques vers l'hypolimnion, améliorant la décomposition aérobie et les pertes saisonnières d'oxygène dans l'hypolimnion. Les augmentations absolues des matières organiques forcées par l'eutrophisation et le climat, ainsi que les changements saisonniers dictés par le climat de la dynamique physique (stratification thermique plus intense et prolongée) sont donc probablement responsables des pertes contemporaines importantes d'oxygène dissous dans les habitats profonds du lac Cultus, qui se répercutent sur la survie en eau douce du saumon rouge du lac Cultus. Selon des données relativement nouvelles sur les contraintes liées à la survie des juvéniles, qui n'ont pas été incluses dans les évaluations précédentes, l'eutrophisation culturelle, les changements climatiques et leurs interactions sont considérés comme des menaces primaires pour la persistance du saumon rouge du lac Cultus. Bien qu'il soit peu probable que les changements climatiques soient renversés dans un délai raisonnable pour le rétablissement, la modélisation de la zone limnologique axée sur l'état indique que la réduction des éléments nutritifs peut retarder considérablement la trajectoire de l'eutrophisation et l'inverser probablement si les sources atmosphériques sont limitées, ce qui permettrait de restaurer la qualité des habitats de croissance dans les zones profondes du lac Cultus (Putt *et al.* 2019). En raison de l'état des données probantes, ainsi que de la dégradation et de la perte catastrophique possible de l'habitat d'eau douce du saumon rouge du lac Cultus sans une gestion ciblée du lac, les interactions des changements climatiques avec l'eutrophisation du lac sont considérées comme une menace de niveau élevé pour la population, avec une certitude causale élevée (tableau 2).

4.1.6.2. Effets du climat sur l'habitat marin et le saumon rouge

Le système couplé océanique-atmosphérique du Pacifique est dynamique et la variabilité naturelle est fortement liée aux changements écosystémiques dans diverses régions de l'océan Pacifique Nord habitées par les saumons du Pacifique anadromes pendant la phase de maturation en mer (Burgner 1991), du plateau continental à la haute mer (Mantua *et al.* 1997; Miller *et al.* 2004; Di Lorenzo *et al.* 2008). Des modes à haute fréquence (de quelques années à des décennies) de variations quasi périodiques des profils couplés de circulation océanique-atmosphérique et des températures résultantes de la surface de la mer, tels que ceux exprimés par l'oscillation australe El Niño, l'oscillation du gyre du Pacifique Nord et l'oscillation décennale du Pacifique, entraînent des changements physiques importants et dynamiques dans les eaux extratropicales de l'océan Pacifique (Mantua *et al.* 1997; Di Lorenzo *et al.* 2008; Soulard *et al.* 2019). Les influences en cascade sur la physique et la chimie des océans et sur la structure et les fonctions des écosystèmes marins ont des conséquences directes et indirectes complexes pour la résidence spatiale, l'écologie alimentaire, la croissance, l'abondance, l'état, la démographie, la fécondité et les interactions écologiques des saumons du Pacifique en mer (Mantua *et al.* 1997; Kaeriyama *et al.* 2004; Di Lorenzo *et al.* 2008; Reed *et al.* 2011; Martins *et al.* 2012; Connors *et al.* 2020).

De même, les changements climatiques directionnels modifient les conditions, la circulation et les écosystèmes des océans, avec des répercussions possibles sur les saumons du Pacifique (Okey *et al.* 2014; Soulard *et al.* 2019). Les températures plus chaudes de la surface de la mer ont une incidence sur le métabolisme du saumon rouge à tous les stades biologiques dans le milieu marin (des post-smolts aux adultes en montaison; Martins *et al.* 2012). Le réchauffement des eaux marines réduit généralement la croissance et la survie des saumons rouges juvéniles du Fraser au début de la période de résidence en mer (Hinch *et al.* 1995; Martins *et al.* 2012). La survie et la taille à la maturité sont liées négativement à la température de la surface de la mer pendant les derniers mois de résidence en mer (Pyper et Peterman 1999; McKinnell 2008; Martins *et al.* 2012), ainsi qu'à la taille et à la densité énergétique durant la dernière année de résidence en mer (Hinch *et al.* 1995; Crossin *et al.* 2008; Martins *et al.* 2012). Ces influences environnementales sur le saumon rouge peuvent agir sur sa croissance et sa survie en mer par l'amélioration des taux métaboliques (Hinch *et al.* 1995; Martins *et al.* 2012), les modifications et les limitations de la disponibilité du réseau trophique (Aydin *et al.* 2000; Mackas *et al.* 2007; Richardson *et al.* 2008) et les contraintes sur l'habitat thermique convenable (Abdul-Aziz *et al.* 2011; Martins *et al.* 2012), ces dernières pouvant entraîner une augmentation de la concurrence en raison de la densité (Martinson *et al.* 2008; Martins *et al.* 2012). Les changements climatiques peuvent également influencer sur la répartition marine du saumon rouge dans l'espace et dans le temps, sur le moment de l'arrivée et sur la quantité proportionnelle de temps passé dans les habitats dulcicoles par rapport aux habitats marins, prolongeant la résidence en mer et induisant des asymétries phénologiques entre la résidence du saumon dans l'océan Pacifique et les ressources disponibles dans le réseau trophique (Cline *et al.* 2019). De plus, à plus long terme, on peut s'attendre à des changements dans la répartition en mer, y compris une éventuelle migration vers le pôle de l'écosystème natal des saumons du Pacifique et des routes de migration en milieu marin (Welch *et al.* 1998; Healey 2011). Malgré les diverses influences du milieu marin sur la survie des saumons du Pacifique au cours de la phase océanique, il n'y a aucune preuve apparente de changement directionnel dans la survie ou de variation dans les séries chronologiques sur la survie du stade de smolt à celui d'adulte et sur la survie en mer pour le saumon rouge du lac Cultus. Cependant, les variations observées de la survie dans les deux séries chronologiques peuvent refléter les influences de facteurs climatiques et autres sur la survie en mer. En raison des possibles influences « stochastiques » de la variabilité et des changements climatiques sur la survie en mer, soit plus de la moitié du cycle biologique, et compte tenu de l'absence de données probantes quantitatives concernant les répercussions directes sur la survie du saumon rouge du lac Cultus, les changements et la variabilité du climat en milieu marin sont considérés comme des menaces de niveau moyen pour la population, avec un niveau moyen de certitude causale (tableau 2).

4.1.7. Aquaculture en parcs en filet en milieu marin

La pisciculture en milieu marin sur la côte de la Colombie-Britannique a été reconnue comme une menace pour le saumon rouge du Fraser et a constitué un élément important d'une enquête judiciaire sur son déclin (Cohen 2012). Il est peu probable que les répercussions des rejets des fermes salmonicoles sur la qualité de l'habitat marin proche et le risque d'évasion de saumons atlantiques (*Salmo salar*) d'élevage aient eu des effets au niveau de la population sur le saumon rouge sauvage du Fraser, mais il n'est pas possible d'exclure le risque de transmission de maladies et d'agents pathogènes des saumons d'élevage aux saumons rouges sauvages, car les connaissances scientifiques des interactions entre les deux ne sont pas suffisantes (Cohen 2012). On a également noté que les données disponibles limitaient la puissance statistique disponible pour inférer les relations entre l'abondance ou la survie du saumon rouge et les tendances des agents pathogènes liés aux fermes piscicoles (Korman 2011).

Pour donner suite aux recommandations formulées à la suite de la Commission d'enquête Cohen sur le déclin des populations de saumon rouge du fleuve Fraser, le MPO a mené une série d'évaluations des risques pour examiner les menaces de transfert de neuf agents pathogènes différents entre le saumon atlantique d'élevage et le saumon rouge sauvage du Fraser. Ces évaluations des risques ont permis de déterminer que les agents pathogènes suivants posaient un risque minimal pour l'abondance et la diversité du saumon rouge du Fraser : virus de la nécrose hématopoïétique infectieuse, *Aeromonas salmonicida*, *Yersinia ruckeri*, *Renibacterium salmoninarum*, *Piscirickettsia salmonis*, orthoréovirus pisciaire (PRV-1), *Moritella viscosa*, *Tenacibaculum maritimum* et virus de la septicémie hémorragique virale IVa (MPO 2017, 2019b, 2020a-g). Bien que l'on n'ait aucune preuve directe de l'incidence des élevages de saumon atlantique sur le saumon rouge du lac Cultus en particulier, on sait que les juvéniles migrent vers le nord en longeant la côte continentale de la Colombie-Britannique (Welch *et al.* 2009). Les conclusions tirées et les incertitudes entourant les répercussions de l'aquaculture en parcs en filet du saumon atlantique sur le saumon rouge du Fraser en général peuvent probablement être généralisées à la population du lac Cultus. Cependant, étant donné l'absence de données probantes au sujet des répercussions directes sur la survie, le niveau de risque de la menace posée par l'aquaculture en parcs en filet pour la population est inconnu, avec un faible niveau de certitude causale (tableau 2).

4.1.8. Achigan à petite bouche, une espèce envahissante

En mai 2018, l'achigan à petite bouche (*Micropterus Dolomieu*; espèce envahissante) a été signalé pour la première fois dans le lac Cultus par des pêcheurs à la ligne. Les travaux préliminaires réalisés à ce jour ont permis d'établir que plusieurs classes d'âge sont présentes dans le lac et que l'espèce se reproduit activement à l'extrémité nord du lac à la fin du printemps. Les observations comprennent la présence de grands individus (plus de 35 cm) à proximité de la sortie du lac, pendant une période correspondant à la dévalaison des smolts. On a également observé des achigans à petite bouche immédiatement en amont de la barrière de dénombrement sur le ruisseau Sweltzer au moment où les smolts du lac Cultus la traversaient vers l'aval. L'examen du contenu stomacal d'achigans à petite bouche prélevés dans le lac Cultus a confirmé leur prédation sur les saumons rouges juvéniles (Wendy Margetts, Université Thompson Rivers, Colombie-Britannique, comm. pers.). L'achigan à petite bouche est un prédateur connu du saumon rouge et d'autres espèces de saumons du Pacifique au stade de juvénile dans d'autres réseaux hydrographiques où il a été introduit (Fayram et Sibley 2000; Fritts et Pearsons 2004; Tabor *et al.* 2007). Dans certains cas, la prédation exercée par l'achigan à petite bouche sur les saumons juvéniles peut dépasser celle de la sauvagesse du Nord (Tabor *et al.* 1993), un prédateur naturel courant désigné depuis longtemps comme une menace pour la production de saumon rouge du lac Cultus (Ricker 1941; Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). En particulier, les saumons rouges juvéniles qui sont encore près du littoral et les smolts peuvent être les stades biologiques les plus vulnérables à la prédation par l'achigan à petite bouche (Fayram et Sibley 2000). Dans le lac Cultus, une étude plus poussée est justifiée pour déterminer l'étendue et la configuration spatiale (sortie du lac, barrière de dénombrement) de la prédation par l'achigan à petite bouche sur les saumons rouges juvéniles et pour caractériser la menace que présente cette espèce envahissante. Compte tenu de l'invasion récente du lac Cultus par l'achigan à petite bouche et des preuves de sa prédation sur *O. nerka*, un risque est probable pour les saumons rouges juvéniles du lac Cultus. Bien que la nouvelle prédation par l'achigan à petite bouche puisse avoir une grande influence sur le saumon rouge du lac Cultus dans ses habitats natal et migratoire, compte tenu du manque de preuves indiquant des répercussions directes sur l'état et les tendances de la population, cette menace émergente est considérée comme un risque faible pour la population, avec une faible certitude causale pour le moment (tableau 2).

Tableau 2. Menaces pour la survie et le rétablissement du saumon rouge du lac Cultus, classées en fonction de leur cote de risque biologique actuelle.

Menace	Stade biologique	Probabilité de réalisation	Niveau des répercussions	Certitude causale	Risque de la menace pour la population	Réalisation de la menace	Fréquence de la menace	Étendue de la menace
Interceptions dans les pêches Pertes directes pour la population	IMMATURE, ADULTE	Connue	Élevé	Très élevée (1)	Élevé (1)	Passée, actuelle, prévue (si l'on suppose qu'aucun changement n'est apporté à la gestion des pêches)	Récurrente	Vaste
Production en éclosion de saumons du Pacifique Répercussions génétiques sur la réduction de la valeur adaptative chez les individus sauvages	TOUS LES STADES BIOLOGIQUES	Probable	Moyen	Moyenne (3)	Moyen (3)	Actuelle, prévue	Récurrente	Considérable
Concurrence en mer avec le saumon rose et le saumon kéta d'éclosion	ADULTE, IMMATURE, SMOLT	Probable	Inconnu	Faible (4)	Inconnu (4)	Actuelle	Récurrente	Vaste
Pollution Augmentation de la mortalité ou des effets sublétaux attribuables aux polluants	TOUS LES STADES BIOLOGIQUES	Probable	Moyen	Faible (4)	Moyen (4)	Passée, actuelle et prévue	Récurrente	Considérable
Eutrophisation du lac Faibles concentrations d'oxygène dans les frayères	ŒUF, ALEVIN VÉSICULÉ	Probable	Élevé	Moyenne (3)	Élevé (3)	Passée, actuelle, prévue (si l'on suppose aucune gestion du lac)	Récurrente	Considérable
Concentrations d'oxygène hypoxiques-anoxiques dans les	ŒUF, ALEVIN VÉSICULÉ, ALEVIN, TACON	Connue	Extrême	Très élevée (1)	Élevé (1)	Passée, actuelle, prévue (si l'on suppose aucune gestion du lac)	Récurrente	Considérable

Menace	Stade biologique	Probabilité de réalisation	Niveau des répercussions	Certitude causale	Risque de la menace pour la population	Réalisation de la menace	Fréquence de la menace	Étendue de la menace
zones hypolimnique et profonde								
Charge interne en sédiments	ŒUF, ALEVIN VÉSICULÉ, ALEVIN, TACON	Connue	Élevé	Très élevée (1)	Élevé (1)	Passée, actuelle, prévue (si l'on suppose aucune gestion du lac)	Récurrente	Considérable

Tableau 2 (suite). Menaces pour la survie et le rétablissement du saumon rouge du lac Cultus, classées en fonction de leur cote de risque biologique actuelle.

Menace	Stade biologique	Probabilité de réalisation	Niveau des répercussions	Certitude causale	Risque de la menace pour la population	Réalisation de la menace	Fréquence de la menace	Étendue de la menace
Espèces envahissantes								
Effets du myriophylle en épi sur les frayères et la décomposition aérobie des matières organiques	ADULTE, ŒUF, ALEVIN VÉSICULÉ, ALEVIN, TACON	Connue	Faible	Faible (4)	Faible (4)	Passée, actuelle et prévue	Récurrente	Vaste
Prédation par l'achigan à petite bouche	ALEVIN VÉSICULÉ, ALEVIN, TACON, SMOLT	Connue	Inconnu	Faible (4)	Faible (4)	Actuelle, prévue	Continue	Considérable
Modifications de l'habitat de migration								
Construction de digues, canalisation, barrière de dénombrement	ADULTE, SMOLT	Connue	Inconnu	Faible (4)	Inconnu (4)	Passée, actuelle et prévue	Continue	Considérable

Menace	Stade biologique	Probabilité de réalisation	Niveau des répercussions	Certitude causale	Risque de la menace pour la population	Réalisation de la menace	Fréquence de la menace	Étendue de la menace
Changements et variabilité climatiques								
Milieu dulcicole Températures sublétales à létales de l'épilimnion du lac	ALEVIN, TACON	Connue	Moyen	Moyenne (3)	Moyen (3)	Passée, actuelle et prévue	Récurrente	Considérable
Interaction avec l'eutrophisation du lac (anoxie/hypoxie renforcée dans la zone profonde)	ADULTE, ŒUF, ALEVIN VÉSICULÉ, ALEVIN, TACON, SMOLT	Connue	Élevé	Élevée (2)	Élevé (2)	Passée, actuelle, prévue (si l'on suppose aucune gestion du lac)	Continue	Considérable
Milieu marin Répercussions sur la fécondité, la croissance, la survie	ADULTE, IMMATURE, SMOLT	Connue	Moyen	Moyenne (3)	Moyen (3)	Passée, actuelle et prévue	Continue	Considérable
Aquaculture en parcs en filet Maladies, parasites	ADULTE, SMOLT	Probable	Inconnu	Faible (4)	Inconnu (4)	Passée, actuelle	Récurrente	Vaste

4.2. ÉLÉMENT 9 : ACTIVITÉS LES PLUS SUSCEPTIBLES DE MENACER (ENDOMMAGER OU DÉTRUIRE) LES PROPRIÉTÉS DE L'HABITAT INDIQUÉES DANS LES ÉLÉMENTS 4 ET 5

Les forçages de l'eutrophisation du lac ainsi que les changements et la variabilité climatiques sont les activités les plus susceptibles de menacer les propriétés de l'habitat du saumon rouge du lac Cultus indiquées dans les éléments 4 et 5. Les voies et les conséquences de ces activités sont décrites à l'élément 8.

4.3. ÉLÉMENT 10 : FACTEURS NATURELS QUI LIMITERONT LA SURVIE ET LE RÉTABLISSEMENT DU SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS

Plusieurs facteurs naturels pourraient limiter la survie et le rétablissement naturels du saumon rouge du lac Cultus. Les vulnérabilités inhérentes sont associées à des événements stochastiques, et la répartition limitée de la population dans la nature (un lac de croissance) et en captivité (une écloserie) est considérée comme une menace de niveau moyen, avec une faible certitude causale. De plus, on a déterminé que les facteurs naturels suivants sont les principaux facteurs limitatifs pour la population.

4.3.1. Variabilité des conditions en milieu marin

La variabilité du climat en milieu marin et ses effets sur la productivité des populations de saumons du Pacifique sont bien documentés (Beamish et Bouillon 1993; Mantua *et al.* 1997; Martins *et al.* 2012). Les données paléolimnologiques des deux derniers millénaires ont montré des fluctuations de l'abondance du saumon rouge correspondant aux changements majeurs du climat de l'océan Pacifique (Finney *et al.* 2002) et, au cours des 300 dernières années, des données semblables ont révélé que l'abondance du saumon rouge suivait les fluctuations des températures de la surface de la mer (Finney *et al.* 2000). Bien qu'il existe peu de renseignements sur la phase océanique du cycle biologique du saumon rouge du lac Cultus, les répercussions sur le saumon rouge du Fraser de la variabilité des conditions en mer ont été documentées (Healey 2011, Martins *et al.* 2012). Le réchauffement des températures de l'océan, qui a entraîné une augmentation de la survie et de la croissance des stocks de saumons rouges de l'Alaska aux premiers stades biologiques en mer (post-smolts), a eu l'effet contraire sur les populations du Fraser (Mueter *et al.* 2002). Des températures plus chaudes ont également été associées à une diminution de la taille chez les individus matures (Cox et Hinch 1997; Pyper et Peterman 1999), ce qui peut avoir des répercussions sur la montaison et le succès de la reproduction (Crossin *et al.* 2004; Healy 2011). De plus, la sensibilité aux maladies et aux agents pathogènes dans le milieu marin est influencée par la hausse des températures (Kent 2011).

Bien que les effets et les mécanismes soient complexes, Martins et ses collaborateurs (2012) ont effectué un examen approfondi de la documentation couvrant les effets de la variabilité du climat sur le saumon rouge à tous les stades biologiques qui a permis de confirmer les observations selon lesquelles les répercussions courantes étaient plus fortement ressenties à l'échelle régionale et locale qu'à des échelles plus grandes (à l'échelle de l'océan) [p. ex., Mueter *et al.* 2002]. En raison du couplage connu de l'abondance du saumon rouge à des forçages océaniques et climatiques marins variables, et compte tenu de l'augmentation prévue des extrêmes climatiques, la variabilité croissante des conditions en milieu marin est considérée comme un risque moyen pour la population, avec une certitude causale moyenne (tableau 3).

4.3.2. Variabilité des conditions en milieu dulcicole

Les écosystèmes lacustres sont étroitement liés aux forçages atmosphériques (Wetzel 2001; Adrian *et al.* 2009). Les profils climatiques synoptiques dans l'ouest de l'Amérique du Nord sont largement forcés par la variabilité couplée océan-atmosphère dans l'océan Pacifique (Stahl *et al.* 2006; Ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique 2016). Des profils oscillatoires quasi périodiques couvrant les eaux tropicales et extratropicales de l'océan Pacifique (p. ex., oscillation australe El Niño, oscillation décennale du Pacifique) induisent des fluctuations à grande échelle des régimes continentaux de températures et de précipitations (Stahl *et al.* 2006).

À la section 4.1.6, on démontre un couplage thermique étroit de la dynamique physique du lac Cultus (températures de la couche supérieure de la colonne d'eau, profils saisonniers de la stratification thermique) avec les forçages climatiques régionaux (p. ex., changements et variabilité climatiques). Notre reconstitution des températures de la couche supérieure de la colonne d'eau au cours du dernier siècle (figure 9) permet de penser que la variabilité de la température due au climat dans le lac Cultus est une caractéristique intrinsèque du réseau. Il est donc raisonnable de supposer que les futures variations de la température de l'air continueront de forcer la variabilité physique du lac Cultus, avec des effets en cascade sur la chimie de l'eau ainsi que la structure et les fonctions écologiques. De plus, la hausse des températures de l'eau peut accroître la vulnérabilité des saumons du Pacifique aux maladies et aux agents pathogènes dans l'eau douce (Wagner *et al.* 2005; Bradford *et al.* 2010; Kent 2011).

Conjuguées aux forçages d'origine anthropique, les variations climatiques périodiques peuvent exacerber (phases chaudes) ou atténuer (phases froides) les effets préjudiciables de l'eutrophisation du lac (p. ex., appauvrissement en oxygène de l'hypolimnion, charge interne provenant des sédiments du lac) même si, compte tenu de la référence changeante de la hausse des températures du lac et de la propension de la variabilité atmosphérique accrue résultant des changements climatiques (Coumou et Rahmstorf 2012), cette relation pourrait devenir plus dynamique, conduisant à une variabilité extrême de la capacité du lac Cultus à soutenir le saumon rouge. Sans la réduction prescrite des charges en éléments nutritifs dans le lac Cultus (voir Putt *et al.* 2019), qui augmentent la réactivité biologique du lac aux facteurs climatiques (Moss *et al.* 2011), ces extrêmes pourraient pousser l'écosystème au-delà des seuils clés (emballement de l'eutrophisation provoqué par la charge interne, modifications renforcées de la structure et des fonctions du réseau trophique, asymétries phénologiques entre la période de l'émergence et les ressources du réseau trophique/prédation), mettant encore plus en péril le saumon rouge du lac Cultus pendant ses premiers stades biologiques sensibles passés en eau douce. Par conséquent, en particulier si la gestion du lac ne parvient pas à réduire la charge en éléments nutritifs, la variabilité accrue des conditions en milieu dulcicole est considérée comme un risque de niveau élevé pour la population, avec une certitude causale très élevée (tableau 3).

4.3.3. Changement de la période de montaison des adultes

Au début des années 1990, les saumons rouges adultes du lac Cultus, ainsi que ceux d'autres populations à montaison tardive, ont commencé à entrer en eau douce plus tôt que par le passé (Cooke *et al.* 2004). Du fait de ce changement de comportement, la date d'arrivée médiane à la barrière sur le ruisseau Sweltzer a passé du 1^{er} novembre au 15 septembre environ, exposant les individus en montaison à des températures et à des débits fluviaux plus élevés et amplifiant les stress pour eux (Bradford *et al.* 2010). Comme la période de fraie n'a pas changé, la période de séjour en eau douce précédant la reproduction s'est trouvée allongée d'au moins 45 jours. On pense que cette période prolongée de résidence en eau douce contribue à des taux plus élevés de mortalité avant la fraie chez les adultes (Bradford *et al.* 2010), bien qu'il soit à noter

que les estimations de la mortalité avant la reproduction pour cette population sont très incertaines en raison de la fraie en eau profonde dans le lac et des défis associés à la récupération des carcasses pour déterminer le succès de la reproduction. C'est pourquoi la période de montaison des adultes comme risque de mortalité avant la fraie est considérée comme un risque de niveau élevé pour la population, avec une certitude causale moyenne (tableau 3).

4.3.4. Agents pathogènes, parasites et maladies

Plusieurs agents pathogènes et parasites touchent le saumon rouge du lac Cultus. *Parvicapsula minibicornis* est un myxozoaire parasite courant chez le saumon rouge adulte du lac Cultus (Bradford *et al.* 2010). *P. minibicornis* infecte tout d'abord les reins, mais aussi les branchies, et on pense qu'il cause l'insuffisance rénale (Raverty *et al.* 2000) et l'insuffisance respiratoire (Bradford *et al.* 2010). Une infection plus grave à *P. minibicornis* a été décelée chez des saumons rouges du lac Cultus migrant tardivement en 2007, probablement en partie à cause d'une exposition accrue à des températures fluviales élevées (Bradford *et al.* 2010), dont on sait qu'elles influencent la performance physiologique du saumon rouge (Wagner *et al.* 2005).

Les saumons rouges juvéniles du lac Cultus sont couramment observés avec le copépode *Salmincola californiensis* attaché à leurs cavités branchiales et à la base de leurs nageoires. En grand nombre, ce copépode peut causer des lésions tissulaires et même la mort de l'hôte (Kabata et Cousens 1977). D'autres espèces de parasites des taxons suivants ont également été observées sur des juvéniles du lac Cultus : *Myxosporea*, *Monogenea*, *Trematoda*, *Cestoda*, *Nematoda* et *Acanthocephala* (Bailey et Margolis 1987).

La maladie bactérienne du rein est causée par *Renibacterium salmoninarum* et touche toutes les espèces de saumons du Pacifique. Elle provoque une infection, particulièrement dans les reins, mais aussi dans d'autres organes (Fryer et Lannan 1993). Le saumon rouge est très sensible à la maladie bactérienne du rein dans une plage de températures, mais la mort survient plus rapidement lorsque les températures sont chaudes (Sanders *et al.* 1978). La maladie bactérienne du rein a été décelée chez relativement peu des saumons rouges adultes du lac Cultus récoltés dans le cadre du programme de stocks de géniteurs, qui sont soumis à un dépistage de la maladie (Ackerman *et al.* 2014).

Les interactions avec les changements environnementaux peuvent exacerber les agents pathogènes, les parasites et les maladies (Teffer *et al.* 2022), dont bon nombre sont endémiques chez le saumon rouge du lac Cultus (Bradford *et al.* 2010). Des preuves génomiques indiquent que l'épizootie *Ichthyophtherius multifiliis* touche le saumon rouge du lac Cultus à la suite de stress thermiques et hypoxiques dans le lac, et peut révéler des interactions différées entre l'environnement et l'agent pathogène (Akbarzadeh *et al.* 2021). Étant donné l'incertitude marquée qui entoure la nature épisodique des événements liés aux agents pathogènes, parasites et maladies, ainsi que leurs effets sur la population de saumon rouge du lac Cultus, on considère qu'il s'agit d'un risque de niveau faible pour la population, avec une faible certitude causale (tableau 3).

4.3.5. Prédation

La prédation sur les saumons rouges juvéniles dans le lac Cultus est depuis longtemps reconnue comme un facteur naturel qui a une incidence sur la productivité de cette population (Ricker 1941). La prédation au stade de l'œuf dans le lac Cultus a été attribuée aux meuniers et aux chabots (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). Les espèces de poissons indigènes présentes dans le lac Cultus, qui sont connues pour se nourrir de saumons rouges juvéniles nageant librement, sont la sauvagesse du Nord, le Dolly Varden, la truite

feldée, le saumon coho, le chabot piquant, le poisson blanc des Rocheuses, ainsi que les saumon rouges et kokanis résiduels (Ricker 1941). La sauvagesse du Nord, en particulier, a été identifiée comme un prédateur important et a fait l'objet de multiples efforts de lutte contre les prédateurs dans le lac Cultus (Mossop *et al.* 2004). Malgré l'accent mis sur la sauvagesse du Nord, Ricker (1941) a noté que les espèces de truites et d'ombles étaient des prédateurs plus voraces, chaque piscivore consommant un plus grand nombre de saumons rouges juvéniles du lac Cultus. Cependant, on ignore l'abondance des truites et des ombles dans le lac Cultus et les rapports sur les augmentations récentes de leurs populations se limitent à des témoignages anecdotiques de pêcheurs locaux. Les smolts en dévalaison sont également chassés par les visons, les harles, les ratons laveurs et les loutres de rivière; toutes ces espèces ont été observées en train de se nourrir de smolts pendant leur dévalaison dans le ruisseau Sweltzer (Dennis Klassen, MPO, Kamloops, Colombie-Britannique, comm. pers.). Les répercussions des prédateurs sur les saumons rouges juvéniles du lac Cultus ont été relevées comme une menace pour le rétablissement, mais elle est inconnue compte tenu de l'état réduit de la population du lac Cultus (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). La prédation en eau douce par des prédateurs aquatiques et terrestres indigènes est considérée comme un risque de niveau moyen pour la population, avec une certitude causale moyenne (tableau 3).

Les adultes en montaison peuvent également faire face à des menaces de prédation par des mammifères marins (p. ex., phoques et otaries) dans les milieux marins et estuariens côtiers et dans le bas Fraser (Christensen et Trites 2011; Walters *et al.* 2020). Les prédateurs dans la mer des Salish sont les oiseaux de mer, le saumon coho, le saumon chinook, l'aiguillat commun (*Squalus acanthias*) et la lamproie de rivière (*Lampetra ayresi*; Beamish et Neville 2001). Les autres prédateurs en milieu marin comprennent le phoque commun (*Phoca vitulina*) et l'épaulard (*Orcinus orca*). Les répercussions des prédateurs sur le saumon rouge du Fraser sont limitées en raison du manque de données et des défis logistiques liés à l'évaluation de la prédation en mer, et présentent donc un risque de niveau faible pour la population, avec une faible certitude causale en ce qui concerne la réalisation.

Tableau 3. Facteurs limitatifs pour la survie et le rétablissement du saumon rouge du lac Cultus, classés en fonction de leur cote de risque biologique actuelle.

Facteur limitatif	Stade biologique	Probabilité de réalisation	Niveau des répercussions	Certitude causale	Risque de la menace pour la population	Réalisation de la menace	Fréquence de la menace	Étendue de la menace
Agents pathogènes, parasites et maladies <i>Salmonicola, Parvicapsula</i> , maladie bactérienne du rein, nécrose hématopoïétique infectieuse	ADULTE, ALEVIN, TACON, SMOLT, IMMATURE	Connue	Moyen	Faible (4)	Faible (4)	Passée, actuelle et prévue	Récurrente	Vaste
Changement de la période de montaison des adultes Augmentation des événements liés aux maladies et agents pathogènes, mortalité avant la fraie	ADULTE	Connue	Élevé	Moyenne (3)	Élevé (3)	Passée, actuelle et prévue	Récurrente	Considérable
Prédation en milieu dulcicole Prédateurs indigènes	ŒUF, ALEVIN, TACON, SMOLT	Connue	Moyen	Moyenne (3)	Moyen (3)	Passée, actuelle et prévue	Continue	Considérable
Prédation en milieu marin Mammifères marins indigènes, piscivores, oiseaux	SMOLT, IMMATURE, ADULTE	Connue	Faible	Faible (4)	Faible (4)	Passée, actuelle et prévue	Continue	Considérable
Variabilité accrue des conditions en milieu dulcicole	ADULTE, ŒUF, ALEVIN VÉSICULÉ, ALEVIN, TACON, SMOLT	Connue	Élevé	Très élevée (1)	Élevé (1)	Passée, actuelle, prévue (en supposant aucune gestion du lac)	Récurrente	Considérable

Facteur limitatif	Stade biologique	Probabilité de réalisation	Niveau des répercussions	Certitude causale	Risque de la menace pour la population	Réalisation de la menace	Fréquence de la menace	Étendue de la menace
Variabilité accrue des conditions en milieu marin	ADULTE, IMMATURE	Connue	Moyen	Moyenne (3)	Moyen (3)	Passée, actuelle et prévue	Récurrente	Considérable
Répartition limitée en eau douce Vulnérabilité aux événements catastrophiques; dégradation de l'habitat	ADULTE, ŒUF, ALEVIN VÉSICULÉ, ALEVIN, TACON, SMOLT	Connue	Moyen	Faible (4)	Moyen (4)	Passée, actuelle et prévue	Récurrente	Considérable

4.4. ÉLÉMENT 11 : RÉPERCUSSIONS ÉCOLOGIQUES POTENTIELLES DES MENACES ÉVALUÉES DANS L'ÉLÉMENT 8 SUR L'ESPÈCE CIBLÉE ET LES ESPÈCES CONCOMITANTES. EFFORTS DE SURVEILLANCE EXISTANTS ET LACUNES DANS LES CONNAISSANCES

L'élément 8 décrit des menaces et traite de leurs répercussions écologiques. Pour la plupart des menaces, on suppose qu'une productivité plus grande de la population serait bénéfique au saumon rouge du lac Cultus si la menace indiquée était atténuée. L'une des exceptions est la menace d'une diminution possible de la valeur adaptative à la suite de la production de saumons rouges du lac Cultus en éclosérie. Compte tenu de l'étendue limitée de la fraie naturelle, l'arrêt des apports de poissons d'éclosérie aurait sans doute un effet négatif sur la productivité de cette population.

Les espèces concomitantes, y compris les concurrents et les prédateurs, réagiront différemment aux menaces décrites dans l'élément 8. Pour nombre d'entre elles, les répercussions sur l'habitat du lac, comme la pollution et l'eutrophisation, seront négatives, mais la mesure dans laquelle ces menaces touchent d'autres espèces dépend en grande partie de leur biologie. Les autres effets négatifs sont la dégradation de l'habitat, qui facilite la prolifération des espèces envahissantes, comme le myriophylle en épi et l'achigan à petite bouche (augmentation des éléments nutritifs et des températures de l'eau).

Une espèce concomitante préoccupante est le chabot côtier endémique, population du lac Cultus (*Cottus aleuticus*; synonyme de chabot pygmée du lac Cultus), qui figure sur la liste des espèces *menacées* à l'annexe 1 de la LEP et dont l'inscription en tant qu'espèce en voie de disparition est à l'étude en raison de la dégradation de son habitat essentiel, le lac Cultus (Ministre de l'Environnement et du Changement climatique 2020). Le chabot pygmée du lac Cultus partage un habitat trophique et profond avec les saumons rouges juvéniles du lac Cultus, et toutes les mesures d'atténuation proposées devraient avoir un effet positif sur cette espèce, dont le cycle biologique a suivi une évolution unique dans le lac Cultus depuis la déglaciation du Pléistocène.

4.5. SURVEILLANCE

Les menaces suivantes ont fait l'objet d'une certaine surveillance.

1. La pollution sous forme d'apports d'éléments nutritifs dans le lac est surveillée au moyen de relevés limnologiques mensuels dans le lac Cultus par le Programme de recherche sur les lacs du MPO. Cependant, les relevés ne couvrent pas d'autres polluants comme les métaux lourds et les contaminants ni l'évolution saisonnière potentielle du sulfure d'hydrogène (H₂S) dans les eaux profondes.
2. L'état des éléments nutritifs dans le lac Cultus, une fonction de l'eutrophisation, est surveillé dans le cadre des relevés limnologiques mensuels du Programme de recherche sur les lacs du MPO depuis 2009.
3. Le myriophylle en épi a été évalué relativement peu souvent par le passé; les deux derniers relevés, en 2004 et en 2014, ont été réalisés à l'aide de méthodes hydroacoustiques pour quantifier l'étendue de la couverture du myriophylle autour du périmètre du lac.
4. Les répercussions de la production en éclosérie sur la diversité génétique sont soigneusement considérées comme un principe fondamental du programme de mise en valeur pour la conservation.
5. Bien qu'il s'agisse d'une menace cernée récemment, la présence de l'achigan à petite bouche, une espèce envahissante, a été détectée et surveillée de façon opportuniste grâce

aux prises déclarées par les pêcheurs à la ligne. Le ministère des Forêts, des Terres, de l'Exploitation des ressources naturelles et du Développement rural de la Colombie-Britannique, avec le soutien du milieu universitaire et du MPO, surveille ponctuellement l'ampleur de la fraie et la démographie de la population.

4.6. LACUNES DANS LES CONNAISSANCES

Il existe plusieurs lacunes importantes dans les connaissances sur les répercussions écologiques des menaces relevées pour le saumon rouge du lac Cultus. Des incertitudes entourent l'estimation des taux nationaux et internationaux d'exploitation dans les pêches en mer, dont la résolution améliorerait la certitude et les mesures d'atténuation liées à la gestion des pêches. Il faudrait évaluer le rôle de la charge interne en substances toxiques (métaux *in situ* dans les sédiments du lac; évolution du H₂S) dans la régulation de la survie des saumons rouges juvéniles pendant leur croissance dans le lac Cultus, compte tenu des mécanismes médiés par l'oxygène décrits ici. L'étendue de la prédation sur les saumons rouges juvéniles du lac Cultus par une espèce envahissante (achigan à petite bouche) n'est pas entièrement connue. De plus, on ne sait pas dans quelle mesure l'expansion de la population d'achigan, en raison des échecs apparents des mesures prises pour endiguer l'invasion en cours, se répercutera sur le saumon rouge du lac Cultus. La prédation en mer est en grande partie non quantifiée et, par conséquent, les taux changeants (l'expansion des mammifères marins, l'expansion de l'aire de répartition de nouveaux prédateurs du sud résultant des changements climatiques) et leur influence sur la productivité de la population demeurent des lacunes dans les connaissances. D'autres incertitudes subsistent au sujet des influences écologiques du myriophylle en épi sur l'habitat de reproduction et le recrutement des prédateurs. De plus, des mises à jour exhaustives sont nécessaires sur les emplacements et les profondeurs des frayères, de même que sur les comportements dans le lac Cultus, car aucun relevé visuel par VTG n'a été effectué depuis plus de 15 ans.

5. OBJECTIFS DE RÉTABLISSEMENT

5.1. ÉLÉMENT 12 : OBJECTIFS D'ABONDANCE ET DE RÉPARTITION POSSIBLES ET PROPOSÉS POUR LE RÉTABLISSEMENT

Le **rétablissement** est défini ainsi : « Retour à un état dans lequel les caractéristiques de la population et de l'aire de répartition de même que le risque de disparition de la planète sont tous dans la fourchette normale de variabilité de l'espèce sauvage. »

La **survie** est quant à elle définie ainsi : « Atteinte d'un état stable (ou qui s'améliore) par une espèce sauvage en milieu naturel au Canada et l'espèce n'étant pas menacée de disparition imminente du pays ou de la planète en raison d'activités anthropiques. » (MPO 2014).

Pour le **rétablissement**, on propose un objectif d'abondance de 7 000 géniteurs (moyenne sur quatre ans) remontant à la barrière de dénombrement. Cet objectif d'abondance reflète un objectif provisoire fondé sur l'état actuel, les menaces et les facteurs limitatifs de la population, en fonction des indications de l'Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009). Dans la PSS, le point de référence pour le saumon rouge du lac Cultus au niveau de probabilité de 50 % (p50) varie d'environ 15 000 géniteurs ($G_{\text{gén}}$) à environ 31 000 géniteurs (G_{RMD}); de ce fait, l'objectif provisoire, bien qu'il se trouve dans la « zone rouge » de la PSS, est considéré comme progressif vers ce point final. Les 7 000 géniteurs seront nécessairement une combinaison de poissons d'écloserie et d'origine naturelle et comprendront les poissons lâchés dans le lac et ceux utilisés pour le stock de géniteurs de l'écloserie, même si la PSS n'inclut pas les poissons

d'écloserie (MPO 2005). En fin de compte, l'un des principaux objectifs est de réduire les influences des poissons d'écloserie sur la diversité génétique et la valeur adaptative du saumon rouge du lac Cultus. L'influence naturelle proportionnelle est une mesure du risque génétique utile pour orienter les apports en poissons d'écloserie pour la conservation (Withler *et al.* 2018; décrit à la section 5.1.3). Les valeurs actuelles de l'influence naturelle proportionnelle devraient être supérieures à 0,72, bien qu'elles puissent nécessairement être inférieures à ce point de référence au début du programme de rétablissement. Aucun objectif précis en matière de répartition n'est fourni, mais on croit que ce niveau d'abondance devrait mener à l'utilisation de plusieurs frayères dans le lac, une propriété souhaitable.

Pour évaluer les effets des mesures d'atténuation et de rétablissement potentielles sur les trajectoires à court terme, on propose également un objectif de **survie** équivalant à une moyenne sur une génération de 2 500 géniteurs parvenant au lac (selon le dénombrement à la barrière), avec un objectif à court terme d'aucune année où ce nombre est inférieur à 500. En effet, cet objectif constitue un point de référence pour un certain niveau de rétablissement par rapport à la situation actuelle (moins de 1 000).

Les objectifs de rétablissement sont fondés sur le dénombrement des adultes qui atteignent la barrière et la reconnaissance que le nombre de poissons frayant réellement sera inférieur, en raison de la mortalité connue avant et pendant la fraie.

Dans un souci d'uniformité avec les indications données dans le document du COSEPAC (2017), l'évaluation de la population par rapport à l'objectif d'abondance doit reposer sur l'abondance moyenne arithmétique des quatre dernières années.

Bien que les changements climatiques puissent influencer le rétablissement du saumon rouge du lac Cultus à court terme (trois générations), il existe de grandes incertitudes quant à la capacité de modéliser les résultats de la survie de la population, compte tenu de son cycle biologique complexe, et ils n'ont donc pas été explicitement pris en compte dans la modélisation du rétablissement.

La justification des objectifs susmentionnés est présentée dans les sections suivantes.

5.1.1. Abondance

Un but et divers objectifs de rétablissement pour l'UD de saumon rouge du lac Cultus ont été établis dans le plan de conservation du saumon rouge du lac Cultus (Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus 2009); d'autres objectifs sont décrits dans les évaluations effectuées aux termes de la PSS (Grant et Pestal 2013). En voici un bref historique.

L'Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus (2009) a indiqué que son but est d'arrêter le déclin de la population de saumon rouge du lac Cultus et de la faire croître jusqu'à ce qu'elle atteigne l'état d'une population sauvage viable, autosuffisante et génétiquement robuste, qui contribuera à ses écosystèmes et pourra soutenir une utilisation durable.

L'Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus a présenté une série d'objectifs hiérarchiques qui définissent les étapes du processus de rétablissement vers l'atteinte du but.

L'**objectif 1** est une moyenne sur quatre ans de 1 000 géniteurs ayant frayé dans le lac, et pas moins de 500 par année; cet objectif vise à protéger l'intégrité génétique de la population. La proportion de géniteurs qui frayent peut être indexée par les estimations des génitrices ayant frayé. Toutefois, dans le cas du lac Cultus, il est difficile d'estimer les génitrices ayant frayé parce que l'on doit se fonder sur l'examen des poissons ayant frayé prélevés dans le lac. En raison de la vaste plage des profondeurs auxquelles l'espèce se reproduit et de la période de l'année où la fraie a lieu (décembre), les carcasses de poissons ayant frayé sont difficiles à

recueillir et les estimations des génitrices ayant frayé sont probablement faussées à la baisse. Par conséquent, on a évalué l'objectif 1 à l'aide du dénombrement des géniteurs à la barrière, sachant que le nombre réel de géniteurs qui réussissent à frayer peut être plus bas, et dans certains cas beaucoup plus bas. Dans ces cas, les risques génétiques pour la population peuvent être plus élevés que ceux envisagés par l'Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus.

L'**objectif 2** est fondé sur la présence d'une croissance sur une génération, trois années sur quatre années successives, afin d'assurer la croissance de la population. La croissance sur une génération est le ratio de l'abondance moyenne sur quatre ans par rapport aux quatre années précédentes, et compare les parents aux descendants. Cet objectif vise à permettre de gérer ou d'atténuer les facteurs qui influent sur la productivité de la population, de façon à ce que la population augmente au fil du temps pour atteindre les objectifs à long terme.

L'**objectif 3** pourrait être utilisé pour étayer une décision de non-inscription. Il est considéré comme atteint si les objectifs 1 et 2 sont réalisés, si les causes de la baisse ont été traitées et si les mesures d'atténuation d'urgence ne sont plus nécessaires. L'Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus (2009) n'a fourni aucune valeur précise de l'abondance, mais a proposé une abondance d'environ 7 000 géniteurs, car on avait à l'époque des preuves que la mortalité anticompensatoire (« zone de prédation ») pouvait limiter la production en eau douce à une abondance plus faible des géniteurs. Une abondance de cet ordre de grandeur a également été jugée suffisante comme tampon contre les années de forte mortalité avant la fraie, dans lesquelles le nombre de géniteurs ayant frayé serait beaucoup plus bas que le dénombrement à la barrière.

L'**objectif 4** est associé à des niveaux d'abondance qui appuieraient l'utilisation durable par l'écosystème et l'humain. Aucune valeur précise n'a été fournie, car on pensait que la PSS fournirait de telles indications.

Deux autres points de référence sont présentés dans l'évaluation de 2011 en vertu de la PSS (Grant *et al.* 2011). Le point de référence inférieur est de 12 000 géniteurs, d'après l'analyse de $G_{\text{gén}}$ (abondance de géniteurs qui mènerait au rétablissement jusqu'au rendement maximal durable [G_{RMD}] en une génération), et le point de référence supérieur est de 32 000, reposant sur 80 % de G_{RMD} (c.-à-d. le rendement maximal durable). Ces niveaux d'abondance pourraient être utilisés pour définir les limites entre les états rouge/ambre et les états ambre/vert de la population selon la PSS. En particulier, le point de référence inférieur est défini dans la PSS comme étant « un niveau d'abondance suffisamment élevé pour assurer la présence d'une zone tampon substantielle entre ce niveau et tout autre niveau d'abondance auquel une UC serait considérée en danger d'extinction par le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada » (MPO 2005).

Parmi les objectifs d'abondance qui sont proposés, on pense que l'objectif 1 de 1 000 géniteurs, avancé par l'Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus, est trop faible, car il exposerait peut-être la population à une inscription potentielle en vertu du critère C du COSEPAC (moins de 2 500 adultes), sur lequel repose l'inscription actuelle. De plus, à ce niveau d'abondance, il y a peu d'effet tampon pour des événements comme la mortalité avant la fraie ou la mortalité par pêche, qui pourraient mettre la population en danger. On remarque que l'objectif 1 de l'Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus a été initialement conçu comme un objectif de rétablissement provisoire plutôt que comme un objectif de rétablissement.

On propose que l'objectif de rétablissement en vertu de la LEP pour le saumon rouge du lac Cultus se situe probablement dans la plage de l'objectif 3 de l'Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus (7 000 géniteurs). Cet objectif est inférieur au point de référence

inférieur de la PSS, ce qui est approprié compte tenu de la définition du point de référence indiquée dans la Politique. Cet objectif d'une moyenne sur une génération de 7 000 géniteurs est également semblable aux moyennes observées entre les années 1970 et 1990 (figure 1) et correspond donc à la définition du rétablissement, puisque l'abondance se situerait dans une plage de variabilité récemment observée et pertinente sur le plan écologique.

On propose un deuxième objectif, plus bas, qui correspond davantage à un objectif de survie, mais qui est semblable à l'objectif 1 de l'Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus. Il s'agit d'une moyenne sur une génération de 2 500 géniteurs dans le lac (selon le dénombrement à la barrière), ce nombre ne devant pas être inférieur à 500 par année. Cet objectif reconnaît le critère C2 du COSEPAC, 2 500 individus matures, qui a en partie servi de base à l'évaluation de la situation (COSEPAC 2017). De plus, l'atteinte de cet objectif implique une croissance importante de la population par rapport à son abondance actuelle. Cet objectif plus bas correspond donc à la définition de la survie qui comprend une tendance à la hausse et un faible risque de disparition imminente.

5.1.2. Répartition

Aucun objectif précis de répartition n'a été établi pour le saumon rouge du lac Cultus. Le seul changement de répartition probable avec le rétablissement de la population est une modification de la répartition de la fraie le long des plages du lac lui-même. Le COSEPAC (2017) note une frayère connue du côté est du lac, qui concorde avec les plus récents relevés par VTG (figure 2), mais on ne connaît pas entièrement l'étendue réelle de la fraie, en raison du manque d'évaluation et des profondeurs auxquelles la reproduction a lieu. Du point de vue de l'étalement du risque, il est logique d'avoir un certain nombre de frayères disponibles. Malheureusement, il est difficile de surveiller la répartition de la fraie et cette surveillance n'a pas été uniforme, ce qui fait qu'on ne sait pas si plusieurs frayères sont régulièrement utilisées. Il est probable que la répartition de la fraie s'étendra à d'autres frayères dans le lac si l'abondance de la population augmente et si les conditions de l'habitat du lac s'améliorent.

5.1.3. Élevage d'appoint

Depuis l'année d'éclosion 2000, les lâchers de poissons d'écloserie ont permis d'accroître l'abondance du saumon rouge du lac Cultus. Le programme consistait en un programme traditionnel d'écloserie complété par un programme d'élevage en captivité exécuté de 2002 à 2013.

À l'heure actuelle, il n'y a pas de consensus sur la façon dont les contributions des individus d'appoint devraient être prises en compte dans les évaluations de la situation menées par le COSEPAC. Dans les lignes directrices du COSEPAC concernant les espèces sauvages manipulées, les individus d'appoint peuvent être inclus dans l'évaluation « si l'on prévoit que ces individus auront une incidence positive nette sur l'espèce sauvage évaluée », et devraient être exclus « si on a la preuve d'une baisse de la capacité d'adaptation ou des caractéristiques génétiques, qui peuvent corrompre les adaptations locales »¹.

On a examiné deux approches quant à la façon dont les poissons d'écloserie contribuent aux objectifs de rétablissement.

¹ [Lignes directrices du COSEPAC concernant les espèces sauvages manipulées, avril 2010.](#)

Méthode 1 : en supposant que les risques génétiques et autres peuvent être gérés, on inclut tous les poissons (d'écloserie et d'origine naturelle, ainsi que le stock de géniteurs) dans la population sauvage à évaluer.

Cette approche repose sur l'établissement que les risques pour la population sauvage sont réduits en cas d'apports de poissons d'écloserie. Le MPO (2018) a récemment élaboré des lignes directrices pour l'apport de poissons d'écloserie dans le contexte de la PSS, afin de s'assurer que les effets de la sélection naturelle dans l'écloserie par rapport à l'environnement naturel sont tels que la nature sauvage de la population est maintenue. Un indice, connu sous le nom d'influence naturelle proportionnelle (INP), a été mis au point aux États-Unis pour surveiller les contributions relatives des milieux de sélection naturels et artificiels (écloseries). L'INP se calcule comme suit :

$$INP = pNOB / (pHOS + pNOB)$$

Où $pNOB$ est la proportion de poissons d'origine naturelle dans le stock de géniteurs de l'écloserie et $pHOS$ est la proportion de poissons d'écloserie frayant dans l'environnement naturel.

Withler et ses collaborateurs (2018) suggèrent que les programmes d'écloserie en cours devraient maintenir les valeurs de l'INP au-delà de 0,72 afin de maintenir l'état « sauvage » en vertu de la PSS. Bien que les apports en cours de poissons d'écloserie puissent avoir des effets négatifs sur la population sauvage, cette valeur garantit que la sélection dans l'environnement naturel dominera le processus d'adaptation, ce qui réduira les risques génétiques pour la population sauvage. On propose d'utiliser cet objectif génétique pour évaluer le rétablissement du saumon rouge sauvage du lac Cultus. En supposant que les géniteurs destinés au programme d'écloserie sont prélevés au hasard parmi les poissons en montaison, la valeur standard de l'INP (0,72) signifie que les poissons d'écloserie ne représenteront pas plus de 28 % de la population totale. Pour maintenir ce niveau d'INP tout en rétablissant la population sauvage, la productivité de la composante naturelle de la population doit être suffisante pour en maintenir l'abondance. Cette condition implique que les menaces pour la population naturelle auront été largement atténuées.

On pourrait faire valoir qu'un programme d'apport en cours de poissons d'écloserie qui répond à cet objectif lié à l'INP devrait satisfaire à l'exigence du COSEPAC selon laquelle les individus d'appoint ne devraient pas « corrompre les adaptations locales ». Si c'est le cas, les poissons d'écloserie et les poissons sauvages peuvent être inclus dans une évaluation du COSEPAC, comme le précisent les lignes directrices. De plus, les poissons utilisés pour le stock de géniteurs de l'écloserie peuvent être considérés comme faisant partie de la population.

On prévoit que la population n'atteindra pas la valeur standard de l'INP pendant le processus de rétablissement, car des apports de poissons d'écloserie pourraient être nécessaires pour accroître l'abondance et compenser l'effet des menaces avant leur atténuation. L'atténuation des menaces devrait entraîner une augmentation de la productivité de la composante d'origine naturelle du stock et une hausse de l'INP, puisque la composante d'appoint de la population diminuera au fil du temps. Les progrès réalisés vers l'atteinte des objectifs de rétablissement peuvent être évalués en fonction de l'augmentation de l'abondance et de la hausse de l'INP.

Méthode 2 : en supposant que les poissons d'écloserie présentent un risque, conformément aux lignes directrices du COSEPAC, on inclut dans l'évaluation seulement les poissons d'origine naturelle qui reviennent frayer à l'état sauvage dans le lac. Une version plus restrictive de cette approche inclurait seulement les poissons qui répondent à la définition de « sauvage » donnée dans la PSS (poisson d'origine naturelle dont les deux parents sont d'origine naturelle).

C'est l'approche que le COSEPAC a utilisée dans la plus récente évaluation, en partant de l'hypothèse que « les poissons d'élevage peuvent nuire à la population locale » (COSEPAC 2017, p. 33). Bien que simple, cette méthode ne tient pas compte des effets potentiellement négatifs des interactions génétiques avec les poissons d'écloserie. Par exemple, si l'on augmente sensiblement la taille du programme d'écloserie, il y aura plus de géniteurs d'origine naturelle, mais les risques de domestication pourraient augmenter. Ces risques peuvent être traités selon le protocole d'évaluation des menaces du COSEPAC.

5.2. ÉLÉMENT 13 : TRAJECTOIRES PRÉVUES DE LA POPULATION COMPTE TENU DES PARAMÈTRES ACTUELS DE LA DYNAMIQUE DE LA POPULATION DE SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS

On a utilisé le modèle de simulation du saumon rouge du lac Cultus (annexe 1) pour modéliser les trajectoires de la population sur trois générations (12 ans, à compter de 2019). Certaines simulations ont été menées sur six générations afin d'évaluer les résultats à long terme. Le modèle projette la population dans l'avenir en utilisant l'abondance des géniteurs et des smolts de 2015 à 2019 comme point de départ, ainsi que les lâchers existants de poissons d'écloserie. La probabilité que la dernière génération atteigne les objectifs de survie et de rétablissement est calculée à partir de 10 000 essais par simulation de Monte Carlo. Les événements de disparition (définis comme quatre années consécutives avec moins de 50 géniteurs à tout moment durant chaque simulation) sont comptabilisés, tout comme la valeur moyenne de l'INP de la dernière génération. La médiane (à l'échelle des simulations) du nombre d'adultes qui atteignent le lac au cours de la dernière génération (moyenne arithmétique des quatre dernières années) est calculée aux fins de comparaison avec la moyenne de 1 167 géniteurs (d'origine naturelle et d'écloserie) entre 2015 et 2018. Comme il est indiqué ci-dessus, les statistiques sur la population dépendent de la méthode utilisée quant aux poissons d'écloserie; les résultats des deux méthodes sont présentés.

Pour la simulation de référence, on a supposé que le programme d'écloserie avait pris fin en 2019 afin d'évaluer les tendances de la population sans apport de poissons d'écloserie. Cependant, les alevins et les smolts qui ont déjà été lâchés lors des années d'éclosion précédentes sont inclus dans les simulations. Les scénarios de statu quo de la productivité naturelle et de la mortalité par pêche actuelle sont présumés. Dans la deuxième simulation, on simule la production en écloserie comme dans la stratégie « mixte » actuelle (voir une description des stratégies de production en écloserie à la section 3.3.2). Le modèle ne simule pas les effets des futurs apports de poissons d'écloserie sur la valeur adaptative de la population; toutefois, tous les effets du programme existant seront effectivement inclus, s'ils ont contribué à une réduction de la survie.

Les résultats montrent que sans apport de poissons d'écloserie, la population est incapable de se maintenir et devrait diminuer sur la durée de la simulation (tableau 4, figure 11). Aucun des objectifs de rétablissement ne sera probablement atteint et la disparition est un résultat possible. La taille médiane de la population au cours des quatre dernières années est très faible et représente environ 10 % de la population actuelle. L'extension des projections à six générations accroît la probabilité de disparition à 0,76 à mesure que la population continue de diminuer.

Tableau 4. Prévisions du modèle de simulation pour les mesures du rendement du stock selon l'ensemble de paramètres de référence. Pour les objectifs liés à la population, la proportion de simulations dans lesquelles la dernière génération atteint chaque objectif est indiquée. Pour la disparition, la proportion de simulations au cours desquelles la population disparaît est indiquée. Pour les deux dernières mesures du rendement, la médiane (intervalle à 95 %) de la dernière génération est indiquée. Les simulations reposent sur le statu quo du taux d'exploitation et la stratégie « mixte » de production en éclosion (voir la section 3.3.2).

Mesure du rendement	Aucun apport de poissons d'éclosion	Méthode 1	Méthode 2
1. Objectif de survie (2 500)	0	0,11	0
2. Objectif de rétablissement (7 000)	0	0	0
3. Probabilité de disparition (moins de 50 géniteurs)	0,1	0	0
4. INP	1,0	0,23 (0,10 – 0,39)	0,23 (0,10 – 0,39)
5. Abondance de la dernière génération (poissons)	147 (24 – 693)	1 469 (864 – 2 919)	404 (87 – 1 424)

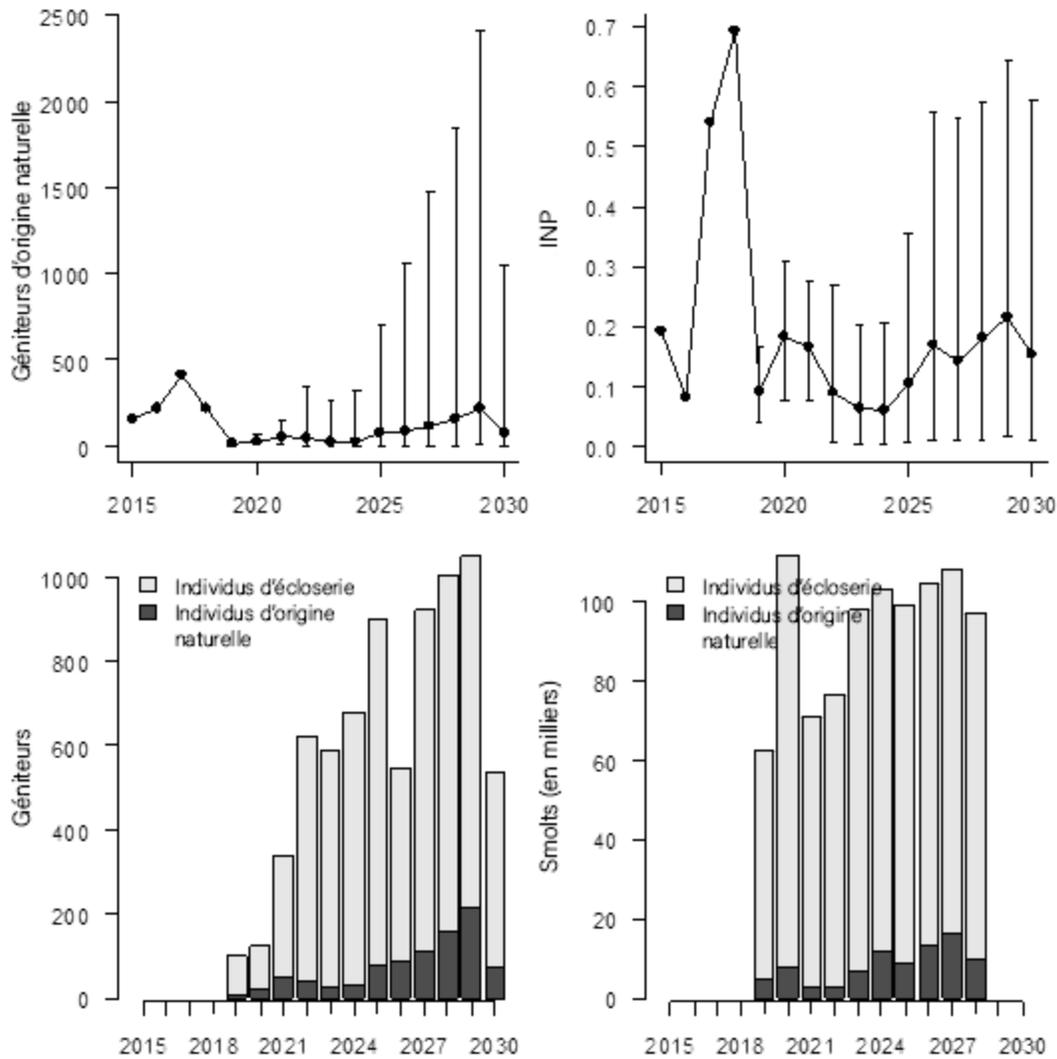


Figure 11. Résultats des simulations de référence, fondées sur la stratégie mixte de lâchers de poissons d'écluserie et un taux de mortalité par pêche fixe. Les barres d'erreur sont les intervalles de 80 % autour des médianes pour les différentes années à partir de 10 000 simulations de Monte Carlo. Les barres empilées sont les abondances médianes.

L'apport de poissons d'écluserie permet d'éviter la disparition, mais il est peu probable que la population atteigne les objectifs de survie ou de rétablissement d'ici trois générations. Il est également peu probable que la population atteigne l'un ou l'autre des objectifs après six générations, puisque la taille moyenne de la population après 24 ans n'est que de 1 680 géniteurs. Et les valeurs de l'INP restent bien en deçà du seuil de 0,72.

Le rétablissement dans la courte durée de trois générations est entravé par la séquence des très petites migrations de smolts de 2017 à 2019 (voir la figure 2) qui devraient produire des remontes de seulement quelques centaines de poissons adultes de 2019 à 2021. Cela signifie que l'abondance moyenne au cours de la première génération simulée est inférieure à celle de la période de référence, de 2015 à 2018, ce qui limite le potentiel de rétablissement pour les deux prochaines générations.

En résumé, ces simulations montrent qu'il est peu probable que la population atteigne l'objectif de survie ou de rétablissement d'ici 12 ou 24 ans aux niveaux actuels des apports de poissons d'écloserie et de la mortalité par pêche si les conditions environnementales d'origine anthropique observées récemment demeurent non atténuées. Des niveaux élevés d'apports de poissons d'écloserie dans ce scénario peuvent compromettre la valeur adaptative de la population sauvage; les changements de la valeur adaptative n'ont pas été pris en compte dans ces simulations. Si les conditions environnementales se détériorent à l'avenir, en raison des changements climatiques, de l'accroissement des répercussions d'origine anthropique ou de leurs interactions, la probabilité de survie ou de rétablissement sera par conséquent plus faible que celle prévue par le modèle.

5.3. ÉLÉMENT 14 : AVIS SUR LA MESURE DANS LAQUELLE L'HABITAT CONVENABLE DISPONIBLE RÉPOND AUX BESOINS DE LA POPULATION, TANT ACTUELLEMENT QUE LORSQUE LES OBJECTIFS DE RÉTABLISSEMENT POTENTIELS SERONT ATTEINTS

En raison des variations interannuelles de la force des années d'éclosion et de la vaste plage des profondeurs de reproduction utilisées dans le lac Cultus, il est difficile d'évaluer le caractère convenable de l'habitat dulcicole disponible pour la fraie et l'incubation. La limitation de la fraie connue aux plateformes littorales profondes à l'est du lac Cultus, par rapport à une reproduction beaucoup plus largement répartie (figure 2), implique une contraction semblable de la qualité de ces habitats pour soutenir les fonctions vitales critiques de la fraie et de l'incubation.

Cependant, les abondances de la population auxquelles ces habitats deviendront limitatifs ne sont pas claires, car il existe peu d'information sur la qualité et l'étendue actuelles de ces habitats. Théoriquement, si les facteurs atténuables de la dégradation de l'habitat lacustre sont traités (eutrophisation), les habitats de fraie et d'incubation pourraient convenir davantage à l'accomplissement de ces fonctions vitales critiques. Par le passé, le lac Cultus avait la capacité productive nécessaire pour soutenir des échappées de saumons rouges bien au-delà de 10 000 géniteurs adultes (c.-à-d. au-dessus de l'objectif de rétablissement) pendant la période précédant l'émergence des facteurs plus récents de la dégradation de l'habitat dulcicole.

Le lac Cultus a un volume de croissance important et productif, qui pourrait vraisemblablement soutenir des densités beaucoup plus fortes de saumons rouges juvéniles. À l'heure actuelle, la qualité de l'habitat sur les grands volumes de l'aire de croissance et le réseau trophique répondent aux besoins pour la survie et la croissance, mais le fait que les juvéniles demeurent près du fond du lac pendant les heures de clarté, en association étroite avec les sédiments, semble constituer une contrainte importante pour la survie en eau douce (voir l'élément 8).

Comme le rétablissement de la population dépend directement de l'amélioration de l'habitat de croissance dans le lac (oxygène dissous en profondeur, mécanismes de dégradation de l'habitat médiés par l'oxygène), la gestion des charges en éléments nutritifs améliorera sans doute simultanément l'étendue de l'habitat et la taille de la population. Comme le lac Cultus a soutenu des densités beaucoup plus élevées d'alevins pendant leur croissance, avant l'eutrophisation, il est probable, si l'on gère efficacement les éléments nutritifs et que l'oxygène en profondeur est restauré, que l'habitat disponible sera suffisant pour les futures abondances ciblées pour le rétablissement et au-delà. À l'heure actuelle, il n'existe aucune limite viable connue pour les habitats marins ou migratoires. Cependant, on ne peut exclure les changements environnementaux futurs associés aux changements climatiques et leurs interactions avec d'autres forçages de la population comme contraintes futures potentielles sur la disponibilité de l'habitat tout au long du cycle biologique du saumon rouge du lac Cultus.

5.4. ÉLÉMENT 15 : PROBABILITÉ QUE L'OBJECTIF DE RÉTABLISSMENT PROPOSÉ PUISSE ÊTRE ATTEINT SELON LES PARAMÈTRES ACTUELS DE LA DYNAMIQUE DE LA POPULATION ET COMMENT CETTE PROBABILITÉ POURRAIT VARIER SELON DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DE MORTALITÉ ET DE PRODUCTIVITÉ

Dans cette section, on examine d'autres scénarios de mortalité par pêche. Dans le scénario de référence, le taux d'exploitation (la proportion du recrutement retirée par les pêches) est fixé à 0,20, mais il est relevé à 0,50 pour les années correspondant à la lignée dominante du cycle du saumon rouge à montaison tardive dans la rivière Shuswap (tous les quatre ans à compter de 2022). Ces taux d'exploitation sont fondés sur les moyennes récentes indiquées dans le document du MPO (2018). Dans deux scénarios de recharge, le taux d'exploitation est fixé à 0 et 50 % de la base de référence, comme le suggèrent les lignes directrices sur l'évaluation du potentiel de rétablissement.

Les résultats du modèle indiquent que les taux de mortalité par pêche ont une incidence sur les taux de rétablissement, mais qu'il est peu probable que les objectifs de rétablissement proposés soient atteints dans les simulations sur trois générations, quel que soit le scénario de mortalité par pêche ou d'apport de poissons d'écloserie (tableau 5).

Tableau 5. Comparaison au moyen du modèle de simulation de trois scénarios de mortalité par pêche avec deux niveaux d'apport de poissons d'écloserie en ce qui concerne les mesures du rendement décrites à l'élément 12. La surbrillance jaune met en évidence la mesure du rendement proposée comme objectif de rétablissement (n° 2). On a utilisé la méthode 1 pour calculer le rendement.

Taux d'exploitation	Sans apport de poissons d'écloserie			Avec apport de poissons d'écloserie		
	0/0	0,1/0,25	0,2/0,5	0/0	0,1/0,25	0,2/0,5
1. Objectif de survie	0,0	0,0	0,0	0,44	0,27	0,11
2. Objectif de rétablissement	0,0	0,0	0,0	0,04	0,01	0
3. Probabilité de disparition	0,03	0,06	0,1	0	0	0
4. INP de la dernière génération	1	1	1	0,30	0,27	0,23
5. Abondance de la dernière génération	425	278	147	2 423	1 922	1 468

6. SCÉNARIOS D'ATTÉNUATION DES MENACES ET ACTIVITÉS DE RECHARGE

6.1. ÉLÉMENT 16 : MESURES D'ATTÉNUATION RÉALISABLES ET ACTIVITÉS DE RECHARGE RAISONNABLES AUX ACTIVITÉS QUI POSENT DES MENACES POUR L'ESPÈCE ET SON HABITAT

Les menaces principales et gérables indiquées dans l'élément 8 sont traitées ci-après. Les mesures d'atténuation mises en évidence visent à interrompre les effets de certaines menaces connues, mais on reconnaît que des mesures d'atténuation supplémentaires pourraient être mises en œuvre pour améliorer le rétablissement de la population. Malheureusement, en raison de l'incapacité d'atténuer certaines menaces (p. ex., le myriophylle en épi; Conseil du bassin du Fraser 2013) et du manque de connaissances sur les effets et le caractère gérable de certaines menaces émergentes (p. ex., achigan à petite bouche, une espèce envahissante), d'autres

recherches sont nécessaires pour déterminer la nature et l'ampleur de ces menaces, et si des mesures d'atténuation sont réalisables.

6.1.1. Gestion des récoltes dans les pêches

La récolte de saumons rouges adultes du lac Cultus dans les pêches ciblant des stocks mixtes du Fraser, et ailleurs pendant leur migration en mer, est considérée comme une menace principale à la persistance qui, selon les estimations, explique les pertes de 22 à 71 % des géniteurs au cours d'une année donnée. Des réductions soutenues des taux d'exploitation dans les pêches concomitantes entraîneront une augmentation de l'abondance des géniteurs en montaison, ce qui accroîtra le potentiel de reproduction de la population et réduira probablement la dépendance à l'égard des poissons d'écloserie. Combinée à la gestion des éléments nutritifs pour améliorer les conditions d'incubation et de croissance des juvéniles, la gestion des pêches selon l'*approche de précaution*, telle que décrite dans MPO (2006), est probablement une stratégie clé pour améliorer l'abondance des adultes, tandis que d'autres mesures d'atténuation sont adoptées pour renforcer la survie en eau douce.

6.1.2. Lutte contre les prédateurs dans le lac

Afin d'atténuer la mortalité dans le lac Cultus des saumons rouges juvéniles, un programme de lutte contre les prédateurs a été mis en œuvre en 2004 dans le but de réduire la population actuelle de sauvagesse du Nord. Dans les premières années du programme, de grands nombres de sauvagesses du Nord ont été retirés à l'aide d'un senneur commercial; à mesure que les captures par unité d'effort diminuaient, on a utilisé de longues lignes appâtées, puis un programme limité de pêche à la ligne par des pêcheurs récréatifs locaux. Bien qu'il semble y avoir eu une réaction positive dans la survie du stade d'alevin à celui de smolt chez les poissons d'écloserie, après les premiers efforts d'élimination des prédateurs, cette réaction a été de courte durée et le lien entre les deux est incertain, car d'autres variables entrent en ligne de compte dans la survie dans le lac du stade d'alevin à celui de smolt.

Bien que la sauvagesse du Nord soit reconnue depuis longtemps comme un prédateur des saumons juvéniles (p. ex., Brown et Moyle 1981), on a noté qu'en comparaison, les espèces d'ombles et de truites étaient plus voraces pour ce qui est du nombre d'alevins consommés par poisson dans le lac Cultus (Ricker 1941). De manière anecdotique, des pêcheurs récréatifs ont signalé une augmentation des prises de truites et d'ombles dans le lac Cultus, et il est possible que ces poissons aient prospéré dans la niche occupée jadis par la sauvagesse du Nord. La pression de prédation supplémentaire exercée par l'achigan à petite bouche, une espèce envahissante, pourrait constituer un autre facteur à considérer dans la lutte contre la prédation dans ce réseau hydrographique, et les efforts visant à endiguer l'invasion devraient être une stratégie clé pour réduire cette nouvelle prédation. Il convient de souligner que de nombreux efforts visant à contrôler l'invasion par l'achigan à petite bouche n'ont pas abouti (Loppnow *et al.* 2013). Dans certains cas, ils ont mené à une surcompensation en ciblant les adultes matures, ce qui a renforcé la population envahissante (Loppnow et Venturelli 2014). Le ciblage des jeunes de l'année peut être un moyen efficace de limiter la propagation et l'influence de l'achigan à petite bouche (Loppnow et Venturelli 2014).

L'atténuation de la mortalité des juvéniles peut bénéficier d'un programme contemporain de lutte contre les prédateurs, mais il faut tenir compte des efforts antérieurs (p. ex., effort soutenu) et du contexte des autres facteurs limitatifs en eau douce (p. ex., prédation par plusieurs espèces, dégradation de l'habitat).

6.1.3. Lutte contre l'eutrophisation du lac

L'eutrophisation des lacs est un phénomène réversible (Schindler 1974, 2012), la réduction des charges en éléments nutritifs dans les lacs permettant de rétablir la qualité de l'eau dans de nombreux contextes, des réseaux hydrographiques régionaux dans lesquels des sources locales constituent le gros des charges (p. ex., lac Washington; Edmondson et Lehman 1981) à des situations beaucoup plus complexes comportant diverses interactions paysage-atmosphère-eau et diverses administrations, comme le rétablissement des eaux libres des Grands Lacs laurentiens après l'eutrophisation des années 1970 à 1990 (Smol 2006).

L'eutrophisation résultant d'éléments nutritifs (azote et phosphore) d'origines anthropiques connues a un effet direct sur le lac Cultus (Putt *et al.* 2019; Gauthier *et al.* 2020), l'habitat essentiel du saumon rouge du lac Cultus, et constitue un obstacle majeur à la persistance de la population dans la nature, la survie en eau douce étant désormais le principal médiateur de l'abondance globale de la population. En fin de compte, le rétablissement du lac après l'eutrophisation ne peut se produire que par la réduction des charges externes en éléments nutritifs (McCrackin *et al.* 2017), en particulier en phosphore (Schindler 2012), le principal élément nutritif limitatif dans le lac Cultus (Shortreed 2007; Gauthier *et al.* 2020).

Putt et ses collaborateurs (2019) ont élaboré des modèles de bilan massique hydrologique et des éléments nutritifs pour le bassin versant du lac Cultus afin de déterminer les sources et les charges responsables de l'eutrophisation du lac, laquelle est dangereuse pour l'espèce en péril. Les principales charges locales en azote (dans le bassin versant) sont issues des contributions des eaux de surface et souterraines provenant de l'agriculture dans la vallée du Columbia, dans le sud du bassin versant (40,7 % de l'azote total), des sous-bassins versants des affluents (32 % de l'azote total) et des charges souterraines provenant du lixiviat des installations septiques (9 % de l'azote total). Les principales charges locales en phosphore sont issues des contributions des eaux de surface et souterraines de la vallée du Columbia (26,4 % du phosphore total), des sous-bassins versants des affluents (26,8 % du phosphore total), du guano produit par une population de goélands migrateurs résidents saisonniers (22,4 % du phosphore total) et du lixiviat des installations septiques (19,1 % du phosphore total).

Putt et ses collaborateurs (2019) ont utilisé le modèle de qualité de l'eau BATHTUB (Walker 1985, 1996), étalonné et validé en fonction des conditions contemporaines, pour déterminer l'état trophique du lac Cultus avant l'eutrophisation (état oligotrophe confirmé; figure 12). Le modèle a également servi à produire des prévisions de l'état stable des conditions du lac (azote total, chlorophylle-*a* [substitut de la biomasse algale] et phosphore total dans l'épilimnion), dans divers scénarios d'aménagement et d'atténuation des éléments nutritifs, d'après des prévisions éclairées par des experts multisectoriels des changements dans les sources dominantes d'éléments nutritifs dans le lac (scénarios d'aménagement futur; horizon temporel de 25 ans). De plus, on a modélisé les états actuel et futur du lac en intégrant la mise en œuvre de mesures d'atténuation réalistes dans le bassin versant (scénarios d'atténuation, maintenant et sur 25 ans), comme des réductions réalisables des charges en lixiviat des installations septiques dans le bassin versant et des intrants agricoles et le contrôle des populations aviaires (Putt *et al.* 2019).

6.1.3.1. Valeur de l'atténuation des éléments nutritifs de source locale

L'application des options d'atténuation locales (dans le bassin versant) dans les conditions actuelles et sur un horizon d'aménagement de 25 ans, a produit une réduction importante des niveaux des éléments nutritifs et de la biomasse algale dans le lac Cultus dans les deux scénarios, maintenant l'état oligo-mésotrophe actuel du lac (figure 12) et soulignant que la réduction ciblée des éléments nutritifs dans le bassin versant est efficace. Sans mesures d'atténuation, cependant, le lac Cultus devrait passer à un état mésotrophe, qui représente une

augmentation importante des symptômes de l'eutrophisation du lac (appauvrissement en oxygène, charge interne) qui constituent des menaces principales pour le saumon rouge du lac Cultus. On a commencé la planification de la gestion des déchets liquides pour le bassin versant en optant pour des niveaux d'élimination du phosphore et de l'azote supérieurs à ceux des normes municipales traditionnelles (Urban Systems 2015), ce qui devrait au moins réduire les charges futures en éléments nutritifs dans le lac Cultus provenant des nombreuses sources septiques actuelles, si les mesures sont respectées.

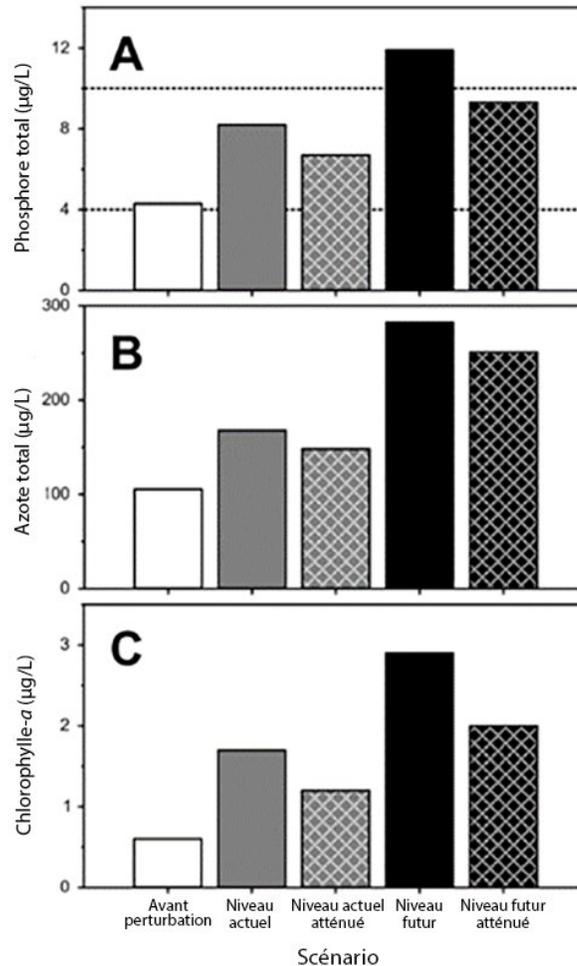


Figure 12. Résultats du modèle BATHTUB pour les conditions actuelles et futures de la qualité de l'eau dans le lac Cultus à l'état stable, avec et sans atténuation locale (dans le bassin versant) des éléments nutritifs. Carte modifiée d'après Putt et al. (2019). Le modèle a été étalonné aux conditions actuelles (barres grises), projeté rétrospectivement pour estimer les conditions de la qualité de l'eau avant les perturbations anthropiques du bassin versant et du bassin atmosphérique (barres blanches), exécuté à nouveau avec les sources locales actuelles d'éléments nutritifs atténuées, d'après les avis d'experts multisectoriels (barres grises avec hachures) et projeté prospectivement sur 25 ans pour deux scénarios d'aménagement futur, sans atténuation des éléments nutritifs (barres noires) et avec application des mesures d'atténuation locales dans le scénario actuel (barres noires avec hachures). Le phosphore total (graphique A), l'azote total (graphique B) et la chlorophylle-a (graphique C) sont des estimations modélisées à l'état stable des moyennes de la saison de croissance épilimnique. Les lignes de référence en pointillés dans le graphique A indiquent les seuils établis par le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME 2004) pour l'état trophique du réseau aquatique inféré d'après le phosphore total (ligne du bas — seuil d'ultraoligotrophie-oligotrophie [4 µg/L]; ligne du haut — seuil d'oligotrophie-mésotrophie [10 µg/L]).

6.1.3.2. Le problème principal : nécessité de cibler les charges provenant du bassin atmosphérique contaminé à l'échelle régionale

Les mesures d'atténuation à l'échelle du bassin versant sont essentielles pour résoudre le problème des charges cumulatives en éléments nutritifs dans le lac Cultus, mais le fait de se concentrer uniquement sur les apports locaux d'éléments nutritifs ne fera que retarder la trajectoire en cours de l'eutrophisation, compte tenu du contrôle dominant des dépôts d'éléments nutritifs provenant du bassin atmosphérique régional du lac et de son bassin versant (63 % de la charge en azote total; 42 % de la charge en phosphore total; Putt *et al.* 2019). Le bassin atmosphérique régional est contaminé par des sources agricoles persistantes et, dans une moindre mesure, par le transport et les charges urbaines (Environnement Canada et U.S. Environmental Protection Agency 2014; Metro Vancouver 2018; Putt *et al.* 2019). Il est donc essentiel de réduire les flux d'éléments nutritifs terrestres vers le bassin atmosphérique régional, ce qui profite à un large éventail de valeurs écologiques et sociales (*voir* Putt *et al.* 2019) et est probablement réalisable avec une coopération intersectorielle ciblée entre les administrations locales, provinciale et fédérale, les intervenants et les communautés autochtones (Putt *et al.* 2019). Un processus naissant, visant à établir des objectifs et à réaliser des réductions de ces charges atmosphériques, a été conçu et exploré, mais il serait sans doute plus fructueux avec une reconnaissance, un soutien et des ressources intergouvernementaux ciblés.

Il faut certes réduire les charges en azote dans le bassin atmosphérique régional, mais l'arrêt de l'apport atmosphérique de phosphore dans le bassin versant du lac Cultus, en limitant les émissions de phosphore dans le bassin atmosphérique régional, est le principal objectif de réduction pour faire diminuer l'eutrophisation du lac (Putt *et al.* 2019). Étant donné l'absence de phase gazeuse stable, le transport et le dépôt atmosphériques du phosphore résultent en grande partie de l'entraînement d'aérosols (Mahowald *et al.* 2008), qui pourrait être une contrainte utile à la fois pour déterminer et minimiser les émissions et réduire les dépôts régionaux de phosphore. Bien qu'il faille déterminer et quantifier toutes les sources de phosphore dans le bassin atmosphérique régional afin de cibler les priorités de réduction, l'agriculture est incontestablement le principal forçage des apports de phosphore dans la vallée du Fraser (Bittman *et al.* 2017). Putt et ses collaborateurs (2019) ont posé l'hypothèse que l'optimisation (dosage propre au sol) des quantités importantes de phosphore appliquées dans le paysage régional par l'agriculture (Bittman *et al.* 2017), conjuguée à des interruptions ciblées de l'entraînement saisonnier d'aérosols (modification des pratiques avec un labour réduit ou sans labour, réduction de l'exposition de sol nu, réductions des épandages de fumier liquide, réductions des bioaérosols des sorties d'air des poulaillers) pourrait abaisser considérablement la charge en phosphore dans le bassin atmosphérique régional et les écosystèmes aquatiques récepteurs. Une approche de gestion intégrée des éléments nutritifs du paysage au bassin atmosphérique, incluant les intervenants, les administrations et les communautés autochtones, ainsi que leurs valeurs individuelles et communes, sera essentielle pour réduire les dépôts de phosphore provenant du bassin atmosphérique et arrêter ou inverser les tendances à l'eutrophisation du lac Cultus et dans toute la région. Si rien n'est fait, cela aura probablement des répercussions importantes sur les valeurs culturelles et socio-économiques, les services écosystémiques tirés du lac et l'espèce en péril.

6.1.3.3. Mesures provisoires

Pendant la planification et la mise en œuvre des réductions à grande échelle des éléments nutritifs, d'autres mesures d'atténuation provisoires peuvent être utiles pour améliorer les niveaux d'éléments nutritifs, l'appauvrissement en oxygène de l'hypolimnion et la charge interne du lac, afin de soutenir le saumon rouge du lac Cultus et l'autre espèce en péril dans le lac (chabot côtier, population du lac Cultus, *menacée*, annexe 1 de la LEP). L'oxygénation

hypolimnique pendant la période avec stratification, obtenue par l'aération ou des injections d'oxygène liquide, est un moyen fiable d'améliorer la qualité de l'eau dans les lacs de la Colombie-Britannique qui subissent un appauvrissement en oxygène lié aux éléments nutritifs (Nordin et McKean 1982; Ashley et Nordin 1999; Ashley 2000; Ashley 2008). De telles approches sont probablement efficaces pour améliorer les conditions hypolimniques du lac Cultus, mais elles doivent être modélisées, planifiées et mises en œuvre pour le site. Un certain nombre de plans de série existent et sont mis au point localement et régionalement (Ashley 2000). D'autres options plus invasives, telles que la déstratification manuelle, l'inactivation du phosphore par l'ajout de produits chimiques, les ajouts bactériens, les algicides et le retrait hypolimnique, sont également possibles et certaines combinaisons pourraient être efficaces pour interrompre la charge interne et améliorer les conditions saisonnières d'oxygène en eaux profondes (Ashley 2008). Toutefois, toute intervention appliquée pour améliorer la qualité de l'eau du lac Cultus en vue de soutenir les espèces en péril qui y vivent comporte des incertitudes et des risques, et doit être soigneusement conçue, modélisée et évaluée avant d'être mise en œuvre.

6.2. ÉLÉMENT 17 : ACTIVITÉS SUSCEPTIBLES D'ACCROÎTRE LA PRODUCTIVITÉ OU LES PARAMÈTRES DE SURVIE

6.2.1. Apports de poissons d'écloserie

Comme mesure provisoire dans le processus de rétablissement, les lâchers de poissons d'écloserie peuvent accroître l'abondance des géniteurs adultes en montaison en améliorant la survie pendant la phase en eau douce du cycle biologique. En consultation avec le personnel du Programme de mise en valeur des salmonidés, trois scénarios de rechange pour le lâcher de poissons d'écloserie ont été élaborés, en fonction de la capacité de l'infrastructure existante. Ces scénarios comprenaient des lâchers de smolts exclusivement, de tacons exclusivement et un lâcher mixte de ces deux stades biologiques, ce dernier constituant la stratégie type des dernières années (tableau 6). La proportion d'individus de chacun des stades biologiques dans ces lâchers a varié au fil du temps, en fonction de la disponibilité des lignées et du succès relatif d'une stratégie par rapport aux autres. L'information sur les lâchers d'une année à l'autre est disponible auprès du Programme de mise en valeur des salmonidés du MPO (données inédites). Le rendement des stratégies de lâcher de poissons d'écloserie présentées dans le tableau 6 a été comparé à l'aide du modèle. Ces scénarios ont été envisagés comme des programmes traditionnels d'écloserie (pas un programme d'élevage en captivité) fondés sur les principes de la production intégrée en écloserie. Bien que dans l'histoire récente de la mise en valeur de cette population depuis 2000, l'élevage en captivité ait été utilisé jusqu'en 2013, il est considéré comme une mesure à court terme visant à minimiser le risque de disparition en raison de l'incertitude associée aux répercussions sur la valeur adaptative à long terme (Fleming 1994; Araki *et al.* 2007). L'adaptation aux caractéristiques locales par l'exposition naturelle à l'environnement est en fin de compte nécessaire pour améliorer l'adaptation locale et la valeur adaptative permettant le succès aux stades biologiques suivants (Kline et Flagg 2014).

On a supposé que le stock de géniteurs de l'écloserie serait capturé de façon non sélective (en ce qui concerne les géniteurs d'origine naturelle ou d'écloserie) et que 50 % au maximum des adultes en montaison une année donnée seraient utilisés pour le stock de géniteurs, jusqu'à concurrence du maximum indiqué dans le tableau 6. Le choix de 50 % du stock de géniteurs repose à la fois sur des contraintes logistiques, car il est difficile de retenir tous les poissons qui reviennent dans le lac, et sur des considérations biologiques fondées sur la nécessité d'exposer certains poissons à la sélection naturelle afin de réduire les effets de la domestication. Comme il a été mentionné plus tôt, le modèle suppose qu'il n'y aura pas de perte supplémentaire de la

valeur adaptative de la population au-delà de celle qui peut déjà s'être produite à la suite des apports continus de poissons d'écloserie.

La survie simulée des adultes, des œufs et des juvéniles dans l'écloserie reposait sur des valeurs récentes, et on a utilisé des données récentes sur la survie des tacons et des smolts pour projeter les remontes prévues des adultes à la suite de ces lâchers.

Tableau 6. Les quatre stratégies de lâcher de poissons d'écloserie évaluées au moyen du modèle de simulation. Les estimations du stock de géniteurs cible sont le nombre de géniteurs adultes requis pour atteindre les objectifs de lâcher. Les années où les remontes sont plus faibles, la règle de ne pas conserver plus de 50 % de la remonte est imposée et les lâchers de juvéniles sont proportionnellement plus petits. Pour la stratégie mixte, les lâchers de smolts sont priorisés par rapport aux lâchers de tacons, lorsque le stock de géniteurs est inférieur à l'objectif.

Stratégie	Poissons lâchés	Stock de géniteurs cible (des deux sexes)
Aucune	0	0
Smolts	87 500 smolts d'âge 1	68
Tacons	250 000 tacons d'hiver	202
Mixte	50 000 smolts + 150 000 tacons d'hiver	180

6.2.2. Gestion du taux d'exploitation

À partir des résultats de l'élément 15, trois scénarios de gestion du taux d'exploitation ont été envisagés : le statu quo (fondé sur les moyennes récentes), une réduction de 50 % et une cessation complète de la mortalité par pêche.

6.2.3. Atténuation de la faible survie en eau douce

La faible production de smolts par les géniteurs dans le lac est l'un des principaux facteurs qui contribuent à la faible probabilité de rétablissement de la population. En particulier, les valeurs inférieures à 10 pour le ratio smolts/géniteur, fréquentes ces dernières années (figure 4), contrastent avec les conditions historiques, où la valeur extrême la plus faible était de 16 smolts/géniteur. Compte tenu de l'atténuation des facteurs à l'origine de la faible production de smolts (p. ex., eutrophisation du lac, hypoxie/anoxie en eaux profondes), la production naturelle moyenne du lac devrait pouvoir augmenter et le potentiel de rétablissement pourrait être considérablement plus élevé.

Il y a de nombreuses façons de modéliser l'atténuation de la faible productivité. On a choisi de mettre en œuvre une limite inférieure du ratio smolts/géniteur qui augmentait de façon linéaire la valeur actuelle de 1 jusqu'à une valeur de 20 (proche de la valeur du 5^e centile de la série de données historiques) sur une période fixe. Il s'agit d'une approche générique qui pourrait représenter les résultats de divers efforts d'atténuation.

Pour chaque année de la simulation, la sélection aléatoire de la valeur du ratio smolts/géniteur a été limitée aux années de la récente série chronologique sur la production naturelle de 1999 à 2017, où la valeur observée de ce ratio était supérieure à la limite inférieure (ligne de la figure 13) pour l'année en question. Cette approche a maintenu la variabilité naturelle de la production de smolts tout en réduisant, au fil du temps, l'incidence des valeurs très faibles qui limitent le rétablissement de la population.

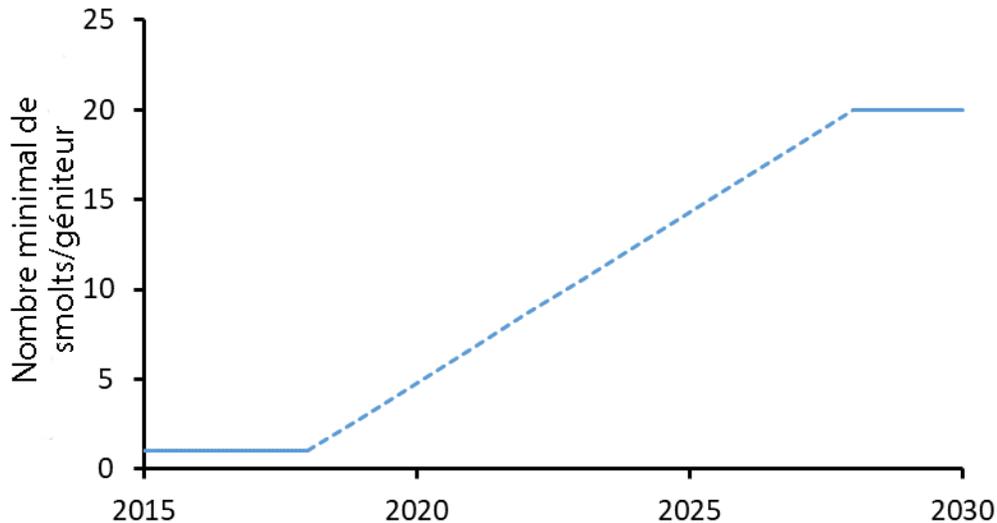


Figure 13. Entrées du modèle du ratio smolts/géniteur minimum dans le lac pour simuler les futures mesures d'atténuation liée à la production en eau douce. On a simulé une augmentation du ratio smolts/géniteur minimum sur une période de 10 ans, à partir des valeurs minimales actuelles observées, jusqu'à une valeur semblable à celle observée dans l'ensemble de données historiques, représentée par la ligne pointillée. Cela a graduellement réduit la présence de valeurs très faibles du ratio smolts/géniteur.

6.3. ÉLÉMENT 18 : SI LA DISPONIBILITÉ ACTUELLE DE L'HABITAT EST INSUFFISANTE POUR L'ATTEINTE DES OBJECTIFS DE RÉTABLISSEMENT (VOIR L'ÉLÉMENT 14), PRÉSENTER UN AVIS SUR LA FAISABILITÉ DE RESTAURER L'HABITAT SELON DES VALEURS PLUS ÉLEVÉES. L'AVIS DOIT ÊTRE PRÉSENTÉ DANS LE CONTEXTE DE TOUTES LES OPTIONS POSSIBLES POUR ATTEINDRE LES OBJECTIFS EN MATIÈRE D'ABONDANCE ET DE RÉPARTITION.

L'eutrophisation et les effets additifs des changements climatiques sont responsables de la dégradation des habitats en eaux profondes dans le lac Cultus, qui a probablement des répercussions sur la fraie, l'incubation et la croissance en eau douce. L'appauvrissement en oxygène de l'hypolimnion et l'appauvrissement grave en oxygène des eaux profondes, qui se produisent maintenant de façon saisonnière dans le lac Cultus (voir l'élément 8), constituent une menace importante pour la persistance. Comme indiqué dans les éléments 8 et 14, l'inversion de l'eutrophisation du lac par la réduction des éléments nutritifs et d'autres moyens améliorera probablement les habitats de croissance, d'incubation et de fraie et favorisera une plus grande abondance de la population. L'eutrophisation est l'un des problèmes environnementaux les plus faciles à résoudre, même lorsque les charges sont complexes et relèvent de plusieurs administrations (Grands Lacs laurentiens). Le rétablissement de la qualité de l'habitat est donc très faisable, à condition qu'il soit ciblé, et permettra probablement de répondre aux exigences des futurs objectifs en matière d'abondance.

6.4. ÉLÉMENT 19 : ESTIMER LA DIMINUTION ATTENDUE DU TAUX DE MORTALITÉ DÉCOULANT DES MESURES D'ATTÉNUATION ET ACTIVITÉS DE RECHANGE ÉNUMÉRÉES DANS L'ÉLÉMENT 16, AINSI QUE

L'AUGMENTATION DE LA PRODUCTIVITÉ OU DE LA SURVIE ASSOCIÉE AUX MESURES INDIQUÉES DANS L'ÉLÉMENT 17.

Les changements de la mortalité et les effets connexes sur la productivité de la population, associés à la production en écloserie et à la gestion de la mortalité par pêche présentées dans l'élément 18, sont estimés dans le modèle de simulation et décrits dans l'élément 20.

Pour les mesures d'atténuation visant à accroître la production de smolts, une stratégie générique unique a été élaborée (figure 4), qui est utilisée dans le modèle de simulation (élément 20) afin d'évaluer la possibilité que l'augmentation de la production de smolts ait une incidence sur le rétablissement. Il n'est actuellement pas possible d'élaborer des estimations quantitatives plus explicites des effets des mesures d'atténuation sur la mortalité ou la productivité de la population.

6.5. ÉLÉMENT 20 : PROJETER LA TRAJECTOIRE ATTENDUE DE LA POPULATION (ET LES INCERTITUDES) SUR UNE PÉRIODE RAISONNABLE DU POINT DE VUE SCIENTIFIQUE ET JUSQU'À L'ATTEINTE DES OBJECTIFS DE RÉTABLISSEMENT, EN FONCTION DES TAUX DE MORTALITÉ ET DES TAUX DE PRODUCTIVITÉ EN RAPPORT AVEC LES MESURES PARTICULIÈRES AUX FINS D'EXAMEN ÉNONCÉES DANS L'ÉLÉMENT 19.

On a tout d'abord comparé les quatre stratégies de lâcher de poissons d'écloserie, puis on en a choisi une et modélisé les effets interactifs des apports, de l'atténuation de la dégradation de l'habitat et de la gestion du taux d'exploitation sur la probabilité d'atteindre les objectifs de rétablissement.

6.5.1. Apports de poissons d'écloserie

Les effets relatifs des quatre stratégies de lâcher de poissons d'écloserie proposées ont été évalués à l'aide du modèle, et tous les autres paramètres ont été fixés aux conditions de référence. Les résultats montrent que toutes les stratégies peuvent augmenter considérablement le nombre de géniteurs qui retournent dans le lac (tableau 7). La stratégie consistant à lâcher uniquement des smolts a donné les résultats les plus faibles, en raison de leur faible survie. La stratégie mixte et la stratégie consistant à lâcher uniquement des tacons ont produit des résultats semblables.

Bien que les lâchers de poissons d'écloserie puissent accroître l'abondance, la population n'atteindra aucun des objectifs de rétablissement dans les conditions de référence. La faible valeur de l'INP indique que la population est dominée par les poissons d'écloserie.

On a choisi la *stratégie mixte* comme scénario privilégié de lâcher de poissons d'écloserie pour les simulations suivantes, car elle combinait les avantages de l'augmentation des remontes et une approche d'étalement des risques (résilience à la perte catastrophique d'individus lors de tous les premiers stades biologiques).

Tableau 7. Comparaison des résultats du modèle de simulation pour la mise en œuvre des quatre scénarios de lâcher de poissons d'écloserie décrits dans le tableau 6. Les autres paramètres ont été fixés aux valeurs de référence; l'exploitation suit la tendance récente (0,2/0,5).

Résultat du modèle	Stratégie de lâcher de poissons d'écloserie			
	Aucune	Tacons	Smolts	Mixte
Objectif de survie	0	0,11	0,01	0,11
Objectif de rétablissement	0	0,01	0	0
P(disparition)	0,10	0	0	0
INP	1,0	0,20	0,33	0,23
Géniteurs de la dernière génération	147	1 534	935	1 469

Dans une deuxième série de simulations, on a inclus les effets de l'atténuation de la faible production en eau douce. On a tenu compte de l'atténuation en eau douce conjointement avec la stratégie mixte et d'autres scénarios de taux d'exploitation, et on a comparé les méthodes 1 et 2 quant aux poissons d'écloserie dans le cadre de l'évaluation (tableaux 8 et 9).

Les résultats ont montré que la probabilité d'atteindre l'objectif de *rétablissement* en trois générations était très faible dans toutes les combinaisons de mesures d'atténuation ou de gestion. Cependant, une probabilité relativement élevée d'atteindre l'objectif de *survie* était possible si toutes les mesures d'atténuation et de gestion étaient mises en œuvre avec succès à l'aide de la méthode 1 pour l'évaluation.

La simulation sur six générations montre que les mesures d'atténuation et de gestion peuvent créer des conditions propices à la croissance de la population, et le modèle prévoit que l'objectif de rétablissement peut être atteint, tant sur le plan de l'abondance que sur celui de l'INP (figure 14). La probabilité d'atteindre les objectifs de survie et de rétablissement après six générations (méthode 1) est de 0,97 et 0,66 respectivement, avec une valeur médiane de l'INP de 0,74. Ces résultats sont fondés sur le taux d'exploitation de 0,1/0,25, qui représente une réduction de 50 % de la mortalité par pêche par rapport aux moyennes récentes.

Les résultats du modèle indiquent également que le programme d'écloserie actuel est correctement dimensionné pour que les valeurs de l'INP augmentent jusqu'à la fourchette cible à mesure que la population augmente jusqu'à l'objectif de rétablissement. Cependant, si l'atténuation de la dégradation l'habitat peut être réalisée, on pourra probablement réduire ou éliminer le programme d'écloserie à mesure que la population augmentera sous l'effet de la production naturelle.

Tableau 8. Résultats probabilistes du modèle de simulation pour l'atteinte des objectifs de survie et de rétablissement en trois générations, en fonction de trois mesures d'atténuation possibles : les apports de poissons d'écloserie, la restauration de l'habitat et la gestion du taux d'exploitation. La probabilité d'atteindre l'objectif à la troisième génération, avec la valeur correspondante de l'INP, est indiquée. Les mesures du rendement sont fondées sur la méthode 1, c'est-à-dire utiliser tous les poissons qui retournent dans le lac.

Écloserie	Habitat	Exploitation	Mesure du rendement (dernière génération)		
			Survie (2 500)	Rétablissement (7 000)	INP
Aucune	Non	0/0	0	0	1,0
		0,1/0,25	0	0	1,0
		0,2/0,5	0	0	1,0
	Oui	0/0	0,02	0,01	1,0
		0,1/0,25	0	0	1,0
		0,2/0,5	0	0	1,0
Mixte	Non	0/0	0,44	0,04	0,30
		0,1/0,25	0,27	0,01	0,27
		0,2/0,5	0,11	0	0,23
	Oui	0/0	0,83	0,12	0,52
		0,1/0,25	0,67	0,03	0,47
		0,2/0,5	0,36	0,01	0,41

Tableau 9. Résultats probabilistes du modèle de simulation pour l'atteinte des objectifs de survie et de rétablissement en trois générations, en fonction de trois mesures d'atténuation possibles : les apports de poissons d'écloserie, la restauration de l'habitat et la gestion du taux d'exploitation. La probabilité d'atteindre l'objectif à la troisième génération, avec la valeur correspondante de l'INP, est indiquée. Les mesures du rendement sont fondées sur la méthode 2, c'est-à-dire n'utiliser que les poissons d'origine naturelle.

Écloserie	Habitat	Exploitation	Mesure du rendement (dernière génération)		
			Survie (2 500)	Rétablissement (7 000)	INP
Aucune	Non	0/0	0	0	1,0
		0,1/0,25	0	0	1,0
		0,2/0,5	0	0	1,0
	Oui	0/0	0,02	0,01	1,0
		0,1/0,25	0	0	1,0
		0,2/0,5	0	0	1,0
Mixte	Non	0/0	0,02	0,03	0,30
		0,1/0,25	0,01	0	0,27
		0,2/0,5	0	0	0,23
	Oui	0/0	0,18	0,03	0,52
		0,1/0,25	0,08	0,01	0,47
		0,2/0,5	0,01	0	0,41

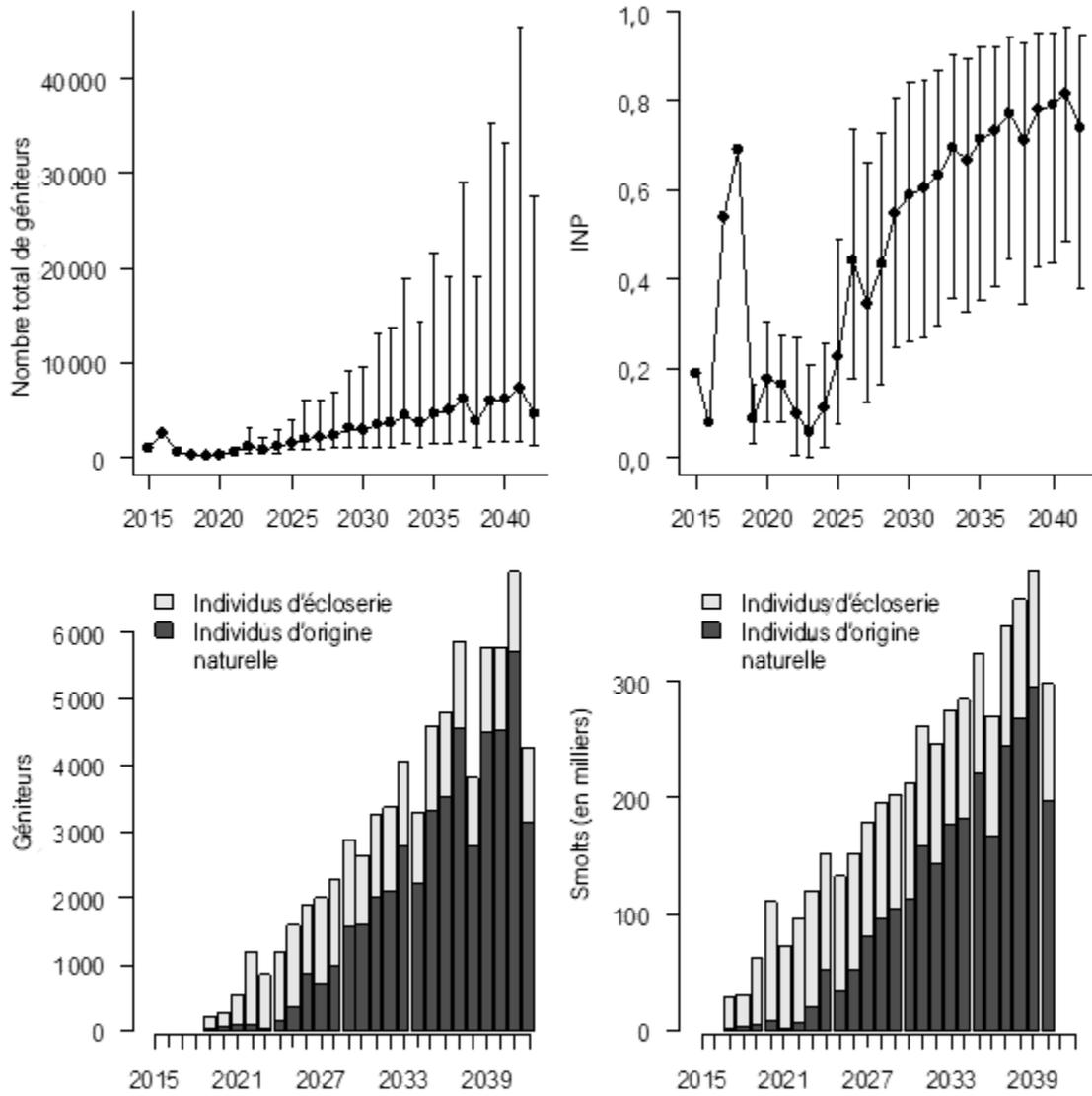


Figure 14. Projections du modèle de simulation sur six générations avec les scénarios de l'apport de poissons d'écloserie, de l'atténuation réussie de la dégradation de l'habitat et du taux d'exploitation de 0,1/0,25.

6.6. ÉLÉMENT 21 : RECOMMANDATIONS DE VALEURS DES PARAMÈTRES POUR LA PRODUCTIVITÉ DE LA POPULATION ET LES TAUX DE MORTALITÉ DE DÉPART, ET DE CARACTÉRISTIQUES PARTICULIÈRES DU MODÈLE DE POPULATION

Aucun paramètre supplémentaire n'est fourni pour le moment. Il faudra modifier les taux vitaux découlant des mesures d'atténuation pour explorer d'autres scénarios, par exemple des données supplémentaires provenant de stratégies de recharge pour le programme d'écloserie et les effets des mesures d'atténuation de la dégradation de l'habitat sur les taux de survie dans le lac. Une modélisation supplémentaire pourrait être effectuée si les taux d'exploitation étaient estimés par des moyens plus précis ou si des changements apportés aux habitudes ou aux méthodes de pêche entraînaient des changements de la mortalité par pêche.

7. ÉVALUATION DES DOMMAGES ADMISSIBLES

7.1. ÉLÉMENT 22 : ÉVALUATION DU TAUX MAXIMAL DE MORTALITÉ ET DE DESTRUCTION DE L'HABITAT D'ORIGINE ANTHROPIQUE QUE L'ESPÈCE PEUT SOUTENIR SANS RISQUE POUR SA SURVIE OU SON RÉTABLISSEMENT

Toutes les sources de dommages devraient être réduites autant que possible. Comme lors des précédentes évaluations du potentiel de rétablissement, il n'y a pas de disposition relative aux dommages admissibles lorsque la population est en déclin ou que l'on prévoit un taux de croissance intrinsèque négatif (p. ex., Young et Koops 2011). La modélisation montre que la population de saumon rouge du lac Cultus diminuera en l'absence d'apports de poissons d'écloserie, même lorsque la mortalité par pêche est éliminée, compte tenu des conditions de survie actuelles dans le lac. Par conséquent, de ce point de vue, aucun dommage n'est admissible pour la population sauvage, et de tels dommages ne devraient être envisagés que dans des cas limités, lorsque le taux de croissance intrinsèque de la population est positif, que ces influences peuvent être maintenues et que la persistance n'est pas compromise.

Les apports de poissons d'écloserie peuvent maintenir une petite population de saumon rouge du lac Cultus, composée principalement de poissons d'écloserie, dans les divers scénarios de mortalité par pêche, mais la survie ou le rétablissement de la population sauvage sont peu probables sans des mesures supplémentaires. La grande proportion de poissons d'écloserie (et les faibles valeurs correspondantes de l'INP) est incompatible avec les lignes directrices du COSEPAC sur les apports de poissons d'écloserie et pourrait entraîner l'exclusion des poissons d'écloserie des futures évaluations de la situation. Dans ces circonstances, la population continuera d'être évaluée comme étant en voie de disparition ou pourrait disparaître à l'état sauvage, après avoir été remplacée de fait par une population d'écloserie. Ainsi, on pourrait considérer que la compensation des effets de la mortalité d'origine anthropique par des apports de poissons d'écloserie met en péril la survie ou le rétablissement de la population à l'état sauvage.

Un certain niveau de mortalité d'origine anthropique limitée peut être autorisé si les mesures visant à relever la production de smolts d'origine naturelle jusqu'aux niveaux observés par le passé sont fructueuses. Un tel taux de mortalité (attribuable à la pêche ou aux répercussions sur l'habitat) ralentirait le taux de rétablissement, mais il est possible qu'un taux de croissance positif de la population soit maintenu. Il n'est pas possible de quantifier le niveau de mortalité parce qu'on ignore l'efficacité des mesures d'atténuation.

8. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier tous ceux qui ont travaillé à comprendre et à conserver le saumon rouge du lac Cultus et son habitat au cours du dernier siècle. Ils remercient en particulier les membres de l'Équipe de conservation du saumon rouge du lac Cultus (l'ancienne Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus), passés et présents, ainsi que W.E. Ricker (décédé) et Ken Shortreed (décédé), pour leurs contributions à la compréhension des interactions entre le lac Cultus et sa population de saumon rouge.

9. RÉFÉRENCES CITÉES

- Abdul-Aziz, O.I., Mantua, N.J., and Myers, K.W. 2011. Potential climate change impacts on thermal habitats of Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.) in the North Pacific Ocean and adjacent seas. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 68: 1660-1680.
- Ackerman, P.A., Barnetson, S., Lofthouse, D., McClean, C., Stobbart, A., and Withler, R.E. 2014. Back from the brink: the Cultus Lake Sockeye Salmon enhancement program from 2000–2014. *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences*. 3032.
- Adrian, R., O'Reilly, C.M., Zagarese, H., Baines, S.B., Hessen, D.O., Keller, W., Livingstone, D.M., Sommaruga, R., Straile, D., Van Donk, E., Weyhenmeyer, G.A., and Winder, M. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography* 54: 2283-2297.
- Allendorf, F.W., England, P.R., Luikart, G., Ritchie, P.A., and Ryman, N. 2008. Genetic effects of harvest on wild animal populations. *Trends in Ecology and Evolution*. 23: 327-337.
- Akbarzadeh, A., Selbie, D.T., Pon, L.B., and Miller, K.M. 2021. Endangered Cultus Lake sockeye salmon exhibit genomic evidence of hypoxic and thermal stresses while rearing in degrading freshwater lacustrine critical habitat. *Conservation Physiology*. 9: coab089.
- Allendorf, F.W., and Hard, J.J. 2009. Human-induced evolution caused by unnatural selection through harvest of wild animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 106: 9987-9994.
- Allendorf, F.W., England, P.R., Luikart, G., Ritchie, P.A., and Ryman, N. 2008. Genetic effects of harvest on wild animal populations. *Trends in ecology & evolution*, 23: 327-337.
- Araki, H., Cooper, B., and Blouin, M.S. 2007. Genetic effects of captive breeding cause a rapid, cumulative fitness decline in the wild. *Science*. 318: 100-103.
- Ashley, K.I. 2000. Recent advances in hypolimnetic aeration design. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*. 27: 2256-2260.
- Ashley, K.I. 2008. Review of St. Mary Lake Restoration Options. Report prepared for the British Columbia Ministry of Environment. 43 pp.
- Ashley, K.I., and Nordin, R. 1999. Lake aeration in British Columbia: Applications and experiences. pp. 87-108 *In* T. Murphy and M. Munawar (eds.), *Aquatic Restoration in Canada*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Aydin, K.Y., Myers, K.W., and Walker, R.V. 2000. Variation in summer distribution of the prey of Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.) in the offshore Gulf of Alaska in relation to oceanographic conditions, 1994–98. pp. 43-54 *in* Helle, J. (ed), *Recent changes in ocean production of Pacific salmon*, *Bulletin of the North Pacific Anadromous Fish Commission* Vol. 2.

-
- Bailey, R.E., and Margolis, L. 1987. Comparison of parasite fauna of juvenile sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) from southern British Columbia and Washington State lakes. *Canadian Journal of Zoology*. 65:420-431.
- Beacham, T.D., and Withler, R.E. 2017. Population structure of sea-type and lake-type sockeye salmon and kokanee in the Fraser River and Columbia River drainages. *PLOS One*. 12(9): e0183713.
- Beamish, R.J., and Bouillon, D.R. 1993. Pacific salmon production trends in relation to climate. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 50: 1002-1016.
- Beamish, R.J., and Neville, C.M. 2001. Predation-based mortality on juvenile salmon in the Strait of Georgia. *The North Pacific Anadromous Fish Commission Technical Report*. 2: 11-12.
- Bittman, S., Sheppard, S.C., Poon, D., and Hunt, D.E. 2017. Phosphorus flows in a peri-urban region with intensive food production: A case study. *Journal of Environmental Management*. 187: 286-297.
- Bradford, M.J., Lovy, J., Patterson, D.A., Speare, D.J., Bennett, W.R., Stobbart, A.R., and Tovey, C.P. 2010. *Parvicapsula minibicornis* infections in gill and kidney and the premature mortality of adult sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) from Cultus Lake, British Columbia. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 67: 673-683.
- Brannon, E.L. 1987. Mechanisms stabilizing salmonid fry emergence timing. Pages 120-144 in H.D. Smith, L. Margolis, and C.C. Wood (eds.). *Sockeye salmon (Oncorhynchus nerka) population biology and future management*. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences. 96.
- Brett, J.R. 1952. Temperature tolerance in young Pacific salmon, genus *Oncorhynchus*. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 9: 265-323.
- Brett, J.R., and Higgs, D.A. 1970. Effect of temperature on the rate of gastric digestion in fingerling sockeye salmon, *Oncorhynchus nerka*. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 27: 1767-1779.
- British Columbia Ministry of Environment. 2016. Indicators of climate change for British Columbia. 2016 Update. 57pp.
- Brodeur, R.D., Myers, K.W., and Helle, J.H. 2003. Research conducted by the United States on the early ocean life history of Pacific salmon. *North Pacific Anadromous Fish Commission Bulletin*. 3: 89-132.
- Brown, L.R., and Moyle, P.B. 1981. The impact of squawfish on salmonid populations: a review. *North American Journal of Fisheries Management*. 1: 104-111.
- Burgner, R.L. 1991. Life history of Sockeye Salmon (*Oncorhynchus nerka*). pp. 1-118. In C. Groot and L. Margolis (eds.) *Pacific Salmon Life Histories*. UBC Press. Vancouver, BC.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). 2004. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: Phosphorus: Canadian guidance framework for the management of freshwater systems. In *Canadian environmental quality guidelines, 2004*, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg. 6pp.
- Carey, M.P., Sanderson, B.L., Friesen, T.A., Barnas, K.A., and Olden, J.D. 2011. Smallmouth Bass in the Pacific Northwest: A threat to native species; a benefit for anglers. *Reviews in Fisheries Science*. 19: 305-315.

-
- Chambers, P.A., Guy, M., Roberts, E.S., Charlton, M.N., Kent, R., Gagnon, C., Grove, G., and Foster, N. 2001. Nutrients and their impact on the Canadian environment. Agriculture and Agri-food Canada, Environment Canada, Fisheries and Oceans Canada, Health Canada, and Natural Resources Canada. 241pp.
- Chilliwack Progress. 1957. Chilliwack Museum and Archives. December 11, 1957.
- Chittenden, C.M., Biagi, C.A., Davidsen, J.G., Davidsen, A.G., Kondo, H., McKnight, A., Pedersen, O., Raven, P.A., Rikardsen, A.H., Shrimpton, M.J., Zuehlke, B., McKinley, R.S., and Devlin, R.H. 2010. [Genetic versus Rearing-Environment Effects on Phenotype: Hatchery and Natural Rearing Effects on Hatchery- and Wild-Born Coho Salmon](#). PLoS ONE 5(8): e12261.
- Christensen, V., and Trites, A.W. 2011. Predation on Fraser River sockeye salmon. Cohen Commission Tech. Rept. 8. 129pp. Vancouver, B.C.
- Clark, C.W., and Levy, D.A. 1988. Diel vertical migrations by juvenile Sockeye Salmon and the antipredation window. *The American Naturalist*. 131: 271-290.
- Cline, T.J., Ohlberger, J., and Schindler, D.E. 2019. Effects of warming climate and competition in the ocean for life-histories of Pacific salmon. *Nature Ecology and Evolution*. 3: 935-942.
- Colby, P.J., Spangler, G.R., Hurley, A.I., and McCombie, A.M. 1972. Effects of eutrophication on salmonid communities in oligotrophic lakes. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 29: 975-983.
- Cohen, B.I. 2012. The uncertain future of Fraser River Sockeye. Final Report. Cohen Commission of Inquiry into the Decline of Sockeye Salmon in the Fraser River. 722pp.
- Coleman, F.C., and Williams, S.L. 2002. Overexploiting marine ecosystem engineers: potential consequences for biodiversity. *Trends in Ecology and Evolution*. 17: 40-44.
- Connors, B., Malick, M.J., Ruggerone, G.T., Rand, P., Adkison, M., Irvine, J.R., Campbell, R., and Gorman, K. 2020. Climate and competition influence sockeye salmon population dynamics across the Northeast Pacific Ocean. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 77: 943-949.
- Cooke, S.J., Hinch, S.G., Farrell, A.P., Lapointe, M.F., Jones, S.R.M., Macdonald, J.S., Patterson, D.A., Healey, M.C., and van der Kraak, G. 2004. Abnormal migration timing and high enroute mortality of sockeye salmon in the Fraser River, British Columbia. *Fisheries*. 29: 22-33.
- COSEPAC. 2003. [Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur le saumon sockeye \(saumon rouge\) *Oncorhynchus nerka* \(population Cultus\) au Canada](#). Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. Ottawa. ix + 61 p.
- COSEPAC. 2010. [Lignes directrices du COSEPAC concernant les espèces sauvages manipulées](#).
- COSEPAC. 2017. [Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur le saumon rouge \(*Oncorhynchus nerka*\), 24 unités désignables dans le bassin versant du fleuve Fraser, au Canada](#). Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. Ottawa. li + 201 p.
- Costella, A.C., Nidle, B., and Shortreed, K.S. 1983. Limnological results from the 1982 British Columbia Lake Enrichment Program. *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1706. 227pp.
- Coumou, D., and Rahmstorf, S. 2012. A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*. 2: 491-496.
-

-
- Cox, S.P., and Hinch, S.G. 1997. Changes in size at maturity of Fraser River sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) (1952–1993) and associations with temperature. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 54: 1159-1165.
- Cramer, F.H. 2005. *The Valley Beyond: A History of Columbia Valley & Lindell Beach*, Columbia Valley Ratepayers Association. 128p.
- Crossin, G.T., Hinch, S.G., Cooke, S.J., Welch, D.W., Patterson, D.A., Jones, S.R.M., Lotto, A.G., Leggatt, R.A., Mathes, M.T., Shrimpton, J.M., Van der Kraak, G., and Farrell, A.P. 2008. Exposure to high temperature influences the behaviour, physiology, and survival of sockeye salmon during spawning migration. *Canadian Journal of Zoology*. 86: 127-140.
- Cultus Lake Sockeye Salmon Recovery Team (CSRT) 2009. National conservation strategy for Cultus Lake sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences. 2846: viii + 46 p.
- Delcan Corporation (Delcan). 2012. Cultus Lake Traffic and Transportation Study. SW1193SWA. Vancouver, BC.
- DFO. 2005. [Canada's policy for conservation of wild Pacific salmon](#). Fisheries and Oceans Canada. 57pp.
- DFO. 2013. [A Biological Risk Management Framework for Enhancing Salmon in the Pacific Region](#). Salmonid Enhancement Program, Fisheries and Oceans Canada, Pacific Region.
- DFO. 2019a. [Integrated Fisheries management Plan June 1, 2019 – May 31, 2020](#). 561pp.
- Di Lorenzo, E., Schneider, N., Cobb, K.M., Chhak, K., Franks, P.J.S., Miller, A.J., McWilliams, J.C., Bograd, S.J., Arango, H., Curchister, E., Powell, T.M., and Rivere, P. 2008. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophysical Research Letters*. 35: L08607.
- Dittman, A.H., and Quinn, T.P. 1996. Homing in Pacific salmon: mechanisms and ecological basis. *The Journal of Experimental Biology*. 199: 83-91.
- Edmondson, W.T., and Lehman, J.T. 1981. The effects of changes in the nutrient income on the condition of Lake Washington. *Limnology and Oceanography*. 26:1-29.
- Environment Canada and U.S. Environmental Protection Agency. 2014. Georgia Basin-Puget Sound Airshed Characterization Report. 2014. Vingarzan, R., So, R., and R. Kotchenruther (eds.) Environment Canada, Pacific and Yukon Region, Vancouver, BC, Canada. U.S. Environmental Protection Agency, Region 10, Seattle, WA, USA. 314pp.
- Environnement et Changement climatique Canada. 2017. [Données Climatiques Canadiennes Ajustées et Homogénéisées](#).
- Environnement et Changement climatique Canada. 2019. [Données des stations pour le calcul des normales climatiques 1981 à 2010](#). Chilliwack. ID: 1101530.
- Farley, E.V., Beacham, T.D., and Bugaev, A.V. 2018. Ocean ecology of Sockeye Salmon. Pp. 319-389 in R.J. Beamish (ed.), *The Ocean Ecology of Pacific Salmon and Trout*. American Fisheries Society, Bethesda, MD.
- Fayram, A.H., and Sibley, T.H. 2000. Impact of predation by smallmouth bass on sockeye salmon in Lake Washington, Washington. *North American Journal of Fisheries Management*. 20: 81-89.
-

-
- Finney, B.P., Gregory-Eaves, I., Sweetman, J., Douglas, M.S.V., and Smol, J.P. 2000. Impacts of climatic change and fishing on Pacific salmon abundance over the past 300 years. *Science*. 290: 795-799.
- Finney, B.P., Gregory-Eaves, I., Douglas, M.S.V., and Smol, J.P. 2002. Fisheries productivity in the northeastern Pacific Ocean over the past 2,200 years. *Nature*. 416: 729-733.
- Fleming, I.A. 1994. Captive breeding and the conservation of wild salmon populations. *Conservation Biology*. 8: 886-888.
- Foerster, R.E. 1944. The relation of lake population density to size of young sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 6: 267-280.
- Foerster, R.E. 1968. The sockeye salmon, *Oncorhynchus nerka*. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*. 162.
- Ford, M.J. 2002. Selection in Captivity during Supportive Breeding May Reduce Fitness in the Wild. *Conservation Biology*. 16: 815-825.
- Forrester, C.R. 1987. Distribution and abundance of Sockeye Salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*. 96: 2-10.
- Fraser Basin Council. 2013. Water quality and Eurasian Watermilfoil Technical Workshop Summary. 12pp.
- Freshwater, C., Trudel, M., Beacham, T.D., Grant, S.C.H., Johnson, S.C., Neville, C.M., Tucker, S., and Juanes, F. 2017. Effects of density during freshwater and early marine rearing on juvenile sockeye salmon size, growth, and migration. *Marine Ecology Progress Series*. 579: 97-110.
- Fritts, A.L., and Pearsons, T.N. 2004. Smallmouth bass predation on hatchery and wild salmonids in the Yakima River, Washington. *Transactions of the American Fisheries Society*. 133: 880-895.
- Fryer, J.L., and Lannan, C.N. 1993. The history and current status of *Renibacterium salmoninarum*, the causative agent of bacterial kidney disease in Pacific salmon. *Fisheries Research*. 17:15-33.
- Gardner, J., Peterson, D.L., Wood, A., and Maloney, V. 2004. Making sense of the debate about hatchery impacts: Interactions between enhanced and wild salmon on Canada's Pacific Coast. Report to the Pacific Fisheries Resource Conservation Council. 187pp.
- Gauthier, J., Gregory-Eaves, I., Bunting, L., Leavitt, P.R., Tran, T., Godbout, L., Finney, B.P., Schindler, D.E., Chen, G., Holtgrieve, G., Shapley, M., and Selbie, D.T. 2021. Ecological dynamics of a peri-urban lake: a multi-proxy paleolimnological study of Cultus Lake (British Columbia) over the past approx. 200 years. *Journal of Paleolimnology*. 65: 33-51.
- Gavery, M.R., and Roberts, S.B. 2017. Epigenetic considerations in aquaculture. *PeerJ*. 5: e4147
- Governor General of Canada. 2005. Order Giving Notice of Decisions not to add Certain Species to the List of Endangered Species. *Canada Gazette Part II*. 139(2): 113-117.
- Grant, S.C.H., and Pestal, G. 2013. [Integrated Biological Status Assessments Under the Wild Salmon Policy Using Standardized Metrics and Expert Judgement: Fraser River Sockeye Salmon \(*Oncorhynchus nerka*\) Case Studies](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2012/106.
-

-
- Grant, S.C.H., MacDonald, B.L., Cone, T.E., Holt, C.A., Cass, A., Porszt, E.J., Hume, J.M.B., and Pon, L.B. 2011. [Evaluation of Uncertainty in Fraser Sockeye \(*Oncorhynchus nerka*\) Wild Salmon Policy status Using Abundance and Trends in Abundance Metrics](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2011/087. 191 p.
- Groot, C., and Margolis, L. 1991. Pacific salmon life histories. UBC Press. Vancouver, BC. 564pp.
- Hartman, W.L., Heard, W.R., and Drucker, B. 1967. Migratory behavior of sockeye salmon fry and smolts. Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 24: 2069-2099.
- Healey, M.C. 1982. Juvenile Pacific salmon in estuaries: the life support system. Pp. 315-341. In V.S. Kennedy (ed.) Estuarine Comparisons. Academic Press, New York.
- Healey, M. 2011. The cumulative impacts of climate change on Fraser River sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) and implications for management. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 68: 718-737.
- Hendry, A.P., Wenburg, J.K., Bentzen, P., Volk, E.C., and Quinn, T.P. 2000. Rapid evolution of reproductive isolation in the wild: Evidence from introduced salmon. Science. 290: 516-518.
- Hinch, S.G., Healey, M.C., Diewert, R.E., Thomson, K.A., Hourston, R., Henderson, M.A., and Juanes, F. 1995. Potential effects of climate change on marine growth and survival of Fraser River sockeye salmon. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 52: 2651-2659.
- Hodgson, S., and Quinn, T.P. 2002. The timing of adult sockeye salmon migration into freshwater: adaptations by populations to prevailing thermal regimes. Canadian Journal of Zoology. 80: 542-555.
- Holtby, L.B., and Ciruna, K.A. 2007. [Conservation Units for Pacific Salmon under the Wild Salmon Policy](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2007/070. 350 p.
- Hyatt, K.D., Stockwell, M.M., and Rankin, D.P. 2003. Impact and adaptation responses of Okanagan River Sockeye Salmon (*Oncorhynchus nerka*) to climate variation and change effects during freshwater migration: Stock restoration and fisheries management implications. Canadian Water Resources Journal. 28: 689-713.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T.F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley (eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, p. 1535.
- Janowitz-Koch, I., Rabe, C., Kinzer, R., Nelson, D., Hess, M.A., and Narum, S.R. 2019. Long-term evaluation of fitness and demographic effects of a Chinook Salmon supplementation program. Evolutionary Applications. 12: 456-469.
- Jennings, S., and Kaiser, M.J. 1998. The effects of fishing on marine ecosystems. Advances in Marine Biology. 34: 201-212.
- Kabata, Z., and Cousens, B. 1977. Host-parasite relationships between Sockeye Salmon, *Oncorhynchus nerka*, and *Salmincola californiensis* (Copepod: Lernaepodidae). Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 34: 191-202.
- Kaeriyama, M., Nakamura, M., Edpalina, R., Bower, J.R., Yamaguchi, M., Walker, R.V., Myers, K.W. 2004. Change in the feeding ecology and trophic dynamics of Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.) in the central Gulf of Alaska in relation to climate events. Fisheries Oceanography. 13: 197-207.
-

-
- Kent, M. 2011. Infectious diseases and potential impacts on survival of Fraser River sockeye salmon. Cohen Commission Technical Report 1. 58p. Vancouver, BC.
- Kline, P.A., and Flagg, T.A. 2014. Putting the red back in Redfish Lake, 20 years of progress toward saving the Pacific Northwest's most endangered salmon population. *Fisheries*. 39: 488-500.
- Kondolf, G.M. 2000. Assessing salmonid spawning gravel quality. *Transactions of the American Fisheries Society*. 129: 262-281.
- Korman, J. 2011. Summary of information for evaluating impacts of salmon farms on survival of Fraser River sockeye salmon. Cohen Commission Technical Report 5A. 65p. Vancouver, BC.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., Centre, P.C., and Wetterdienst, D. 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15: 259–263.
- Kraemer, B.M., Orlane, A., Chandra, S., Dix, M., Kuusisto, E., Livingstone, D.M., Rimmer, A., Schladow, S.G., Silow, E., Sitoki, L.M., Tamatamah, R., Vadeboncoeur, Y., and McIntyre, P.B. 2015. Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change. *Geophysical Research Letters*. 42: 4981-4988.
- Le Luyer J., Laporte M., Beacham, T.D., Kaukinen, K.H., Withler, R.E., Leong, J.S., Rondeau, E.B., Koop, B.F., and Bernatchez, L. 2017. Parallel epigenetic modifications induced by hatchery rearing in a Pacific salmon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 14: 12964-12969.
- Levy, D.A. 1989. The selective advantage of diel vertical migration behavior in juvenile sockeye salmon and kokanee (*Oncorhynchus nerka*). Ph.D. thesis, University of British Columbia, Vancouver, B.C.
- Loppnow, G. L., Vascotto, K., and Venturelli P.A. 2013. Invasive Smallmouth Bass (*Micropterus dolomieu*): history, impacts, and control. *Management of Biological Invasions*. 4: 191–206.
- Loppnow, G.L., and Venturelli, P.A. 2014. Stare-structured simulations suggest that removing young of the year is an effective method for controlling invasive Smallmouth Bass. *Transactions of the American Fisheries Society*. 143: 1341-1347.
- Luther, G.W., Ma, S., Trouwborst, R., Glazer, B., Blickley, M., Scarborough, R.W., and Mensinger, M.G. 2004. The roles of anoxia, H₂S, and storm events in fish kills of dead-end canals of Delaware inland bays. *Estuaries*. 27: 551-560.
- Mackas, D.L., Batten, S., and Trudel, M. 2007. Effects on zooplankton of a warmer ocean: recent evidence from the Northeast Pacific. *Progress in Oceanography*. 75:223–252.
- Mahowald, N., Jickells, T.D., Baker, A.R., Artaxo, P., Benitez-Nelson, C.R., Bergametti, G., Bond, T.C., Chen, Y., Cohen, D.D., Herut, B., Kubilay, N., Losno, R., Luo, C., Maenhaut, W., McGee, K.A., Okin, G.S., Siefert, R.L., and Tsukuda, S. 2008. Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates, and anthropogenic impacts. *Global Biogeochemical Cycles*. 22: GB4026
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., and Francis, R.C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 78:1069-1079.
- Manzer, J.I. 1968. Food of the Pacific salmon and steelhead trout in the north-eastern Pacific Ocean. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 25: 1085-1089.
-

-
- Martins, E.G., Hinch, S.G., Cooke, S.J., and Patterson, D.A. 2012. Climate effects on growth, phenology, and survival of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*): a synthesis of the current state of knowledge and future research directions. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 22: 887-914.
- Martinson, E.C., Helle, J.H., Scarnecchia D.L., and Stokes, H.H. 2008. Density-dependent growth of Alaska sockeye salmon in relation to climate-oceanic regimes, population abundance, and body size, 1925 to 1998. *Marine Ecology Progress Series*. 370: 1-18.
- McCrackin, M.L., Jones, H.P., Jones, P.C., and Moreno-Mateos, D. 2017. Recovery of lakes and coastal marine ecosystems from eutrophication: A global meta-analysis. *Limnology and Oceanography*. 62: 507-518.
- McKinnell, S. 2008. Fraser River sockeye salmon productivity and climate: a re-analysis that avoids an undesirable property of Ricker's curve. *Progress in Oceanography*. 77: 146-154.
- McPhail, J.D. 2007. *The freshwater fishes of British Columbia*. University of Alberta Press. 620pp.
- Meidinger, D., and Pojar, J. 1991. *Ecosystems of British Columbia, Province of British Columbia*. Ministry of Forests, Victoria, B.C.
- Melnychuk, M.C., Welch, D.W., and Walters, C.J. 2010. Spatio-temporal migration patterns of Pacific salmon smolts in rivers and coastal marine waters. *PloS one*. 5(9), e12916.
- Metro Vancouver. 2018. 2015 Lower Fraser Valley air emissions inventory and forecast: Final report and summarized results. Metro Vancouver Air Quality and Climate Change Division. 20pp.
- Miller, A.J., Chai, F., Chiba, S., Moisan, J.R., and Neilson, D.J. 2004. Decade-scale climate and ecosystem interactions in the North Pacific Ocean. *Journal of Oceanography*. 60: 163-188.
- Minister of Environment and Climate Change Canada. 2019. [Response Statement – Sockeye Salmon, Cultus-L population](#). January 13, 2019.
- Minister of Environment and Climate Change Canada. 2020. [Response Statement – Coastrange Sculpin, Cultus Population](#). December 2, 2020.
- Moss, B., Kosten, S., Meerhoff, M., Battarbee, R.W., Jeppesen, E., Mazzeo, N., Havens, K., Lacerot, G., Liu, Z., De Meester, L., Paerl, H., and Scheffer, M. 2011. Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters*. 1: 101-105.
- Mossop, B., and Bradford, M.J. 2004. [Review of Eurasian water milfoil control at Cultus Lake and recommendations for future removals](#). MS Prepared for Fisheries and Ocean Canada, May 3, 2004. 26p.
- Mossop, B., Bradford, M.J., and Hume, J. 2004. Review of northern pikeminnow (*Ptychocheilus oregonensis*) control programs in western North America with special reference to sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) production in Cultus Lake, British Columbia. Report prepared for the Cultus Lake Sockeye Salmon Recovery Team. Vancouver. 58 p.
- MPO. 2006. [Stratégie de pêche en conformité avec l'approche de précaution](#). Secr. Can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2006/023.
- MPO. 2014. [Lignes directrices sur l'évaluation des menaces, des risques écologiques et des répercussions écologiques pour les espèces en péril](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2014/013. (Erratum : juin 2016)
-

-
- MPO. 2017. [Avis tiré de l'évaluation du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser que représente le transfert du virus de la nécrose hématopoïétique infectieuse à partir des fermes de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery \(Colombie-Britannique\)](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2017/048.
- MPO. 2018a. [Information scientifique à l'appui de la prise en compte des risques pesant sur le saumon rouge du lac Cultus en 2018](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Rép. des Sci. 2018/052.
- MPO. 2018b. [Évaluation du potentiel de rétablissement du saumon rouge du lac Sakinaw \(*Oncorhynchus nerka*\) \(2017\)](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2018/042.
- MPO. 2019. [Avis découlant de l'évaluation des risques pour le saumon rouge du fleuve Fraser que représente le transfert de l'orthoréovirus pisciaire \(RVP\) à partir des fermes de saumon de l'Atlantique situées dans la région des îles Discovery, en Colombie-Britannique](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2019/022.
- MPO. 2020a. [Avis découlant de l'évaluation du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser attribuable au transfert de la bactérie *Aeromonas salmonicida* à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery \(Colombie-Britannique\)](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2019/017.
- MPO. 2020b. [Avis découlant de l'évaluation du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser attribuable au transfert de *Yersinia ruckeri* à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery \(Colombie-Britannique\)](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2019/018.
- MPO. 2020c. [Avis découlant de l'évaluation du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser attribuable au transfert de la bactérie *Renibacterium salmoninarum* à partir de fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery \(Colombie-Britannique\)](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2019/019.
- MPO. 2020d. [Avis découlant de l'évaluation du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser attribuable au transfert de la bactérie *Piscirickettsia salmonis* à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery \(Colombie-Britannique\)](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2019/020.
- MPO. 2020e. [Avis découlant de l'évaluation du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser attribuable au transfert de la bactérie *Moritella viscosa* à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery \(Colombie-Britannique\)](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2020/043.
- MPO. 2020f. [Avis découlant de l'évaluation du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser attribuable au transfert de la bactérie *Tenacibaculum maritimum* à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery \(Colombie-Britannique\)](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2020/044.
- MPO. 2020g. [Avis découlant de l'évaluation du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser attribuable au transfert du virus de la septicémie hémorragique virale IVa \(vSHV-IVa\) à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery \(Colombie-Britannique\)](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2020/049.
- Mueter, F.J., Peterman, R.M., and 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. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 59: 456-463.
-

-
- Müller, B., Bryant, L.D., Matzinger, A., and Wüest, A. 2012. Hypolimnetic oxygen depletion in eutrophic lakes. *Environmental Science and Technology*. 46: 9964-9971.
- Mueller, C.W., and Enzenhofer, H.J. 1991. Trawl catch statistics in sockeye rearing lakes of the Fraser River drainage basin: 1975-1985. *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences*. 825.
- Naish, K.A., Taylor, J.E., Levin, P.S., Quinn, T.P., Winton, J.R., Huppert, D., and Hilborn, R. 2007. An evaluation of the effects of conservation and fishery enhancement hatcheries on wild populations of salmon. *Advances in Marine Biology*. 53: 61-194.
- Nekouei, O., Vanderstichel, R., Kaukinen, K.H., Thakur, K., Ming, T., Patterson, D.A., Trudel, M., Neville, C., and Miller, K.M. 2019. Comparison of infectious agents detected from hatchery and wild juvenile Coho salmon in British Columbia, 2008-2018. *PLoS ONE*. 14(9): e0221956.
- Nordin, R.N., and McKean, C.J.P. 1982. A review of lake aeration as a technique for water quality improvement. *APD Bulletin* 22. British Columbia Ministry of Environment. 30 pp.
- Nürnberg, G.K. 2009. Assessing internal phosphorus load – problems to be solved. *Lake and Reservoir Management*. 25: 419-432.
- Okey, T.A., Alidina, H.M., Lo, V., and Jessen, S. 2014. Effects of climate change on Canada's Pacific marine ecosystems: a summary of scientific knowledge. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 24: 519-559.
- O'Reilly, C.M., Sharma, S., Gray, D.K., Hampton, S.E., Read, J.S., Rowley, R.J., Schneider, P., Lenters, J.D., McIntyre, P.B., Kraemer, B.M., and Weyhenmeyer, G.A. 2015. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters*. 42: 10773-10781.
- Pettersson, K. 1998. Mechanisms for internal loading of phosphorus in lakes. *Hydrobiologia*. 373: 21-25.
- Pon, L.B., Tovey, C.P., Bradford, M.J., MacLellan, S.G., and Hume, J.M.B. 2010. Depth and thermal histories of adult sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in Cultus Lake in 2006 and 2007. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2867: iii+39 p.
- Preikshot, D., Beamish, R.J., Sweeting, R.M., Neville, C.M., and Beacham, T.D. 2012. The residence time of juvenile Fraser River sockeye salmon in the Strait of Georgia. *Marine and Coastal Fisheries: Dynamics, Management, and Ecosystem Science*. 4: 438-449.
- Putt, A.E., MacIsaac, E.A., Herunter, H.E., Cooper, A.B., and Selbie, D.T. 2019. Eutrophication forcings on a peri-urban lake ecosystem: Context for integrated watershed to airshed management. *PLOS One*. 14(7): e0219241.
- Pyper, B.J., and Peterman, R.M. 1999. Relationship among adult body length, abundance, and ocean temperature for British Columbia and Alaska sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*), 1967–1997. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 56: 1716-1720.
- Quinn, T. 2005. The behavior and ecology of Pacific salmon and trout. University of Washington Press. Seattle, WA 378 pp.
- Reed, T.E., Schindler, D.E., Hague, M.J., Patterson, D.A., Meir, E., Waples, R.S., and Hinch, S.G. 2011. Time to evolve? Potential evolutionary responses of Fraser River Sockeye Salmon to climate change and effects on persistence. *PLOS One*. 6: e20380.
- Richardson, A.J. 2008. In hot water: zooplankton and climate change. *ICES Journal of Marine Science*. 65: 279-295.
-

-
- Ricker, W.E. 1937. Physical and chemical characteristics of Cultus Lake, British Columbia. *Journal of the Biological Board of Canada*. 3: 363-402.
- Ricker, W.E. 1941. The consumption of young sockeye salmon by predaceous fish. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 5: 293-313.
- Ricker, W.E. 1952. The benthos of Cultus Lake. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 9: 204-212.
- Ricker, W.E. 1966. Sockeye Salmon in British Columbia pp. 59-70 *In* Salmon of the North Pacific Ocean. Part III. A review of the life history of North American salmon. International North Pacific Fisheries Commission Bulletin 18.
- Rosenberger, A., Chicatun, V., and Taylor, G. 2022. Alaskan interceptions of BC Salmon: State of Knowledge. Report Series. 268pp.
- Ruggerone, G.T. 2000. Differential survival of juvenile sockeye and coho salmon exposed to low dissolved oxygen during winter. *Journal of Fish Biology*. 56: 1013-1016.
- Ruggerone, G.T., and 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. *Marine and Coastal Fisheries*. 10: 152-168.
- Ruggerone, G.T., Peterman, R.M., Dorner, B., and Myers, K.W. 2010. Magnitude and trends in abundance of hatchery and wild Pink salmon, Chum salmon, and Sockeye salmon in the North Pacific Ocean. *Marine and Coastal Fisheries*. 2: 306-328.
- Sanders, J.E., Pilcher, K.S., and Fryer, J.L. 1978. Relation of water temperature to bacterial kidney disease in coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*), sockeye salmon (*O. nerka*), and steelhead trout (*Salmo gairdneri*). *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 35: 8-11.
- Scheuerell, M.D., and Schindler, D.E. 2003. Diel vertical migration by juvenile sockeye salmon: Empirical evidence for the antipredation window. *Ecology*. 84: 1713-1720.
- Schindler, D.E., Rogers, D.E., Scheuerell, M.D., and Abrey, C.A. 2005. Effects of changing climate on zooplankton and juvenile sockeye salmon growth in southwestern Alaska. *Ecology*. 86: 198-209.
- Schindler, D.W. 1974. Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lake management. *Science*. 184: 897-899.
- Schindler, D.W. 2012. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proceedings of the Royal Society B*. 279: 4322-4333.
- Schmidt, W. 1928. Über Temperatur und Stabilitätsverhältnisse von Seen. *Geografiska Annaler* 10: 145-177.
- Schubert, N.D. 1998. The 1994 Fraser River sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) escapement. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences. 2201. ix + 62pp.
- Schubert, N.D., Beacham, T.D., Cass, A.J., Cone, T.E., Fanos, B.P., Foy, M., Gable, J.H., Grout, J.A., Hume, J.M.B., Johnson, M., Morton, K.F., Shortreed, K.S., Staley, M.J., and Withler, R.E. 2002. [Status of Cultus Lake Sockeye Salmon \(*Oncorhynchus nerka*\)](#). Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2002/064: 109pp.
- Shaw, B., Mechenich, C., and Klessig, L. 2004. Understanding lake data. University of Wisconsin, Wisconsin USA. 18pp.
-

-
- Shortreed, K.S. 2007. Limnology of Cultus Lake, British Columbia. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences. 2753. vi + 85pp.
- Sigma Environmental Consultants. 1983. Summary of water quality criteria for salmonid hatcheries. Report to DFO, October 1983 SECL 8067. 163 p.
- Skjoldal, H.R., and Wassmann, P. 1986. Sedimentation of particulate organic matter and silicium during spring and summer in Lindåspollene, Western Norway. *Marine Ecology Progress Series*. 30: 49-63.
- Smith, C.S., and Adams, M.S. 1986. Phosphorus transfer from sediments by *Myriophyllum spicatum*. *Limnology and Oceanography*. 31: 1312-1321.
- Smith, L.L., and Oseid, D.M. 1972. Effects of hydrogen sulfide on fish eggs and fry. *Water Research*. 6: 711-720.
- Smith, V.H., and Schindler, D.W. 2009. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution*. 24: 201-207.
- Smol, J.P. 2006. Eutrophication: the environmental consequences of over-fertilization. Chapter 11. *Pollution of Lakes and Rivers: A Paleoenvironmental Perspective*. pp. 180-228.
- Soulard, N., Lin, H., and Yu, B. 2019. The changing relationship between ENSO and its extratropical response patterns. *Scientific Reports*. 9: 6507.
- Soutar, M. 2005. Cultus Lake: A Natural Paradise, Chilliwack Museum and Archives. 36p.
- Loi sur les espèces en péril. 2002. Bill C-5. Loi concernant la protection des espèces sauvages en péril au Canada.
- Stables, B. 2004. [Hydroacoustic survey of aquatic plants in Cultus Lake, BC: conducted August 16-18, 2004: mapping of plant density & depth of canopy top](#). Shuksan Fisheries Consulting PO Box 904 Everson, WA 98247 USA. Prepared for: Department of Fisheries and Oceans Canada, Freshwater Habitat Division, 4222 Columbia Valley Highway, Cultus Lake, BC.
- Stahl, K., Moore, R.D., and McKendry, I.G. 2006. The role of synoptic-scale circulation in the linkage between large-scale ocean-atmosphere indices and winter surface climate in British Columbia, Canada. *International Journal of Climatology*. 26: 541-560.
- Sumka, M.G. 2017. Climate change impacts on a eutrophying lake: Cultus Lake, British Columbia, Canada. M.A.Sc. Thesis. Department of Civil Engineering. University of British Columbia. 94pp.
- Tabor, R.A., Shively, R.S., and Poe, T.P. 1993. Predation on juvenile salmonids by smallmouth bass and northern squawfish in the Columbia River near Richland, Washington. *North American Journal of Fisheries Management* 13: 831-838.
- Tabor, R.A., Footen, B.A., Fresh, K.L., Celedonia, M.T., Mejia, F., Low, D.L., and Park, L. 2007. Smallmouth bass and largemouth bass predation on juvenile Chinook salmon and other salmonids in the Lake Washington basin. *North American Journal of Fisheries Management*. 27: 1174-1188.
- Tatara, C.P., and Berejikian, B.A. 2012. Mechanisms influencing competition between hatchery and wild juvenile anadromous Pacific salmonids in fresh water and their relative competitive abilities. *Environmental Biology of Fishes*. 94: 7-19.

-
- Teffer, A.K., Hinch, S.G., Miller, K.M., Patterson, D.A., Bass, A.L., Cooke, S.J., Farrell, A.P., Beacham, T.D., Chapman, J.M., and Juanes, F. 2022. Host-pathogen environment interactions predict survival outcomes of adult sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) released from fisheries. *Molecular Ecology*. 31: 134-160.
- Tovey, C., Hume, J.M.B., Bradford M., and Ross, P.S. 2008. Preliminary assessment of contaminant exposure risk to developing Cultus Lake sockeye embryos. Summary report prepared for the Pacific Salmon Commission. 55pp.
- Tucker, S., Trudel, M., Welch, D.W., Candy, J.R., Morris, J.F.T., Thiess, M.E., Wallace, C., Teel, D.J., Crawford, W., Farley Jr. E.V., and Beacham, T.D. 2009. Seasonal stock-specific migrations of juvenile sockeye salmon along the west coast of North America: implications for growth. *Transactions of the American Fisheries Society*. 138: 1458-1480.
- Unmuth, J.M.L., Lillie, R.A., Dreikosen, D.S., and Marshall, D.W. 2000. Influence of dense growth of Eurasian watermilfoil on lake water temperature and dissolved oxygen. *Journal of Freshwater Ecology*. 15: 497-503.
- Urban Systems Ltd. 2015. Cultus Lake Liquid Waste Management Plan. A report prepared for the Fraser Valley Regional District. 100pp.
- Vander Zanden, M.J., and Vadeboncoeur, Y. 2002. Fishes as integrators of benthic and pelagic food webs in lakes. *Ecology*. 83: 2152-2161.
- Wagner, G.N., Hinch, S.G., Kuchel, L.J., Lotto, A., Jones, S.R.M., Patterson, D.A., MacDonald, J.S., Van Der Kraak, G., Shrimpton, M., English, K.K., Larsson, S., Cooke, S.J., Healey, M.C., and Farrell, A.P. 2005. Metabolic rates and swimming performance of adult Fraser River sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) after a controlled infection with *Parvicapsula minibicornis*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 62: 2124-2133.
- Walker, W.W. 1985. Empirical methods for predicting eutrophication in impoundments; Report 3, Phase III: Model Refinements. Technical Report E-81-9, U.S. Army Engineer Waterways Station. Vicksburg, MS. 323 pp.
- Walker, W.W. 1996. Simplified procedures for eutrophication assessment and prediction: User manual. U.S. Army Engineer Waterways Station. Vicksburg, MS. 239 pp.
- Walters, C.J., McAllister, M.K., and Christensen, V. 2020. Has Stellar sea lion predation impacted survival of Fraser River Sockeye Salmon? *Fisheries*. 45: 597-604.
- Waples, R.S. 1991. Pacific salmon, *Oncorhynchus* spp., and the definition of 'species' under the Endangered Species Act. *Marine Fisheries Review*. 53: 11-22.
- Welch, D.W., Ishida, Y., and Nagasawa, K. 1998. Thermal limits and ocean migrations of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*): long-term consequences of global warming. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 55: 937-948.
- Welch, D.W., Melnychuk, M.C., Rechisky, E.R., Porter, A.D., Jacobs, M.C., Ladouceur, A., McKinley, R.S., and Jackson, G.D. 2009. Freshwater and marine migration and survival of endangered Cultus Lake sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) smolts using POST, a large-scale acoustic telemetry array. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 66: 736-750.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology. Lake and River Ecosystems*. Third Edition. Academic Press. 1006pp.

Withler, R.E., Bradford, M.J., Willis, D.M., and Holt, C. 2018. [Genetically Based Targets for Enhanced Contributions to Canadian Pacific Chinook Salmon Populations](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2018/019. xii + 88pp.

Young, J.A.M., and Koops, M.A. 2011. [Recovery Potential Modelling of Lake Chubsucker \(*Erimyzon sucetta*\) in Canada](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2011/049. 17pp.

Zubel, M. 2000. Groundwater Conditions of the Columbia Valley Aquifer Cultus Lake, British Columbia. Report prepared for the Ministry of Environments, Lands, and Parks Water Management. 98pp.

ANNEXE A. DESCRIPTION DU MODÈLE DE DYNAMIQUE DE LA POPULATION DE SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS

On prévoit l'abondance des saumons rouges d'origine naturelle et d'écloserie du lac Cultus à l'aide d'un modèle simple de dynamique de la population (figure 1 de l'annexe). Ce modèle est initialisé à l'aide des données de 2015 à 2018 et prévoit l'abondance des smolts et des géniteurs en montaison pour les trois prochaines générations (2019 à 2030) ou plus. Il inclut la variation stochastique des taux de survie dans le lac et dans l'océan Pacifique. Le modèle peut simuler différents autres taux de production en écloserie et d'exploitation, ainsi que des augmentations potentielles des taux de production naturelle de smolts découlant des stratégies d'atténuation de la dégradation de l'habitat ou autres. Il calcule une série de mesures du rendement décrites dans l'évaluation du potentiel de rétablissement. Comme chaque simulation sur 12 ans est fondée sur une série différente de taux de survie choisis au hasard, un grand nombre d'essais de simulation sont nécessaires pour calculer la réaction attendue à une solution de rechange stratégique particulière. Le code source du modèle est présenté ci-après.

Les principales hypothèses du modèle sont les suivantes.

- Aucune dépendance à la densité pour les taux de survie dans le lac ou l'océan pour la période de simulation sur 12 ans. Une dépendance à la densité dans le lac est peu probable, compte tenu des faibles densités de reproduction, de l'état trophique élevé, des densités actuelles et prévues de saumons rouges juvéniles et du manque de biomasse importante de concurrents planctivores. Il n'est pas possible d'estimer avec fiabilité le potentiel de dépendance à la densité en mer en moyenne ou par année, et les estimations de la survie en mer ne reflètent pas les tendances connues à long terme des apports en saumons d'écloserie dans le Pacifique Nord.
- Des extractions aléatoires d'estimations empiriques (environ pour les années d'éclosion 2002 à 2017) du nombre de smolts naturels produits par géniteur, des taux de survie dans l'écloserie, de la survie des poissons d'écloserie lâchés dans le lac et des taux de survie des smolts d'origine naturelle et d'écloserie dans l'océan représenteront raisonnablement les conditions au cours des 12 prochaines années.
- La variation de la proportion de poissons d'écloserie frayant dans le lac n'influera pas sur les taux de survie ultérieurs dans le lac ou l'océan durant la période de simulation sur 12 ans. Autrement dit, la sélection de la stratégie d'écloserie sur la survie à l'état sauvage n'a aucun autre effet au-delà de ceux qui sont implicitement reflétés dans les données de 2002 à 2017.

Le nombre annuel de smolts produits naturellement dans le lac Cultus est prédit en fonction de l'échappée de géniteurs (d'écloserie et d'origine naturelle) deux ans plus tôt et du ratio smolts naturels/géniteur. Ce ratio varie selon les années d'éclosion dans chaque essai de simulation sur 12 ans, déterminé en choisissant aléatoirement une année entre 2002 et 2017 (année d'éclosion) et en utilisant l'estimation correspondante du ratio smolts/géniteur pour cette année. Le ratio smolts naturels/géniteur comprend les pertes dues à la mortalité avant la fraie, ainsi que la variation de la survie des œufs et des alevins. Il convient de noter que le modèle suppose qu'il n'y a pas de dépendance à la densité pour les taux de survie dans le lac. Il s'agit d'une hypothèse raisonnable compte tenu de l'abondance actuelle très faible des géniteurs et de l'horizon relativement court du modèle, soit trois générations. L'atténuation en eau douce est fondée sur la diminution de la probabilité au fil du temps des très faibles ratios smolts/géniteur observés dans l'ensemble de données historiques, comme il est indiqué dans l'évaluation du potentiel de rétablissement.

Le nombre de géniteurs d'origine naturelle qui retournent vers le lac deux ans plus tard, avant les prélèvements dans les pêches (recrues adultes), est calculé à partir du nombre prévu de smolts et d'une estimation aléatoire du taux de survie en mer des smolts d'origine naturelle (selon une série chronologique pour les années d'éclosion de 1999 à 2015). Un taux d'exploitation fixe est appliqué aux recrues adultes pour calculer le nombre de géniteurs qui reviennent à la barrière. Le nombre de poissons capturés à la barrière pour le stock de géniteurs est simulé, et le reste correspond à l'échappée dans le lac.

Le nombre de smolts produits en écloserie prévu par le modèle dépend du scénario d'écloserie simulé, du nombre d'adultes d'origine naturelle et d'écloserie qui devraient parvenir à la barrière, ainsi que des taux de survie en écloserie et dans le lac. Les scénarios sont l'absence de production en écloserie, les lâchers de smolts en aval de la barrière, les lâchers de tacons dans le lac ou les lâchers de tacons et de smolts. Les calculs des poissons d'écloserie commencent par une prévision du nombre de géniteurs capturés à la barrière chaque année pour le stock de géniteurs. On applique une règle selon laquelle on ne peut pas prendre plus de 50 % de la remonte totale à la barrière pour le stock de géniteurs. Les années où la remonte totale à la barrière (poissons d'écloserie et d'origine naturelle) est au moins deux fois plus élevée que le stock de géniteurs requis pour l'écloserie, le nombre total nécessaire est capturé. Les années où la remonte totale n'est pas suffisante pour répondre aux besoins, on capture 50 % de la remonte pour le stock de géniteurs.

Le nombre d'alevins ou de smolts produits par l'écloserie chaque année dépend du nombre de géniteurs capturés et d'une valeur aléatoire pour les alevins ou les smolts produits par femelle dans l'écloserie à partir des séries chronologiques disponibles (2002 à 2017). On suppose que 50 % du stock de géniteurs sont des femelles. Dans le scénario de lâchers de tacons et de smolts, seuls les smolts sont lâchés si le nombre total de géniteurs est inférieur à 38 (le minimum requis pour produire 50 000 smolts). Lorsque 38 géniteurs ou plus sont disponibles, le nombre de tacons lâchés est fondé sur l'excédent de poissons disponibles par rapport au nombre nécessaire pour produire 50 000 smolts.

Le nombre prévu de smolts à la barrière au printemps, produits à partir des tacons lâchés de l'écloserie l'automne ou l'hiver précédent, dépend du nombre de tacons lâchés et d'un taux de mortalité instantanée quotidien pour les alevins produits en écloserie d'après les séries chronologiques d'estimations disponibles (2002 à 2017). La valeur choisie dépend de l'année choisie pour le ratio smolts naturels/géniteur afin de maintenir la covariation qui existe entre la survie des smolts d'origine naturelle et celle des juvéniles d'écloserie. Le taux de survie totale dans le lac, du lâcher à l'arrivée à la barrière, dépend du taux de mortalité et de la date présumée du lâcher. Les alevins lâchés en hiver passent généralement moins de temps dans le lac que ceux lâchés à l'automne, et ils auront donc un taux de survie globale plus élevé entre le lâcher et leur arrivée à la barrière. Pour ces simulations, on suppose que les tacons sont lâchés dans le lac le 15 décembre de chaque année selon une stratégie visant à éviter les conditions environnementales stressantes rencontrées plus tôt dans l'année.

Le nombre de poissons d'écloserie qui effectuent la montaison à l'âge adulte avant la pêche dépend du taux de survie en mer et du nombre de smolts d'écloserie produits par les lâchers d'alevins qui devraient atteindre la barrière au printemps en tant que smolts, ainsi que du nombre prévu de smolts lâchés en aval de la barrière. Dans le cas des lâchers d'alevins, le nombre prévu de recrues adultes dépend du même taux de survie en mer choisi aléatoirement et appliqué aux smolts d'origine naturelle décrit précédemment. Pour les lâchers de smolts, on choisit au hasard un taux de survie en mer pour les smolts d'écloserie dans la série chronologique disponible (années d'éclosion de 2007 à 2015). Les recrues adultes d'écloserie sont exposées au même taux de récolte annuel que les poissons d'origine naturelle.

Dans le code ci-après, on calcule une série de mesures du rendement pour chaque scénario.

1. **Objectif de survie** : la proportion d'années dans chaque essai où l'abondance arithmétique moyenne sur une génération (4 ans) des géniteurs atteignant le lac est d'au moins 2 500 et où il n'y a pas moins de 500 géniteurs chacune des quatre années utilisées dans le calcul des moyennes sur une génération. On calcule ensuite la proportion moyenne d'années pendant lesquelles ces conditions sont remplies sur 10 000 essais.
2. **Objectif de croissance sur une génération établi par l'Équipe de rétablissement du saumon rouge du lac Cultus** : la proportion d'années où l'abondance moyenne des géniteurs sur une génération augmente au fil du temps et où un accroissement de l'abondance se produit pendant au moins trois des quatre lignées d'un cycle. On calcule ensuite la proportion moyenne d'années pendant lesquelles ces conditions sont remplies sur 10 000 essais.
3. La proportion d'années où l'échappée dépasse 7 000 géniteurs, calculée en moyenne sur 10 000 essais.
4. La proportion d'années où l'échappée dépasse 15 000 géniteurs, calculée en moyenne sur 10 000 essais.
5. Une statistique de quasi-disparition, calculée comme la proportion de 10 000 essais où le nombre de géniteurs sur quatre années consécutives est inférieur à 50 poissons.
- 6-8. Les mesures du rendement 1, 3 et 4 ont également été calculées à l'aide de la dernière génération simulée uniquement. Cela permet de quantifier l'état prévu de la population à la fin de la période de rétablissement.
9. L'influence naturelle proportionnelle (INP), qui représente le degré potentiel d'influence des poissons d'écloserie sur la valeur adaptative de la population. Cette statistique est calculée comme le ratio entre la proportion de géniteurs d'origine naturelle dans le stock de géniteurs (pNOB) et la somme de pNOB et de la proportion de poissons d'écloserie frayant dans le lac (pHOS), autrement dit : $INP = pNOB / (pNOB + pHOS)$. L'INP est calculée annuellement, la moyenne est calculée sur les années d'un essai, puis la moyenne est calculée sur 10 000 essais.
10. L'INP pour la dernière génération de chaque essai.

Dans le document, on présente les mesures du rendement 5, 6, 7 et 10 seulement.

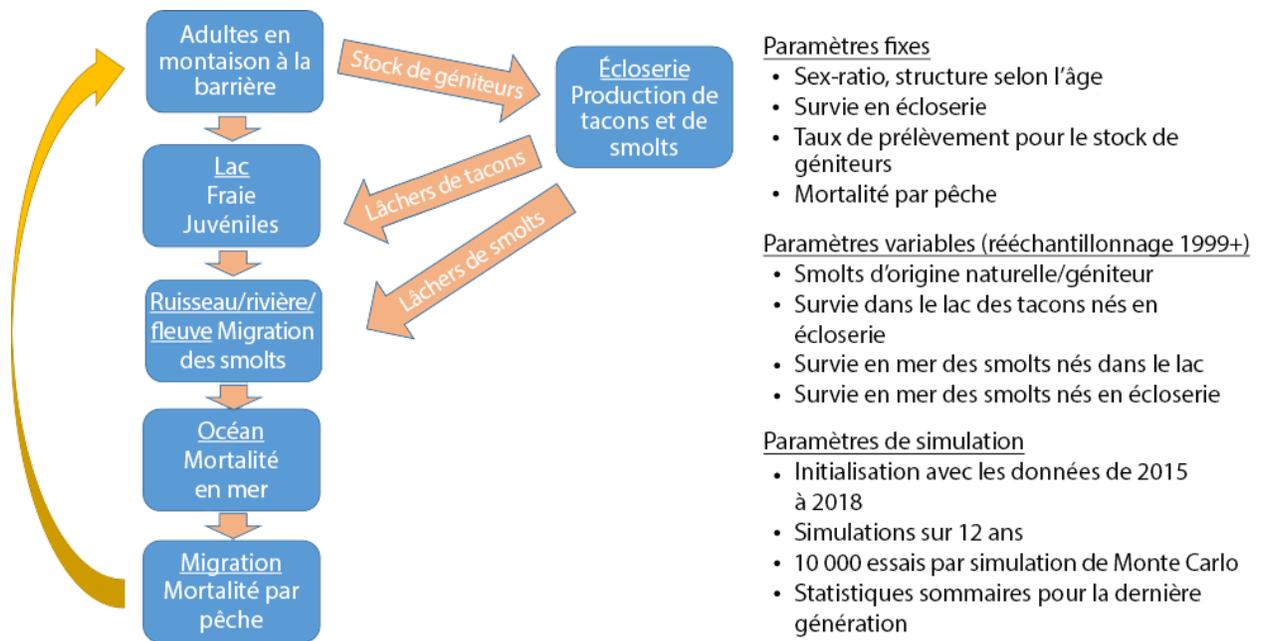


Figure A.1. Organigramme du modèle du saumon rouge du lac Cultus.

A.1. CODE SOURCE POUR LE MODÈLE DE DYNAMIQUE DE LA POPULATION DE SAUMON ROUGE DU LAC CULTUS

Le texte surligné en vert est un commentaire (les énoncés qui commencent par un signe #).

```
##### Définir une série de données sur les taux de survie qui seront échantillonnés au hasard, selon la
définition dans les données d'entrée sur le lac Cultus pour le modèle v3.xlsx #####

#Smolts d'origine naturelle (lac)/géniteur
#LSpS=c(5.0,3.0,20.8,22.5,33.7,59.6,85.8,38.6,130.3,1.4,106.9,20.8,1.7,2.3,29.3,4.7,1.0,1.1)
#Supprimer les 3 premières estimations pour avoir le même nombre que pour Hmd, puis sélectionner les mêmes
#années dans la simulation pour tenir compte de la corrélation
LSpS=c(22.5,33.7,59.6,85.8,38.6,130.3,1.4,106.9,20.8,1.7,2.3,29.3,4.7,1.0,1.1,7.2)
NlspS=length(LSpS)

#Taux de survie instantané quotidien après le lâcher dans le lac des alevins jusqu'à ce qu'ils parviennent
#à la barrière en tant que smolts
Hmd=c(.0173,.0141,.0094,.0093,.0059,.0057,.0086,.0079,.0091,.0106,.0120,0.0122,0.0185,0.0172,0.0195,0.0155)
Nhmd=length(Hmd)

#Taux de survie en mer appliqué aux smolts d'origine naturelle (lac) ainsi qu'aux alevins d'écloserie qui
#ont survécu jusqu'à la barrière
Lms=c(0.042,0.011,0.011,0.035,0.014,0.012,0.024,0.030,0.056,0.012,0.023,0.018,0.035,0.049,0.009,0.041)
Nlms=length(Lms)

#Taux de survie en mer des smolts d'écloserie lâchés en aval de la barrière
Hms=c(0.0318,0.0052,0.0092,0.0083,0.0095,0.0050,0.0023,0.0067)
Nhms=length(Hms)

##### Définir les constantes et les ensembles de variables d'état #####

Nsims=1000
Ngens=3

AgeAtReturn=4;Nyrs=Ngens*AgeAtReturn
#Lyr (dernière année d'éclosion) est 2026, mais on simulera l'échappée jusqu'en 2030 (prévision pour la
#dernière année d'éclosion iyr est iyr+4)
Fyr=2015;Lyr=Fyr+Nyrs-1
Yr=c(seq[Fyr,Lyr,by=1],Lyr+1,Lyr+2,Lyr+3,Lyr+4) #années totales de 2015 à 2030 si Ngens=3.
```

```

Sp=matrix(nrow=Nyrs+AgeAtReturn,ncol=Nsims)      #géniteurs
Sp_Nat=Sp;Sp_Hatch=Sp;pNOB=Sp;pHOS=Sp;PNI=Sp
Sp_Nat_A=Sp; Sp_Hatch_A=Sp; Sp_A=Sp #Série sur les géniteurs utilisée pour les évaluations
Sm_Nat=Sp;Sm_Hatch=Sm_Nat                       #smolts
Ret=Sp;Ret_Nat=Ret;Ret_Hatch=Ret                #remontes d'adultes à la barrière

#alevins d'écloserie lâchés dans le lac, smolts d'écloserie lâchés en aval de la barrière
HatFry=Sp;HatSmolt=Sp;Brood=Sp
Brood=matrix(nrow=Nyrs+AgeAtReturn,ncol=Nsims)  # Nombre de géniteurs capturés pour le stock de géniteurs

#Initialisation de la variable d'état

#indexé par année civile (iyr). Les 4 premières années sont initialisées en fonction des observations
Sp[1:4,1:Nsims]=rep(c(1113,2554,670,330),times=Nsims)

#La première année est 2015; il s'agit donc de smolts deux ans plus tard en 2017-2019
Sm_Nat[3:5,1:Nsims]=rep(c(1089,2722,4793),times=Nsims)

#Alevins en 2017-2020 (les trois premiers nombres ont survécu jusqu'à la barrière, le dernier indique les lâchers)
HatFry[3:6,1:Nsims]=rep(c(2735,3165,7070,194000),times=Nsims)
HatSmolt[3:6,1:Nsims]=rep(c(24747,26146,50750,50000),times=Nsims) #smolts en 2017-2020 lâchés en aval de la barrière
PNI[1:4,1:Nsims]=rep(c(0,19,0,08,0,54,0,69),times=Nsims) #valeurs de l'INP observées (2015-2018) pour le tracé

#### Paramètres de la politique #####
ErMult=0 #multiplicateur du profil d'exploitation existant; utiliser 1 pour le TE existant
fnout="stats.out"
Uadams=0,5*ErMult; Ureg=0,2*ErMult #TE les années de montaison de la lignée dominante du saumon rouge de la
#rivière Adams (2018, 2020, etc.) et les autres années (rég.)
Hscen=4 #Scénario d'écloserie (1 = aucun apport, 2 = smolts, 3 = alevins, 4 = mixte)
MaxBrood=c(0,68,202,160) #stock de géniteurs requis pour Hscen 1-4
HSmPerFem=c(0,2584,2476,NA) #smolts d'écloserie ou alevins-smolts produits par femelle
pBrood=0,5 #prop. max d'adultes à la barrière qui peuvent être capturés pour le stock de géniteurs

#Nombre de jours entre le lâcher des alevins dans le lac et l'arrivée des smolts à la barrière
#(192 = lâcher à l'automne, 120 pour l'hiver)
Hdur=120

```

```

#Atténuation de la production de smolts : HabMax est la valeur minimale de smolts/géniteur atteinte par
#HabMaxYr
HabMax=1;HabMaxYr=10
#Établir la séquence annuelle des mesures d'atténuation. Les cinq premières années d'éclosion (2015-2019)
#ne sont pas touchées
HabMult=c(1,1,1,1,seq[1,HabMax,length.out=HabMaxYr])

#Régler HabMults supplémentaires à HabMax les années après HabMaxYr
if(length[HabMult]<Nyrs) HabMult=c(HabMult,rep[HabMax,times=Nyrs-length(HabMult)])

#### Mesures du rendement #####

Nobj=7
Obj=matrix(data=0,nrow=Nobj,ncol=Nsims)
ObjStats=matrix(nrow=Nobj,ncol=3) #Stats LCL, moyenne et UCL pour les valeurs Obj dans les simulations

LG_Obj=matrix(data=0,nrow=4,ncol=Nsims) #Quelques statistiques pour la dernière génération
LG_ObjStats=matrix(nrow=4,ncol=3)

perc=c(0,1,0,9) #centiles pour le tracé et limites de l'incertitude concernant les mesures du rendement

##### Modèle #####

#Régler des graines aléatoires pour obtenir toujours le même ensemble de nombres aléatoires pour chaque
#politique (pour un ensemble d'essais et d'années de simulation). Commenter en déterminant combien de
#Nsims sont nécessaires pour obtenir un résultat stable. Besoin de beaucoup de Nsims pour un Obj stable[2,]
set.seed(10)

for(isim in 1:Nsims){          #boucle d'essais

  cycle_cnt=0
  for(iyr in 1:Nyrs){ #boucle de l'année

    #Régler le taux d'exploitation pour les années correspondant à une lignée dominante du saumon
    #de la rivière Adams ('22, '26, '30) et les autres ('19-'21, '23-25, '27-29)
    cycle_cnt=cycle_cnt+1
    #iyr=1 correspond à 2015, donc en 2018 (année Adams), vous êtes à cycle_cnt=4. Appliquer un TE
    #plus élevé (Uadams)
    if(cycle_cnt==4){
      U=Uadams
    }
  }
}

```

```

        cycle_cnt=0

    } else {
        U=Ureg          #les années non-Adams, appliquer un TE plus faible
    }

    ##### Production naturelle #####
    #Prédire les smolts d'origine naturelle qui sortent du lac compte tenu de l'échappée et
    #sélectionner aléatoirement dans les séries de données sur les smolts/géniteur du lac
    #La série de données sur les smolts est raccourcie pour inclure seulement les valeurs > HabMult
    #afin de tenir compte de l'atténuation dans le lac
    if(iyr>3){
        #Sm_Nat déjà défini pour les valeurs données de iyr=1-3 pour Sm_Nat[1+2,] Sm_Nat[2+2,],
        #Sm_Nat[3+2,] (Voir conditions initiales ci-dessus)
        LSpS2<-LSpS[LSpS>HabMult[iyr]];Nlsps=length(LSpS2) #Truncate Sm/Sp vector to values > HabMult
        j=runif(n=1,min=SurvStart,max=Nlsps)             #random pick of element in LSpS2
        Sm_Nat[iyr+2,isim]=Sp[iyr,isim]*LSpS2[j] #Use picked value of LSpS2 to compute smolts
    }

    #Prédire les remontes à la barrière deux ans plus tard à partir de la production naturelle dans
    #le lac en fonction des smolts produits et de la survie en mer
    k=runif(n=1,min=1,max=Nlms) #sélectionner l'élément dans la survie du marsurv pour les smolts
    #produits dans le lac
    Ret_Nat[iyr+4,isim]=Sm_Nat[iyr+2,isim]*Lms[k]*(1-U)

    ##### Production en éclosion #####
    #HatFry et HatSmolts pour iyr=1:4 définis par les conditions initiales donc n'ont pas besoin
    #d'être calculés

    #la production en éclosion dépend de la capture de géniteurs. La première année où elle est
    #calculée est l'année 5 (2019)
    if(iyr>4){
        if(Hscen==1){          #no hatchery
            HatFry[iyr+2,isim]=0; HatSmolt[iyr+2,isim]=0
        } else if (Hscen==2){ #smolt release only
            HatFry[iyr+2,isim]=0
        }
    }

```

```

        HatSmolt[iyr+2, isim]=Brood[iyr, isim]*0.5*HSmPerFem[Hscen]

    } else if (Hscen==3){ #fry release only
        HatFry[iyr+2, isim]=Brood[iyr, isim]*0.5*HSmPerFem[Hscen]
        HatSmolt[iyr+2, isim]=0

    } else { #lâcher combiné d'alevins et de smolts
        if(Brood[iyr, isim]>38){ #stock de géniteurs suffisant pour produire à la fois des
#alevins et des smolts
            #besoin de 19 femelles (38*0,5) pour produire la limite de 50 000 smolts
            (19*HsmPerFem[3])
            HatSmolt[iyr+2, isim]=38*0.5*HSmPerFem[2]

            #la descendance restante non destinés à la production de smolts sert à la
production d'alevins
            HatFry[iyr+2, isim]=(Brood[iyr, isim]-38)*0.5*HSmPerFem[3]

        } else { #descendance pas suffisante, donc ne produire que des smolts
            HatSmolt[iyr+2, isim]=Brood[iyr, isim]*0.5*HSmPerFem[2]
            HatFry[iyr+2, isim]=0
        }
    }
}

#Calculer les remontes à la barrière à partir des poissons d'écloserie à la barrière deux ans
#plus tôt
#noter que les sélections aléatoires pour les valeurs de la survie en mer pour les smolts
#d'origine naturelle (Lms[k] par rapport aux smolts d'écloserie (Hms[m] ne sont pas corrélées
#dans la simulation (r2 dans les données = 0,15)

#sélection aléatoire d'éléments de survie en mer pour les smolts d'écloserie lâchés en aval de
la barrière
m=runif(n=1, min=1, max=Nhms)

if(iyr>3){
    #sélection aléatoire d'éléments dans la mortalité instantanée des alevins-smolts pour les
#lâchers d'alevins d'écloserie
    l=j #Utiliser la même année que pour les smolts naturels/géniteur

    #traduire en survie pour l'intervalle lâcher-smolt

```

```

HatFrySurv=exp(-Hmd[1]*Hdur)

#Pour le tracé seulement. Total des poissons d'écloserie qui parviennent à la barrière en
#tant que smolts, ce qui représente seulement les smolts et les alevins survivants
Sm_Hatch[iyr+2, isim]=HatSmolt[iyr+2, isim] + HatFry[iyr+2, isim]*HatFrySurv

#Prédire les remontes à la barrière provenant de la production en écloserie, ce qui comprend
#les lâchers d'alevins et ceux de smolts
#Noter que la survie en mer des alevins lâchés est la même que celle des smolts d'origine
#naturelle, mais que le taux de survie en mer est différent pour les smolts lâchés en aval de
la barrière
    Ret_Hatch[iyr+4, isim]=(HatSmolt[iyr+2, isim]*Hms[m] +
    HatFry[iyr+2, isim]*HatFrySurv*Lms[k])*(1-U)
} else {    #traitement spécial pour les 3 premières années où la survie des alevins
            #d'écloserie lâchés jusqu'à la barrière est déjà connue (alors HatFry = smolts à la
            #barrière d'après le lâcher d'alevins)
    Sm_Hatch[iyr+2, isim]=HatSmolt[iyr+2, isim] + HatFry[iyr+2, isim]
    Ret_Hatch[iyr+4, isim]=(HatSmolt[iyr+2, isim]*Hms[m] + HatFry[iyr+2, isim]*Lms[k])*(1-U)
}

#Le total des remontes à la barrière est la somme des remontes de poissons d'origine naturelle
#et d'écloserie
Ret[iyr+4, isim]=Ret_Nat[iyr+4, isim] + Ret_Hatch[iyr+4, isim]

##### Prélèvement pour le stock de géniteurs #####

# # Le nombre de poissons capturés pour le stock de géniteurs ne peut pas dépasser 50 % de la
#remonte à la barrière (pBrood)
if(Hscen==1){
    Brood[iyr+4, isim]=0
} else {
    #les remontes sont >= 2*stock de géniteurs requis (pBrood=0,5)
    if(Ret[iyr+4, isim]>=MaxBrood[Hscen]/pBrood){
        Brood[iyr+4, isim]=MaxBrood[Hscen] #prélever tout le stock de géniteurs requis
    }
}

```

```

    } else {
        #Remonte pas suffisante pour prélever tout le stock de géniteurs. Prélever 1/2 de
la remonte à la barrière
        Brood[iyr+4, isim]=Ret[iyr+4, isim]*pBrood
    }
}

#Calculer le nombre de poissons d'origine naturelle et d'écloserie en montaison prélevé pour le
#stock de géniteurs pour déterminer le nombre de géniteurs qui reviennent frayer dans le lac et
#pour le calcul de l'INP. La proportion de poissons d'écloserie et d'origine naturelle à la
#barrière capturés pour le stock de géniteurs est proportionnelle à la composition de la
#remonte à la barrière
NatTaken=Brood[iyr+4, isim]*Ret_Nat[iyr+4, isim]/Ret[iyr+4, isim]
HatTaken=Brood[iyr+4, isim]-NatTaken

#Calculer le nombre de géniteurs dans le lac après le prélèvement pour le stock de géniteurs à
#partir de la remonte à la barrière
Sp_Nat[iyr+4, isim]=trunc(Ret_Nat[iyr+4, isim]-NatTaken)

Sp_Hatch[iyr+4, isim]=trunc(Ret_Hatch[iyr+4, isim]-HatTaken)
Sp[iyr+4, isim]=trunc(Sp_Nat[iyr+4, isim]+Sp_Hatch[iyr+4, isim])
##Deuxième ensemble d'abondances des géniteurs, incluant le stock de géniteurs -- à utiliser
pour l'évaluation et les tracés
Sp_Nat_A[iyr+4, isim]=trunc(Ret_Nat[iyr+4, isim])
Sp_Hatch_A[iyr+4, isim]=trunc(Ret_Hatch[iyr+4, isim])
Sp_A[iyr+4, isim]=trunc(Sp_Nat_A[iyr+4, isim]+Sp_Hatch_A[iyr+4, isim])

#Calculs de INP et pHOS
#Noter que pNOB = INP dans sim Cultus parce qu'on suppose que la proportion de poissons
#d'origine naturelle et d'écloserie prélevée pour le stock de géniteurs est exactement la même
#que la proportion arrivant à la barrière
#INP=pNOB/(pNOB+pHOS), pHOS=SP_Hatch/(Sp_Nat + Sp_Hatch). Disons que 30 % des poissons à la
#barrière sont d'origine naturelle, donc INP = 0,3/(0,3 + (1-0,3)) = 0,3
#Mais maintenir les équations ci-dessous conformes aux équations de l'analyse doc. de
#l'écloserie.

if(Brood[iyr+4, isim]==0){
    PNI[iyr+4, isim]=1
} else {
    pNOB[iyr+4, isim]=NatTaken/Brood[iyr+4, isim]

```

```

    pHOS[iyr+4, isim]=Sp_Hatch[iyr+4, isim]/Sp[iyr+4, isim]
    PNI[iyr+4, isim]=pNOB[iyr+4, isim]/(pNOB[iyr+4, isim]+pHOS[iyr+4, isim])
  }

##### Calculer les mesures du rendement pour les objectifs #####

#modèle initialisé avec les échappées de 2015-2018 (iyr = 1-4) et 2019 (iyr = 5) est la
#première année avec une prédiction pour l'échappée, alors c'est celle où les calculs des
#objectifs commencent.
#Noter que comme la dernière année (éclosion) est 2026, la dernière prévision pour les
#géniteurs est 2026 + 4 = 2030
#La façon dont les statistiques sur une génération sont présentées ci-après, la dernière
#prédiction des géniteurs utilisée est iyr + 3 = 2029

  if (iyr>4){

    #Objectif d'abondance sur une génération (I). Gen avg d'au moins 2 500 et aucune année
#avec moins de 500 poissons
    GenAvg=mean(Sp[iyr:(iyr+3), isim])
    fail=length(which(Sp[iyr:(iyr+3), isim]<500))
    if(GenAvg>=2500 & fail==0) Obj[1, isim]=Obj[1, isim]+1 #objective met for this trial

    #Objectif de croissance sur une génération (II). Croissance de la moyenne sur une génération et
#sur 3 des 4 lignées du cycle.

    GroGen=mean(Sp[iyr:(iyr+3)], isim)-mean(Sp[(iyr-4):(iyr-1), isim])

    GroCyc=c(Sp[iyr+3, isim]-Sp[iyr-1, isim], Sp[iyr+2, isim]-Sp[iyr-2, isim], Sp[iyr+1, isim]-
    Sp[iyr-3, isim], Sp[iyr, isim]-Sp[iyr-4, isim])

    if(GroGen>0 & length(which(GroCyc>0))>=3) Obj[2, isim]=Obj[2, isim]+1

    #géniteurs d'origine naturelle supérieurs à la limite inférieure de la PSS
    if(Sp[iyr, isim]>=7000) Obj[3, isim]=Obj[3, isim]+1
    if(Sp[iyr, isim]>=15000) Obj[4, isim]=Obj[4, isim]+1 #géniteurs naturels correspondent au
#moins à la valeur sur une génération

    #La limite de quasi-disparition a-t-elle été atteinte quatre années consécutives

```

```

if(Sp[iyr,isim]<50 & Sp[iyr+1,isim]<50 & Sp[iyr+2,isim]<50 & Sp[iyr+3,isim]<50)
Obj[5,isim]=1      #did quasi-extinction occur at any point in the simulation

#Quelques statistiques pour la dernière génération
if(iyr==Nyrs) {
  Obj[7,isim]=GenAvg #abondance moyenne sur une génération à la fin de la simulation

  if(GenAvg>=1000 & fail==0) LG_Obj[1,isim]=LG_Obj[1,isim]+1
  if(GenAvg>=7000) LG_Obj[2,isim]=LG_Obj[2,isim]+1
  if(GenAvg>=15000) LG_Obj[3,isim]=LG_Obj[3,isim]+1
  LG_Obj[4,isim]=mean(PNI[iyr:(iyr+3),isim])
}
}

} #next iyr

#proportion d'années pendant lesquelles l'objectif a été atteint pour l'essai en cours
for(i in 1:4) Obj[i,isim]=100*Obj[i,isim]/(Nyrs-4)

#INP moyenne sur la période de simulation pour l'essai en cours (en %)
Obj[6,isim]=mean(PNI[5:Nyrs,isim],na.rm=T)
} #prochaine simulation de l'essai

#Résumer les mesures du rendement pour les essais de simulation et les transférer dans le dossier et le
#filtre
for (i in c(1,2,3,4,6,7)){

  #Valeurs moyennes de la mesure du rendement pour toutes les simulations
  ObjStats[i,2]=mean(Obj[i,1:Nsims])

  #10° et 90° centiles ou le pourcentage établi.
  ObjStats[i,c(1,3)]=as.double(quantile[Obj[i,1:Nsims],prob=c(perc[1],perc[2]),na.rm=T])
}
ObjStats[7,2]=median(Obj[7,1:Nsims]) # prendre la valeur médiane de l'abondance de la dernière génération
ObjStats[5,2]=100*sum(Obj[5,1:Nsims])/Nsims #% des essais où la quasi-disparition s'est produite

#impossible de calculer l'intervalle de crédibilité pour les stat. de disparition. Une seule valeur
possible pour tous les essais.
ObjStats[5,c(1,3)]=c(NA,NA)

```

```
#Terminer les statistiques de la dernière génération
for(i in 1:4){
  if(i<4){
    LG_ObjStats[i,2]=sum(LG_Obj[i,1:Nsims])/Nsims #Proportion de simulations qui répondaient aux
#critères
    LG_ObjStats[i,c(1,3)]=c(NA,NA)
  } else {
    LG_ObjStats[i,2]=median(LG_Obj[i,1:Nsims]) #INP médiane
    LG_ObjStats[i,c(1,3)]=as.double(quantile(LG_Obj[i,1:Nsims],prob=c(perc[1],perc[2]),na.rm=T))
  }
}

#Transférer les résultats dans le fichier
objnm=c("ObjI","ObjII","WSP_7k","WSP_15k","Ext","PNI","EndGenAvg")
write.table(file=fnout,round(ObjStats,digits=1),row.names=objnm,col.names=c("LCL","MU","UCL"))
```

ANNEXE B. GLOSSAIRE

Terme	Définition
A	
Alevin – <i>saumons du Pacifique</i>	Larve de poisson nageant librement qui effectue sa croissance dans un lac ou un cours d'eau
Alevin vésiculé – <i>saumons du Pacifique</i>	Poisson larvaire émergent (saumons du Pacifique), dépendant du sac vitellin qui est attaché à son corps
Algues	Groupe diversifié d'organismes eucaryotes photosynthétiques unicellulaires ou coloniaux contribuant à la production primaire dans les écosystèmes aquatiques
Amphipode	Invertébré crustacé, typiquement de l'ordre <i>Amphipoda</i>
Anadromie – <i>saumons du Pacifique</i>	Cycle biologique de poissons migrateurs (saumons du Pacifique) comprenant l'éclosion et la croissance de juvéniles en eau douce, suivies de la dévalaison et de la maturation en mer (océan Pacifique), puis du retour en eau douce pour la reproduction
Anoxie – <i>eau</i>	Absence d'oxygène dissous dans l'eau
Anthropique	Dont la nature est influencée par l'être humain, est liée à cette influence ou en résulte
Apport de poissons d'écloserie – <i>saumons du Pacifique</i>	Propagation de poissons d'une population donnée dans un environnement d'élevage artificiel pour compléter les stocks sauvages
Après la saison – <i>gestion des pêches</i>	Relatif à la période suivant la saison de pêche ou une pêche
Atténuation – <i>agent de stress</i>	Action de réduire la gravité, la dangerosité ou le caractère douloureux d'un agent de stress pour un habitat aquatique ou une espèce aquatique
Avant la saison – <i>gestion des pêches</i>	Se rapportant à la période précédant la saison de pêche ou une pêche
B	
Barrière – <i>dénombrement</i>	Structure de déversoir utilisée pour limiter le parcours des poissons en vue d'estimer la population
Bassin atmosphérique	Région de l'atmosphère, par rapport au paysage sous-jacent, où le mouvement de l'air et des polluants peut être entravé par des caractéristiques géographiques locales comme des montagnes, ainsi que par les conditions météorologiques (p. ex., bassin atmosphérique de la vallée du Fraser)

Terme	Définition
Bassin versant	Zone de terre qui draine tous les apports d'eau canalisés (ruisseaux, rivières) et non canalisés (écoulements de surface, écoulements souterrains) dans un plan d'eau (lac)
Biomasse	Masse totale d'organismes dans une zone ou un volume donné, agrégée au niveau de l'espèce, de la population, de la communauté ou de l'écosystème
C	
Cétacé	Mammifère marin de l'ordre <i>Cetacea</i> (baleine, dauphin, marsouin)
Changement climatique	Changement dans les profils climatiques mondiaux ou régionaux, en particulier un changement apparent du milieu à la fin du XX ^e siècle, attribué en grande partie à l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique résultant de l'utilisation de combustibles fossiles
Charge interne – lacs	Introduction d'éléments constitutifs des sédiments (éléments nutritifs, substances toxiques) dans la colonne d'eau sus-jacente, souvent dans des conditions de réduction à l'interface sédiments-eau (oxydoréduction)
Colonne d'eau – lac	Colonne verticale d'eau, de la surface aux sédiments du fond, dans un lac
Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC)	Comité consultatif indépendant relevant du ministre de l'Environnement et du Changement climatique du Canada, qui se réunit deux fois par année afin d'évaluer ou de réévaluer la situation des espèces sauvages menacées de disparition
Concurrence	Interaction entre des organismes ou des espèces lorsque les deux ont besoin d'une ressource dont la disponibilité est limitée (ressources du réseau trophique)
Crépusculaire – période	Se rapportant au crépuscule à l'aube ou à la brunante
Croissance/Habitat de croissance – saumons du Pacifique	Processus ou habitat de croissance des saumons juvéniles du Pacifique en eau douce avant leur dévalaison vers l'océan Pacifique
Cycle biologique	Série de changements subis par un organisme au cours de sa vie
D	
Décapode	Crustacé de l'ordre <i>Decapoda</i>
Décomposition microbienne aérobie	Décomposition des matières organiques par des voies aérobie, nécessitant la consommation d'oxygène dissous ambiant en tant qu'accepteur d'électrons

Terme	Définition
Décomposition microbienne anaérobie	Décomposition des matières organiques par des voies non aérobies lorsque les concentrations d'oxygène dissous limitent la décomposition aérobie, nécessitant d'autres accepteurs d'électrons que l'oxygène
Demande biologique en oxygène	Quantité d'oxygène dissous qui doit être présente dans l'eau pour que les microorganismes puissent décomposer les matières organiques, <i>synonyme</i> : demande biochimique en oxygène
Dème	Subdivision d'une population constituée d'organismes étroitement apparentés, se reproduisant principalement dans le groupe
Dépendance à la densité	Effet dans lequel l'intensité change avec la densité croissante de la population
Dévalaison – saumons du Pacifique	Action de quitter un habitat d'eau douce natal pour l'océan Pacifique
Dommages admissibles – LEP	Dommages à une espèce sauvage qui ne menaceront pas son rétablissement ou sa survie
E	
Eaux interstitielles – substrats	Vides entre les particules de sédiments ou les cailloux
Eaux souterraines	Eau retenue ou s'écoulant sous terre dans le sol ou dans les pores et les crevasses du substratum rocheux ou des dépôts sédimentaires
Effets épigénétiques	Régulation à la hausse ou à la baisse de l'expression génétique par rapport au comportement organismique ou à l'environnement
Élevage de géniteurs en captivité – saumons du Pacifique	Mise en valeur du stock de géniteurs d'écloserie où le cycle biologique complet se produit en captivité
El Niño-Oscillation australe	Variation quasi périodique des vents et des températures de la surface de la mer sur la partie tropicale de l'est de l'océan Pacifique, oscillant entre des états chauds (El Niño) et froids (La Niña), avec des influences climatiques sur les régions subtropicales et tropicales
Émergence	Abandon des eaux interstitielles dans le gravier à la suite de l'utilisation du sac vitellin (alevin vésiculé), transition vers le stade biologique de la croissance en nage libre (alevin)
En cours de saison – gestion des pêches	Relatif à la période au cours d'une saison de pêche ou d'une pêche
Endémique	Indigène et confiné à un certain endroit

Terme	Définition
Épilimnion	Couche d'eau de surface généralement plus chaude dans un lac stratifié thermiquement, recouvrant l'hypolimnion plus profond et généralement plus froid
Espèce envahissante	Espèce non indigène introduite qui se propage d'un point d'introduction à la naturalisation, avec des effets négatifs sur son nouvel environnement
Espèce en voie de disparition – statut selon la LEP	Espèce sauvage exposée à une disparition de la planète ou à une disparition du pays imminente
Espèce disparue du pays – statut selon la LEP	Espèce sauvage qui n'existe plus à l'état sauvage au Canada, mais qui est présente ailleurs à l'état sauvage
Espèce menacée – statut selon la LEP	Espèce susceptible de devenir une espèce en voie de disparition si rien n'est fait pour contrer les facteurs menaçant de la faire disparaître
Espèce préoccupante – statut selon la LEP	Espèce qui pourrait devenir une espèce menacée ou une espèce en voie de disparition en raison de l'effet cumulatif de ses caractéristiques biologiques et des menaces reconnues qui pèsent sur elle
Estuaire	Plan côtier, partiellement fermé, d'eau saumâtre recevant de l'eau douce d'un ou de plusieurs réseaux fluviaux, avec un lien hydrologique libre avec les eaux libres
État trophique – lacs	Productivité d'un écosystème lacustre, en termes de carbone organique produit par unité d'espace et de temps
Euphausiacé	Crustacé marin de l'ordre <i>Euphausiacea</i>
Eutrophisation	Enrichissement excessif en éléments nutritifs des écosystèmes aquatiques (lacs) entraînant une croissance excessive des algues et des macrophytes. <i>Synonymes</i> : eutrophisation culturelle, dystrophisation
Évaluation du potentiel de rétablissement – LEP	Processus d'évaluation, y compris l'état actuel de l'unité désignable, les menaces pour sa survie et son rétablissement, ainsi que la faisabilité du rétablissement, pour conseiller le ministre en réponse aux recommandations du COSEPAC
Exploitation – pêches	Capture de poissons dans une pêche récréative, commerciale ou autochtone
F	
Facteur limitatif – LEP	Facteur naturel biotique ou abiotique qui nuit à la productivité du saumon rouge du lac Cultus
Fécondité – saumons du Pacifique	Efficacité de la reproduction potentielle maximale physiologique d'une femelle au cours de sa vie

Terme	Définition
Floc – lac	Génération agrégative et sédimentation des particules dans la colonne d'eau
G	
Génération – saumons du Pacifique	Une seule cohorte de poissons dans une population, généralement définie annuellement pour les saumons du Pacifique
Géniteur – saumons du Pacifique	Saumons du Pacifique sexuellement mature atteignant son environnement natal
Génitrice ayant frayé – saumons du Pacifique	Estimation des génitrices, ajustée selon la proportion d'œufs qui n'ont pas été fécondés, déterminée par échantillonnage. Cette estimation reflète une cohorte de femelles ayant réussi à se reproduire parmi la remonte globale
Génomique	Relatif à l'ensemble complet des gènes d'une cellule ou d'un organisme
Groupe de montaison – saumons du Pacifique	Groupe de populations pour la gestion des pêches des saumons du Pacifique (p. ex., montaison hâtive dans la Stuart, montaison hâtive, montaison estivale, montaison tardive) défini par la période de montaison semblable des adultes de différents stocks du complexe des saumons rouges du Fraser
H	
Habitat essentiel – LEP	L'habitat nécessaire à la survie ou au rétablissement d'une espèce sauvage inscrite, qui est désigné comme tel dans un programme de rétablissement ou un plan d'action élaboré à l'égard de l'espèce
Habitat natal – saumons du Pacifique	Habitat d'eau douce (lac, rivière, ruisseau) où un organisme est né
Holomictique – lac	Lac où toute la colonne d'eau se mélange de façon saisonnière de la surface au fond
Hydroacoustique – saumons juvéniles du Pacifique	Utilisation du son dans l'eau (sonar) pour dénombrer les poissons ciblés dans une colonne d'eau
Hypolimnion – lac	Couche inférieure, généralement plus froide, de la colonne d'eau d'un lac stratifié thermiquement, située sous l'épilimnion, moins profond et généralement mélangé
Hypoxie/hypoxique – eau, poisson	Carence en oxygène dans un environnement biotique ou dans les tissus d'un poisson

Terme	Définition
I	
Imprégnation olfactive – <i>saumons du Pacifique</i>	Apprentissage pertinent sur le plan biologique pendant une période sensible (juvénile) définie par un stade de développement ou un état physiologique particulier
Incubation – <i>saumons du Pacifique</i>	Développement d'un embryon fécondé dans un œuf
Isolé sur le plan reproductif – <i>poissons</i>	Incapacité de populations sexuellement compatibles de se reproduire en raison d'obstacles comportementaux, physiologiques ou environnementaux
Isotherme – <i>lacs</i>	État d'un lac comportant une température constante de la surface aux sédiments, permettant le mélange causé par le vent, où il se produit
J	
-	-
K	
-	-
L	
Lac de croissance – <i>saumons du Pacifique</i>	Habitat de croissance en eau douce habituellement utilisé par le saumon rouge pendant sa croissance
Limnologie	Étude des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des lacs et autres plans d'eau douce
Loi sur les espèces en péril (LEP)	Législation fédérale régissant l'identification, la conservation et le rétablissement des espèces sauvages menacées de disparition au Canada
M	
Macrophyte	Plante aquatique macroscopique suffisamment grande pour être visible à l'œil nu
Maladie bactérienne du rein	Maladie chronique causée par la bactérie <i>Renibacterium salmoninarum</i> , qui infeste en grande partie les salmonidés, responsable d'une mortalité importante
Maximum de la chlorophylle profonde (MCP) – <i>lacs</i>	Région sous la surface de l'eau, généralement avec la concentration maximale de chlorophylle associée à la profondeur. <i>Synonyme</i> : maximum de la chlorophylle souterraine
Mélange – <i>lac</i>	Circulation de la colonne d'eau dans un lac, faisant généralement référence au renversement saisonnier pendant la période où le lac n'est pas stratifié thermiquement

Terme	Définition
Menace – LEP	Activité ou processus humain qui a causé, cause ou peut causer des dommages à une espèce sauvage en péril, sa mort ou des modifications de son comportement, ou la destruction, la détérioration ou la perturbation de son habitat jusqu'au point où des effets sur la population se produisent; une activité humaine peut exacerber un processus naturel
Métalimnion – lac	Couche de la colonne d'eau qui se trouve sous l'épilimnion et au-dessus de l'hypolimnion, où la température diminue rapidement avec l'augmentation de la profondeur. <i>Synonyme</i> : thermocline
Mise en valeur du stock de géniteurs – saumons du Pacifique	Augmentation des populations de saumons sauvages ou d'écloserie en recourant à l'aquaculture en écloserie pour produire des juvéniles qui seront lâchés dans l'environnement
Modèle BATHTUB	Modèle de qualité de l'eau à l'état stable de l'Army Corps of Engineers des États-Unis pour les lacs et les réservoirs, conçu pour évaluer et prévoir l'eutrophisation
Monomictique – lac	Lac où toute la colonne d'eau se mélange (c.-à-d. holomictique)
Morphométrie – lac	Forme bathymétrique unique d'un lac
Mortalité	État d'un organisme lorsqu'il est exposé à la mort
Mortalité anticompensatoire – saumons du Pacifique	Mortalité dans une population dont le taux augmente à mesure que l'effectif de la population diminue
MPO	Pêches et Océans Canada (anciennement ministère des Pêches et des Océans)
Myriophylle en épi	Plante aquatique envahissante et vivace qui s'est établie en Colombie-Britannique dans les années 1970 et qui forme des peuplements submergés denses. <i>Synonyme</i> : <i>Myriophyllum spicatum</i>
N	
Nid de salmonidés – saumons du Pacifique	Nid construit pour recevoir et incuber des œufs après la fécondation
Niveau trophique	Chacun des différents niveaux hiérarchiques dans un écosystème, comprenant des organismes qui partagent la même fonction dans une chaîne ou un réseau alimentaire et la même relation nutritionnelle avec les sources primaires d'énergie (p. ex., producteurs primaires, consommateurs primaires, consommateurs secondaires)

Terme	Définition
O	
Œuf – <i>saumons du Pacifique</i>	Produit reproductif des femelles. Les œufs sont pondus, puis fécondés par la laitance d'un mâle
Oscillation décennale du Pacifique	Régime solide et récurrent de variabilité du climat océan-atmosphère centré sur le bassin du Pacifique aux latitudes moyennes, avec des influences climatiques synoptiques sur les écosystèmes marins et continentaux régionaux
Oxique – <i>eau</i>	Quantité suffisante d'oxygène dissous dans un environnement biotique ou dans les tissus d'un poisson
Oxydoréduction – <i>eau, lacs</i>	Réaction chimique dans laquelle les états d'oxydation des atomes sont modifiés par oxydation (perte d'électrons augmentant l'état d'oxydation) ou réduction (gain d'électrons diminuant l'état d'oxydation)
Oxygène dissous (OD)	Concentration ou pourcentage de saturation des molécules d'oxygène dissoutes dans l'eau
P	
Paléolimnologie	Étude des lacs et des sédiments des lacs pour reconstituer les changements limnologiques, climatiques et environnementaux passés
<i>Parvicapsula minibicornis</i>	Myxozoaire parasite courant chez le saumon rouge adulte du lac Cultus
Périphyton	Algues, cyanobactéries et bactéries attachées à des surfaces submergées dans les écosystèmes aquatiques
Phénologie	Relatif au moment des phénomènes naturels saisonniers ou cycliques qui ont une influence écologique (développement du réseau trophique)
Photosynthèse	Processus utilisé par les plantes et d'autres organismes autotrophes pour convertir l'énergie lumineuse en énergie chimique qui peut être libérée pour soutenir les fonctions physiologiques
Phytoplancton	Composantes autotrophes de la communauté planctonique (p. ex., algues, cyanobactéries) dans un écosystème d'eau douce (p. ex., lac)
Piscivore	Animal carnivore qui se nourrit principalement de poissons
Plan de gestion intégrée des pêches (PGIP) – <i>saumons du Pacifique</i>	Outil de gestion des pêches comportant l'évaluation des stocks, la consultation de l'industrie et des parties intéressées, et l'établissement des priorités et des orientations visant à promouvoir des pêches durables

Terme	Définition
Point de référence – saumons du Pacifique	Point de référence biologique pour une population de saumon du Pacifique, par rapport auquel on peut mesurer les attributs d'un stock (l'abondance, la survie, l'exploitation) afin de déterminer son statut
Politique concernant le saumon sauvage (PSS)	Politique fédérale guidant la conservation des saumons sauvages du Pacifique au Canada par rapport aux valeurs sociétales. <i>Synonyme</i> : Politique du Canada pour la conservation du saumon sauvage du Pacifique
Population	Tous les organismes d'un même groupe ou d'une même espèce qui vivent dans une zone géographique donnée et qui sont capables de se reproduire entre eux
Prédation/Prédateur/Proie	Interaction biologique où un organisme (prédateur) tue et mange un autre organisme (proie)
Production/Productivité – écosystème aquatique	Création de matière organique nouvelle (biomasse), habituellement exprimée sous la forme d'un taux
Production/Productivité – poissons et pêches	Relation entre la quantité de poisson produite et la quantité d'intrants utilisés pour récolter les poissons
Prolifération printanière – lacs	Forte augmentation de l'abondance du phytoplancton qui se produit habituellement au début du printemps et dure jusqu'à la fin du printemps et au début de l'été
Q	
-	-
R	
Récolte en tant que prise accessoire – pêches	Conservation létale non ciblée de saumons rouges du lac Cultus
Recrutement – dynamique de la population, saumons du Pacifique	Processus par lequel de nouveaux individus sont ajoutés à une population par la naissance, la maturation ou l'immigration
Relevé hydroacoustique et au chalut – lacs de croissance des saumons du Pacifique	Relevé mené dans un lac de croissance de saumons du Pacifique à l'aide d'un sonar hydroacoustique orienté vers le bas pour estimer et dénombrer les poissons ciblés, couplé à l'abaissement d'un chalut pélagique pour la répartition des poissons ciblés entre les espèces
Renversement – lacs	Phénomène par lequel tout le volume d'eau d'un lac est mélangé par le vent lorsque le gradient vertical de température-densité de la colonne d'eau est minimal (isotherme)

Terme	Définition
Reproduction – <i>poissons</i>	Processus biologique par lequel de nouveaux organismes individuels (p. ex., progéniture) sont produits par l'échange sexuel de gamètes
Réseau trophique – <i>aquatique</i>	Réseau de chaînes alimentaires interreliées et interdépendantes dans un écosystème
Résidence – <i>LEP</i>	Gîte -- terrier, nid ou autre aire ou lieu semblable -- occupé ou habituellement occupé par un ou plusieurs individus pendant tout ou partie de leur vie, notamment pendant la reproduction, l'élevage, les haltes migratoires, l'hivernage, l'alimentation ou l'hibernation
Rétablissement – <i>LEP</i>	Retour à un état dans lequel les caractéristiques liées à la population et à la répartition ainsi que le risque de disparition se situent tous à l'intérieur de la plage de variabilité normale pour l'espèce sauvage
S	
Salmonicola spp.	Copépodes parasites surtout d'eau douce, du genre <i>Salmonicola</i> , qui se nourrissent du sang et des cellules épithéliales des salmonidés, infestant habituellement les filaments branchiaux, les opercules, les tissus de la cavité buccale et les nageoires, et capables de causer un stress subléta à léta
Saumon rouge	Espèce anadrome et sémelpare de la guilde des saumons du Pacifique (<i>Oncorhynchus</i> spp.) dont les juvéniles effectuent généralement leur croissance dans un lac. <i>Synonyme</i> : <i>Oncorhynchus nerka</i>
Sélection par domestication – <i>saumons du Pacifique</i>	Sélection génétique artificielle parmi des organismes ou des populations (p. ex., saumons du Pacifique) découlant de la propagation dans les écloséries
Sémelparité – <i>saumons du Pacifique</i>	Stratégie de reproduction caractérisée par un seul épisode de reproduction avant la mort
Sénescence – <i>lac, saisonnière</i>	Diminutions de la production aquatique et de la biomasse organismique à la fin de la saison de croissance associées à l'arrivée de l'automne et de l'hiver
Smolt – <i>saumons du Pacifique</i>	Saumon juvénile suivant le stade du tacon, ayant subi des préparations physiologiques en vue de la dévalaison vers l'océan Pacifique
Smolts/géniteur – <i>saumons du Pacifique</i>	Nombre moyen de smolts en dévalaison produits par génitrice ayant frayé
Stabilité de Schmidt – <i>lac</i>	Résistance au mélange mécanique de la colonne d'eau d'un lac à stratification thermique résultant d'une différence de densité induite thermiquement, et représentée par l'indice de stabilité de Schmidt (J/m^2)

Terme	Définition
Stock de géniteurs – <i>saumons du Pacifique</i>	En aquaculture, les stocks de géniteurs sont constitués d'individus matures qui servent à la reproduction
Stratification – <i>lacs</i>	<i>Synonymes</i> : stratification thermique, stratification de la densité
Substrat – <i>lacs</i>	Relatif aux environnements de fond sous-jacents à la colonne d'eau d'un lac (sédiments, fonds littoraux)
Survie – <i>LEP</i>	Atteinte d'un état de stabilité (ou de croissance) dans lequel l'espèce existe à l'état sauvage au Canada et n'est pas exposée à une disparition imminente du pays ou de la planète par suite de l'activité humaine
Survie smolt-recrue – <i>saumon rouge du lac Cultus</i>	Survie à partir de la barrière de dénombrement jusqu'au recrutement, définie comme la somme du nombre de poissons matures qui atteignent le lac et de ceux qui sont capturés dans les pêches
Survie smolt-géniteur – <i>saumon rouge du lac Cultus</i>	Survie des poissons entre leur départ du lac (smolts à la barrière de dénombrement) et leur arrivée à la barrière de dénombrement (lac) en tant qu'adultes
T	
Taxonomie	Classification biologique des organismes et leur identification
Taux de mortalité	Nombre de décès dans une population au cours d'une période donnée
Taux d'exploitation (TE) – <i>pêches</i>	Proportion du nombre d'individus ou de la biomasse prélevée par la pêche au cours d'une période définie
Thermocline	Couche de la colonne d'eau qui se trouve sous l'épilimnion et au-dessus de l'hypolimnion, où la température diminue rapidement avec l'augmentation de la profondeur. <i>Synonyme</i> : métalimnion
Trophique	Relatif à l'alimentation et à la nutrition
U	
Unité de conservation (UC) – <i>saumons du Pacifique</i>	Groupe de saumons sauvages suffisamment isolé des autres groupes qui, s'il disparaissait, aurait peu de chances de se rétablir de manière naturelle dans une limite de temps acceptable, à savoir une vie humaine ou un nombre donné de générations
Unité désignable (UD)	Espèce sauvage, indigène au Canada, sauvage par nature, pouvant inclure des individus élevés en captivité ayant des ancêtres sauvages récents

Terme	Définition
V	
Valeur adaptative – <i>saumons du Pacifique</i>	Succès de la reproduction d'un génotype, habituellement mesuré par le nombre des descendants produits par un individu qui survivent jusqu'à l'âge de la reproduction
Variabilité climatique	Variations de l'état moyen et d'autres caractéristiques du climat à des échelles spatiales et temporelles au-delà des événements météorologiques individuels
Véhicule sous-marin téléguidé (VTG)	Dispositif mobile sous-marin câblé capable d'acquérir des images ou d'effectuer d'autres tâches en profondeur dans les réseaux aquatiques
Virus de la nécrose hématopoïétique infectieuse	Agent causal de la nécrose hématopoïétique infectieuse, une pathologie chez les salmonidés qui peut entraîner la mortalité
W	
-	-
X	
-	-
Y	
-	-
Z	
Zone benthique – <i>lacs</i>	Fond des lacs et d'autres habitats aquatiques, y compris la surface du substrat et certaines couches souterraines
Zone euphotique	Couche d'eau supérieure d'un lac, biologiquement productive, qui reçoit la lumière du soleil, ce qui permet la photosynthèse. <i>Synonymes</i> : zone photique, zone trophogène
Zone hyporhéique – <i>eaux souterraines</i>	Région sédimentaire d'un espace poreux sous ou le long d'un plan d'eau où se produit un échange entre les eaux souterraines et les eaux de surface
Zone littorale – <i>lac</i>	Zone littorale d'un lac, définie du rivage à la profondeur à laquelle 1 % de la lumière incidente est atténué
Zone pélagique – <i>lac</i>	Zone d'eaux libres d'un écosystème lacustre
Zone profonde – <i>lac</i>	Zone la plus profonde, sans végétation, d'une zone benthique lacustre avec des substrats caractérisés par des limons et des boues
Zooplancton – <i>lacs</i>	Plancton vagile (necton), composé de petits animaux et de stades immatures d'animaux plus gros